

# پلتفرم اختصاصی مهندسی کنترل



<https://controlengineers.ir>



<https://t.me/controlengineers>



<https://www.instagram.com/controlengineers.ir>

## اندازه‌گیری سطح مخازن ذخیره‌سازی با استفاده از امواج رادار

سحاب علی نجفی<sup>۱</sup> ■ مدیریت نظارت بر تولید نفت و گاز

### مقدمه

اندازه‌گیری دقیق و مداوم ارتفاع و حجم سیالات (مایعات و یا گازهایی که تحت فشار به صورت مایع درآمده‌اند) موجود در مخازن ذخیره‌سازی، مخازن صادراتی واقع در پایانه‌های صادرات مواد نفتی، کشتی‌ها و تانکرهایی که مواد نفتی حمل می‌کنند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

اصولاً اندازه‌گیری سطح سیال درون مخازن، به دلایل ذیل صورت می‌پذیرد:

- ۱- انتقال حفاظت شده<sup>۲</sup> محموله‌ها در پایانه‌های صادراتی در زمان تخلیه و بارگیری.
- ۲- کنترل موجودی<sup>۳</sup> به منظور جمع‌آوری اطلاعات مخازن ذخیره‌سازی و مدیریت ذخایر.

و به کارگیری این اطلاعات بر روی کامپیوتر و یا سامانه کنترل محلی نیز برخوردارند. معروف‌ترین شرکت‌هایی که در زمینه سامانه‌های کنترل مخازن فعالیت می‌کنند و محصولات آنها در کشور ما نیز نصب و راه‌اندازی شده‌اند عبارتند از: Fisher Rosemount، Enraf، Endress + Hauser.

### ۱- امواج رادار

واژه رادار، در حقیقت مخفف Radar Detection And Ranging می‌باشد که از سال ۱۹۳۰ در بخش هوایی صنایع نظامی مورد استفاده بوده و در حال حاضر استفاده از آن بسیار فراگیرتر شده است. سامانه‌های ناوبری کشتی و هواپیما، سامانه‌های هواشناسی، وسایل خانگی (مایکروفرها) و... از تکنولوژی رادار که در حقیقت امواج تقویت شده الکترومغناطیسی است، استفاده می‌کنند. حدود ۵۰ سال است که حس‌گرهای راداری جهت اندازه‌گیری ارتفاع سیال درون مخازن به کار می‌روند. امواجی که برای اندازه‌گیری سطح، در حسگرهای راداری استفاده می‌شوند در محدوده فرکانسی ۳ تا ۳۰ گیگا هرتز که برای سلامت انسان بی‌خطر است قرار می‌گیرند.

همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، امواج خطرناک الکترومغناطیسی مانند: «اشعه

در مخازنی که اندازه‌گیری سطح سیال، به منظور انتقال حفاظت شده انجام می‌شود، معمولاً علاوه بر سطح مایع درون مخزن، حجم اشغال شده توسط مایع و جرم آن نیز اندازه‌گیری می‌شود. در مخازن حاوی مواد نفتی، بعضاً مقداری آب همراه سیال وجود دارد که اطلاع از میزان آن نیز ضروری می‌باشد. عموماً تجهیزات اندازه‌گیری در مخازن ذخیره‌سازی به همراه نرم افزارهای مربوطه، به صورت یک مجموعه<sup>۴</sup> ارائه می‌شود و توانایی جمع‌آوری و ارسال اطلاعات مخازن موجود در سایت را به اتاق کنترل و اندازه‌گیری آنها به کمک شبکه‌ای از حسگرهای<sup>۵</sup> مختلف (دما، سطح، فشار و چگالی) را دارا بوده و از قابلیت نمایش



شکل ۱ | مجتمع مخازن ذخیره‌سازی

از آن، کشتی‌های حامل نفت خام مجهز به سطح‌سنج‌های شناور مکانیکی بودند. این تجهیزات تنها در مواقعی که کشتی‌ها در ساحل پهلو می‌گرفتند و یا در حال تخلیه و بارگیری بودند مورد استفاده واقع می‌گشتند. دستورالعمل‌های جدید ایمنی در خصوص شستشوی تانک‌های سرپوشیده و نیز ضرورت انباشت تانک‌های خالی با گازهای بی اثر، موجب گردید سایر روش‌های سنجش، نظیر: استفاده از سطح‌سنج‌های راداری به مرور زمان ترجیح داده شود.

سطح‌سنج‌های راداری در حقیقت تجهیزاتی هستند که با ارسال امواج رادار، فضای خالی بالای مخزن<sup>۱</sup> را اندازه‌گیری می‌کنند. با کسر ارتفاع خالی مخزن، از مقدار ارتفاع واقعی آن که به عنوان «مقدار اولیه» به حسگر داده شده است، «ارتفاع مایع» محاسبه می‌شود. در حقیقت امواج رادار از طریق آنتن، منتشر و پس از برخورد با سطح سیال مجدداً به سمت آنتن بازتاب می‌گردد. با توجه به رابطه معکوس میان فرکانس و طول موج، هر چه فرکانس امواج ارسالی از آنتن بالاتر باشد، طول موج امواج کوتاه‌تر خواهد بود و موجب کاهش طول آنتن

اندازه‌گیری سطح، با دقت بالاتری صورت می‌پذیرد. هوا، بخارات و کف‌های موجود روی سطح سیال درون مخزن، دارای ثابت گذردهی کوچکتر از ۱/۸ بوده و در نتیجه امواج راداری به راحتی از آنها عبور می‌کنند و بازتاب نمی‌شوند. این مواد در فضای خالی بالای مخزن همواره وجود دارند اما کمترین تاثیر را بر اندازه‌گیری سطح سیال خواهند داشت. ثابت گذردهی با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌گردد:

$$\epsilon_r = 1 + (\epsilon_{N-1}) \times \frac{\theta_N \times P}{\theta \times P_N} \quad (1)$$

$\epsilon_r$  = ثابت گذردهی  
 $\epsilon_{N-1}$  = ثابت گذردهی گاز/بخار در شرایط نرمال  
 $\theta_N$  = دما در شرایط نرمال (۲۷۳ درجه کلوین)  
 $P$  = فشار مطلق بر حسب بار  
 $\theta$  = دما بر حسب کلوین  
 $P_N$  = فشار مطلق در شرایط نرمال (۱ بار)

## ۲- «سطح‌سنج» های راداری<sup>۲</sup>

سطح‌سنج‌های راداری در اوائل دهه شصت میلادی و به منظور سنجش میزان نقل و انتقالات نفت خام توسعه یافته‌اند. پیش

ایکس و «گاما» از نظر فرکانس، در محدوده بالاتری نسبت به «امواج رادار» قرار دارند. امواج راداری در محدوده امواج تلویزیونی، رادیویی و امواج موبایل جای می‌گیرد. موضوع دیگر در خصوص امواج الکترومغناطیسی، انرژی لازم جهت ارسال امواج با یک فرکانس مشخص می‌باشد که در این مقوله نیز امواج رادار در محدوده ایمنی قرار می‌گیرند.

یکی از ویژگی‌های مهم امواج رادار این است که در برخورد با سطح جسم، بازتاب می‌شوند. میزان این بازتاب با «ثابت گذردهی» اجسام مرتبط است. هر ماده‌ای که دارای ثابت گذردهی بزرگتر از ۱/۸ باشد این امواج را از خود عبور نمی‌دهند. خلا دارای ثابت گذردهی یک (۱) است. این بدین معنی است که امواج الکترومغناطیسی، از خلا عبور می‌کنند و بازتاب نمی‌شوند. موادی مانند آب، نفت خام و محلول آمونیاک، دارای ثابت گذردهی بزرگتر از ۱/۸ می‌باشند و به راحتی این امواج را برگشت می‌دهند. مقادیر ثابت گذردهی (ε) برای برخی سیالات مطابق با جدول زیر می‌باشد:

هر چه ثابت گذردهی سیال بزرگتر باشد، امواج بیشتری از سطح آن بازتاب می‌شوند و



شکل ۳ | سطح‌سنج راداری جهت کاربرد در فشارهای بالا

AM radio	Short wave radio	Television FM radio	Microwaves radar	Millimeter waves telemetry	Infrared	Visible light	Ultraviolet	X-rays Gamma rays
5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	10	10	10	10	10	10	10	10
Low frequency Long wavelength Low quantum energy						High frequency Short wavelength High quantum energy		

شکل ۲ | محدوده فرکانسی طیفهای الکترومغناطیسی

جدول ۱   مقادیر ثابت گذردهی برخی از مواد شیمیایی	شکل ۱
نفت، مواد شیمیایی، بنزین و سایر هیدروکربن‌ها	$1/9 < \epsilon_r < 4$
مخلوط آب و نفت، استون، حلال‌های آلی، اسیدهای غلیظ و الکل‌ها	$4 < \epsilon_r < 10$
مایعات هادی (اسیدها و بازهای رقیق، محلولهای آبی)	$\epsilon_r > 10$

۵. نصب آسان و اتصالات مکانیکی استاندارد. «سطح سنج‌های راداری» عموماً از طریق دو مکانیسم، امواج رادار را به سطح سیال ارسال و محاسبات مربوط به تعیین سطح مایع و حجم مایع درون مخزن را انجام می‌دهند: ۱- ارسال امواج ضربه‌ای<sup>۱۳</sup> ۲- ارسال امواج پیوسته با فرکانس متغیر<sup>۱۴</sup>.

### ۲-۱- امواج ضربه‌ای

استفاده از امواج ضربه‌ای از زمان کاربرد فناوری رادار همواره مرسوم بوده است. در این حالت امواج رادار به صورت پالس‌های کوتاه با دوره‌های تناوب میلی‌ثانیه<sup>(۱۰<sup>-۳</sup>)</sup> و یا نانو ثانیه<sup>(۱۰<sup>-۹</sup>)</sup> (ثانیه) ارسال می‌گردد. در حقیقت هر پالس، شامل تعدادی موج الکترومغناطیسی بوده که تعداد آن بستگی به فرکانس و زمان تناوب امواج خواهد داشت؛ پالس‌ها در فواصل زمانی معین پشت سر هم ارسال می‌گردند. اساس کار در این روش، محاسبه زمان پیمایش امواج رادار در مسیر رفت و برگشت می‌باشد. امواج پس از برخورد با سطح مورد نظر، بازتاب می‌شوند. سطح مایع متناسب با زمان رفت و برگشت امواج می‌باشد. چنانچه فاصله تا مقصد R باشد و سرعت نور C فرض گردد، زمان سپری شده از معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta t = \frac{2 \times R}{C} \quad (2)$$

«فرستنده»<sup>۱۵</sup> با اندازه‌گیری مدت زمان سپری شده در رفت و برگشت امواج، ارتفاع مایع درون مخزن را اندازه‌گیری می‌کند. به دلیل آنکه امواج

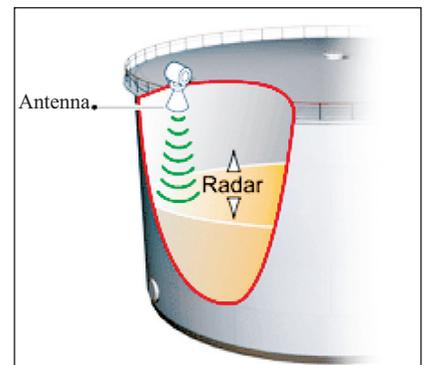
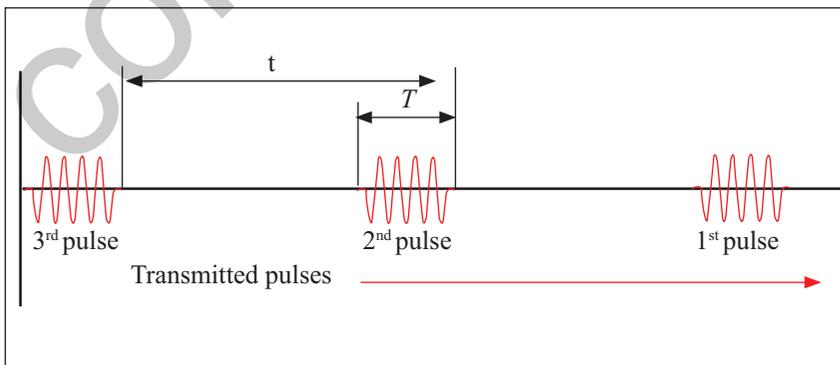
مانند سیمان و سیلوهای گندم مناسبند. اندازه‌گیری ارتفاع تا ۷۰ متر با دقت بسیار بالا و نیز قابلیت کارکرد تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۶۰ بار از جمله ویژگی‌های سطح سنج‌های راداری می‌باشد. «سطح سنج‌های راداری» هیچ‌گونه قطعه متحرک مکانیکی که در حین کار گیر کرده و باعث توقف اندازه‌گیری شود و یا قطعه‌ای که نیاز به سرکشی و تعمیرات مداوم داشته باشد، ندارند؛ لذا نیاز به تعمیرات اندک، مزیت دیگری است که در این گونه سطح سنج‌ها وجود دارد. «سطح سنج‌های راداری» بدون آنکه تماسی با مواد درون مخزن برقرار کنند (تنها آنتن با بخارات درون مخزن در تماس است)، ارتفاع مایع درون آن را اندازه‌گیری می‌کنند. این ویژگی از خوردگی قطعات حسگر جلوگیری می‌کند که مزیت دیگر سطح سنج‌های راداری است و استفاده از آنها را در مکان‌هایی که خوردگی سیال بالاست با کمترین هزینه، ممکن می‌سازد. از دیگر مزایای این دسته از سطح سنج‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. دقت بالا تا ۰/۵ میلی‌متر
۲. قابلیت کارکرد به تنهایی جهت اندازه‌گیری ارتفاع سیال و یا همراه با سایر تجهیزات جهت تانک گیجینگ (Tank gauging)
۳. قابلیت انتخاب نشانگر بر روی دستگاه جهت تسهیل تنظیم و کالیبراسیون در محل
۴. قابلیت تنظیم ارتفاع قابل اندازه‌گیری، بر اساس تغییر سایز آنتن

خواهد شد. بنابراین استفاده از سطح سنج‌هایی که با فرکانس بالا کار می‌کنند به سبب کوتاه بودن طول آنتن، نسبت به حسگرهای فرکانس پایین آسان‌تر خواهد بود.

آنتن معمولاً از جنس فولاد ضد زنگ ساخته می‌شود. آنتن از پخش امواج درون مخزن جلوگیری کرده و موجب می‌شود امواجی که پس از برخورد با سطح مایع و نه قطعات مونتاژ شده داخل آن، بازگشت می‌شوند، در محاسبه مایع به کار روند. هر چه قطر آنتن کوچک‌تر باشد، امواج در عرض کوچک‌تری درون مخزن منتشر خواهند شد و از برخورد با تجهیزات دیگری که درون مخزن نصب شده اند (هم زنها، گرم کن‌ها و...) جلوگیری می‌شود. بسته به شرایط مخزن و مواد داخل آن، آنتن‌های مختلفی طراحی و ساخته شده‌اند که هر یک کاربرد خاصی دارند. مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- ۱- «آنتن‌های مخروطی» یا «شیپوری»<sup>۹</sup> که جهت اندازه‌گیری سطح مایعات مانند نفت و مشتقات نفتی به جز قیر و آسفالت کاربرد دارد.
- ۲- «آنتن‌های میله‌ای»<sup>۱۰</sup> که در مخازن کوچک و یا مخازنی که نازل ورودی آنتن، کوچک انتخاب شده باشد مناسب است.
- ۳- «آنتن‌های تخت»<sup>۱۱</sup> که برای سیالات خورنده و مخازنی که سطح متلاطم دارند مناسب می‌باشد.
- ۴- «آنتن‌های سهمی وار»<sup>۱۲</sup> که جهت اندازه‌گیری سطح مایعات و مواد جامد



شکل ۵ | امواج ارسالی به صورت ضربه‌ای

شکل ۴ | سیستم سطح سنج رادار در مخزن ذخیره‌سازی

با فاصله پیموده شده (که همان فضای خالی بالای مخزن است) می باشد. فرستنده به جای اندازه گیری مدت زمان رفت و برگشت، اختلاف فرکانس ایجاد شده را اندازه گیری می کند. با سنجش این اختلاف فرکانس، مدت زمان طی شده محاسبه و ارتفاع سیال درون مخزن تعیین می گردد. اندازه گیری اختلاف فرکانس امواج برگشتی با امواج ارسالی، بسیار دقیق تر می باشد، لذا دقت این روش از روش قبل بیشتر خواهد بود.

### نتیجه گیری

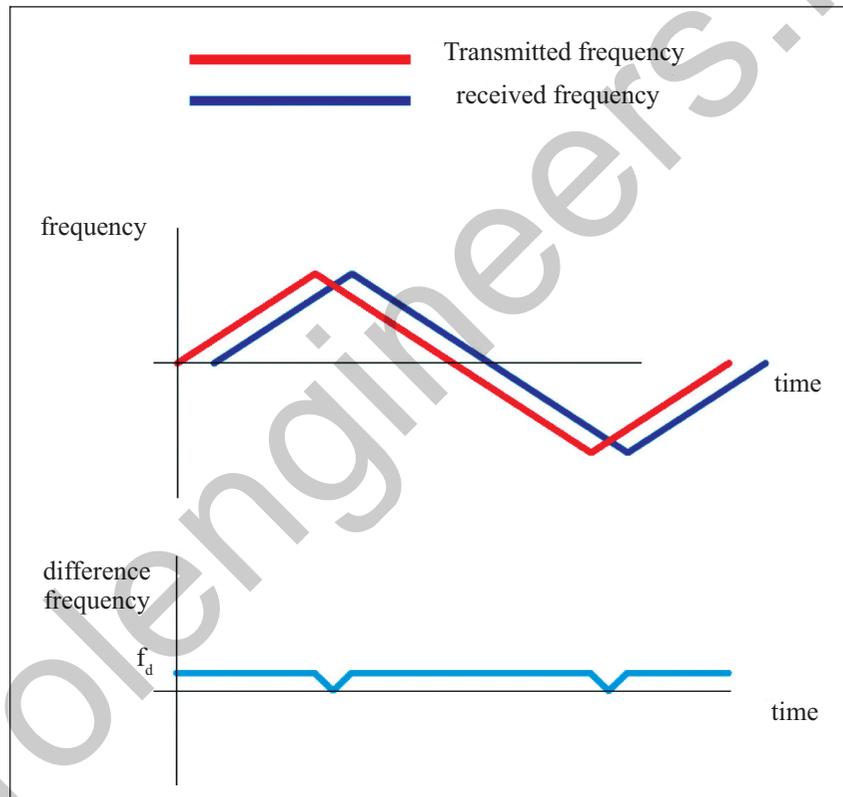
انتقال مواد میان واحدهای صنعتی و در پایانه های صادراتی مواد نفتی، یکی از فرآیندهای مهم صنعتی و تجاری است که آگاهی از مقدار دقیق ماده جابه جا شونده با توجه به ارزش بالای آن هم برای خریدار و هم برای فروشنده بسیار حائز اهمیت است. این فرآیند در پایانه های صادراتی، کشتی های حامل مواد نفتی و نیز در مخازن ورودی و خروجی مجتمع های بزرگ بسیار اتفاق می افتد. یک روش معمول جهت سنجش مقدار ماده انتقال یافته، اندازه گیری ارتفاع، حجم و جرم سیال درون مخزن قبل و بعد از انتقال می باشد. تجهیزاتی که جهت اندازه گیری ارتفاع و یا جرم سیال درون مخازن، مورد استفاده قرار می گیرند، مستلزم دقت بالا و خطای کم خواهند بود. برای این منظور از تجهیزات سطح سنجی متفاوتی استفاده می گردد، نمونه ای از آنها «سطح سنج های راداری» بوده که در انتقال حفاظت شده سیالات کاربرد دارند.

حسگرهایی خواهد شد که از این روش جهت محاسبه ارتفاع سیال استفاده می کنند.

### ۲-۲- امواج پیوسته با فرکانس متغیر

در این حالت، امواج رادار به صورت پیوسته ارسال می گردند. فرکانس امواج، پس از برخورد با سطح سیال، تغییر کرده و این تغییر، متناسب

الکترومغناطیسی با سرعت نور حرکت می کنند، زمان اندازه گیری شده در مخازن ذخیره ای که ارتفاع کمی دارند (همانند مخازن ذخیره سازی نفت خام) بسیار کوچک بوده و در حدود چند پیکو ثانیه ( $10^{-12}$  ثانیه) خواهد بود. اندازه گیری دقیق این زمان کوچک، بسیار مشکل است. این مسئله موجب کاهش دقت اندازه گیری



شکل ۶ | امواج پیوسته با فرکانس تغییر یافته از نوع مثلثی که در فرستنده های راداری استفاده می شود.

### پانویس ها

<sup>1</sup>sahab.alinajafi@yahoo.com

<sup>6</sup>permittivity

<sup>12</sup>Parabolic antenna

<sup>2</sup>Custody transfer

<sup>7</sup>radar level gauges

<sup>13</sup>pulse waves

<sup>3</sup>Inventory control

<sup>8</sup>ullage

<sup>14</sup>frequency modulated continuous wave

<sup>4</sup>package

<sup>9</sup>cone or horn antenna

<sup>15</sup>transmitter

<sup>5</sup>sensor

<sup>10</sup>Rod antenna

<sup>11</sup>Planner antenna

### منابع

[1] Devine .P, "Radar level measurement-the user's guide", 2000.

[3] The art of Tank Gauging, from Enraf.

[2] Sepehrinia .M, "Tank Gauging Techniques", April 2009.

[4] Tank Gauging & Inventory Management Solutions from www.varec.com.