مجله تحقیق در عملیات و کاربردهای آن، سال نهم، شماره دوم (پیاپی ۳۳)، تابستان ۹۱، ص ص ۵۶-۳۹
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

طراحی بهینه پروب آزمون جریان گردابی با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC) و تحلیل اجزای محدود (FEA)

حمید رضا پارسا*[۱]، سید اصغر غلامیان[۲]، مجید عباسی[۳]، عبدالرضا شیخ الاسلامی[۴]، سپیده ولی اللهی[۵]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳- استادیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۴- دانشیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۵- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

رسید مقاله: ۲۱ آذر ۱۳۹۰

پذیرش مقاله: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۱

چکیده

آزمون جریان‌گردابی (ECT) یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب (NDT) می‌باشد. این آزمون برای بازرسی لوله‌های مبدل حرارت و شناسایی انواع عیوب احتمالی در این لوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از این مقاله، تعیین پارامترهای بهینه پروب آزمون جریان گردابی به منظور بالابردن حساسیت و عملکرد سامانه بازرسی می‌باشد. در این مقاله ابتدا معادلات مربوط به طراحی و مشخصه‌های پروب به منظور بازرسی لوله‌های نمونه بیان می‌شوند. سپس طراحی بهینه با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC) به منظور رسیدن به بالاترین نسبت سیگنال به نویز (SNR) و حساسیت (S) ارایه می‌گردد. در نهایت نتایج حاصل از بهینه‌سازی جهت تایید آزمون توسط تحلیل اجزای محدود (FEA) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از آن ارایه خواهد شد.

کلمات کلیدی: آزمون جریان گردابی، لوله‌های مبدل حرارت، الگوریتم بهینه‌سازی ABC، تحلیل اجزای محدود (FEA).

۱ مقدمه

آزمون‌های غیرمخرب که دارای کاربرد و انواع مختلفی در صنعت می‌باشند، تجهیزات و قطعات را بدون این‌که تخریب یا به آن‌ها آسیب وارد کنند، مورد بازرسی قرار می‌دهند. آزمون جریان‌گردابی یکی از روش‌های آزمون غیرمخرب است که ماهیت اندازه‌گیری و ارزیابی داشته و از اصول الکترومغناطیس برای بازرسی مواد رسانا استفاده می‌کند. در آزمون جریان گردابی، سیم‌پیچ پروب با جریان متناوب تحریک می‌شود. از آن‌جایی

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: hr.parsa@ymail.com

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

که سیم‌پیچ حامل جریان متناوب است، یک میدان مغناطیسی متناوب نیز در درون و اطراف سیم‌پیچ طبق قانون آمپر تشکیل می‌گردد. هنگامی که پروب از داخل لوله رسانا حرکت می‌کند میدان مغناطیسی متغیر با زمان، باعث ایجاد نیروی محرکه القایی در ماده رسانا خواهد شد. وجود نیروی محرکه القایی باعث جاری‌شدن جریان‌های گردابی در دیواره لوله می‌شود. این جریان‌های گردابی یک میدان مغناطیسی القایی (ثانویه) تولید می‌کنند که این میدان طبق قانون لنز با میدان مغناطیسی سیم‌پیچ (اولیه) مخالفت می‌کند. هنگامی که پروب از هوا وارد لوله می‌شود، به علت جاری شدن جریان گردابی در لوله امپدانس سیم‌پیچ تغییر می‌کند. وجود یک عیب (ناپیوستگی) در لوله، باعث تغییر در جریان گردابی، دامنه و فاز میدان مغناطیسی ثانویه می‌شود و در نتیجه با تغییر میدان مغناطیسی، امپدانس سیم‌پیچ نیز تغییر می‌کند. با مشاهده تغییر در امپدانس سیم‌پیچ در حین حرکت پروب در داخل لوله، می‌توان عیوب احتمالی موجود در لوله را شناسایی کرد[۱].

طراحی بهینه پروب با هدف افزایش عملکرد آن در بازرسی لوله‌های مبدل حرارت از اهمیت زیادی برخوردار است. در این مقاله دو تابع سیگنال به نویز (SNR) و حساسیت (S) با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی(ABC) به صورت ترکیبی بهینه می‌شوند. پس از توصیف آزمون جریان گردابی در بخش اول، معادلات مربوط به پروب آزمون جریان‌گردابی در بخش دوم ارایه می‌گردد. در بخش سوم، مفاهیم الگوریتم بهینه‌سازی ABC تشریح می‌شود و بخش چهارم نتایج بهینه‌سازی را ارایه می‌دهد. تحلیل اجزای محدود در بخش پنجم ارایه شده و نهایتاً مقاله در بخش ششم با بیان نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.

۲ معادلات طراحی

یکی از کاربردهای آزمون جریان گردابی بازرسی لوله‌های مبدل حرارت می‌باشد که در نیروگاه‌ها و پالایشگاه‌ها به کار می‌روند. این لوله‌ها رسانا و غیرفرومغناطیس و جنس آن‌ها معمولاً مس (Copper) یا فولاد زنگ‌نزن (Stainless Steel) می‌باشد. پروب این آزمون از یک هسته فرومغناطیس، یک یا دو سیم‌پیچ و... تشکیل می‌شود. پارامترهای اصلی پروب در جدول ۱ ارایه شده است. در این جدول مقادیر پارامترهای ثابت مانند مقاومت ویژه سیم مسی (سیم‌پیچ)، قطر سیم، دامنه جریان ورودی و... ذکر شده است و سایر پارامترها بعد از طراحی بهینه مشخص خواهند شد. در شکل ۱ نمایی دو بعدی از سیم‌پیچ و هسته پروب در داخل لوله نشان داده شده است.

طبق قانون فاراده با اعمال جریان متناوب به سیم‌پیچ، ولتاژ متناوبی مطابق با رابطه زیر در دو سر سیم‌پیچ القا می‌شود:

$$V = \mu_0.\mu_c.n.A.\frac{dH}{dt} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، μ_c نفوذپذیری برآیند هسته نامیده می‌شود که به علت اثر میدان مغناطیس‌زدایی کمتر از مقدار نفوذپذیری مغناطیسی نسبی هسته و وابسته به ضریب مغناطیس‌زدایی (N) می‌باشد و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

$$\mu_c = \frac{\mu_r}{1 + N(\mu_r - 1)} \qquad (۲)$$

جدول ۱. پارامترهای اصلی پروب آزمون جریان گردابی

علامت	توصیف پارامتر	واحد(مقدار)
V	ولتاژ القایی در پروب	V
f	فرکانس	Hz
d	ضخامت سیم	۰/۴ mm
μ_0	نفوذ پذیری خلا	$4\pi \times 10^{-10} H.mm^{-1}$
n	تعداد دور سیم پیچ	turns
μ_r	نفوذ پذیری نسبی هسته	۷۰۰
μ_c	نفوذ پذیری برآیند هسته	
N	ضریب مغناطیس زدایی	
I	دامنه جریان ورودی	۰/۰۱ A
H	شدت میدان مغناطیسی	$A.turns/mm$
A	سطح مقطع	mm^2
k	ضریب فشردگی	۰/۸
D	قطر سیم‌پیچ	mm
D_i	قطر هسته	mm
l	طول سیم‌پیچ	mm
l_c	طول هسته	mm
ρ	مقاوت ویژه (سیم مسی)	$1/724 \times 10^{-5} \Omega - mm$
ρ_T	مقاومت ویژه (لوله فولاد زنگ نزن)	$90/91 \mu\Omega - cm$
ρ_T	مقاومت ویژه (لوله مسی)	$1/724 \mu\Omega - cm$
T	دمای محیط	$298K^\circ$
k_B	ثابت بولتزمن	$1/38 \times 10^{-23} WsK^{-1}$

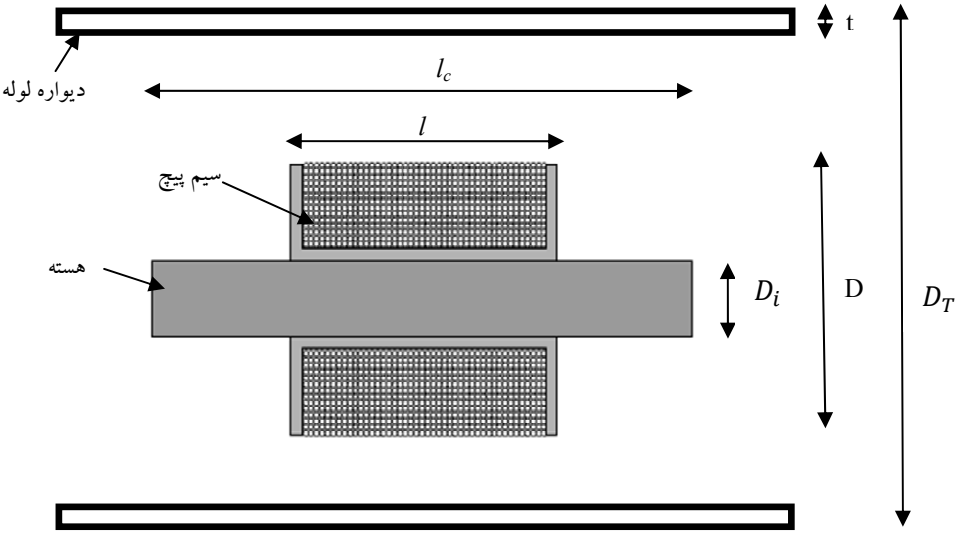
ضریب مغناطیس‌زدایی به شکل هندسی هسته بستگی دارد و این ضریب برای شکل‌های مختلف هندسی متفاوت خواهد بود. این ضریب برای یک هسته استوانه‌ای وابسته به طول هسته (l_c) و قطر هسته (D_i) می‌باشد و با رابطه زیر به دست می‌آید [۳]

$$N = \frac{2\pi . D_i^2}{l_c^2} \qquad (۳)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

در رابطه (۱)، سطح مقطع شارعبوری (A)، دایره‌ای فرض می‌شود که قطرآن میانگین قطرهسته و قطر سیم‌پیچ می‌باشد. بنابراین

$$A = \frac{\pi}{۱۶}.(D + D_i)^۲ \qquad (۴)$$



شکل ۱. نمایی دو بعدی از هسته و سیم پیچ پروب در داخل لوله

با توجه به این‌که جریان تحریک سیم‌پیچ، یک موج سینوسی با دامنه I و فرکانس f می‌باشد شدت میدان مغناطیسی نیز یک موج سینوسی با دامنه H و همان فرکانس خواهد بود. با توجه به فرضیات مذکور، رابطه (۱) به صورت معادله زیر نوشته می‌شود:

$$V = \frac{۱۰^{-۷}}{۲}.\pi^۳.\mu_c.f.n.(D + D_i)^۲.H \qquad (۵)$$

تعداد دورهای سیم پیچ (n) وابسته به قطر سیم، ضریب فشردگی و ابعاد سیم‌پیچ می‌باشد و طبق رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$n = \frac{l.(D - D_i)}{۲k.d^۲} \qquad (۶)$$

با استفاده از قانون آمپر می‌توان شدت میدان مغناطیسی را به صورت رابطه زیر بیان کرد:

$$H = \frac{n.I}{l_c} \qquad (۷)$$

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

در بازرسی لوله‌های مبدل حرارت، علاوه بر سیگنال خروجی، نویز حرارتی V_T نیز وجود دارد که باعث ایجاد محدودیت در عملکرد پروب می‌شود. مقدار نویز از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۲].

$$V_T = ۲.\sqrt{k_B T .\Delta f .R} \quad (۸)$$

در رابطه بالا، مقاومت سیم پیچ (R) مطابق با رابطه (۹) محاسبه می‌شود [۴] :

$$R = \frac{\rho.l}{d^۴}.(D - D_i).(D + D_i) \quad (۹)$$

با استفاده از معادلات (۲) تا (۹) نسبت سیگنال به نویز (SNR) به صورت رابطه زیر قابل بیان است.

$$SNR = \frac{V}{V_T} = \frac{۱۰^{-۱۰}.\pi^۳}{۱۶}.\frac{f}{\sqrt{\Delta f}}.\frac{\sqrt{l^۳}}{k^۲ d^۲.\sqrt{k_B T .\rho}}.\left[\sqrt{(D^۲ - D_i^۲)^۳}\right] \times \frac{\mu_r}{۱ + \frac{۲\pi.D_i^۲.(\mu_r - ۱)}{l_c^۲}}.\frac{I}{l_c} \quad (۱۰)$$

در آزمون جریان گردابی، علاوه بر تابع SNR پارامتر حساسیت (S) نیز به عنوان معیاری برای عملکرد پروب مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S = \frac{V}{H} = \frac{۱۰^{-۱۳}.\pi^۳}{۴}.\frac{f .l}{k .d^۲}.\left[(D - D_i).(D + D_i)^۲\right] \times \frac{\mu_r}{۱ + \frac{۲\pi.D_i^۲.(\mu_r - ۱)}{l_c^۲}} \quad (۱۱)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، مقدار فرکانس بهینه قرار داده می‌شود تا عملکرد سامانه ارتقا یابد. مقدار این فرکانس به ضخامت و مقاومت ویژه لوله مورد آزمایش بستگی دارد و از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۵]

$$f_{۹۰} = \frac{۳/۰۷۴.\rho_T}{t^۲} \quad (۱۲)$$

که در رابطه بالا، ρ_T و t به ترتیب مقاومت ویژه و ضخامت لوله می‌باشد.

۳ الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC)

الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی (ABC) که در سال ۲۰۰۵ توسط Karaboga پیشنهاد شد، الهام گرفته از رفتار کاوشگرانه کلونی زنبورها می‌باشد. این الگوریتم برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته و پیدا نمودن مقادیر بهینه یک تابع یا ترکیبی از توابع عددی چند متغیره به کار می‌رود. این روش با بهره‌گیری از پارامترهای کنترلی کمتر نسبت به الگوریتم‌های دیگر، از عملکرد بهتری برخوردار است. در این الگوریتم، مدل کمینه جستجوی غذا که موجب ظهور هوش دسته جمعی زنبورهای عسل می‌شود دو حالت رفتاری را تعیین می‌کند: سربازگیری برای یک منبع غذا و ترک کردن یک منبع.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

این مدل شامل سه قسمت ضروری می‌باشدکه در ذیل تشریح می‌شوند:

۱. منابع غذا (food sources): ارزش یک منبع غذا به پارامترهای مختلفی مثل نزدیکی به لانه، فراوانی انرژی (زیادی شهد) وسهولت بهره‌برداری از این انرژی بستگی دارد.
۲. کاوشگرهای به کار گرفته نشده (unemployed foragers): اگر فرض شود که یک زنبور هیچ دانشی درباره‌ی منابع غذا در زمینه‌ی جستجو ندارد زنبور جستجوی خود را به عنوان یک کاوشگر به کار گرفته نشده شروع می‌کند. این زنبورها به دنبال منبع غذایی برای بهره‌برداری می‌گردند. دو نوع کاوشگر به کار گرفته نشده وجود دارد:
   - زنبورهای دیده‌بان (scout bees): اگر زنبور جستجو را خود به خود و بدون هیچ دانشی شروع کند یک زنبور دیده‌بان خواهد بود. زنبورهای دیده بان محیط اطراف لانه را برای پیدا کردن منابع غذای جدید جستجو می‌کنند. تعداد زنبورهای دیده‌بان از ۵ تا ۳۰ درصد بر حسب اطلاعات داخل لانه متغیر است. متوسط تعداد زنبورهای دیده‌بان با توجه به میانگین شرایط حدود ۱۰ درصد است.
   - زنبورهای تماشاگر(onlooker bees): این دسته از زنبورها در لانه منتظر هستند و با استفاده از اطلاعاتی که کاوشگرهای به کار گرفته شده به اشتراک می‌گذارند یک منبع غذا پیدا می‌کنند.
۳. کاوشگرهای به کارگرفته شده (employed foragers): این زنبورها به منبع غذای مشخصی مربوط می‌باشند که در حال بهره‌برداری از آن هستند. آن‌ها اطلاعات مربوط به این منبع مشخص را حمل می‌کنند و این اطلاعات را که شامل مسافت و جهت منبع نسبت به لانه و سودمندی منبع می‌باشند، حتما به اشتراک می‌گذارند.

در الگوریتم ABC، فرایند جستجوی غذای یک کلونی زنبورعسل توسط زنبورهای دیده‌بان آغاز می‌شود که برای جستجوی تصادفی منابع غذایی گلزارهای امید بخش فرستاده می‌شوند. یک کلونی زنبور عسل می‌تواند در مسافت‌های زیاد (حدود ۱۴ کیلومتر) و نیز در جهت‌های گوناگون به جستجو بپردازد تا از منابع غذایی زیادی بهره‌برداری کند که این امر باعث می‌شود تا تمامی مسیرهای ممکن مورد جستجو قرار گیرند [۶، ۷]. هم‌چنان که فرایند جستجو انجام می‌شود، تعدادی از زنبورهای کلونی به طور مداوم به عنوان زنبورهای دیده‌بان انتخاب می‌شوند [۷]. اگر غذای جمع‌آوری شده از یک مسیر به یک حد معیار برسد زنبورهای دیده‌بان آن را در کندو ذخیره کرده و مسیر نسبی را از طریق رقص چرخشی (Waggle Dance) اعلام می‌کنند [۶]. رقص چرخشی یک ابزار ارتباطی مهم برای کلونی بوده که شامل تمام اطلاعات خارج از کندو می‌باشد [۶].

زنبورهای کندو بر اساس اطلاعات مختلف به دست آمده از رقص‌های چرخشی، در مورد کیفیت نسبی آن‌ها تصمیم‌گیری می‌کنند. بنابراین زنبورهای جدیدی را برای جستجوی مسیرهای بهتر انتخاب می‌کنند [۸، ۹] که این فرایند کمک می‌کند تا جستجوی موثرتری انجام گیرد. فرستادن زنبورها به مسیرهای مشخص تا حدی ادامه می‌یابد که تابع برازش مسیر به حد آستانه خود برسد. الگوریتم ABC با دادن جمعیت تصادفی اولیه از فضای جستجو یعنی فاز جمعیت اولیه شروع می‌شود:

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

$$X_{mi} = X_i^{\min} + rand * (X_i^{\max} - X_i^{\min}) \quad (۱۳)$$

که در رابطه بالا، X_{mi} یک بردار راه حل برای مساله بهینه سازی و m=۱، ...،SN و i=۱،...،n می‌باشد. SN بیان‌گر تعداد جمعیت اولیه و هر X_i یک بردار n بعدی است. سپس تابع برازش هر راه حل محاسبه می‌شود.
گام بعدی الگوریتم، فاز زنبورهای به کارگرفته شده می‌باشد که در این گام یک راه حل جدید (V_{mi}) در همسایگی X_i برای هر راه حل تولید می‌شود.

$$V_{mi} = X_{mi} + \varphi_{mi}(X_{mi} - X_{ki}) \quad (۱۴)$$

$$k = \text{int}(rand * SN) + ۱ \quad (۱۵)$$

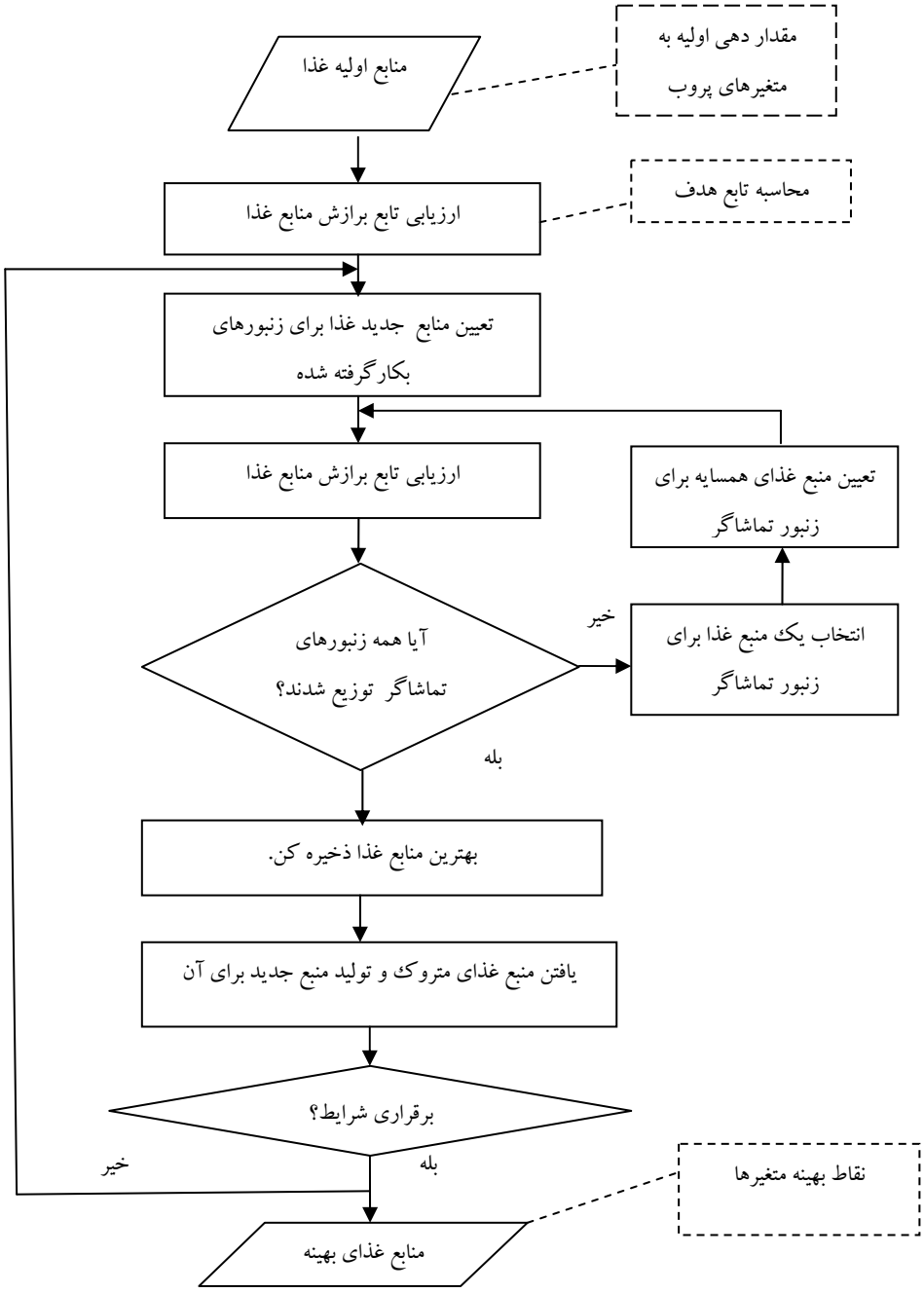
در معادله (۱۴)، φ_{mi} یک توزیع یکنواخت از اعداد تصادفی حقیقی در بازه [۱، ۱-] می‌باشد. X_{ki} بیانگر i امین از k امین راه حل جمعیت است که در آن k از میان $\{۱,\ldots,SN\}$ به طور تصادفی انتخاب می‌شود. اگر راه حل جدید سازگاری بهتری داشته باشد، جایگزین راه حل قبلی می‌گردد. در فاز زنبورهای تماشاگر، هر زنبور تماشاگر بر اساس میزان احتمال محاسبه شده خود با استفاده از معادله (۱۶)، با روش گزینشی به انتخاب یک راه حل می‌پردازد. سپس زنبور دیده‌بان راه حل جدیدی در برابر راه حل انتخابی می‌یابد که اگر راه حل جدید بهتر از راه حل قبلی باشد جایگزین آن می‌گردد. تعداد زنبورهای تماشاگر برابر SN می‌باشد.

$$\vec{P}_m = \frac{fit_m(\vec{x}_m)}{\sum_{m=۱}^{SN} fit_m(\vec{x}_m)} \quad (۱۶)$$

که در رابطه بالا، $fit(\vec{x}_m)$ تابع برازش x_m می‌باشد.

اگر تعداد سیکل‌هایی که راه حل نتواند بهبود یابد، بزرگ‌تر از یک مقدار از پیش تعیین شده باشد، راه حل کنار گذاشته شده و راه حل جدیدی به طور تصادفی ایجاد می‌شود. این فازها تا حدی تکرار می‌گردد که معیار توقف ارضا شود. فلوچارت روش ارایه شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم ABC

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

٤ نتایج بهینه سازی

در این بخش، از الگوریتم ABC برای بهینه‌سازی توابع نسبت سیگنال به نویز (SNR) و حساسیت (S) به صورت ترکیبی استفاده می‌شود. هدف از بهینه‌سازی، حداکثر شدن همزمان توابع SNR و S می‌باشد. به همین دلیل، تابع هدف به صورت ترکیب دو تابع مذکور انتخاب می‌شود و از آن‌جایی که در آزمون جریان گردابی تابع SNR نسبت به تابع S از اهمیت بیشتری برخوردار است، وزن بیشتری را در تابع هدف به خود اختصاص می‌دهد. با توجه به فرض مذکور، تابع هدف (Objective Function) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$OF = (\lambda)\cdot/\text{۸}\ SNR + \cdot/\text{۲}S \qquad (\text{۱۷})$$

در تابع هدف، به منظور قرار گرفتن مقادیر توابع SNR و S در یک محدوده، ضریب $\lambda = \text{۱۰}^{-\text{۹}}$ به تابع SNR اعمال شد تا بهینه سازی برای دو تابع معنادار شود. بهینه سازی برای یک نمونه لوله مسی و یک نمونه لوله فولاد زنگ‌نزن انجام می‌شود. مقادیر مربوط به ابعاد لوله‌ها، فرکانس بهینه و پهنای باند فرکانس برای بازرسی هر دو نوع لوله در جدول ۲ ارایه می‌شود.

جدول ۲. پارامترهای طراحی پروب برای دو نوع لوله نمونه

پارامترهای طراحی	مقدار پارامتر (لوله مسی)	مقدار پارامتر (لوله فولاد زنگ‌نزن)
فرکانس بهینه $(f_{\text{۹۰}})$	۱/۳۲۵ kHz	۷۰ kHz
قطر خارجی لوله (D_T)	۵۳ mm	۲۶ mm
ضخامت لوله (t)	۲ mm	۲ mm
پهنای باند فرکانس (Δf)	۹۰۰۰ Hz	۱۰۰۰۰۰ Hz

٤-۱ بهینه‌سازی پروب به منظور بازرسی لوله مسی نمونه

در این حالت، یک لوله مسی نمونه مطابق با پارامترهای جدول ۲ انتخاب می شود. در هر حالت با توجه به ابعاد لوله، محدودیت‌هایی برای ابعاد و مشخصات پروب در نظر گرفته می‌شود و با توجه به این محدودیت‌ها ابعاد بهینه پروب توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌شوند. محدودیت‌های پروب به منظور بهینه‌سازی برای حالت اول در جدول ۳ بیان می‌شوند.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول ۳. محدودیت‌های پروب به منظور بازرسی لوله مسی نمونه

پارامتر	واحد	کمینه	بیشینه
D	mm	۴۴	۴۶
l	mm	۱۰	۲۰
$m_1 = \frac{D_i}{D}$	-	۰/۲۵	۰/۵
$m_2 = \frac{l_c}{l}$	-	۶	۱۶
$m_3 = \frac{l_c}{D_i}$	-	۷	-
n	turns	۸۰۰	۱۰۰۰

الگوریتم بهینه‌سازی با تغییر پارامترهای پروب تابع هدف را بهینه می‌کند. در این بهینه‌سازی سه پارامتر کنترلی محدودیت، SN و تکرار وجود دارد که هرکدام به شرح ذیل تعریف می‌شوند:

- محدودیت: تعداد سیکل‌هایی که راه حل بهبود نیافته است
- SN : اندازه جمعیت اولیه
- تکرار: تعداد تکرار برای رسیدن به همگرایی

با صرف وقت و تغییر این پارامترها نتایج بهینه بدست خواهد آمد. مقادیر مربوط به پارامترهای کنترلی الگوریتم در جدول ۴ ارایه می‌شود.

جدول ٤. پارامترهای کنترل الگوریتم ABC

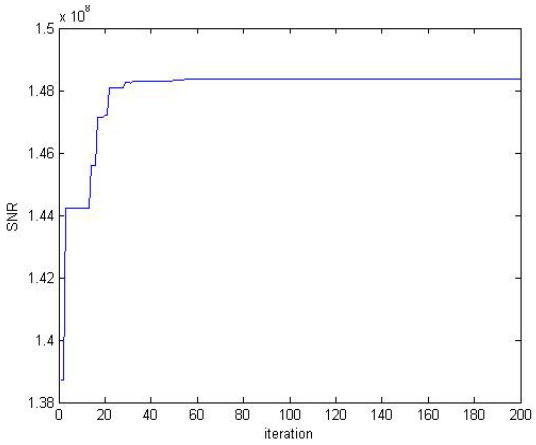
پارامترهای ABC	مقدار
SN	۲۰۰
محدودیت	۱۸۰
تکرار	۲۰۰

شکل‌های ۳ و۴ بترتیب نمودار تغییرات SNR و S را برحسب تکرار نشان می‌دهد. در شکل ۵ نیز نمودار تغییرات تابع هدف (OF) بر حسب تکرار برای لوله مسی نشان داده شده است. مقادیر بهینه پارامترهای پروب برای بازرسی لوله‌های مسی و فولاد زنگ‌نزن مفروض در جدول ۵ ارایه شده است.

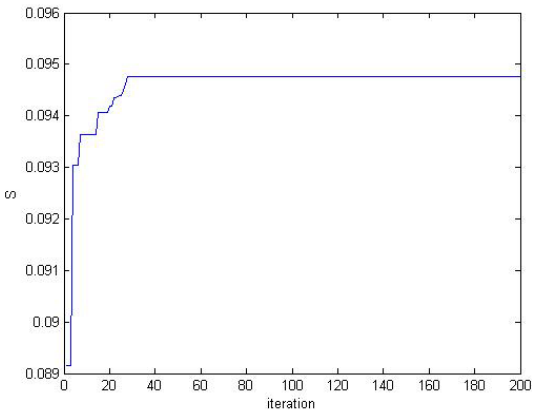
[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

جدول ۵. مقادیر بهینه پارامترهای پروب

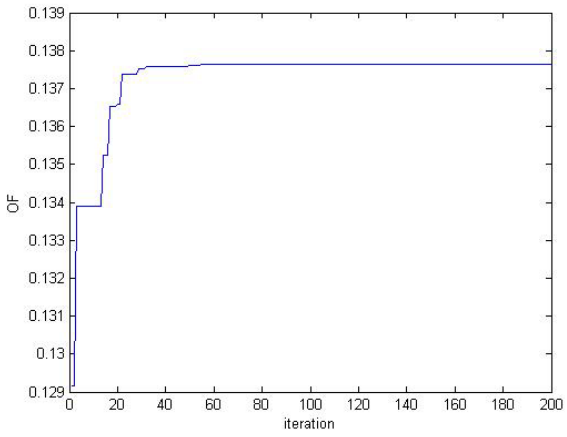
پارامترهای طراحی پروب	مقدار بهینه (لوله مسی)	مقدار بهینه (لوله فولاد زنگ‌نزن)
D	۴۴/۲۲ mm	۲۰/۳۴ mm
m_1	۰/۴۵۲۴	۰/۳۸۵۰
l	۱۰/۵۳ mm	۱۹/۰۵
m_2	۱۵/۸۵۷۱	۱۵/۲۳۷۸
n	۹۹۶	۹۳۰
m_3	۸/۳۵	۳۷/۰۸۵۳
SNR	$۱/۴۸۳۸\times۱۰^{۸}$	$۸/۳۲۷۴\times۱۰^{۹}$
S	۰/۰۹۴۷	۱۹/۳۲۲۳
OF	۰/۱۳۷۶	۱۰/۵۲۶۴



شکل ۳. نمودار تغییرات SNR برحسب تکرار (لوله مسی)



شکل ٤. نمودار تغییرات S برحسب تکرار (لوله مسی)



شکل ۵. نمودار تغییرات تابع هدف (OF) بر حسب تکرار (لوله مسی)

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

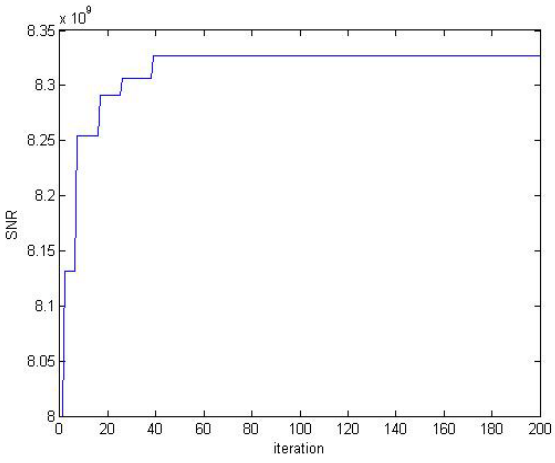
٤-٢ بهینه سازی پروب به منظور بازرسی لوله فولاد زنگ‌نزن نمونه

در حالت دوم، بهینه سازی برای یک نمونه لوله مبدل حرارت از جنس فولاد زنگ‌نزن و با توجه به محدودیت‌های جدول ۶ انجام می‌شود.

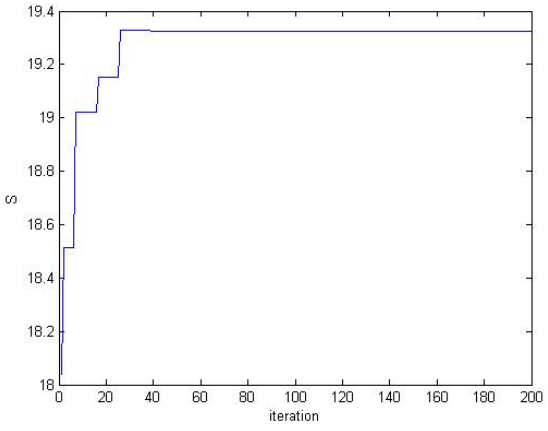
جدول ٦. محدودیت‌های پروب به منظور بازرسی لوله فولاد زنگ‌نزن نمونه

پارامتر	واحد	کمینه	بیشینه
D	mm	۱۹	۲۱
l	mm	۱۰	۲۰
$m_1 = \frac{D_i}{D}$	-	۰/۳	۰/۵
$m_2 = \frac{l_c}{l}$	-	۶	۱۲
$m_3 = \frac{l_c}{D_i}$	-	۱۰	-
n	turns	۸۰۰	۱۰۰۰

نمودار تغییرات توابع SNR و S برای بازرسی لوله فولادزنگ‌نزن نمونه به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. شکل ۸ نیز تغییرات تابع هدف را در این حالت نشان می‌دهد.

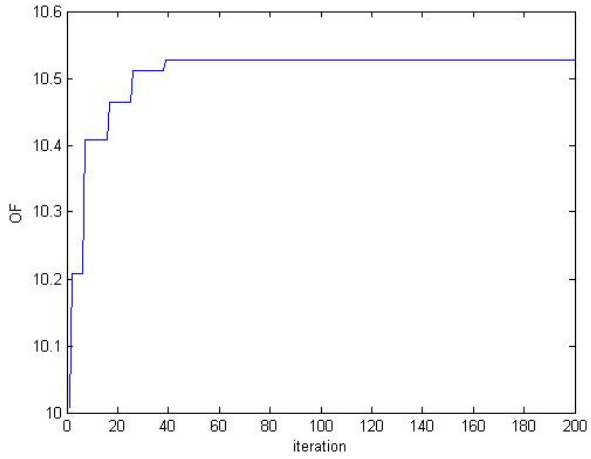


شکل ٦. نمودار تغییرات SNR بر حسب تکرار (لوله فولاد زنگ‌نزن)



شکل ۷. نمودار تغییرات S بر حسب تکرار (لوله فولاد زنگ‌نزن)

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

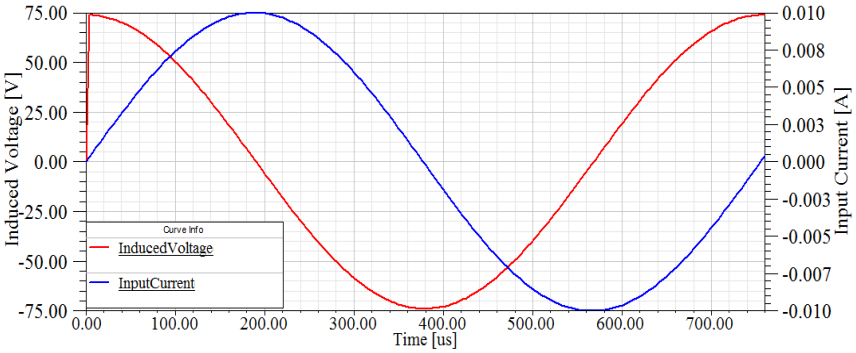


شکل ۸. نمودار تغییرات تابع هدف (OF) برحسب تکرار (لوله فولاد زنگ‌نزن)

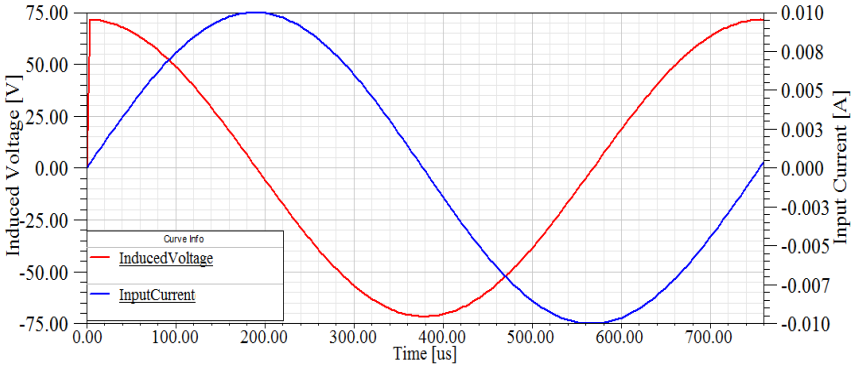
۵ شبیه‌سازی پروب بهینه با روش اجزای محدود

در این بخش، پروب بهینه با استفاده از روش اجزای محدود(FEM) و نرم افزار MAXWELL 2D برای هر دو نوع لوله شبیه‌سازی شده است. در بازرسی لوله‌های مبدل حرارت، امپدانس پروب در موقعیت‌های مختلف تعیین می‌شود و تغییر امپدانس در حین حرکت پروب در داخل لوله به منزله وجود عیب در لوله می‌باشد. در شبیه‌سازی، با اعمال یک موج سینوسی با فرکانس بهینه و دامنه مشخص، ولتاژ القایی در پروب توسط نرم‌افزار تعیین می‌گردد. با توجه به شکل موج جریان و ولتاژ، امپدانس پروب به صورت یک عدد مختلط بیان می‌شود. قسمت حقیقی امپدانس پروب (R)، مقاومت و قسمت موهومی آن (X)، راکتانس نامیده می‌شود. با ورود پروب از هوا به داخل لوله و عبور از نواحی سالم و معیوب لوله، امپدانس آن در هرسه موقعیت تعیین و مقایسه می‌گردد. یک سوراخ به قطر ۱۰ میلی متر در لوله به عنوان یک عیب مشخص در نظرگرفته می‌شود. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب منحنی‌های ولتاژ و جریان را در سه موقعیت هوا، ناحیه سالم ومعیوب لوله نشان می‌دهد. با توجه به شکل موج ولتاژ و جریان، امپدانس پروب در هر موقعیت محاسبه می‌شود. دامنه امپدانس برابر با نسبت دامنه ولتاژ به دامنه جریان و زاویه امپدانس، اختلاف فاز بین منحنی‌های جریان و ولتاژ می‌باشد. با استفاده از مقادیر دامنه وفاز امپدانس، مقاومت و راکتانس پروب تعیین می‌شود. در جدول ۷ مقادیر دامنه، فاز، مقاومت و راکتانس پروب در هر موقعیت برای بازرسی لوله مسی بیان می‌شوند.

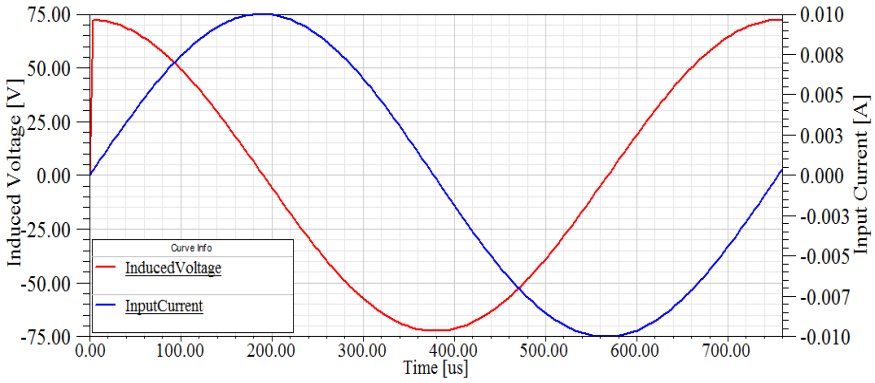
[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]



شکل ۹. منحنی ولتاژ و جریان پروب در هوا (حالت اول)



شکل ۱۰. منحنی ولتاژ و جریان پروب در ناحیه سالم لوله مسی



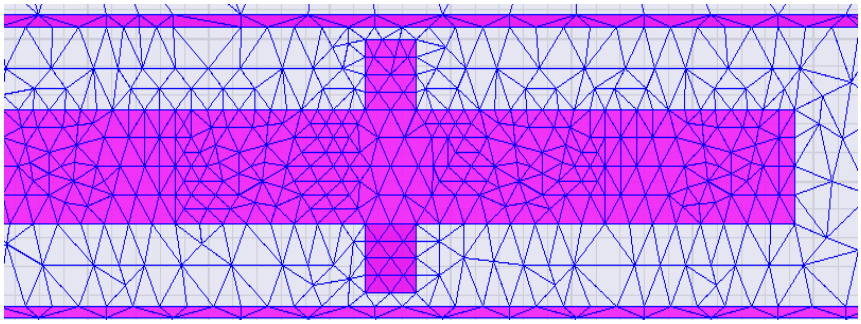
شکل ۱۱. منحنی ولتاژ و جریان پروب درناحیه معیوب لوله مسی

جدول ۷. دامنه، فاز، مقاومت و راکتانس پروب در موقعیت‌های مختلف (لوله مسی)

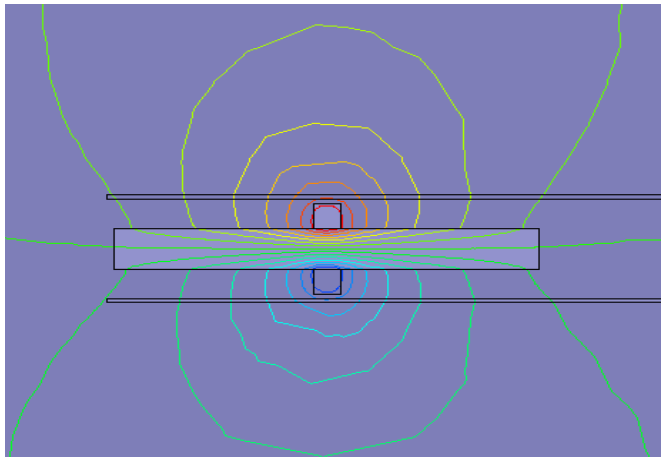
موقعیت پروب	دامنه امپدانس (اهم)	زاویه امپدانس (درجه)	مقاومت پروب (اهم)	راکتانس پروب (اهم)
هوا	۷۳۸۳/۹	۸۹/۵	۶۴/۴	۷۳۸۳/۶
ناحیه سالم لوله	۷۱۴۹/۵	۸۷	۳۷۴/۲	۷۱۳۹/۷
ناحیه معیوب لوله	۷۲۳۲/۶	۸۸	۲۵۲/۴	۷۲۲۸/۲

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

برای این حالت، نمایی دوبعدی از پروب شبیه سازی شده با نرم افزار و مش بندی آن در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ نیز توزیع شار را درپروب بهینه نشان می‌دهد.



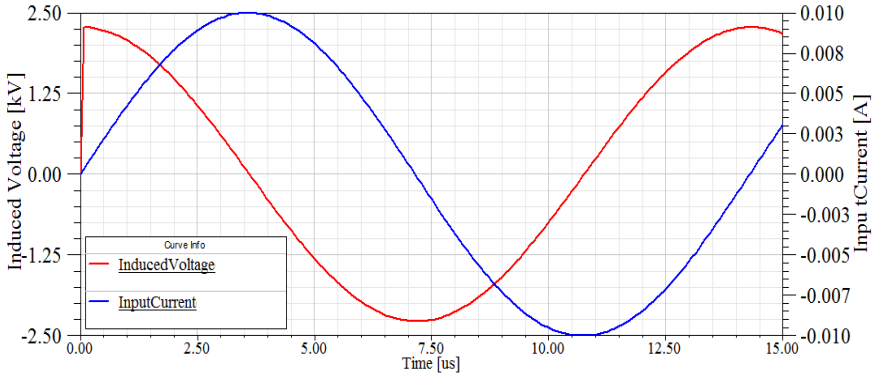
شکل ۱۲. مش‌بندی پروب بهینه آزمون جریان گردابی در داخل لوله مسی نمونه



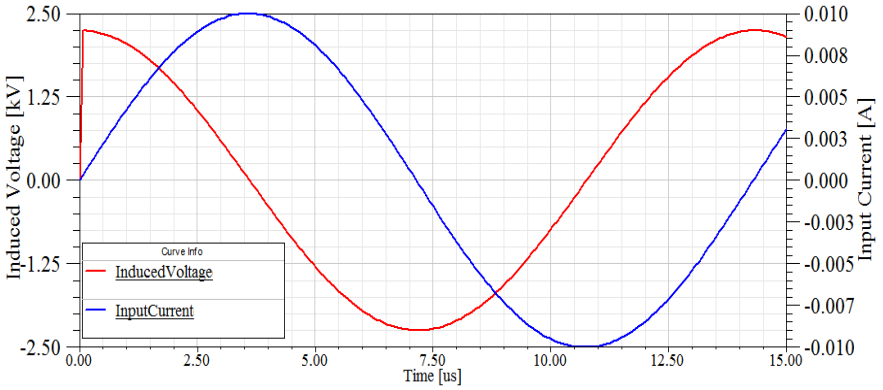
شکل ۱۳. توزیع شار در پروب بهینه

شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نیز به ترتیب منحنی‌های ولتاژ و جریان را در سه موقعیت هوا، ناحیه سالم و معیوب لوله برای بازرسی لوله فولاد زنگ‌نزن نشان می‌دهد. مقادیر مربوط به دامنه، فاز، مقاومت و راکتانس پروب در این حالت برای موقعیت‌های مختلف در جدول ۸ ارایه می‌شوند.

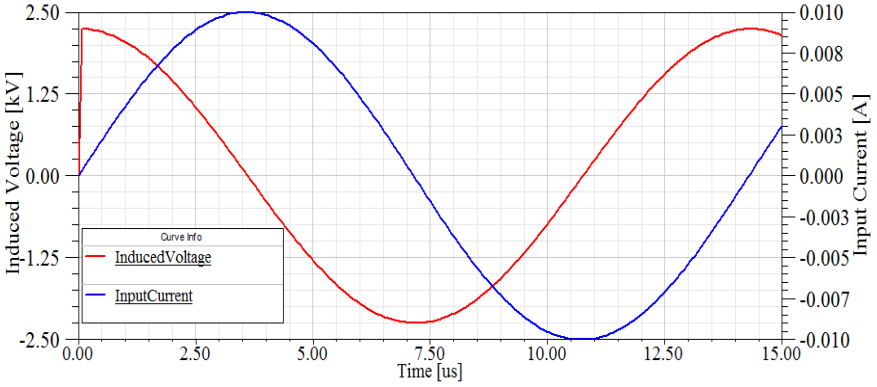
[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]



شکل ۱۴. منحنی ولتاژ و جریان پروب در هوا (حالت دوم)



شکل ۱۵. منحنی ولتاژ و جریان پروب درناحیه سالم لوله فولاد زنگ‌نزن



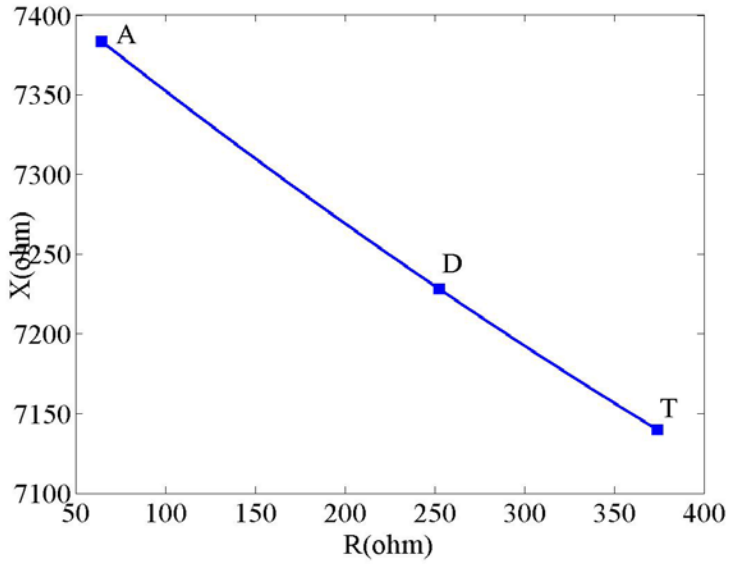
شکل ۱۶. منحنی ولتاژ و جریان پروب درناحیه معیوب لوله فولاد زنگ‌نزن

جدول ۸. دامنه، فاز، مقاومت و راکتانس پروب در موقعیت‌های مختلف (لوله فولاد زنگ‌نزن)

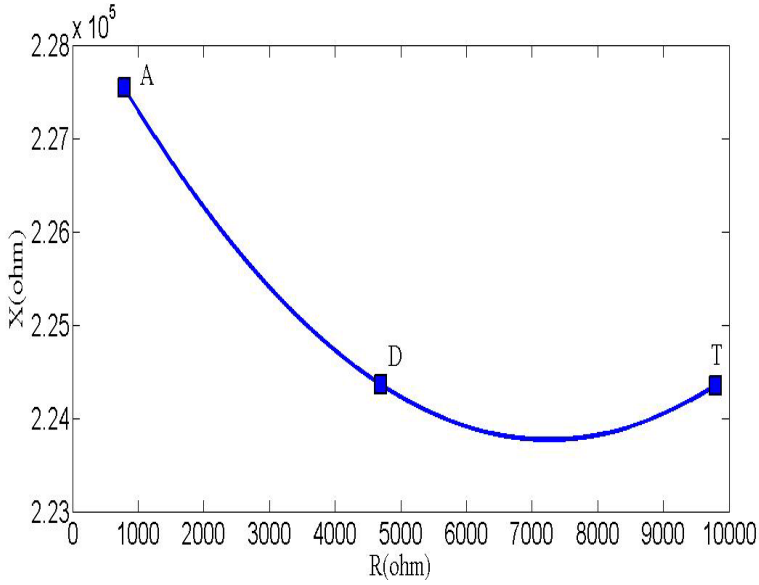
موقعیت پروب	دامنه امپدانس (اهم)	زاویه امپدانس (درجه)	مقاومت پروب (اهم)	راکتانس پروب (اهم)
هوا	۲۲۷۵۵۰	۸۹/۸	۷۹۴/۳	۲۲۷۵۴۸/۶
ناحیه سالم لوله	۲۲۴۵۷۰	۸۷/۵	۹۷۹۵/۶	۲۲۴۳۵۶/۳
ناحیه معیوب لوله	۲۲۴۴۱۰	۸۹	۴۶۹۹/۷	۲۲۴۳۶۰/۸

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

با توجه به مقادیر جدول‌های ۷ و ۸، نمودار تغییرات راکتانس پروب برحسب مقاومت پروب در عبور از موقعیت‌های مختلف برای بازرسی لوله مسی و فولاد زنگ‌نزن نمونه به ترتیب در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است. در این شکل‌ها، A بیان‌گر هوا، T به معنی ناحیه سالم و D نشان دهنده عبور پروب از ناحیه معیوب لوله (یک عیب مشخص) می‌باشد. در این منحنی‌ها محور عمودی، راکتانس و محور افقی، مقاومت پروب می‌باشد.



شکل ۱۷. منحنی تغییرات راکتانس پروب برحسب مقاومت پروب در بازرسی لوله مسی برای موقعیت‌های مختلف



شکل ۱۸. منحنی تغییرات راکتانس پروب برحسب مقاومت پروب در بازرسی لوله فولاد زنگ‌نزن برای موقعیت‌های مختلف

با توجه به مقادیر جدول‌های ۷ و ۸ می‌توان گفت که به علت طراحی بهینه پروب، مقاومت و راکتانس پروب دارای تغییرات قابل توجه‌ای می‌باشد و با توجه به اختلاف بین مقادیر ناحیه معیوب لوله‌ها نسبت به هوا و ناحیه

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]

سالم لوله‌های نمونه، عیب مشخص در لوله‌ها با استفاده از پروب بهینه موردنظر با حساسیت و دقت بالا شناسایی می‌شود. از آن‌جایی که مقادیر مقاومت و راکتانس پروب در ناحیه معیوب لوله‌ها بین مقادیر مقاومت و راکتانس نواحی سالم لوله‌ها و ناحیه هوا قرار دارد، می‌توان این مقادیر را به منظور شناسایی عیوب دیگر به عنوان مقادیر مرجع در نظرگرفت. با تعیین مقاومت و راکتانس پروب در حین حرکت در لوله و مقایسه با مقادیر مرجع، بازرسی لوله‌ها به منظور شناسایی عیوب احتمالی مختلف با دقت بالا انجام می‌شود و همچنین با مقایسه مقادیر مقاومت و راکتانس پروب در عبور از نواحی معیوب مختلف، می‌توان نوع و ویژگی هر عیب را مورد بحث قرار داد.

٦ نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور مصنوعی، طراحی بهینه پروب آزمون جریان گردابی به منظور بازرسی دو نمونه لوله مختلف انجام شد. با استفاده از الگوریتم ABC حداکثر مقدار توابع SNR و S به صورت ترکیبی و با توجه محدودیت‌های پروب تعیین گردید. در نهایت پروب بهینه آزمون جریان گردابی با استفاده از تحلیل اجزای محدود (با نرم افزار MAXWELL 2D) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی برای موقعیت‌های مختلف پروب در بازرسی لوله‌ها ارایه شد و تفاوت قابل توجه بین مقادیر مقاومت و راکتانس پروب در موقعیت‌های مختلف نشان دهنده ارتقای عملکرد سامانه بازرسی و بهبود حساسیت پروب در تشخیص عیوب در هر دو نوع لوله نمونه می‌باشد. همچنین می‌توان با استفاده از الگوریتم ABC، برای لوله‌هایی با ابعاد و جنس مختلف، پروب بهینه با قابلیت شناسایی عیوب مختلف طراحی نمود.

منابع

[1] Xian, P., (2005). Automatic multi-frequency rotating-probe eddy current data analysis. dissertation of PHD Iowa State.

[2] Tumanski, S., (2007). Induction coil sensors-a review. Meas Sci. Technol, 18 R31– R46.

[3] Shuddemagen, C. L. B., (1907). The magnetizing factors for cylindrical iron rods. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 43(6), 185-256.

[4] Richter, W., (1979). Induction magnetometer for biomagnetic fields. Exp. Technic Phys., 27, 235-243.

[5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.,(2011). Eddy Current Testing at Level 2, Manual for the syllabi contained in IAEA-TECDOC-628.Rev2, Training Course Series No. 48, IAEA, Vienna.

[6] Frisch, V., (1976). K. Bees: Their Vision, Chemical Senses and Language. (Revised edn) cornell University Press, N.Y., Ithaca.

[7] Seeley, T. D., (1996). The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies. Massachusetts: Harvard University Press, Cambridge.

[8] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G., (1999). Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems Oxford University Press, New York.

[9] Camazine, S., Deneubourg, J., Franks, N. R., Sneyd, J., Theraula, G. Bonabeau, E., (2003). Self-Organization in Biological Systems. Princeton: Princeton University Press.

[Downloaded from jorlu.ir on 2026-11-29]