



## Optimum design of single and three phase iron core shunt reactors

Atilla Dönük\*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Aydın Adnan Menderes University, 09010, Aydın, Turkey

### Highlights:

- A fast, accurate and reliable optimum design methodology and software
- Analytical calculations and optimization
- FEM accuracy tests

### Keywords:

- Air-gap
- Finite Element Method
- Leakage inductance
- Optimum design
- Shunt-reactor

### Article Info:

Research Article  
Received: 04.01.2021  
Accepted: 07.09.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.853725

### Acknowledgement:

This study has been funded by Tubitak Code 1002 Grant in the scope of project 118E687.

### Correspondence:

Author: Atilla Dönük  
e-mail: adonuk@adu.edu.tr  
phone: +90 505 839 0525

### Graphical/Tabular Abstract

**Table A.** Design data and FEM results for verification of the software

Target Design	phase	Leak. Ind.%	$\Delta T$ (K)	B (T)	Steel	Design Criteria	Wind.	FEM L (mH)	Err. %
338 mH 0.4 kV	1	5	80	1.2	M120	minC	Al	330	2.36
5.05 mH 0.4 kV	3	5	60	1.2	M330	minC	Al	5.06	0.2
5.05 mH 0.4 kV	3	5	60	1.2	M330	minL	Cu	5.3	4.9
1.43 mH 0.4 kV	3	5	100	1.1	M330	minL	Cu	1.5	4.9
1.43 mH 0.4 kV	3	5	100	1.1	M330	minC	Al	1.48	3.5

**Purpose:** It is aimed at to develop a simple and accurate methodology and a design software for single and three-phase iron core shunt reactors.

### Theory and Methods:

The design software based on the proposed methodology is developed by Matlab/Guide considering the leakage inductance. The accuracy test of the methodology is performed by Ansys/Maxwell FEM analyses.

### Results:

Several reactor designs with different power and voltage levels are performed by means of the developed methodology and accuracy tests are carried out by FEM analyses. Results show that; the proposed design methodology is fast, accurate and reliable for iron core shunt reactor design.

### Conclusion:

The proposed methodology and software, which performs analytical calculations and optimization of the target reactor under design, in accordance with the pre-determined criteria by the user such as input data, assumptions and design criterion, is developed for both single and three-phase reactors in Matlab/GUIDE environment. The software provides convenience to the designers and researchers, and improves the competition conditions for the producers, since the ability to produce more product types with less cost is possible. Since there is no proposed clear cut design methodology and software in the literature, introduced software may overcome a significant deficiency in the relevant field.



## Tek ve üç fazlı demir çekirdekli şönt reaktörlerin optimum tasarımı

Atilla Dönük\*<sup>ID</sup>

Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 09010, Aydın, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Hızlı, uygun ve güvenilir bir optimum tasarım metodu ve yazılımı
- Analitik hesaplamalar ve optimizasyon
- SEY doğruluk testleri

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 04.01.2021  
Kabul: 07.09.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.853725

#### Anahtar Kelimeler:

Hava aralığı,  
kaçak endüktans,  
optimum tasarım,  
sonlu elemanlar yöntemi,  
şönt reaktör

#### ÖZ

Bu çalışmada tek ve üç fazlı demir çekirdekli şönt reaktörler için optimum bir tasarım yöntemi ve bu yöntemeye dayanan bir tasarım yazılımı sunulmuştur. Tasarımcı tarafından belirlenen girdiler, varsayımlar ve seçilen tasarım kriterine göre farklı güç, gerilim ve sıcaklık artışı seviyelerinde analitik hesaplamalarını ve optimizasyonunu gerçekleştiren yazılım, üç fazlı ve tek fazlı şönt reaktör modelleri için alüminyum ve bakır sargı seçenekleri ile Matlab/GUIDE ortamında gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda kaçak endüktans değeri de göz önüne alınmıştır. Geliştirilen yazılım vasıtasıyla çeşitli güç ve gerilim seviyelerinde tek fazlı ve üç fazlı reaktör tasarımları gerçekleştirilmiş ve doğruluk testleri Ansys/ Maxwell sonlu elemanlar analizleri ile sağlanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında; önerilen tasarım metodunun demir çekirdekli şönt reaktör tasarımı için hızlı, uygun ve güvenilir olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde detaylı ve adım adım uygulanan benzer bir tasarım yöntemi paylaşılması nedeniyle bu çalışma ilgili alana önemli bir katkı sağlamaktadır.

## Optimum design of single and three phase iron core shunt reactors

### H I G H L I G H T S

- A fast, accurate and reliable optimum design methodology and software
- Analytical calculations and optimization
- FEM accuracy tests

#### Article Info

Research Article  
Received: 04.01.2021  
Accepted: 07.09.2021

#### DOI:

10.17341/gazimmfd.853725

#### Keywords:

Air-gap,  
finite element method,  
leakage inductance,  
optimum design,  
shunt-reactor

#### ABSTRACT

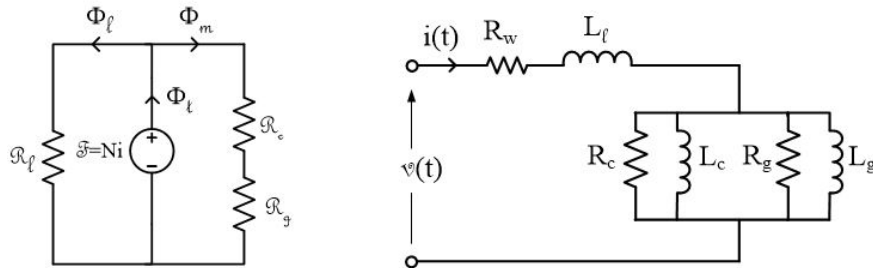
In this study, a design methodology and a software based on this methodology for single and three-phase iron-core shunt-reactors are introduced. The software, which performs analytical calculations and optimization of the target reactor under design, in accordance with the pre-determined criteria by the user such as input data, assumptions and design criterion, is developed for both single and three-phase reactors in Matlab/GUIDE environment. Several reactor designs with different power and voltage levels are performed by means of the developed software and accuracy tests are carried out by Ansys/Maxwell finite element analyses. Results show that; the proposed design methodology is fast, accurate and reliable for iron core shunt reactor design. In addition, since there is no introduced clear cut design methodology and software in the literature, the proposed study may have an important contribution in the field.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Demir çekirdekli şönt reaktörler güç sistemi uygulamalarında sıklıkla kullanılırlar. Kutkut ve Divan [1] yüksek frekanslı folyo sargılar için optimum hava aralığı tasarımı, Tomczuk ve Babczyk [2] hava aralıklı manyetik devrelerin öz ve karşılıklı endüktans değerlerinin hesabı ve McLyman [3] transformatör ve endüktans tasarımı çalışmalarında manyetik devrede hava aralıklarının yer alması durumunun oluşan saçaklanma akısı nedeniyle ekstra sargı ve demir kayıplarına sebep olduğunu göstermişlerdir. Bu etkiyi azaltmak için şönt reaktörler genellikle bacakları boyunca eşit dağıtılmış hava aralıkları ile imal edilirler. Donuk vd. [4] tarafından önerilen tek fazlı, hava aralıklı iki bacak boyunca eşit dağıtılmış, demir-çekirdekli bir şönt reaktörün manyetik ve elektrik eşdeğer devreleri Şekil 1'de verilmiştir. Manyetik eşdeğer devresinde  $\Phi_t$ ,  $\Phi_m$ ,  $\Phi_l$  sırasıyla, toplam, miktanısız ve kaçak akıyı,  $R_c$ ,  $R_g$  ve  $R_l$  ise sırasıyla demir, toplam hava-aralığı ve kaçak relüktans değerlerini ifade etmektedir. Elektrik eşdeğer devresinde görülen  $R_w$ ,  $R_c$  ve  $R_g$  dirençleri sırasıyla sargı, demir ve hava kayıplarını sembolize etmektedir. Hava aralıklı bir şönt reaktörün 50 Hz şebeke koşullarındaki kayıpları; sargı, demir ve hava aralığı kayıpları olarak kabul edilebilir. Hava aralığı kayıpları McLyman [3] tarafından hava aralıkları etrafındaki saçaklanma akısı nedeniyle oluşan ekstra eddy-akımlarının sebep olduğu kayıplar olarak tanımlanmaktadır.

Demir-çekirdekli şönt reaktör tasarımı ile ilgili çeşitli çalışmalar uzun yıllardır yayınlanmaktadır. Ohri vd. [5] birleştirilmiş AC ve DC akım taşıyan hava aralıklı manyetik nüveli endüktans tasarımı, Hubert ve Kakalec [6] bilgisayar destekli AC ve DC endüktans tasarımı, Bartoli vd. [7] minimum bakır ve demir kayıplı reaktör tasarımı, Han-Jong vd. [8] bir evirici çıkış reaktörünün maliyet etkin tasarımı, Slobodan and Ljiljana [9] şebeke bağlı güç dönüştürücüleri uygulamaları için reaktör tasarımı, Li vd. [10] kaçak akı kontrollü reaktör test ve tasarımı, Dayi vd. [11] azaltılmış pasif güç filtreli yeni bir seri güç kalitesi denetleyicisi, Antonov ve Glushkov [12] kuru tip hava nüveli akım sınırlayıcı reaktör, Ben vd. [13] ise manyetizasyon ve manyetostriktif anizotropi ile şönt reaktörün gerilme karakteristiklerinin araştırılması ile ilgili çalışmalarını raporlamıştır. Ancak bu çalışmalarda reaktör tasarımı ile ilgili açık ve detaylı bir yöntem belirtilmemiştir. Birçok küçük hava aralığı içeren yüksek gerilim şönt reaktörlerin tasarımı Christoffel [14] tarafından irdelenmiş ancak çalışmada tasarım detayları verilmemiştir. Diğer bir

çalışmada Vora vd. [15] birden fazla hava aralığına sahip 765 kV şönt reaktör tasarımı gerçekleştirmiş ancak çalışmada hem kaçak endüktans ihmal edilmiş hem de tasarım detayları yeterince belirtilmemiştir. Bossi vd. [16] yüksek ve orta gerilim hava aralıklı şönt reaktörlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak tasarımını çalışmış ancak detaylı bir tasarım yöntemi belirtilmemiştir. Maliyeti minimize etmeye dayalı bir yöntem Faridi ve Lotfi [17] çalışmasında gösterilmiş ancak çalışılan yöntemle ait detaylı tasarım yaklaşımı belirtilmemiştir. Kuru tip demir-çekirdekli reaktörlerin optimum tasarım problemi dinamik programlama ve dairesel algoritma kullanılarak Zhao vd. [18] tarafından raporlanmış, fakat detaylı bir tasarım prosedürü bu çalışmada da paylaşılmamıştır. Arabul vd. [19] tarafından raporlanan bir başka çalışmada hava aralıkları eşit dağıtılmış farklı hava aralık sayılarına sahip üç ve beş bacaklı nüve yapılı şönt reaktör modellemesi ve benzetim çalışmaları SEY analizi kullanılarak yapılmıştır. Çalışma reaktör tasarımına ilişkin bilgiler içerse de detaylı tasarım yöntemi raporlanmamıştır. Dawood vd. [20] SEY ile şönt reaktör modellemesi ve tasarımı gerçekleştirmiş ancak çalışmada yine detaylı bir tasarım yöntemi paylaşılmamıştır. Sefa vd. [21] SEY ile M330-35A, M330-50A ve M150-30S sac tiplerini kullanarak reaktör tasarım sürecini ele almış, bir reaktörün farklı tasarımlarını raporlamıştır. İlgili çalışmada kullanılan yöntem Alan Çarpım Metodu olarak bilinen yöntemdir [3]. Lotfi ve Rahimpour [22] hava aralığı ve bacakta parça sayılarının endüktans değerine etkisini göstermek ve saçaklanma etkisini analiz etmek amacıyla hava aralıklarının bacak boyunca dağıtılmasını optimize eden bir çalışma raporlamıştır ancak bu çalışmada da detaylı bir tasarım metodu ve süreci paylaşılmamıştır. Literatürde farklı disiplinlerde bir çok araştırmacı tarafından tercih edilen Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), transformatör kayıplarının azaltılması [23], döner elektrik makineleri tasarımı [24] ve güç reaktörleri tasarımı [25] uygulamaları gibi güç sistemleri alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır ve benzer birçok çalışmada deneysel sonuçlarla SEY analizinin güvenilirliği kanıtlanmıştır. Literatürde raporlanan Alan Çarpım Metodu ve Çekirdek Geometri Metodu [3] gibi yöntemler değişik malzemeler için uygulanabilir de bu yöntemler sadece orta ve yüksek frekansta çalışan küçük boyutlu reaktörler için kullanılabilir. Ayrıca bu yöntemlerin üreticiler tarafından hali hazırda üretilen boyutları belirli nüveler için uygulama imkânı olmaktadır. Literatürde bu yöntemler dışında detaylı analitik hesaplamaları içeren çalışmalara pek rastlanmamaktadır. Üreticilerin sahip oldukları analitik



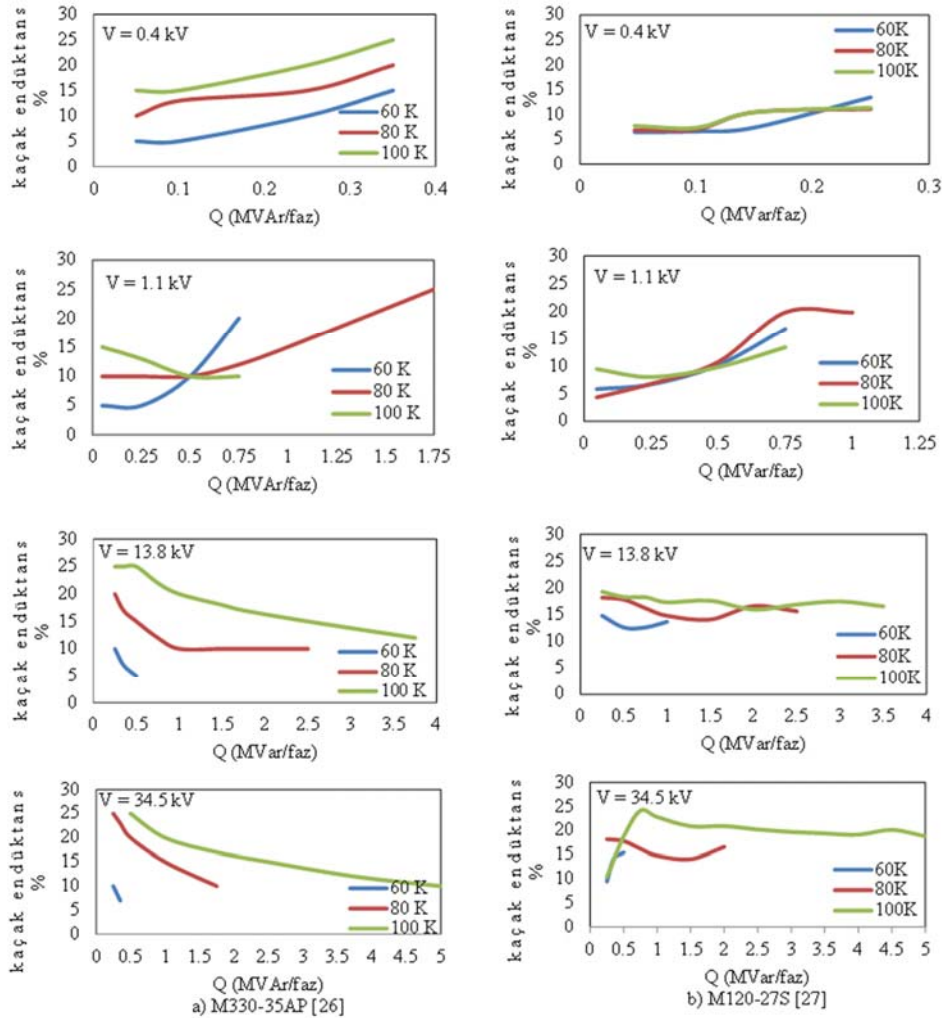
Şekil 1. Tek fazlı şönt reaktörün manyetik ve elektrik eşdeğer devreleri  
(Magnetic and electric equivalent circuits of a single-phase iron-core shunt reactor)

hesaplama yöntemleri elbette bulunmaktadır ancak ticari kaygılar nedeniyle bu yöntemler paylaşılmamaktadır. Bu çalışmada tek ve üç fazlı demir çekirdekli şönt reaktörler için analitik bir tasarım yöntemi ele alınmıştır. Ayrıca, hem tek fazlı hem de üç fazlı reaktörler için bu yöntemde dayalı Matlab/GUIDE ortamında bir tasarım yazılımı gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yazılımın güvenilirlik testleri Ansys/Maxwell yazılımı kullanılarak SEY analizleri ile doğrulanmıştır. Bu çalışmada analitik hesaplamalar için genel geçer elektromanyetik formüller ve hesaplamalar kullanılmıştır. Kullanılan yöntemin literatürdeki diğer çalışmalardan farkı, reaktör tasarımının detaylı ve açık bir şekilde adım adım analitik hesaplamalar ile gerçekleştirilmesi, hedef reaktörün minimum maliyet ve kayıp kriterlerine göre optimize edilebilmesi, hem alüminyum hem de bakır sargılı reaktörler için uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca bu çalışmada sunulan analitik hesaplamalar; spir sayısı, reaktör bacak genişlik-derinlik oranı, sargı malzeme kalınlığı, akım yoğunluğu değerlerinin sürekli olarak değiştirilmesi ile tasarımı hedeflenen reaktörün maliyet ve ya kayıplarının optimize edilerek yüz binlerce reaktör arasından seçilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürde benzer bir tasarım yöntemi ve yazılımı paylaşılmaması nedeniyle bu çalışma ilgili alana önemli bir katkı sağlamaktadır.

## 2. KAÇAK ENDÜKTANS DEĞERİNİN BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF LEAKAGE INDUCTANCE VALUE)

Hava aralıklı demir çekirdekli bir şönt reaktörün kaçak endüktans bileşeni toplam endüktans değeri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, tasarım yazılımının önemli bir girdisi olan kaçak endüktans değeri reaktör tasarımı aşamasında ihmal edilmemelidir [25]. Literatürde saçaklanma etkisini hesaplayan çalışmalar bulunsun da [3, 22] kaçak endüktans değerini analitik olarak doğrudan hesaplayan basit ve pratik bir formül raporlanmamıştır. Ancak, şönt reaktörler için kaçak endüktans yüzdeleri, M330-35AP [26] ve M120-27S [27] sac tipleri için enerji metodu kullanılarak elde edilmiş ve paylaşılmıştır. Çeşitli güç, gerilim ve sıcaklık sınıfı için elde edilen kaçak endüktans yüzdeleri reaktör gücüne karşılık olarak grafiksel veri olarak raporlanmıştır. Şekil 2'de gösterilen veriler bu



**Şekil 2.** Kaçak endüktans yüzdelerinin çalışma gerilimi ve sıcaklık artışı cinsinden reaktör gücüne karşı grafiği  
(Leakage inductance percentage against reactor power in terms of operating voltage and temperature rise)

çalışmada reaktör tasarımı aşamasında analitik parametre hesaplamaları için giriş verisi olarak kullanılmıştır.

### 3. TASARIM YÖNTEMİ / YAZILIM GELİŞTİRİLMESİ

(THE DESIGN METHODOLOGY / DEVELOPMENT OF THE SOFTWARE)

Tasarım yazılımı Matlab/GUIDE ortamında hazırlanmış ve tüm analitik hesaplamalar Matlab yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yazılımın geliştirilmesi için kullanılan hesaplama yöntemine ait basit akış şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Tasarım yazılımı basit akış şeması  
(Simple flow chart of the calculation method)

Tasarım yazılımı ilk olarak tek-fazlı, demir-çekirdekli, alüminyum folyo sargı malzemesine sahip, hava aralıkları eşit dağıtılmış reaktörler için geliştirilmiştir. Sonraki aşamada alternatif olarak bakır folyo sargı malzemesi için de tasarım ekranı eklenmiştir. Her iki alternatif için de tasarım maliyet ve minimum toplam kayıp (demir ve sargı kayıpları) kriterlerine göre ayrı tasarım yapabilmek için geliştirilmiştir. İlgili tasarım yazılımı ara yüzü genel görünümü Şekil 4'te verilmiştir. Yazılım ekranının sol tarafı kullanıcı tarafından belirlenecek ve yazılıma girdi olarak tanımlanacak olan verileri içermektedir. Sağ tarafta ise kullanıcı tarafından girilen verilerden sonra yine kullanıcı tarafından seçilecek tasarım kriterine (minimum maliyet / minimum kayıp) göre analitik hesaplama sonuçlarının görüntülediği sonuç kısmı yer almaktadır. Tek fazlı reaktör tasarım yazılımı tamamlandıktan sonra üç fazlı reaktör tasarımı için de aynı yöntem ile yazılım tekrarlanmıştır.

Kullanıcı tarafından yazılıma girilmesi gereken veriler aşağıda özetlenmiştir;

- L (mH): Tasarımı gerçekleştirilmek istenilen hedef reaktörün mili-Henri cinsinden endüktans değeri
- Akım (A): Amper cinsinden reaktör nominal akımı
- Gerilim (L-to-L) (V): Volt cinsinden reaktör hat gerilimi
- İlk spir sayısı: minimum spir sayısı
- Son spir sayısı: maksimum spir sayısı
- Spir artış: spir artım sayısı
- B(T): Manyetik akı yoğunluğu tasarım değeri
- Ortam sıcaklık: Sıcaklık hesabında kullanılmak üzere belirlenecek ortam sıcaklığı değeri
- Tmin / Tmax: Sıcaklık artış minimum ve maksimum değeri
- LLeak(%): Kaçak endüktans yüzdesi
- f (Hz): Frekans

GİRDİLER		Alüminyum Sargı		Bakır Sargı	
L (mH)	134.8	Boyutlar		Boyutlar	
Akım (A)	188.3	N (Spir)	230	N (Spir)	170
Gerilim (L-to-L) (V)	13800	J (A/mm <sup>2</sup> )	1.1	J (A/mm <sup>2</sup> )	2.3
İlk Spir Sayısı	100	a:kisakenar (mm)	220	a:kisakenar (mm)	260
Son Spir Sıvısı	400	b:uzunkenar (mm)	440	b:uzunkenar (mm)	494
Spir Artış	10	H:Top.Yuks.(mm)	1227.31	H:Top.Yuks.(mm)	1087.48
B (T)	1.3	G:Top.Gen. (mm)	1348	G:Top.Gen. (mm)	1244
Ortam Sıcaklık	20	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	96800	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	128440
Tmin	1	gap/bacak (mm)	58.2153	gap/bacak (mm)	42.1992
Tmax	102	gap sayısı	20	gap sayısı	20
L leak(%)	18	g:gap (mm)	2.91077	g:gap (mm)	2.10996
f (Hz)	50	y:Bck.Y.(mm)	787.306	y:Bck.Y.(mm)	567.478
Sac Malzeme	M4	p:Pencere (mm)	344	p:Pencere (mm)	232
Stacking	0.99	Sıcaklık Artış(K)	101.477	Sıcaklık Artış(K)	101.755
İki Bobin Mesafe(mm)	25	Max. Sıcaklık (C)	121.477	Max. Sıcaklık (C)	121.755
Srg-Üst Demir M.(mm)	120	Al (kg)	777.215	Cu (kg)	911.242
Nuvc-İlkSpir M sağ-sol	10	Sac (kg)	3850.02	Sac (kg)	4315.5
Nuvc-İlkSpir M on-arka	10	Ekstra Malz.(kg)	0	Ekstra Malz.(kg)	0
İzolasyon Mlz Kln (mm)	0.3	Toplam (kg)	4627.23	Toplam (kg)	5226.74
Cu (€/kg)	6	Folyo Klnlk (mm)	0.35	Folyo Klnlk (mm)	0.25
Demir (€/kg)	3	Folyo Gnslk(mm)	489.091	Folyo Gnslk(mm)	327.478
Al (€/kg)	4	Top.Srg Klnlk(mm)	149.5	Top.Srg Klnlk(mm)	93.5
İşçilik+Genel Gider(€)	0	Kayıp/Maliyet		Kayıp/Maliyet	
Ekstra Maliyet(€)	0	Fe kayıp (W)	2524.58	Fe kayıp (W)	2829.81
Ekstra Malzeme (kg)	0	Al kayıp (W)	9752.61	Cu kayıp (W)	9315.97
Bacak Parca Sayısı	19	Toplam (W)	12277.2	Toplam (W)	12145.8
Paralel Folyo Sayısı	1	Maliyet (€)	14658.9	Maliyet (€)	18413.9
		Min Maliyet	Min Kayıp	Min Maliyet	Min Kayıp
Temizle		Temizle - AL		Temizle - CU	Çıkış

Şekil 4. Reaktör tasarımı yazılım ara yüzü (Reactor design software interface)



- Sac malzeme: Nüve malzemesi olarak kullanılacak sac tipi
- Stacking: Sac tipi için stacking (istif) katsayısı
- İki bobin mesafe (mm): Her iki bacakta yer alacak sargılar arası mm cinsinden mesafe
- Srg-Üst Demir M (mm): Sargı ile boyunduruk arası mm cinsinden mesafe
- Nüve-İlk Spir M (sağ-sol): İzolasyon sınıfı göz önüne alınarak havalandırma amacıyla nüve ile ilk spir arası mm cinsinden sağ ve soldan bırakılacak mesafe
- Nüve-İlk Spir M (ön-arka): İzolasyon sınıfı göz önüne alınarak havalandırma amacıyla nüve ile ilk spir arası mm cinsinden ön ve arkadan mesafe
- İzolasyon Mlz Kln (mm): İzolasyon sınıfı ve çalışma gerilimi göz önüne alınarak mm cinsinden sargı izolasyon malzemesi kalınlığı
- Cu (€/kg): Bakır kg başına Euro cinsinden fiyatı
- Demir (€/kg): Demir kg başına Euro cinsinden fiyatı
- Al (€/kg): Alüminyum kg başına Euro cinsinden fiyatı
- İşçilik-Genel Gider (€): İşçilik, genel gider vs. masraflar var ise Euro cinsinden fiyatı
- Ekstra Maliyet (€): Vergi vb. ekstra masraflar var ise Euro cinsinden fiyatı
- Ekstra Malzeme (kg): Üretim sırasında kullanılması planlanan ekstra malzemeler (havalandırma çubukları, sabitleme vidaları, sargı için kullanılacak tüp vb.) için kg cinsinden ağırlık
- Bacak parça sayısı: Her bir bacakta kaç adet hava aralığı olacağını belirleyen parametre
- Paralel folyo sayısı: Sargı paralel katman sayısı

Tüm bu değişkenler tasarımı hedeflenen reaktör için kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Değişkenlerin veri olarak girilmesinden sonra kullanıcı belirlemiş olduğu tasarım kriterine göre, alüminyum ve bakır sargı için ilgili pencerede bulunan Min Maliyet, Min Kayıp tuşlarına basarak analitik parametrelerin hesaplama işlemi başlatır. Yazılım ekranında reaktöre ait kullanıcı verisi girdileri tamamlandıktan sonra aynı ekran üzerinde hem alüminyum sargı hem de bakır sargı için ayrı ayrı tasarım gerçekleştirilebilmekte ve aynı ekran üzerinde görüntülenebilmektedir. Örneğin aynı reaktörün alüminyum sargılı minimum maliyet kriterine göre tasarımı için Min Maliyet butonuna tıklanarak fiziksel parametreler ekranda görüntüledikten sonra hemen yanındaki Min Maliyet ya da Min Kayıp butonlarından birisine tıklanarak aynı reaktörün minimum maliyet ya da minimum kayıp kriterine göre bakır sargılı versiyonunun da fiziksel parametreleri ilgili ekranda görüntülenebilir. İlk aşamada Min Maliyet/Min Kayıp butonu ile fiziksel parametreler elde edildikten sonra, Temizle butonu kullanılarak ilgili alandaki veriler temizlenebilir, belirlenecek yeni kritere göre tasarım yinelenir. Aynı şekilde, yeni bir reaktör için tüm veriler değişecek ise, veri girdi kısmı temizle butonu ile temizlenerek veri girişi yapılabilir. Sadece belli veriler değişecek ise aynı ekran üzerinde ilgili veri kutucuğunda veri değişimi yapılabilir. Hesaplamalar sonucunda fiziksel parametreleri elde edilen reaktörün boyutları sonraki aşamalar (üretici için üretim aşaması, tasarımcı için analiz

çalışmaları vb.) için kullanılmak üzere rapor butonuna basılarak ilgili parametreler ayrı bir ekranda çıktısı alınabilecek şekilde görüntülenebilir ve yeni ekrandaki rapor tuşuna basılarak pdf formatında kaydedilebilir. Hesaplama ve rapor alma işlemlerine ait ekran görüntüleri sonuç (Bölüm 4) kısmında verilmiştir.

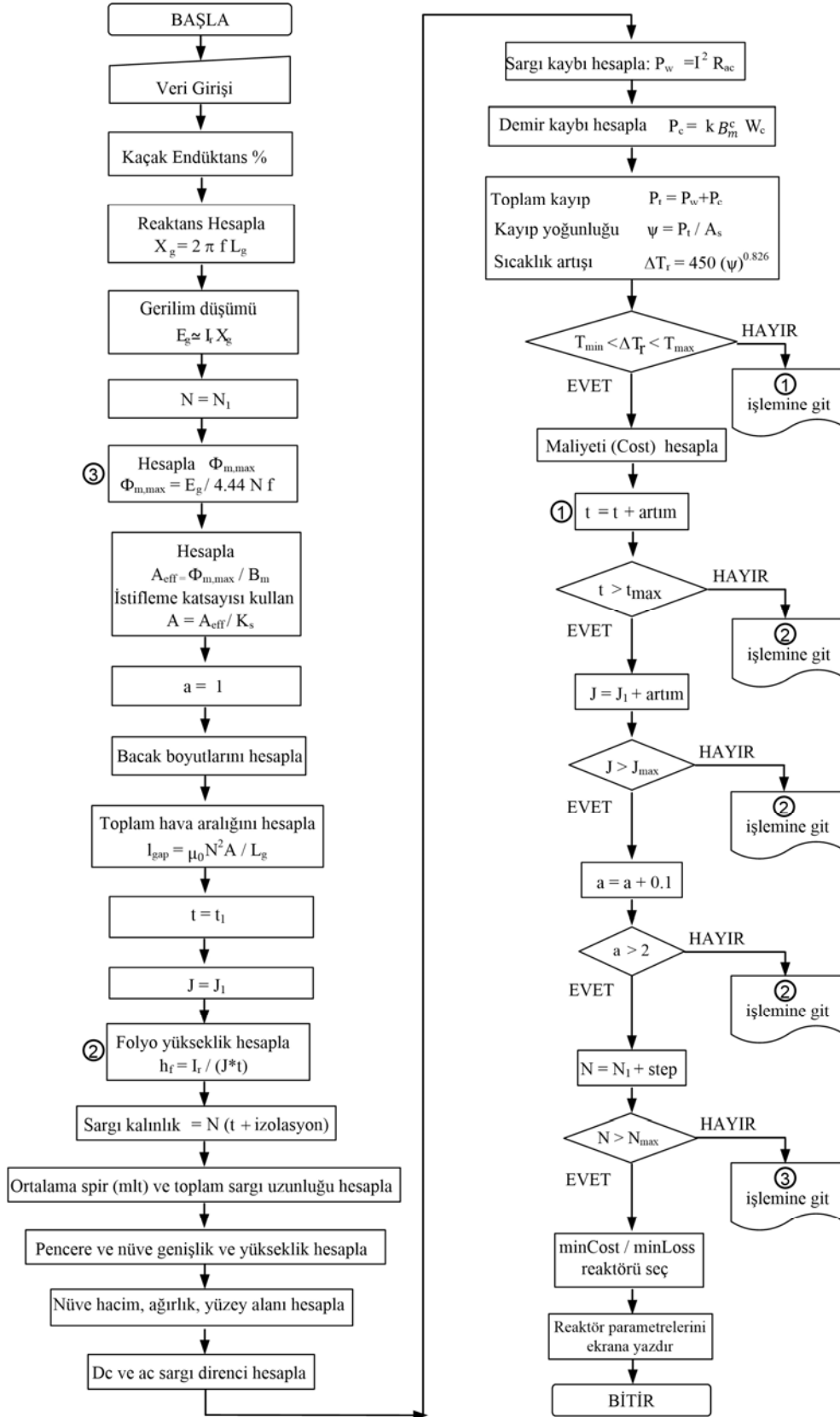
Analitik hesaplama prosedürü şu şekilde işlemektedir. Hesaplama dört farklı döngü vardır. Dıştan içe doğru bu döngüler sırasıyla;

- spir sayısı, N (ilk ve son spir sayısı ile artım miktarı kullanıcı tarafından belirlenir ve veri olarak girilir)
- reaktör bacak genişlik ve derinliğinin oranı, a (1 den 2 ye kadar 0,1 artım)
- sargı folyo kalınlığı, t (0,05 değerinden 1 değerine 0,1 artım)
- akım yoğunluğu, J (0,1 değerinden 5 değerine 0,1 artım) şeklinde yazılıma tanımlanmıştır.

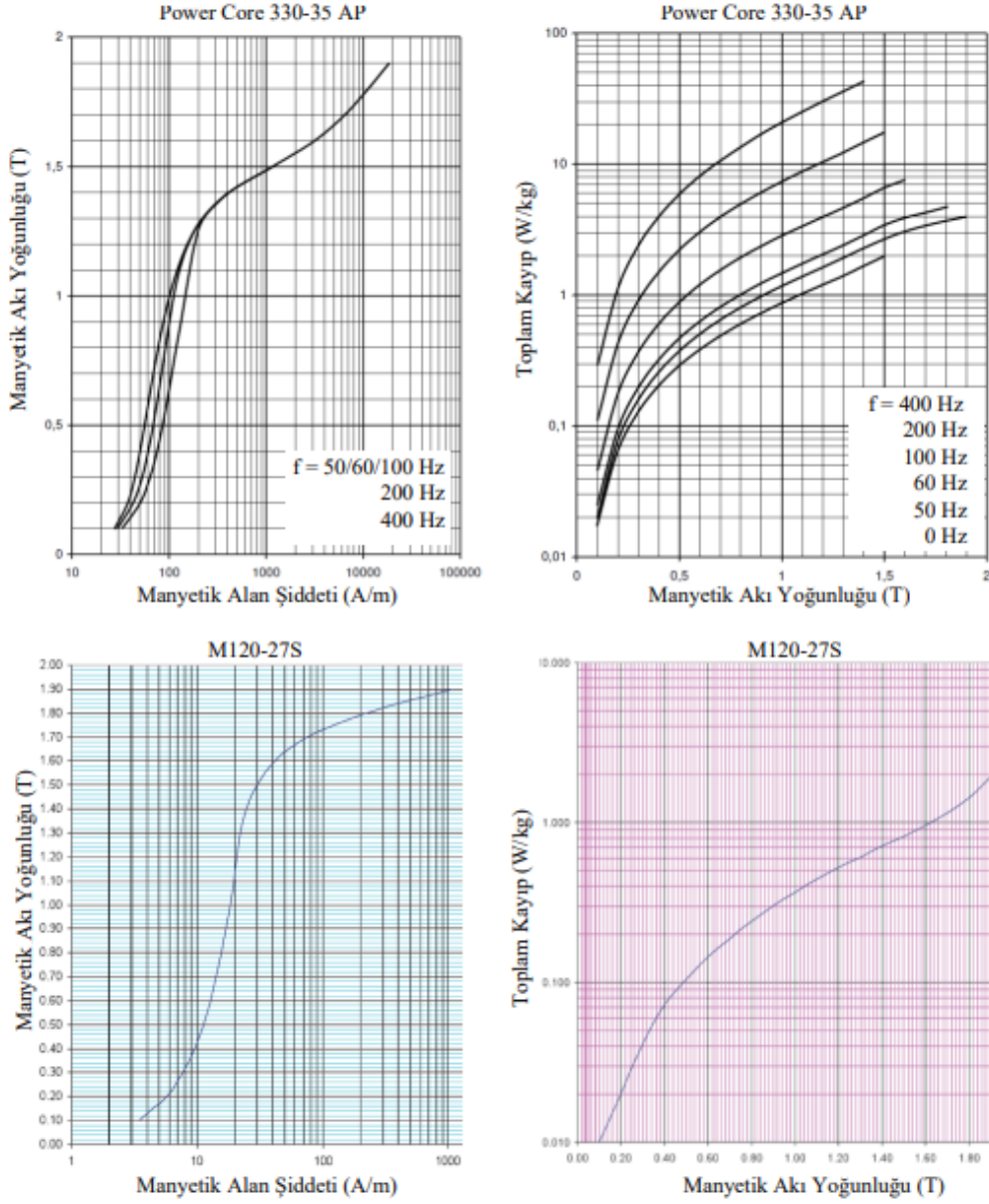
Örnek verecek olursak; kullanıcı minimum ve maksimum spir sayısını sırasıyla 1 ve 50, ve artım oranını da 1 olarak belirleyerek veri girdisi yapmış olsun. Böylece yazılım arka planda elli farklı tur sayısı değeri, on farklı genişlik/derinlik oranı değeri, yirmi farklı sargı malzeme kalınlık değeri ve elli farklı akım yoğunluğu değeri çarpımından oluşan  $(50 \times 10 \times 20 \times 50) = 500000$  (beş yüz bin) adet farklı reaktör tasarımı gerçekleştirecektir. Her bir döngü tekrarında öncelikle reaktörün fiziksel parametreleri (boyutları), ikinci olarak demir ve sargı kayıpları, sonra maliyeti ve en sonunda da sıcaklık artış değeri hesaplanmaktadır. Eğer tasarım kriteri minimum maliyetli reaktörün elde edilmesi ise, bahsedilen beş yüz bin reaktör arasında kullanıcı tarafından girdi olarak belirlenen sıcaklık artış limitlerini karşılayan reaktörler arasından maliyeti en ucuz olanı yazılım tarafından optimum reaktör olarak belirlenir ve ekranda sadece bu reaktöre ait parametreler görüntülenir. Yazılım, bacak genişliğini pratikte kullanılan sac boyutlarını göz önüne alarak on ve katları şeklinde hesaplamaktadır. Pratikte lamine saclar kullanıldığı için analitik hesaplamalarda bacak derinliği için benzer bir yuvarlama yapılmamıştır. Şüphesiz, yazılımdaki tüm veriler tasarımı yapılmak istenilen reaktör dikkate alınarak kullanıcı tarafından arzu edilen şekilde değiştirilebilir. Yazılıma ait detaylı akış şeması ve hesaplamada kullanılan formüller Şekil 5'te verilmiştir.

#### 4. BULGULAR (RESULTS)

Tek fazlı ve üç fazlı tasarım ara yüzleri tamamlandıktan sonra yöntem ve yazılımın doğruluğunun test edilmesi aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada farklı güç, gerilim ve sıcaklık sınıfı seviyelerinde, kaçak endüktans değerleri de göz önünde bulundurularak, M33035-AP ve M120-27S tipi saclar kullanılarak tek fazlı ve üç fazlı reaktör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her iki sac tipine ait BH ve kayıp eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Tasarımı hedeflenen reaktörün fiziksel parametreleri yazılım vasıtasıyla elde edildikten sonra SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece endüktans değerleri ve nüve manyetik akı dağılımları incelenerek hedeflenen değerlerin ne ölçüde gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Yazılıma ait detaylı akış şeması (Detailed flow chart of the design methodology)



Şekil 6. M120-27S / M330-35 AP BH ve kayıp eğrileri (B-H and loss curves of M120-27S and M330-35 AP)

SEY analizi Ansys/Maxwell yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Maxwell, elektromanyetik alan problemlerini sonlu bir uzay bölgesinde uygun sınır koşulları ile Maxwell denklemleri ile çözer. Bu çalışmada SEY analizleri üç boyutlu Manyetostatik (Magnetostatic) analiz yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Manyetostatik analiz DC akımlar, statik harici manyetik alanlar ve sabit mıknatıslar tarafından oluşturulan statik manyetik alanların, kuvvetlerin, torkların ve endüktansların hesaplanmasında oldukça yaygın olarak kullanılan ve güvenilir bir yöntemdir. Manyetostatik analiz yöntemi statik manyetik alanları hesaplar, bu yöntemde tüm nesnelere hareketsizdir. Hesaplanan büyüklük manyetik alan şiddeti (H)'dir. Akım yoğunluğu (J) ve manyetik akı yoğunluğu (B) değerleri H değerinden bulunur. Kuvvet, tork, enerji ve endüktans gibi büyüklükler bu temel alan değerlerinden türetilerek hesap edilir. Maxwell yazılımında

manyetostatik analiz için varsayılan sınır koşulları; nesnelere arasındaki bölgede doğal (Natural) ve dış sınırlarda Neumann sınır koşullarıdır. Doğal sınır koşulları H alanının sınır boyunca sürekli olması, Neumann sınır koşulları ise H alanının sınıra teğet olması ve akımın onu geçmemesi olarak tanımlanır. Bu çalışmada varsayılan sınır koşulları seçilerek benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uyarım olarak dahili uyarım yöntemi seçilmiş, sargılara manyetostatik analiz için literatürde yaygın olarak kullanılan amper-sarım (NI) uyarımı tanımlanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan sacların BH eğrileri Maxwell yazılımında tanımlanmış, böylece lineer olmayan (nonlinear) manyetik geçirgenlik hesaba katılmıştır. Sacların kayıp eğrilerinden elde edilen değerler analitik hesaplamada demir kayıplarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Geçici zaman (transient) sinüzoidal akım ve gerilim uyarımları ile yapılan



çözümlerin manyetostatik analiz çözümünü ile yakın sonuçlar verdiği literatürde raporlanmıştır [21]. Maxwell manyetostatik analiz çözümü ile gerçekleştirilen şönt reaktör benzetim çalışmalarının doğru ve güvenilir sonuç verdiği deneysel çalışmalarla da doğrulanmış ve raporlanmıştır [21]. Örneğin, 500 kVAR, 1100 V (2,57 mH, 787,3 A) tek fazlı, alüminyum sargılı şönt reaktör tasarımı minimum maliyet kriteri ile yapılacak olsun. Belirlenen veri girdileri yazılım ekranında gerçekleştirildikten sonra Min Maliyet tuşuna basılarak işleyiş başlatılmış olur. Analitik hesaplamalar Matlab tarafından (bu tasarım için yaklaşık 30 saniye) bitirildiğinde ilgili reaktörün fiziksel parametreleri Şekil 7'de gösterildiği gibi aynı ekranın sonuçlar kısmında görüntülenir. Şekil 7'de bu reaktörün hem alüminyum hem de bakır sargılı durum için minimum maliyete göre elde edilmiş fiziksel parametreleri verilmiştir. Giriş verisi ve hesaplama sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu örnek için, nüve malzemesi olarak M33035-AP tipi sac ve sargı malzemesi olarak alüminyum folyo seçilmiştir. Nüve manyetik akı yoğunluğu 1,0 Tesla, minimum ve maksimum sıcaklık artış değerleri sırasıyla 58 ve 62 K olarak alınmıştır. Şekil 2'den 1100 V, 500 kVAR, 60 K sıcaklık artışı için kaçak endüktans değeri %10 olarak kullanılmıştır. Spir sayısı 10 turdan başlayarak 100 tura kadar birer tur artırılarak hesaplamaya dahil edilmiş, hava aralığı sayısı 20 olarak seçilmiştir. Demir ve alüminyum fiyatları sırasıyla 3 ve 4 €/kg olarak alınmıştır. Diğer parametreler Tablo 1'de görüldüğü gibidir. Tüm veri girdisi tamamlandıktan sonra Min Maliyet tuşuna basılarak yazılım çalıştırılmış ve sonuç olarak Tablo 1'de verilen parametreler elde edilmiştir. Yaklaşık yarım dakika süren hesaplama işlemi sonucunda; 58 K ile 62 K sıcaklık artış aralığında iki yüz elli bin reaktör arasından (25x10x20x50) minimum maliyete sahip optimum reaktör bulunarak fiziksel parametreleri sonuç kısmında görüntülenmiştir.

Yazılımın çalıştırılması sonrasında elde edilen fiziksel parametreleri rapor olarak almak mümkündür. Bunun için yazılım ekranının orta üst kısmında reaktör şeklinin altında konumlandırılan rapor butonuna basıldığında Şekil 8'de verildiği üzere ayrı bir ekran açılmakta ve açılan bu yeni ekranda reaktöre ait fiziksel parametreler görülmektedir. Ekranın sol üst kısmında konumlandırılan rapor butonuna basılarak ilgili ekran görüntüsü hem tek fazlı hem de üç fazlı tasarım yazılımında pdf dosyası olarak kaydedilebilmektedir.

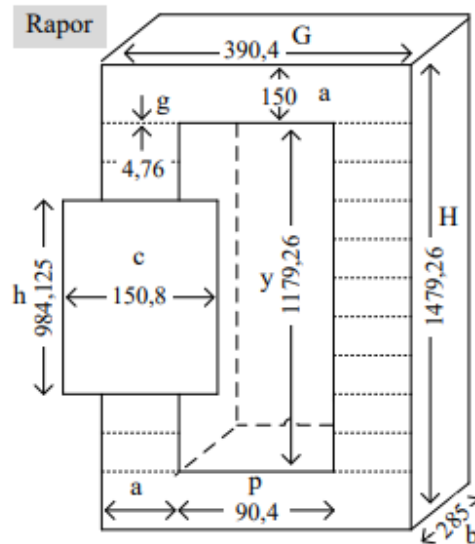
Tablo 1'de gösterilen fiziksel parametreler kullanılarak tek fazlı reaktörün SEY analizi sonucunda toplam endüktans değeri Şekil 9'da görüldüğü üzere 2,56 mH olarak hesaplanmıştır. Reaktörün ağ (mesh) dağılımı ve nüve manyetik akı dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. SEY analiz sonuçlarından görüldüğü üzere hedeflenen endüktans değeri yaklaşık %1'den düşük bir sapma ile gerçekleşmiştir. Ayrıca manyetik akı değerinin hedeflenen 1,0 T düzeyi ile uyumlu olduğu görülmüştür. Üç fazlı tasarım için yazılımın doğruluğunun test edilmesi için de çeşitli reaktör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Şekil 11, 4500 kVAR, 13,8 kV (134,8 mH, 188,3 A) üç fazlı reaktörün M120-27S tipi nüve malzemesi ve alüminyum ve bakır sargılar için minimum maliyet kriterine göre elde edilen tasarım yazılımı ekran görüntüsünü içermektedir. Reaktörün minimum maliyet ve alüminyum sargı için SEY analiz modeli ağ dağılımı ve nüve manyetik akı yoğunluğu dağılımı ile endüktans matrisi sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir. SEY analizi sonucunda elde edilen sonuçlara göre toplam endüktans değeri ve nüve manyetik akı değeri tasarım değerlerinden yaklaşık %5'lik bir sapma ile doğru sonuçlar vermektedir.

GİRDİLER		Alüminyum Sargı		Bakır Sargı	
L (mH)	2,57	Boyutlar		Boyutlar	
Akım (A)	787,3	N (Spir)	64	N (Spir)	40
Gerilim (L-to-L) (V)	1100	J (A/mm <sup>2</sup> )	0,8	J (A/mm <sup>2</sup> )	1,5
İlk Spir Sayısı	1	a:kisakenar (mm)	150	a:kisakenar (mm)	180
Son Spir Sayısı	100	b:uzunkenar (mm)	285	b:uzunkenar (mm)	360
Spir Artış	1	H:Top.Yuks.(mm)	1479,26	H:Top.Yuks.(mm)	984,867
B (T)	1	G:Top.Gen. (mm)	390,4	G:Top.Gen. (mm)	424
Ortam Sıcaklık	20	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	42750	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	64800
Tmin	58	gap/bacak (mm)	95,1328	gap/bacak (mm)	56,3286
Tmax	62	gap sayısı	20	gap sayısı	20
L leak (%)	10	g:gap (mm)	4,75664	g:gap (mm)	2,81643
f (Hz)	50	y:Bck.Y.(mm)	1179,26	y:Bck.Y.(mm)	624,867
Sac Malzeme	M33	p:Pencere (mm)	90,4	p:Pencere (mm)	64
Stacking	0,98	Sıcaklık Artış(K)	61,7845	Sıcaklık Artış(K)	61,8928
İki Bobin Mesafe(mm)	10	Max. Sıcaklık (C)	81,7845	Max. Sıcaklık (C)	81,8928
Srg-Üst Demir M.(mm)	50	Al (kg)	248,956	Cu (kg)	303,222
Nüve-İlkSpir M sag-sol	5	Sac (kg)	986,711	Sac (kg)	1054,94
Nüve-İlkSpir M on-arka	5	Ekstra Malz.(kg)	0	Ekstra Malz.(kg)	0
İzolasyon Mlz Kln (mm)	0,1	Toplam (kg)	1235,67	Toplam (kg)	1358,16
Cu (€/kg)	6	Folyo Klnlk (mm)	1	Folyo Klnlk (mm)	1
Demir (€/kg)	3	Folyo Gnslk(mm)	984,125	Folyo Gnslk(mm)	524,867
Al (€/kg)	4	Top.Srg.Klnlk(mm)	70,4	Top.Srg.Klnlk(mm)	44
İşçilik+Genel Gider(€)	0	Kayıp/Maliyet		Kayıp/Maliyet	
Ekstra Maliyet(€)	0	Fe kayıp (W)	1124,85	Fe kayıp (W)	1202,63
Ekstra Malzeme (kg)	0	Al kayıp (W)	1652,33	Cu kayıp (W)	1318,5
Bacak Parca Sayısı	19	Toplam (W)	2777,18	Toplam (W)	2521,13
Paralel Folyo Sayısı	1	Maliyet (€)	3955,96	Maliyet (€)	4984,14
		Min Maliyet	Min Kayıp	Min Maliyet	Min Kayıp
Temizle		Temizle - AL		Temizle - CU	
		Çıkış			

Şekil 7. Hesaplama tamamlandıktan sonraki ekran görüntüsü (minCost-AL ve MinCost-Cu için)  
(Screen shot after the calculation is completed (for minCost-AL and MinCost-Cu))

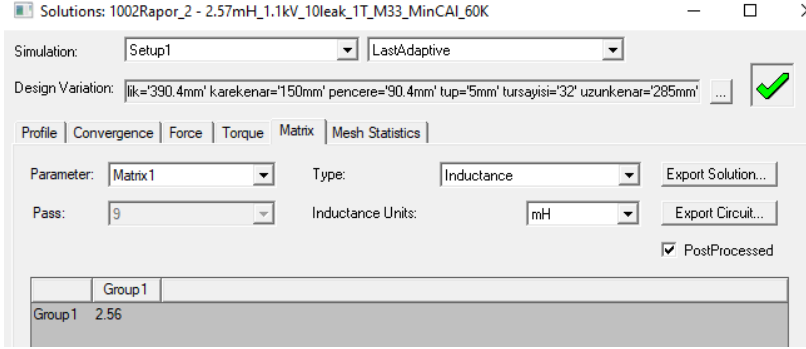
**Tablo 1.** 500 kVAR / 1100 kV reaktör tasarım yazılımı girdi ve sonuç verileri  
(500 kVAR / 1100 V reactor design software input and result data)

Veri Girdisi		Hesaplama Sonrası Değerler	
Endüktans	2,57 mH	N	64 turns
Current	787,3 A	J	0,8 A/mm <sup>2</sup>
Gerilim	1,1 kV	a	150 mm
Max. spir	10	b	285 mm
Min. spir	100	H	1479,26 mm
Spir artım	1	G	390,4 mm
B	1,0 T	a x b	42750 mm <sup>2</sup>
Ortam sıcaklık	20°C	Toplam hava aralığı	95,13 mm
Min. sıcaklık artış	58	Hava aralığı sayısı	20 / bacak
Min. sıcaklık artış	62	Tek bir hava aralığı	4,76 mm
Kaçak endüktans	10%	y	1179,26 mm
Frekans	50 Hz	p	90,4 mm
Sac tipi	M33035AP	Sıcaklık artış	61,78 K
İstif (stacking) faktörü	0,98	Alüminyum	248,96 kg
Sargı mesafe	10 mm	Demir	986,7 kg
Boyunduruk mesafe	50 mm	Toplam	1235,67 kg
Tüp	5 mm	Folyo kalınlık	1,0 mm
İzolasyon	0,1 mm	Folyo yükseklik	984 mm
Demir	3 (€/kg)	Sargı genişlik	70,4 mm
Alüminyum	4 (€/kg)	Demir kaybı	1124,85 W
İşçilik&genel gider	0 €	Sargı kaybı	1652,33 W
Ekstra gider	0 €	Toplam kayıp	2777,18 W
Ekstra mazleme	0 kg	Toplam maliyet	3955,96 €
Gap sayısı	20		
Paralel sargı	1		

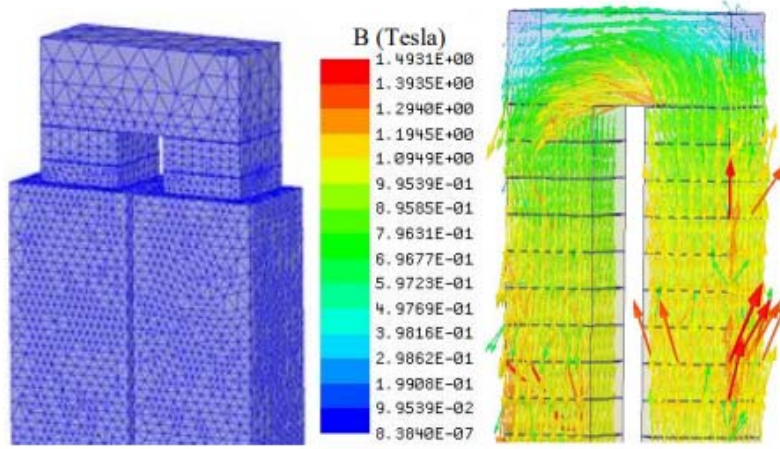
**Şekil 8.** Hesaplama sonucunda elde edilen fiziksel parametrelerin rapor olarak alınması  
(Physical parameters obtained as a result of the calculation as a report)

Tasarım yazılımı doğrulanma testleri amacıyla gerçekleştirilen tasarım örnekleri ve bunlara ait SEY analizi

sonuçları Tablo 2’de özetlenmiş, bulgular tartışma ve sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.



Şekil 9. Tek fazlı model SEY analizi sonucu endüktans hesabı (Inductance calculation of single-phase model by FEM analyses)

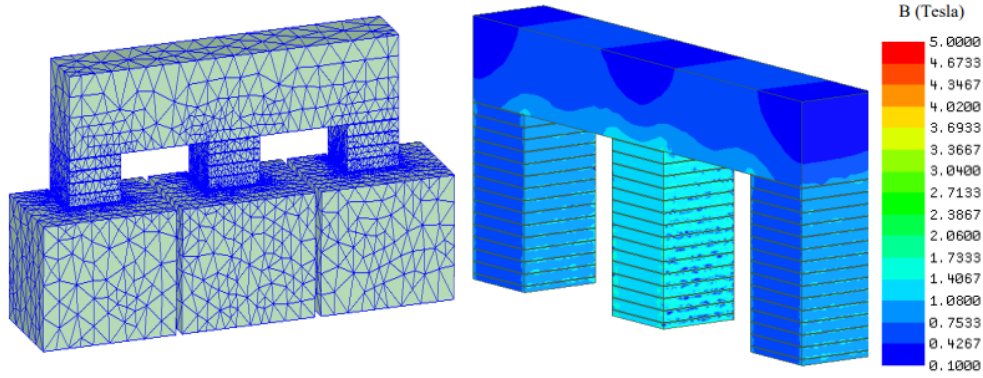


Şekil 10. Tek fazlı model için 3D SEY analizi ağ ve nüve manyetik akı dağılımı (3D model mesh distribution and magnetic flux density for single-phase model)

GİRDİLER		Alüminyum Sargı		Bakır Sargı																																																																																									
L (mH)	134.8																																																																																												
Akim (A)	188.3																																																																																												
Gerilim (L-to-L) (V)	13800																																																																																												
İlk Spir Sayısı	100																																																																																												
Son Spir Savisi	400																																																																																												
Spir Artış	10																																																																																												
B (T)	1.3																																																																																												
Ortama Sıcaklık	20																																																																																												
Tmin	1																																																																																												
Tmax	102																																																																																												
L leak (%)	18																																																																																												
f (Hz)	50																																																																																												
Sac Malzeme	M4																																																																																												
Stacking	0.99																																																																																												
İki Bobin Mesafe (mm)	25					<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Boyutlar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N (Spir)</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td>J (A/mm<sup>2</sup>)</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>a:kisakenar (mm)</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td>b:uzunkenar (mm)</td> <td>440</td> </tr> <tr> <td>H:Top.Yuks.(mm)</td> <td>1227.31</td> </tr> <tr> <td>G:Top.Gen. (mm)</td> <td>1348</td> </tr> <tr> <td>a*b:Kesit (mm<sup>2</sup>)</td> <td>96800</td> </tr> <tr> <td>gap/bacak (mm)</td> <td>58.2153</td> </tr> <tr> <td>gap sayısı</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>g:gap (mm)</td> <td>2.91077</td> </tr> <tr> <td>y:Bek.Y.(mm)</td> <td>787.306</td> </tr> <tr> <td>p:Pencere (mm)</td> <td>344</td> </tr> <tr> <td>Sıcaklık Artış(K)</td> <td>101.477</td> </tr> <tr> <td>Max. Sıcaklık (C)</td> <td>121.477</td> </tr> <tr> <td>Al (kg)</td> <td>777.215</td> </tr> <tr> <td>Sac (kg)</td> <td>3850.02</td> </tr> <tr> <td>Ekstra Malz.(kg)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Toplam (kg)</td> <td>4627.23</td> </tr> <tr> <td>Folyo Klnlk (mm)</td> <td>0.35</td> </tr> <tr> <td>Folyo Gnşlk(mm)</td> <td>489.091</td> </tr> <tr> <td>Top.Srg.Klnlk(mm)</td> <td>149.5</td> </tr> </tbody> </table>		Boyutlar		N (Spir)	230	J (A/mm <sup>2</sup> )	1.1	a:kisakenar (mm)	220	b:uzunkenar (mm)	440	H:Top.Yuks.(mm)	1227.31	G:Top.Gen. (mm)	1348	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	96800	gap/bacak (mm)	58.2153	gap sayısı	20	g:gap (mm)	2.91077	y:Bek.Y.(mm)	787.306	p:Pencere (mm)	344	Sıcaklık Artış(K)	101.477	Max. Sıcaklık (C)	121.477	Al (kg)	777.215	Sac (kg)	3850.02	Ekstra Malz.(kg)	0	Toplam (kg)	4627.23	Folyo Klnlk (mm)	0.35	Folyo Gnşlk(mm)	489.091	Top.Srg.Klnlk(mm)	149.5	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Boyutlar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>N (Spir)</td> <td>170</td> </tr> <tr> <td>J (A/mm<sup>2</sup>)</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>a:kisakenar (mm)</td> <td>260</td> </tr> <tr> <td>b:uzunkenar (mm)</td> <td>494</td> </tr> <tr> <td>H:Top.Yuks.(mm)</td> <td>1087.48</td> </tr> <tr> <td>G:Top.Gen. (mm)</td> <td>1244</td> </tr> <tr> <td>a*b:Kesit (mm<sup>2</sup>)</td> <td>128440</td> </tr> <tr> <td>gap/bacak (mm)</td> <td>42.1992</td> </tr> <tr> <td>gap sayısı</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>g:gap (mm)</td> <td>2.10996</td> </tr> <tr> <td>y:Bek.Y.(mm)</td> <td>567.478</td> </tr> <tr> <td>p:Pencere (mm)</td> <td>232</td> </tr> <tr> <td>Sıcaklık Artış(K)</td> <td>101.755</td> </tr> <tr> <td>Max. Sıcaklık (C)</td> <td>121.755</td> </tr> <tr> <td>Cu (kg)</td> <td>911.242</td> </tr> <tr> <td>Sac (kg)</td> <td>4315.5</td> </tr> <tr> <td>Ekstra Malz.(kg)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Toplam (kg)</td> <td>5226.74</td> </tr> <tr> <td>Folyo Klnlk (mm)</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>Folyo Gnşlk(mm)</td> <td>327.478</td> </tr> <tr> <td>Top.Srg.Klnlk(mm)</td> <td>93.5</td> </tr> </tbody> </table>		Boyutlar		N (Spir)	170	J (A/mm <sup>2</sup> )	2.3	a:kisakenar (mm)	260	b:uzunkenar (mm)	494	H:Top.Yuks.(mm)	1087.48	G:Top.Gen. (mm)	1244	a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	128440	gap/bacak (mm)	42.1992	gap sayısı	20	g:gap (mm)	2.10996	y:Bek.Y.(mm)	567.478	p:Pencere (mm)	232	Sıcaklık Artış(K)	101.755	Max. Sıcaklık (C)	121.755	Cu (kg)	911.242	Sac (kg)	4315.5	Ekstra Malz.(kg)	0	Toplam (kg)	5226.74	Folyo Klnlk (mm)	0.25
Boyutlar																																																																																													
N (Spir)	230																																																																																												
J (A/mm <sup>2</sup> )	1.1																																																																																												
a:kisakenar (mm)	220																																																																																												
b:uzunkenar (mm)	440																																																																																												
H:Top.Yuks.(mm)	1227.31																																																																																												
G:Top.Gen. (mm)	1348																																																																																												
a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	96800																																																																																												
gap/bacak (mm)	58.2153																																																																																												
gap sayısı	20																																																																																												
g:gap (mm)	2.91077																																																																																												
y:Bek.Y.(mm)	787.306																																																																																												
p:Pencere (mm)	344																																																																																												
Sıcaklık Artış(K)	101.477																																																																																												
Max. Sıcaklık (C)	121.477																																																																																												
Al (kg)	777.215																																																																																												
Sac (kg)	3850.02																																																																																												
Ekstra Malz.(kg)	0																																																																																												
Toplam (kg)	4627.23																																																																																												
Folyo Klnlk (mm)	0.35																																																																																												
Folyo Gnşlk(mm)	489.091																																																																																												
Top.Srg.Klnlk(mm)	149.5																																																																																												
Boyutlar																																																																																													
N (Spir)	170																																																																																												
J (A/mm <sup>2</sup> )	2.3																																																																																												
a:kisakenar (mm)	260																																																																																												
b:uzunkenar (mm)	494																																																																																												
H:Top.Yuks.(mm)	1087.48																																																																																												
G:Top.Gen. (mm)	1244																																																																																												
a*b:Kesit (mm <sup>2</sup> )	128440																																																																																												
gap/bacak (mm)	42.1992																																																																																												
gap sayısı	20																																																																																												
g:gap (mm)	2.10996																																																																																												
y:Bek.Y.(mm)	567.478																																																																																												
p:Pencere (mm)	232																																																																																												
Sıcaklık Artış(K)	101.755																																																																																												
Max. Sıcaklık (C)	121.755																																																																																												
Cu (kg)	911.242																																																																																												
Sac (kg)	4315.5																																																																																												
Ekstra Malz.(kg)	0																																																																																												
Toplam (kg)	5226.74																																																																																												
Folyo Klnlk (mm)	0.25																																																																																												
Folyo Gnşlk(mm)	327.478																																																																																												
Top.Srg.Klnlk(mm)	93.5																																																																																												
İki Bobin Mesafe (mm)	25	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">V/Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gerilim (L-to-L)</td> <td>13800</td> </tr> <tr> <td>Gerilim Düşümü</td> <td>13811.8</td> </tr> <tr> <td>Reaktör Gücü</td> <td>4500.8</td> </tr> </tbody> </table>		V/Q		Gerilim (L-to-L)	13800	Gerilim Düşümü	13811.8	Reaktör Gücü	4500.8	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">V/Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gerilim (L-to-L)</td> <td>13800</td> </tr> <tr> <td>Gerilim Düşümü</td> <td>13811.8</td> </tr> <tr> <td>Reaktör Gücü</td> <td>4500.8</td> </tr> </tbody> </table>		V/Q		Gerilim (L-to-L)	13800	Gerilim Düşümü	13811.8	Reaktör Gücü	4500.8																																																																								
V/Q																																																																																													
Gerilim (L-to-L)	13800																																																																																												
Gerilim Düşümü	13811.8																																																																																												
Reaktör Gücü	4500.8																																																																																												
V/Q																																																																																													
Gerilim (L-to-L)	13800																																																																																												
Gerilim Düşümü	13811.8																																																																																												
Reaktör Gücü	4500.8																																																																																												
Srg-Üst Demir M.(mm)	120	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Kayıp/Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe kayıp (W)</td> <td>2524.58</td> </tr> <tr> <td>Al kayıp (W)</td> <td>9752.61</td> </tr> <tr> <td>Toplam (W)</td> <td>12277.2</td> </tr> <tr> <td>Maliyet (€)</td> <td>14658.9</td> </tr> </tbody> </table>		Kayıp/Maliyet		Fe kayıp (W)	2524.58	Al kayıp (W)	9752.61	Toplam (W)	12277.2	Maliyet (€)	14658.9	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Kayıp/Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fe kayıp (W)</td> <td>2829.81</td> </tr> <tr> <td>Cu kayıp (W)</td> <td>9315.97</td> </tr> <tr> <td>Toplam (W)</td> <td>12145.8</td> </tr> <tr> <td>Maliyet (€)</td> <td>18413.9</td> </tr> </tbody> </table>		Kayıp/Maliyet		Fe kayıp (W)	2829.81	Cu kayıp (W)	9315.97	Toplam (W)	12145.8	Maliyet (€)	18413.9																																																																				
Kayıp/Maliyet																																																																																													
Fe kayıp (W)	2524.58																																																																																												
Al kayıp (W)	9752.61																																																																																												
Toplam (W)	12277.2																																																																																												
Maliyet (€)	14658.9																																																																																												
Kayıp/Maliyet																																																																																													
Fe kayıp (W)	2829.81																																																																																												
Cu kayıp (W)	9315.97																																																																																												
Toplam (W)	12145.8																																																																																												
Maliyet (€)	18413.9																																																																																												
Nüve-İlkSpir M sağ-sol	10	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Nüve-İlkSpir M on-arka	10	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
İzolasyon Mlz Kln (mm)	0.3	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Cu (€/kg)	6	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Demir (€/kg)	3	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Al (€/kg)	4	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
İşçilik+Genel Gider(€)	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Ekstra Maliyet(€)	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Ekstra Malzeme (kg)	0	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Bacak Parca Sayısı	19	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Paralel Folyo Sayısı	1	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Min Maliyet</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Min Maliyet</td> <td>Min Kayıp</td> </tr> </tbody> </table>		Min Maliyet		Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Min Maliyet																																																																																													
Min Maliyet	Min Kayıp																																																																																												
Temizle		Temizle - AL		Temizle - CU		Çıkış																																																																																							

Şekil 11. Üç fazlı reaktör (134,8 mH, 188,3 A) tasarım yazılımı ekran görüntüsünü (Three-phase reactor (134.8 mH, 188.3 A) design software screenshot)





Şekil 12. Üç fazlı model için 3D SEY analizi ağ ve nüve manyetik akı dağılımı (MinMaliyet-AL)  
(FEM analysis model / mesh and magnetic flux distribution for the three-phase model (minCost-AL))

Parameter:	Matrix1	Type:	Inductance	Export Solution...
Pass:	8	Inductance Units:	mH	Export Circuit...
				<input checked="" type="checkbox"/> PostProcessed
	Current1	Current3	Current5	
Current1	99.844	-27.813	-26.697	
Current3	-27.813	98.895	-27.81	
Current5	-26.697	-27.81	99.844	

Şekil 13. Üç fazlı model için SEY analizi sonucu endüktans matrisi (minMaliyet-AL)  
(Inductance matrix by FEM analysis for three phase model (minCost-AL))

Tablo 2. Yazılım doğrulama amacıyla gerçekleştirilen tasarım örnekleri (Design data and FEM results for verification of the software)

Hedef Tasarım	Faz	Kaçak End. (%)	$\Delta T$ (K)	B (T)	Sac	Kriter	Sargı	SEY L (mH)	Hata %
338 mH 0,4 kV	1	5	80	1,2	M120	minC	Al	330	2,36
16,9 mH 0,4 kV	1	5	80	1,2	M120	minC	Al	17,7	4,5
16,9 mH 0,4 kV	1	5	80	1,0	M120	minC	Cu	17,9	4,5
5,05 mH 0,4 kV	3	5	60	1,2	M330	minC	Al	5,06	0,2
5,05 mH 0,4 kV	3	5	60	1,2	M330	minC	Cu	4,99	1,2
5,05 mH 0,4 kV	3	5	60	1,2	M330	minL	Cu	5,3	4,9
5,14 mH 1,1 kV	3	10	80	1,2	M330	minC	Al	4,96	3,5
5,15 mH 0,4 kV	3	10	60	1,1	M330	minC	Al	5,12	0,6
134,8 mH 13,8 kV	3	18	100	1,3	M120	minC	Al	128	5
134,8 mH 13,8 kV	3	18	100	1,3	M120	minC	Cu	126	6,5
1264 mH 34,5 kV	3	20	100	1,1	M330	minC	Al	1281	1,3
1264 mH 34,5 kV	3	20	100	1,1	M330	minC	Cu	1188	6
1,43 mH 0,4 kV	3	5	100	1,1	M330	minL	Cu	1,5	4,9
1,43 mH 0,4 kV	3	5	100	1,1	M330	minC	Al	1,48	3,5
1,43 mH 0,4 kV	3	10	80	1,1	M330	minC	Cu	1,34	6,2
1,43 mH 0,4 kV	3	10	80	1,1	M330	minC	Al	1,4	2,1
134,78 mH 13,8 kV	1	14	80	1,0	M120	minC	Al	131,9	2,13
2,57 mH 1,1 kV	1	10	60	1,1	M330	minC	Al	2,56	0,39
2,57 mH 1,1 kV	1	10	60	1,1	M330	minC	Cu	2,46	4,28
2,57 mH 1,1 kV	1	10	60	1,1	M330	minL	Cu	2,68	4,28
2,57 mH 1,1 kV	1	10	60	1,1	M330	minL	Al	2,59	0,78
808 mH 13,8 kV	1	20	80	1,1	M120	minC	Al	787	2,6
808 mH 13,8 kV	1	20	80	1,1	M330	minC	Al	819	1,36
270 mH 13,8 kV	1	12	100	1,1	M330	minC	Al	278	2,9
270 mH 13,8 kV	1	10	100	1,1	M330	minC	Al	285	5,56
1,72 mH 0,4 kV	3	10	100	1,1	M330	minC	Al	1,73	0,58
0,74 mH 0,4 kV	3	10	100	1,1	M330	minC	Al	0,74	0,1

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tasarım yöntemi ve bu yöntem ışığında geliştirilen yazılımın doğruluk testleri SEY analizleri sonucunda gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Hedef endüktans değerleri farklı *gerilim seviyeleri, nüve malzemesi, sıcaklık sınıfı, tasarım kriterleri* göz önüne alındığında genel olarak standartlarda belirtilen limitler çerçevesinde gerçekleşmiştir. Endüktans tolerans değeri IEEE Std. C57.120-1991 dokümanında  $\pm \%2,5$  olarak, IEC 289 ve IEC 60076-6 dokümanında ise  $\pm \%5$  olarak tanımlanmıştır. Tablo 2’de hata sütununda yüzde olarak verilen değerler standartlarda belirtilen tolerans değerleri ile uyushmaktadır. Şüphesiz burada yer alan sonuçlar ilk tasarım aşamasında kullanılan varsayımlar ve seçilen veriler doğrultusunda elde edilmiştir. İlgili yazılım kullanılırken kullanıcı kendi tasarım kriterlerini ve verilerini istediği gibi değiştirebilecektir.

Bakır sargılı reaktörlerde sapma miktarı alüminyum sargılı reaktörlere göre biraz fazla çıkmıştır. Bu sonucun esas nedeni referans alınan çalışmalarda kaçak endüktans yüzdelерinin alüminyum sargılı modeller kullanılarak elde edilmesidir. Kaçak endüktans yüzdeleri farklı sac tipleri ve bakır sargılı reaktörler için ileriki çalışmalarda elde edilip bu sonuçlar tekrar test edilebilir.

Tüm modellerde nüve manyetik alan dağılımları tasarım öncesi hedeflenen sınırlar içerisinde kalmıştır. M330-35AP ve M120-27S tipi saclar için optimum çalışma değeri 1-1,2 Tesla aralığı olarak görülmektedir.

Tablo 2’de, 270 mH 13,8 kV reaktör tasarımına bakılacak olursa kaçak endüktans değeriindeki  $\%2$  fark endüktans sapmasının  $\%2,9$ ’dan  $\%5,56$  oranına yükselmesine sebep olmuştur. Bu durum kaçak endüktans oranının tasarımda ihmal edilmemesi gerektiğini, toplam endüktans değeri için önemli ve belirleyici bir unsur olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar, önerilen tasarım metodunun demir çekirdekli şönt reaktör tasarımı için uygun ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Bu metodun kullanılması sayesinde reaktör üreticileri, tasarım mühendisleri ve araştırmacılar hedefledikleri reaktörlerin tasarımını hızlı, doğru ve güvenilir bir şekilde gerçekleştirme imkânına kavuşacaklardır. Literatürde benzer bir tasarım yöntemi/yazılımı mevcut olmaması (mevcut ise bile çeşitli nedenlerle paylaşılması), nedeniyle demir-çekirdekli reaktörlerin detaylarının hesaba katılarak geliştirilen bu yöntem ilgili alanda önemli bir eksikliği giderecektir.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1002 programı kapsamında 118E687 proje numarasıyla desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kutkut N.H., Divan D.M., Optimal air-gap design in high frequency foil windings, IEEE Transactions on Power Electronics, 13 (5), 942-949, 1998.
2. Tomczuk B., Babczyk K., Calculation of self and mutual inductances and 3-D magnetic fields of chokes with air gaps in core. Electrical Engineering, 83, 41-46, 2001.
3. McLyman T., Transformer and Inductor Design Handbook, Marcel Dekker Inc., USA, 2004.
4. Donuk A., Bilgin, H.F., Ermis M., Effects of distributed air-gaps in the iron-core of shunt reactors on inductance components and losses, International Review of Electrical Engineering, 7 (3), 4428-4436, 2012.
5. Ohri A.K., Wilson T.G., Owen H.A., Design of air-gapped magnetic-core inductors for superimposed direct and alternating currents. IEEE Transactions on Magnetics, 12 (5), 564-574, 1976.
6. Hubert J., Kakalec R., Computer design of ac and dc inductors, Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 707-712, 1993.
7. Bartoli M., Reatti A., Kazimierczuk M.K., Minimum copper and core losses power inductor design, IEEE Industry Applications Conference, 3, 1369-1376, 1996.
8. Han-Jong K., Geun-Ho L., Cheol-Ho J., Jea-Pil L., Cost-effective design of an inverter output reactor in ASD applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48 (6), 1128-1135, 2001.
9. Slobodan N.V., Ljiljana S.P., High-precision active suppression of dc bias in ac grids by grid-connected power converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64 (1), 857-865, 2017.
10. Li R., Zuoshuai W., Sinian Y., Ying X., Shifeng S., Xiang Z., Hongda D., Lei C., Design and verification test of an HTS leakage flux-controlled reactor, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28 (3), 2018.
11. Dayi L., Kai Y., Zhu Z.Q., Yi Q., A novel series power quality controller with reduced passive power filter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64 (1), 773-784, 2017.
12. Antonov A.S., Glushkov D.A., Research on electromagnetic and heat processes in dry type air core current-limiting reactors, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical & Electronic Engineering, 1471-1476, 2017.
13. Ben T., Yang Q., Yan R., Zhu L., Zhang C., Research on stress characteristics of shunt reactor considering magnetization and magnetostrictive anisotropy, IEEE Transactions on Magnetics, 54 (3), 2018.
14. Christoffel M., Design and testing of EHV shunt reactors, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86 (6), 684-692, 1967.
15. Vora J.P., Barnes H.C., Johnson B.L., New shunt reactor principle proved-design data and factory test results for units built on insulated core principle, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 92 (3), 900-906, 1973.



16. Bossi A., Tontini G., Coppadoro F., Influence of dimensional parameters on the design of gapped-core shunt reactors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98 (4), 1144-1146, 1979.
17. Lotfi A., Faridi M., Design optimization of gapped-core shunt reactors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48 (4), 1673-1676, 2012.
18. Zhao Y., Chen F., Ma X., Zhou Z., Optimum design of dry-type air-gapped iron-core reactor based on dynamic programming and circular traversing algorithm, *International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*, 1 (4), 2012.
19. Ahmet Yiğit Arabul, Emre Kurt, Fatma Keskin Arabul, İbrahim Şenol, Hava aralıkları eşit dağıtılmış şönt reaktör modellenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26 (2), 286-294, 2020.
20. Kamran Dawood, Güven Kömürgöz, Fatih Işık, Modelling of the shunt reactor by using finite element analysis, *International Conference on Electric Power Drive Systems*, 2020.
21. İbrahim Sefa, Selami Balcı, Necmi Altın, Sonlu elemanlar yöntemi ile AA hat reaktörlerinin tasarımı, *Politeknik Dergisi*, 18 (4), 257-267, 2015.
22. Abbas Lotfi, Ebrahim Rahimpour, Optimum design of core blocks and analyzing the fringing effect in shunt reactors with distributed gapped-core, *Electric Power Systems Research*, 101, 63-70, 2013.
23. Çınar M., Alboyacı B., Çürükova S., Sönmez O., 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.
24. Ergene L., Polat A., Bakhtiarzadeh H., Design of a permanent magnet synchronous motor used in elevators, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 757-770, 2018.
25. Atilla Dönük, Modeling and Design of Iron-Core Shunt Reactors With Discretely Distributed Air-Gaps, PhD Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2012.
26. Donuk, A., Bilgin, H., Ermis, M., A practical approach to the design of power shunt-reactors with discretely distributed air-gaps, *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, 6 (2), 567-576, 2013.
27. Dönük, A., Determination of leakage inductance percentage for gapped iron-core shunt-reactors with M4 steel as core material, *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 8 (2), 164-169, 2020.