معرفی استاندارد

گرچه بسیاری از تحقیقات، گزارشهای فنی، مقالات و کتابها ممکن است از لحاظ علمی ارزش بالاتری از استانداردها داشته باشند، لیکن آنچه استانداردها را از این موارد متمایز می‌سازد اینست که گروهی متشکل از سازندگان، خریداران، بهره برداران و اساتید دانشگاه (و در خصوص استانداردهای بین المللی مانند IEC، نمایندگان کشورها) آنها را مورد تأیید قرارداده‌اند. در حقیقت استانداردها را می توان توافقی بین کلیه ذینفعان یک محصول در خصوص مشخصات و کیفیت آن دانست. در صنعت برق ایران از جمله ترانسفورماتور، استانداردهای تدوین شده توسط موسسه IEC بیشترین کاربرد را (در مقایسه با سایر استانداردها از جمله ANSI/IEEE) دارد که دلیل آن علاوه بر بین المللی بودن این استاندارد، نزدیکی بیشتر صنعت برق ایران با اروپا است. با توجه به اهمیت آشنایی فعالان در صنعت ترانسفورماتور با آخرین ویرایش استانداردهای IEC مورد استفاده در این صنعت، فصلنامه ترانسفورماتور در هر شماره یکی از استانداردهای منتشره توسط این مؤسسه را معرفی می نماید. نظر به پیچیدگی فنی استانداردهای IEC ،تلاش بر این است که متون به زبان ساده تشریح شده و در نهایت مثالی واقعی از کاربرد آن بر روی یک ترانسفورماتور نمونه در ایران ارائه شود. علاقه مندان جهت دریافت نسخه کامل استانداردهای معرفی شده می توانند به وبسایت فصلنامه مراجعه نمایند.

معرفی استاندارد IECTR 62874ed.1

(ویرایش سال ۲۰۱۵)

مقدمه

با توجه به گرانقیمت بودن ترانسفورماتور، زمان طولانی مورد نیاز جهت سفارش، طراحی و ساخت ترانسفورماتور جدید (یک تا دو سال برای ترانسفورماتورهای قدرت) و همچنین وابستگی شبکه برق رسانی به کارکرد بدون خطای این تجهیز، محاسبه قابلیت اطمینان و تخمین عمر ترانسفورماتورهای قدیمی (با بیش از ۱۵ سال عمر) که اکنون بیش از نیمی از شبکه برق کشور و صنایع را تغذیه می کنند، اهمیت بسیاری دارد. در صورتی که بهره بردار قادر به تخمین عمر ترانسفورماتور باشـــد، نه تنها می تواند از بروز حوادث و خاموشی ناخواسته جلوگیری نماید، بلکه قادر اســـت در زمان مناسب نســـبت به برنامه ریزی جهت انجام عملیات سرویس و نگهداری، تعمیرات، بازسازی یا تعویض ترانسفورماتور اقدام نماید. تخمین عمر ترانسفورماتور با استفاده از نتایج آزمونهای روغن در طی بیست سال گذشته توسط بســـیاری از محققین مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته و مقالات، گزارشـــها و دســـتورالعملهای متفاوت و در برخی موارد، متناقضی در این مدت انتشار یافته است. لیکن به دلیل پیچیدگی این بحث و تفاوتهای اساسی بین نتایج حاصل از مدل سازیهای آزمایشگاهی با شرایط واقعی در ترانسفورماتور، هیچگاه این گزارشات جنبه رســـمی به خود نگرفته و به صورت استاندارد منتشر نشده بود. سرانجام در سال ۲۰۱۵ مؤسسه **IEC** با انتشار گزارش فنی IEC TR 62874 نقطه عطفی در این مبحث پدید آورد و توانســـت راه حل جامع و کاملی در این خصوص ارائه نماید. مطابق این گزارش فنی با اندازه گیری مقادیر دی اکســـید کربن (از تســـت گازکروماتوگرافی) و دو – فورفورالدهید (از تست فورفورال) می توان با اســـتفاده از جداول ذکر شـــده در این گزارش، عمر ترانسفورماتور را تخمین زده و اقدامات آتی (مانند نوع و زمان انجام آزمونهای تکمیلی و تصمیم گیری در خصوص وضعیت ترانسفورماتور) را تعیین نمود.

خلاصه استاندارد

در ابتدای این گزارش فنی به این مسئله اشـــاره می شود که تحقیقات زیادی در خصوص رابطه بین دو – فورفورال و درجه پلیمریزاســـیون عایق کاغذی (**DP**) صورت گرفته و مدلهای مختلفی در این خصوص پیشـــنهاد شـــده است. لیکن بنا به دلایلی همچون، همخوانی نداشـــتن مدلهای ارائه شده در این تحقیقات با یکدیگر و همچنین عدم اثبات کارآیی این مدلهای آزمایشگاهی در شرایط واقعی کار ترانسفورماتور، در این استاندارد از هیچ یک از این مدلها استفاده نشده است. بطور کلی این استاندارد صرفاً به عنوان راهکار عملی جهت بررسی میزان تخریب حرارتی عایق کاغذی قابل اســـتفاده بوده و به عنوان الگوریتمی جهت محاسبه میزان درجه پلیمریزاسیون عایق کاغذی (**DP**) کاربرد ندارد.

در ادامه به دلایل کاهش عمر ترانسفورماتور اشاره و سه عامل اصلی در تخریب عایق کاغذی معرفی می شود:

– هیدرولیز (تخریب عایق کاغذی به واسطه حرارت)

شکل یک: دیاگرام شماتیک نشان دهنده تأثیر هر یک از عوامل پیری بر نرخ کاهش عمر ترانسفورماتور K

– اکسیداسیون (تخریب عایق کاغذی به دلیل حضور اکسیژن)

– پیرولیز (تخریب عایق کاغذی توسط آب)
در یک ترانسفورماتور کلیه این فرآیندها، به صورت همزمان عمل کرده و مطابق شکل یک، مکانیزم غیرخطی را بوجود می آورند. اینکه کدام فرآیند غالب می‌شود بستگی به درجه حرارت و عوامل بهره برداری دارد. در حقیقت به دلیل پیچیدگی فرآیندهای تخریب، تعیین تنها یک فرآیند به عنوان فرآیند غالب، بسـیار دشوار است.
با توجه به اینکه در ترانسفورماتورهای در حال بهره برداری، امکان نمونه برداری از کاغذ و اندازه گیری مسـتقیم درجه پلیمریزاسـیون عایق کاغذی (**DP**) و در نهایت تخمین عمر وجود ندارد، لذا راهکار پیشـنهادی اسـتاندارد، استفاده از نشـانگرهای پیری در روغن است. نشـانگرهای پیری در حقیقت موادی است که براثر تخریب کاغذ در روغن حل شـده و با انـدازه گیری آنها می توان پیری ترانسـفورماتور را تخمین زد. از بین کلیه نشـانگرهای پیری موجود در روغن، اسـتاندارد حاضر دی اکسـید کربن (که با آزمون گازکروماتوگرافی قابل اندازه گیری اسـت) و دو – فورفورال (که از نتیجه آزمون اندازه گیری ترکیبات فوران بدست می آید) را انتخاب نموده است.

روش گام به گام جهت تخمین عمر ترانسفورماتور

به منظور تخمین عمر ترانسـفورماتور ، استاندارد با اسـتفاده از جداول مقادیر نرمال، روش گام به گام ذیل را پیشنهاد می نماید:
۱) انجـام حداقل دو بـار آزمونهـای گازکروماتوگرافی و فورفـورال بر روی ترانسفورماتور
شرایط انجام آزمونها به قرار ذیل می باشد:
– فواصل انجام آزمونها باید حداقل شش ماه بوده و در این مدت تصفیه فیزیکی، شیمیائی یا تعویض روغن انجام نشده باشد.
– ترانسفورماتور مورد مطالعه نباید به مدت طولانی خارج از مدار قرار گرفته‌باشد.
– در زمان اولین نمونه برداری می بایست حداقل شش ماه از انجام آخرین تصفیه فیزیکی، شیمیائی یا تعویض روغن گذشته باشد.
– نمونه برداریها باید در زمانی انجام شـود که بار ترانسـفورماتور، قبل از نمونه برداری تغییرات زیادی نکرده باشد
۲) تعیین مقادیر مطلق دو–فورفورال (**mg/kg**) و دی اکسـید کربن (**µLit/Lit**) در هر دو نمونه
۳) تعیین مقادیر رشد سـالانه دو–فورفورال (**mg/kg/year**) و دی اکسید کربن (**µLit/Lit/year**)
۴) مقایسه مقادیر مطلق و رشد سالانه دی اکسید کربن و دو فورفورال با جداول مقادیر نرمال (جداول یک تا دوازده)
۵) تعیین اینکه هریک از مقادیر مطلق و رشـد کمتر از صدک نودم، بین صدک نودم و نود و هشتم یا بیشتر از صدک نود و هشتم هستند.
۶) تعییـن وضعیـت تخریب عایـق کاغـذی و تخمین عمر از دسـت رفته ترانسفورماتور مطابق جدول سیزده
۷) تعیین نوع و زمان انجام پایشهای آتی مطابق جدول چهارده

مقادیر نرمال دو–فورفورال و دی اکسید کربن

اسـتاندارد حاضر مقادیر مطلق دو–فورفورال و دی اکسید کربن و رشد سالانه آنها در تعداد زیادی از ترانسـفورماتورهای مورد بهره برداری را تحت بررسی قرار داده و با استفاده از روشهای آماری مقادیر نرمال این شاخصهای پیری را ذکر نموده است. این جداول به قرار ذیل می باشند:

۱) مقادیر نرمال دو–فورفورال برمبنای مقادیر مطلق (برحسـب mg/kg) و نرخ رشد سالانه (برحسب mg/kg/year)

توضیح: در بخشهایی از جداول ذکر شده است: «داده ناکافی» در این حالت تعداد نمونه های آماری جهت تعیین مقادیر نرمال به اندازه کافی نبوده است.

جدول یک: ترانسفورماتورهای اصلی نیروگاهی (GSU) با روغن فاقد مواد بازدارنده (Uninhibited Oil)

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۳	۰/۰۴	۲	۰/۳	۳	داده ناکافی
نود و هشتم	۰/۰۵	۰/۰۱	۱	۰/۱۰	۴	۰/۷	۶	

(نمونه آماری: ۱۸۶۰دستگاه ترانسفورماتور)

جدول دو: ترانسفورماتورهای اصلی نیروگاهی(GSU) با روغن حاوی مواد بازدارنده (Inhibited Oil)

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	داده ناکافی		۰/۱	داده ناکافی	۰/۸	۰/۲۵	داده ناکافی	
نود و هشتم			۰/۱۵		۱/۵	۰/۶۰		

(نمونه آماری: ۱۷۶دستگاه ترانسفورماتور)

جدول سه: ترانسفورماتورهای فوق توزیع و انتقال با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۰/۱	۰/۰۱	۰/۳	۰/۰۶	۱/۶	۰/۲۵	۲	۰/۳
نود و هشتم	۰/۲	۰/۰۲	۱/۱	۰/۶	۳/۵	۰/۸	۴/۵	۱/۱

(نمونه آماری: ۲۸۴۵ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول چهار: ترانسفورماتورهای توزیع بزرگ (با توان نامی بیشتر از ۲MVA) با روغن فاقد مواد بازدارنده و منبع انبساط باز (Open Breathing Conservator)

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۷	۰/۲	۱/۵	۰/۳	داده ناکافی	
نود و هشتم	۰/۲	۰/۰۳	۳	۰/۵	۴/۵	۰/۸		

(نمونه آماری: ۷۱۰۷ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول پنج: ترانسفورماتورهای توزیع بزرگ با روغن فاقد مواد بازدارنده و منبع انبساط بسته (Sealed Conservator)

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۰/۰۵	داده ناکافی	۰/۱۵	۰/۰۲	۱/۶	۰/۴	داده ناکافی	
نود و هشتم	۰/۱۵		۰/۸۵	۰/۰۴	۵	۰/۷		

(نمونه آماری: ۲۸۸ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول شش: ترانسفورماتورهای توزیع شبکه و صنایع (با توان نامی کمتر از ۲MVA) با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۰/۶	۰/۰۲	۰/۷	۰/۱	۱/۳	۰/۳	داده ناکافی	
نود و هشتم	۱/۵	۰/۲	۲/۷	۰/۷	۴/۵	۱/۱		

(نمونه آماری: ۳۸۸۵ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول هفت: ترانسفورماتورهای LVDC با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	داده ناکافی		۰/۸	۰/۳	۱	۰/۳	داده ناکافی	
نود و هشتم			۱/۴	۰/۸	۳	۰/۸		

(نمونه آماری: ۳۶۰ دستگاه ترانسفورماتور)

۲) مقادیر نرمال دی اکسید کربن برمبنای مقادیر مطلق (برحسب µlit/Lit) و نرخ رشد سالانه (برحسب µLit/Lit/year)

توضیحات:

۱) در بخشهایی از جدول ذکر شده است: «داده ناکافی» در این حالت تعداد نمونه های آماری جهت تعیین مقادیر نرمال به اندازه کافی نبوده است.

۲) مقادیر نرمال دی اکسید کربن که در استاندارد **IEC60599** ذکر شده است با مقادیر نرمال ذکر شده در جداول ذیل متفاوت است. مقادیر نرمال مذکور در این استاندارد تنها به منظور تخمین میزان تخریب حرارتی عایق کاغذی ارائه شده در حالیکه هدف از مقادیر نرمال مذکور در استاندارد **IEC60599** شناسایی خطای احتمالی ترانسفورماتور می باشد.

جدول هشت: ترانسفورماتورهای اصلی و تحریک نیروگاهی با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۲۰۰۰	داده ناکافی	۵۰۰۰	۱۵۰۰	۶۰۰۰	۱۵۰۰	۸۰۰۰	داده ناکافی
نود و هشتم	۲۵۰۰		۷۰۰۰	۳۰۰۰	۱۱۰۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰۰	

(نمونه آماری: ۱۰۹۸ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول نه: ترانسفورماتورهای فوق توزیع و انتقال با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ⟵	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۳۰۰۰	داده ناکافی	۵۰۰۰	داده ناکافی	۸۰۰۰	داده ناکافی	۸۰۰۰	داده ناکافی
نود و هشتم	۵۰۰۰		۸۰۰۰		۱۱۰۰۰		۱۳۰۰۰	

(نمونه آماری: ۴۳۵ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول ده: ترانسفورماتورهای توزیع بزرگ با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ←	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۲۰۰۰	داده	۴۰۰۰	داده	۵۰۰۰	داده	۶۰۰۰	داده ناکافی
نود و هشتم	۳۵۰۰	ناکافی	۸۰۰۰	ناکافی	۹۰۰۰	ناکافی	۱۲۰۰۰	

(نمونه آماری: ۷۲۹۱ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول یازده: ترانسفورماتورهای توزیع شبکه و صنایع با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ←	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	۱۵۰۰	داده	۳۵۰۰	داده	۴۵۰۰	داده	۵۰۰۰	داده ناکافی
نود و هشتم	۳۵۰۰	ناکافی	۵۵۰۰	ناکافی	۷۰۰۰	ناکافی	۹۰۰۰	

(نمونه آماری: ۴۵۵۶ دستگاه ترانسفورماتور)

جدول دوازده: ترانسفورماتورهای LVDC با روغن فاقد مواد بازدارنده

سن ←	کمتر از یکسال		بین یک تا ده سال		بین ده تا سی سال		بیشتر از سی سال	
صدک ↓	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد	مقدار مطلق	رشد
نودم	داده ناکافی		۳۰۰۰	داده	۴۵۰۰	داده	داده ناکافی	
نود و هشتم			۴۵۰۰	ناکافی	۷۵۰۰	ناکافی		

(نمونه آماری: ۲۷۳ دستگاه ترانسفورماتور)

نحوه تحلیل نتایج

پس از انجام آزمونهای گازکروماتوگرافی و فورفورال لازم است مقادیر مطلق و نرخ رشد دو-فورفورال و دی اکسید کربن را با مقادیر ذکر شده در جداول یک تا دوازده مقایسه نمود. تحلیل نتایج مطابق جدول سیزده می‌باشد.

جدول سیزده: تعیین وضعیت تخریب عایق کاغذی ترانسفورماتور و تخمین عمر از دست رفته با توجه به مقادیر دو-فورفورال و دی اکسید کربن

مقادیر مطلق و نرخ رشد دو=فورفورال و دی اکسید کربن	وضعیت تخریب عایق کاغذی	تخمین عمر
کمتر از صدک نودم	کم	عمر واقعی ترانسفورماتور کمتر از مدت زمان بهره برداری است.
بین صدک نودم و نود و هشتم	متوسط	عمر واقعی ترانسفورماتور برابر با مدت زمان بهره برداری است.
بیشتر از صدک نود و هشتم	زیاد	عمر واقعی ترانسفورماتور بیشتر از مدت زمان بهره برداری است.

در صورتی که وضعیت تخریب عایق کاغذی مربوط به مقادیر مطلق و نرخ رشد دو- فورفورال و دی اکسید کربن همخوانی نداشته (به عنوان مثال یکی وضعیت تخریب کم و دیگری وضعیت تخریب متوسط را نشان دهد)، بدترین حالت در نظر گرفته می شود.

نوع و زمان انجام پایشهای آتی

جدول چهارده: پایش ترانسفورماتور با توجه به وضعیت تخریب عایق کاغذی

وضعیت تخریب عایق کاغذی	نوع پایش	زمان انجام آزمونها
کم	پایه	هر یک تا دو سال
متوسط		
زیاد	پایه	هر شش ماه
	تکمیلی	

توضیحات جدول:

پایش پایه: انجام آزمونهای گازکروماتوگرافی و فورفورال

پایش تکمیلی:

۱) شناسائی عیوب احتمالی ترانسفورماتور با استفاده از استاندارد: **IEC**60599

۲) انجام آزمونهای ذیل:

– آب محلول در روغن

– اسیدیته

– شمارش ذرات معلق

– اندازه گیری مقدار مواد بازدارنده موجود در روغن (برای روغنهای حاوی مواد بازدارنده)

– اندازه گیری مقدار پسیواتور موجود در روغن (برای روغنهای حاوی افزودنی پسیواتور)

مثال عملی از نحوه استفاده از استاندارد

مقادیر دی اکسید کربن و دو–فورفورال برمبنای آزمونهای گازکروماتوگرافی و فورفورال انجام شده برروی یک دستگاه ترانسفورماتور اصلی نیروگاهی ۲۵ ساله و ۴۰۰ MVA با روغن فاقد مواد بازدارنده و وضعیت تخریب عایق کاغذی ترانسفورماتور و تحلیل نتایج، مطابق جداول پانزده و شانزده می باشد:

جدول پانزده: تعیین وضعیت تخریب عایق کاغذی یک دستگاه ترانسفورماتور اصلی نیروگاهی

شاخص پیری	مقدار مطلق در تاریخ ۹۳/۲/۱۵ (ppm)	مقدار مطلق در تاریخ ۹۳/۸/۲۰ (ppm)	نرخ رشد سالانه (ppm/year)
2FAL	**1.5**	**1.8**	**0.59**
وضعیت تخریب عایق کاغذی (مطابق جدول یک)	کم	کم	متوسط
CO_2	**7000**	**8750**	**3452**
وضعیت تخریب عایق کاغذی (مطابق جدول هشت)	متوسط	متوسط	زیاد

جدول شانزده: تخمین عمر و تعیین اقدامات آتی در خصوص ترانسفورماتور

وضعیت تخریب عایق کاغذی	تخمین عمر	نوع پایش	اقدامات / آزمونهای آتی	زمان انجام آزمونها
زیاد	عمر واقعی ترانسفورماتور بیشتر از مدت زمان بهره برداری است.	پایه و تکمیلی	عیب یابی ترانسفورماتور با استفاده از استاندارد IEC۶۰۵۹۹	در اسرع وقت و تکرار هر شش ماه
			گازکروماتوگرافی فورفورال آب محلول در روغن اسیدیته شمارش ذرات معلق	

نتیجه گیری

به کمک روشهای ذکر شده در این استاندارد تنها می توان فهمید عمر واقعی ترانسفورماتور کمتر، مساوی یا بیشتر از مدت زمان بهره برداری خود است، لیکن تعیین مقدار درجه پلیمریزاسیون عایق کاغذی (**DP**) و تخمین عمر باقیمانده ترانسفورماتور (که در برخی از مقالات و تحقیقات بدان اشاره شده است) با استفاده از این استاندارد ممکن نیست.