

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

HOLMİYUM (Ho) KATKILI YBCO (358) SÜPERİLETKEN
MALZEMELERİNE AİT RADYASYON SOĞURMA PARAMETRELERİNİN
HİSTERİZİS EĞRİLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS

Osman GÜL

OCAK-2026
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**HOLMİYUM (Ho) KATKILI YBCO (358) SÜPERİLETKEN
MALZEMELERİNE AİT RADYASYON SOĞURMA PARAMETRELERİNİN
HİSTERİZİS EĞRİLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

**EFFECT OF RADIATION ABSORPTION PARAMETERS ON THE
HYSTERESIS CURVES OF HOLMIUM (Ho) DOPED YBCO (358)
SUPERCONDUCTING METARIALS**

YÜKSEK LİSANS

Osman GÜL

**OCAK-2026
GÜMÜŞHANE**



T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

HOLMİYUM (H_o) KATKILI YBCO (358) SÜPERİLETKEN
MALZEMELERİNE AİT RADYASYON SOĞURMA PARAMETRELERİNİN
HİSTERİZİS EĞRİLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

EFFECT OF RADIATION ABSORPTION PARAMETERS ON THE
HYSTERESIS CURVES OF HOLMIUM (H_o) DOPED YBCO (358)
SUPERCONDUCTING METARIALS

YÜKSEK LİSANS

Osman GÜL

Danışman: Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN

OCAK-2026
GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Holmiyum (Ho) Katkılı YBCO (358) Süperiletken Malzemelerine Ait Radyasyon Soğurma Parametrelerinin Histerezis Eğrileri Üzerine Etkisi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, danışmanımın sorumluluğunda hazırladığımı, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

15/01/2026

.....
Osman GÜL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her türlü desteği bana sunan çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. İbrahim DÜZGÜN' e en kalbi duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tezde kullanılan Ho katkılı YBCO(358) numuneleri ve M–H ölçüm verilerinin bir kısmı, danışmanım yürütücülüğünde tamamlanan Gümüşhane Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) projesi kapsamında (2020, Proje No/Adı: [20.F5120.02.01/YBCO (358) Bulk Süperiletkenine Holmiyum (Ho) Katkısının Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Etkisi]) elde edilmiştir. Sağlanan destek için Gümüşhane Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim

Tez çalışmamda benden yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Selim KAYA' ya çok teşekkür ederim. Ayrıca bu sürecin başında beni başarabileceğime inandıran ve beni bu noktada her daim teşvik eden çok kıymetli değerli dostum makine mühendisi Yılmaz Erhan KARACA' ya şükranlarımı sunarım.

Tüm bu süreç boyunca bana her türlü desteklerini sunan çok kıymetli eşim ve çocuklarıma minnettarlığımı sunarım.

Osman GÜL
GÜMÜŞHANE - 2026

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Holmiyum (Ho) katkılı YBCO(358) yüksek sıcaklık süperiletken radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri üzerinden incelenmiştir. Çalışma kapsamında saf YBCO(358), yarı Ho katkılı YBCO(358) ve tam Ho katkılı YBCO(358) numuneleri ele alınarak, katkı oranının enerji aktarım ve kayıp mekanizmaları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Manyetik özellikler, sıfır doğru akım manyetik alanı koşulunda alınan mıknatıslanma–manyetik alan ($M-H$) ölçümleri üzerinden analiz edilmiştir. Elde edilen $M-H$ histerezis eğrileri altında kalan alanlar, MATLAB ortamında sayısal integrasyon yöntemiyle hesaplanarak manyetik alan çevrimi başına karşılık gelen enerji kayıpları nicel olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, Ho katkı oranına bağlı olarak histerezis davranışının ve manyetik enerji kaybının belirgin biçimde değiştiğini göstermiştir.

Radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri ise deneysel ölçüm yapılmaksızın, XCOM ve EGS4 tabanlı hesaplamalı yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Kütle ve lineer soğurma katsayıları, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, radyasyon koruma etkinliği, etkin atom numarası ve kerma katsayıları gibi parametrelerin foton enerjisine bağlı değişimleri değerlendirilmiştir. Hesaplamalı sonuçlar, Ho katkısının atomik bileşim ve yoğunluk üzerinden radyasyon enerjisinin soğurulma ve aktarılma süreçlerini etkilediğini ortaya koymuştur.

Manyetik enerji kayıpları ile radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri arasında doğrudan bir nedensellik kurulmamış olmakla birlikte, her iki enerji rejiminin de malzemenin atomik yapısı ve katkı oranı tarafından belirlendiği gösterilmiştir. Özellikle yarı Ho katkılı numunenin, hem manyetik hem de radyasyonla ilişkili parametreler açısından dengeli bir davranış sergilediği belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, YBCO(358) tabanlı süperiletken seramiklerin enerji sistemleri ve radyasyon ortamlarındaki potansiyel uygulamalarına yönelik önemli çıkarımlar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: EGS4, Holmiyum katkılama, Manyetik enerji kaybı, Radyasyon soğurma parametreleri, YBCO(358)

SUMMARY

In this thesis, Holmium (Ho)-doped YBCO (358) high-temperature superconducting ceramics were investigated in terms of magnetic-field-induced energy losses and photon interaction parameters. Pure YBCO (358), partially Ho-doped YBCO (358), and fully Ho-doped YBCO (358) samples were compared to determine how dopant concentration affects energy transfer and loss mechanisms.

Magnetic behaviour was analysed using Magnetization – Magnetic Field (M–H) measurements under zero DC magnetic field conditions. The energy loss per cycle was quantified by numerically integrating the area enclosed by each M–H hysteresis loop in MATLAB. The results showed that Ho doping significantly alters the hysteresis characteristics and the associated magnetic energy losses.

Radiation interaction parameters were evaluated computationally without irradiating the samples. XCOM and EGS4 based calculations were used to obtain mass and linear attenuation coefficients and derived quantities including half-value layer, mean free path, radiation protection efficiency, effective atomic number, and kerma coefficients over a wide photon energy range. The calculations indicate that Ho addition influences radiation attenuation and energy transfer primarily through changes in atomic composition and density.

Although a direct causal link between magnetic losses and radiation parameters was not established, both sets of properties are governed by the same compositional and structural features. Notably, the partially Ho doped sample exhibited a balanced performance in both magnetic and radiation-related metrics, suggesting potential relevance for energy systems and radiation exposed applications.

Keywords: EGS4, Holmium doping, Magnetic energy loss, Radiation attenuation parameters, YBCO (358)

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji Sistemleri Perspektifinden Süperiletken Malzemeler	1
1.2. Manyetik Alan Altında Enerji Kaybı ve M–H Histerezis Eğrileri.....	2
1.3. Katkılama Yaklaşımı ve Enerji Davranışının Kontrolü	3
1.4. Radyasyonla Etkileşimde Enerji Soğurma Mekanizmaları ve Matematiksel Temeller	5
1.5. YBCO(358) Fazının Yapısal Özellikleri ve Enerji Taşıma Potansiyeli.....	7
1.6. Holmiyum (Ho) Katkısının Fiziksel Özellikleri ve Enerjiyle İlişkili Etkileri	9
1.7. Radyasyon Parametreleri ile Manyetik Enerji Kaybı Arasındaki Kavramsal Bağlantı	11
1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı	12
2. MATERYAL VE YÖNTEM	14
2.1. Numunelerin Hazırlanması	14
2.2. Numunelerin Kodlanması ve Fiziksel Özellikleri	14
2.3. Manyetik Ölçümler ve M–H Histerezis Alanlarının Hesaplanması	15
2.4. Radyasyon Parametrelerinin Hesaplanması (XCOM ve EGS4 Yöntemi).....	16
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	19
3.1. M–H Histerezis Eğrileri ve Manyetik Enerji Kayıpları	19
3.2. M–H Histerezis Alanlarının Hesaplanması ve Sayısal Karşılaştırılması.....	21
3.3. Enerjiyle İlişkili Parametrelerin Karşılaştırmalı Analizi.....	23
3.3.1. Kütlelesel Soğurma Katsayısı (μ/ρ) ve Enerjiye Bağımlı Davranış	23
3.3.2. Yarı Değer Kalınlığı (HVL) ve Ortalama Serbest Yol (MFP).....	25
3.3.3. Radyasyon Koruma Etkinliği (RPE) ve Etkin Atom Numarası (Z_{eff}).....	27
3.3.4. Kerma Katsayıları ve Hızlı Nötron Uzaklaştırma Kesitleri	30

4. SONUÇLAR	33
KAYNAKÇA.....	35
ÖZGEÇMİŞ	39



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Ho katkılı YBCO(358) numunelerine ait temel fiziksel özellikler.....	15
Tablo 2. Ho katkılı YBCO(358) numunelerine ait M–H histerezis alanları (T = 20 K).23	
Tablo 3. S1, S2 ve S3 numuneleri için farklı foton enerjilerinde kütleli soğurma katsayıları μ/ρ (cm ² /g): XCOM (teorik) ve EGS4 (Monte Carlo) karşılaştırması.	25
Tablo 4. S1, S2 ve S3 numuneleri için farklı foton enerjilerinde hesaplanan Kerma katsayıları k (pGy.cm ² /foton): XCOM (teorik) ve EGS4 (Monte Carlo) sonuçları.	32

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. EGS4 Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan dedektör ve geometrik modelin şematik gösterimi.	17
Şekil 2. S1 kodlu saf YBCO (358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi ($T = 20$ K)...	19
Şekil 3. S2 kodlu yarı H_0 katkılı YBCO(358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi ($T = 20$ K)	20
Şekil 4. S3 kodlu tam H_0 katkılı YBCO (358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi ($T = 20$ K).....	20
Şekil 5. S1 kodlu saf YBCO(358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi altında kalan alanın, MATLAB ortamında sayısal integrasyon yöntemiyle hesaplanmasına ait örnek gösterim.	22
Şekil 6. S1, S2 ve S3 numuneleri için kütleli soğurma katsayısının (μ/ρ) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM teorik sonuçları ve EGS4 Monte Carlo sonuçları).....	24
Şekil 7. S1, S2 ve S3 numuneleri için yarı değer kalınlığının (HVL) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).	26
Şekil 8. S1, S2 ve S3 numuneleri için ortalama serbest yolun (MFP) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).	27
Şekil 9. S1, S2 ve S3 numuneleri için radyasyon koruma etkinliğinin (RPE) foton enerjisine bağlı değişimi.	28
Şekil 10. S1, S2 ve S3 numuneleri için etkin atom numarasının (Z_{eff}) foton enerjisine bağlı değişimi.....	29
Şekil 11. S1, S2 ve S3 numuneleri için gama kerma katsayısının foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).	30
Şekil 12. S1, S2 ve S3 numuneleri için hızlı nötron uzaklaştırma kesitlerinin (Σ_R) karşılaştırılması.	31

1. GİRİŞ

1.1. Enerji Sistemleri Perspektifinden Süperiletken Malzemeler

Enerji sistemlerinin verimliliği, sürdürülebilirliği ve güvenilirliği; enerjinin üretimi, iletimi, depolanması ve tüketimi sırasında ortaya çıkan kayıpların minimize edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, enerji kayıplarının fiziksel kökenlerinin anlaşılması ve malzeme düzeyinde kontrol altına alınması, modern enerji mühendisliğinin temel araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Elektriksel ve manyetik alanlar altında çalışan ileri malzemeler, bu kayıpların belirlenmesinde ve iyileştirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

Süperiletken malzemeler, belirli koşullar altında elektriksel direncin sıfıra yaklaşması ve manyetik alanlara karşı özgün tepkiler göstermesi nedeniyle enerji sistemleri açısından dikkat çekici bir potansiyele sahiptir. Elektriksel dirençten kaynaklanan Joule kayıplarının ortadan kalkması, süperiletkenlerin özellikle yüksek akım taşıma gerektiren uygulamalarda cazip olmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, gerçek sistemlerde süperiletken davranış yalnızca ideal dirençsiz iletimle sınırlı değildir; manyetik alan etkileri, akı hareketleri ve yapısal kusurlar nedeniyle enerji kayıpları ortaya çıkabilmektedir (Rouco vd., 2019; Eley vd., 2021; García-Tabarés vd., 2025).

Enerji sistemleri bağlamında süperiletkenlerin değerlendirilmesinde yalnızca elektriksel özellikler değil, aynı zamanda manyetik alan altındaki davranışları da belirleyici olmaktadır. Özellikle değişken manyetik alan koşullarında çalışan sistemlerde, süperiletken malzemelerin manyetik tepkileri histerezis karakteri göstermekte ve bu histerezis döngüleri altında kalan alan, bir çevrim boyunca sistemden kaybolan enerjiyi temsil etmektedir. Bu enerji kaybı, süperiletkenin mikro-yapısal özellikleri, katkı elementleri ve kristal düzeniyle yakından ilişkilidir (Grilli vd., 2016).

Öte yandan, enerji sistemleri yalnızca elektriksel ve manyetik alanlarla sınırlı değildir. Nükleer enerji sistemleri, uzay teknolojileri, radyasyon ortamlarında çalışan elektronik bileşenler ve tıbbi görüntüleme sistemleri gibi birçok uygulamada, malzemelerin iyonlaştırıcı radyasyonla etkileşimi de enerji yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Bu etkileşimler sırasında radyasyon enerjisi, malzeme içerisinde soğurulmakta, saçılmakta veya ikincil enerji formlarına dönüştürülmektedir. Bu süreçlerin nicel olarak değerlendirilmesi; kütleli soğurma katsayısı, yarı değer kalınlığı ve kerma gibi parametreler aracılığıyla yapılmaktadır (Düzgün, 2021; Kaya, 2023).

Bu noktada, süperiletken malzemelerin enerji sistemleri açısından değerlendirilmesi, iki farklı fakat birbiriyle ilişkili enerji rejimini içermektedir: manyetik alanlar altında ortaya çıkan enerji kayıpları ve radyasyon ortamlarında gerçekleşen enerji soğurma süreçleri. Her iki durumda da enerji, malzemenin atomik yapısı, elektron dağılımı ve mikro-yapısal özellikleri tarafından belirlenen mekanizmalar aracılığıyla yeniden dağıtılmakta veya disipasyonu (dissipation) uğramaktadır. Dolayısıyla, katkılama gibi yapısal müdahalelerin bu iki enerji davranışı üzerindeki eşzamanlı etkilerinin incelenmesi, enerji sistemleri mühendisliği açısından bütüncül bir yaklaşıma sunmaktadır.

Bu tez çalışması, süperiletken bir seramik sistemde gerçekleştirilen katkılamanın, manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları ile radyasyon enerjisinin malzeme içindeki etkileşimi üzerindeki etkilerini birlikte ele almayı amaçlamaktadır. Böylece, süperiletken malzemelerin enerji sistemleri bağlamındaki performansı, yalnızca tek bir fiziksel olgu üzerinden değil, farklı enerji etkileşim rejimlerinin ortak yapısal temelleri üzerinden değerlendirilmektedir.

1.2. Manyetik Alan Altında Enerji Kaybı ve M–H Histerezis Eğrileri

Enerji sistemlerinde kullanılan malzemelerin performansı, yalnızca ideal koşullar altındaki davranışlarıyla değil, değişken ve çoğu zaman zorlayıcı alan koşulları altındaki enerji kayıplarıyla da değerlendirilmelidir. Özellikle manyetik alanların etkin olduğu uygulamalarda, malzemenin manyetik yanıtı enerji verimliliği açısından belirleyici bir parametre hâline gelmektedir. Süperiletken malzemeler bu bağlamda özgün bir konuma sahiptir; çünkü manyetik alanlara karşı gösterdikleri tepki, klasik iletken ve manyetik malzemelerden önemli ölçüde farklıdır.

Süperiletkenlerde uygulanan manyetik alanın artmasıyla birlikte, malzeme önce Meissner durumunda alanı dışlamakta, daha yüksek alan değerlerinde ise manyetik akının kuantize vorteksler (girdaplar) hâlinde yapıya nüfuz ettiği karışık duruma geçmektedir. Bu vortekslerin hareketi, çivileme (pinning) merkezleriyle etkileşimi ve alan çevrimleri sırasında gösterdikleri geri dönüşsüz davranışlar, mıknatıslanma–manyetik alan (M–H) eğrilerinde histerezis olarak gözlenmektedir (Bean, 1962; Kim vd., 1963). Ortaya çıkan bu histerezis döngüsü, süperiletken malzemenin manyetik alan altında ideal olmayan davranışının doğrudan bir göstergesidir.

M–H eğrileri altında kalan alan, bir manyetik alan çevrimi boyunca malzeme tarafından kaybedilen enerjiyi temsil eder (Jackson, 1999). Bu enerji kaybı, fiziksel olarak vortekslerin hareketi sırasında ortaya çıkan sürtünme benzeri süreçler ve mikro-

yapısal kusurlar etrafında gerçekleşen enerji disipasyonu ile ilişkilidir (Eley vd., 2021). Enerji sistemleri açısından bu durum, her manyetik çevrimde sistemden geri kazanılamayan bir enerji bileşeni anlamına gelmektedir. Dolayısıyla histerezis alanının büyüklüğü, süperiletken malzemenin manyetik alanlar altındaki enerji verimliliğinin nicel bir ölçütü olarak kabul edilmektedir.

Bu enerji kaybı, aşağıdaki ifade ile tanımlanan kapalı integrale hesaplanabilir:

$$W = \oint M dH \quad (\text{Eşitlik 1})$$

Burada **M** mıknatıslanmayı, **H** uygulanan manyetik alanı ve **W** ise bir çevrim boyunca birim hacimde kaybolan enerjiyi temsil etmektedir. Deneysel olarak elde edilen M–H verileri kullanılarak bu integral sayısal yöntemlerle hesaplanabilmekte ve farklı malzeme bileşimleri arasındaki enerji kayıpları doğrudan karşılaştırılabilmektedir.

Süperiletken malzemelerde manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları; kristal yapı, tane boyutu, oksijen stokiometrisi ve katkı elementleri gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmektedir. Özellikle katkılama yoluyla oluşturulan yapısal düzensizlikler ve yerel kusurlar, vorteks çivileme mekanizmasını güçlendirerek vorteks hareketini sınırlayabilmekte ve bu durum histerezis davranışı üzerinde belirgin değişimlere yol açabilmektedir (Düzgün vd., 2006; Çelebi ve Düzgün, 2009; Düzgün Vd., 2010). Ancak bu etkinin yönü ve büyüklüğü, katkı oranına ve katkı elementinin fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.

Bu tez kapsamında incelenen süperiletken seramiklerde, manyetik alan altındaki enerji kaybı yalnızca bir manyetik özellik olarak ele alınmamış; aksine, malzemenin enerji sistemleri açısından performansını belirleyen temel bir büyüklük olarak değerlendirilmiştir. Farklı katkılama oranlarına sahip numuneler için elde edilen M–H eğrileri ve bu eğrilerden hesaplanan histerezis alanları, katkılamanın manyetik enerji disipasyonu üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Böylece, katkı elementinin süperiletken yapıda enerji kaybını artırıcı veya azaltıcı rolü, deneysel veriler üzerinden tartışılabilir hâle getirilmiştir.

1.3. Katkılama Yaklaşımı ve Enerji Davranışının Kontrolü

Süperiletken malzemelerde katkılama (doping), yalnızca kritik sıcaklık veya taşıyıcı yoğunluğu gibi temel parametreleri değiştiren bir yöntem olarak değil, aynı zamanda enerjiyle ilişkili fiziksel süreçleri kontrol edebilen bir araç olarak değerlendirilmektedir. Enerji sistemleri perspektifinden bakıldığında, katkılama işlemi;

manyetik alanlar altında ortaya çıkan enerji kayıplarının ve radyasyonla etkileşim sırasında gerçekleşen enerji aktarım mekanizmalarının aynı malzeme içerisinde yeniden düzenlenmesini mümkün kılmaktadır.

Yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde, özellikle YBaCuO ailesinde, katkılama çoğunlukla itriyum (Y^{3+}) konumuna nadir toprak elementlerinin yerleştirilmesi yoluyla gerçekleştirilmektedir (Bondarenko vd., 2017; Yong ve Lian, 1992). Bu tür katkılama, kristal kafeste yerel gerilim alanları, manyetik moment farklılıkları ve elektron dağılımında düzensizlikler oluşturarak süperiletken davranış üzerinde çok boyutlu etkiler meydana getirmektedir (Jin vd., 1991; Gokhfeld vd., 2017). Bu etkiler, doğrudan ölçülebilen makroskobik büyüklükler olan mıknatıslanma, enerji kaybı ve radyasyon soğurma parametreleri üzerinden değerlendirilebilmektedir.

Manyetik alan altında çalışan bir süperiletken sistemde, elektromanyetik enerji yoğunluğu genel olarak

$$u = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} \quad (\text{Eşitlik 2})$$

ifadesiyle tanımlanır. Burada $\mathbf{B}$ manyetik akı yoğunluğunu, $\mathbf{H}$ ise manyetik alan şiddetini temsil etmektedir. Katkılama yoluyla malzemenin manyetik yanıtı değiştirildiğinde, bu enerji yoğunluğunun alan çevrimleri boyunca nasıl dağıldığı ve ne kadarının geri kazanılamadığı da değişmektedir. Bu durum, M–H histerezis eğrilerinin şekli ve alanı üzerinden doğrudan gözlemlenebilmektedir.

Holmiyum (Ho) gibi yüksek manyetik momente sahip nadir toprak elementlerinin katkı elementi olarak seçilmesi, bu bağlamda özel bir önem taşımaktadır. Ho^{3+} iyonlarının güçlü manyetik momentleri, süperiletken yapı içerisinde vortekslerin hareketini etkileyen ilave manyetik etkileşimler oluşturabilmektedir (Vallès vd., 2022). Vorteks dinamiği üzerinde etkili olan bu etkileşimler, elektromanyetik enerji disipasyonunun artmasına veya belirli koşullarda sınırlandırılmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla katkı oranının değiştirilmesi, manyetik enerji kaybının kontrollü bir şekilde ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Katkılamanın enerji davranışı üzerindeki etkisi yalnızca manyetik alanlarla sınırlı değildir. Radyasyonla etkileşim sırasında gerçekleşen enerji aktarımı da doğrudan malzemenin atomik yapısı ve elektron yoğunluğu ile ilişkilidir. Fotonların madde içerisindeki zayıflaması, genel olarak Beer–Lambert yasası ile ifade edilir:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Burada I_0 başlangıç radyasyon şiddetini, I malzeme içerisinde geçtikten sonraki şiddeti, μ lineer soğurma katsayısını ve x malzeme kalınlığını temsil etmektedir. Lineer soğurma katsayısı, malzemenin kimyasal bileşimi ve yoğunluğuna bağlı bir büyüklük olup, katkılama yoluyla değiştirilebilmektedir.

Ho katkısı, yüksek atom numarası ve elektron konfigürasyonu nedeniyle foton–madde etkileşim kesitlerini artırabilmekte; bu durum kütleli soğurma katsayısı ve kerma gibi enerjiyle doğrudan ilişkili parametrelerde belirgin değişimlere yol açabilmektedir (Erzenoğlu vd., 2006). Bu bağlamda katkılama, radyasyon enerjisinin malzeme içerisinde ne ölçüde soğurulduğunu veya ikincil enerji formlarına dönüştürüldüğünü belirleyen temel bir kontrol değişkeni hâline gelmektedir.

Bu tez kapsamında ele alınan yaklaşımda, katkılama işlemi tek başına manyetik ya da radyasyonel bir iyileştirme yöntemi olarak değil; enerjinin farklı fiziksel etkileşim rejimlerinde yeniden dağılımını belirleyen ortak bir yapısal müdahale olarak değerlendirilmiştir. Farklı Ho katkı oranlarına sahip YBCO(358) numuneleri için hem M–H histerezis alanlarından elde edilen manyetik enerji kayıpları hem de radyasyon soğurma ve kerma parametreleri birlikte incelenerek, katkılama enerji ilişkisi çok yönlü bir bakış açısıyla analiz edilmiştir.

1.4. Radyasyonla Etkileşimde Enerji Soğurma Mekanizmaları ve Matematiksel Temeller

Enerji sistemleri mühendisliği açısından radyasyonla etkileşim, yalnızca güvenlik veya zırlama problemi olarak değil, enerjinin madde içerisinde nasıl aktarıldığı, soğurulduğu veya yeniden dağıtıldığına ilişkin temel bir fiziksel süreç olarak ele alınmaktadır. İyonlaştırıcı radyasyonun bir malzeme ile etkileşimi sırasında gerçekleşen her olay, taşınan enerjinin bir kısmının atomik ve elektronik yapıya aktarılmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu nedenle radyasyon fiziği, doğrudan enerji transferi ve enerji disipasyonu kavramları üzerine kuruludur.

Foton enerjisinin madde içerisindeki zayıflaması, elektromanyetik etkileşimlerin istatistiksel doğası nedeniyle olasılıksal bir süreçtir. Bu süreç, makroskobik ölçekte Beer–Lambert yasası ile tanımlanır ve foton akısındaki üstel azalma şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{dI}{dx} = -\mu I \quad (\text{Eşitlik 4})$$

Bu diferansiyel denklemin çözümü, radyasyon şiddetinin malzeme kalınlığına bağlı değişimini verir:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (\text{Eşitlik 5})$$

Burada I_0 başlangıç radyasyon şiddeti, $I(x)$ belirli bir x kalınlığından sonra kalan şiddet ve μ lineer soğurma katsayısıdır. Lineer soğurma katsayısı, fotonların malzeme içerisinde birim uzunluk başına etkileşime girme olasılığını temsil etmekte olup, malzemenin yoğunluğu ve atomik bileşimi ile doğrudan ilişkilidir.

Enerjiye bağlı radyasyon–madde etkileşimleri temel olarak üç ana mekanizma üzerinden gerçekleşmektedir: Fotoelektrik olay, Compton saçılması ve çift oluşumu. Bu etkileşimlerin her biri, farklı enerji aralıklarında baskın hâle gelmekte ve taşınan enerjinin maddeye aktarılma biçimini belirlemektedir (Hubbel, 1999).

Düşük enerjili fotonlar için baskın olan fotoelektrik olayda, foton enerjisinin büyük bir kısmı atomun iç kabuk elektronuna aktarılır. Bu süreçte soğurma olasılığı yaklaşık olarak atom numarasının yüksek bir kuvvetiyle orantılıdır ve genellikle

$$\sigma_{pe} \propto Z^n E^{-3} \quad (\text{Eşitlik 6})$$

şeklinde ifade edilir. Burada Z atom numarasını, E foton enerjisini ve n genellikle 4 ile 5 arasında değişen bir üstel katsayıyı temsil etmektedir (Hubbell, 1982). Bu ilişki, yüksek atom numarasına sahip katkı elementlerinin düşük enerjili radyasyon soğurma kapasitesini neden artırdığını fiziksel olarak açıklamaktadır.

Orta enerji aralığında baskın olan Compton saçılmasında ise foton, serbest veya zayıf bağlı bir elektronla etkileşerek enerjisinin bir kısmını elektrona aktarır. Bu süreçte foton tamamen soğurulmaz; ancak enerjisi ve yönü değişir. Compton saçılması, enerji transferinin kademeli olarak gerçekleştiği bir mekanizma olup, malzemenin elektron yoğunluğu ile ilişkilidir. Yüksek enerjilerde ortaya çıkan çift oluşumu sürecinde ise foton enerjisi, elektron–pozitron çiftine dönüşerek malzeme içinde yeni enerji taşıyıcılarının oluşmasına neden olur.

Bu etkileşim mekanizmalarının toplam etkisi, kütle soğurma katsayısı (μ / ρ) gibi enerjiyle doğrudan ilişkili parametreler üzerinden değerlendirilir. Kütle soğurma katsayısı, malzemenin birim kütle başına radyasyon enerjisini soğurma kapasitesini temsil eder ve şu şekilde tanımlanır:

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho \quad (\text{Eşitlik 7})$$

Burada kütle soğurma katsayısı (μ / ρ), foton-madde etkileşimlerinin atomik kökenli bir ölçüsü olup, yoğunluktan bağımsızdır. Lineer soğurma katsayısı μ ise malzemenin gerçek yoğunluğu dikkate alınarak radyasyon enerjisinin uzaysal zayıflamasını tanımlar.

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Eşitlik 8})$$

Burada ρ malzemenin yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu parametre, farklı yoğunluklara sahip malzemelerin radyasyon enerjisiyle etkileşimlerini karşılaştırmak açısından temel bir ölçüt sunmaktadır.

Enerji aktarımının bir diğer önemli göstergesi olan kerma (Kinetic Energy Released per unit Mass), fotonlar tarafından ikincil yüklü parçacıklara aktarılan kinetik enerjiyi temsil eder. Kerma, foton/nötron gibi yüksüz radyasyonun bir ortamda ikincil yüklü parçacıklara aktardığı kinetik enerjiyi birim kütle başına tanımlar; bu nedenle enerji aktarım sürecini nicel olarak karakterize eder. Kerma, enerji soğurmayla doğrudan özdeş değildir; yalnızca yüklü parçacıkların ortamda enerjiyi bırakma (soğurma) koşulları sağlandığında soğurulan dozla yakınlık gösterebilir (Zhanh vd., 2023). Bu bağlamda kerma katsayıları, radyasyonun enerji taşıma kapasitesinin doğrudan bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.

Bu tez kapsamında radyasyonla etkileşim, yalnızca zırhlama performansı açısından değil; enerji transferinin malzeme yapısı tarafından nasıl yönlendirildiğini anlamak amacıyla ele alınmıştır. Katkılama yoluyla değiştirilen atomik yapı ve yoğunluk değerlerinin, kütle soğurma katsayısı, yarı değer kalınlığı ve kerma gibi enerji temelli parametreler üzerindeki etkileri, deneysel ve hesaplamalı veriler üzerinden karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece, radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki davranışı, manyetik alan kaynaklı enerji kayıplarıyla birlikte bütüncül bir enerji çerçevesi içinde değerlendirilmiştir.

1.5. YBCO(358) Fazının Yapısal Özellikleri ve Enerji Taşıma Potansiyeli

YBaCuO ailesinin en yaygın üyesi olan YBa₂Cu₃O_{7-δ} (Y123) fazı, 1987 yılında keşfedilmesinden itibaren yüksek sıcaklık süperiletkenleri alanında temel referans yapı olarak kabul edilmiştir (Chu vd., 1987). CuO₂ düzlemi sayısının artışı ile süperiletkenlik

özellikleri arasındaki ilişkiye yönelik çalışmalar, YBCO ailesinde daha karmaşık fazların araştırılmasına zemin hazırlamış ve bu bağlamda $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (Y358) fazı literatüre kazandırılmıştır (Aliabadi vd., 2009). Y358 fazı, Y123'e kıyasla daha yüksek CuO_2 düzlemi sayısı ve genişletilmiş kristal düzeni ile dikkat çekmiş; ancak sentez zorlukları ve yapısal karmaşıklığı nedeniyle sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır (Topal vd., 2011; ayaş vd., 2011; Gholipour vd., 2012; Gaona vd., 2020; Düzgün, 2025). Bu durum, Y358 fazını enerjiyle ilişkili fiziksel özelliklerin araştırılması açısından hâlen açık bir çalışma alanı hâline getirmektedir.

Bu bağlamda YBCO(358) fazı, yalnızca Y123 yapısının genişletilmiş bir türevi olarak değil, aynı zamanda enerji taşınımı ve enerji kayıplarının yapısal hassasiyetinin incelenebileceği özgün bir süperiletken sistem olarak değerlendirilmektedir. Artan CuO_2 elektromanyetik enerji kaybı gibi süreçlerin Y123 benzeri daha basit yapılara kıyasla farklı biçimlerde ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle Y358 fazı, enerji sistemleri açısından süperiletken yapı–enerji ilişkisini incelemek için uygun bir model sistem sunmaktadır.

YBCO(358) fazı, klasik Y123 yapısına kıyasla daha fazla bakır–oksijen düzlemi içermekte ve bu durum taşıyıcı yoğunluğu ile enerji taşınım mekanizmaları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. CuO_2 düzlemleri, süperiletkenliğin ortaya çıktığı temel yapısal birimler olduğundan, bu düzlemlerin sayısındaki artış teorik olarak daha yüksek akım taşıma kapasitesi ve farklı vorteks dinamikleri anlamına gelmektedir. Enerji sistemleri açısından bakıldığında, bu durum yalnızca iletim kapasitesinin değil, aynı zamanda manyetik alan altında ortaya çıkan enerji kayıplarının da farklılaşabileceğini göstermektedir.

Y358 yapısının bir diğer önemli özelliği, kristal yapısının Y123'e göre daha karmaşık ve sentez koşullarına daha duyarlı olmasıdır. Bu karmaşıklık, faz saflığının sağlanmasını zorlaştırmakla birlikte, aynı zamanda katkılama yoluyla enerjiyle ilişkili özelliklerin daha hassas biçimde ayarlanabilmesine olanak tanımaktadır. Yapısal karmaşıklık arttıkça, kristal kafes içerisinde oluşan yerel gerilim alanları, kusurlar ve bağlanma düzensizlikleri de artmakta; bu durum manyetik vortekslerin hareketi ve çivileme davranışı üzerinde belirleyici olmaktadır.

Manyetik alan altında çalışan bir süperiletken için vorteks hareketi, doğrudan elektromanyetik enerji kaybıyla ilişkilidir. Y358 fazında artan CuO_2 düzlemleri ve karmaşık bağlanma geometrisi, vortekslerin hareket yollarını ve çivileme merkezleriyle etkileşimini değiştirmektedir. Bu bağlamda, Y358 yapısında gözlenen M–H histerezis davranışının, Y123 benzeri daha basit yapılara kıyasla farklı bir enerji kaybı karakteri

sergilemesi beklenmektedir. Bu farklılık, histerezis alanı üzerinden nicel olarak değerlendirilebilmektedir.

Radyasyon enerjisiyle etkileşim açısından değerlendirildiğinde ise YBCO(358) yapısının atomik bileşimi önemli bir avantaj sunmaktadır. Yapı içerisinde yer alan Ba ve Cu gibi görece yüksek atom numaralı elementler, foton–madde etkileşim kesitlerini artırarak enerji soğurma süreçlerini etkilemektedir. Ayrıca Y358 fazının yoğunluğu ve mikro-yapısal düzeni, radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki uzaysal zayıflamasını belirleyen lineer soğurma katsayısı üzerinde doğrudan rol oynamaktadır. Bu nedenle, Y358 fazı yalnızca süperiletkenlik açısından değil, aynı zamanda radyasyon enerjisiyle etkileşim potansiyeli bakımından da incelenmeye değer bir sistemdir.

Literatürde YBCO(358) fazı üzerine yapılan çalışmaların sınırlı sayıda olması, bu yapının enerjiyle ilişkili özelliklerinin henüz yeterince ortaya konmadığını göstermektedir. Özellikle katkılama ile birlikte manyetik enerji kayıpları ve radyasyon soğurma parametrelerinin aynı yapı üzerinde eşzamanlı olarak değerlendirilmesi, mevcut çalışmalarda nadiren ele alınmıştır. Bu durum, Y358 fazını hem bilimsel hem de uygulamalı açıdan özgün bir araştırma konusu hâline getirmektedir.

Bu tez çalışmasında YBCO(358) fazının seçilmesinin temel gerekçesi, yapının sunduğu bu yapısal karmaşıklığın ve literatürdeki sınırlı verinin, enerjiyle ilişkili fiziksel süreçlerin daha derinlemesine incelenmesine olanak tanınmasıdır. Farklı katkılama oranlarıyla elde edilen Y358 tabanlı numunelerde, manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları ile radyasyon enerjisi soğurma davranışlarının birlikte değerlendirilmesi, bu fazın enerji sistemleri açısından potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

1.6. Holmiyum (Ho) Katkısının Fiziksel Özellikleri ve Enerjiyle İlişkili Etkileri

Nadir toprak elementleri, yüksek sıcaklık süperiletkenlerinde katkı elementi olarak kullanıldıklarında, malzemenin hem manyetik hem de enerjiyle ilişkili fiziksel özellikleri üzerinde belirgin etkiler yaratabilmektedir. Bu elementler arasında yer alan Holmiyum (Ho), sahip olduğu yüksek manyetik moment ve atomik özellikleri nedeniyle YBaCuO tabanlı süperiletkenlerde dikkat çeken katkı elementlerinden biridir. Ho katkısının etkisi, yalnızca süperiletkenliğin temel parametreleri ile sınırlı olmayıp, enerji kaybı ve enerji soğurma süreçlerini de kapsayan daha geniş bir fiziksel çerçevede değerlendirilmelidir.

Holmiyum iyonlarının (Ho^{3+}) iyonik yarıçapı ($\sim 0.901 \text{ \AA}$), itriyum iyonlarının (Y^{3+}) iyonik yarıçapına ($\sim 0.892 \text{ \AA}$) oldukça yakın olup, bu durum Ho'nun YBCO yapısında Y konumuna ikame olmasını yapısal açıdan mümkün kılmaktadır (Shannon, 1976; Andreouli ve Tesetsekou, 1997). Bununla birlikte Ho^{3+} iyonlarının sahip olduğu yüksek manyetik moment ($\sim 10,6 \mu_B$), kristal yapı içerisinde ilave manyetik etkileşimlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu manyetik etkileşimler, özellikle manyetik alan altında vortekslerin hareketi ve çivileme davranışı üzerinde etkili olarak, M–H histerezis eğrilerinin şekli ve alanı üzerinde belirleyici rol oynayabilmektedir.

Manyetik alan altında çalışan bir süperiletken sistemde, vorteks hareketi ile ilişkili enerji kaybı, büyük ölçüde çivileme merkezlerinin etkinliğine bağlıdır. Ho katkısı ile kristal kafes (örgü) içerisinde oluşan yerel bozulmalar ve manyetik düzensizlikler, vorteksler için ilave çivileme merkezleri oluşturabilmektedir. Bu durum, vorteks hareketinin kısıtlanmasına bağlı olarak manyetik alan çevrimleri sırasında ortaya çıkan enerji kaybının artmasına veya belirli koşullarda yeniden dağıtılmasına yol açabilmektedir. Dolayısıyla Ho katkı oranı, manyetik enerji kaybının ayarlanabilir bir parametresi olarak değerlendirilebilir.

Ho katkısının enerjiyle ilişkili etkileri yalnızca manyetik alanlarla sınırlı değildir. Atom numarası $Z = 67$ olan Holmiyum elementi, foton–madde etkileşimlerinde önemli rol oynayan atomik kesitleri de etkilemektedir. Bu bağlamda Ho katkısı, malzemenin kütle ve lineer soğurma katsayıları üzerinde değişimlere neden olarak, radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki soğurulma ve enerji aktarım davranışını değiştirebilmektedir. Özellikle radyasyon enerjisinin ikincil yüklü parçacıklara aktarımını tanımlayan kerma parametresi, katkı oranına bağlı olarak farklılaşabilmektedir.

Enerji sistemleri açısından bakıldığında, Ho katkısı ile süperiletken bir yapıda iki farklı enerji rejiminin eşzamanlı olarak etkilenmesi dikkat çekicidir. Bir yandan manyetik alan altında vorteks dinamiklerine bağlı enerji kayıpları değişirken, diğer yandan radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki soğurma ve yayılım davranışı katkı oranına bağlı olarak yeniden şekillenmektedir. Bu iki sürecin ortak noktası, her ikisinin de malzemenin atomik yapısı, yoğunluğu ve mikro-yapısal özellikleri tarafından belirlenmesidir.

Bu tez kapsamında Holmiyum katkısı, YBCO(358) yapısında yalnızca süperiletkenlik parametrelerini değiştiren bir katkı elementi olarak değil, enerji kaybı ve enerji soğurma süreçlerini birlikte etkileyen bir kontrol değişkeni olarak ele alınmıştır. Farklı Ho katkı oranları için elde edilen manyetik histerezis alanları ile radyasyon

soğurma ve kerma parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi, katkılamanın enerjiyle ilişkili fiziksel etkilerinin bütüncül bir şekilde analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

1.7. Radyasyon Parametreleri ile Manyetik Enerji Kaybı Arasındaki Kavramsal Bağlantı

Süperiletken malzemelerin enerjiyle ilişkili davranışları, farklı fiziksel etkileşim rejimleri altında incelenmektedir. Bu tez kapsamında ele alınan manyetik histerezis kaynaklı enerji kayıpları ile radyasyon soğurma parametreleri, aynı deneysel koşullar altında eşzamanlı olarak ölçülen büyüklükler değildir. Manyetik ölçümler, numunelerin süperiletken hâlde bulunduğu koşullarda deneysel olarak gerçekleştirilirken; radyasyonla etkileşime ilişkin parametreler, XCOM ve EGS4 gibi hesaplamalı ve Monte Carlo tabanlı yöntemler kullanılarak teorik olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu iki veri seti, doğrudan deneysel bir eş zamanlılığa değil, aynı malzeme yapısının farklı enerji etkileşim rejimlerindeki tepkilerine dayanmaktadır.

Manyetik alan altında elde edilen M–H histerezis eğrileri, süperiletken malzemede vorteks hareketi ve çivileme mekanizmalarıyla ilişkili elektromanyetik enerji kayıplarını temsil etmektedir. Bu kayıplar, malzemenin atomik düzeni, katkı oranı ve mikro-yapısal özellikleri tarafından belirlenmektedir. Öte yandan radyasyon fiziği kapsamında hesaplanan kütleli soğurma katsayısı, yarı değer kalınlığı ve kerma gibi parametreler, foton enerjisinin malzeme içerisindeki aktarımı ve soğurulma davranışını tanımlamaktadır. Bu büyüklükler de benzer biçimde atomik bileşim, yoğunluk ve elektron dağılımı gibi yapısal özelliklere bağlıdır.

Bu çalışmada kurulan temel yaklaşım, manyetik enerji kaybı ile radyasyon enerjisi soğurma süreçlerinin aynı fiziksel mekanizma ile gerçekleştiği varsayımına dayanmamaktadır. Aksine, her iki sürecin de malzemenin yapısal ve atomik özelliklerinden beslendiği kabul edilmekte; katkılama yoluyla oluşturulan yapısal değişimlerin, farklı enerji etkileşim rejimlerinde nasıl yansıdığı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle elde edilen manyetik ve radyasyon verileri arasında kurulan ilişki, doğrudan nedensel değil, kavramsal ve yapısal temelli bir ilişkidir.

Holmiyum katkısı ile YBCO(358) yapısında meydana gelen atomik ve mikro-yapısal değişimler, bir yandan vorteks çivileme davranışını ve buna bağlı manyetik enerji kayıplarını etkilerken, diğer yandan radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki soğurulma ve aktarım karakterini belirleyen parametrelerde değişimlere yol açmaktadır. Bu iki etki alanının ortak noktası, katkı elementinin atom numarası, manyetik momenti ve yapıya ikame biçimi gibi temel fiziksel özelliklerdir. Dolayısıyla katkı oranına bağlı

olarak gözlenen eğilimlerin, farklı enerji rejimlerinde benzer yönlü veya karşıt biçimde ortaya çıkması, malzeme yapısının enerjiyle etkileşiminin çok boyutlu doğasını yansıtmaktadır.

Bu bağlamda tez kapsamında yapılan değerlendirme, süperiletken numunelerin süperiletken hâlde radyasyona maruz bırakıldığı bir durumu temsil etmemekte; bunun yerine aynı malzeme bileşiminin manyetik alanlar ve iyonlaştırıcı radyasyon altında sergilediği enerji davranışlarının ayrı ayrı incelenip birlikte yorumlanmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, özellikle enerji sistemleri açısından malzemelerin farklı çalışma ortamlarındaki performanslarının bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

1.8. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, YBCO(358) tabanlı süperiletken seramiklerde Holmiyum (Ho) katkısının, enerjiyle ilişkili iki farklı fiziksel etkileşim rejimindeki yansımalarını bütüncül bir bakış açısıyla incelemektir. Bu kapsamda, katkılama oranına bağlı olarak değişen manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları ile radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki soğurulma davranışı, aynı malzeme bileşimi üzerinden ancak farklı yöntemlerle değerlendirilmiştir.

Çalışmanın birinci ayağında, Ho katkı oranı farklı olan YBCO(358) numunelerinin süperiletken hâlde manyetik alan altındaki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla elde edilen M–H histerezis eğrileri kullanılarak, manyetik alan çevrimleri sırasında ortaya çıkan enerji kayıpları nicel olarak belirlenmiş ve katkılama ile vorteks dinamikleri arasındaki ilişki analiz edilmiştir. Bu değerlendirme, süperiletkenliğin manyetik yönüyle ilişkili enerji disipasyonu açısından yapılmıştır.

Çalışmanın ikinci ayağında ise aynı numune bileşimleri için radyasyonla etkileşime ilişkin parametreler, deneysel bir radyasyon uygulaması yapılmaksızın, XCOM ve EGS4 tabanlı hesaplamalı ve Monte Carlo yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu aşamada kütle ve lineer soğurma katsayıları, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol ve kerma gibi enerjiyle doğrudan ilişkili radyasyon parametreleri hesaplanmış ve katkı oranına bağlı değişimleri incelenmiştir. Böylece radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki aktarımı ve soğurulma davranışı teorik bir çerçevede değerlendirilmiştir.

Bu tezde sunulan yaklaşım, manyetik enerji kaybı ile radyasyon enerjisi soğurulmasının aynı fiziksel süreç olduğu varsayımına dayanmamaktadır. Aksine, her iki sürecin de malzemenin atomik yapısı, katkı oranı ve mikro-yapısal özelliklerinden

etkilendiği kabul edilmekte; Holmiyum katkısının bu yapısal özellikler üzerinden farklı enerji etkileşim rejimlerinde nasıl yansıdığı karşılaştırmalı olarak yorumlanmaktadır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar, nedensel bir ilişki kurmaktan ziyade, yapısal temelli bir enerji davranışı değerlendirmesi sunmaktadır.

Sonuç olarak bu tez, Ho katkılı YBCO(358) sistemlerinde manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları ile radyasyon enerjisi soğurma parametrelerini aynı malzeme platformu üzerinden birlikte ele alarak, enerji sistemleri mühendisliği perspektifinden süperiletken seramiklerin çok boyutlu enerji davranışını ortaya koymayı hedeflemektedir. Elde edilen bulguların, hem süperiletken malzemelerin enerji verimliliği açısından değerlendirilmesine hem de radyasyon ortamlarında kullanılabilecek ileri seramik sistemlerin tasarımına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Numunelerin Hazırlanması

Bu tezde incelenen Ho katkılı YBCO(358) seramik numuneler, danışman yürütücülüğünde tamamlanan Gümüşhane Üniversitesi BAP projesi kapsamında (2020, Proje No/Adı: [20.F5120.02.01/YBCO (358) Bulk Süperiletkenine Holmiyum (Ho) Katkısının Yapısal ve Manyetik Özellikleri Üzerine Etkisi]) daha önce sentezlenmiş numuneler arasından seçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yeni numune üretimi yapılmamış; mevcut numuneler tez amaçları doğrultusunda kodlanarak kullanılmıştır. $Y_{3-x}Ho_xBa_2Cu_3O_{7+\delta}$ ($x = 0, 1.5$ ve 3) bileşimine sahip polikristal numuneler için başlangıç hammaddeleri olarak yüksek saflıkta Y_2O_3 , Ho_2O_3 , $BaCO_3$ ve CuO tozları kullanılmıştır. Tozlar, hedef stokiometriye uygun oranlarda tartılarak homojen bir karışım elde edilmesi amacıyla mekanik olarak öğütülmüştür.

Elde edilen karışımlar, faz oluşumunu sağlamak amacıyla hava ortamında kalsinasyon işlemine tabi tutulmuş; ara öğütme adımlarını takiben preslenerek pelet hâline getirilmiştir. Preslenen numuneler, tane büyümesi ve yoğunlaşmanın artırılması amacıyla sinterlenmiştir. Süperiletken fazın oluşumunu ve oksijen stokiometrisinin optimize edilmesini sağlamak için, tüm numunelere sinterleme sonrası oksijen atmosferinde ısıtıl işlem uygulanmıştır.

Bu yöntemle elde edilen numuneler, süperiletkenlik ve radyasyonla etkileşime ilişkin fiziksel özelliklerin karşılaştırmalı olarak incelenmesine uygun, faz bütünlüğü sağlanmış seramik sistemlerdir.

2.2. Numunelerin Kodlanması ve Fiziksel Özellikleri

Bu çalışma kapsamında incelenen YBCO(358) tabanlı süperiletken seramik numuneler, danışman yürütücülüğünde tamamlanan BAP projesi kapsamında üretilmiş numuneler arasından seçilmiş olup. Holmiyum (Ho) katkı oranlarına bağlı olarak üç farklı bileşimde hazırlanmıştır. Tez boyunca anlatım bütünlüğünün sağlanması ve karşılaştırmalı değerlendirmelerin kolaylaştırılması amacıyla numuneler aşağıdaki şekilde kodlanmıştır:

- **S1:** Saf $Y_3Ba_5Cu_3O_{18}$ (Ho katkısız YBCO(358))
- **S2:** $Y_{1.5}Ho_{1.5}Ba_5Cu_3O_{18}$ (yarı Ho katkılı YBCO(358))

• **S3:** $\text{Ho}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ (tam Ho katkılı YBCO(358))

Hazırlanan numunelerin geometrik boyutları (a, b ve c), kütleleri ve hacimleri ölçülerek yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu temel fiziksel parametreler, hem manyetik histerezis ölçümlerinin hem de radyasyonla etkileşime ilişkin hesaplamalı analizlerin yorumlanmasında girdi olarak kullanılmıştır. Numunelere ait ölçülen ve hesaplanan fiziksel özellikler Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Ho katkılı YBCO(358) numunelerine ait temel fiziksel özellikler

Numune	Kimyasal Bileşim	a (mm)	b (mm)	c (mm)	Kütle (g)	Hacim (cm ³)	Yoğunluk (g/cm ³)
S1	$\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	1.90	1.75	2.54	0.0406	0.0084455	4.81
S2	$\text{Y}_{1.5}\text{Ho}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	1.92	1.78	2.47	0.0433	0.0084415	5.13
S3	$\text{Ho}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	1.89	1.75	2.57	0.0335	0.0085003	3.94

Yoğunluk değerlerindeki değişim, Ho katkı oranına bağlı olarak kristal yapı ve mikro-yapısal düzenin farklılaşmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu farklılıkların, ilerleyen bölümlerde sunulan manyetik enerji kaybı ve radyasyon enerjisi soğurma parametreleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

2.3. Manyetik Ölçümler ve M–H Histerezis Alanlarının Hesaplanması

Ho katkılı YBCO(358) süperiletken numunelerinin manyetik alan altındaki davranışları, mıknatıslanma–manyetik alan (M–H) ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Bu ölçümler, numunelerin süperiletken hâlde bulunduğu düşük sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiş ve her bir numune için kapalı M–H histerezis eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler, manyetik alan çevrimleri sırasında ortaya çıkan enerji kayıplarının nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu tezde kullanılan M–H ölçüm verileri, danışman yürütücülüğünde tamamlanan BAP projesi kapsamında Quantum Design Physical Property Measurement System (PPMS) kullanılarak tüm manyetik ölçümler sıfır DC manyetik alanı koşulunda ($H_{dc} = 0$ Oe) alınmıştır.

Manyetik histerezis davranışında, M–H eğrisi altında kalan alan, bir manyetik çevrim boyunca birim hacimde kaybolan elektromanyetik enerjiyi temsil etmektedir. Bu enerji kaybı, vorteks hareketi, çivileme merkezleri ve mikro-yapısal düzensizlikler ile ilişkili olup, katkılama oranına bağlı olarak değişim gösterebilmektedir. Bu nedenle M–H histerezis alanlarının doğru ve karşılaştırılabilir biçimde hesaplanması, süperiletken numunelerin enerji davranışlarının değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Bu çalışmada M–H histerezis alanları, deneysel olarak elde edilmiş mıknatıslanma verileri kullanılarak sayısal yöntemlerle hesaplanmıştır. Ölçümlerden elde edilen manyetik alan (H) ve mıknatıslanma (M) değerleri, dijital ortama aktarılarak MATLAB yazılımı yardımıyla analiz edilmiştir. Her bir numune için artan ve azalan manyetik alan yönlerine karşılık gelen M–H eğrileri ayrı ayrı ele alınmış, kapalı bir histerezis döngüsü oluşturulacak şekilde veri setleri birleştirilmiştir.

Kapalı M–H eğrileri altında kalan alan, sayısal integrasyon yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu amaçla, M–H düzleminde tanımlanan kapalı eğrinin alanı, çokgen alan hesabına dayanan bir algoritma ile belirlenmiştir. Bu yöntem, deneysel verilerin ayırık noktalardan oluşması durumunda histerezis alanının güvenilir bir şekilde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Hesaplanan alan değerleri, her bir numune için manyetik alan çevrimi başına kaybolan enerjinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Histerezis alanlarının hesaplanması sırasında tüm numuneler için aynı analiz prosedürü uygulanmış, böylece katkı oranına bağlı değişimlerin doğrudan karşılaştırılabilir olması sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Ho katkı oranının artmasıyla birlikte manyetik enerji kaybı davranışında meydana gelen değişimleri ortaya koymakta ve vorteks dinamikleri üzerindeki katkılama etkisinin nicel olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Bu bölümde sunulan yöntemle hesaplanan M–H histerezis alanları, ilerleyen bölümlerde radyasyon enerjisi soğurma parametreleri ile birlikte tartışılarak, Ho katkılı YBCO(358) sistemlerinde enerjiyle ilişkili fiziksel süreçlerin bütüncül bir değerlendirmesi yapılacaktır.

2.4. Radyasyon Parametrelerinin Hesaplanması (XCOM ve EGS4 Yöntemi)

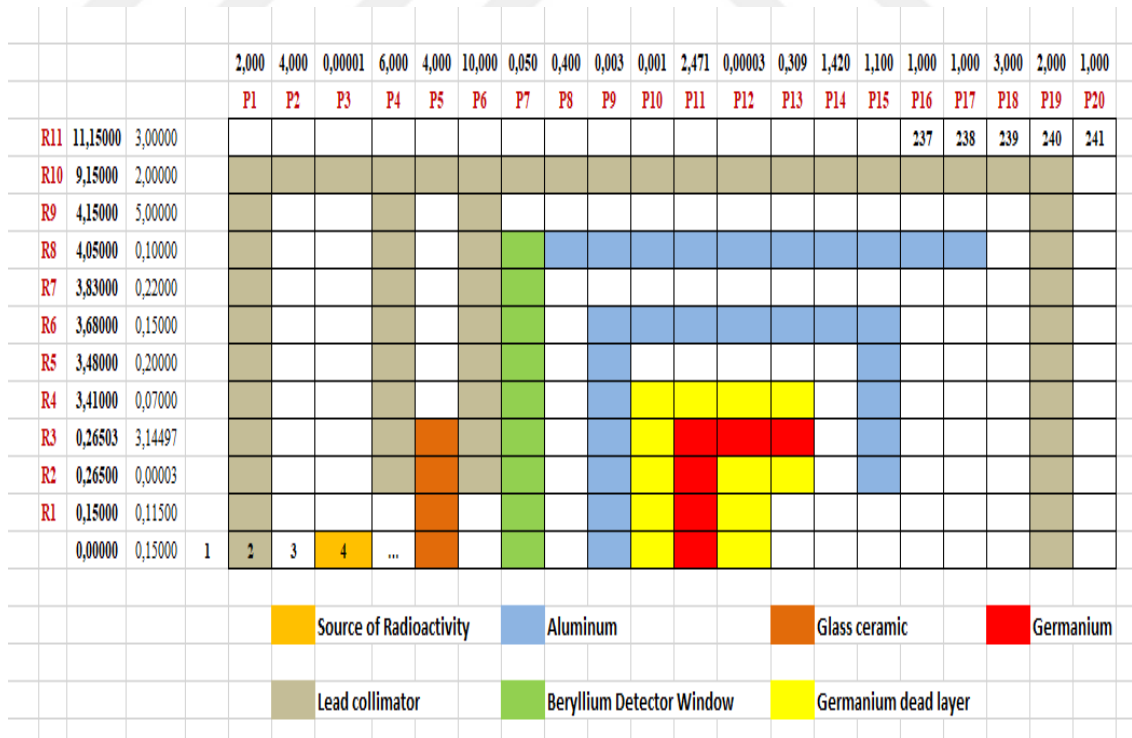
Bu tez kapsamında radyasyonla etkileşime ilişkin parametreler, süperiletken numunelere doğrudan radyasyon uygulanmaksızın, hesaplamalı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Radyasyon enerjisinin Ho katkılı YBCO(358) sistemleri ile etkileşimi, teorik ve Monte Carlo tabanlı yaklaşımlar aracılığıyla incelenmiş; böylece farklı katkı oranlarına sahip numunelerin radyasyon enerjisi soğurma davranışları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Kütlesel soğurma katsayısı (μ/ρ) ve buna bağlı türetilen radyasyon parametreleri, XCOM veri tabanı kullanılarak teorik olarak hesaplanmıştır. XCOM programı, malzemenin kimyasal bileşimi ve foton enerjisine bağlı olarak, fotoelektrik etkileşim, Compton saçılması ve çift oluşumu gibi temel foton–madde etkileşim mekanizmalarını

dikkate alarak kütleli soğurma katsayılarını sağlamaktadır. Bu hesaplamalar, farklı foton enerjileri için numunelerin radyasyon enerjisini soğurma kapasitelerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Teorik sonuçların doğrulanması ve enerji aktarım süreçlerinin daha ayrıntılı biçimde modellenmesi amacıyla, Monte Carlo tabanlı EGS4 kodu kullanılmıştır. EGS4 simülasyonlarında, numunelerin kimyasal bileşimleri ve yoğunluk değerleri girdi parametresi olarak tanımlanmış; fotonların malzeme içerisindeki izledikleri yollar ve enerji kayıpları istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, radyasyon enerjisinin malzeme içerisinde nasıl aktarıldığını ve ikincil yüklü parçacıklara nasıl dönüştüğünü nicel olarak ortaya koymaktadır.

EGS4 Monte Carlo simülasyonlarında kullanılan dedektör ve geometrik model, Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir. Simülasyonlarda malzemenin kimyasal bileşimi, yoğunluğu ve kalınlığı girdi parametreleri olarak tanımlanmış; fotonların malzeme içerisindeki enerji aktarımı ve ikincil yüklü parçacık oluşumu bu model üzerinden istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Bu geometrik modelleme, kütleli soğurma katsayıları ve kerma gibi radyasyon parametrelerinin fiziksel bir etkileşim ortamı içerisinde belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. EGS4 Monte Carlo hesaplamalarında kullanılan dedektör ve geometrik modelin şematik gösterimi.

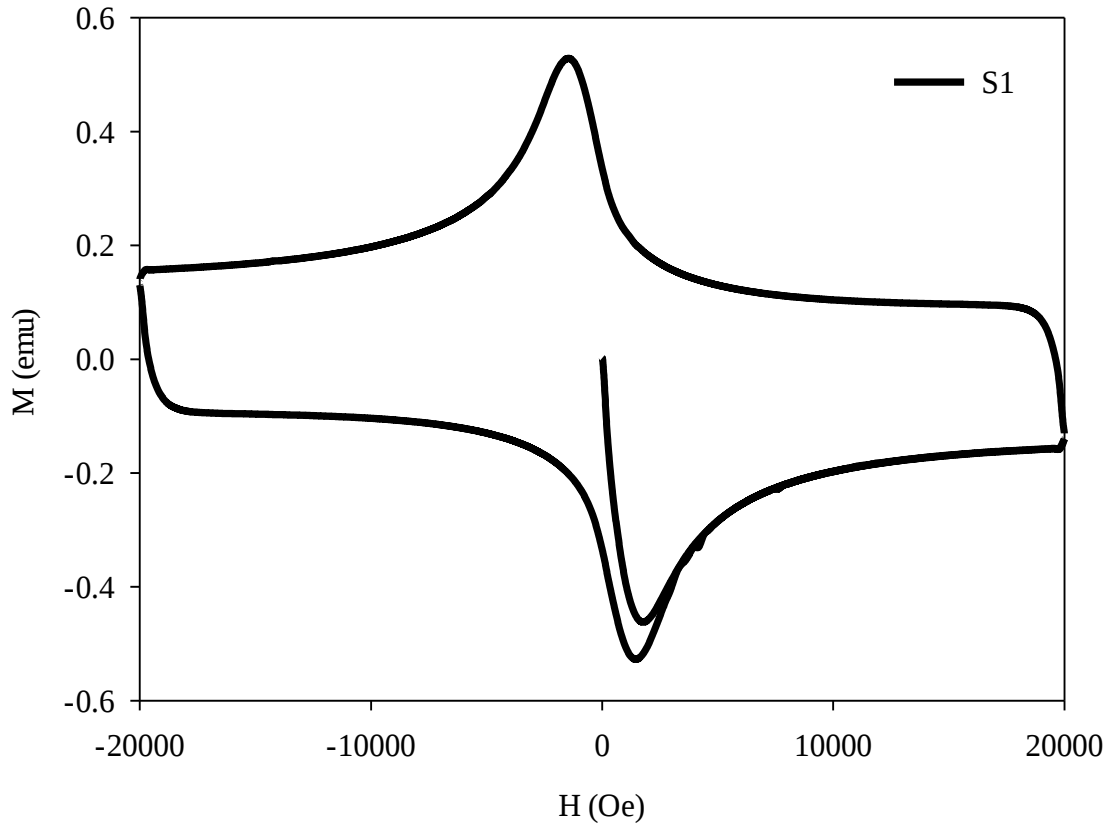
XCOM ve EGS4 yöntemleri kullanılarak elde edilen kütleli ve lineer soğurma katsayıları yardımıyla, yarı değer kalınlığı (HVL), ortalama serbest yol (MFP), radyasyon koruma etkinliği (RPE), etkin atom numarası (Z_{eff}) ve kerma katsayıları gibi enerjiyle doğrudan ilişkili parametreler hesaplanmıştır. Bu parametreler, H_0 katkı oranına bağı olarak numunelerin radyasyon enerjisi ile etkileşim performanslarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır.

Bu bölümde elde edilen radyasyon parametreleri, manyetik ölçümlerden elde edilen M–H histerezis alanları ile doğrudan deneysel bir bağ kurmak amacıyla değil; aynı malzeme bileşiminin farklı enerji etkileşim rejimlerindeki davranışlarını bütüncül bir çerçevede değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Böylece, H_0 katkılı YBCO(358) sistemlerinde enerjiyle ilişkili fiziksel süreçler, deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlar birlikte ele alınarak analiz edilmiştir.

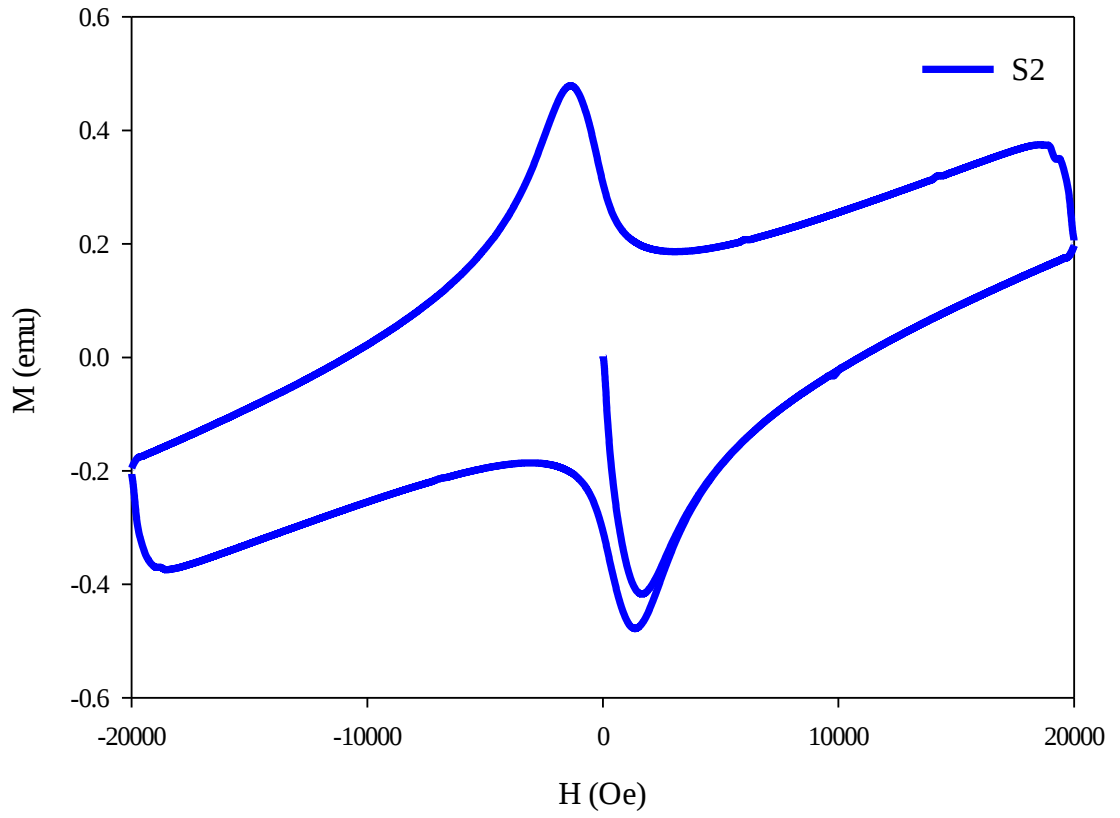
3. BULGULAR VE TARTIşMA

3.1. M–H Histerezis Eğrileri ve Manyetik Enerji Kayıpları

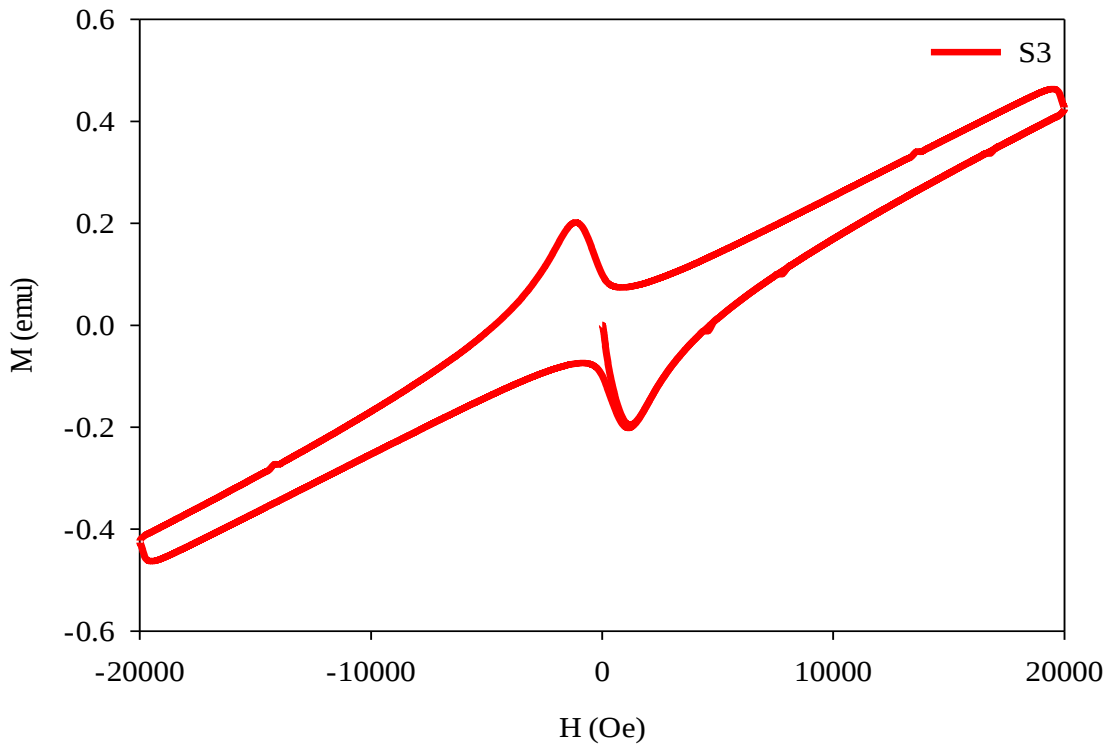
Ho katkılı YBCO(358) süperiletken numunelerinin manyetik alan altındaki davranışları, mıknatıslanma–manyetik alan (M–H) ölçümleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda elde edilen kapalı M–H histerezis eğrileri, numunelerin manyetik alan çevrimleri sırasında sergiledikleri geri dönüşsüz davranışları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan manyetik enerji kayıplarını nicel olarak ortaya koymaktadır. şekil 2, şekil 3 ve şekil 4’te sırasıyla S1, S2 ve S3 kodlu numunelere ait M–H histerezis eğrileri verilmiştir. Tüm numunelerde, düşük sıcaklık koşullarında tipik bir Tip-II süperiletken davranışı gözlenmiş; manyetik alanın artan ve azalan yönlerinde mıknatıslanma değerlerinin farklı yollar izlemesi sonucu belirgin histerezis döngüleri oluşmuştur. Bu döngülerin varlığı, vorteks hareketi ve çivileme mekanizmalarının manyetik yanıt üzerindeki etkisini yansıtmaktadır. şekillerde görüldüğü üzere, Ho katkısının artışı histerezis eğrilerinin biçimini ve alanını belirgin şekilde etkilemektedir.



şekil 2. S1 kodlu saf YBCO (358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi (T = 20 K)



Şekil 3. S2 kodlu yarı Ho katkılı YBCO(358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi ($T = 20$ K)



Şekil 4. S3 kodlu tam Ho katkılı YBCO (358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi ($T = 20$ K)

M–H eğrileri altında kalan alanlar, her bir numune için sayısal yöntemlerle hesaplanarak manyetik alan çevrimi başına kaybolan enerji miktarının bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Hesaplanan histerezis alanları karşılaştırıldığında, H_o katkı oranına bağlı olarak manyetik enerji kaybı davranışında belirgin değişimler olduğu görülmektedir. Saf YBCO(358) numunesi (S1) için elde edilen histerezis alanı, referans bir davranış sergilerken; yarı H_o katkılı numune (S2) ve tam H_o katkılı numune (S3) için bu alanın farklılaştığı gözlenmiştir.

H_o katkısının artmasıyla birlikte kristal yapı içerisinde oluşan yerel bozulmalar ve manyetik düzensizlikler, vorteks çivileme davranışını doğrudan etkilemektedir. S2 numunesinde gözlenen histerezis alanı değişimi, H_o katkısının vorteks hareketini kısmen sınırlandırarak manyetik enerji kaybı mekanizmasını yeniden düzenlediğini düşündürmektedir. Buna karşılık S3 numunesinde, katkı oranının daha da artmasıyla birlikte, çivileme merkezlerinin yoğunluğunun ve manyetik etkileşimlerin farklı bir rejime geçtiği ve bunun histerezis davranışına yansıdığı görülmektedir.

Bu sonuçlar, H_o katkısının manyetik enerji kaybı üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığını, katkı oranına bağlı olarak farklı vorteks dinamiklerinin baskın hâle gelebildiğini göstermektedir. Dolayısıyla YBCO(358) sisteminde H_o katkısı, yalnızca enerji kaybını artıran veya azaltan bir unsur olarak değil, manyetik enerji disipasyonunun karakterini belirleyen yapısal bir kontrol parametresi olarak değerlendirilebilir.

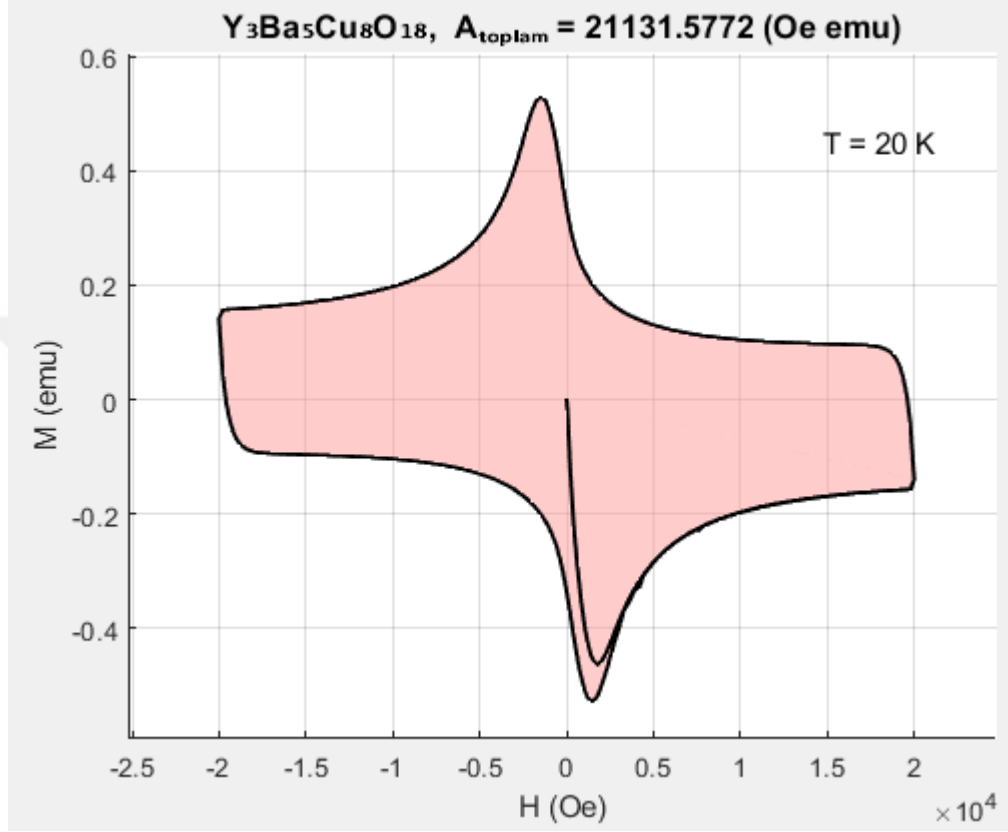
Bu bölümde elde edilen manyetik enerji kaybı sonuçları, bir sonraki alt bölümde sunulacak olan radyasyon enerjisi soğurma parametreleri ile birlikte ele alınarak, H_o katkılı YBCO(358) sistemlerinde enerjiyle ilişkili fiziksel süreçlerin karşılaştırmalı bir analizi yapılacaktır.

3.2. M–H Histerezis Alanlarının Hesaplanması ve Sayısal Karşılaştırılması

H_o katkılı YBCO(358) süperiletken numunelerinin manyetik alan kaynaklı enerji kayıplarını nicel olarak değerlendirmek amacıyla, her bir numuneye ait M–H histerezis eğrileri altında kalan alanlar hesaplanmıştır. Bu alanlar, manyetik alanın bir çevrimi boyunca birim hacimde kaybolan elektromanyetik enerjinin ölçüsü olarak kabul edilmektedir. Hesaplamalar, deneysel olarak elde edilen M–H verilerinin sayısal integrasyon yoluyla gerçekleştirilmiştir.

M–H histerezis alanlarının hesaplanmasında, manyetik alanın artan ve azalan yönlerinde ölçülen mıknatıslanma verileri kullanılarak kapalı bir histerezis döngüsü oluşturulmuştur. Bu kapalı eğri altında kalan toplam alan (A_{toplam}), MATLAB ortamında

geliştirilen sayısal algoritmalar yardımıyla belirlenmiştir. Böylece her bir numune için manyetik alan çevrimi başına karşılık gelen enerji kaybı değerleri elde edilmiştir. Bu alan hesabı yöntemini örneklemek amacıyla, S1 kodlu saf YBCO(358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi altında kalan alanın MATLAB ortamında sayısal integrasyonla belirlenmesine ilişkin örnek bir gösterim Şekil 5’te sunulmuştur.



Şekil 5. S1 kodlu saf YBCO(358) numunesine ait M–H histerezis eğrisi altında kalan alanın, MATLAB ortamında sayısal integrasyon yöntemiyle hesaplanmasına ait örnek gösterim.

Bu örnek hesaplama, manyetik enerji kaybının belirlenmesinde kullanılan sayısal alan hesabı yöntemini açıklamak amacıyla verilmiş olup, S2 ve S3 numuneleri için de aynı analiz prosedürü uygulanmıştır.

Saf YBCO(358) numunesi (S1) için hesaplanan toplam histerezis alanı, H_0 katkılı numunelerle karşılaştırmada referans değer olarak alınmıştır. Yarı H_0 katkılı YBCO(358) numunesi (S2) için elde edilen histerezis alanı, saf numuneye kıyasla daha düşük bir değer sergilerken; tam H_0 katkılı YBCO(358) numunesi (S3) için hesaplanan alanın belirgin biçimde azaldığı gözlenmiştir. Bu durum, H_0 katkı oranının artmasıyla birlikte manyetik enerji kaybı mekanizmasının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir.

Hesaplanan histerezis alanlarına ait sayısal değerler Tablo 2’de özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, Ho katkısının manyetik enerji kaybı üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığı, katkı oranına bağlı olarak farklı vorteks çivileme rejimlerinin baskın hâle geldiği anlaşılmaktadır. Özellikle S2 numunesinde gözlenen görece yüksek histerezis alanı, Ho katkısının belirli bir oranına kadar vorteks çivileme mekanizmasını güçlendirdiğini; S3 numunesinde ise aşırı katkı durumunda manyetik etkileşimlerin farklı bir karakter kazandığını düşündürmektedir.

Tablo 2. Ho katkılı YBCO(358) numunelerine ait M–H histerezis alanları (T = 20 K)

Numune	Kimyasal Bileşim	A_{toplam} (Oe . emu)	Manyetik Enerji Kaybı
S1	$\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	21131.58	Referans
S2	$\text{Y}_{1.5}\text{Ho}_{1.5}\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	19648.98	Azalmış
S3	$\text{Ho}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$	6957.07	Belirgin biçimde azalmış

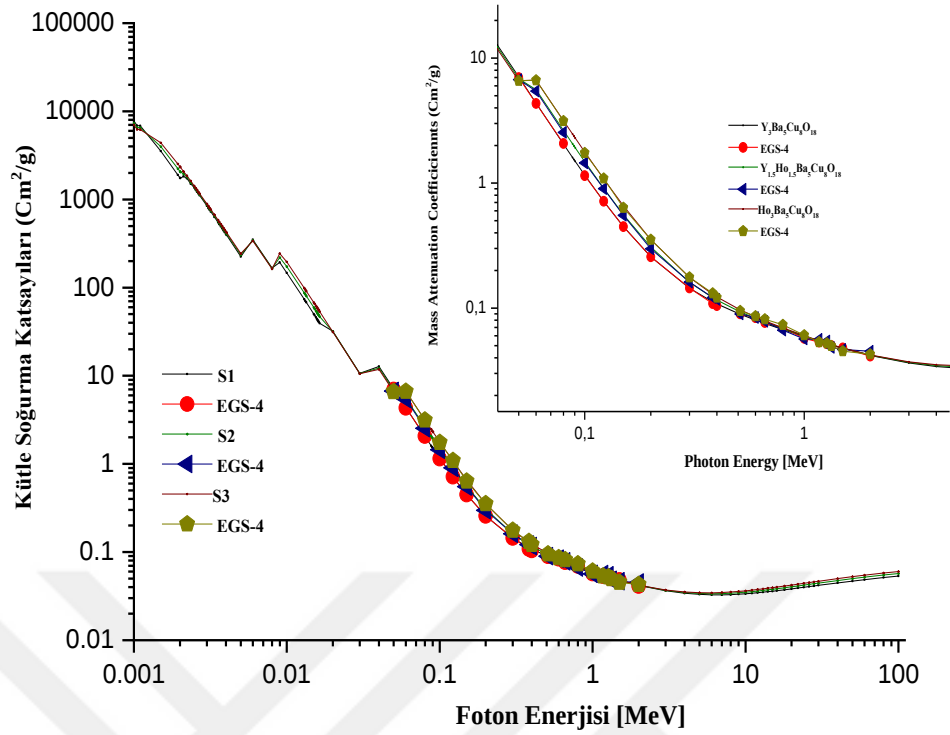
A_{toplam} değerleri, M–H histerezis eğrileri altında kalan alanların sayısal integrasyon ile hesaplanmıştır.

3.3. Enerjiyle İlişkili Parametrelerin Karşılaştırmalı Analizi

3.3.1. Kütlesel Soğurma Katsayısı (μ/ρ) ve Enerjiye Bağımlı Davranış

Bu alt bölümde Ho katkılı YBCO(358) numunelerinin foton enerjisine bağlı kütlesel soğurma katsayıları (μ/ρ) XCOM ve EGS4 sonuçları birlikte değerlendirilmiştir. Kütlesel soğurma katsayısı, malzemenin birim kütle başına foton enerjisini zayıflatma/soğurma kapasitesini temsil ettiğinden, farklı bileşimlerin radyasyonla etkileşim performansını karşılaştırmak için temel bir ölçüttür. Bu çalışmada S1, S2 ve S3 numuneleri için elde edilen μ/ρ eğrileri geniş bir foton enerji aralığında karşılaştırılmıştır.

Şekil 6’da görüldüğü üzere μ/ρ değerleri düşük foton enerjilerinde yüksek değerler almakta, enerji arttıkça azalma eğilimi göstermekte ve yüksek enerji bölgesinde tekrar farklı bir rejime geçmektedir. Düşük enerji bölgesindeki davranış, fotoelektrik etkileşimin baskın olduğu enerji aralığıyla uyumludur; bu bölgede atom numarası ve kimyasal bileşim farklılıklarının soğurma olasılığı üzerinde daha belirgin etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Orta enerji bölgesinde eğrilerin birbirine yaklaşması ise Compton saçılmasının baskın olduğu rejimde bileşime duyarlılığın görece azalmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 6. S1, S2 ve S3 numuneleri için kütleli soğurma katsayısının (μ/ρ) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM teorik sonuçları ve EGS4 Monte Carlo sonuçları).

Bu alt bölüm açısından önemli bir nokta da XCOM (teorik) ile EGS4 (Monte Carlo) sonuçlarının genel eğilim bakımından birbirini doğrulamasıdır. Numuneler için elde edilen XCOM-EGS4 yakınlığı, simülasyon modellemesinin güvenilirliğini desteklemekte ve sonraki parametrelerin (HVL, MFP, kerma vb.) yorumlanması için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

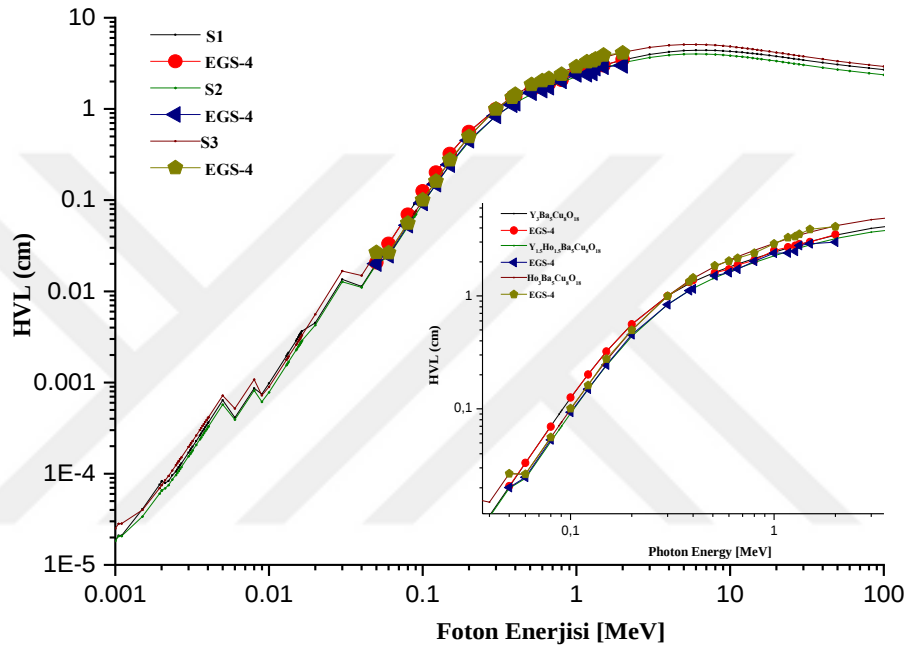
Tablo 3. S1, S2 ve S3 numuneleri için farklı foton enerjilerinde kütleli soğurma katsayıları μ/ρ (cm^2/g): XCOM (teorik) ve EGS4 (Monte Carlo) karşılaştırması.

Enerji (keV)	S1		S2		S3	
	XCOM	EGS4	XCOM	EGS4	XCOM	EGS4
50	7.084	6.974	6.825	6.722	6.597	6.589
60	4.366	4.335	5.587	5.450	6.668	6.658
80	2.050	2.072	2.638	2.542	3.158	3.140
100	1.158	1.146	1.486	1.450	1.776	1.746
122	0.714	0.716	0.907	0.904	1.078	1.090
150	0.449	0.448	0.560	0.553	0.658	0.635
200	0.257	0.257	0.308	0.298	0.353	0.353
300	0.144	0.145	0.161	0.162	0.176	0.176
383	0.112	0.109	0.121	0.121	0.129	0.131
400	0.108	0.105	0.116	0.117	0.123	0.122
511	0.089	0.090	0.093	0.090	0.097	0.095
600	0.080	0.084	0.083	0.084	0.085	0.086
662	0.075	0.077	0.077	0.078	0.079	0.081
800	0.067	0.070	0.068	0.067	0.069	0.073
1000	0.059	0.057	0.060	0.057	0.060	0.061
1173	0.054	0.053	0.055	0.056	0.055	0.053
1274	0.052	0.052	0.052	0.054	0.052	0.052
1332	0.051	0.050	0.051	0.048	0.051	0.050
1500	0.048	0.048	0.048	0.047	0.048	0.045
2000	0.042	0.041	0.042	0.045	0.042	0.043

3.3.2. Yarı Değer Kalınlığı (HVL) ve Ortalama Serbest Yol (MFP)

Kütleli soğurma katsayısından türetilen yarı değer kalınlığı (HVL) ve ortalama serbest yol (MFP) parametreleri, malzemenin radyasyon enerjisini zayıflatma ve soğurma kapasitesini geometrik bir bakış açısıyla değerlendirmeye olanak tanımaktadır. HVL, gelen foton şiddetinin yarıya düşürülmesi için gerekli malzeme kalınlığını temsil ederken; MFP, fotonların malzeme içerisinde bir etkileşme gerçekleştirmeden kat ettiği ortalama mesafeyi ifade etmektedir. Bu iki parametre, radyasyon koruma ve zayıflatma performansının karşılaştırılmasında tamamlayıcı göstergeler olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 7’de S1, S2 ve S3 numuneleri için HVL değerlerinin foton enerjisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Düşük foton enerjilerinde HVL değerlerinin oldukça küçük olduğu, enerji arttıkça ise belirgin bir artış eğilimi sergilediği görülmektedir. Bu davranış, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkileşimin baskın olması nedeniyle radyasyonun daha kısa mesafelerde soğurulmasıyla ilişkilidir. Enerji arttıkça Compton saçılmasının baskın hâle gelmesi, fotonların malzeme içerisinde daha uzun mesafeler kat edebilmesine ve dolayısıyla HVL değerlerinin artmasına neden olmaktadır.

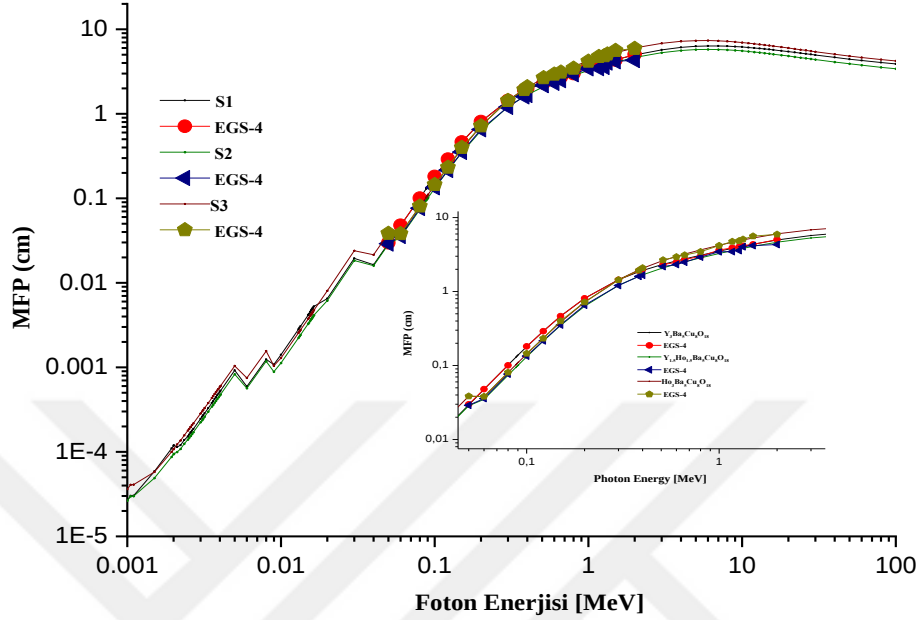


Şekil 7. S1, S2 ve S3 numuneleri için yarı değer kalınlığının (HVL) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).

Ho katkı oranına bağlı karşılaştırma yapıldığında, numuneler arasında HVL değerlerinde belirli farklılıklar gözlenmektedir. Bu farklılıklar, numunelerin yoğunlukları ve etkin atom numaralarındaki değişimlerle doğrudan ilişkilidir. Özellikle yarı Ho katkılı S2 numunesinin bazı enerji aralıklarında daha düşük HVL değerleri sergilemesi, bu bileşimin radyasyon zayıflatma açısından daha dengeli bir yapı sunduğunu göstermektedir.

Şekil 8’de ise ortalama serbest yol (MFP) değerlerinin foton enerjisine bağlı değişimi sunulmuştur. MFP eğrileri genel olarak HVL ile benzer bir enerji bağımlılığı sergilemekte olup, düşük enerjilerde küçük, yüksek enerjilerde ise daha büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu durum, foton–madde etkileşim olasılığının enerjiye bağlı olarak

azalmasıyla tutarlıdır. Numuneler arasındaki MFP farkları, Ho katkısının atomik bileşim ve yoğunluk üzerindeki etkilerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 8. S1, S2 ve S3 numuneleri için ortalama serbest yolun (MFP) foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).

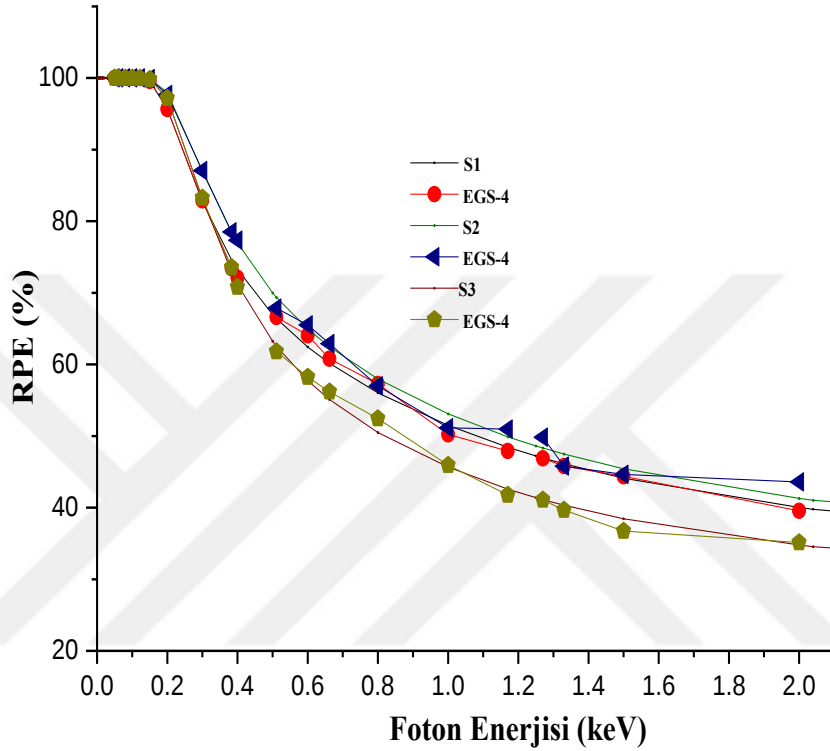
HVL ve MFP parametrelerinin birlikte değerlendirilmesi, Ho katkılı YBCO(358) numunelerinde radyasyon enerjisinin malzeme içerisindeki yayılım ve zayıflama karakterinin katkı oranına duyarlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, bir önceki alt bölümde sunulan kütleli soğurma katsayılarıyla tutarlı olup, farklı parametrelerin aynı fiziksel eğilimleri desteklediğini ortaya koymaktadır.

3.3.3. Radyasyon Koruma Etkinliği (RPE) ve Etkin Atom Numarası (Z_{eff})

Radyasyon koruma etkinliği (Radiation Protection Efficiency, RPE), belirli bir enerji aralığında malzemenin gelen foton akısını ne ölçüde zayıflattığını yüzdesel olarak ifade eden önemli bir parametredir. Bu büyüklük, kütleli ve lineer soğurma katsayılarından türetilmekte olup, malzemenin radyasyon zırhlama performansının doğrudan bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada S1, S2 ve S3 numuneleri için RPE değerleri farklı foton enerjileri altında hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Şekil 9'da görüldüğü üzere, tüm numuneler için RPE değerleri düşük foton enerjilerinde yüksek değerlere ulaşmakta, enerji arttıkça belirgin bir azalma eğilimi

göstermektedir. Bu davranış, düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkileşimin baskın olması ve soğurma olasılığının yüksekliği ile ilişkilidir. Enerji arttıkça Compton saçılmasının baskın hâle gelmesi, radyasyonun malzeme içerisinde daha kolay geçmesine ve dolayısıyla RPE değerlerinin azalmasına neden olmaktadır.

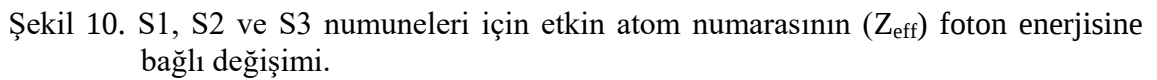


Şekil 9. S1, S2 ve S3 numuneleri için radyasyon koruma etkinliğinin (RPE) foton enerjisine bağlı değişimi.

Ho katkı oranına bağlı karşılaştırma yapıldığında, yarı Ho katkılı S2 numunesinin geniş bir enerji aralığında görece daha yüksek RPE değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durum, S2 numunesinin atomik bileşimi ve yoğunluğunun, radyasyon zayıflatma açısından daha dengeli bir yapı sunduğunu düşündürmektedir. Buna karşılık tam Ho katkılı S3 numunesinde, bazı enerji aralıklarında RPE değerlerinin daha düşük olması, aşırı katkılamanın radyasyon zırhlama performansı üzerinde her zaman olumlu bir etki oluşturmadığını göstermektedir.

Radyasyonla etkileşim süreçlerinin daha ayrıntılı yorumlanabilmesi amacıyla, etkin atom numarası (Z_{eff}) parametresi de değerlendirilmiştir. Etkin atom numarası, bileşik ve çok elementli malzemelerde foton-madde etkileşimlerinin tek bir atom

Şekil 10'da S1, S2 ve S3 numuneleri için etkin atom numarasının foton enerjisine bağlı değişimi sunulmaktadır. Düşük enerji bölgesinde Z_{eff} değerlerinin yüksek olduğu, enerji arttıkça ise daha düşük ve nispeten sabit değerlere yaklaştığı görülmektedir. Bu eğilim, fotoelektrik etkileşimin atom numarasına güçlü biçimde bağlı olması ve yüksek enerjilerde Compton saçılmasının baskın hâle gelmesiyle tutarlıdır. Ho katkısının artmasıyla birlikte düşük enerji bölgesinde Z_{eff} eğrilerinde gözlenen değişimler, atomik bileşimin radyasyon etkileşim mekanizmaları üzerindeki belirleyici rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

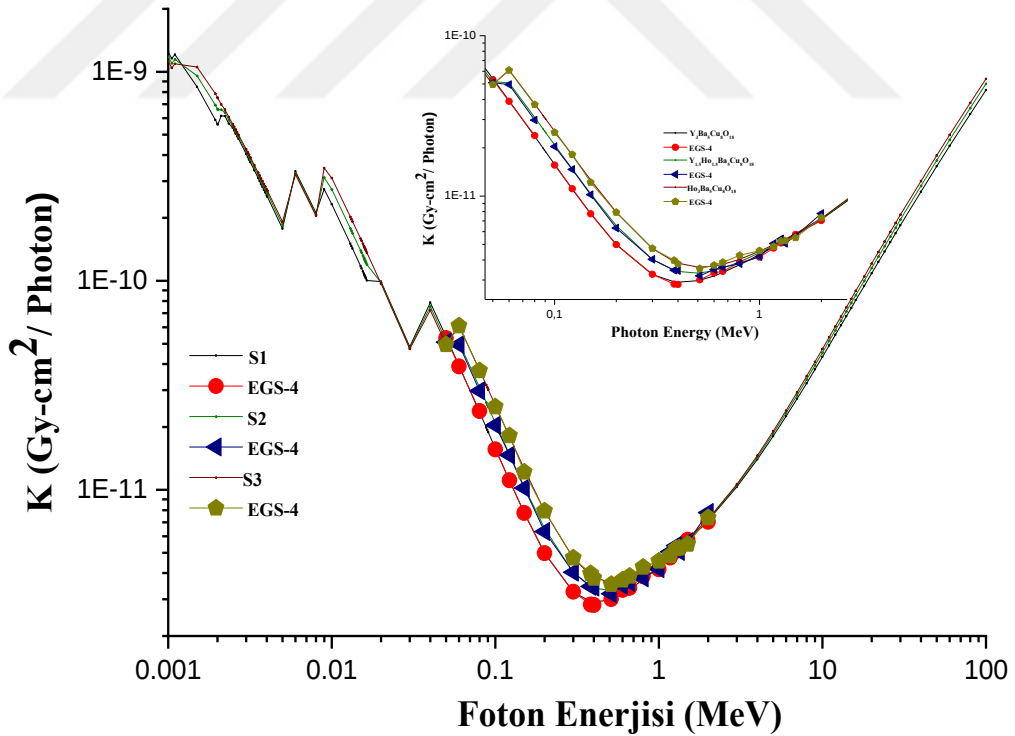


29

3.3.4. Kerma Katsayıları ve Hızlı Nötron Uzaklaştırma Kesitleri

Kerma katsayısı (K), fotonların malzeme içerisinde yüklü parçacıklara aktardığı kinetik enerjiyi temsil eden ve radyasyon doz değerlendirmelerinde sıklıkla kullanılan bir parametredir. Bu büyüklük, foton enerjisinin malzeme tarafından ne ölçüde enerjiye dönüştürüldüğünü nicel olarak ortaya koymakta olup, radyasyon enerjisi aktarım süreçlerinin anlaşılması açısından tamamlayıcı bir rol üstlenmektedir. Bu çalışmada S1, S2 ve S3 numuneleri için kerma katsayıları, XCOM ve EGS4 tabanlı hesaplamalarla geniş bir foton enerji aralığında değerlendirilmiştir.

Şekil 11’de görüldüğü üzere, kerma katsayıları düşük foton enerjilerinde yüksek değerler almakta, orta enerji bölgesinde minimuma yaklaşmakta ve yüksek enerji bölgesinde tekrar artış eğilimi göstermektedir. Bu davranış, foton–madde etkileşim mekanizmalarının enerjiye bağlı olarak değişmesiyle ilişkilidir. Düşük enerji bölgesinde fotoelektrik etkileşim baskınken, orta enerji aralığında Compton saçılması etkili olmakta; yüksek enerjilerde ise çift oluşumu sürecinin katkısı artmaktadır.

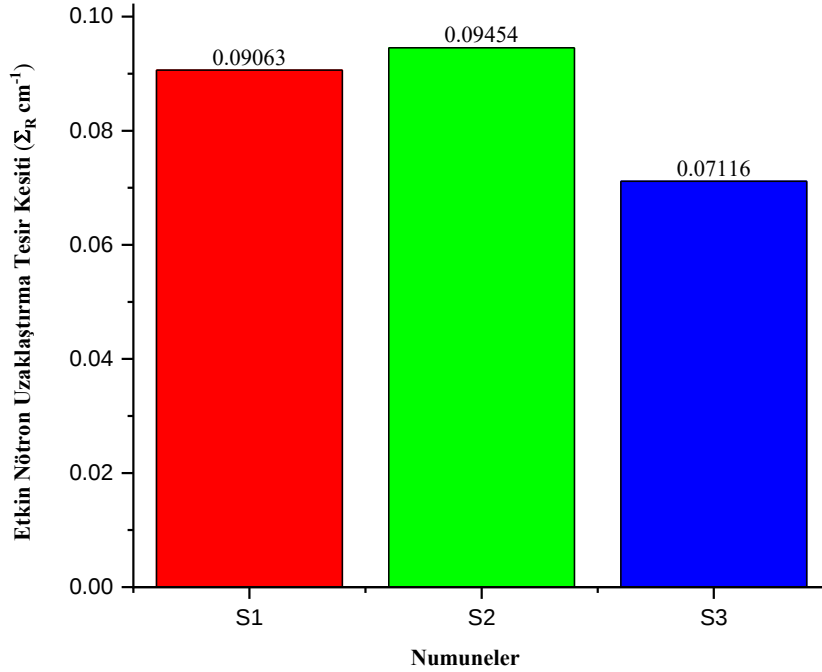


Şekil 11. S1, S2 ve S3 numuneleri için gama kerma katsayısının foton enerjisine bağlı değişimi (XCOM ve EGS4 sonuçları).

Numuneler arasındaki karşılaştırma incelendiğinde, H_o katkı oranının kerma değerleri üzerinde belirli enerji aralıklarında etkili olduğu görülmektedir. Özellikle H_o içeriği arttıkça, düşük ve orta enerji bölgelerinde kerma katsayılarında gözlenen değişimler, atomik bileşimin ve etkin atom numarasının enerji aktarım süreçleri üzerindeki rolünü ortaya koymaktadır. XCOM ve EGS4 sonuçlarının genel eğilim bakımından uyumlu olması, hesaplamaların tutarlılığını desteklemektedir.

Radyasyonla etkileşim açısından değerlendirilen bir diğer önemli parametre ise hızlı nötron uzaklaştırma kesiti (Σ_R) olup, bu büyüklük malzemenin hızlı nötronları zayıflatma ve uzaklaştırma kapasitesini temsil etmektedir. Her ne kadar bu tez kapsamında deneysel nötron ölçümleri gerçekleştirilmemiş olsa da, hesaplanan Σ_R değerleri, malzemenin nükleer radyasyon ortamlarındaki potansiyel davranışına ilişkin karşılaştırmalı bir öngörü sunmaktadır.

Şekil 3.12’de S1, S2 ve S3 numuneleri için hesaplanan hızlı nötron uzaklaştırma kesitleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yarı H_o katkılı S2 numunesinin görece daha yüksek Σ_R değerleri sergilediğini, buna karşılık tam H_o katkılı S3 numunesinde bu parametrenin azaldığını göstermektedir. Bu durum, atomik bileşimdeki değişimin yalnızca foton etkileşimlerini değil, nötronlarla etkileşimi de etkileyebildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 12. S1, S2 ve S3 numuneleri için hızlı nötron uzaklaştırma kesitlerinin (Σ_R) karşılaştırılması.

Kerma katsayıları ile hızlı nötron uzaklaştırma kesitlerinin birlikte değerlendirilmesi, Ho katkılı YBCO(358) numunelerinde enerji aktarım ve zayıflatma süreçlerinin çok boyutlu bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, önceki alt bölümlerde sunulan soğurma katsayıları, HVL, MFP, RPE ve etkin atom numarası verileriyle birlikte ele alındığında, Ho katkısının enerjiyle ilişkili parametreler üzerinde bütüncül bir etki yarattığını ortaya koymaktadır.

Tablo 4. S1, S2 ve S3 numuneleri için farklı foton enerjilerinde hesaplanan Kerma katsayıları k (pGy.cm²/foton): XCOM (teorik) ve EGS4 (Monte Carlo) sonuçları.

Enerji (keV)	S1		S2		S3	
	XCOM	EGS4	XCOM	EGS4	XCOM	EGS4
50	54.032	53.197	51.713	50.928	49.661	49.601
60	39.280	38.995	50.792	49.544	60.977	60.889
80	23.557	23.813	30.910	29.789	37.416	37.197
100	15.778	15.611	20.880	20.377	25.394	24.955
122	11.077	11.107	14.727	14.671	17.957	18.161
150	7.770	7.755	10.334	10.203	12.602	12.170
200	4.984	4.985	6.543	6.326	7.922	7.923
300	3.241	3.257	4.021	4.035	4.711	4.722
383	2.924	2.827	3.444	3.452	3.904	3.977
400	2.907	2.812	3.392	3.429	3.820	3.781
511	2.989	3.006	3.316	3.183	3.606	3.534
600	3.178	3.323	3.433	3.485	3.659	3.709
662	3.338	3.396	3.557	3.602	3.751	3.867
800	3.731	3.860	3.894	3.792	4.039	4.271
1000	4.320	4.167	4.433	4.193	4.533	4.568
1173	4.819	4.746	4.905	5.062	4.982	4.857
1274	5.105	5.095	5.164	5.414	5.229	5.241
1332	5.262	5.212	5.331	5.071	5.392	5.272
1500	5.723	5.767	5.781	5.643	5.832	5.502
2000	7.153	7.042	7.212	7.794	7.264	7.360

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Ho katkılı YBCO(358) süperiletken seramiklerin enerjiyle ilişkili fiziksel davranışları, manyetik alan kaynaklı enerji kayıpları ve radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri üzerinden bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Çalışma kapsamında S1, S2 ve S3 numuneleri ele alınarak, katkı oranının enerji aktarım ve kayıp mekanizmaları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Manyetik ölçümler sonucunda elde edilen M-H histerezis eğrileri, tüm numunelerin tip-II süperiletken karakter sergilediğini göstermiştir. Histerezis eğrileri altında kalan alanların sayısal olarak hesaplanmasıyla, Ho katkı oranına bağlı manyetik enerji kaybı davranışında belirgin değişimler olduğu ortaya konmuştur. Saf YBCO(358) numunesi referans bir davranış sergilerken, yarı Ho katkılı S2 numunesinde vorteks çivileme davranışının dengelendiği ve manyetik enerji kaybının kontrollü biçimde değiştiği gözlenmiştir. Tam Ho katkılı S3 numunesinde ise aşırı katkılamanın manyetik etkileşim rejimini değiştirdiği ve histerezis alanının belirgin biçimde azaldığı belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Ho katkısının manyetik enerji kaybı üzerinde doğrusal olmayan ve katkı oranına duyarlı bir etki yarattığını göstermektedir.

Radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri XCOM ve EGS4 tabanlı hesaplamalı yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. Kütleli ve lineer soğurma katsayıları, yarı değer kalınlığı, ortalama serbest yol, radyasyon koruma etkinliği, etkin atom numarası ve kerma katsayıları gibi parametrelerin enerjiye bağlı değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, Ho katkısının atomik bileşim ve yoğunluk üzerindeki etkileri aracılığıyla radyasyon enerjisinin soğurulma ve aktarılma süreçlerini belirgin biçimde etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle düşük foton enerjileri bölgesinde atom numarasına duyarlılığın arttığı, orta ve yüksek enerji bölgelerinde ise etkileşim mekanizmalarının farklılaştığı gözlenmiştir.

Manyetik enerji kayıpları ile radyasyon enerjisiyle etkileşim parametreleri arasında doğrudan bir nedensellik kurulmamış olmakla birlikte, her iki enerji rejiminin de malzemenin atomik yapısı, katkı oranı ve mikro-yapısal düzeni tarafından belirlendiği açıkça görülmüştür. Bu bağlamda, yarı Ho katkılı S2 numunesi, hem manyetik enerji kaybı hem de radyasyon zayıflatma parametreleri açısından dengeli bir davranış sergileyerek öne çıkmıştır. Tam Ho katkılı S3 numunesinde ise aşırı katkılamanın bazı enerjiyle ilişkili parametrelerde olumsuz etkiler oluşturabileceği görülmüştür.

Bu çalışma, literatürde sınırlı sayıda ele alınan YBCO(358) fazının Ho katkılmasıyla birlikte enerjiyle ilişkili fiziksel özelliklerinin çok yönlü biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, süperiletken seramiklerin enerji sistemleri, manyetik alan altında çalışan uygulamalar ve radyasyon ortamlarında kullanılabilirliğinin anlaşılması açısından yol gösterici niteliktedir. Ayrıca, katkı oranının optimize edilmesinin enerji kaybı ve enerji soğurma süreçlerinin kontrolü açısından kritik bir parametre olduğu bu çalışma kapsamında açıkça ortaya konmuştur.



KAYNAKÇA

- Aliabadi, A., Akhavan Farshchi, Y ve Akhavan, M. (2009). A new Y-based HTSC with T_s above 100K, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 469, (22), 2012–2014, Nov. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2009.09.003>
- Andreouli, C. ve Tsetsekou, A.(1997). Synthesis of HTSC $\text{Re(Y)Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ powders: the role of ionic radius, *Physica C: Superconductivity*, 291, 274–286. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(97\)01636-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(97)01636-5)
- Ayaş, A. O., Ekicibil, A., Çetin, S. K., Coşkun, A., ErA, O., Ufuktepe, Y., Fırat, T. ve K1ymaç, K.(2011). The structural, superconducting ve transport properties of the compounds $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ ve $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Ca}_2\text{Cu}_8\text{O}_{18}$, *Journal of Superconductivity ve Novel Magnetism*, 24, 2243–2252.<https://doi.org/10.1007/s10948-011-1192-7>
- Bean C. P. (1962). Magnetization of hard superconductors, *Physical Review Letters*, 8 (6), 250–253. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.8.250>
- Bondarenko, S. I., Koveeya, V. P., Krevsun, A. V. ve Link, S. I. (2017). High-temperature superconductors of the family $(\text{RE})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ve their application, *Low Temperature Physics*, 43 (1), 1125–1151. <https://doi.org/10.1063/1.5008405>
- Çelebi, S. ve Düzgün İ. (2009). AC losses in a commercial Bi:2223/Ag tape, *Superconductor Science ve Technology*, 22 (3), 034018. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/22/3/034018>
- Chu, C. W. , Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J. ve Wang, Y. Q.(1987). Evidence for superconductivity above 40 K in the La–Ba–Cu–O compound system, *Physical Review Letters*, 58 (4), 405–407. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.405>
- Düzgün, İ., Karaca, İ., Öztürk, A., Çelebi, S. (2006).AC losses ve determination of some superconducting parameters of Ag_2O added Bi2223 superconductors, *Physica C: Superconductivity ve its Applications*, 436, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.physc.2006.02.003>
- Düzgün, İ. (2021). The first measurement for mass attenuation coefficients, effective atomic numbers, ve electron densities of Y123 ve Y358 high-temperature superconductors (HTS) for the energies from 46.6 to 1332 keV, *Journal of Superconductivity ve Novel Magnetism*, 34, 695–703. <https://doi.org/10.1007/s10948-020-05771-0>

- Düzgün, İ. (2025). Limitations of conversion factor approaches in the synthesis of complex oxide superconductors: a case study on Y123 ve Y358, *Gümüşhane University Journal of Science (GUJS)*, 15 (4), 1282–1290, 2025. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1786375>
- Düzgün, İ., Öztürk, A. ve Çelebi, S. (2010). Irreversibility line ve flux relaxation in Bi:2223/Ag tape, *Journal of Superconductivity ve Novel Magnetism*, 23,1349–1354.<https://doi.org/10.1007/s10948-010-0780-2>
- Eley, S., Glatz, A. ve Willa, R. (2021). Challenges ve transformative opportunities in superconductor vortex physics, *Journal of Applied Physics*, 130, (5), 050901. <https://doi.org/10.1063/5.0055611>
- Erzenoğlu, S., Icelli, Q., Gürbulak, B. ve Ateş A.(2006). Measurement of mass attenuation coefficients for holmium doped ve undoped layered semiconductors InSe at different energies ve the validity of mixture rule for crystals around the absorption edge, *Journal of Quantitative Spectroscopy ve Radiative Transfer*, 102, (3), 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2005.06.001>
- García-Tabarés, L., Toral, F., Munilla, J., González, L., Puig T. ve Obradors, X. (2025). Perspectives in power applications of low ve mainly high temperature superconductors: energy, transport ve industry, *La Rivista del Nuovo Cimento*, 48, 435–536.<https://doi.org/10.1007/s40766-025-00071-6>
- Gholipour, S., Daadmehr, V., Rezakhani, A. T., Khosroabadi, H., Shahbaz Tehrani, F. ve Hosseini Akbarnejad, R. (2012). Structural phase of Y358 superconductor: comparison with Y123, *Journal of Superconductivity ve Novel Magnetism*, 25, 2253–2258. <https://doi.org/10.1007/s10948-012-1611-4>
- Gokhfeld, D. M., Semenov, S. V., Balaev, D. A., Yakimov, I. S., Dubrovskiy, A. A.,... Krasikov, A. A. ve Petrov, M. I.(2017). Establishing of peak effect in YBCO by Nd substitution, *Journal of Magnetism ve Magnetic Materials*, 440, 127–128. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.12.089>
- Grilli, F., Pardo, E., Stenvall, A., Nguyen, D. N., Yuan, W. ve Gömöry, F.(2016) Computation of losses in HTS under the action of varying magnetic fields ve currents, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (3),1–14. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2259827>
- Hubbell, J. H. (1982). Photon mass attenuation ve energy-absorption coefficients, *The International Journal of Applied Radiation ve Isotopes*, 33 (11), 1269–1290. [https://doi.org/10.1016/0020-708X\(82\)90248-4](https://doi.org/10.1016/0020-708X(82)90248-4)

- Hubbell, J. H. (1999). Review of photon interaction cross section data in the medical ve biological context, *Physics in Medicine & Biology*, 44 (1).
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/44/1/001>
- Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics*, (3. Baskı), New York, NY, USA: John Wiley ve Sons.
- Jin, S., Tiefel, T. H., Kammlott, G. W., Fastnacht, R. A. ve Graebner, J. E. (1991). Superconducting properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ with partial rare earth substitution, *Physica C: Superconductivity*, 173, 75–79. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(91\)90795-Z](https://doi.org/10.1016/0921-4534(91)90795-Z)
- Kaya, S. (2023). Calculation of radiation shielding parameters of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ve $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ superconductors for the energies from 122 to 1332 keV using EGS4 code, *Optical Materials*, 144, 113466.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114366>
- Kim, Y. B., Hempstead, C. F. ve Strnad, A. R., (1963). Magnetization ve critical supercurrents, *Physical Review*, 129, (2), 528–535.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.129.528>
- Markert, J. T., , Dunlap, B. D. ve Maple M. B. (1989). Magnetism, superconductivity, ve chemical substitutions in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, *MRS Bulletin*, 14, 37–44.
<https://doi.org/10.1557/s0883769400053884>
- Rouco, V., Navau, C., Del-Valle, N., Massarotti, D., Papari, G. P., Stornaiuolo, D.,... Sanchez Á. ve Palau A. (2019). Depairing current at high magnetic fields in vortex-free high-temperature superconducting nanowires, *Nano Letters*, 19 (6), 3069–3075. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b01693>
- Saavedra Gaona, I. M., Supelano, G. I. ve Parra Vargas, C. A. (2020). Determination of critical superconducting parameters based on the study of the magnetization fluctuations for $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-\delta}$ (RE = Sm, Eu, Gd, Dy ve Ho) ceramic superconductor system, *Ceramics International*, 46, 11530–11538.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.179>
- Shannon, R. D. (1976). Revised effective ionic radii ve systematic studies of interatomic distances in halides ve chalcogenides, *Acta Crystallographica Section A*, 32 (5), 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>
- Topal, U., Akdogan, M. ve Ozkan H. (2011). Electrical ve structural properties of $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ (RE = Y, Sm ve Nd) superconductors, *Journal of Superconductivity ve Novel Magnetism*, 24, 2099–2102.
<https://doi.org/10.1007/s10948-011-1176-7>

- Vallès, F., Palau, A., Abraimov, D., Jaroszynski, J., Constantinescu, A.- M., Mundet, B.,... Larbalestier D. ve Puig T.(2022). Optimizing vortex pinning in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting films up to high magnetic fields, *Communications Materials*, 3 (4)5.<https://doi.org/10.1038/s43246-022-00266-y>
- Yong, F. ve Lian, Z. (1992).Superconducting properties ve microstructures of the powder melting processed Y–Ho–Ba–Cu–O ve Y–Gd–Ba–Cu–O superconductors, *Physica C: Superconductivity*, 202, 298–302. [https://doi.org/10.1016/0921-4534\(92\)90174-B](https://doi.org/10.1016/0921-4534(92)90174-B)
- Zhang, L., Xu, F., Wang, L., Chen, Y., Nazemi, E., Zhang,. G. ve Zhang X., (2025). Air Kerma Calculation in Diagnostic Medical Imaging Devices Using Group Method of Data Handling Network, *Diagnostics*, 13 (8). <https://doi.org/10.3390/diagnostics13081418>

ÖZGEÇMİŞ

Osman Gül lise ve ortaokul eğitimini Gümüşhane’ de tamamladıktan sonra Gazi Üniversitesi Fen ve Teknoloji Öğretmenliği Bölümünden 2004 yılında mezun oldu. 2014 yılında Avrasya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yerel Yönetimler Bölümünde tezsiz yüksek lisansa başlamış ve 2016 yılında bu bölümden mezun olmuştur. 2022 yılında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalında tezli yüksek lisansa başlamıştır. 2004-2013 yılları arasında Milli Eğitim Bakanlığında öğretmenlik yaparak eğitim-öğretim alanında deneyim kazanmıştır. Evli ve iki çocuk babası olan Osman GÜL 2013 yılı itibari ile Aile ve Sosyal Politikalar Bakanlığı bünyesinde bulunan Sosyal Yardımlaşma ve Dayanışma Vakfında “Büro Görevlisi” ve "Sosyal Yardım ve İnceleme Görevlisi” ünvanlarında bulunmuş ve halen görevine Sosyal Yardım ve İnceleme Görevlisi olarak devam etmektedir.