

## Hava aralıkları eşit dağıtılmış şönt reaktör modellenmesi Modelling of the equally distributed air gapped shunt reactor

Ahmet Yiğit ARABUL<sup>1\*</sup>, Emre KURT<sup>2</sup>, Fatma KESKİN ARABUL<sup>3</sup>, İbrahim ŞENOL<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
arabul@yildiz.edu.tr, emre.kurt@outlook.com, fkeskin@yildiz.edu.tr, senol@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 05.09.2018,  
Kabul Tarihi/Accepted: 15.02.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 07.02.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.95826  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Elektrik enerjisi günümüzde vazgeçilmez bir yere sahiptir. Elektrik enerjisinin üretildiği tesislerden kullanım alanlarına kadar ulaşmasını sağlayan ise iletim ve dağıtım hatlarıdır. Ancak, uzun iletim hatlarındaki reaktif güç dengesinin sağlanamaması sonucunda iletilen enerji hem kalitesiz olur hem de taşıma sırasında oluşan kayıplar artar. Bu olumsuz durumların yaşanmaması için iletim hatlarının tamamlayıcı bir parçası olarak geliştirilen şönt reaktörler kullanılmaktadır. Şönt reaktörlerin bu işlevi en iyi şekilde yerine getirebilmesi için tasarım aşaması önemli bir yere sahiptir. Reaktör boyutu, hava aralığının toplam uzunluğu, bırakılan hava aralığı sayısı gibi önemli parametreler reaktörün endüktans değerini doğrudan etkilemektedir. Reaktörün endüktans değeri ise iletim hatlarındaki reaktif güç dengesini sağlamak adına yapılacak olan kompanzasyon işleminin sonucunu doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu çalışmada; hava aralıkları eşit dağıtılmış farklı hava aralık sayılarına sahip üç ve beş bacaklı nüve yapılı şönt reaktör tasarımı yapılmıştır. Tasarımlara ait benzetim çalışmaları, yüksek doğruluğa ve kararlılığa sahip Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Benzetim çalışmalarının sonuçları ile ekonomik analizlerin karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** İletim hatları kayıpları, Uzun iletim hatları kompanzasyonu, Şönt reaktör, Şönt reaktör modellenmesi, Sonlu elemanlar yöntemi.

### Abstract

Today, electrical energy has an indispensable place. The transmission and distribution lines deliver electrical energy from power plants to usage areas. However, as the reactive power balance in the long transmission lines cannot be achieved, the transmitted energy is both has poor quality and increases the transportation losses. Shunt reactors developed as an integral part of the transmission lines should be used to avoid these adverse events. Shunt reactors have an important place in the design phase in order to perform this function in the best way. Important parameters such as the reactor size, the total length of the air gap, the number of air gaps, directly affect the reactor's inductance value. The inductance value of the reactor is a factor that directly affects the result of the compensation process to ensure the reactive power balance in the transmission lines. In this study; three-legged and five-legged core shunt reactor designs are done with different air gap numbers and equally distributed air gapped. Simulation studies of the designs are done by using Finite Element Method with high accuracy and stability. A comparative evaluation of the results of simulation studies and economic analyzes are done.

**Keywords:** Transmission lines losses, Long transmission line compensation, Shunt reactor, Modeling of shunt reactors, Finite element method.

## 1 Giriş

İnsan toplumsal bir varlıktır. İnsanların birbirleriyle etkileşiminde ve ihtiyaçlarının giderilmesinde elektrik enerjisi hayati bir önem arz etmektedir. Gün geçtikçe artan dünya nüfusu ile elektrik enerjisi üretim ihtiyacı da gün geçtikçe artmaktadır. Üretilen elektrik enerjisinin kullanım alanlarına ulaştırılması iletim ve dağıtım hatları ile mümkün olmaktadır. Ancak, üretim tesislerinin kullanım alanlarına uzaklığı arttıkça, iletim hatlarının uzunluğu da artmaktadır. İletim hattının uzunluğunun artması da çeşitli problemleri beraberinde getirmektedir. Bu problemlerin bazılarının çözümü için reaktörler kullanılmaktadır. Reaktörler şebekede kullanım şekline göre paralel ya da seri bağlanabilmektedirler. Ayrıca, tek başına bağlanabildikleri gibi başka elemanlar eklenerek de bağlanabilirler.

Reaktörler birçok nedenle devreye endüktif reaktans sağlamak amacıyla kullanılırlar. Reaktörler; hata akımı sınırlandırılması, harmonik filtrelemek, VAR kompanzasyonu ve yük dengelenmesi vb. birçok işlemi gerçekleştirmek reaktörlerin kullanım amaçları arasındadır [1].

Yüksek gerilim iletim hatları, özellikle uzun olanlar, hafif yüklerde azımsanmayacak boyutta önde olan bir reaktif güç üretirler. Tersine, ağır yüklerde geri yönde reaktif güçleri absorbe ederler. Sonuç olarak; sistemdeki reaktif güç dengesini sağlayabilmek için, verilen işletme şartları için iletim veya dağıtım hattında mutlaka kompanzasyon uygulanmalıdır [2].

Ağır yükler altında reaktif yük dengesi negatiftir ve kapasitif kompanzasyon gerekmektedir. Bu genelde şönt kapasiteler kullanılarak gerçekleştirir. Bu durumun tersi olarak, hafif yüklerde güç dengesi pozitifdir ve endüktif kompanzasyon gereklidir. Bu da şönt reaktörler yardımıyla sağlanmaktadır [1],[3].

Hafif yüklenmiş iletim hatlarının sahip olduğu doğal kapasite iki tip aşırı gerilime neden olmaktadır. Bu gerilimler şönt reaktörler tarafından kontrol edilebilir.

Oluşan aşırı gerilimlerden ilki; hafif yükte yüklenmiş iletim hatlarının oluşturduğu ileri yöndeki kapasitif şarj akımının hattın endüktansından ve sistemin içinden geçmesi sonucu (Ferrati Etkisi) çalışma geriliminin hat boyunca hattın uzunluğuna bağlı olarak artmasıdır. Reaktör tarafından

\*Yazışılan yazar/Corresponding author

tüketilen geri yöndeki reaktif akım, önde olan kapasitif şarj akımını sönmüleyerek gerilim artışını azaltmış olur.

Oluşan aşırı gerilimlerden ikincisi; hattın kapasitesi ve doyuma girebilecek herhangi bir endüktansın etkileşimi ya da ferrezonanstanır. Örneğin, hat sonuna bağlanan bir iletim hattı işletmeye alındığında, hat sonunda oluşan gerilim transformator endüktansı ile etkileşime girerek aşırı gerilime sebep olan harmonikler oluşturmaktadır. Bu tip aşırı gerilimleri engellemek amacıyla şönt reaktörler tersiyer olarak sisteme bağlanırlar. Böylece, transformatorü doyuma sokacak gerilim değerine ulaşılması sağlanır bunun yanında transformator empedansına paralel olarak doyuma girmeyen bir endüktans bağlanmış olur [1],[4].

Zaman içinde çeşitli reaktör tasarımları yapılmıştır. Demir nüveli reaktörler transformatorler ile benzer yapıda üretilirler. Sekonder sargısı bulunmayan transformator de denilebilir. Şönt reaktörün reaktif güç sönmüleyebilmesi için manyetik devre relüktansının artırılması gerekir. İstenilen relüktans değerini elde etmek için dağıtılmış hava aralıkları yöntemi kullanılmaktadır. Nüve malzemesinin yüksek manyetik geçirgenliği nedeniyle relüktansın belirlenmesinde baskın olan hava aralığıdır. Endüktans değeri nüve manyetik geçirgenliğine çok bağlı değildir ve nüve doyumunu normal kararlı hal akımında gerçekleşmez [1].

Dağıtılmış hava aralığı saçak akılarının etkisini azaltmak amacıyla da kullanılır. Bu yöntemle sarımlardaki Eddy kayıpları da azalır ve amper-sarım verimi artar [1],[3].

Bu çalışmada, şönt reaktörün tasarımında kullanılan parametrelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları sonucunda etkileri incelenmiştir. Sonraki bölümde modellenen reaktörün tasarımın ait hesaplamalar sunulmuştur. Üçüncü bölümde, benzetim çalışmalarında kullanılan yöntem, endüktans hesabı, geçici rejim benzetim çalışmalarına ait sonuçlar ile ekonomik analiz sonuçları verilmiştir. Son bölümde ise yapılan analizler karşılaştırılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Geleneksel tasarım olan 3-bacıklı nüve yapısı ile daha verimli ve güncel olan 5-bacıklı nüve tasarımı anlatılmış, verilen tasarım bilgilerine istinaden yapılan benzetim çalışması ile iki nüve tipi arasındaki olumlu ve olumsuz yönler belirtilmiş ve karşılaştırmalı analizleri sunulmuştur.

## 2 Modellenen reaktörün tasarım ve yapısı

Şönt reaktörler tasarımının temel adımı, nüve yapısının belirlenmesidir. Şönt reaktörler nüve yapılarına göre 2 türde tasarlanmaktadır. Nüve yapısının belirlenmesinde reaktörün güç, nominal akım, nominal gerilim gibi değerler göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada, ülkemiz standartları ve hali hazırda kullanılmakta olan şönt reaktör yapıları esas alınarak reaktörün standart ve güç değerleri belirlenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, etiket değerleri 420 kV, 250 MVA olan 3-fazlı hava aralıklı nüveli şönt reaktör 3 ve 5 bacıklı olmak üzere iki farklı yapıda tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan reaktörlerin temel yapısı üzerinde, hava aralıkları sayıları değiştirilerek çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Şekil 1'de 3 bacıklı olarak tasarlanan şönt reaktörün temel nüve yapısı gösterilmiştir. Nüve boyutlandırılması ve tasarımında izlenecek adımlar ve kullanılan formüller bir sonraki bölümde açıklanacaktır.

## 2.1 Nüvenin tasarımı

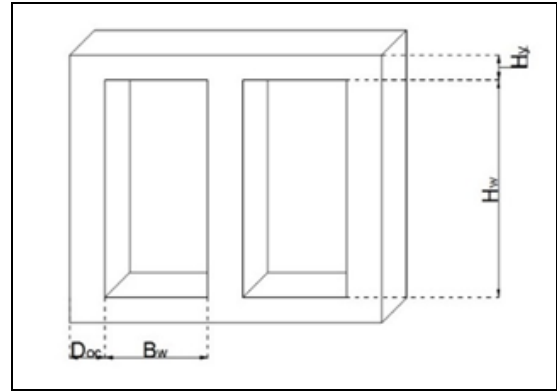
Bu bölümde, şönt reaktör tasarımında önemli bir rolü bulunan nüvenin tasarım adımları ve bu adımlarda kullanılan formüller açıklanmıştır. Ülkemizde bulunan iletim hatlarında kullanılan şönt reaktör etiket değerleri ve resmi şartnameler incelenerek nominal gerilim ve güç değerleri sırasıyla 420 kV ve 250 MVA olarak seçilmiştir. Kullanılan formüllerde  $V_e$  nominal gerilimi,  $I_e$  nominal akımı,  $f$  frekansı,  $\phi_m$  maksimum manyetik akıyı,  $K$  ve  $K_t$  yapıya bağlı olan sabitleri,  $Q_m$  reaktörün maksimum reaktif gücünü,  $L$  reaktörün endüktans değerini,  $N$  nüvenin sarım sayısını ifade eder.

$$L = \frac{V_e^2}{\omega \cdot Q} \quad (1)$$

$$K = 4.44 \cdot f \cdot 10^3 \cdot K_t \quad (2)$$

$$K_t = \left( \frac{Q_m}{I_e \cdot N} \right) \quad (3)$$

$$N = \sqrt{\frac{L}{\mu_0 \cdot \left( \frac{A_g}{l_g} \right)}} \quad (4)$$



Şekil 1. 3 bacıklı şönt reaktör nüve temel yapısı.

Figure 1. Basic structure of 3-legged shunt reactor core.

Sarım sayısı, reaktörün endüktansı ve  $A_g/l_g$  oranı kullanılarak hesaplanabilir. Bu formülde,  $A_g$  hava aralığı alanı ve  $l_g$  toplam hava aralığı uzunluğu değerlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada ( $A_g/l_g$ ) oranı enerji dağılım oranları dikkate alınarak 1.1 seçilmiştir.

$$A_g \cdot l_g = \frac{Q}{\left( \frac{\pi}{\mu_0} \cdot B_m \cdot f \right)} \quad (5)$$

Denklem 5 incelendiğinde,  $A_g$  ve  $l_g$ 'nin, şönt reaktörün reaktif gücü ( $Q$ ) ve maksimum manyetik akı ( $B_m$ ) değeri ile birebir ilişkide olduğu görülmektedir [5].  $B_m$  değeri kullanılan nüve malzemesine bağlı olarak seçilmeli ve hesaplamalar buna göre yapılmalıdır. İlgili değer nüve malzemesinin  $B/H$  eğrisinde görünen doyuma ulaşma değerinden küçük olarak seçilmelidir. Aksi takdirde nüve çalışma esnasında doyuma girecek ve şönt reaktör görevini gerçekleştiremeyecektir.

Denklem 5 ile birlikte belirlenen  $A_g/l_g$  değeri kullanılarak, toplam hava aralığı alanı ( $A_g$ ) ve toplam hava aralığı uzunluğu ( $l_g$ ) değerlerine ulaşılabilir. Bu değerlerin belirlenmesi tasarlanan nüvenin boyutlarında önemli etkiye sahiptir [5].

Denklem 5'in hesaplanmasından sonra bulunan  $A_g$  değeri ile birlikte nüve bacağına kesit alanı da bulunmuş olacaktır.  $A_g$  değeri bu şekilde hesaplanabileceği gibi Denklem 6'da belirtilen formül kullanılarak da hesaplanabilmektedir.

$$A_g = \frac{\Phi_m}{B_m} \quad (6)$$

$A_g$  değerinin hesaplanmasının ardından, nüve bacağına yarıçapı ( $d/2$ ) Denklem 7 kullanılarak hesaplanabilecektir.

$$A_g = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (7)$$

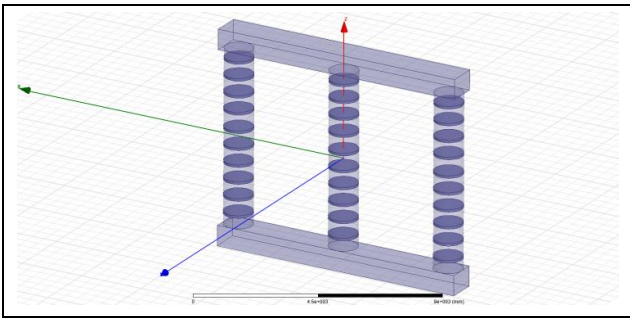
$$A_w = H_w \cdot B_w \quad (8)$$

Şekil 1'den de görülebileceği üzere tasarlanacak olan nüvenin pencere kısmı Denklem 8'de verilen formül kullanılarak hesaplanabilir. Denklem 8'de  $H_w$  ve  $B_w$  değerleri sırasıyla nüve penceresinin yüksekliği ve nüve penceresinin genişliğini ifade etmektedir.

Nüve penceresini oluşturan yükseklik ( $H_w$ ) ve genişlik ( $B_w$ ) değerlerinin birbirlerine oranı ( $H_w/B_w$ ), reaktör tasarımında verimlilik ve ekonomik kriterleri etkileyen bir parametredir ve bu değer daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde ilk tasarımda kullanılmak üzere 2.1 olarak seçilmiştir [5].

Bunlara ek olarak, sarım ve dolayısıyla endüktans değerini etkileyecek sabitler olan, sarım dolgu faktörü ( $K_u$ ) 0.6 ve akım yoğunluğu ( $J$ ) 3.2 A/mm<sup>2</sup> olarak seçilmiştir. Ayrıca, sarım dolgu faktörü ( $K_u$ ) nüve penceresine oturtulacak olan sargının konumun belirlenmesinde de önemli bir yere sahiptir.

Tüm hesaplamalar yapıldıktan sonra, tasarlanan şönt reaktörün temel nüve yapısını oluşturan parametreler belirlenmiş olmaktadır. Bu parametrelere ek olarak, nüvenin üst kısmında kalan bacak dikdörtgen şeklindedir ve bu dikdörtgenin kenarlarına içten teğet olarak dairenin çapı ( $d_y$ ), daha önce hesaplanan reaktörün sargı gelecek bacağına çapı ile aynı olmalıdır ( $D_{oc}$ ). Üst bacağına kalınlığı 5 bacaklı nüve tasarımı ile uyumlu olması açısından, 5 bacaklı nüvede hesaplanan değer ile aynı seçilmiştir. Tüm hesaplamalar yapıldıktan sonra 3-bacaklı nüve Şekil 2'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 2. Tasarlanan 3 bacaklı şönt reaktör nüve yapısı.

Figure 2. Structure of designed 3-legged shunt reactor core.

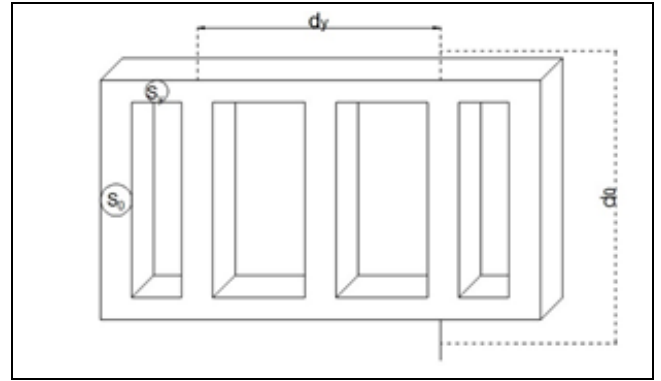
Türkiye Elektrik İletim AŞ'nin belirlediği şartnamede yer alan bilgilere göre, Türkiye'de iletim hatlarında kullanılan şönt reaktörler 5 bacaklı nüve yapısında olmalıdırlar. Bu nedenle, bu çalışmada da 3 bacaklı nüve yapısına ek olarak 5 bacaklı nüve de tasarlanmış ve benzetim çalışmasına tabi tutulmuştur.

5 bacaklı nüve tasarlanırken, 3 bacaklı nüve tasarımında kullanılan formüllere ek olarak, nüvenin kenarlarına eklenecek olan ilave bacakların tasarımı için gereken formüller Denklem 9 ve Denklem 10'da belirtilmiştir.

$$r_{ly0} = \frac{d_y}{d_0} \quad (9)$$

$$r_{ay0} = \frac{S_y}{S_0} \quad (10)$$

Denklem 9 ve 10'da verilen  $r_{ly0}$ ,  $r_{lyw}$  ve  $r_{ay0}$  parametreleri 5 bacaklı nüve tasarımlarında kullanılan oranlardır ve genellikle 2 ile 3 değerleri arasında seçilmektedirler [6]. Şekil 3'te verilen 5 bacaklı nüve yapısında denklemlerde belirtilen  $d_0$ ,  $d_y$ ,  $S_0$ ,  $S_y$  değerlerinin karşılıkları gösterilmiştir.



Şekil 3. Tasarlanan 5 bacaklı nüve yapısı.

Figure 3. Structure of designed 5-legged shunt reactor core.

Denklem 9 ve Denklem 10 kullanılarak yapılan oranlama işleminde elde edilen sonuçlar, Denklem 11'de yerine konulduğunda; 5 bacaklı nüve yapısının oluşması için temel 3 bacaklı nüveye eklenecek bacakların boyutlandırılması yapılmış olmaktadır. Belirlenen ölçülerde eklemeler yapıldığında, oluşturulması planlanan nüve yapısı ortaya çıkmış olacaktır [7].

$$L_{ol} = \frac{2r_{lyw}}{r_{ly0}} \quad (11)$$

Yukarıda belirtilen tüm hesaplamalar yapıldığında, 3 ve 5 bacaklı nüve yapısına sahip şönt reaktörlerin boyutlandırılması tamamlanmış olacaktır. Boyutlandırılması tamamlanan 3 ve 5 bacaklı şönt reaktörler karşılaştırmalı olarak Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. 3-bacaklı ve 5-bacaklı nüve parametreleri.

Table 1. Parameters of 3-legged and 5-legged core.

Parametreler	Sembol	Değer (3-bacaklı)	Değer (5-bacaklı)
Reaktif Güç	$Q$ [MVar]	250	250
Gerilim	$V_e$ [kV]	420	420
Akım	$I_e$ [A]	343.66	343.66
Reaktör Bacak Çapı	$D_{oc}$ [cm]	112	112
Pencere Genişliği	$B_w$ [cm]	330	330
Pencere Yüksekliği	$H_w$ [cm]	693	693

## 2.2 Reaktör sargılarının belirlenmesi

Şönt reaktör tasarımında kullanılacak olan sargının belirlenmesinde en önemli parametrelerden bir tanesi sargının endüktans değeridir. Sargının endüktans değeri nüve tasarımında da kullanıldığı için Denklem 1'de verilen formül kullanılarak hesaplanır. Endüktans değerinin formülü incelendiğinde, reaktif güç, nominal gerilim ve frekans değerlerinin sargı endüktansı üzerindeki etkisi görülmektedir.

Kullanılacak sargının boyutlandırılmasında, nüve penceresinin doluluk oranı ( $K_u$ ) değeri ve iletken kesiti değerleri belirleyici rol oynamaktadır. Denklem 12 kullanılarak hesaplanan pencere alanı, doluluk faktörü değeri ile çarpıldığında sargının nüve penceresinde kaplayacağı alan belirlenmektedir.

$$A_w = H_w \cdot B_w \quad (12)$$

Sargının kaplayacağı alanın belirlenmesinden sonra, Denklem 13'te hesaplanan kullanılacak bakır iletken kesiti değeri kullanılarak sargının boyutlandırılması sargı alanı değeri ve sarım sayısı göz önüne alınarak yapılmalıdır. Sargı kesitinin seçiminde iletkenler arasında bırakılacak boşluk ve iletken kalınlıklarının standartta belirtilen değerde olmasına dikkat edilmelidir.

$$A_{Cu} = \frac{I_e \cdot N}{K_u \cdot J} \quad (13)$$

Sarım sayısı değeri Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak, reaktör nüvesinde kullanılan hava aralığı sayısının değişimi ile birlikte, nüve geçirgenliği değeri azalacak buna bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu ve endüktans değerleri de azalacaktır. Aynı zamanda endüktans değerinin azalmasıyla çekilecek akım değeri de artacaktır ve mevcut sargı yetersiz durumda kalacaktır.

## 3 Benzetim çalışması

SEY, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlk olarak 1940'lı yıllarda önerildikten sonra 1950'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bu tarihten sonra, yöntem sürekli geliştirilmiş ve başta yapı analizi ile ilgili problemler olmak üzere pek çok alanda kullanılmıştır. Günümüzde, SEY mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak kabul edilmiştir. Bu bölümde de ilk olarak bu yöntemin kullanıldığı elektromanyetik benzetim çalışmaları yapılmıştır [8].

### 3.1 Benzetim çalışmasında kullanılan yöntem

Benzetim çalışmalarında, tasarlanan reaktör üzerindeki etkilerin gözlemlenebilmesi için Ansys Maxwell programı kullanılarak 3 boyutlu SEY analizi yapılmıştır.

Kullanılan analiz yönteminde, reaktör tamamıyla SEY kullanılarak tasarlanmış ve Eddy kayıpları ihmal edilmiştir. Magnetostatik denklemler endüktans hesabında kullanılmıştır. Kullanılan SEY'in güvenilirliği daha önce yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır [9]-[12]. Bu geçerlilik ve güvenilirliğe göre 3 boyutlu model oluşturulmuştur.

Denklem 14'te verilen Poisson Vektör denklemine göre, tasarlanan reaktöre ağ yöntemi uygulanmış (mesh) ve lineerlik sağlanmıştır[7], [13].

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (14)$$

Denklem 14'te  $A$  manyetik potansiyel vektörünü ve  $\mu_r$  bağlı geçirgenliği temsil etmektedir.

Akı yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğu gibi parametreler, manyetik potansiyel vektör hesaplandıktan sonra kolayca hesaplanabilmektedir. Aşağıda verilen denklemler kullanılarak enerji yoğunluğu ve ek olarak hava boşluğunda biriken enerjinin yarattığı endüktans değeri bulunabilmektedir.

$$w_m = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} \quad (15)$$

$$W_m = \iiint W_m \cdot dv \quad (16)$$

$$L = \frac{2W_m}{I_m} \quad (17)$$

Denklem 15, 16, 17'de verilen formüllerde kullanılan  $W_m$ ,  $w_m$ ,  $B$  ve  $H$  sırasıyla manyetik enerji, birim hacimdeki enerji yoğunluğu, manyetik akı vektörü ve manyetik alan şiddetini temsil etmektedir [14],[15].

SEY analizleri boyunca, maksimum akım uygulanmış ve daha doğru sonuçların elde edilebilmesi için her bir parça ayrı ayrı küçük ağ yapılarına (mesh) bölünmüştür.

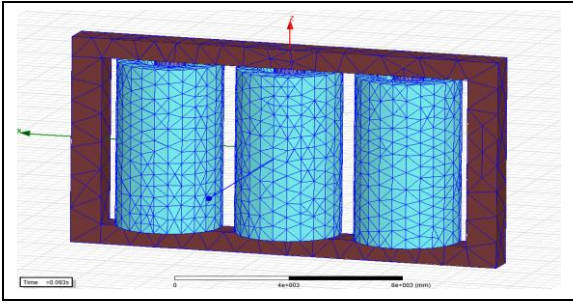
Denklem 17 kullanılarak hesaplanan endüktans değeri, geçici rejim analizi yönteminde, hava aralığında biriken enerjinin oluşturmuş olduğu endüktans değerinin sargı endüktansı ile birlikte oluşturduğu reaktörün toplam endüktans değerinin hesaplanmasında kullanılacaktır.

### 3.2 Endüktans Hesabı

Tasarlanan şönt reaktörlerin, istenilen özellikleri sağlayıp sağlamadığının gözlemlenmesini sağlayacak olan benzetim çalışmasında farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu bölümdeki benzetim çalışmasında kullanılacak olan magnetostatik yöntem ile şönt reaktörün temel çalışması gözlemlenecek, sargılara uygulanan sabit değerli alternatif akım ile çalışması sağlanacak ve bunun sonucunda oluşacak olan etkiler gözlemlenecektir. Bu yöntemde yapılan modellemede temel çalışma gözlemlenmesi yapılacaktır ve zamana bağlı parametre değişimlerinin gerçek zamanlı değişiminin gözlemlenmesi mümkün olmayacaktır.

Hava aralığı dağıtılmamış olan şönt reaktör modellerinde yapılan gözlemler sonucu, hava aralığında biriken enerji miktarının fazlalığı ve hava aralığında meydana gelen kaçak akıların fazlalığı dikkat çekmektedir

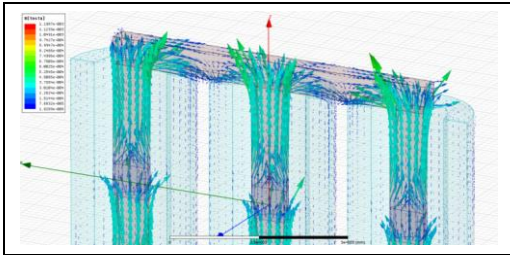
Bu durumları gözlemlenmek amacıyla, tasarımı yapılan şönt reaktör benzetim çalışmasına tabi tutulmuştur. Uygulanan benzetim çalışmasında, gözlemlenecek olan manyetik akı yoğunluğu, akım, gerilim ve kaçak akı gibi değerlerin net olarak hesaplanabilmesi için model yüzeyine ağ yöntemi (mesh) uygulanmıştır. Model yüzeyini küçük parçalara ayıran bu yöntem ile her bir parça üzerinde hesaplama yapılarak daha net sonuçlar elde edilmesi sağlanmaktadır. Ağ yönteminin uygulandığı şönt reaktör modeli Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Uygulanan ağ yöntemi.

Figure 4. Applied mesh method.

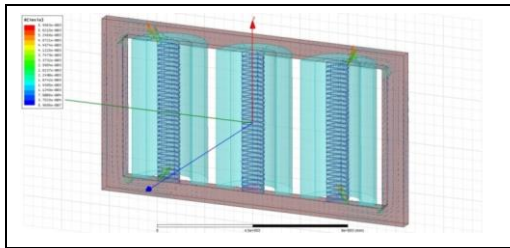
Benzetim çalışmasının başlatılmasıyla, modellenen reaktör sargılarına alternatif akım uygulanır. Uygulanan alternatif akımın etkisi ile Maxwell kanunları ile ispatı yapıldığı şekilde, alternatif akım taşıyan bir iletkenin oluşturduğu değişken manyetik alan çizgileri nüveyi keser ve nüve üzerinde bir manyetik akı indüklenmesi gerçekleşir. Bu etkileşimin sonucu olarak nüvede manyetik akımın aktığı bir manyetik devre oluşur. Oluşan manyetik devredeki akı çizgileri ve kaçak manyetik akı çizgileri benzetim çalışmasında Şekil 5'te olduğu gibi gözlemlenebilmektedir.



Şekil 5. 1 adet hava aralıklı nüve manyetik akı çizgileri.

Figure 5. Magnetic flux lines of 1 gapped core.

Şekil 6'da da görüldüğü gibi hava aralıklarında oluşan kaçak akı miktarlarını azaltmak için, hesaplanan toplam hava aralığı uzunluğu reaktör bacakları boyunca eşit parçalara ayrılır. Yapılan çalışmada kaçak akıların etkilerinin, hava aralığı sayısı ile olan ilişkisinin net bir şekilde gözlemlenebilmesi için farklı hava aralığı sayılarına sahip şönt reaktör tasarımları yapılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.



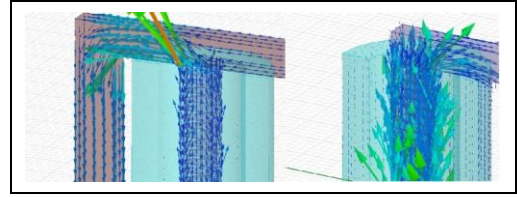
Şekil 6. 5-Bacaklı nüve manyetik akı çizgileri.

Figure 6. Magnetic flux lines of 5-legged core.

3 bacaklı nüve yapısının yanında tasarlanan 5 bacaklı nüve yapısının birbirlerinden farklılıkları, benzetim çalışması sonucunda gözlemlenebilmektedir.

Şekil 7'de 30 adet hava aralığı ile tasarlanmış 3 ve 5 bacaklı şönt reaktör nüve yapısı görünmektedir. Şekilden gözlemlendiği üzere, 5 bacaklı nüve yapısının sahip olduğu ek bacak sayesinde, sargının bulunduğu bacadaki manyetik akı yoğunluğunu azalttığı söylenebilmektedir. Bu sayede, nüvenin

doyuma gitmesi zorlaşmış olacak ve daha az manyetik akı bacak üzerinden aktığı için kaçak akıların miktarı da azalmış olacaktır.



Şekil 7. 30 adet hava aralıklı 3 ve 5 bacaklı nüve yapısı.

Figure 7. 3-legged and 5-legged core structures which have 30-gapped core.

### 3.3 Geçici rejim analizi

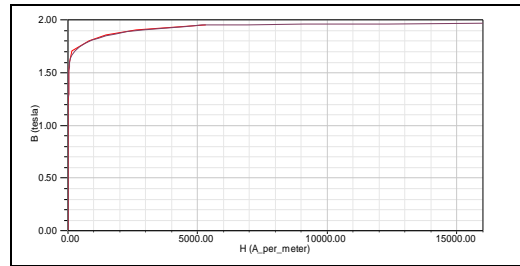
Magnetostatik yöntem, daha temel bir benzetim yöntemi olup nüve kayıpları, Eddy akımları gibi parametreleri benzetim çalışmasında göz ardı etmektedir. Yapılan çalışmanın gerçek değerlere daha yakın bir sonuç vermesi ve bu sonuçlara göre daha sağlıklı bir çıkarım yapılabilmesi için, bu bölümde Geçici Rejim Analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede, Eddy kayıpları da hesaba katılarak nüve kayıplarının gözlenmesi, hava aralığında biriken enerjinin daha net belirlenmesi ve sargı endüktansları daha gerçekçi biçimde gözlemlenebilecektir.

Nüvede kullanılacak malzeme, elektrik makinelerinde da sıkça kullanılan M125-027 koduyla bilinen çelik olarak seçilmiştir. Kullanılan malzemenin özellikleri ve B-H eğrisi sırasıyla Tablo 2'de ve Şekil 8'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan çeliğin özellikleri.

Table 2. B-H characteristic values of steel.

Parametreler	Değer	Birim
Geçirgenlik	5000000	Siemens/m
$K_h$	64.488	w/m <sup>3</sup>
$K_c$	0.599	w/m <sup>3</sup>
Özgül Ağırlık	7.650	kg/m <sup>3</sup>



Şekil 8. Kullanılan çeliğin B-H grafiği.

Figure 8. B-H characteristic graphic of steel.

Kullanılan Geçici Rejim Analiz yöntemi, Magnetostatik yöntemin aksine reaktör sargılarına sinüsoidal olarak 3 fazlı gerilimin uygulanması ile gerçekleşmektedir. Uygulanan bu gerilim sonucu endüklenen akım değeri, manyetik akıyı oluşturmaktadır. Bu yöntemde, nüvede tanımlanan Eddy Akımları sayesinde nüve kayıpları hesaplanabilmektedir. Çekirdekdeki akı yoğunluğunun maksimum değerine bağlı olarak değişen nüve kayıpları nüve kayıpları ile ekonomik analiz ve verim gibi önemli parametre hesaplamaları da yapılabilmektedir [16]-[18].

Genel yapı ve 17 ile 18 numaralı denklemler gereği, hava aralığı sayısının artması ile birlikte manyetik geçirgenlik değeri düşmekte buna bağlı olarak da nüvenin doyuma gireceği

manyetik akı değeri de düşecektir. Aynı zamanda, manyetik geçirgenlik değerinin düşmesi ile birlikte nüvenin endüktans değeri de aynı oranda düşecektir. Hava aralığı sayısının artması ile birlikte düşecek olan endüktans değeri akım değerinin de yükselmesine neden olacaktır.

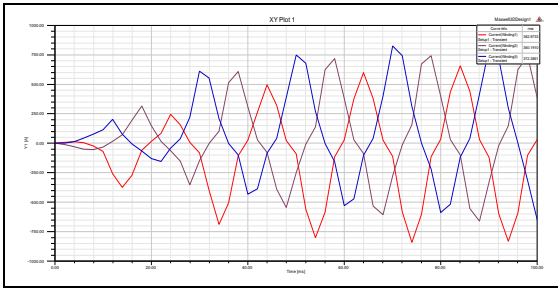
Yükselen akım değerinin düşürülmesi için sargının boyutunun ve sarım sayısının artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada sargının boyutu artırılırken, sadece sargının yüksekliği değiştirildiğinden dolayı nüvenin boyu ( $H_w$ ) da değişmiştir.

$$B = \mu_r \cdot H \quad (17)$$

$$L = \frac{0.4 \cdot \pi \cdot \mu \cdot N^2 \cdot A \cdot 10^{-2}}{l_{av}} \quad (18)$$

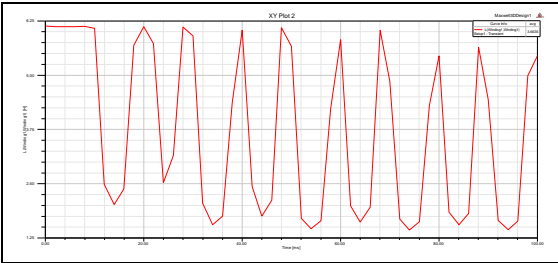
### 3.3.1 1 adet hava aralıklı nüve tasarımı ve sonuçları

1 Adet hava aralığı ile bu çalışmada verilen denklemler kullanılarak yapılan tasarımın, benzetim çalışmasına tabi tutulduktan sonra sarğı endüktans değeri, reaktörün çektiği akım ve kayıplar Şekil 9, 10 ve 11'de gösterilmiştir.



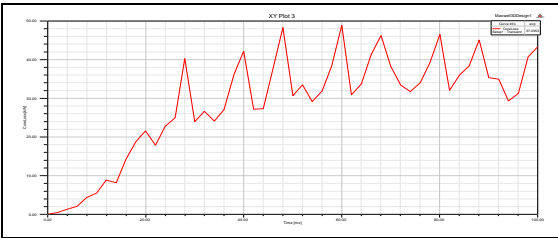
Şekil 9. Reaktör akım değerleri.

Figure 9. Current values of reactor.



Şekil 10. 1 numaralı sarğı endüktans değeri.

Figure 10. Inductance value of winding #1.



Şekil 11. Nüve kayıpları grafiği.

Figure 11. Core Loss graphic.

Sarğı endüktans değerinin hesaplanan 3.89 H değerine yakın 3.66 H olarak görülmüş, Hava aralığında biriken enerjinin integrali alınıp sarğı endüktansına eklendiğinde reaktör endüktansı 4.24 H olarak hesaplanmıştır. Reaktörün çektiği akım değerinin 343.66 A olarak hesaplanmışken 382.97 A olarak çekildiği gözlemlenmiştir. Bu değerlere bakıldığında

analitik hesaplara yakın değerlere ulaşıldığı görülmektedir. Nüve kayıp değeri incelendiğinde reaktörün kararlı çalışma moduna oturduğu aralıkların ortalamasına bakıldığında 37 kW değerinde nüve kaybının olduğu görülmektedir.

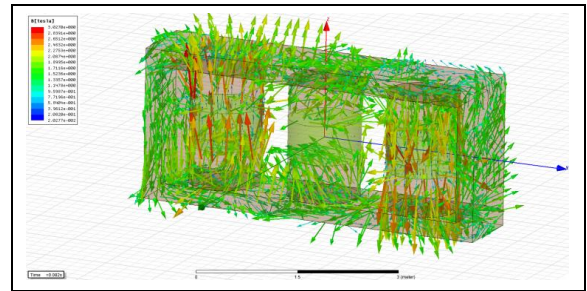
0.082 saniyedeki manyetik akı çizgilerine bakılacak olursa, Şekil 12'de görüleceği üzere hava aralığının bulunduğu kısımlarda kaçak akıların oldukça fazla ve  $B$  manyetik akı değerlerinin oldukça büyük olduğu görülmektedir. Bunun neticesinde ekstra kayıplar oluşmakta ve nüvenin daha kolay doyuma ulaşması gerçekleşme ihtimali bulunmaktadır.

### 3.3.2 10 adet hava aralıklı nüve tasarımı ve sonuçları

Bölüm 3.3.1'de tasarımı ve benzetim çalışması yapılan şönt reaktör modeli incelemelerinde belirtilen hava aralığında oluşan kaçak akıların azaltılması için en etkili yöntem olarak hava aralığı sayısının artırılması kullanılmaktadır.

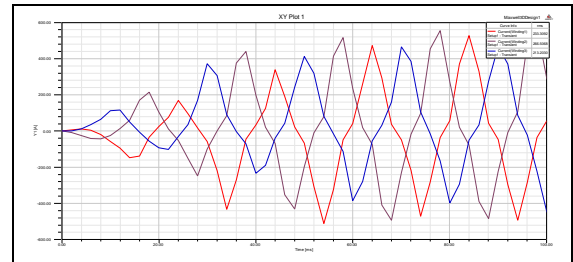
Hava aralığı sayısının artırılması, reaktör tasarımında hesaplanan toplam hava aralığı uzunluğu değerinin sabit tutularak nüve bacağı boyunca bu uzunluğun eşit olarak dağıtılmasıdır. Bu bölümde 10 adet eşit olarak dağıtılmış hava aralığı için yapılan çalışma sonuçlarına yer verilecektir.

Tasarlanan nüve incelendiğinde, nüve yüksekliği ve pencere yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Bunun nedeni, hava aralığı sayısının artırılmasıyla birlikte, nüvenin manyetik geçirgenliğinin artması ve bunun sonucu olarak endüktans değeri düşmesidir. Düşen endüktans değerini normal seviyeye çekmek ve endüktans değerinin düşmesiyle artan akımın nominal seviyeye düşmesini sağlamak amacıyla sargının sarım sayısı ve buna bağlı olarak sargının boyu değişmiştir. 1 hava aralığı için yapılan sarım sayısı ( $N$ ) 1400 iken, 10 hava aralığında oluşan endüktans düşümü ve akımın artması etkilerini normale döndürmek için 1722 olarak değiştirilmiştir. Modellenmiş şönt reaktör benzetim çalışmasına tabi tutulduğunda, çıkan sonuçlar akım, sarğı endüktansı, nüve kayıpları ve manyetik akı çizgileri sırasıyla Şekil 13, Şekil 14, Şekil 15 ve Şekil 16'da görülmektedir.



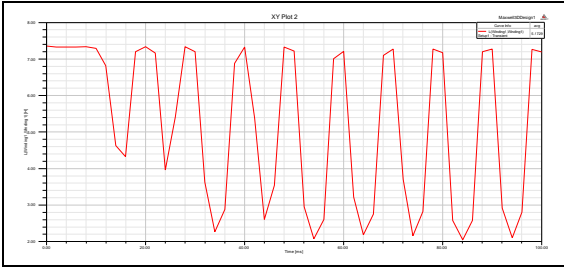
Şekil 12. Manyetik akı çizgileri.

Figure 12. Magnetic flux lines.



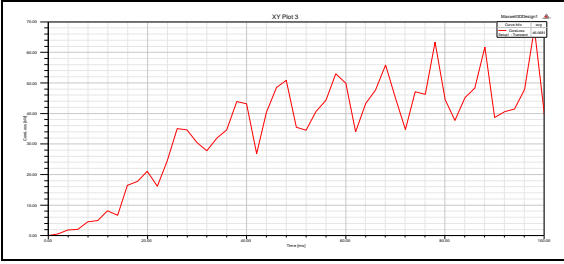
Şekil 13. Reaktör akım değerleri.

Figure 13. Current values of reactor.



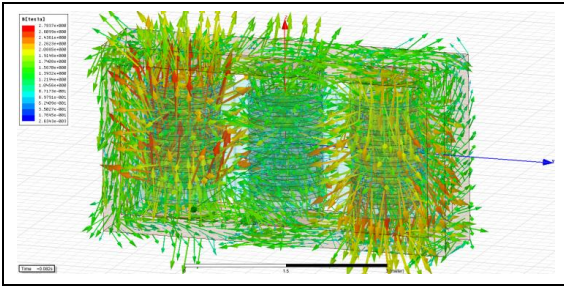
Şekil 14. 1 numaralı sargı endüktans değeri.

Figure 14. Inductance value of winding #1.



Şekil 15. Nüve kayıpları.

Figure 15. Core loss.



Şekil 16. Manyetik akı çizgileri.

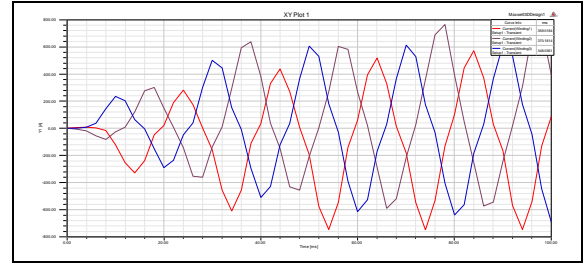
Figure 16. Magnetic flux lines.

Benzetim çalışması sonuçlarına göre yapılan değerlendirmede, düşen sargı endüktans değerini arttırmak için yapılan çalışma neticesinin alındığı ve sargı endüktansının 5 H seviyelerine geldiği görülmüştür. Öte yandan akım değerlerine bakıldığında sargının büyütülmesi ile birlikte 266 A değerine kadar düştüğü görülmektedir. Akım ve endüktans değerleri analitik hesaplarda beklendiği gibi değişiklik göstermiştir ancak hesaplardaki değerlerin biraz uzağında kalmıştır.

Nüve kayıpları incelendiğinde, reaktörün kararlı çalışmaya başladığı 45 ms anından itibaren alınan ortalama değer 46 kW olarak görülmektedir.

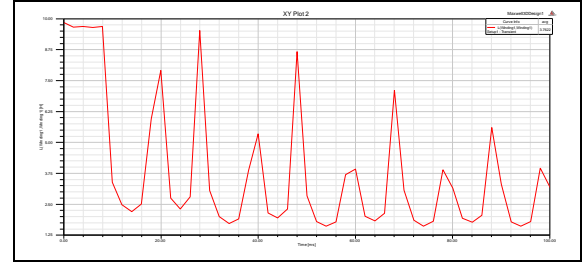
### 3.3.3 30 adet hava aralıklı nüve tasarımı ve sonuçları

Benzetim çalışması sonuçları değerlendirilen 10 adet hava aralıklı nüve yapısında istenilen iyileştirilmelerin tam görülebilmesi nedeniyle 30 Adet hava aralıklı tasarım belirtilen formüller kullanılarak tasarlanmıştır. Yeni tasarlanan nüvede kullanılan sargı sarım sayısı akımın nominal değerine düşürülmesi ve istenilen endüktans değerinin sağlanabilmesi için 2072 sarım olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan bu model ile birlikte hava aralıklarında oluşan kaçakların mümkün olduğunca azaltılması, akım ve endüktans değerlerinin istenilen seviyeye ulaşması ve nüve kayıplarının azaltılması hedeflenmektedir. Yapılan benzetim çalışması sonucunda alınan akım, endüktans, nüve kayıpları ve manyetik akı çizgileri sırasıyla Şekil 17, Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de gösterilmiştir.



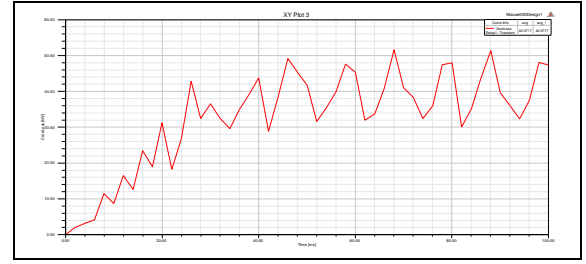
Şekil 17. Reaktör akım değerleri.

Figure 17. Current values of reactor.



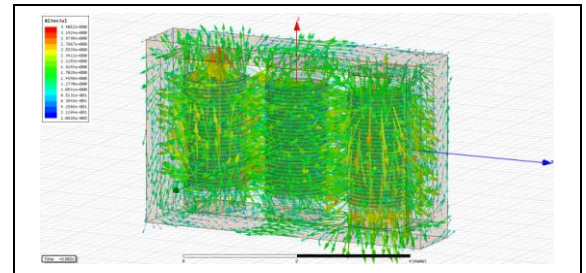
Şekil 18. 1 numaralı sargı endüktans değeri.

Figure 18. Inductance value of winding #1.



Şekil 19. Nüve kayıpları.

Figure 19. Core Loss.



Şekil 20. Manyetik akı çizgileri.

Figure 20. Magnetic flux lines.

Yapılan benzetim çalışması sonucunda; akım ve endüktans değerlerine bakıldığında, akımın 360 A olduğu ve nominal akım olan 343.66 A değerine yakın olduğu, endüktans değerinin 3.72 H olduğu ve hesaplanan endüktans değeri olan 3.89 H değerine yakın olduğu görülmektedir. Bu değerler analitik hesaplar ile örtüşüp beklenen sonuçları vermiştir.

Hava aralıklarında biriken enerji neticesinde oluşan endüktans değeri yapılan hesaplamalar sonucunda 0.841 H bulunmuş ve reaktörün toplam endüktans değeri 4.60 H olarak hesaplanmıştır. Bu değerler incelendiğinde nüve kayıpları incelendiğinde, 40.37 kW değeri okunmaktadır. Hava aralığı sayısının 1 adet olarak tasarlanan nüveden 30 kat büyük olmasına rağmen kayıplar birbirine yakın seviyededir. Manyetik akı çizgileri gözlemlendiğinde hava aralıklarında

oluşan kaçak akıların oldukça az ve değerlerinin nominal seviyede olduğu gözlemlenmektedir. Bu sayede reaktör kayıpları azalacak ve nüvenin doyuma girmesi zorlaşacaktır.

### 3.4 Ekonomik analiz

Tasarlanan reaktörün ekonomik analizinin yapılabilmesi için, kullanılan materyaller olan bakır ve çelik ağırlıklarının bilinmesi gerekmektedir. Bu ağırlıklara göre de nüve imalatında çıkacak malzeme maliyeti değerleri belirlenebilmektedir. Ayrıca, ekonomik olarak yapılacak bir analizde, reaktörde çalışma esnasında oluşacak kayıpların belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan benzetim çalışması sonucu bu değerler gözlemlenebilmektedir. Ekonomik analiz için gereken veriler, Denklem 19'da verilmiştir. Bu denkleme göre, reaktörde kullanılan toplam bakır ağırlığı Denklem 20 kullanılarak hesaplanmıştır. Diğer bir parametre olan Çelik ağırlığı ise Denklem 21 hesaplanarak bulunabilmektedir. Güncel bakır ve demir fiyatlarına bakılarak Denklem 19'da yerine konulmalıdır. Belirtilen denklemlerde;  $M_{Cu}$  toplam bakır kütesini,  $M_{St}$  toplam çelik kütesini,  $Fiyat_{Cu}$  ve  $Fiyat_{St}$  birim çelik ve bakır fiyatlarını (0 dönemde piyasa fiyatlarına göre değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada o dönemki kurlar alınarak hesaplama yapılmıştır. Bakır fiyatı 1 poundu ortalama 2.70 \$, çelik fiyatı ortalama rulo başı 617 \$'dır. Boyutlara göre miktar seçilmelidir.),  $\Delta P_{Cukayıp}$  ve  $\Delta P_{Stkayıp}$  sırasıyla reaktörün bakır kayıplarını ve manyetik devredeki kayıpları, kayıp bedeli ise o dönemde yetkili kurumlarca belirlenen meblağ,  $\gamma_{Cu}$  ve  $\gamma_{St}$  bakır ve çeliğin özgül ağırlığı,  $V_{leg}$  nüve bacalarının hacmi olarak tanımlanmaktadır.  $K_u$ ,  $A_w$  ve  $l_{av}$  değerleri daha önceki bölümlerde tanımlanmış ve hesaplanmıştır. Eğer, reaktör kayıpları bildirilen değerden fazla çıkarsa, birim güç başına kayıp değerinin toplam kayıplar ile çarpılması ve malzeme giderlerine eklenmesi gerekmektedir. Tüm bu verilerin toplanması sonucunda maliyet hesabı tamamlanmış olacaktır. Tablo 3 ve Tablo 4'te hava aralığı sayısına göre maliyet ve kayıp değerleri gösterilmiştir.

$$M_{Cu} \cdot Fiyat_{Cu} + M_{St} \cdot Fiyat_{St} + (\Delta P_{Cukayıp} + \Delta P_{Stkayıp}) \cdot \text{Kayıp Bedeli} \quad (19)$$

$$M_{Cu} = 3 \cdot \gamma_{Cu} \cdot K_u \cdot A_w \cdot l_{av} \quad (20)$$

$$M_{St} = 3 \cdot \gamma_{St} \cdot V_{leg} \quad (21)$$

Tablo 3. Hava aralığı ve maliyet.

Table 3. Air gap and cost.

Hava Aralığı Sayısı	1	10	30
Maliyet [\$]	133360	161872	195118

Tablo 4: Kayıplar ve maliyet.

Table 4. Losses and cost.

Hava Aralığı Sayısı	1	10	30
Kayıp [kW]	256	176	326

## 4 Sonuçlar

Uzun iletim hatlarının yapısı gereği sahip olduğu kapasitif özellik sistemde gereksiz bir reaktif akımın dolaşmasına neden olmakta ve sistemin verimi ile birlikte gelen enerjinin kalitesini de düşürmektedir. Bu nedenle, kompanzasyon işleminin sağlanması için reaktörlerden yararlanılmaktadır. Bahsedilen durumda sönmünecek büyüklük kapasitif olduğundan dolayı burada kullanılması gereken reaktör tipi şönt reaktördür. Yapılan bu çalışmada, belirlenen tüm kalite ve teknik konudaki

standart ve şartnameler çerçevesinde, iletim hatlarındaki verimlilik ve kalitenin artırılmasında kullanılacak olan şönt reaktör tasarımı yapılmış ve benzetim çalışmasına tabi tutularak çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şönt reaktörlerin tasarımının tamamlanmasının ardından, sonuçların gözlemlenebilmesi için tabi tutulan benzetim çalışması 2 farklı yöntemle sahiptir. Bu yöntemlerden bir tanesi, Magnetostatik yöntem olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, temel olarak tasarlanan reaktörün çalışması gözlemlenebilmektedir. Reaktör sargılarına uygulanan sabit değerli alternatif akım ile nüve üzerinde meydana gelen manyetik akı çizgileri ve bu manyetik akı yoğunluğu gözlemlenerek tasarımda hedeflenen değerlere ulaşıp ulaşılmadığı gözlemlenmiştir. Uygulanan bu yöntemde, zaman bağılı olarak anlık reaktör durumu gözlemlenmesi yapılamamaktadır. Bu yöntem daha genel bir yöntem olup, reaktörün iletim operasyonlarında çalışırken ortalama değerlerinin gözlemlenebildiği bir yöntemdir. Benzetim çalışmasında kullanılan diğer bir yöntem ise geçici rejim analizi yöntemidir. Bu yöntem magnetostatik yöntemle göre daha detaylı olup, reaktör çalışmasında oluşan birçok değer gözlemlenmesi imkânı sunmaktadır.

Bu yöntem ile nüve kayıpları da gözlemlenebilmektedir. Nüve kayıplarının gözlemlenmesi ile birlikte, reaktör çalışmasındaki kritik değerlerden bir tanesi olan kayıpların da değerlendirilmesi imkânı doğmuş bulunmaktadır. Geçici rejim analizi yönteminin getirdiği avantajlarda bir tanesi de, zamana bağılı değişken olarak reaktör durumunun gözlemlenmesidir. 1, 10 ve 30 adet hava aralığı ile tasarlanmış nüve modellerinde benzetim çalışmaları sonucu alınan değerler, reaktörün maliyet hesabı çıkarılmak üzere kullanılmıştır. Yapılan değerlendirme sonucunda; nüvede bırakılan hava aralıkları sayısının artması ile birlikte endüktans değerinde azalmanın hedeflenen değere ulaşabilmesi için tasarımda gidilen nüve ve sargı boyunun artması değişikliklerinin sonucu olarak, kullanılan malzemenin de artması maliyetin artmasına neden olmaktadır. Sargıda meydana gelen sarım sayısının artması ve kullanılan bakır miktarının artması ile birlikte direnç değerinin de artması ile birlikte, kayıpların da buna bağlı olarak arttığı görülmektedir. Nüve kayıpları incelendiğinde, hava aralığı sayısının artması ile birlikte önce arttığı ancak daha sonra azaldığı ve istenilen değerlere yakın olarak kaldığı görülmektedir.

Tüm bu veriler göz önüne alındığında, hava aralığı sayısının artması ile maliyet ve görünür güç kayıplarının artmış olduğu ancak istenilen endüktans ve nüve kayıpları değerine hava aralığı artırılmış nüve tasarımında ulaşıldığından dolayı 30 adet hava aralığı olan nüve yapısı seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Kullanılan nüve ve hava aralığını sağlamak amacıyla kullanılan materyalde yapılacak iyileştirmeler, maliyeti belirli bir bant aralığında tutmak için sargının değişiminin belirli bir oran kullanılarak yapılması şeklinde yöntemler izlenerek reaktör verimi artırılabilir. Ayrıca maliyet azaltılarak iletim hatlarında kullanılmak üzere yeni tasarım çalışmaları gerçekleştirilebilir.

## 5 Kaynaklar

- [1] Heatcote M. *J&P Transformer Book*. Thirteenth Edition, Oxford, United Kingdom, Newness An imprint on Elsevier 2007.
- [2] Tao Zheng, Zhao YJ, Ying Jin, Chen PL, Zhang FF. "Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of a magnetically controlled shunt reactor". *IEEE Transactions*, 30(2), 967-975, 2015.



- [3] Turan H, Çekirdekli D. Hava Aralığı Bulunan Reaktör Çeşitlerinin İrdelenmesi ve Bir Prototip için Uygulama Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye 2009.
- [4] Dönük A, Modeling and Design of Iron-Core Shunt Reactors With Discretely Distributed Air-Gaps. Doktora Tezi, ODTÜ, Ankara, Turkey, 2012.
- [5] Lotfi A, Faridi M. "Design optimization of gapped-core shunt reactor". *IEEE*, 48(4), 1673-1676, 2012.
- [6] Enright W, Watson N, Nayak O. "Three phase five Limb unified magnetic equivalent circuit transformer models for PSCAD V3". *International Conference on Power Systems Transients*, Budapest, Hungary, 20-24 June 1999.
- [7] Arabul AY, Senol I. "Development of a hot-spot temperature calculation method for the loss of life estimation of an ONAN distribution transformer". *Electrical Engineering*, 100(3), 1651-1659, 2018.
- [8] Arabul AY, Arabul FK, Senol I. "Experimental thermal investigation of an ONAN distribution transformer by fiber optic sensors". *Electric Power Systems Research*, 155, 320-330, 2018.
- [9] Sakura T, Takashi N, Fujiwara K. "3D-finite element analysis of eddy current loss of three-phase shunt reactor". *JSAEM* 1,81-88, 2003.
- [10] Lotfi A, Rahimpour E. "Optimum design of core blocks and analyzing the fringing effect shunt reactors with distributed gapped-core". *Elsevier, Electric Power Systems Research*, 101(2013), 63-70, 2013.
- [11] Yan-ping L, Hai-ting Z, Zhen A. "Leakage inductance calculation and simulation research of extra-high voltage magnetically controlled shunt reactor". *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, 2010 International Conference, 26-28 June 2010.
- [12] Dönük A. "Effects of air gaps on core losses of shunt reactors/şönt reaktörlerde hava aralıklarının demir kayıplarına etkisi". *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 103-108, 2016.
- [13] Reece ABJ, Preston TW. *Finite Element Methods in Electrical Power Engineering*. New York, USA, Oxford University Press Inc, 2000.
- [14] Nashawithi E, Fisher N, Bin Le, Taylor D. "Impact of shunt reactors on transmission line protection". *38th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, 18-20 October 2011.
- [15] Arabul AY, Kurt E, Senol I, Arabul FK. "An investigation on flux density of three phase distributed Air-Gap 3-5 legged shunt reactor". *IRES-27th ICJET*, Amsterdam, Netherlands, 25 December 2015.
- [16] Power transformers - Part 6: Reactors. IEC 6076-6, 2007.
- [17] IEEE Loss Evaluation Guide for Power Transformers and Reactors. IEEE Std. C57.120.1991
- [18] Bertotti, G. "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials". *IEEE Transactions on Magnetics*, 24(1), 621-630, 1988.