



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Transformatörlerde kazan kayıplarının azaltılmasında en uygun yatay şönt eleman boyutu ve konumunun parametrik sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi

Investigation of the optimal dimension and location of horizontal shunts in transformers with parametrical finite element analyses

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Aytaç ÇINAR

ORCID: 0000-0002-1655-4281

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çınar M. A., “Transformatörlerde kazan kayıplarının azaltılmasında en uygun yatay şönt eleman boyutu ve konumunun parametrik sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 729-736, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.438023

Transformatörlerde Kazan Kayıplarının Azaltılmasında En Uygun Yatay Şönt Eleman Boyutu ve Konumunun Parametrik Sonlu Elemanlar Analizleri ile İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mehmet Aytaç ÇINAR*

İzmit Meslek Yüksekokulu, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 02.10.2016 ; Kabul/Accepted : 26.08.2017)

ÖZ

Manyetik şönt kullanımı transformatörlerde meydana gelen kazan kayıplarının azaltılmasında etkin bir yöntemdir. Bu şönt elemanların kazan duvarlarının iç yüzeyine dikey olarak yerleştirilmesi, kazan kayıplarını önemli oranda azaltması sebebiyle transformatör üreticileri tarafından yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, şönt elemanların yatay biçimde kullanılması durumu değerlendirilmekte ve en uygun şönt eleman boyutu ve konumunun belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla 1250kVA gücünde düşük kayıplı bir dağıtım transformatörü incelenmiştir. Öncelikle, transformatörde meydana gelen kazan kayıpları benzetim çalışmaları ile belirlenmiş ve deneysel ölçümler ile doğrulanmıştır. Ardından kazan kayıplarını etkin biçimde azaltmak için yatay şönt elemanların en uygun boyut ve konumunun belirlenmesi amacıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, göz önünde tutulan diğer kriterlere de bağlı olarak kazan kayıplarının yaklaşık %80 oranında azaltılabildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, kazan kaybı, yatay manyetik şönt, sonlu elemanlar analizi.

Investigation of the Optimal Dimension and Location of Horizontal Shunts in Transformers with Parametrical Finite Element Analyses

ABSTRACT

Magnetic shunting is an efficient way to reduce stray losses in transformer tank walls. Due to the vertical placement of these shunts inside the tank walls are greatly reduce these losses, this method are widely used by transformer manufacturers. In this study, authors are focused on horizontal shunting method and optimal dimensions and locations of these shunts are investigated. A 1250kVA high efficient distribution transformer is studied. First, stray losses on tank walls were calculated by simulations and obtained results were verified by measurements. Then, a number of analyses were conducted parametrically to obtain the optimal position and dimensions of the horizontal shunts. Analysis results show that, considering the other important issues such as cooling efficiency of tank walls, stray losses on tank walls are reduced by 80%.

Keywords: Transformer, stray loss, horizontal magnetic shunt, finite element analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Transformatörler elektrik iletim ve dağıtım şebekesinde önemli görev üstlenen şebeke bileşenlerinden biridir. Anma yükündeki çalışma verimleri %98-99 düzeyinde olmasına karşın transformatörler, enerji şebekesinde yüz binler ile ifade edilen sayıları sebebiyle şebekede meydana gelen toplam güç kayıplarının üçte birini oluşturmaktadır. Bu durum transformatörleri kayıplara neden olan ikinci büyük bileşen haline getirmektedir.

Transformatörlerin çalışması esnasında meydana gelen güç kayıpları boşa çalışma kayıpları ile yükte çalışma kayıplarının toplamı biçiminde ifade edilmektedir. Yükten bağımsız olduğu kabul edilen boşa çalışma kayıplarının aksine yüklü çalışma kayıpları yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Yük

kayıpları transformatörün faz sargılarında meydana gelen I²R kayıpları, sargılarda ortaya çıkan eddy akımlarının meydana getirdiği kayıplar ile transformatörün metal yapısal bileşenlerinde meydana gelen eddy akımlarının oluşturduğu kayıpların toplamı biçiminde hesaplanmaktadır.

Transformatörün başta kazan duvarları olmak üzere metal yapısal bileşenlerinde ortaya çıkan eddy kayıpları toplam yüklü çalışma kaybının %20-50'si düzeyindedir [1]. Bu kayıpların çok büyük miktarı sargılarda meydana gelen kaçak akıların kazan duvarlarında oluşturduğu ve kazan kaybı olarak da adlandırılan güç kayıplarındır. Literatürde, transformatörlerin kazan kayıplarının hesaplanması, azaltılması ve çeşitli sayısal yöntemler ile analizi çalışmalarına yoğunlukla rastlanmaktadır. Bunun yanı sıra kaçak akıların nüve tutucu elemanlar [2] ve iletken bağlantılarının gerçekleştirildiği bağlantı kutuları

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : aytac@kocaeli.edu.tr

[3] gibi yapısal elemanlar ile çoğunlukla kazan kapağı üzerine yerleştirilen buşinglerin bağlantı noktaları [4-5] gibi kısımlarda bölgesel olarak meydana getirdiği güç kayıpları da literatürde incelenmektedir.

Kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıpları transformatörün sargı akımları, bağlı kısa devre gerilimi, sargı yapısı, sargılar ile kazan duvarları arasındaki uzaklık gibi fiziksel ve elektriksel parametrelere ek olarak kazanın üretiminde kullanılan malzemenin elektromanyetik özelliklerine de bağlıdır. Kazan duvarlarının iç yüzeyine manyetik özellikli olmayan malzemeler ile ekranlama uygulamasının yanı sıra manyetik özellikli malzemeler kullanılarak imal edilen şönt elemanların kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilmesi ile de kazan kayıplarının önemli düzeyde azaltılması mümkün olmaktadır.

Literatürde kazan kayıplarını konu alan çalışmaların çok büyük kısmının, ortaya çıkan kayıpların büyüklüğü sebebiyle güç transformatörleri odaklı olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Dağıtım transformatörleri için gerçekleştirilen az sayıdaki çalışmadan biri olan [6]'da 50kVA gücündeki bir dağıtım transformatörünün kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların alüminyum ekranlama uygulanarak azaltılması incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar, kazan kayıplarının %50 oranında azaltıldığını göstermektedir. [7]'de, ekranlama amacıyla kullanılan alüminyum malzemenin kayıplar üzerine etkisi 500kVA gücündeki bir transformatör yardımıyla değerlendirilmektedir. Teknik analizlere ek olarak gerçekleştirilen ekonomik analizler, ekranlama yönteminin küçük güçlü transformatörler için uygulanabilir olmadığını göstermektedir. [8]'de ise ekranlama ve manyetik şönt uygulanması yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, kazan kayıplarının azaltılmasında şönt uygulamasının ekranlama yöntemine kıyasla daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Literatürde manyetik şönt uygulamalarının incelendiği çalışmaların tamamına yakınında bu elemanlar kazan duvarının iç yüzeyine dikey konumda yerleştirilmektedir. Yazarlar tarafından [9]'da, dikey olarak yerleştirilen şönt elemanların en uygun konum ve boyutunun belirlenmesine yönelik bir yöntem geliştirilmiştir. Çalışmada boyutları ve konumu bu yöntem ile belirlenen şönt elemanların kullanımı ile kazan kayıplarının %91.43, transformatörün toplam yüklü çalışma kayıplarının ise %14.9 oranında azaltıldığı görülmektedir.

Dikey şönt uygulamalarının aksine, literatürde yatay şönt uygulamasının incelendiği sadece birkaç çalışma bulunmaktadır. [10-11]'de şönt elemanların yatay olarak sargı ile boyunduruk arasına yerleştirilmesi durumu incelenmektedir. Bu çalışmalarda ağ modeline dayanan bir sayısal yöntem oluşturulmuş ve bu yöntem yatay şöntlerin kaçak akılara olan etkisinin hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. [12]'de sargılar ile nüve arasına yatay olarak yerleştirilen şönt elemanlar ile nüve tutucu elemanlar ve kazan duvarlarına sirayet eden kaçak akının

oluşturduğu kayıpların sırasıyla %49.6 ve %25.8 oranında azaltılması sağlanmıştır. [13]'te ise şönt elemanların yatay olarak kazan duvarının iç yüzeyine yerleştirilmesi durumu incelenmektedir. Çalışmada 200MVA gücünde bir güç transformatörü için yatay ve dikey şönt uygulamaları güç kayıplarındaki azalma ve toplam ilave şönt ağırlığı bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmada sadece uzun yan duvarlara yatay şönt elemanlar yerleştirildiği, kısa yan duvarlarda ise alışlagelen dikey şönt elemanların kullanıldığı görülmektedir. Sonuç olarak yatay şönt elemanların dikey şönt eleman uygulanması yöntemi kadar etkin olduğu, bununla birlikte yatay şöntlerin ağırlığının %25 daha az olduğu vurgulanmaktadır.

2015 yılında yürürlüğe giren ve 2017 yılında revize edilen EN 50588-1 standardı ile transformatörlerde izin verilen boşa ve yükte çalışma kayıplarının sınır değerleri yeniden düzenlenmiştir. Yerini aldığı standart ile karşılaştırıldığında bu düzenleme ile transformatörün gücüne bağlı olarak izin verilen boşa ve yükte çalışma kayıplarının sınır değerleri sırasıyla %42.50 ve %21.43'e varan oranlarda azaltılmıştır. Bu durum özellikle transformatör üreticileri için kayıplara neden olan her bileşenin değerlendirilmesi ve kayıpların azaltılmasının önemini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, transformatörlerin kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıplarının azaltılması amacıyla şönt elemanların yatay olarak konumlandırılması yöntemi değerlendirilmektedir. Bu amaçla, 1250kVA gücünde, 34.5/0.4kV gerilim düzeyinde ve 50Hz frekanslı bir dağıtım transformatörü incelenmiştir. Çalışmada transformatörün kazan duvarları üzerinde meydana gelen kayıplar benzetim çalışmaları ile hesaplanmış ve elde edilen kayıp değeri deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Ardından bu kayıpların etkin biçimde azaltılması amacıyla kullanılacak olan yatay şönt elemanların en uygun boyutunun ve en uygun konumunun belirlenmesi amacıyla sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla parametrik analizler gerçekleştirilmiştir.

2. EDDY KAYIPLARININ HESAPLANMASI (CALCULATION OF EDDY LOSSES)

Transformatörlerin faz sargılarında meydana gelen kaçak akılar kazan duvarları başta olmak üzere transformatörün metal yapısal bileşenleri üzerinde güç kayıplarına sebep olmaktadır. Bu kayıplar bileşenler üzerinde bölgesel olarak yüksek sıcaklıklar meydana getirerek transformatörün yaşlanmasını hızlandırmakta ve zaman zaman arızalara yol açmaktadır.

Bu kayıpların doğru biçimde hesaplanabilmesi, kayıpların azaltılması için en uygun yöntemin uygulanabilmesi amacıyla önem taşımaktadır. Metal bileşenlerin elektromanyetik özellikleri göz önünde tutulduğunda meydana gelen güç kayıplarının sayısal olarak hesaplanmasının kolay olmadığı görülmektedir. Bu sebeple, oluşturulan üç boyutlu modeller ve sonlu elemanlar analizi gibi matematiksel yöntemler bu

kayıpların hesaplanabilmesinde kolaylıklar sağlamaktadır..

Transformatör modelinin zaman domeninde gerçekleştirilen üç boyutlu analizinde,

$$\vec{B}=\nabla\times\vec{A} \quad (1)$$

$$\nabla\times\vec{H}=\vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla\times\frac{1}{\mu}(\nabla\times\vec{A})=\vec{J}-\sigma\frac{\partial\vec{A}}{\partial t} \quad (4)$$

eşitliklerinden faydalanılmaktadır. Bu eşitliklerde; \vec{H} manyetik alan şiddeti, \vec{J} akım yoğunluğu, μ geçirgenlik, σ iletkenlik, \vec{E} elektrik alan şiddeti, \vec{B} manyetik alan yoğunluğu ve \vec{A} manyetik vektör potansiyelini simgelemektedir.

Kaçak akının metal bileşen üzerinde etki ettiği deri kalınlığı,

$$\delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\sigma}} \quad (5)$$

olarak ifade edilmektedir. Bu değer malzemenin elektromanyetik özelliklerine önemli oranda bağlıdır. 50Hz'lik şebeke frekansında bu kalınlık değeri milimetre düzeyindedir. Transformatörü oluşturan yapısal bileşenlerin boyutlarıyla kıyaslandığında çok küçük olan bu değer sebebiyle, sonlu elemanlar yönteminin uygulanmasında çok yoğun ağ yapısına ve dolayısıyla çok fazla sayıda sonlu elemana gereksinim duyulmaktadır. Bu ihtiyaç beraberinde yüksek işlemci kapasitesini gerektirmekte ve çözüm süresini uzatmaktadır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla kazan duvarının modellenmesinde yüzey empedans yöntemi kullanılmaktadır. Bu sayede kazan yapısında oluşturulan sonlu eleman sayısı ve çözüm süresi önemli ölçüde azalmaktadır.

Buradan yola çıkarak metal yapısal bileşenlerde meydana gelen güç kayıplarının değeri;

$$P=\iint_S\sqrt{\frac{\omega\mu\mu_0^2}{2\sigma}}ds \quad (6)$$

biçiminde hesaplanmaktadır.

3. İNCELENEN TRANSFORMATÖR (STUDIED TRANSFORMER)

EN50588-1 standardı ile düşük kayıp sınıflarındaki dağıtım transformatörleri için izin verilen en yüksek boşa ve yükte çalışma kayıp sınır değerleri düzenlenmektedir. Bu gerekliliklerin karşılanabilmesi amacıyla, transformatörün üretiminde düşük özgül kayıp değerine sahip nüve malzemesi kullanılması, iletken kesitine bağlı olarak sargı direncinin azaltılması ve modern üretim tekniklerinin kullanılmasına ek olarak kazan kayıplarının azaltılması da önem taşımaktadır.

Bu çalışmada 1250kVA gücünde, 34.5/0.4kV gerilim seviyesinde, 50Hz frekanslı ve Dyn11 bağlantı grubundaki bir düşük kayıplı dağıtım transformatörü incelenmiştir. AA0AK sınıfı gerekliliklerine uygun olarak tasarlanan transformatörde nüve tasarımı ve üretiminde H0-DR tip düşük kayıplı nüve malzemesi, primer ve sekonder sargıların üretiminde ise bakır iletken kullanılmıştır.

Transformatörün aktif kısmına ilişkin görünüm Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. İncelenen transformatör (Studied transformer)

4. EDDY KAYIPLARININ ANALİZİ VE AZALTILMASI (STRAY LOSS ANALYSES AND LOSS REDUCTION)

Transformatörün kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıplarının başlıca sebebi sargı akımlarının meydana getirdiği manyetik alandan kaynaklanan ve kazan duvarlarına sirayet eden kaçak akılardır. Bu kayıpların büyüklüğü faz sargıları ile kazan duvarları arasındaki mesafeyle ters orantılı olarak değişmektedir [9]. Bununla birlikte, kayıpları azaltmak amacıyla kazan boyutlarının büyütülerek bu mesafenin artırılması toplam kazan hacmini artıracağından dolayı kullanılan yağ miktarını ve toplam ağırlığı da artırmaktadır. Bu sebeple kazan kayıplarının azaltılması amacıyla manyetik şönt eleman uygulaması başta olmak üzere uygulanan yöntemler büyük önem kazanmaktadır.

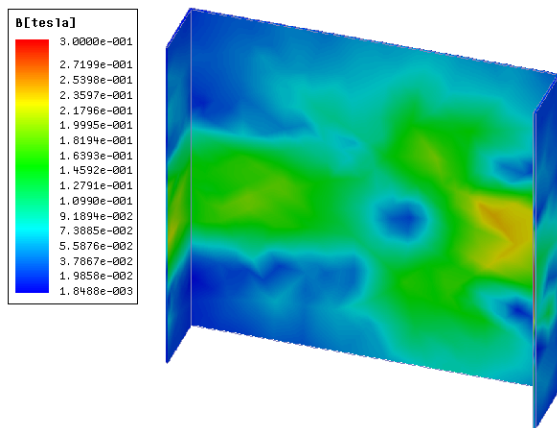
Bu çalışma ile en uygun yatay şönt eleman boyutlarının ve konumunun belirlenmesi hedeflenmektedir. Uygulanan yöntemin etkinliğinin belirlenmesi için öncelikle kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıplarının değerinin yüksek doğruluk ile elde edilmesi gerekmektedir. Önceki bölümde parametreleri verilen dağıtım transformatörü için kazan duvarlarında ortaya çıkan kayıplar benzetim çalışmaları ile hesaplanmış, elde edilen sonuçlar deneysel ölçümler ile doğrulanmıştır.

Kazan kayıplarının benzetim yoluyla hesaplanması amacıyla nüve, sargılar ve kazan duvarlarının üç boyutlu modellerinden faydalanılmaktadır. Kaçak akılar transformatörün yapısında mevcut olan nüve tutucu

elemanlar ve diğer metal bileşenler üzerinde de güç kayıpları meydana getirmektedir. Bununla birlikte, kazan duvarları ile kıyaslandığında bu bileşenlerde meydana gelen kayıpların çok küçük olması sebebiyle modelleme aşamasında bu bileşenler ihmal edilmiş ve modele dahil edilmemiştir. Elektromanyetik analizler için gerekli olan işlemci gücünü ve çözüm süresini azaltmak amacıyla transformatör kazanı duvarları düz levha olarak modellenmiş, dalga duvar yapısı göz ardı edilmiştir. Kazan malzemesi olarak elektriksel iletkenliği $\sigma = 5e6$ S/m ve bağıl geçirgenliği $\mu_r = 500$ olan düşük karbon içeriğe sahip demir malzeme tanımlanmıştır. Kazan kayıplarının hesaplanması için transformatörün kısa devre çalışmasının benzetimi gerçekleştirilmiştir. Tüm elektromanyetik analizler ANSYS Maxwell v16.0 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kaçak akıların kazan duvarlarında meydana getirdiği güç kayıpları benzetim çalışması sonucunda 1460.2W olarak hesaplanmaktadır. Bu değer kazan yan duvarları ile üst kapak ve kazan tabanında meydana gelen toplam kayıp değeridir. Analiz sonuçları bu kaybın %95'inin kazan duvarlarında meydana geldiğini göstermektedir. Transformatörün kazan tabanında meydana gelen kayıp değeri ihmal edilebilir düzeydedir. Transformatörlerde kazan kapağında meydana gelen güç kayıplarının ise başlıca nedeni yüksek akım taşıyan iletkenlerin buşing bağlantı noktalarında meydana getirdiği kayıplardır. Kapağın iç yüzeyine şönt eleman yerleştirmek yapısal sebeplerden dolayı mümkün olmadığından dolayı bu kayıpları azaltmak için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Yazarlar tarafından [4]'te açıklanan yöntem bu çalışmada incelenen transformatöre uygulanmış olup, kapakta meydana gelen kayıpların da göz ardı edilebilecek seviyeye düşürülmesi mümkün olmuştur.

Şekil 2'de kazan duvarlarında meydana gelen akı yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 2. Kazan duvarlarında meydana gelen akı yoğunluğu dağılımı (Flux distribution on tank walls)

Elde edilen benzetim sonuçlarının doğrulanması amacıyla deneysel ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim sürecinde, transformatörün modellenen her bir parçası üzerindeki güç kayıplarının ayrı ayrı belirlenmesi

mümkün olmaktadır. Buna karşın, deneysel olarak bu kayıpların doğrudan doğruya ölçümü mümkün değildir. Bu amaçla, transformatörün rutin testlerinden biri olan kısa devre çalışma deneyi EN60076-1 standardında belirtilen gerekliliklere uygun olarak iki kez gerçekleştirilmiştir. İlk olarak transformatöre kazan dışında kısa devre testi uygulanarak kısa devre kaybı ölçülmüştür. Ardından aynı ölçümler kazan içerisinde tekrarlanmıştır. İki ölçüm değeri arasındaki fark kazan duvarlarında meydana gelen kayıplar olarak kabul edilmiştir. Tüm ölçümler a-eberle PQ-Box 200 Mobil Enerji Analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

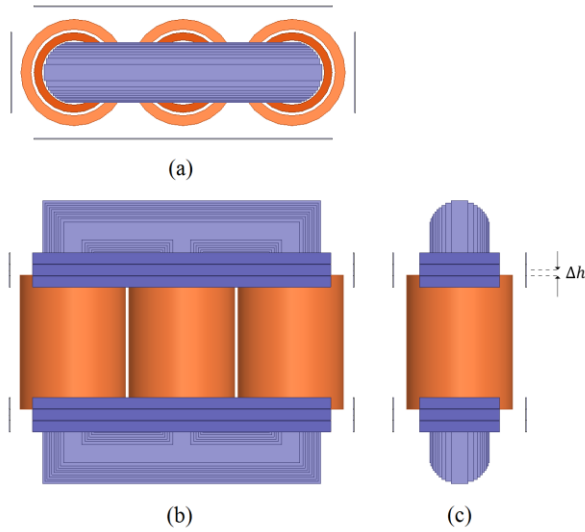
Çizelge 1'de benzetim ve test sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Çizelge 1. Kazanda meydana gelen güç kayıpları (Power losses on tank walls)

| Benzetim (W) | Deneysel ölçüm (W) | Hata oranı (%) |
|--------------|--------------------|----------------|
| 1460.2 | 1378.1 | 5.62 |

Literatürde yer alan araştırmalar kazan duvarları içerisine dikey olarak yerleştirilen manyetik şönt elemanlar ile kazan duvarlarında meydana gelen eddy kayıplarının önemli ölçüde azaltılabildiğini göstermektedir. Bu doğrultuda, kayıpları en etkin düzeyde azaltacak olan en küçük ve en büyük dikey şönt eleman boyutlarının belirlenmesine yönelik olarak [9]'da yazarlar tarafından geliştirilen bir yöntem önerilmektedir. Buna karşın, özellikle hermetik kazanlı transformatörlerde geniş bir yüzey alanına sahip olan dikey şönt elemanların kullanılması sonucunda kazan içerisindeki yağ sirkülasyonu engellenmekte ve dalga duvar yapısının soğutma kapasitesi azalmaktadır. Yatay şönt elemanların kullanılması durumunda ise üst ve alt şönt paketler arasındaki boş alan sebebiyle kazan içerisindeki yağ sirkülasyonu mümkün olmaktadır. Bu sebeple yatay şönt kullanımı dikey şönt uygulamasına göre avantajlı olarak görülmektedir.

Bu çalışmada, parametrik olarak gerçekleştirilen analizler yardımıyla en uygun yatay şönt eleman boyutunun ve konumunun belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla kazanın uzun yan duvarları için 50*1340*3mm, kısa yan duvarları için ise 50*360*3mm boyutlarında I-biçimli şönt elemanlar tanımlanmıştır. Bu elemanların genişlik ve kalınlık değerleri [9]'da yazarlar tarafından belirlenen yöntem esas alınarak belirlenmiştir. Bu elemanların ikili, üçlü ve dörtlü paketler halinde bir araya getirilerek kullanılması ile kazan kayıpları üzerinde meydana gelen değişimlerin izlenmesi ve en etkin yatay şönt yüksekliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bu paketler kazan duvarlarının iç yüzeyinde faz sargılarının üst ve alt kenarlarına karşılık gelen bölgelerine simetrik olarak yerleştirilmek suretiyle analiz edilerek en etkin konumun da belirlenmesi öngörülmüştür.



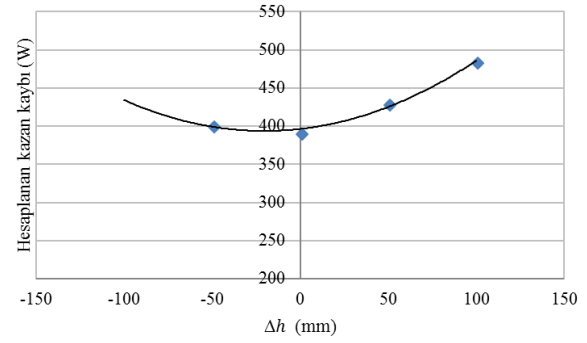
Şekil 3. Transformatör modelinin (a) Üstten, (b) Önden, (c) Yandan görünümü (a) Top, (b) Front, (c) Rear view of the transformer model)

Kazan duvarlarının iç yüzeyinde bu elemanların yerleştirilmesi için öngörülen yüzeyin sınırlarının belirlenmesinde de [9]'da açıklanan yöntem esas alınmıştır. Şekil 3'te örnek olarak yukarıda boyutları verilen I-biçimli şönt elemanların üçlü paketler halinde kazan duvarlarının iç yüzeyinde sargıların üst ve alt kenarlarına karşılık gelen kısımlara yerleştirilmesi durumu gösterilmektedir. Burada Δh değeri şönt paket yüksekliğinin orta noktası ile faz sargısının bitimi arasındaki uzaklığı tanımlamaktadır. Şekilde kazan duvarları gösterilmemektedir.

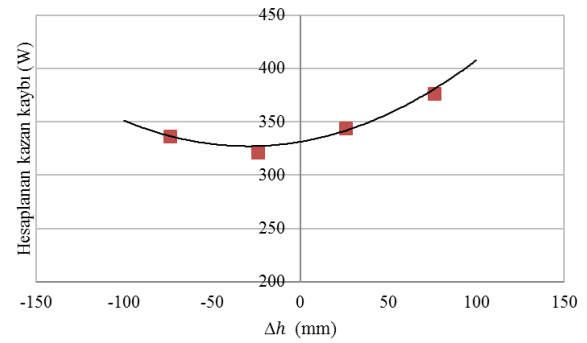
Şekil 4-6'da, I-biçimli şönt elemanların sırasıyla ikili, üçlü ve dörtlü paketler halinde kullanılması durumları için Δh değerine bağlı olarak kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların değişimi gösterilmektedir.

Buna göre, her üç şönt kombinasyonu için kazan kayıplarında görülen minimum değerlerin $-50\text{mm} < \Delta h < 0$ aralığında elde edildiği görülmektedir. Bu aralıkta kazan kayıplarının en küçük değerleri; ikili şönt paketler kullanılması durumunda $\Delta h=0\text{mm}$ için 391.34W , üçlü şönt paketler kullanılması durumunda $\Delta h=-25\text{mm}$ için 323.17W , dörtlü şönt paketler kullanılması durumunda ise $\Delta h=-50\text{mm}$ için 285.47W olarak hesaplanmıştır.

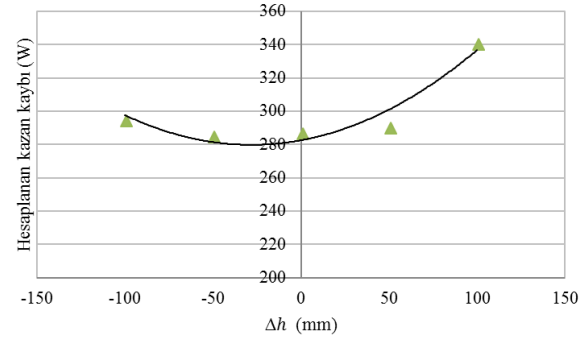
Δh 'in pozitif değer alması durumu Şekil 3(b-c) için şönt paketlerin y ekseninde sargı merkezinden uzaklaşmasını, Δh değerinin negatif değer alması durumu ise şönt paketlerin y ekseninde sargı merkezine yaklaşmasını tanımlamaktadır. Şönt paketlerin ikili, üçlü ve dörtlü olarak kullanılmasından bağımsız olarak her iki durumda da kazan kayıplarının değerinin artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4. İkili yatay şönt paketlerin konumuna bağlı olarak kazan kayıpları (Tank losses vs. location of double I-shaped horizontal shunts)

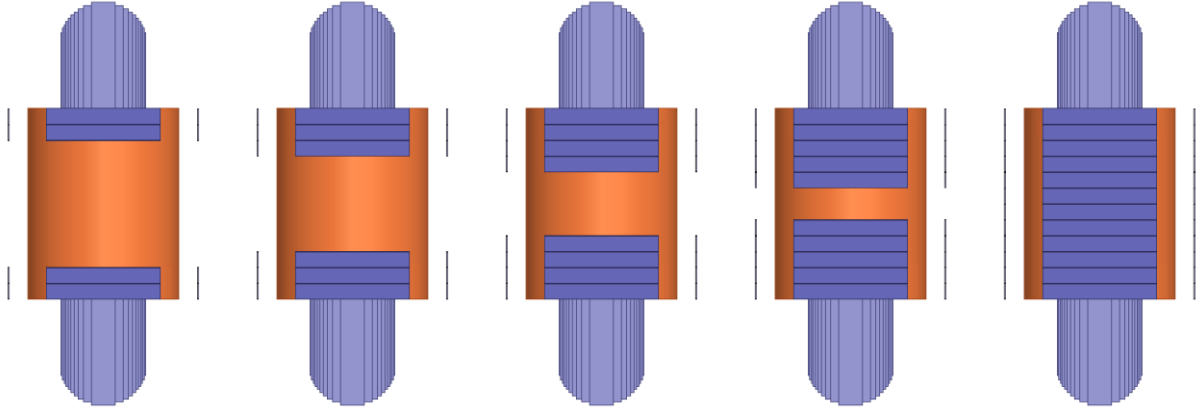


Şekil 5. Üçlü yatay şönt paketlerin konumuna bağlı olarak kazan kayıpları (Tank losses vs. location of triple I-shaped horizontal shunts)

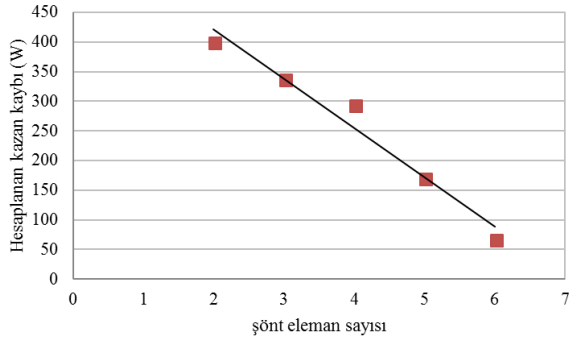


Şekil 6. Dörtlü yatay şönt paketlerin konumuna bağlı olarak kazan kayıpları (Tank losses vs. location of quadruple I-shaped horizontal shunts)

Şekil 4-6'da sonuçları verilen analizler için kazan duvarları üzerinde gözlenen akı dağılımları incelendiğinde, meydana gelen güç kayıplarının yoğunlukla kazan duvarlarının sargılara karşılık gelen yüzey alanı içerisinde meydana geldiği görülmektedir. Bu sebeple, sargılara karşılık gelen alana yerleştirilen yatay şönt paketlerin miktarına bağlı olarak kazan kayıplarının değişimi de Şekil 7'de gösterilen benzetimler ile incelenmiştir.



Şekil 7. Sargıya karşılık gelen tank yüzeyine yatay şönt elemanların yerleştirilmesi (Placement of horizontal shunts on tank walls corresponding to the phase windings)

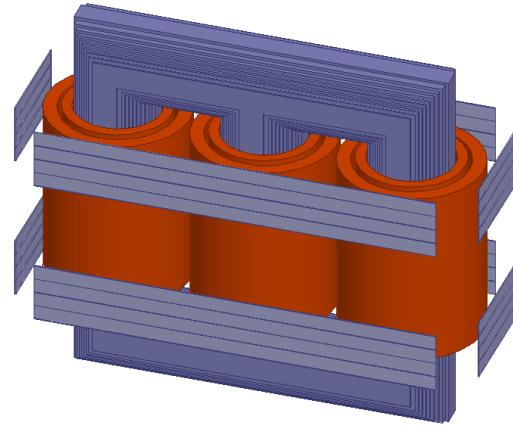


Şekil 8. Yatay şönt eleman sayısına bağlı olarak kazan kayıplarının değişimi (Tank losses vs. number of horizontal I-shaped shunt elements)

Bu benzetim çalışmaları sonucunda kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların değişimi her bir şönt paketindeki I-biçimli eleman sayısına bağlı olarak Şekil 8'de verilmektedir. Buna göre, kayıp değerlerinin şönt paketin toplam yüksekliğinin artışıyla ters orantılı olarak hızla azaldığı görülmektedir.

Kazan duvarlarının sargılara karşılık gelen yüzey alanının tamamıyla şönt elemanlar ile kaplanması durumunda kazan kayıplarının yaklaşık %95 oranında azaldığı hesaplanmaktadır. Bununla birlikte bu durum, önceki bölümlerde de bahsedilen kazan duvarlarının soğutma kapasitesini önemli ölçüde etkileyecektir. Bu sebeple Şekil 4-6'da farklı şönt yapıları için verilen analiz sonuçları göz önünde tutulduğunda kazan duvarı üzerinde faz sargılarının üst ve alt kenarlarına yakın olarak yerleştirilen ve aralarında yeterli boşluk bırakılan şönt yapıların arasında $\Delta h=-25\text{mm}$ konumuna yerleştirilen ve her birinde dört adet I-biçimli şönt eleman kullanılan paket yapısının en efektif sonuç verdiği değerlendirilmektedir.

Şekil 9'da bu durum için transformatörün üç boyutlu modeli gösterilmektedir.

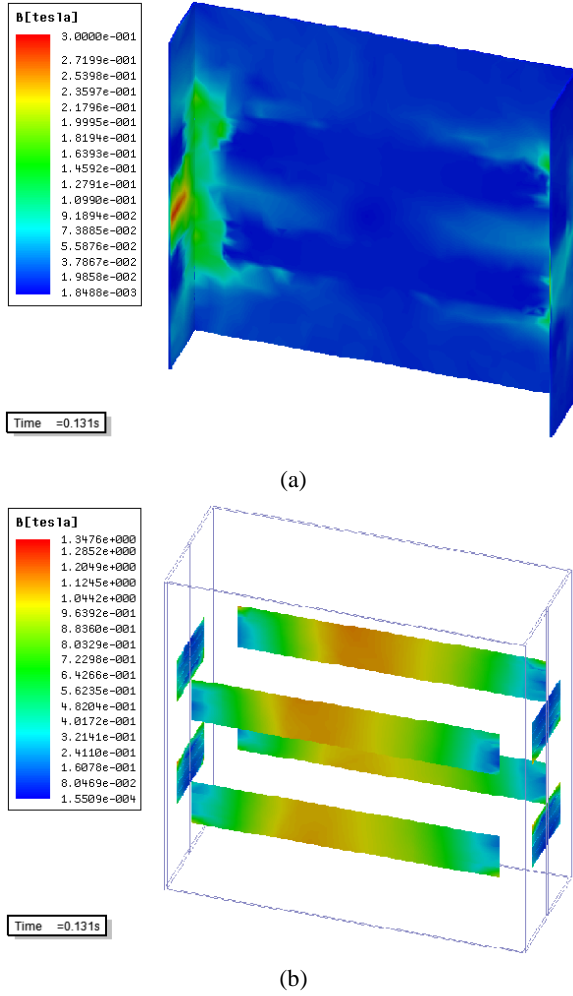


Şekil 9. $\Delta h=-25\text{mm}$ için dörtlü yatay şönt paketlerin yerleşimi (placement of quadruple horizontal shunt packages for $\Delta h=-25\text{mm}$)

Şekil 10(a)'da transformatörün kazan duvarları üzerinde meydana gelen akı dağılımı gösterilmektedir.

Şekil 2'de görülen akı dağılımı ile karşılaştırıldığında, kullanılan yatay şönt paketlerin kazan duvarları üzerinde faz sargılarına karşılık gelen yüzeylerdeki akı dağılımlarını önemli ölçüde engellediği görülmektedir. Şönt elemanların mevcut olmadığı yüzeylerde meydana gelen kayıp güç değeri ise 285.47W olarak hesaplanmaktadır. Bu durum, seçilen şönt eleman boyutlarının ve konumunun kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıplarının %80.45 oranında azaltılmasını sağladığını ortaya koymaktadır.

Benzetim çalışmalarında şönt elemanların tasarlandığı malzeme nüve üretiminde de kullanılan H0-DR tip nüve malzemesi olarak tanımlanmış olup bu elemanların öngörülen toplam ağırlığı yaklaşık 31.2kg olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 10. $\Delta h=-25\text{mm}$ için dörtlü yatay şönt paketler kullanılması durumunda, (a) kazan duvarları (b) şönt elemanlar üzerindeki akı dağılımları (Flux distribution of (a) tank walls, (b) quadruple shunt packages, for $\Delta h=-25\text{mm}$)

Şekil 10(b)'de ise yatay şönt paketler üzerinde meydana gelen akı yoğunluğu gösterilmektedir. Analiz sonuçları bu elemanlar üzerinde en yüksek akı yoğunluğu değerinin 1.1T civarında olduğunu göstermektedir. Bu malzemenin doyma indüksiyonu 1.7T düzeyinde olup, 1.1T indüksiyon değerine karşılık olarak için öngörülen 0.3W/kg kayıp değeri [14] şönt elemanlar üzerinde ortaya çıkan kayıpların göz ardı edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, transformatörlerin kazan duvarlarında meydana gelen eddy kayıplarının azaltılması amacıyla yatay şönt uygulaması için en uygun şönt paket boyutları ve konumunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla öncelikle prototip bir düşük kayıplı dağıtım transformatörünün kazan duvarlarında meydana gelen eddy kayıpları benzetim çalışmaları ile belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel ölçümler ile doğrulanmıştır.

Çizelge 2. Yatay şönt paketlerin kazan kayıplarına olan etkisi (Effects of the horizontal shunts on tank walls)

| | Kazan kaybı (W) | Şönt elemanlarda oluşan kayıplar (W) | Toplam kazan kaybı (W) |
|---------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------|
| Şönt eleman kullanılmaması durumu | 1460.2 | - | 1460.2 |
| Yatay şönt eleman kullanılması durumu | 285.47 | 7.61 | 293.08 |

Ardından farklı boyutlar ve konumlardaki yatay şönt paketleri için parametrik olarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilerek kazan duvarlarında meydana gelen güç kayıplarına olan etkileri incelenmiştir.

Kullanılacak yatay şönt paketin yüksekliğinin belirlenmesi faz sargılarının yüksekliğine ve kazan duvarlarının soğutma kapasitesine olan etkisine bağlı olarak değerlendirilmektedir. Kazan duvarının iç yüzeyinde sargıların üst ve alt kenarlarına karşılık gelen yüzeylere yerleştirilecek olan yatay şönt paket yüksekliğinin artması ile kayıpların giderek daha fazla oranda azaltılabildiğini göstermektedir. Bununla birlikte analiz sonuçları, kullanılacak yatay şönt paket yüksekliğinin sargı yüksekliğinin ortalama olarak %30'u kadar seçilmesinin kazan kayıplarının tatminkar düzeyde azaltılabilmesi için yeterli olduğunu göstermektedir.

Yatay şönt paket yüksekliğinin ise ortalama olarak %75'lik kısmının kazan duvarının sargıya karşılık gelen yüzeye yerleştirilmesinin yeterli olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumda sargıda meydana gelen kaçak akının büyük kısmının kazan duvarlarına sirayet etmesi şönt paketler tarafından engellenmektedir.

Bununla birlikte, literatürde yer alan çalışmaların sonuçları değerlendirildiğinde uygulamada yaygın şekilde kullanılmakta olan dikey şönt uygulamasının yatay şönt kullanımına kıyasla kazan kayıplarının azaltılmasında daha etkin sonuçlar ortaya koyduğu sonucuna varılmaktadır.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 7160183 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Prototip transformatörün imalatında ve deneysel çalışmalarda Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş. tarafından sağlanan imkanlar kullanılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Valkovic Z., "Some aspects of stray losses in large power transformers", *Applied Electromagnetics*, 36(25): 238-243, (2002).

- [2] Mokkapaty S.P.K., Weiss J., Schramm A., Magdaleno-Adame S., Schwarz H. and Olivares-Galvan J.C., "3D finite element analysis of magnetic shunts and aluminum shields in clamping frames of distribution transformers", *IEEE Int. Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*, Ixtapa-Mexico, 1-6, (2015).
- [3] Olivares Galvan J., Campero Littlewood E., Hernandez J., Escarela Perez R., and Adame S., "Evaluation of stray losses in throats of distribution transformers using finite element simulation", *Andean Region Int. Conf.*, Ecuador, 7-10, (2012).
- [4] Çınar M.A., Alboyacı B., Çürükova S., Sönmez O. ve Yapıcı R., "Reduction of eddy current losses around bushing holes on the top-plate of a high efficient transformer", *Sakarya Univ. Journal of Science*, 21(4): 691-697, (2017).
- [5] Kulkarni S., Olivares J., Escarela Perez R., Lakhiani V. and Turowski J., "Evaluation of eddy current losses in the cover plates of distribution transformers", *IEE Proc-Science Meas. and Tech.*, 151(1): 313-318, (2004).
- [6] Kirar M., "Study of stray losses reduction through finite element method", *IEEE India Conf.*, India, 1-4, (2013).
- [7] Olivares J.C., Canedo J., Moreno P., Driesen J., Escarela R. and Palanivasagam S., "Experimental study to reduce the distribution transformers stray losses using electromagnetic shields", *Electric Power Systems Research*, 63(1): 1-7, (2002).
- [8] Milagre A.M., Ferreira da Luz M.V., Cangane G.M., Komar A. and Avelino P.A., "3D calculation and modelling of eddy current losses in a large power transformer", *Int. Conf. on Electrical Machines*, Japan, 2282-2286, (2012).
- [9] Çınar M.A., Alboyacı B., Çürükova S., Sönmez O. ve Yapıcı R., "Calculation of optimum dimensions of magnetic shunt elements to reduce stray losses on transformer tank walls", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4): 1337-1346, (2017).
- [10] Djurovic N. and Monon J.E., "3-dimensional computation of the effect of the horizontal magnetic shunt on transformer leakage fields", *IEEE Trans on Magnetics*, 13(5): 1137-1139, (1977).
- [11] Djurovic N. and Monson J.E., "Stray losses in the step of a transformer yoke with a horizontal magnetic shunt", *IEEE Trans on Power Apparatus and Systems*, 101(8): 2995-3000, (1982).
- [12] Li L., Fu W.N., Ho S.L., Niu S. and Li Y., "Numerical analysis and optimization of lobe-type magnetic shielding in a 334 MVA single-phase auto-transformer", *IEEE Trans on Magnetics*, 50(11): 1-4, (2014).
- [13] Moghaddami M., Sarwat A.I. and deLeon F., "Reduction of stray loss in power transformers using horizontal magnetic wall shunts", *IEEE Trans on Magnetics*, 53(2): 1-7, (2017).
- [14] TRAN-COR H Grain Orients Electrical Steels, AK Steel, (2013).