طراحی حسگر فیبر نوری جهت تشخیص تخلیه جزیی

محسن قراط1، اعظم لایقی2،مهدی غفاری اصل2،مریم اخوان حجازی3،گئورک قره پتیان1و حمید لطیفی2

1دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی [امیرکبیرghorat@aut.ac.ir](mailto:امیرکبیرghorat@aut.ac.ir)

2دانشکده فیزیک- دانشگاه شهید بهشتی ،a.layeghi@gmail.com

3 دانشکده مهندسی برق- دانشگاه کاشان mhejazi@kashanu.ac.ir

چکيده - ماهيت مخرب تخليه هاي جزيي و تأثير با اهميت آنها در طول عمر عايق تجهيزات فشارقوي از سالیان پيش شناخته شده است. از اینرو روش های مختلفی جهت شناسایی و تشخیص این پدیده در نظر گرفته شده است. استفاده از حسگر فیبر نوری در جهت شناسایی علایم صوتی این پدیده روشی است که به دلیل اقتصادی و فنی مورد علاقه می باشد. در این مقاله ضمن معرفی یک سنسور فیبر نوری به نام فابری پرو، از جهات مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده است که با طراحی بهینه انجام شده بر روی آن، می تواند جهت تشخیص تخلیه جزیی مناسب باشد.

كليد واژه- تخلیه جزیی، حسگر فیبر نوری، فابری پرو، موج آکوستیک

# مقدمه:

هميشه نمي­توان در ساخت قطعات عايقي مانع ايجاد ناهمگني و ناخالصي در مواد عايقي شد. وقتي عايق مورد نظر بين الكترودها کیفیت مناسبی نداشته باشد، ترانسفورماتورها و شبکه­های برق را با ریسک بزرگی مواجه می­کند. زیرا اثرات شکست ترانسفورماتور می­تواند فاجعه بار باشد. نظارت برعملکرد قسمت­های مختلف تجهیزات و شرایط لحظه ای اجزا مختلف به منظور تشخیص به موقع عوامل موثر در ایجاد خطا و در نتیجه جلوگیری از به وجود آمدن عیب را پایش می­گویند. درحال حاضرسیستم­های پایش مختلف در ترانسفورماتورهای قدرت وجوددارند ]1[.

یکی ازعوامل مخرب ترانسفورماتور تخلیه جزیی است. با آشکار شدن اثر مخرب پدیده تخلیه ­جزیی بر روی عایق­هاکوشش­های زیادی صرف تحقیقات در این زمینه گردید. عوارض ناشي از تخلیه­ جزیی عبارتند از: تشعشعات نوراني، امواج صوتي، فرايند شيميائي، افزايش ناگهانيو پالس­هاي الكتريكي. با بررسي و اندازه‌گيري هريك ازعوارض مذكور مي‌توان به شدت وميزان تخليه‌جزیي پي‌برد. هريك ازروش­هاي آشكارسازي عوامل ناشي ازتخلیه­جزیی مزايا و معايب خاص خود را دارند كه باعث مي‌گردد هريك ازاين روش­ها در تجهيزات مختلف ارجحيت يابند.

در این مقاله استفاده از حسگر فیبر نوری در روش صوتی برای دریافت سیگنال های تخلیه جزیی را پیشنهاد می دهد. روش صوتی علاوه بر سرعت بالا دارای دقت قابل قبول و هزینه پایینی نیز است. فرکانس صوتی تخلیه جزیی بین 100 تا 200 کیلوهرتز می باشد. در محیط ترانسفورماتور نویزهای صوتی داخلی و خارجی نظیر نویز Barkhausen ناشی از هسته ترانسفورماتور و یا نویز ناشی از برخورد شن یا قطره­های باران به بدنه تانک ترانسفورماتور وجود دارند. یکی دیگر از عوامل موجود در ترانسفورماتور میدان مغناطیسی و نویزهای موثر از آن است. استفاده از حسگرهای فیبر نوری سبب می شود نویزهای ناشی از میدان های مغناطیسی به حداقل برسد. حسگر فیبر نوری دارای مزایایی است که استفاده از آن در شناسایی تخلیه جزیی مورد بررسی قرار گیرد.

# اساس آشکارسازی حسگر فیبر نوری:

ساخت حسگر فیبرنوری برای تشخیص تخلیه جزیی از سال 2000 آغاز شده است] 2-6[. روش های مختلف برای این کار در نظرگرفته اند. از روشهای متداولی مانند ماخ زندر ]5-8[، فابری پرو] 9-10[، ساگناک ] 11[ و مایکلسون ]3 , 12[ می توان نام برد. هریک از این روش ها مزایا و معایبی داشته که سبب می شود در کاربردهای متفاوت بر یکدیگر برتری یابند. این مقاله به منظور بررسی عملکرد این حسگرها و طراحی حسگری مناسب جهت استفاده از آن جهت تشخیص تخلیه جزیی می باشد. به دلیل آنکه استفاده از این حسگرها در مرحله آزمایشی است در کارهای گذشته بررسی همه جانبه نسبت به آنها صورت نگرفته است. در این مقاله به جنبه های مختلف که در میزان نتیجه گیری حسگر در تشخیص تخلیه جزیی موثر بوده مانند زاویه برخورد موج آکوستیک، دمای روغن و همچنین بهینه بودن ابعاد فیزیکی پرداخته شده است.

اساس عملكرد حسگرهاي فيبرنوري مدولاسيون نور مي­باشد. نور به روش­هاي مختلفي در فيبر مدوله مي شود كه مي­توان آنرا در چهار دسته طبقه بندي كرد :قطبش سنجي، تداخل سنجي، شدت سنجي، ماهيت سنجي.

برهمكنش امواج صوتي در فركانس­هاي صوتي و فراصوتي با فيبرنوري باعث اعمال فشار به فيبرنوري مي­گردد. در محدوده فركانسي فراصوتي، فشارصوتي روي فيبر در امتداد فيبر يكنواخت و داراي تقارن محوري است. بنابراين يك فشار شعاعي يكسان بر روي فيبر بوجود مي­آورد.

حساسيت فشار فيبرها تحت تاثير ضرایب الاستيك والاستواپتيك فيبرشيشه اي و ضرائب الاستيك روكش فيبر است.

شاخص انکسار می­تواند پارامتر حساس در فیبر نوری باشد. به تغییرشاخص انکسار (nΔ) به دلیل فشار اعمالی به آن فشار نوری گفته می­شود.

تغییر در فاکتور در اثر فشار اعمالی برابر است با]12[:

|  |  |
| --- | --- |
| (1) |  |

Pij کشش فشار نوری می­باشد. اگر فیبر از یک جنس هموژن باشد کشش فشار نوری برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (2) |  |

بردار فشار Sj، برای فشار طولی ε برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (3) |  |

تنشی که در محور عرضی وارد می­شود (قطرفیبر) موجب تنش طولی با نسبت پواسون v می­شود. با حل معادله­های (1) ، (2) و (3) خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (4) |  |

تغییر در سبب تغییر در شاخص انکسار nΔ می­شود ]13[:

|  |  |
| --- | --- |
| (5) |  |

تغییر در شاخص انکسار به دلیل فشار طولی برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (6) |  |

بنابراین با فشار در راستای طولی و عرضی میزان شاخص انکسار تغییر می­کند.

یکی از روش های آشکار سازی فشار ناشی از تخلیه جزیی با استفاده از حسگرهای فیبرنوری تكنيك تداخل سنجي می باشد. دراين روش، پرتو نوري منتشر شده از طريق فيبرنوری بواسطه اغتشاش و آشفتگي ناشي از امواج فشاري فراصوتی تولید شده توسط تخلیه­جزیی، فاز تداخل تغییر می یابد . ضریب مدولاسيون به پارامترهاي مختلفي نظير ضريب شكست فيبرنوری، تطبيق امپدانس صوتي ماده در تماس با فيبرنوری و تغيير درطول فيبرنوری بستگي دارد ]13[.

در یک فیبر نوری با طول L، فاز نوری که از آن عبور می­کند برابر است با]14[:

|  |  |
| --- | --- |
| (7) |  |

در این معادله β ثابت انتشار بوده و برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (8) |  |

neff متوسط شاخص انکسار هسته فیبر و لایه روکش بوده و k0 نیز برابر است. برای استفاده از فیبر به عنوان حسگر به عنوان مثال فشار، برای تغییر در تداخل باید تغییر در فاز ایجاد شود. با استفاده از معادله (7) تغییر در فاز ΔΦ به موجب تغییر در طول ΔL و یا تغییر در ثابت انتشار Δβ رخ می­دهد. بنابراین:

|  |  |
| --- | --- |
| (9) |  |

تغییر در طول بواسطه فشار برابر است با:

|  |  |
| --- | --- |
| (10) |  |

تغییر در ثابت انتشار بوسیله تغییر در شاخص انکسار و یا تغییر در قطر فیبر ایجاد می­شود:

|  |  |
| --- | --- |
| (11) |  |

تغییر در شاخص انکسار به دلیل فشار طولی در معادله (6) نشان داده شده است. با مشتق گیری از β نسبت به n در معادله (8) خواهیم داشت:

|  |  |
| --- | --- |
| (12) |  |

مشتق گیری نسبت به قطر به دلیل تغییرات بسیار اندک مخصوصا در فیبر تک حالته nm1550 درنظر گرفته نمی­شود. بنابراین معادله کلی (13) تغییرات در فاز را نشان می­دهد.

|  |  |
| --- | --- |
| (13) |  |

لذا با طراحی و ساخت حسگر فیبرنوری بر پایه تداخل سنجی می توان فشار اکوستیکی را به تغییر طول تبدیل و اندازه گیری نمود.

# طراحی و مدل سازی حسگر فیبرنوری برای آشکار سازی تخلیه جزئی

## حسگر فابری پرو فیبرنوری

در حسگر تداخل سنجی فابری پرو سه بازتاب وجود دارد که در شکل 1 با نام­های E1 ناشی از انتهای فیبر، E2 سطح داخلی دیافراگم و E3 سطح خارجی دیافراگم نشان داده شده است.

دیافراگم

فیبرنوری

گاف

E1

E2

E3

نور

شکل 1: شماتیک ساختار حسگر فابری-پرو دیافراگمی فیبرنوری

دیافراگم دارای ضخامتی به میزان d و شعاع r است. گاف نیز به فضای پشت دیافراگم گفته می شود که از هوا پر شده است که طول آن برابر L است. در این ساختار صفحه دیافراگم با اعمال فشار ناشی از تخلیه جزیی امکان جابجایی در حسگر را ایجاد می نماید که این امر موجب تغییر در طول گاف فابری پرو فیبرنوری می شود. شدت میدان بازتابی برآیند برابر است با ] 8[:

|  |  |
| --- | --- |
| (14) |  |
| (15) |  |

که در آن n ضریب شکست دیافراگم، λ طول موج و A دامنه شدت موج می باشد. از این حسگر در یک ساختار تداخل سنجی فابری پرو استفاده می­شود که در شکل 2 نشان داده شده است.

حسگر فابری پرو

لیزر

آنالیز

فتودیتکتور

فیبر نوری

شکل 2: شماتیک ساختار فابری پرو

با توجه به شکل 2، نوری از لیزر خارج و از کوپلر عبور کرده و داخل حسگر می شود. بازخورد نور که از معادله (15) بدست می­آید در بازگشت توسط کوپلر به داخل فتودیتکتور هدایت می­شود. فتودیتکتور نور را به ولتاژ تبدیل می­کند و سپس آنالیز می­شود.

همانطور که اشاره شد، بر اثر فشار بر دیافراگم جابجایی در آن رخ می دهد که در شکل 3 شماتیک فشار اعمالی بر دیافراگم نشان داده شده است.

Pressure

شکل 3: شماتیک تغییر حالت دیافراگم در اثر اعمال فشار آکوستیکی

با توجه به آنکه فرکانس صوتی تخلیه جزیی بین 100 تا 200 کیلوهرتز است، لذا بهینه سازی پارامترهای طراحی دیافراگم باید در این محدوده فرکانسی قرار گیرد.

با وارد کردن یک فشار آکوستیکی با استفاده از معادله (16) می توان میزان انحراف اطراف یک دیافراگم را در هر شعاع دلخواه بدست آورد] 15-16[.

|  |  |
| --- | --- |
| (16) |  |

که در معادله فوق P میزان فشار، Z میزان انحراف دیافراگم از حالت اولیه، r شعاع دیافراگم، d ضخامت دیافراگم، a فاصله شعاعی، μ ضریب پواسون و E مدول یانگ دیافراگم می باشد. بطوریکه بیشترین میزان انحراف در مرکز دیافراگم (r=0) صورت می پذیرد.

فرکانس طبیعی برای یک دیافراگم طبق معادله (17) تعریف می شود

|  |  |
| --- | --- |
| (17) | = |

در معادله فوق α ضریبی ثابت است که به مد ارتعاش وابسته است و ρ چگالی دیافراگم می باشد.

زمانیکه دیافراگم داخل مایع قرار بگیرد، فرکانس طبیعی کاهش پیدا می کند و از معادله (18) محاسبه می شود] 15-16[.

|  |  |
| --- | --- |
| (18) |  |

که در معادله فوق نسبت چگالی مایع به چگالی دیافراگم می باشد. در این طراحی جنس دیافراگم از سیلیکا انتخاب شده است که مشخصات فیزیکی آن در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1: مشخصات فیزیکی سیلیکا

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| واحد | مقدار |  |
| Gpa | 73 | مدول یانگ |
| 1 | 0.17 | ضریب پواسون |
| Kg/m3 | 2201 | چگالی |

در این مدل سازی قطر دیافراگم برابر با 5/2 میلیمتر و ضخامت آن برابر با 15/0 میلیمتر در نظر گرفته شده است. بر اساس معادله (17) فرکانس تشدید دیافراگم برابر با 263 کیلو هرتز و با استفاده از شبیه سازی 257 کیلوهرتز بدست آمده است. فرکانس تشدید دیافراگم در آب نیز بر اساس معادله (18) برابر 140 کیلوهرتز می باشد که بر اساس شبیه سازی نیز برابر 145 کیلوهرتز بدست آمده است. لذا نتایج بدست آمده از شبیه سازی نشان دهنده صحت آن می باشد.



شکل 4 : فرکانس تشدید دیافراگم در هوا



شکل 5 : فرکانس تشدید دیافراگم در آب

### بررسی تغییرات شعاع دیافراگم

بر طبق معادله (16) تغییرات میزان جابجایی دیافراگم نسبت به تغییرات شعاع دیافراگم می­توان محاسبه نمود. این تغییرات فرکانس تشدید و میزان جابجایی دیافراگم نسبت به شعاع در شکل های 6 و 7 نشان داده شده است

با افزایش شعاع، فرکانس تشدید تا شعاع 6/1 میلیمترکاهش می یابد. اگرچه بیشترین انحراف دیافراگم در شعاع 25/1 میلیمتر اتفاق می افتد که شعاع طراحی مورد نظر می باشد. میزان فرکانس تشدید برابر 145 کیلوهرتز است.



شکل6: میزان جابجایی دیافراگم در فرکانس تشدید نسبت به تغییرات شعاع دیافراگم



شکل7: میزان تغییرات فرکانس تشدید نسبت به تغییرات شعاع دیافراگم

### بررسی تغییرات ضخامت دیافراگم

ضخامت دیافراگم را از 05/0 میلی متر تا 1 میلی متر تغییر داده ایم. شکل های 8 و 9چگونگی تغییرات فرکانس تشدید و میزان جابجایی دیافراگم را نشان می دهد.



شکل 8: میزان جابجایی دیافراگم در فرکانس تشدید نسبت به تغییرات ضخامت دیافراگم



شکل 9: میزان تغییر فرکانس تشدید نسبت به تغییرات ضخامت دیافراگم

همانطور که در شکل­های 8 و 9دیده می شود بیشترین میزان جابجایی دیافراگم در ضخامت 15/0 میلیمتر که میزان طراحی موردنظر بوده دیده می­شود.

### بررسی تغییرات دما

با توجه به اینکه محیط داخلی ترانسفورماتور از روغن پر شده است و دما در داخل آن متغیر است، لذا باید طراحی بگونه ای صورت گیرد که وابستگی فرکانس تشدید دیافراگم به دما کم باشد. لذا در مدل سازی تغییر دما در اطراف حسگر فابری پرو فیبرنوری دیافراگمی در بازه بین 280 تا 330 درجه کلوین تغییر داده می شود. تغییر میزان جابجایی دیافراگم و همچنین فرکانس رزونانس با تغییرات دما در شکل های 10 و 11 نشان داده شده است.



شکل 10: میزان جابجایی دیافراگم در فرکانس تشدید نسبت به تغییرات شعاع دیافراگم



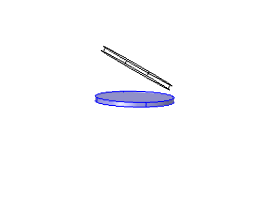
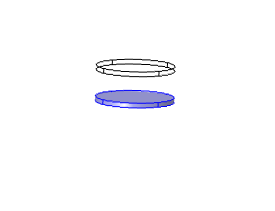
شکل 11: میزان تغییرات فرکانس تشدید نسبت به تغییرات شعاع دیافراگم

همانطور که نتایج شبیه سازی نشان می دهند مشاهده می شود که فرکانس رزونانس با تغییر دما تغییر زیادی نداشته است. بیشترین میزان جابجایی دیافراگم در 311 درجه کلوین معادل 38 درجه سلسیوس بوده است. این دما تقریبا برابر دمای روغن داخل ترانسفورماتور بوده و نشان می دهد عملکرد حسگر در نقطه مناسب دمایی قرار دارد.

### بررسی حساسیت حسگر نسبت به جهت گیری زاویه موج فرودی آکوستیک بر روی صفحه دیافراگمی

با توجه به آنکه حسگر می تواند در هر جای ترانسفورماتور جایگذاری شده و موقعیت آن نسبت به مکان تخلیه جزیی نامشخص است با توجه به زاویه برخورد فشار آکوستیکی میزان جابجایی دیافراگم تغییر خواهد کرد. هر چه مقدار این تغییرات کوچک باشد امکان تشخیص تخلیه جزیی کاهش می یابد. برای این منظور صفحه ای بالای دیافراگم تعریف شده که فشار آکوستیکی از آن خارج شده و به دیافراگم می رسد. بنابراین با زاویه قرار دادن این صفحه نسبت به دیافراگم فشار وارد شده بر دیافراگم نیز زاویه می گیرد.

نحوه چگونگی قرار گرفتن این دو صفحه در شکل 12 نشان داده شده است. صفحه تیره به عنوان دیافراگم بوده و صفحه روشن به عنوان منبع فشار است.



چگونگی قرارگیری منبع فشار و دیافراگم نسبت به هم

شکل 12: زاویه ورود فشار آکوستیکی بر دیافراگم



شکل13: تغییرات فرکانس تشدید نسبت به تغییرات زاویه فشار آکوستیکی



شکل14: میزان جابجایی دیافراگم در فرکانس تشدید نسبت به تغییرات زاویه فشار آکوستیکی

زاویه اعمال فشار صفر تا 90 درجه تغییر کرده است. طبیعی است که فرکانس تشدید نسبت به زاویه فشار تغییر نکند. میزان تغییرات جابجایی دیافراگم نسبت به فشار نیز کاملا رفتاری سینوسی دارد و در زمانیکه فشار با زاویه ای کمتر از 31 درجه قرار دارد میزان جابجایی به کمتر نصف کاهش یافته است.

# نتیجه گیری:

در این مقاله حسگر فیبر نوری فابری پرو طراحی شده و از جنبه های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به طراحی انجام شده نشان داده شده است که از لحاظ ابعاد فیزیکی کاملا بهینه بوده و ابعاد مناسبی انتخاب شده است. فرکانس تشدید تقریبا نزدیک 150 کیلوهرتز بوده که کاملا مطلوب است. در مورد تغییرات پارامترهای دیگر مانند دما نیز نقطه کاری، مناسب است. اگر چه می توان برای عملکرد بهتر حسگر، جبرانساز نیز طراحی شود. با توجه به میزان جابجایی دیافراگم تا حدود 60 درجه، عملکرد مناسب در دریافت سیگنال تخلیه جزیی را می توان انتظار داشت. ساخت حسگر در مرحله بعد این کار قرار دارد که به مقایسه طراحی، شبیه سازی و واقعیت پرداخته می­شود.

## مراجع

[1] حسين محسنی ، « مباني مهندسي فشار قوي الكتريكي » ، انتشارات دانشگاه تهران

[2]A.Zargari, T. R. Blackburn,"Application of Optical Fibre Sensor for Partial Discharge Detection in High-voltage power equipment", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996

[3]A.Zargari, T. R. Blackburn,"Detection of Partial Discharge signals in Unknown Noisy Environment", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, October 20-23, 1996

[4] J.Deng, H.Xiao, W.Huo, M.Luo, R.May,A.Wang, Y.Liu,"Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers", Optics & Laser Technology 33 (2001) 305–311

[5] Z.Zhiqiang, M.MacAlpine, M. Süleyman Demokan"The Directionality of an Optical Fiber High-Frequency Acoustic Sensor for Partial Discharge Detection and Location", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 18, NO. 6, JUNE 2000

[6]M.MacAlpine, Z.Zhiqiang, M. S. Demokan"Development of a fibre-optic sensor for partial discharges in oil-filled power transformers", Electric Power Systems Research 63 (2002) 27\_/36

[7] H Lamela-Rivera, C Maci`a-Sanahuja and J A Garc´ıa-Souto,"Detection and wavelet analysis of partial discharges using an optical fibre interferometric sensor for high-power transformers", JOURNAL OF OPTICS A: PURE AND APPLIED OPTICS, Pure Appl. Opt. 5 (2003) 66–72

[8] X.Wang, B.Li, Z.Xiao, S.Hwui Lee, H.Roman, O.L.Russo, K.K.Chin, K.R.Farmer,"An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection", JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING, J. Micromech. Microeng. 15 (2005) 521–527

[9] Xiaodong Wang, Baoqing Li, Harry T. Roman, Onofrio L. Russo, Ken Chin, and Kenneth R. Farmer,"Acousto-optical PD Detection for Transformers", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 21, NO. 3, JULY 2006

[10] Sanderson E. U. Lima, Orlando Frazão, Rubem G. Farias, Francisco M. Araújo,Luis A. Ferreira, José L. Santos, and Vladimiro Miranda, "Mandrel-Based Fiber-Optic Sensors for Acoustic Detection of Partial Discharges—a Proof of Concept", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCTOBER 2010

[11]M. S. Hapeez1, A. F. Abidin, H. Hashim, M. K. Hamzah, N. R. Hamzah,"Analysis and Classification of Different Types of Partial Discharges by Harmonic Orders", ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, ISSN 1392-1215, VOL. 19, NO. 9, 2013

[12] C. D. Butter and G. B. Hocker, “Fiber optic strain gauge,” Appl. Opt.,vol. 17, no. 18, pp. 2867–2869, 1978

[13] G.Wild, S.Hinckley," Acousto-Ultrasonic Optical Fiber Sensors:Overview and State-of-the-Art", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 8, NO. 7, JULY 2008

[14] E. Hecht*, Optics*. Reading, MA: Addison-Wesley, 2002.

[15] Alison K. Lazarevich,"Partial Discharge Detection and Localization in High Voltage Transformers Using an Optical Acoustic Sensor", May 12, 2003, Blacksburg, Virginia, U.S.A.

[16] Lijun Song,"Detection and Position Location of Partial Discharges in Transformers Using Fiber Optic Sensors", December 3, 2004, Blacksburg, Virginia, U.S.A