T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ACSS/TW HAVAİ HAT İLETKENLERİNİN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Hazırlayan
Murat GÜREK

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

Yüksek Lisans Tezi

Aralık 2021
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ACSS/TW HAVAİ HAT İLETKENLERİNİN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Murat GÜREK

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

Aralık 2021
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Murat GÜREK

İmza

"**ACSS/TW Havai Hat İletkenlerinin Tasarımı ve Prototip İmalatı"** adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi' ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan	**Danışman**
Murat GÜREK	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA
İmza	İmza

Mekatronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Şahin YILDIRIM

İmza

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bilgi, tecrübe ve önerileriyle beni aydınlatan, rehberlik eden, ilgisini ve yardımlarını esirgemeyen sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA' ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımı proje olarak destekleyen Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına ve Ar-Ge Merkezi bünyesinde gerçekleştirdiğim tüm faaliyetlerden dolayı hem bana imkân veren hem de beni destekleyen Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş.' ye teşekkür ederim.

Bu süreç içerisinde en az benim kadar fedakârlık gösteren ve her daim beni destekleyen sevgili eşime, oğluma, kızıma ve tüm aileme teşekkür ediyorum.

Murat GÜREK

Aralık 2021, KAYSERİ

ACSS/TW HAVAİ HAT İLETKENLERİNİN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Murat GÜREK

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2021
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

ÖZET

Medeniyetlerin gelişmesi ile birlikte enerjiye olan talepte her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle yeni enerji kaynaklarının bulunması, taşınması ve son kullanıcıya ulaştırılması büyük önem arz etmektedir. Mevcutta üretilen enerjinin dahi en az kayıpla ve en yüksek kapasite ile taşınması yeni enerji kaynaklarının bulunması kadar değerlidir. Bu nedenle son yıllarda, enerji iletiminde kullanılan geleneksel iletkenlerin yerini alabilecek yeni malzeme arayışları ortaya çıkmıştır. En yaygın olarak kullanılan çelikle güçlendirilmiş alüminyum iletkenler (ACSR) yerini zamanla daha yüksek performanslı ürünlere bırakmaya başlamıştır.

Bu çalışmada, iletkenlere ait genel bilgiler paylaşılmış ve literatür gelişmeleri incelenmiştir. Bu tez kapsamında, ACSR iletkenlere alternatif olan yüksek sıcaklık ve düşük sarkma (HTLS) iletkeni ile çelik takviyeli alüminyum iletken (ACSS) üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen ilk örnekler üzerinde ilgili standartların gerektirdiği tüm testler uygulanmıştır. ANSYS 19.2 programı ile çelik tel üzerinde gerilme, % uzama ve toplam deformasyon analizleri yapılmıştır. Ayrıca ACSR ve ACSS iletkenlerinin farklı tipleri arasından yirmi beş adet iletken seçilerek ilgili iletkenlerin akım taşıma kapasitelerinin tahminine yönelik yapay sinir ağ (YSA) modellemeleri iki farklı öğrenme algoritması için MATLAB tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: HTLS, ACSS, Akım Taşıma Kapasitesi, Sarkma, Süneklik

DESIGN AND PROTOTYPE PRODUCTION OF ACSS/TW OVERHEAD CONDUCTORS

Murat GUREK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Master Thesis, November 2021
Supervisor: Dr. Lecturer Mehmet Bahadır ÇETİNKAYA

ABSTRACT

In accordance with the development in civilizations, the demand for energy is increasing day by day. Therefore to find, transport and delivery of new energy sources to the end user have of great importance. Also, transmission the currently produced energy with minimum losses and highest capacity is as valuable as finding new energy sources. The search for new materials has been emerged in last decades to replace the traditional conductors used in energy transmission in last decades. As a result of this, instead of the most widely used steel reinforced aluminum conductors (ACSR), higher performance products have been started to use.

In this study, general information about conductors has been shared and also a detailed literature review has been given. In this thesis, the production of high temperature and low sag (HTLS) conductors and steel reinforced aluminum conductors (ACSS) have been carried out as an alternative to ACSR conductors. All tests required by the relevant standards have been applied on the first samples produced. The strain, % elongation and total deformation analysis of steel have been performed by using ANSYS 19.2 program. In addition, twenty-five conductors were selected among different types of ACSR and ACSS and then artificial neural network (ANN) models were improved in MATLAB based on two different training algorithms for the estimation of the current carrying capacities of the relevant conductors.

Keywords: HTLS, ACSS, Ampacity, Sag, Creep

İÇİNDEKİLER

ACSS/TW HAVAİ HAT İLETKENLERİNİN TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

YÖNERGEYE UYGUNLUK....iii
KABUL VE ONAY....iv
TEŞEKKÜR....v
ÖZET....vi
ABSTRACT....vii
İÇİNDEKİLER....viii
KISALTMALAR....xi
TABLOLAR LİSTESİ....xii
ŞEKİLLER LİSTESİ....xiii
GİRİŞ....1

1.BÖLÜM
GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler....3
1.1.1.Enerji İletim Hatları....4
1.1.1.1.Yer Altı Enerji Hatları....4
1.1.1.2. Havai Enerji İletim Hatları....5
1.1.2. Enerji İletim Hatları Hat Sabiteleri....7
1.1.2.1. Direnç....7
1.1.2.2. İndüktans....8
1.1.2.3. Kapasitans....8
1.1.2.4. Korona Nedenli Kayıplar....9
1.1.2.5. Havai Enerji İletim Hat İletkenleri....9
1.1.3. Havai Hat İletkenlerinde Kullanılan Malzemeler....9
1.1.3.1. Bakır....9
1.1.3.2. Tam Alüminyum İletkenler (AAC)....9
1.1.3.3. Tam Alüminyum Alaşım İletkenler (AAAC)....10
1.1.3.4. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR)....10
1.1.3.5. Yüksek Sıcaklık Düşük Sarkma İletkenleri (HTLS)....12

1.1.4. Havai Hat Tanımlamaları 14
1.1.4.1. Tel 14
1.1.4.1.1. Çelik Teller 14
1.1.4.1.2. Alüminyum Teller 15
1.1.4.2. Tel Şekli 15
1.1.4.2.1. Yuvarlak Teller (RW) 15
1.1.4.2.2. Trapez Teller (TW) 15
1.1.4.3. İletken Çapı 16
1.1.4.4. İletkenlik 17
1.1.4.5. Akım Taşıma Kapasitesi 17
1.1.4.6. Isı Dayanımı 18
1.1.4.7. Sarkma(Sehim) 18
1.1.4.8. Kendinden Sönümleme Özelliği 19
1.1.4.9. Uzun Süreli Sünme (Creep) 20
1.2. Literatür Araştırması 20

2. BÖLÜM
GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş 24
2.2. Prototip İmalat 25
2.2.1. Alüminyum Trapez Tellerin Üretimi 25
2.2.2. Yüksek Mukavemetli Çelik Üretimi 27
2.2.3. Tellerin Bükümü 29
2.3. Testler 30
2.3.1. Bükülü İletkene Yapılan Testler 30
2.3.1.1. Yüzey Kontrolü ve İletken Çapının Ölçülmesi 31
2.3.1.2. Doğru Akım Direncinin Ölçülmesi 31
2.3.1.3. Adım Oranı ve Yönü ile Tellerin Sayısı ve Türü 31
2.3.1.4. İletken ve Yağın Birim Ağırlığı Ölçümü 31
2.3.1.5. Çekme Kopma Mukavemeti Testi 31
2.3.2. Bireysel Tellere Yapılan Testler 32
2.3.3. Diğer Testler 32
2.3.3.1. Sünme Testi 33
2.3.3.2. Sarkma – Gerilme Testi 34

2.3.3.3. Kasnak Testi 34
2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle ANSYS Analizleri 35
2.5. Yapay Sinir Ağları İle Akım Taşıma Kapasitesinin Tahmin Edilmesi 37
3. BÖLÜM
BULGULAR
3.1. Test Sonuçları 41
3.1.1. Elektriksel Test Sonuçları 41
3.1.2. Mekaniksel Test Sonuçları 42
3.1.3. Sünme Testi Sonucu 44
3.1.4. Sarkma – Gerilme Testi Sonucu 45
3.1.5. Kasnak Testi Sonucu 46
3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle ANSYS Analizlerinin Sonuçları 46
3.3. Yapay Sinir Ağları ile Akım Taşıma Kapasitesinin Tahmin Sonuçları 48
4. BÖLÜM
TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER
KAYNAKÇA 54
ÖZGEÇMİŞ 60

KISALTMALAR

kV	:	Kilo Volt
˚ C	:	Santigrat derece
XLPE	:	Çapraz bağlı polietilen
Al	:	Alüminyum
kg	:	Kilo gram
g/cm^3	:	Gram / santimetre küp
AC	:	Alternatif akım
DC	:	Doğru akım
AAC	:	Tam alüminyum iletkenler
ACSR	:	Çelik takviyeli alüminyum iletkenler
HTLS	:	Yüksek sıcaklık düşük sarkma iletkenleri
RW	:	Yuvarlak tel
TW	:	Trapez tel
IACS	:	Uluslararası tavlanmış bakır standart
ACSR	:	Çelik takviyeli alüminyum iletkenler
A	:	Amper
kN	:	Kilo Newton
mm^2	:	Milimetre kare
MPa	:	Mega Pascal
R	:	Direnç
Ω	:	Ohm

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1. 1. Gerilim seviyelerine göre iletkenlerin toprak ile mesafesi 6
Tablo 1. 2. ACSR iletkenlerin çalışabilmesi için istenen koşullar..... 11
Tablo 2. 1. ACSS/TW için yapısal gereksinimler..... 25
Tablo 2. 2. Tavlanmış ve sert çekilmiş alüminyum tellerin karşılaştırılması 27
Tablo 2. 3. Üretilen alüminyum trapez tellerin özellikleri..... 27
Tablo 2. 4. Ekstra yüksek mukavemetli çeliğin içeriği..... 28
Tablo 2. 5. Ekstra yüksek mukavemetli çeliğin özellikleri..... 28
Tablo 2. 6. ANSYS analizlerinde kullanılan malzemelerin verileri 35
Tablo 2. 7. Yapay sinir ağlarında kullanılacak veriler..... 38
Tablo 3. 1. Al tellere yapılan elektriksel test sonuçları..... 41
Tablo 3. 2. 26,6 kN yükte farklı sürelerde sünme..... 45
Tablo 3. 3. Termal döngülerin sarkma-gerilme özellikleri 45

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Elektrik enerjisinin tüketiciye ulaştırılması 3
Şekil 1. 2. Yer altı enerji iletim kablosu ve bileşenleri 4
Şekil 1. 3. Havai enerji iletim hatları 5
Şekil 1. 4. AAAC iletken yapısı 10
Şekil 1. 5. ACSR iletkeni yapısı 11
Şekil 1. 6. ACSS iletkeni yapısı 13
Şekil 1. 7. Trapez tel yapısı 16
Şekil 1. 8. Havai hat iletkenlerinde sarkma 19
Şekil 2. 1. Tez çalışması kapsamında esas alınan iş akış şeması 24
Şekil 2. 2. Alüminyum filmaşinlerin üretimi 25
Şekil 2. 3. Trapez tellerin üretilmesi 26
Şekil 2. 4. Çelik tellerin üzerine trapez tellerin bükümü ile iletken üretilmesi 29
Şekil 2. 5. Tez ürünü 29
Şekil 2. 6. Prototip üretimi tamamlanmış Wabash iletkeni 30
Şekil 2. 7. Mukavemet Test Cihazı 32
Şekil 2. 8. Sünme Test Düzeneği 33
Şekil 2. 9. Kasnak Testi Düzeneği 34
Şekil 2. 10. Çelik telin ANSYS programında geometrisi 35
Şekil 2. 11. Çelik telin mesh boyutunun tespit edilmesi 36
Şekil 2. 12. Benzetimlerde kullanılan yapay sinir ağları genel ağ mimarisi 37
Şekil 2. 13. Benzetimde kullanılan yapay sinir ağlarının ağ mimarisi 39
Şekil 3. 1. Çelik tel mukavemet sonuçları 42
Şekil 3. 2. Alüminyum tel mukavemet sonuçları 43
Şekil 3. 3. Wabash katmanları tel adım oranları 44
Şekil 3. 4. Kasnak testi sonrası iletkenin durumu 46
Şekil 3. 5. Çelik telde gerçekleşen % uzama 47
Şekil 3. 6. Çelik telde meydana gelen gerilme 47
Şekil 3. 7. Çelik telde meydana gelen uzama miktarı 48
Şekil 3. 8. YSA' nın Scaled Conjugate Gradient algoritması ile eğitilmesi 49
Şekil 3. 9. YSA'nın Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilmesi 50

GİRİŞ

Günümüzde üretimin ve tüketimin her geçen gün hızla artmasına paralel olarak enerjiye olan ihtiyaçta aynı oranda artmaktadır. Bu nedenle yeni enerji santrallerinin kurulumu kadar mevcut iletim hatlarının kapasitelerinin artırılması da büyük önem arz etmektedir.

İletim hatlarında günümüze kadar ilk önce bakır iletkenler daha sonra alüminyum iletkenler kullanılmıştır. Sonraki süreçte ise çelik merkezli alüminyum iletkenler tercih edilmiştir. Ancak bu iletkenlerin kapasitesi ve çalışabilme sıcaklıkları sınırlı olduğu için alternatif olarak daha fazla akım taşıma kapasitesine sahip yeni nesil yüksek sıcaklık düşük sarkma iletkenleri üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu tez çalışması kapsamında yüksek sıcaklık ve düşük sarkma iletkenlerinden birisi olan Wabash iletkeni üretilmiş ve detaylı performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Birinci bölümde, havai iletim hatları ve bileşenleri, havai iletim hat parametreleri, havai iletim hatlarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerden üretilen ürünler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Daha sonra, iletim hatlarının geçmişi ve günümüzdeki durumlarına dair detaylı bir literatür bilgisi sunulmuştur.

Tez çalışmasının ikinci bölümde, üretim süreci ve uygulanacak testler hakkında bilgiler verilmiştir. Üretim aşamaları bölümler halinde detaylandırılmış ve ayrıca ürüne ait yapısal ve elektriksel gereklilikler ilgili standartlar ile ilişkilendirilmiştir. Bireysel tellerin ve bükülü haldeki iletkenin performansını analiz etmek amacıyla mekanik ve elektriksel testler laboratuvar ortamında tamamlanmıştır. Ayrıca elde edilen veriler ile mekanik

analizler ANSYS programında sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Son olarak, MATLAB programı kullanılarak yapay sinir ağları ile akım taşıma kapasitesinin modellenmesine yönelik benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü bölümde, yapılan testlerin sonuçları paylaşılarak ilgili standartların gereksinimleri çerçevesinde açıklanmıştır. Daha sonra, ANSYS programında elde edilen analiz sonuçları ve ayrıca MATLAB programında iki farklı öğrenme algoritması için YSA ile elde edilmiş olan modelleme sonuçları verilmiştir.

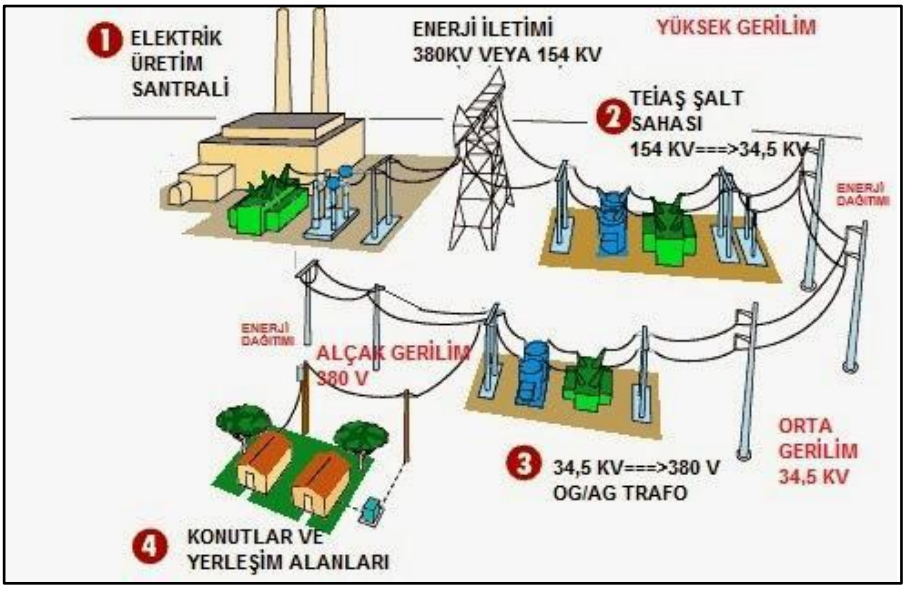
Tez çalışmasının son bölümünde ise tez çalışmasının genel anlamda sonuçları paylaşılmıştır ve üretilen ürüne ait geliştirilmesi gereken kısımlardan bahsedilmiştir.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Genel Bilgiler

Elektrik enerjisinin son kullanıcıya ulaştırılmasında birkaç aşamaya ihtiyaç duyulmaktadır. Enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketicilere ulaştırılması için dağıtılması gerekmektedir. Üretim aşaması tüketicilerden uzak mesafelere kurulan santraller ile sağlanmaktadır. Üretilen enerji yerleşim birimlerinin ve sanayi bölgelerinin yakınına kadar iletim hatları ile taşınmakta ve buradaki trafo merkezlerinde gerilimleri düşürülerek tüketicilerin ihtiyaçlarına göre dağıtılmaktadır. Santrallerde üretilen elektrik enerjisinin tüketiciye ulaşmasındaki süreç Şekil 1.1'de görülmektedir [1].



Şekil 1. 1. Elektrik enerjisinin tüketiciye ulaştırılması

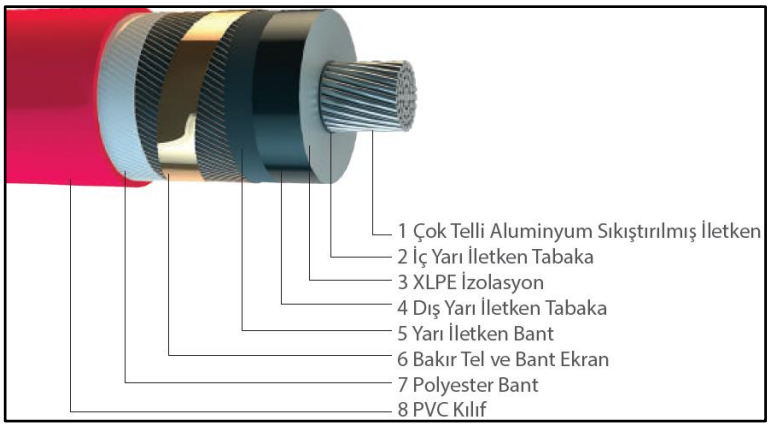
Üretilen enerjinin gerilimi santrallerde trafolar ile yükseltildikten sonra iletim hatları ile beklemeksizin ve en az kayıp ile taşınması istenmektedir. Bununla birlikte, üretilen enerjinin sistemden kesintisiz enerji akışını sağlaması, güvenilir ve anlaşılır olması ve doğal afetlerden kolayca etkilenmemesi beklenmektedir. Enerji iletimi ve dağıtımı yerleşim yerlerinin olmadığı özellikle kırsal alanlarda havai iletim iletkenleri ile yapılırken yerleşim yerlerinin sıklıkla olduğu yerlerde bu havai hatlar yerine toprak altına döşenen kablolar ile gerçekleştirilmektedir.

1.1.1.Enerji İletim Hatları

Enerji iletim hatları yüksek gerilim olarak tanımlanan 154 kV ve 380 kV gerilimlerin taşınmasında tercih edilmektedir. Yer altında XLPE izoleli bakır veya alüminyum iletkenli enerji kabloları kullanılırken yer üstünde çelik tellerin merkezinde olduğu alüminyum tellerden oluşan izolesiz iletkenler kullanılmaktadır. Canlı nüfusun az olduğu yerlerde kurulum ve bakım maliyetlerinin daha uygun olması nedeniyle havai hat iletkenleri tercih edilmektedir.

1.1.1.1.Yer Altı Enerji Hatları

Yer altı enerji hatları, şehir içlerinde hava hatları kullanımının mümkün olmadığı yerlerde ve boğaz geçişlerinde su altında tercih edilmektedir. Bir yer altı enerji iletim kablosu ve bileşenleri aşağıda Şekil 1.2 ile gösterilmiştir [2].



Şekil 1. 2. Yer altı enerji iletim kablosu ve bileşenleri

Yer altı enerji iletim hatlarının kullanılmasının getirdiği bazı avantaj ve dezavantajlar aşağıda belirtilmiştir.

Yer altı enerji iletim hatlarının başlıca avantajları:

- Direklere ihtiyaç duyulmaz,
- Görüntü kirliliğine yol açmaz,
- İklimsel olaylardan (yıldırım, kar, rüzgâr v.b.) etkilenmez,
- Bakım ihtiyaçları yok denecek kadar azdır.

Yer altı enerji iletim hatlarının başlıca dezavantajları:

- İlk kurulum ve montaj maliyeti yüksektir,
- Arıza tespiti ve onarımı oldukça zordur.

1.1.1.2. Havai Enerji İletim Hatları

Havai hat tesisleri yer üstünde bulunmaktadır ve iletkenler, direkler, izolatörler, bağlantı elemanları ve topraklama elemanlarından oluşmaktadır [3]. Örnek bir havai enerji iletim hattı aşağıda Şekil 1.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 1. 3. Havai enerji iletim hatları

Havai enerji iletim hatları genellikle sıcaklık değişimleri, rüzgâr, kar ve buz gibi çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Aynı zamanda dirençli, manyetik ve kapasitif

etkiler nedeni ile kayıplar gerçekleşmekte ve verimlilik düşmektedir. Tüm bu etkenler iletim hatlarının performansını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, tasarım aşamasında iletim hatları gerginlik, güvenlik mesafeleri ve kırsal alanların konumu gibi farklı parametrelerin detaylı analizleri ile iyi bir şekilde modellenmelidir [4].

Havai enerji iletim hatlarının kurulumu esnasında hem canlıların hem de hattın korunması için hattın toprağa en yakın noktası en az 6 m, iki hat arasındaki mesafe ise en az 35 cm olmalıdır [5]. Gerilim Seviyelerine göre iletkenlerin toprak ile sağlanması gereken mesafe aralıkları Tablo 1.1 ile verilmiştir [5].

Tablo 1. 1. Gerilim seviyelerine göre iletkenlerin toprak ile mesafesi

Gerilim Seviyesi	**Toprak İle Hattın Mesafesi (m)**
66 kV'dan az	6,09
66 kV ile 110 kV arası	6,40
110 kV ile 165 kV arası	6,70
165 kV' dan daha yüksek	7,01

Havai enerji iletim hatlarının bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

Havai enerji iletim hatlarının başlıca avantajları:

- İlk kurulum ve montaj maliyeti yer altı enerji iletim hatlarına oranla daha ucuzdur,
- Arıza tespiti ve onarımı daha kolaydır,
- Dağlık ve ormanlık gibi engebeli alanlarda kullanımı daha uygundur.

Havai enerji iletim hatlarının başlıca dezavantajları:

- İklim şartlarından oldukça fazla etkilenmektedirler,
- Görsel kirliliğe neden olmaktadırlar,
- Uzun ömürlü değillerdir, kullanım ömürleri ortalama 20-30 yıldır,
- Alçak uçuş yapan hava araçları için tehlike arz etmektedirler.

1.1.2. Enerji İletim Hatları Hat Sabiteleri

İletim hatlarında akım, gerilim, güç ve güç katsayısı gibi parametrelerin değişikliklerinden etkilenen hattın direnç, indüktans ve kapasitans gibi değerlerine hat sabiteleri denmektedir. Hat sabiteleri aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

1.1.2.1. Direnç

İletim hatlarında güç kayıplarına ve gerilim düşümlerine neden olan en önemli parametrelerden birisi hat sabitesidir. Bir iletkenin doğru akım direnci Eşitlik 1.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{L}{KxS} \tag{1.1}$$

burada R, doğru akım direncini; l, iletkenin boyunu; K, iletkenlik katsayısını ve S ise iletkenin kesit alanını temsil etmektedir. Doğru akım direnci Ohm (Ω), iletken boyu metre (m), iletkenlik katsayısı $m/(\Omega.\mathrm{mm}^2)$ ve kesit alanı mm^2 ölçü birimleri ile gösterilmektedir. K, malzemenin kendine özgü bir değeridir ve her malzemede değişkenlik göstermektedir. K, değeri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$K = \frac{1}{\rho} \tag{1.2}$$

İletkenlik ile özdirenç (ρ) arasında ters orantı bulunmaktadır. Buna göre, Eşitlik 1.2, Eşitlik 1.1'de yerine yazılırsa,

$$R = \rho\, x \frac{l}{S} \tag{1.3}$$

eşitliği elde edilmektedir.

Havai hatlarda direnç hesaplanırken sadece alüminyum (Al) iletkenin kesiti dikkate alınmaktadır. İletkenleri oluşturan katmanlar birbirleri üzerine spiral şeklinde sarıldığından iletken direnci $\%2$ oranında artmaktadır. Direnç değeri ayrıca sıcaklık artışına bağlı olarak da artış göstermektedir.

1.1.2.2. İndüktans

İçerisinden akım geçen iletkenin çevresinde manyetik alan oluşmaktadır. Oluşan manyetik alan devrede bir elektromotor kuvveti meydana getirerek Lenz Yasası' na göre iletkenden geçen akımı azaltmaya çalışmaktadır. Bu da alternatif akıma (AC) karşı bir indüktans adı verilen direnç etkisi oluşturmaktadır. İndüktansın aktif güç kaybına etkisi bulunmamaktadır. İndüktans etkisini tanımlayan İndüktif Reaktans (X_L) ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \tag{1.4}$$

bu eşitlikte açısal hız, ω (rad/s) ;indüktans, L ve alternatif akım frekansı, f (Hz) ile sembolize edilmektedir. İndüktansın birimi Henry (H) iken İndüktif Reaktans (X_L) birimi Ohm olarak tanımlanmaktadır.

1.1.2.3. Kapasitans

İki iletken arasında boşluk, hava veya yalıtkan malzemenin olması durumunda kapasitans etkisi oluşmaktadır. Havai iletim hatlarında iletkenler arasında ya da iletkenler ile toprak zemin arasında bu olay gerçekleşmektedir. Kapasitans (C) değeri Farad (F) cinsinden ve Eşitlik 1.5'te gösterildiği gibi iletkenlerin birisi üzerindeki yükün (Q) iletkenler arasındaki potansiyel farka (V) oranıyla tanımlanmaktadır.

$$C = Q / V \tag{1.5}$$

Kapasitans etkisini tanımlayan ve Ohm birimi ile ifade edilen Kapasitif Reaktans (X_C) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{1.6}$$

1.1.2.4. Korona Nedenli Kayıplar

Nemli ve sisli havalarda iletim hatlarında gerilimin artması ile hava iletken yüzeyde iyonize olmaktadır. Gerilim artışının devam etmesiyle iletken çevresinde mor renkli ışıklı bir halka meydana gelmektedir. Bu olay *Korona* olarak isimlendirilmektedir. Korona olayına neden olan korona akımı gerilim düşümlerine ve güç kayıplarına yol açmaktadır.

1.1.2.5. Havai Enerji İletim Hat İletkenleri

Elektrik santrallerinde üretilen enerjinin taşınmasında ve dağıtılmasında kullanılan izolesiz iletkenler havai enerji iletim hat iletkenleri olarak tanımlanırlar. Enerji iletiminde güç kayıplarının en aza indirilmesi için iletkenliği yüksek malzemeler tercih edilmelidir. Direkler arasına çekilen bu iletkenler mekanik veya atmosferik durumlardan da olumsuz etkilenirler. Aşırı ısınan iletim hatlarında sarkmalar meydana gelmektedir. Bu nedenle kullanılan iletkenlerin ısı dayanımının da iyi olması beklenmektedir.

1.1.3. Havai Hat İletkenlerinde Kullanılan Malzemeler

1.1.3.1. Bakır

İletkenliğinin yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedir. Ancak yoğunluğun yüksek olması direklere binen yük miktarını artırdığı için sarkmaların çok olmasına neden olmaktadır. Ayrıca tedarik edilebilirliği açısından maliyetinin yüksek olması nedeniyle iletim hatlarında kullanımı yıllar öncesinde yerini alüminyum iletkenlere bırakmıştır. Günümüzde daha çok gümüş ile bakır alaşımları kataner sistemlerde kullanılmaktadır.

1.1.3.2. Tam Alüminyum İletkenler (AAC)

Alüminyum iletkenlerin iletkenliği bakıra göre daha az olmasına rağmen hem maliyetlerinin daha az olması hem de yoğunluğunun nerdeyse bakırın üçte biri oranında olması nedeniyle tercih edilmektedir. Diğer taraftan, kopma mukavemetleri bakıra göre daha düşük olmasına rağmen ağırlıklarının daha az olması nedeniyle mukavemet anlamında ihtiyacı da karşılayabilmektedir.

1.1.3.3. Tam Alüminyum Alaşım İletkenler (AAAC)

Tam alüminyum iletkenlerdeki mukavemet değerlerinin artırılması için AAAC iletkenler birden çok alaşımlı Alüminyum-Magnezyum-Silisyum (Al-Mg-Si) tellerin birbiri üzerine bükülmesi ile üretilmektedir. Bütün teller aynı çapta ve 7, 19, 37, 61 veya 91 adet telden oluşmaktadır. Bir AAAC iletken yapısı Şekil 1.4 ile gösterilmiştir [2].



Şekil 1. 4. AAAC iletken yapısı

İlave edilen malzemeler mukavemet değerini artırırken iletkenlik değerini azaltmaktadır. Bu iletkenler ayrıca 0,6/1 kV havai hat izoleli kablolarda askı teli olarak da kullanılabilmektedir.

1.1.3.4. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR)

Bu tip iletkenlerin merkezinde çelik öz, dış katmanlarında ise alüminyum malzeme kullanılmaktadır. Merkezde bulunan çelik özler iletkenin mukavemet özelliklerini güçlendirirken dış katmanda yer alan alüminyum iletkenlerde enerjinin taşınmasında rol almaktadır. ACSR iletkenlerin çalışabilmesi için gerek duyulan koşullar Tablo 1.2'de verilmiştir [6].

Tablo 1. 2. ACSR iletkenlerin çalışabilmesi için istenen koşullar

Parametre	İstenen Koşul	Ölçü Birimi
Yükselti	< 1000	m
- En yüksek ortam sıcaklığı	45	℃
- En düşük ortam sıcaklığı	-40	℃
Rüzgâr basıncı	53-68	kg/m^2
En yüksek güneş ışınımı	1000	W/m
Anma frekansı	50	Hz

Bu tip iletkenler, yüksek gerilim iletim hatlarında 100 yıldan fazla bir süredir kullanılmaktadır. Ancak yüksek ısıl genleşme katsayısı nedeniyle belirli sıcaklıklardan sonra iletkenler sarkmaya başlamakta ve artan yüklerde aşırı ısınmalara neden olmaktadır [7]. ACSR iletkenlerinin genel yapısı aşağıda Şekil 1.5'te gösterilmiştir [2].



Şekil 1. 5. ACSR iletkeni yapısı

ACSR iletkenleri 75℃ - 85 ℃ aralığında sürekli olarak çalışan iletim hatlarında kullanılırlar. Bu sıcaklığın üzerinde iletkenlerdeki alüminyum katmanların mekanik mukavemeti azalmaya başlar, bu durum ise iletkenin yüksek rüzgâr ve buz koşullarında kırılmasına neden olmaktadır. Ayrıca çalışma sıcaklıklarının üzerindeki durumlarda iletkende aşırı sarkmalar meydana gelmektedir ve direkler arası mesafe bu durumu tolere etmek anlamında yetersiz kalabilmektedir [8, 9].

1.1.3.5. Yüksek Sıcaklık Düşük Sarkma İletkenleri (HTLS)

Bu iletken yapısında, merkezde çelik etrafında da alüminyum iletkenler yer almaktadır. Yapısı itibari ile ACSR iletkenlere benzemekle birlikte bu iletkenler hem daha yüksek mukavemete sahiptir hem de elektrik iletkenlikleri daha yüksektir. Alüminyum iletkenler üretim aşamasında ısıl işleme tabi tutularak elektrik iletkenliği artırılırken merkezdeki çelik üretimindeki farklılar sebebiyle mukavemet değerleri de artmaktadır. 200 ℃'ye kadar yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini kaybetmeyen ve ayrıca sarkma miktarı daha az olan HTLS iletkenleri tasarlanmıştır [8, 10, 11]. Bu iletkenler, ACSR iletkenlere göre hem termal hem de elektriksel olarak çok daha iyi özellik göstermektedir. Bu nedenle mevcut hatlarda yer alan ACSR iletkenleri HTLS iletkenleri ile değiştirilebilmektedirler [10]. Ancak HTLS iletkenleri yüksek akım nedeniyle daha yüksek gerilim düşümüne ve güç kaybına sebep oldukları için uzun iletim hatlarında HTLS kullanılması önerilmemektedir [12].

Yüksek sıcaklık düşük sarkma iletkenlerinin temel kullanım alanları [13]:

- Yeni hat yapımının mümkün olmadığı yerlerde mevcut direklerin kullanılmasıyla daha yüksek kapasiteli enerji koridorları oluşturmak,
- Yeni hat yapımı mümkün olsa bile direklerin yeni ancak düşük iletken kapasiteli olduğu noktalarda benzer ağırlıkta yüksek kapasiteli iletkenler kullanmaktır.

Bu iletkenlerin temel avantajları [13]:

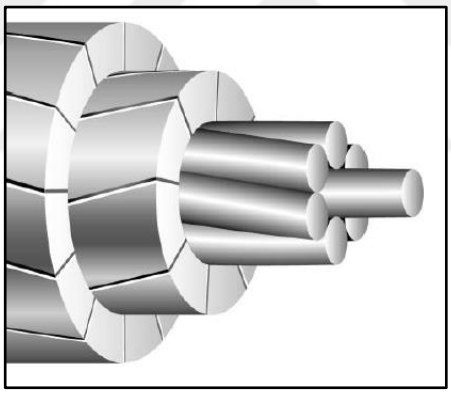
- Akım taşıma kapasitesini artırmak,
- Uzun süreli kullanımlarda ekonomik olmak,
- İletkenlerin sarkmasını azaltmak,
- Hatlardaki gerilim düşümünü azaltmak,
- Hat kayıplarını minimize etmek,
- Kamulaştırma ve irtifak hakkı alanlarını azaltmaktır.

Avantajlarından dolayı HTLS iletkenler başta Amerika Birleşik Devletleri olmak üzere birçok ülke tarafından hat kapasitelerini yükseltmek amacıyla yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi bakımından 2006 yılından beri kullanılmaktadır [7, 14].

HTLS iletkenleri performans avantajlarının çoğunu alüminyum tellerin üretim sürecinde tamamen tavlanmış olması ve düşük akma dayanımına sahip olması ile elde etmektedir [11]. Düşük akma dayanımı nedeniyle yükü çeliğe aktaran iletkene gerilim uygulandığında alüminyumda hızlı, kalıcı ve elastik olmayan uzama meydana

gelmektedir. Yüksek sıcaklık düşük sarkma iletkenleri, alüminyum iletkenli kompozit çekirdek (ACCC) ve alüminyum iletkenli güçlendirilmiş çelik çekirdek (ACSS) gibi farklı çeşitlere sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında ACSS iletken yapılarının üretim, test ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum İletkenli Güçlendirilmiş Çelik Çekirdek (ACSS) iletkenlerinde, merkezdeki çelik teller yuvarlak ve fazladan güçlendirilerek üretimi yapılmaktadır. Çelik telleri trapez şekilli alüminyum teller çevrelemektedir. Alüminyum teller, tamamen tavlanarak iletkenliği yükseltilmektedir. ACSS iletkenlerin ideal çalışma üst sıcaklıkları 200 ℃'dir. 250 ℃'ye kadar çalışabildiği bilinen ACSS iletkenlerin bu sıcaklığın üzerindeki durumlarda çalışabilirliği tam olarak bilinmemektedir [9]. Bir ACSS iletken yapısı aşağıda Şekil 1.6 ile gösterilmiştir [15].



Şekil 1. 6. ACSS iletkeni yapısı

Üretimleri esnasında alüminyum tellerin tamamen tavlanması ve çok düşük akma dayanımına sahip olması ACSS iletkenlerinin önemli özellikleridir. Düşük akma mukavemeti nedeniyle yükü çeliğe aktaran kompozit iletkene gerilim uygulandığında alüminyumda hızlı kalıcı veya elastik olmayan uzama meydana gelmektedir. Bu nedenle ACSS' nin ilk kullanım uygulamaları sarkmanın çok kritik olduğu uzun mesafelerde yapılmasına rağmen günümüzde kısa iletim hatlarında daha çok kullanılmaktadır.

ACSS iletkenlerde Yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı için çalışma anında operatörün, iletkenin ve diğer elemanların güvenliği açısından canlı hat bakımına müsaade edilmemektedir [14].

1.1.4. Havai Hat Tanımlamaları

Havai hat iletkenlerinin seçiminde kullanılan malzemenin iletkenlikleri, mukavemet değerleri ve ısı dayanımı gibi özellikleri dikkate alınmaktadır. Bu nedenle tel, tel şekli, iletken çapı, iletkenlik, akım taşıma kapasitesi, ısı dayanımı, sarkma, kendinden sönümleme özelliği ve uzun süreli sünme gibi bazı önemli parametreler tasarım esnasında dikkate alınmalıdır. Bu parametreler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1.1.4.1. Tel

Havai iletim hatlarının en önemli parçalarından birisi olan iletkenler yapısal olarak genellikle merkezde çelik teller ve bunların etrafına alüminyum tellerin sarılması ile üretilirler.

1.1.4.1.1. Çelik Teller

Çelik teller, mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle iletkenin taşınmasında kullanılmaktadır. Çelik teller, galvaniz ile kaplanarak korozyona karşı direncin ve termal kararlılığın artırılması sağlanmaktadır [9, 11].

İletkenlerdeki çalışma sıcaklığını alüminyum teller değil, galvaniz kaplı çelik teller sınırlandırmaktadır [11]. Galvaniz kaplamalar 245 °C ve üzeri sıcaklıklarda bozulmaya başlar ve bu nedenle daha yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar.

Havai hat iletkenlerinin üretiminde üç tip çelik tel kullanılmaktadır. Bunlar normal, yüksek ve ekstra yüksek mukavemetli tiplerdir. Ekstra yüksek mukavemetli teller ile maksimum yük taşınabilmektedir. Geleneksel galvanizleme çelik tellerin kaplamasında mükemmel bir malzeme değildir, çünkü iletkenin iletim hattına montajından 5 yıl sonra galvanik hareket en üst seviyeye ulaşmakta ve iletken içerisinde tahribat başlamaktadır. Bu nedenle % 5 Al-Zn kaplı çelik teller, kompozit iletken ACSS yapımında en iyi birleşim olarak bilinmektedir [9].

1.1.4.1.2. Alüminyum Teller

Alüminyum teller iletkenlikleri daha yüksek olduğu için enerjinin taşınmasını sağlamaktadır. İletkenlik en yüksekten düşüğe doğru gümüş, bakır, altın ve alüminyum olarak sıralanmaktadır. İletim hatlarında hem mekanik hem elektrik özellikleri hem de maliyet bakımından en uygun olan alüminyum iletkenler sıklıkla tercih edilmektedir.

1.1.4.2. Tel Şekli

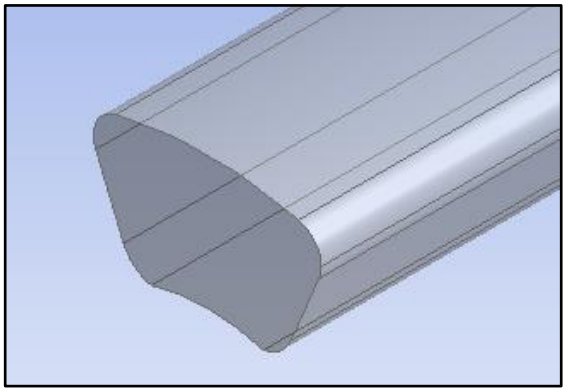
Havai hatlarında kullanılan iletkenler tel çekme işleminden sonra istenilen şekle dönüştürülmektedir. Optimum güç transferi için iletkenin malzemesi kadar iletkenin şekli de önemlidir. İletkenleri farklı şekillerde biçimlendirmekteki amaç korozyonu, titreşimi ve korona kayıplarını azaltmaktır. Bu yüzden farklı şekilli iletkenler kullanılmaktadır. İletkenlerin şeklinin değişmesi ile çap, direnç ve manyetik alan değişmektedir. Tel şekli olarak genellikle tercih edilen geometrilerin Yuvarlak Teller ve Trapez Teller olduğu ifade edilebilir.

1.1.4.2.1. Yuvarlak Teller (RW)

En yaygın olarak kullanılan yuvarlak (round) teller zamanla HTLS iletkenlerde yerini genellikle trapez tellere bırakmıştır. Ancak 132 kV'dan büyük gerilimlerde genellikle RW teller tercih edilmektedir. Teller eş merkezli sarılmakta ve aralarında önemli boşluklar bulundurmaktadır.

1.1.4.2.2. Trapez Teller (TW)

Trapez tellerde büküm işleminden sonra iletkenler arasında boşluklu yapı bırakılmayarak yuvarlak tellere göre daha fazla iletkenlik kesit alanı oluşturulmaktadır. Trapez şekilli alüminyum telleri pürüzsüz bir dış yüzeye ve daha küçük toplam çapa sahip kompakt bir iletken oluşturmaktadır. Bu teller, belirli bir iletken çapı için alüminyum alanını artırmak veya belirli bir alüminyum alanı için çapı azaltmak amacıyla tasarlanmaktadır. Trapez teller 1350 alüminyum serisinden oluşmaktadır. Trapez teller iki veya daha fazla katmandan meydana gelmektedir. Merkezde ise yuvarlak çelik teller yer almaktadır [16]. Trapez tel yapısının görüntüsü aşağıda Şekil 1.7 ile verilmiştir.



Şekil 1. 7. Trapez tel yapısı

Aynı alüminyum kesit alana sahip trapez tellerden oluşan iletkenin çapı, yuvarlak tellerden oluşan iletkenin çapından yaklaşık % 10 oranında daha küçüktür [9].

Trapez alüminyum teller, daha düşük genleşme katsayısı sayesinde geleneksel yuvarlak tel iletkenlere kıyasla daha yüksek akım taşıyabilmektedirler [14]. Trapez teller, tamamen tavlandığında sarkma ve sınırlı akım taşıma kapasitesi sorunlarını çözerek performans ve maliyet avantajı sağlamaktadır.

Aynı kesit için TW' de daha küçük çap olduğundan metal malzemelerin daha az kullanılmasına ve iletken ağırlıklarının azalmasına sebep olmaktadır. İletken ağırlığının azalması ile iletken gerilmesi, sarkması ve maruz kaldığı rüzgâr ve buz yükleri de azalmaktadır.

1.1.4.3. İletken Çapı

İletkenlerin çapı taşınması gereken enerjinin miktarı ile doğru orantılı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle hatlar tasarlandığında iletken çapı sadece iletilecek günlük güç için değil aynı zamanda acil bir durum derecelendirmeleri için artan durum yüklerine izin vermek amacıyla da tasarlanmaktadır [11]. Alüminyumun iletkenliği bakıra göre daha az iken alüminyum kesitinin artırılması ile aynı seviyede enerji taşınabilmektedir. Ancak iletken çaplarının büyük olması da daha fazla buz ve rüzgâr yükünün etkisinde kalacağını göstermektedir. Bu nedenle, iletken çapının da gereğinden fazla büyük olması iletkenlerin fazla sarkmasına olumsuz etkisi olacaktır.

1.1.4.4. İletkenlik

Enerji taşınmasının en önemli kıstası ve her malzemenin kendine has özelliği iletkenliktir. İletkenliği yüksek olan malzemelerin kullanılması aktif güç kayıplarının azaltılmasına katkı sağladığı gibi aynı zamanda elektrik enerjisinin daha yüksek kapasitelerde taşınmasında da etkilidir. İletkenliği en yüksek malzeme gümüş iken onu bakır, altın ve alüminyum sırasıyla takip etmektedir. Uluslararası tavlı bakır standardına (IACS) göre metal ve alaşımlar için elektrik iletkenliği birimi olarak Siemens/metre (S/m) tanımlanmaktadır. Bakır telin iletkenliği %100 ve $5{,}8 \times 10^7$ S/m'dir. Alüminyum tel iletkenliği ise yaklaşık % 61,2 IACS olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, HTLS iletkenlerdeki alüminyum teller % 63 IACS iletkenliğe sahiptir [11].

Tellerin iletkenliğini artırabilmek için tavlama işlemi yapılmaktadır. Tavlama, daha yavaş ve daha kontrollü bir soğutma yöntemi ile metal işleme işlemidir. Tavlanmış alüminyumda iletkenlik ve minimum yüzde uzama artar iken gerilme mukavemeti düşmektedir [7]. [17] numaralı çalışmada yeni bir yaklaşım olarak tavlama işlemi filmaşin ile tel çekme işlemleri arasında yapılmıştır. İlgili çalışmada geliştirilen yaklaşımdan önceki uygulamalarda tavlama işlemi tel çekme işlemlerinden hemen sonra yapılmakta iken [17] numaralı çalışmada önerilen yeni yaklaşım ile iletkenliğin artırılarak akım taşıma kapasitesinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Tavlanan alüminyum tellerde iletkenlik ve yüzde uzama oranı artırılırken kopma mukavemeti düşürülmüştür. Tamamen tavlanmış alüminyum teller, ilk kez SSAC olarak bilinen ve 1970' lerin başında geliştirilen bir iletkende kullanılmıştır [11].

1.1.4.5. Akım Taşıma Kapasitesi

İletim hatlarında güç taşıma kapasitesi performansını mekanik, elektrik ve yaşlanma özellikleri belirlemektedir ve bu parametrelerin her birisinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Hava durumu ve çalışma koşullarının bu hesaplamalar üzerinde doğrudan bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Hava durumu verilerini buz ve rüzgâr yükü oluştururken çalışma koşullarını ise maksimum iletken çalışma sıcaklığı, sistem frekansı ve çalışma süresi oluşturmaktadır [18]. İletken özellikleri (malzeme, boyut, yapı), çevre koşulları (ortam sıcaklığı, rüzgâr, güneş radyasyonu) ve hattın çalışma koşulları iletim hatlarının hat akımını sınırlandıran ve etkileyen en önemli faktörlerdir.

Bu faktörleri dikkate alarak iletkenlerin akım taşıma kapasitelerini hesaplamak için CIGRE ve IEEE' nin termal dengeye dayanan hesaplamaları kullanılmaktadır [19, 20].

HTLS iletkenler, ACSR iletkenlere göre eşit çaplı ve alanlı tasarımın tüm avantajlarına sahip ancak alüminyum alanı artırılmış bir iletken sunmaktadır. Ağırlıkta ortaya çıkan çok düşük bir artışla dahi kablolar düşük direnç, artan akım taşıma kapasitesi ve artan güç sergilemektedir [11]. Enerji iletim havai hatlarındaki akım taşıma kapasitesi, termal dengeye dayanan ve aşağıda verilmiş olan Eşitlik 1.7 ile hesaplanmaktadır.

$$I = \sqrt{\frac{q_C + q_r - q_S}{R_{TC}}} \tag{1.7}$$

bu eşitlikte I, akım (Amper); q_C, konveksiyonla ısı kaybı (W/ft); q_r, yayılan ısı kaybı (W/ft); q_S, güneş ısısı kazancı (W/ft) ve R_{TC}, istenilen frekansta (50 Hz) iletkenin çalışma sıcaklığındaki AC direnci (Ω/ft).

HTLS iletkenleri, aynı boyuttaki geleneksel ACSR iletkenlerinden yaklaşık 2,5 kat daha fazla akım taşıyabilmekte ve daha az sarkma ile daha yüksek sıcaklığa dayanabilmektedir [12].

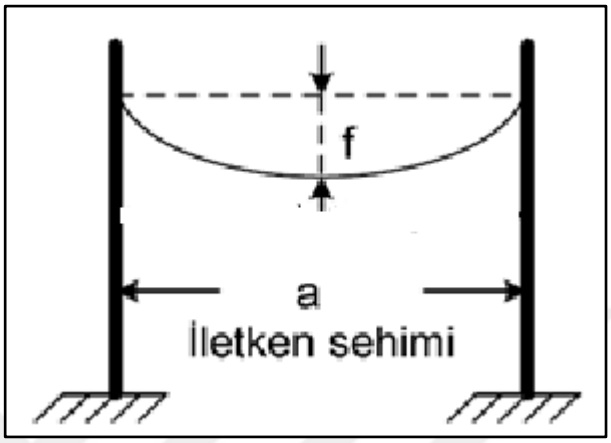
1.1.4.6. Isı Dayanımı

İletkenlerin ısısı hem akımdan hem de dış faktörlerden dolayı artmaktadır. Isıya maruz kalması iletkenin sürekli uzamasına ve mekanik açıdan zayıflamasına neden olmaktadır. Isının artması ile iletken boyu uzar, sarkmalar meydana gelir ve belirli bir seviyeden fazla sarkmanın gerçekleşmesi durumunda ise iletim hatlarında hem hat güveliği hem de canlılar için istenmeyen durumlar ortaya çıkar. Bu nedenle ısı dayanımı iyi olan malzemeler tercih edilmektedir. Ayrıca, ısı limitleri iletkenin akım taşıma kapasitesini de sınırlandırmaktadır.

1.1.4.7. Sarkma(Sehim)

Enerji iletim hatlarında iki direk arasında kalan iletkenin hem kendi ağırlığı hem de buz ve rüzgâr yüklerinin etkisi ile aşağı yönde sarkmasına sehim denmektedir. İletim hatlarındaki sarkmayı iletken ağırlığı, direkler arası mesafe, iletim hattı gerginliği, hava

şartları ve sıcaklık etkilemektedir [4]. Havai hat iletkenlerinde ortaya çıkan sarkma durumu aşağıda Şekil 1.8 ile gösterilmiştir [22].



Şekil 1. 8. Havai hat iletkenlerinde sarkma

İletkenlerde gerçekleşen sarkma miktarı ise Eşitlik 1.8 ile elde edilmektedir.

$$f = \frac{Gxa^2}{8 \text{ x } p} \tag{1.8}$$

Bu eşitlikte

f , sarkma (m),

G , İletkenin yoğunluğu *(kg/dm^3)*

a , iki direk arası mesafe (m)

p , gerilme (kg/cm^2)

olarak belirtilmektedir.

HTLS iletkenlerdeki çeliğin ısıl genleşme katsayısı, ACSR iletkenlerinin yaklaşık yarısı kadar olduğundan HTLS iletkenlerinde daha düşük sarkma miktarları oluşmaktadır [11].

1.1.4.8. Kendinden Sönümleme Özelliği

İletken türleri, doğal olarak rüzgâr titreşimini sönümleme kapasitesine sahiptir. Rüzgâr titreşimine karşı direnç tavlanmış metal içermesine, büküm yapısına, iletken yapısına ve

iç sürtünme gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bir iletkenin büküm katmanları arasındaki daha düşük radyal sıkıştırma kuvvetleri daha yüksek kendi kendini sönümleme kapasitesine yol açmaktadır. HTLS iletkenleri, alüminyum tellerin tamamen tavlanmış olması ve artan sünme kapasiteleri dikkate alındığında, alüminyum büküm katmanları ve çelik çekirdek arasında ACSR iletkenlerine göre daha düşük sıkıştırma kuvvetleri sağlamaktadır [11]. HTLS iletkenlerde tüm gerilme yükünün çelik çekirdeğe aktarılıyor olmasından dolayı bu iletkenlerin kendi kendini sönümleme kapasitesi diğer iletken türlerine göre çok daha fazla artırmaktadır.

1.1.4.9. Uzun Süreli Sünme (Creep)

Geleneksel iletkenler, alüminyum tellerdeki yüksek çekme gerilimleri nedeniyle kalıcı uzama ve uzun süreli sünme yaşamaktadırlar. Uygulamalarda, tüm gerginlik çalışma koşullarında hızla çeliğe aktarıldığı için daha öncede belirtildiği gibi HTLS iletkenler için sünme bir etken olarak ele alınmamaktadır [11]. Alüminyumların sünmesi ise HTLS iletkenlerinin son sarkmalarını etkilememektedir. Çeliğin uzun süreli sünme hızı çok küçük olduğu için izin verilen nominal çalışma gerilimlerinde sünme ihmal edilmektedir. HTLS iletkenine mekanik gerilim uygulandığında alüminyum tellerin kalıcı olarak uzaması hızla gerçekleşmektedir ve alüminyum uzadıkça çekme yükü çeliğe aktarılmaktadır [9].

1.2. Literatür Araştırması

Elektrik iletiminde özellikle uzun mesafelerde iletken olarak II. Dünya Savaşı' na kadar bakır kullanılmıştır. Savaş sonrasında bakır yerine alüminyum yaygın bir biçimde tercih edilmiştir. Zamanla merkezinde çelik tellerin olduğu ve yuvarlak alüminyum teller ile etrafının çevrelenmesi ile ACSR iletkenler kullanılmıştır [23]. Toplumun hızla gelişimi ile elektrik enerjisine olan ihtiyaç da her geçen gün hızla artmıştır. Bu artan enerji ihtiyacını karşılayabilmek için yeni iletim hatları inşa edilmektedir veya mevcut iletkenler yenileriyle değiştirilerek güç iletim kapasitesi artırılmaktadır [7, 9, 12, 18, 19, 24]. Değiştirilecek yeni malzemeler, mevcut iletkenlere göre hem daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeli hem de daha düşük sarkmaya izin vermelidir [18]. Bu nedenle 1980'lerin başlarından itibaren yuvarlak tellerin yerine trapez teller üzerinde çalışılmaya başlanılmıştır [11]. 1985 yılında Reynold Cable tarafından ACSR ile aynı

çapta olmasına rağmen daha yüksek iletkenlik sağlayan ACSS iletkenleri geliştirilmiş ve piyasaya sürülmüştür. ACSS iletkenleri yüksek gerilimler taşınırken dahi düşük sarkmaların oluşması için tasarlanmıştır [23].

HTLS iletkenleri üzerine çalışmalar ilk olarak Douglass [25] tarafından Connecticut Light and Power Company için kullanılan pratik uygulamalara yönelik olarak başlamıştır. Daha sonra Alwar ve arkadaşları [26], yüksek sıcaklıkta düşük sarkma elde edebilmek için geleneksel ACSR iletkenleri ve kompozit çekirdek iletkenler üzerine çalışmalar başlatmışlardır. IEEE 738 Standartlarının tanımlandığı [27] numaralı çalışmada ise çıplak havai iletken sıcaklığını etkileyen faktörler ve mevcut sıcaklık ilişkisini bulmaya yönelik matematiksel yaklaşımlar standartize edilmiştir. [28-31] numaralı çalışmalarda farklı araştırmacılar çıplak, katı ve çok telli iletkenlerde salım gücü, radyal sıcaklık dağılımı, korozyon ve etkili radyal ısıl iletkenlik etkenleri üzerine detaylı analizler gerçekleştirmişlerdir. Gorur ve Olsen [32], HTLS iletkenleri için Kompozit çekirdeklerini karakterize etmişler ve IEEE 738 standardına [27] uygun olarak yüzey sıcaklığı-zaman eğrisi, akımla çekirdek sıcaklığı, emisivite, soğurma, termal iletkenlik performanslarını incelemişlerdir. Bazı araştırmacılar ise çalışmalarında, HTLS iletkenlerinin sıcaklık-sünme ve sarkma-gerilim performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir [33-37]. Gerald ve arkadaşları tarafından yapılmış olan [38] numaralı çalışmada, HTLS iletkenlerinin giderek artan güç talebine nasıl bir çözüm üretebileceği üzerine analizler gerçekleştirilmiştir.

Havai enerji iletim hatları, rüzgârın neden olduğu rüzgâr titreşimlerine maruz kalmaktadır. Bu da iletkenlerde ve bağlantı elemanlarında yorgunluk hasarına neden olmaktadır. Bu titreşimi azaltmak için damperler kullanılırken ayrıca iletkenlerin kendi kendini sönümleme özellikleri de bulunmaktadır. Bu nedenle farklı boyutlarda ve farklı tipte iletkenlerin kendinden sönümleme özellikleri literatürde detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. [39] numaralı çalışmada, belirli koşullar altında sönümleme ölçümleri yapılmış ve trapez tellerin genel olarak yuvarlak tellere göre daha yüksek sönümlemeye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Sheshagiri ve arkadaşları [8], yaptıkları çalışmada 3 farklı bölgede 400 kV, 220 kV ve 132 kV gerilim seviyelerinde yük akış değerlerini 9 saatlik günlük enerji talebinin karşılanmasını dikkate alarak incelemiş ve ayrıca ilgili koşullar altında ACSR Partner,

HTLS Stacir Partner ve HTLS Casablanca iletkenlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırmalarda, üç farklı iletken çapı için akım taşıma kapasiteleri, sarkma etkileri, ağırlık etkileri ve enerji kayıpları analiz edilmiştir.

Zhao ve arkadaşları tarafından HTLS iletkenlerde sünme ömrünün tespiti için deneysel bir yöntem geliştirilerek sünme gerinimi ana eğrisinin elde edildiği [40] numaralı çalışmada, farklı sıcaklık ve stres seviyeleri altında çekme sünme deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu iletkenler için zaman, sıcaklık ve gerilme ilişkisi ortaya koyulmuştur.

Nahman ve arkadaşları [41], sonlu elemanlar yöntemi ile 110 kV için hem değişken hem de sabit durum yük koşullarında iletkendeki ve iletkenin çevresindeki sıcaklık artışını analiz etmişlerdir. [11] numaralı çalışmada ise ACSR Hawk, ACSR Drake ve ACSS/TW Calumet iletkenleri mukayese edilmiş ve ACSR ürünlerin 125 ℃'nin üzerinde çalışmadığı görülmüştür.

Reddy ve Chatterjee [12, 42] geliştirdikleri MATLAB tabanlı yazılımları kullanılarak ACSR ve HTLS iletkenlerinde aynı akım uygulamasında kararlı hal yüzey sıcaklığı değişimlerini analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, termal zaman sabitinin HTLS iletkenlerde ACSR' ye göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Noor ve Aman [4], ETAP 12.6 yazılımını kullanarak farklı sıcaklık, rüzgâr hızı ve direkler arası mesafelerde iletim hatlarının gerilmesini ve sarkmasını inceledikleri çalışmalarının sonucunda direkler arası mesafe arttıkça sarkmanın artacağını gerilmenin azalacağını ve rüzgâr hızı arttıkça sarkmanın değişmeyeceğini gerilmenin artacağını, sıcaklık arttıkça sarkmanın artacağını gerilmenin azalacağını tespit etmişlerdir. Yine başka bir çalışmada ACSR Drake ile aynı dış çapa sahip ACCC/TW iletkeni karşılaştırılmıştır ve ACCC/TW iletkenin %28 daha fazla alüminyum kesit alanına sahip olduğu belirtilmiştir[7]. Chen ve arkadaşları [43], Curlew ve Linnet iletkenlerinin sarkma ve gerilme analizlerini farklı çalışma sıcaklıklarında ve çalışma sürelerinde inceleyerek iletkenin akımını, sıcaklığını ve sarkmasını hesaplamıştır. Bir diğer çalışmada [44] ise laboratuvar ortamında beş farklı hat kurularak ACSS/TW ve ACSR/RW iletkenlerinin çalışma performansları Ratekit programı ile karşılaştırılmıştır ve ACSS/TW' nin %20' lik maliyet açısından daha uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu

çalışmada ayrıca, ACSS iletkenlerinin rüzgârda oluşan titreşimlere ve yüksek sıcaklıktaki sarkmalara karşı daha iyi olduğu görülmüştür.

Kumar ve Rahangdale, PLS-CADD (Elektrik Hat Sistemleri-Bilgisayar Destekli Tasarımı ve Çizimi) yazılımını kullanarak ACSR/Moose ve HTLS/ACCC/Budapeşt iletkenlerini mukayese etmişlerdir [24]. Bu çalışma sonucunda, ACSR'nin 902 A, ACCC'nin ise 2114 A akım taşıma kapasitelerine sahip olabileceğini hesaplamıştır. Son olarak, [45] numaralı çalışmalarında Mbuli ve arkadaşları tarafından HTLS iletkenleri üzerine yapılan çalışmalara yönelik detaylı bir literatür analizi gerçekleştirilmiştir.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş

Bu tez çalışmasında ilgili standartlar gereğince belirlenen şartlara göre fabrika ortamında ilk örnek üretim ve testler gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS programında zamana bağlı mekanik testlerin analizi yapılmıştır. Devamında ise farklı ACSR ve tezin ürünü olan HTLS iletken verileri alınarak yapay sinir ağları ile MATLAB programında akım taşıma kapasitelerinin öğretilmesi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması İş Akış Şeması aşağıda Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

İş Akış Şeması

Prototip İmalat	Testler	Ansys Analizler	YSA ile Öğrenme
* Alüminyum Trapez Tellerin Üretimi * Yüksek Mukavmetli Çelik Üretimi * Tellerin Bükümü	* Tip Testler	* Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Mukavemet Analizleri	* HTLS ve ACSR malzemelerine ait akım taşıma kapasitelerinin öğrenilmesi

Şekil 2. 1. Tez çalışması kapsamında esas alınan iş akış şeması

2.2. Prototip İmalat

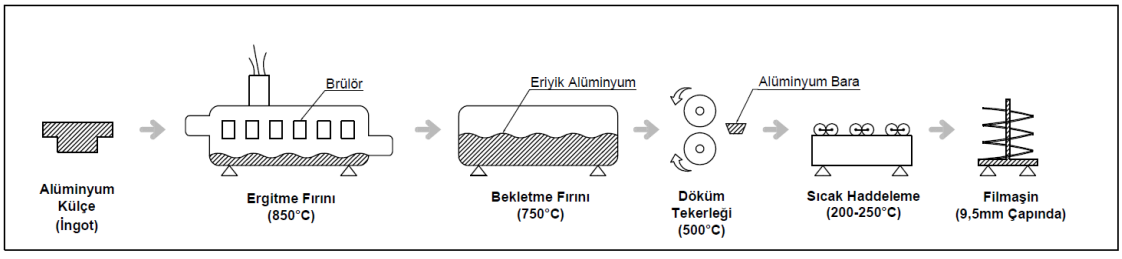
İletkenin üretiminde sürekli döküm hattı, tel çekme hattı ve büküm hattı olmak üzere 3 ana kısımdan oluşan üretim aşaması kullanılmıştır. ACSS/TW Wabash HTLS iletkeni trapez Al tellerin oluşturduğu iki katmandan çevrelenmiştir. Merkezinde, yuvarlak şekilli çelik tellerin oluşturduğu bir merkezi çekirdek üretilmiştir. Tablo 2.1'de bu tez çalışması kapsamında üretilen ACSS/TW/Wabash iletkenleri için yapısal gereksinimler belirtilmiştir [16].

Tablo 2. 1. ACSS/TW için yapısal gereksinimler

Parametre	Ölçü Birimi	Değer
İletken Tanımı	-	Wabash/ACSS/TW
İletken Kesiti	mm^2	386,5
Alüminyum Kesiti	mm^2	322,26
Toplam Tel Sayısı	Adet	27
Alüminyum Tel Sayısı	Adet	20
Alüminyum Katman Sayısı	Adet	2
Çelik Tel Sayısı	Adet	7
Çelik Tel Çapı	mm	3,38
Nominal Kütle	kg/km	1558
Nominal Dış Çap	mm	25,15
Anma İletken Mukavemeti	kN	132

2.2.1. Alüminyum Trapez Tellerin Üretimi

Alüminyum trapez tel üretiminin ilk aşamasında Şekil 2.2'de gösterildiği gibi alüminyum filmaşinlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

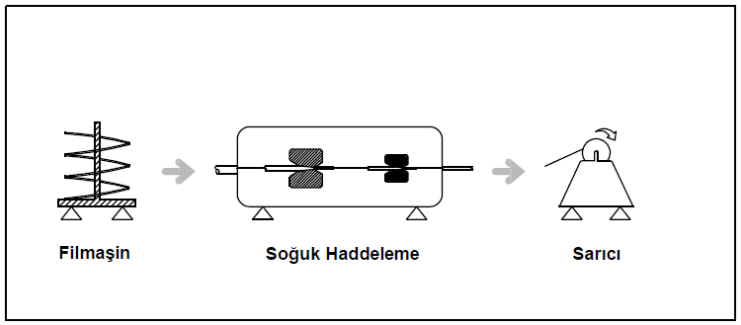


Şekil 2. 2. Alüminyum filmaşinlerin üretimi

İngot adı verilen alüminyum külçeler, sürekli ve düzenli olarak ergitme fırınına yerleştirilerek eritilmiştir. Ergitme fırınında bulunan brülörler vasıtasıyla doğal gaz hava ile karıştırılarak yakılmış ve fırın iç sıcaklığı 850 ℃ civarında tutulmuştur. Elde edilen eriyik alüminyum, eritilmiş metalden çıkan cürufu yakalamak ve gazları berraklaştırmak için bekletme fırınına alınmıştır. Eriyik haldeki ürün, bakır malzemeden yapılmış olan döküm çarkına transfer edilmiş ve sürekli su püskürtmeyle soğutulmuştur.

Buradan yaklaşık 500 ℃ sıcaklıkta çıkan alüminyum, bar şeklinde ve katılaşmış halde sıcak haddeleme için sürekli olarak makineyi beslemiştir. Bu makinede her ruloda % 25 oranında çapta küçültme ve şekillendirme yapılmıştır. Sürecin sonunda 9,5 mm çapında yuvarlak bir şekilde 200 ℃ sıcaklığında ASTM B-230 standardına uygun filmaşin elde edilmiştir. Bu filmaşine; iletkenlik, direnç, çekme mukavemeti ve yüzde uzama gibi testler uygulanmıştır ve iletkenlik ölçüm sonucu yaklaşık olarak % 61,3 IACS civarında elde edilmiştir.

Bir sonraki aşamada ise Şekil 2.3'te gösterildiği gibi trapez tellerin üretilme sürecine geçilmiştir.



Şekil 2. 3. Trapez tellerin üretilmesi

İlk olarak, elde edilen filmaşinlerin soğuk haddeleme makinesinde trapez şekillendirme haddeleri ile istenilen çapa gelmesi sağlanmıştır. Trapez şekilli teller belirli bir iletken çapı için Al alanını artırmak üzere tasarlanmıştır [46]. Elde edilen trapez tellerin iletkenliğini artırmak amacıyla bu teller tavlama fırınında 400 ℃ sıcaklıkta üç saat tavlanmıştır. Tablo 2.2. ile verilmiş olan mukayese sonuçları incelendiğinde ise tavlama

işlemi sonucunda alüminyum trapez tellerin iletkenlikleri artarken mukavemetlerinin azaldığı görülmektedir [9].

Çelik tellerin etrafını üst üste iki katman halinde çevreleyen trapez Al teller, ilk katmanda 8 adet ve ikinci katmanda 12 adet olmak üzere toplamda 20 adet olarak kullanılmıştır. Üretilen trapez tellere ait bilgiler Tablo 2.3'te verilmiştir. 1350 alaşımlı alüminyumdan oluşturulan trapez tellerin 20 ℃' deki yoğunluğu 2,705 g/cm^3 ve özdirenci 0,0279 n.mm^2/ m şeklinde elde edilmiştir [16, 47, 48].

Tablo 2. 2. Tavlanmış ve sert çekilmiş alüminyum tellerin karşılaştırılması

Özellik	**Tavlanmış Alüminyum (ACSS)**	**Sert Çekilmiş Alüminyum (ACSR)**
Çekme Gerilmesi (MPa)	59-76	160-200
Uzama (%)	20-30	1,2-2,0
İletkenlik (IACS)	% 63	% 61,2

Tablo 2. 3. Üretilen alüminyum trapez tellerin özellikleri

Parametre	**Ölçü Birimi**	**Değer**
Alüminyum Tel Sayısı	Adet	8+12
Alüminyum Bükülü Kesit	mm^2	386,6
Alüminyum Ağırlık	kg/km	1068
İletkenlik	IACS	% 63
Nihai Kopma Mukavemeti	MPa	60

2.2.2. Yüksek Mukavemetli Çelik Üretimi

Havai hat iletkenlerinde çeliği korozyondan korumak için bir çinko kaplama kullanılmaktadır. Ancak, 200 ℃'nin üzerindeki sıcaklıklarda çinko kaplama zarar görerek demir-çinko alaşımına dönüşmektedir. Bu durum ise şiddetli pullanma ile birlikte korozyon direncinin düşmesine ve ayrıca iletkenler arasındaki parçacıkların ani kırılmalar sonucunda aşınmasına neden olmaktadır [9]. Karşılaşılan bu önemli

dezavantajlardan dolayı ekstra güçlendirilmiş çelik tel üretimleri tercih edilmektedir. Ekstra güçlendirilmiş çelik telleri oluşturan demir dışındaki diğer elementler Tablo 2.4 ile gösterilmiştir [49].

Tablo 2. 4. Ekstra yüksek mukavemetli çeliğin içeriği

Element	**Kompozisyon (%)**
Karbon	0,5-1,0
Manganez	0,3 - 1,3
Fosfor	0,035
Kükürt	0,045
Silikon	0,15-1,2

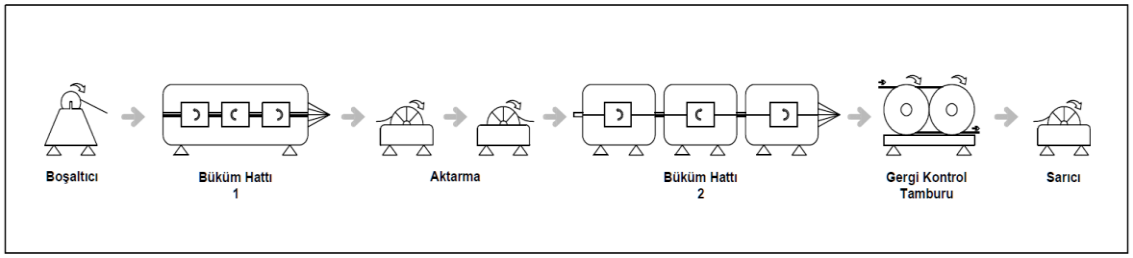
Üretim sürecinde çelik teller, çinko kaplı ve soğuk tel çekme işlemi ile üretilmiştir. Merkezde bulunan 1 adet tel ve dışındaki 6 adet tel ile çevrelenmiştir. 3,38 mm çapında çelik tellerin oluşturduğu yapının çapı 10,14 mm olarak elde edilmiştir. Üretilen çelik çekirdeğe ait elde edilen veriler Tablo 2.5' te paylaşılmıştır. Tablodan görüldüğü gibi çinko kaplı çelik tellerin 20 ℃' deki yoğunluğu 7,78 g/cm^3 ve özdirenci 0,1915 n.mm^2/ m şeklinde elde edilmiştir [16, 46, 47].

Tablo 2. 5. Ekstra yüksek mukavemetli çeliğin özellikleri

Parametre	**Ölçü Birimi**	**Değer**
Çelik Tel Çapı	mm	3,38
Çelik Tel Sayısı	Adet	1+6
Çelik Bükülü Çap	mm	10,14
Çelik Bükülü Kesit	mm^2	62,85
Çelik Gres Yağlama Ağırlığı	kg/km	12,5
Çelik Ağırlık	kg/km	490
Çinko Kaplama	g/m^2	259
Nihai Kopma Mukavemeti	MPa	1760

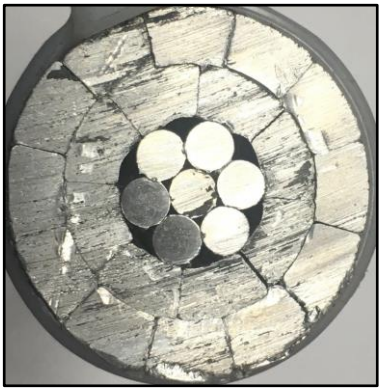
2.2.3. Tellerin Bükümü

Alüminyum tel tabakasının büküm yönü sağ taraf olacak şekilde üretilmiştir. Bununla birlikte, alt katmanlardaki alüminyum ve çelik tellerin büküm yönü birbirini takip eden katmanlarda tersine çevrilmiştir [46, 47]. Çelik tellerin üzerine trapez tellerin bükümü ile iletken üretilmesi süreci Şekil 2.4 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Çelik tellerin üzerine trapez tellerin bükümü ile iletken üretilmesi

Büküm esnasında alüminyum ve çelik kendi aralarında kıyaslanmak üzere herhangi bir tabakanın adım oranı, hemen altındaki tabakanın adım oranından büyük olmayacak şekilde tamamlanmıştır. Böylece, uygun olmayan adım oranı değerlerinden dolayı iletkenin makaraya sarılması esnasında sarımlarda dağılmaların ortaya çıkması engellenmiştir. Tez çalışması Wabash iletkeninin kesit görseli Şekil 2.5 ile verilmiştir.



Şekil 2. 5. Tez ürünü

Aynı zamanda adım oranının bu şekilde belirlenmesi büküm esnasında katmanların birbiri üzerine sorunsuz şekilde oturmasına da imkân sağlamıştır. Üretimi tamamlanmış iletkende Al tellerin kesit alanının standartta belirtilen değerlerin %98'inden az ve %102'sinden fazla olmamasına dikkat edilmiştir [46, 47]. Benzer şekilde, iletken çapının standartta tanımlanmış olan değerin % 99'undan az ve %101'inden fazla olmamasına özen gösterilmiştir [46]. İletkenin kopma mukavemeti ise standartta belirtilen değerlerin %95'inden az olmayacak şekilde üretilmiştir [47]. Ayrıca, örgü işlemi üretimi tamamlanmış tellerin hiçbirisinde ek olmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında prototip üretimi tamamlanmış olan Wabash iletkeni aşağıda Şekil 2.6 ile gösterilmiştir.



Şekil 2. 6. Prototip üretimi tamamlanmış Wabash iletkeni

2.3. Testler

Tez çalışması kapsamında üretilen iletkene Özel İletkenler Teknik Şartnamesi içerisinde tanımlanmış olan şartlar dikkate alınarak testler uygulanmıştır [13]. Testler hem bükülü iletkene hem de bireysel olarak çelik ve alüminyum tellere yapılmıştır. Yapılan testler ile iletkenin şekilsel, elektriksel ve mekaniksel açıdan ilgili standartlara ve şartnameye uygunluğu incelenmiştir.

2.3.1. Bükülü İletkene Yapılan Testler

Merkezde ekstra yüksek mukavemetli çinko kaplı yuvarlak çelik teller ve etrafında ise iki katmandan oluşan trapez şekilli alüminyum iletkenlerden oluşan bükülü iletkenler üzerinde gerçekleştirilmiş olan 5 adet test aşağıda açıklanmıştır.

2.3.1.1. Yüzey Kontrolü ve İletken Çapının Ölçülmesi

Üretilen iletkenin yüzeyi çentikler, çizikler ve girintiler gibi çıplak gözle görülebilen tüm kusurlardan arınmış olmalıdır. Bu nedenle, iletkenin yüzeyi görsel bir incelemeye tabi tutulmuş ve ayrıca iletken çapı kumpas ile farklı yerlerden tekrarlanarak ölçülmüştür.

2.3.1.2. Doğru Akım Direncinin Ölçülmesi

Üretilen iletkenden, 1m uzunlukta birden fazla örnekler alınarak bu örnekler üzerinde son ürünün 20°C' deki doğru akım direnci ölçülmüştür.

2.3.1.3. Adım Oranı ve Yönü ile Tellerin Sayısı ve Türü

Tasarımlarda, tellerin dış tabakası sağ yönde olacak şekilde bükülmüştür. Sarım oranı ise ölçülen sarım uzunluğunun katmanın çapına bölünmesi ile elde edilmiştir. Merkezdeki çelik çekirdek, (1+6) olacak şekilde toplam 7 adet 3,38 mm çapında ekstra yüksek mukavemetli çelik tellerden üretilmiştir. Merkez çelik çekirdek etrafına ise iki katmandan oluşan (8+12) 20 adet trapez şekilli tavlanmış alüminyum teller sarılarak toplam yapı elde edilmiştir.

2.3.1.4. İletken ve Yağın Birim Ağırlığı Ölçümü

İletkenin çelik çekirdek kısmı gres yağı ile yağlanmıştır. Gres yağı ile çelik çekirdeğin korozyona karşı dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Üründen alınan numuneler ile önce toplam ağırlık sonra çelik çekirdek ağırlığı sonra da yağdan arındırılmış çelik kısmın ağırlığı ölçülerek üç farklı ağırlık bulunmuştur.

2.3.1.5. Çekme Kopma Mukavemeti Testi

Üretilmiş olan üründen toplam 10 m uzunluklu numune alınarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri ile iletkenin direkler arasındaki hem kendi ağırlığına hem de rüzgâr ve buz yüklerine karşı göstereceği reaksiyon incelenmiştir.

2.3.2. Bireysel Tellere Yapılan Testler

Alüminyum ve çelik tellere ayrı ayrı uygulanmış olan bu testlerde her iki iletken yapısı üzerinde aşağıdaki analizler ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir,

- Tellerin yüzeyleri kontrol edilmiştir ve çapları ölçülmüştür,
- Mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla Şekil 2.7'de gösterilmiş olan Zwick marka mukavemet test cihazı kullanılarak her bir tele çekme, kopma ve uzama testleri yapılmıştır [50],
- Elektriksel özelliklerini belirlemek için alüminyum tellerin 20℃'deki doğru akım direnci ölçülmüştür.



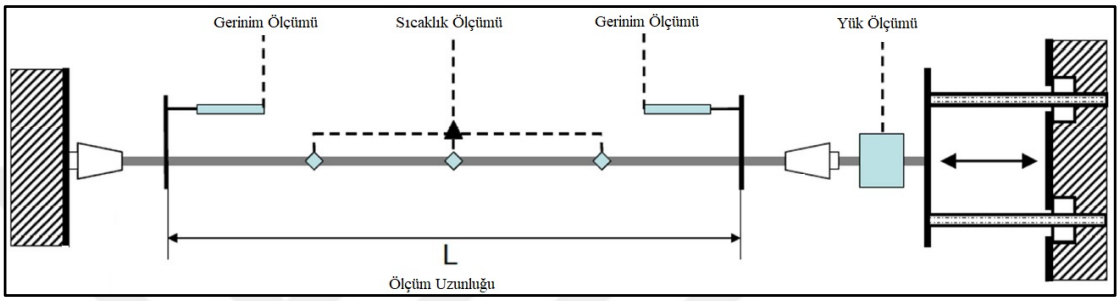
Şekil 2. 7. Mukavemet Test Cihazı

2.3.3. Diğer Testler

Bu bölüme kadar anlatılmış olan testlerin tamamı Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş. laboratuvarlarında yapılmıştır. Ancak, bu bölümde diğer testler başlığı altında aşağıda açıklanacak olan testler uluslararası akredite olmuş SPIE laboratuvarlarında Almanya' da gerçekleştirilmiştir.

2.3.3.1. Sünme Testi

Sünme testlerine yönelik kullanılmış olan test düzeneği Şekil 2.8'de gösterilmiştir. 9 m uzunluğundaki iletken numunesi test düzeneğine yerleştirildikten sonra iletkene çekme kuvveti uygulanarak iletkenin uzama değişimleri ve gerinimi ölçülmüştür.



Şekil 2. 8. Sünme Test Düzeneği

Bu test ile iletkenin sahada kullanım esnasında sıcaklık ve yüklere bağlı olarak uzama miktarı ve ayrıca iletkende oluşabilecek stres miktarı belirlenmiştir. 20°C'de 26,6 kN yükte ve 1000 saat süreyle gerçekleştirilen testler esnasında iletkenin farklı üç noktasında sıcaklığı ölçülmüştür. Elde edilen veriler Eşitlik 2.1'de yerine koyularak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = axt^{b} \tag{2.1}$$

Bu denklemdeki ε, sünmeden kaynaklanan uzamadır ve mm/m birimindedir, t ise zaman değişkenini temsil etmektedir. Eşitlik 2.1'deki, a ve b sayıları sabit katsayılardır ve yerine konulduğunda aşağıdaki denklem 2.2 elde edilmiştir.

$$\varepsilon = 0,0547xt^{0,2157} \tag{2.2}$$

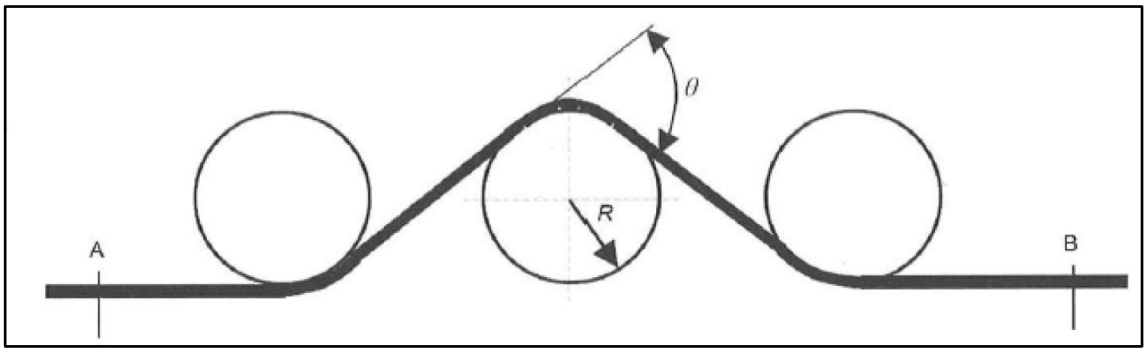
Denklem 2.2'ye göre bir saat, bir gün, bir ay, altı ay, bir yıl ve on yıl gibi farklı zaman dilimlerine göre sonuçlar ayrı ayrı elde edilmiştir.

2.3.3.2. Sarkma – Gerilme Testi

Deney için hazırlanan iletken, 45 m uzunluğundadır ve 42,9 m mesafedeki sarkma kelepçeleri arasına montaj edilmiştir. İletken sıcaklığı test süresince altı farklı bölgeden ölçülmüştür. İletkene 26,6 kN çekme kuvveti uygulanmış ve ayrıca çalışma sıcaklığı olan 120 ℃'ye kadar iletken akım uygulanarak ısıtılmıştır. Uygulanan yük, akım ve sarkma düzenli olarak ölçülmüştür. İletken, 120 ℃'de yarım saat bekletildikten sonra yavaş yavaş soğutulmuştur. Bu döngü beş kez tekrarlanmıştır.

2.3.3.3. Kasnak Testi

Şekil 2.9 ile verilmiş olan kasnak test düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiş olan kasnak testinde, 45,5 m uzunluğundaki test numunesinin kelepçelerle bağlantısı yapılmıştır. İletkene 19,9 kN çekme yükü uygulanarak germe işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune, iç yarıçapı R=40 cm olan iki saptırma silindiri altında ve aynı yarıçapta başka bir silindirin üzerinde yönlendirilmiştir.



Şekil 2. 9. Kasnak Testi Düzeneği

Test sistemindeki silindirlerin arasındaki büküm açısı $\theta = 20°$ olarak belirlenmiştir. Test süresince, iletken yaklaşık 2 m/s hızla 10 kez ileri ve geri silindirlerden geçirilmiştir.

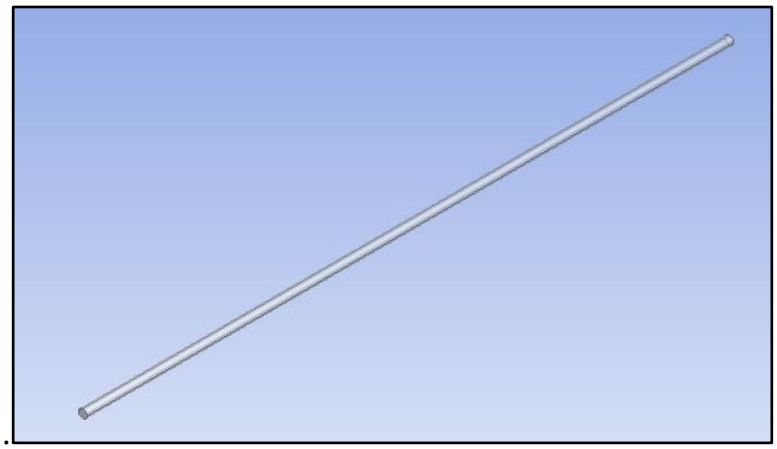
2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle ANSYS Analizleri

Bu çalışmada ayrıca, üretilen ACSS/TW/Wabash ürününü oluşturan çelik tellere ait çekme, kopma ve yüzde uzama test sonuçları dikkate alınarak çelik telde meydana gelen deformasyonların ANSYS programında zamana bağlı yapısal analizleri de gerçekleştirilmiştir. Tablo 2.6'daki malzeme verileri *Engineering Data* bölümünde programa girilmiştir. Bu bölümde, malzeme olarak paslanmaz çelik seçilerek kütüphaneye eklenen paslanmaz çeliğe ait veriler üzerinde değişiklikler yapılmıştır.

Tablo 2. 6. ANSYS analizlerinde kullanılan malzemelerin verileri

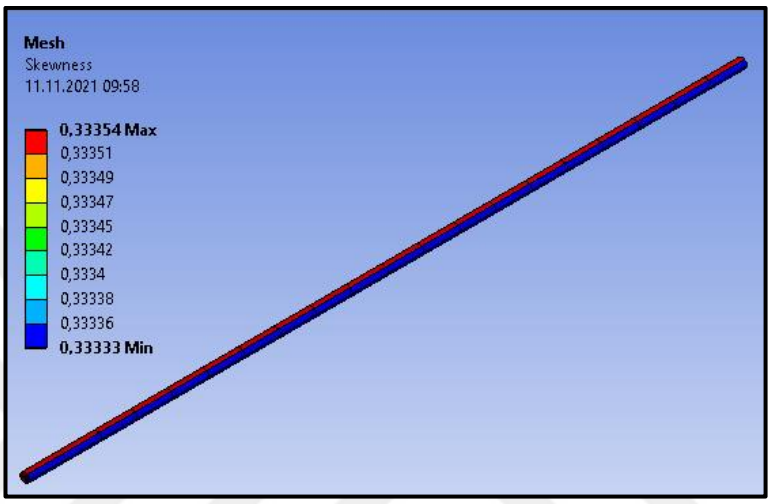
Özellik	**Ölçü Birimi**	**Çelik Tel**
Yoğunluk (d)	g/cm^3	7,78
Termal Genleşme Katsayısı	1/K	$11,5x10^{-6}$
Elastik Modülü (E)	MPa	$190x10^3$
Akma Dayanımı	MPa	1703
Poisson Oranı (υ)	-	0,3
Kopma Dayanımı	MPa	1861

Analizin ikinci adımda, *Design Modeler* ara yüzünde çelik telin 250 mm uzunluğundaki 3,38 mm çapında geometrik çizimi Şekil 2.10'daki gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 10. Çelik telin ANSYS programında geometrisi

ANSYS analizi üçüncü adımında, *Model* ara yüzünde malzemenin çözümlenmesine ait en uygun mesh ataması yapılmıştır. Belirlenen mesh yapısı ile elde edilmiş olan skewness sonuçları Şekil 2.11 ile verilmiştir. Benzetim sonuçları incelendiğinde, en uygun çözümün 12,5 mm mesh boyutu ile elde edildiği görülmüştür.



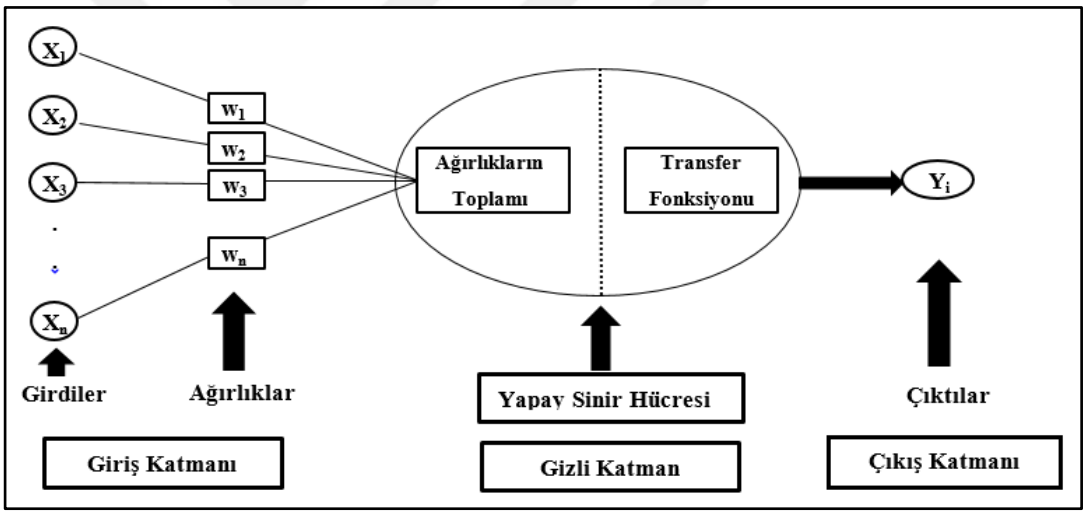
Şekil 2. 11. Çelik telin mesh boyutunun tespit edilmesi

ANSYS analizi dördüncü adımında ise fabrika testlerindeki çekme kuvvetinden ANSYS analizinde faydalanılmıştır. Test edilen malzeme (– z) koordinatından sabitlenmiştir ve malzemeye *(+ z)* yönünde çekme kuvveti uygulanmıştır. Başlangıçta çekme için 2688 N kuvvet uygulanmış ve daha sonraki her saniye için çekme kuvveti 313 N artırılmıştır. Çelik tel, fabrika testlerinde 1861 MPa'da kopmuştur. Bu değer dikkate alındığında yukarıdaki başlangıç ve her saniyede artarak giden çekme değerlerine göre telin yaklaşık olarak *45.* saniyede koptuğu hesaplanmıştır. Elde edilen süreye göre analiz kırk beş eşit parçaya ayrılmıştır.

ANSYS analizi son adımında ise gerilme, uzama ve toplam deformasyon analizleri seçilmiş ve bu analizler için çözümler gerçekleştirilerek analiz sonuçları elde edilmiştir.

2.5. Yapay Sinir Ağları İle Akım Taşıma Kapasitesinin Tahmin Edilmesi

Yapay sinir ağları (YSA), biyolojik sinir sisteminin çalışma prensiplerini taklit eden etkili bir yapay zekâ yaklaşımıdır. Yapay sinir ağları, öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptir. Örneklerden elde ettikleri bilgiler ile kendi deneyimlerini oluşturur ve daha sonra benzer konularda benzer kararlar verirler. YSA tabanlı yaklaşımlar özellikle eksik, belirsiz, karmaşık ve bulanık bilgileri işlemekteki başarıları nedeniyle, birçok endüstriyel probleme uygulanabilmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında iletkenlerin akım taşıma kapasitelerinin tahmin edilebilmesi için yöntem olarak YSA tercih edilmiştir. Yapay sinir ağlarına ait benzetimlerde kullanılan genel ağ mimarisi şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 12. Benzetimlerde kullanılan yapay sinir ağları genel ağ mimarisi

Yapay sinir ağlarının modellenmesinde giriş veri setini oluşturacak veriler Tablo 2.7'de gösterilmiştir [2, 15]. Görüldüğü gibi, YSA giriş veri setini oluşturan parametreler iletkenlerin toplam kesit alanları, alüminyum kesit alanları, 20 ℃'deki DC direnç değerleri ve akım taşıma kapasiteleri olarak belirlenmiştir. Benzetimlerde, bu verilere göre elde edilen akım taşıma kapasitelerinin öğretilerek tahmin edilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 2. 7. Yapay sinir ağlarında kullanılacak veriler

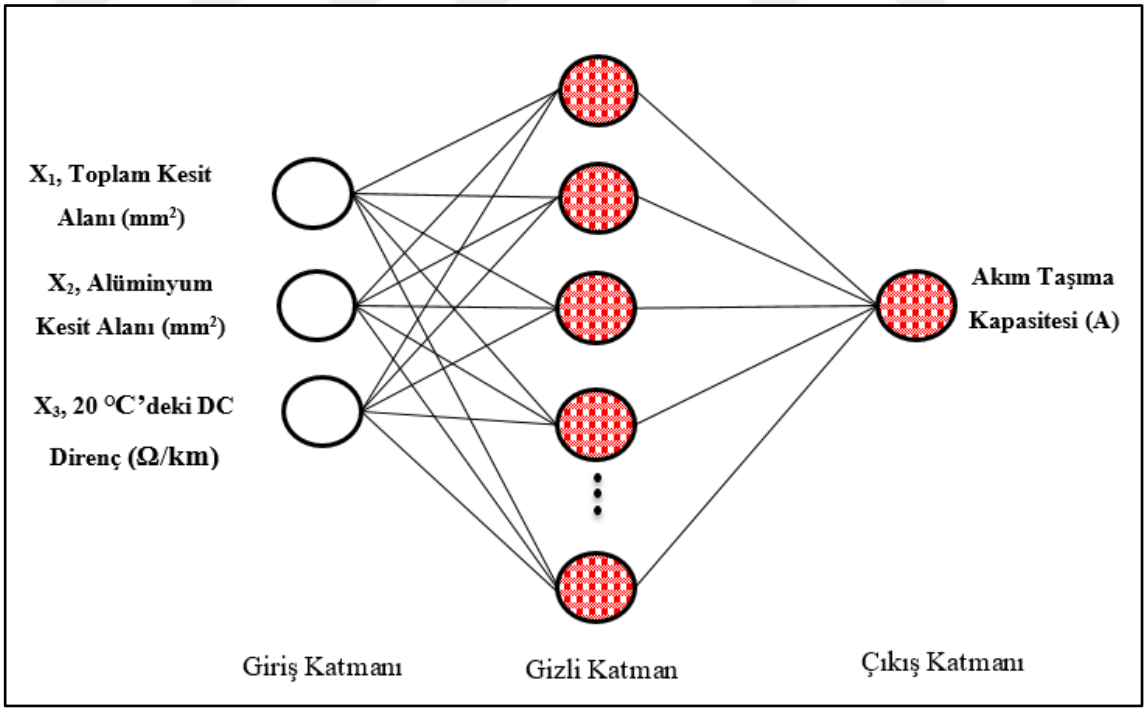
İletken Adı	Giriş			Hedef
	Toplam Kesit Alanı (mm^2)	Alüminyum Kesit Alanı (mm^2)	20 °C'deki DC Direnç (Ω/km)	Akım Taşım Kapasitesi (A)
ACSR/RW/Swan	24,71	21,18	1,328	145
AAC/RW/Rose	21,14	21,14	1,364	145
ACSS/TW/Calumet	333,03	286,39	0,154	1295
ACSS/TW/Wabash	449,41	386,58	0,1141	1573
ACSR/RW/Rawen	62,44	53,52	0,536	255
AAC/RW/Pansy	42,49	42,49	0,68	225
ACSS/TW/Columbia	553,1	489,61	0,0904	1822
ACSR/RW/Pigeon	99,31	85,12	0,337	340
ACSR/RW/Patrigde	156,9	134,87	0,214	490
ACSS/TW/Suwannee	565,29	486,26	0,0907	1828
AAC/RW/Aster	67,34	67,34	0,428	305
ACSR/RW/Ostrich	176,9	152,2	0,168	560
ACSS/TW/Nelson	681,1	637,03	0,0702	2094
ACSR/RW/Brant	227,7	227,7	0,142	630
ACSR/RW/Hawk	280,8	241,65	0,094	715
ACSR/RW/Starling	421	361,9	0,078	930
ACSS/TW/Truckee	731,22	695,48	0,0644	2203
ACSR/RW/Drake	468	402,56	0,072	995
ACSR/RW/Rail	517,3	483,8	0,059	1090
ACSR/RW/Cardinal	547,3	484,53	0,06	1095
ACSS/TW/Platte	835,93	795,03	0,0564	2439
ACSR/RW/Curlew	593,6	525,5	0,054	1150
ACSR/RW/Pheasent	726,8	645,08	0,045	1310
ACSR/RW/Falcon	908,6	908,6	0,035	1510
ACSS/TW/Powder	1180	1091,09	0,0412	3009

Girişi oluşturan 25 x 3 matrisi için MATLAB programında eğri uydurma ile bir eğri uydurma işlemi yapılmıştır. Çıkış matrisi olarak ise 25x1 boyutunda Tablo 2.7'deki

akım taşıma kapasitesi sütunu seçilmiştir. Malzeme tipi olarak ise AAC, ACSR ve ACSS iletkenlerinin tercih edilmiştir.

Bir sonraki adımda ise verilerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i test için düzenlenmiştir. Gerçekleştirilmiş olan YSA ağ mimarisi aşağıda Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

YSA ağ mimarisinde giriş, gizli ve çıkış olmak üzere toplam üç katman kullanılmıştır. Giriş katmanı, yapay sinir ağına girdilerin geldiği katman olarak bilinmektedir. Bu katmana gelecek giriş sayısı kadar hücrenin bulunmasına rağmen genel olarak girdiler herhangi bir işlem sürecine maruz kalmadan bir sonraki katmana/katmanlara iletilmektedir. Gizli katman on nörondan oluşmaktadır ve tek katmanlıdır. Gizli katmanların ve nöron sayılarının artırılması hesaplama karmaşıklığını ve süresini artırmaktadır. Çıkış katmanı ise gizli katmandan gelen bilgileri işleyerek ağın çıktılarını oluşturmaktadır. Bu katmanda üretilen çıktılar doğrudan kullanıcıya gönderilir.



Şekil 2. 13. Benzetimde kullanılan yapay sinir ağlarının ağ mimarisi

Bu mimaride ayrıca eğitim algoritmaları olarak Levenberg-Marquardt ve Scaled Conjugate Gradient algoritmaları kullanılmıştır. Eğitim algoritması olarak kullanılan bu iki algoritma hem MATLAB kütüphanesinde mevcut temel algoritmalardan oldukları için hem de yüksek hızda eğitilebilme özelliklerinden dolayı tercih edilmişlerdir.

3. BÖLÜM

BULGULAR

3.1. Test Sonuçları

Bu tez çalışması kapsamında üretilmiş olan test numunelerine uygulanan tüm testler hem fabrika ortamında hem de akredite olan SPIE laboratuvarında gerçekleştirilen testler ile ilgili standartlar açısından başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

3.1.1. Elektriksel Test Sonuçları

Üretilen ACSS/TW/Wabash malzemesini oluşturan Al trapez teller için parametre ölçümlerinde elde edilen sonuçlar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3. 1. Al tellere yapılan elektriksel test sonuçları

Parametre	Ölçü Birimi	Değer
İletken Tanımı	-	Wabash/ACSS/TW
Alüminyum Tek Tel Kesit Alanı	mm^2	19,33
Alüminyum Bükülü Kesiti Alanı	mm^2	322,26
20 °C'deki DC Direnci	Ω/km	0,072
120 °C'deki Akım Taşıma Kapasitesi	A	1122

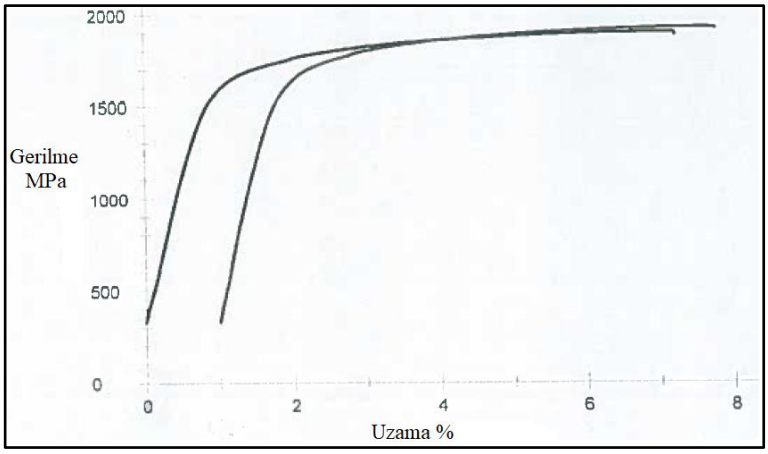
Kesit alanının artması ile DC ve AC direnç değerleri azaldığı için Al kesit alanının büyük olması akım taşıma kapasitesinin artırılması için istenen bir özelliktir. Bu nedenle, Al tek tel ve bükülü iletken kesit alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca,

20℃'deki DC direnç değeri ve IEC 61597 [51] standardına göre 120 ℃'deki akım taşıma kapasitesi de ölçülmüştür.

3.1.2. Mekaniksel Test Sonuçları

Havai hat iletkenlerinde enerji taşınması esnasındaki elektriksel gereklilikleri Al teller karşılarken mukavemet ile ilgili gereklilikleri de çelik tellerin üstlenmesi beklenmektedir. Bununla birlikte, Al tellerin bu mukavemet değerleri altında tahrip olmaması için çelik tellere göre çok daha fazla sünek olması gerekmektedir. Bu nedenle, hem Al tellere hem de çelik tellere çekme ve kopma testleri yapılarak gerilme-uzama eğrileri elde edilmiştir. Aynı anda üretilen teller için birer adet tele çekme kopma testi yapılması yeterli iken çalışma kapsamında verilerin doğrulanması için iki farklı çelik tele test uygulanmıştır ve sonuçlar Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Al telin yapısı ise geleneksel olarak üretilen yuvarlak tellerin aksine trapez şekilli olması nedeniyle sonuçları doğrulamak adına üç farklı tele test uygulanmıştır ve Şekil 3.2' de verilmiştir.

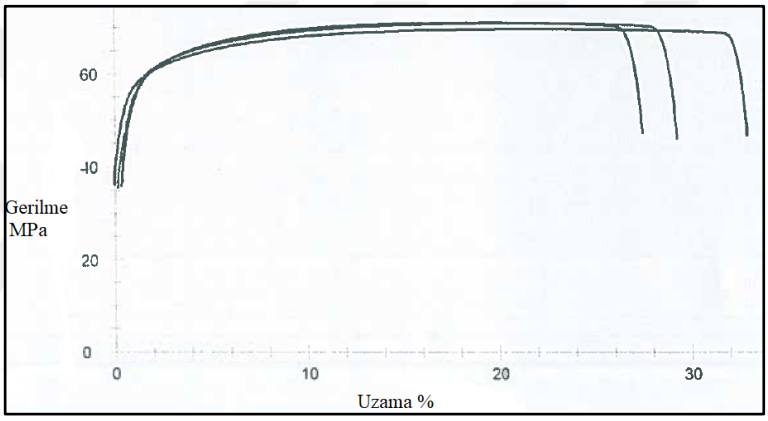
İlk olarak, iki farklı ekstra güçlendirilmiş çelik tele çekme kuvveti uygulanmıştır. Elde edilen veriler ile bilgisayar ortamında Şekil 3.1'deki gerilme-uzama eğrisi çizdirilmiştir. Yataydaki veriler iletkenin ilk boya göre yüzde uzama miktarını gösterirken dikeydeki veriler iletkene ait mukavemet değerlerini göstermektedir. Grafikteki eğrilerin sağ üst bölümde tamamlandığı nokta iletkenin kopması ile sonlanmıştır.



Şekil 3. 1. Çelik tel mukavemet sonuçları

Şekil 3.1'de görüldüğü üzere mukavemet değeri 1860 MPa civarındadır ve uzama değerleri ise %7,13 ile % 7,5 arasında değişkenlik göstermiştir. İlgili standarda göre 3,38 mm çelik tellerin çekme dayanımının en az 1700 MPa olması gerektiği dikkate alındığında [52], bu tez çalışması kapsamında üretilmiş olan ürünün ilgili standartlara uygun olduğu ifade edilebilir.

İkinci adımda, üç farklı trapez Al tele çekme kuvveti uygulanmıştır. Elde edilen veriler ile bilgisayar ortamında Şekil 3.2.'deki gerilme-uzama eğrisi çizdirilmiştir.



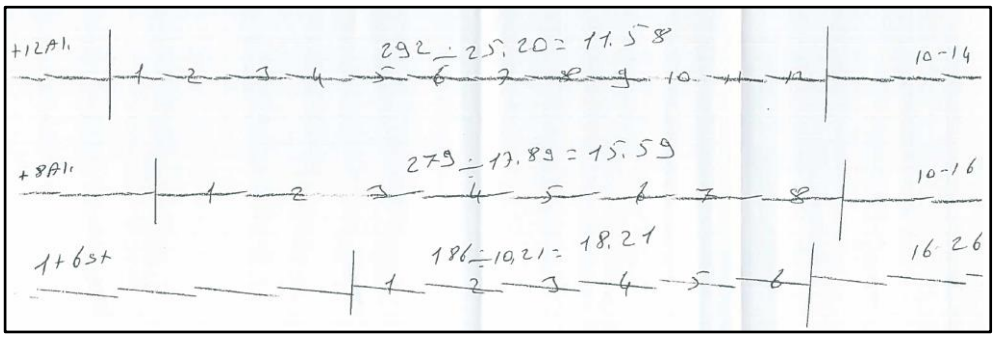
Şekil 3. 2. Alüminyum tel mukavemet sonuçları

Trapez şekilli Al tellere ait ortalama yüzde uzama ve ortalama çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde uzama miktarının %31 ve çekme dayanımının 71 MPa olarak elde edildiği görülmektedir. Al tellere ait % uzama miktarının, bu tez kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel sonuçlarda da elde edildiği gibi, çelik tellerinkine göre daha yüksek olması gerekmektedir. Bunun bir sonucu olarak, Al teller daha fazla sünerek iletkenlerin maruz kaldığı yüklerden çok az etkilenirler veya hiç etkilenmezler.

Gerilme – uzama eğrileri, malzemeye ait elastikiyet modülünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Belirli bir noktadaki gerilmenin uzamaya oranı olarak tanımlanan elastikiyet modülü aynı zamanda malzemenin ne kadar sünek olduğunun da bir ölçüsüdür. Elastikiyet modül değeri çelik tellerde düşük iken Al tellerde daha yüksek olmaktadır.

Adım oranı parametre değeri tellerin büküm aşamasında birbirleri üzerine sarılırken açılma olmaması için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, hem çelik tellerin hem de Al tellerin adım oranı her katman için olmak üzere toplam üç katman için ayrı ayrı belirlenmiştir. Adım oranı, ölçülen adım uzunluğunun katman çapına bölünmesi ile elde edilmektedir. Adım uzunluğunu bulmak için ilgili katman üzerine sırasıyla karbon kâğıdı ve A3 kâğıdı koyularak A3 kâğıdı üzerinde tellerin izinin çıkması sağlanmıştır. İlk katmanda 6 adet çelik tel, ikinci katmanda 8 adet Al tel ve üçüncü katmanda ise 20 adet Al tel bulunmaktadır. Bu tel sayıları kadar telin yer aldığı uzunluk değeri ise ilgili katmandaki adım uzunluğu değerini tanımlamaktadır.

Her bir katmandaki teller için gerçekleştirilmiş olan adım oranı test sonuçları Şekil 3.3 ile gösterilmiştir. Birinci katmanda olması gereken adım oranı 16 ile 26 arasında iken test sonucu 18,21 olarak bulunmuştur. İkinci katmanda olması gereken adım oranı 10 ile 16 arasında iken test sonucu 15,59 olarak bulunmuştur. Üçüncü katmanda olması gereken adım oranı 10 ile 14 arasında iken test sonucu 11,58 olarak bulunmuştur. Olması gereken optimum adım oranları sayısı katmanlara ve telin türüne göre değişkenlik göstermektedir ve ilgili standartta belirtilmiştir [53].



Şekil 3. 3. Wabash katmanları tel adım oranları

3.1.3. Sünme Testi Sonucu

ACSS/TW/Wabash iletkeninin beyan edilen maksimum kopma yükünün %20' sine denk gelen 26,6 kN' luk bir çekme kuvveti uygulanan iletkende oluşan sünme miktarı

ilgili standarda göre testteki boyunun % 10'undan az olmalıdır [13]. Bir metrelik üründeki değişim miktarı ise en fazla 10 mm olmalıdır ancak bu değerin olabildiğince az olması istenmektedir.

Sünme testi uygulanan iletkene ait ölçülen değerler Tablo 3.2.'de verilmiştir. Sünme miktarları %10 değerinden az olduğu için test başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.

Tablo 3. 2. 26,6 kN yükte farklı sürelerde sünme

Yük Süresi	Sünme (mm/m)
1 saat - 1 gün	0,0547 – 0,1086
1 ay - 6 ay	0,2269 – 0,3339
1 yıl - 10 yıl	0.3877 – 0,6371

3.1.4. Sarkma – Gerilme Testi Sonucu

İletkene uygulana sarkma ve gerilme testlerine ait 25 ℃ ve 120 ℃'deki sarkma miktarı ve çekme yükü değerleri Tablo 3.3' te verilmiştir.

Tablo 3. 3. Termal döngülerin sarkma-gerilme özellikleri

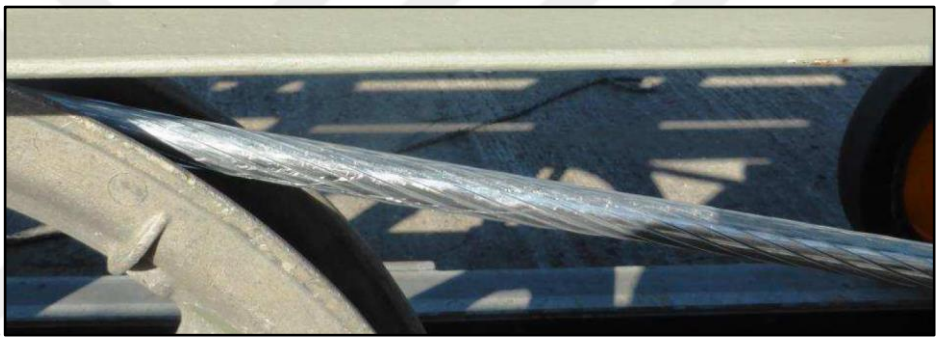
Döngü Numarası	25 ℃'deki Sarkma (mm)	120 ℃'deki Sarkma (mm)	25 ℃'deki Çekme Yükü (kN)	120 ℃'deki Çekme Yükü (kN)
Başlangıç	132	-	24,7	-
1	131	591	25,5	5,9
2	131	594	25,3	5,9
3	132	595	25,3	5,9
4	136	600	24,7	5,8
5	137	600	24,6	5,9

Tablo 3.3' e göre beş kez tekrarlanan test sonucunda sarkma miktarlarının sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Elde edilen deneysel verilere göre 25 ℃ sıcaklıkta sarkma miktarları 131 mm – 137 mm aralığında değişirken 120 ℃ sıcaklıkta değişim aralığının 591 mm ile 600 mm aralığında oluştuğu görülmektedir. Gerilme değerlerinin ise 25 ℃

için 24,6 kN – 25,5 kN aralığında ve 120 ℃ için 5,8 kN – 5,9 kN aralığında değiştiği görülmektedir.

3.1.5. Kasnak Testi Sonucu

Kasnak testinin amacı silindirler arasında ileri geri sarılan iletkenin, bükümünde açılma olup olmadığının ve iletken yüzeyindeki değişimlerin kontrol edilmesidir. İletkene uygulanan kasnak testi, Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Testten sonra bu tez çalışmasında geliştirilmiş olan iletken görsel olarak da incelenmiştir. İletkenin ne dış kısmında ne de tek tellerde herhangi bir hasar tespit edilmemiştir. Ayrıca, iletken yapısında herhangi bir gevşeme de görülmemiştir.

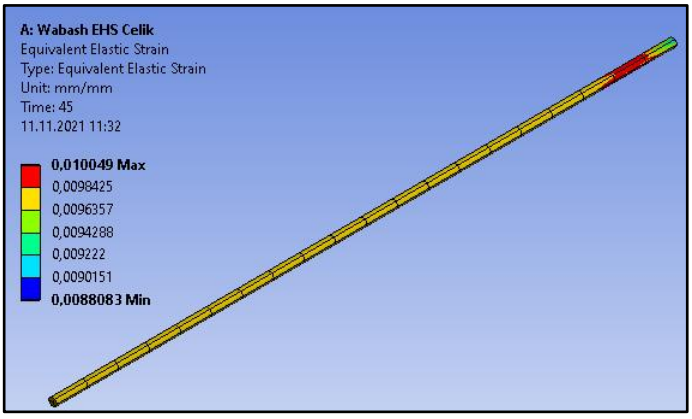


Şekil 3. 4. Kasnak testi sonrası iletkenin durumu

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle ANSYS Analizlerinin Sonuçları

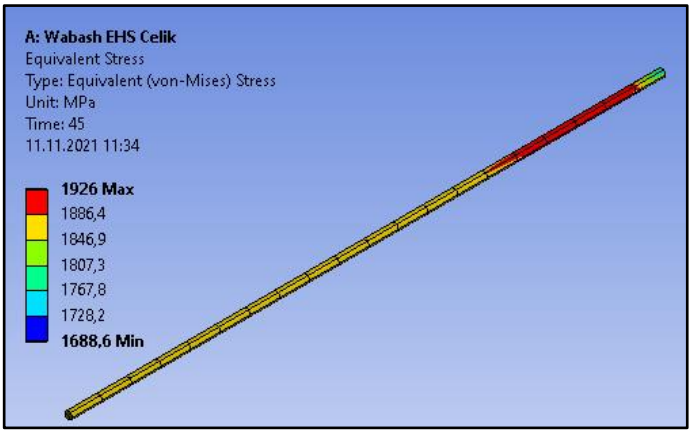
Laboratuvar ortamında çelik tellere uygulanan çekme, kopma ve uzama testlerinde elde edilmiş olan veriler kullanılarak ANSYS programında analizler gerçekleştirilmiştir. Çelik tel bir uçtan sabitlenmiştir diğer uçtan da çekme kuvveti uygulanarak teldeki değişimler incelenmiştir.

Şekil 3.5' te çelik telde gerçekleşen yüzde uzama değişimi gösterilmiştir. Maksimum ve minimum uzama miktarları ve ayrıca renk dağılımına göre sarıdan kırmızıya doğru uzamanın arttığı da görülmektedir. Deneysel test sonuçlarını temel alan ANSYS analizlerine göre yaklaşık % 1 oranında bir uzama gerçekleşmiştir.



Şekil 3. 5. Çelik telde gerçekleşen % uzama

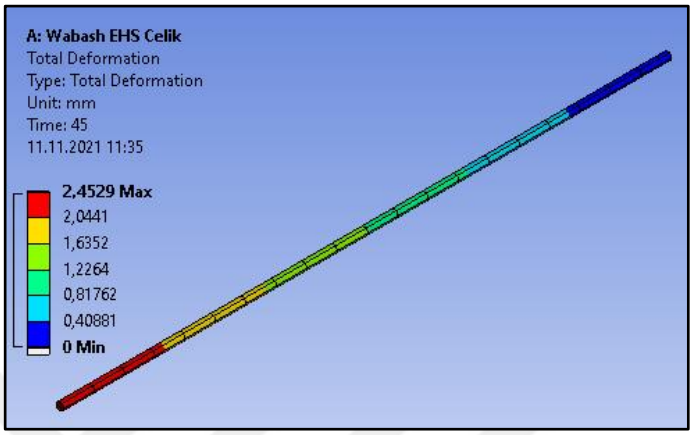
Şekil 3.6' da çelik telde meydana gelen gerilme değeri verilmiştir. Gerilmenin en yoğun olduğu yer kırmızı ile gösterilmiştir ve bu değer 1926 MPa civarındadır. Bu gerilme değeri iletkenin kopma mukavemet değerinden fazla olduğu için ANSYS analizlerine göre bu bölgede telin kopacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 3. 6. Çelik telde meydana gelen gerilme

ANSYS analizlerinde çelik tele uygulanan çekme kuvveti ile tel boyunda ortaya çıkacak olan uzama değişimleri Şekil 3.7 verildiği gibi elde edilmiştir. Toplam deformasyon

verilerine bakıldığında 250 mm'lik üründe yaklaşık 2,45 mm uzamanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.



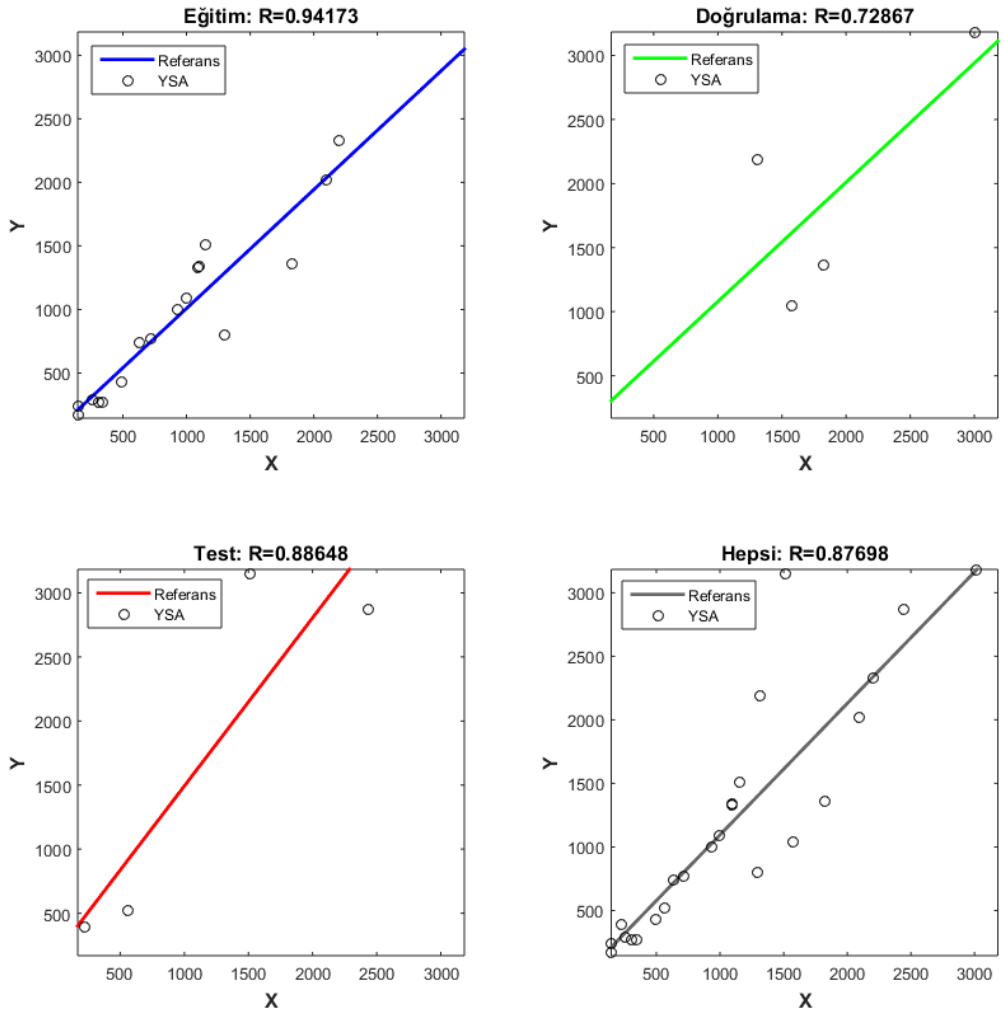
Şekil 3. 7. Çelik telde meydana gelen uzama miktarı

3.3. Yapay Sinir Ağları ile Akım Taşıma Kapasitesinin Tahmin Sonuçları

Yapay sinir ağlarına giriş değerleri olarak üç farklı parametre girilerek akım taşıma kapasitesinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Benzetimlerde Tablo 2.7' de verilmiş olan yirmi beş farklı ürüne ait veriler kullanılmıştır. Bu ürünlerin arasında Tablo 2.7' deki gibi tez kapsamında üretilen ACSS/TW/Wabash'da bulunmaktadır. Benzetimlerde, eğitim algoritmaları olarak Levenberg-Marquardt ile Scaled Conjugate Gradient algoritmaları kullanılmıştır. Levenberg-Marquardt, Newton algoritmasının bir başka versiyonudur ve Newton metodunun hızıyla adım düşme metodunun sağlamlığının bileşkesidir [54]. Scaled Conjugate Gradient ise giriş değerleri mevcut ve türevi alınabilir transfer fonksiyonlarına sahip yapay sinir ağlarının eğitiminde kullanılabilmektedir [55]. Bu algoritmalar yukarıda tanımlanmış olan avantajları, MATLAB veri tabanında hazır olarak bulunmaları ve çözüm sürelerinin hızlı olması nedeni ile tercih edilmişlerdir [56, 57].

Şekil 3.8'de Scaled Conjugate Gradient algoritması ile eğitilmiş YSA'nın sonuçları paylaşılmıştır. Bu grafiklerde X ekseni, akım taşıma kapasiteleridir ve hedeflenen gerçek verilerdir. Y ekseni ise YSA' nın Scaled Conjugate Gradient algoritması ile

ürettiği sonuçlardır. Referans yani Şekil 3.8 (a)' da mavi, (b)'de yeşil, (c)'de kırmızı ve (d)'de gri renkli olan doğrusal çizgiler ideal sonuçları temsil etmektedir.



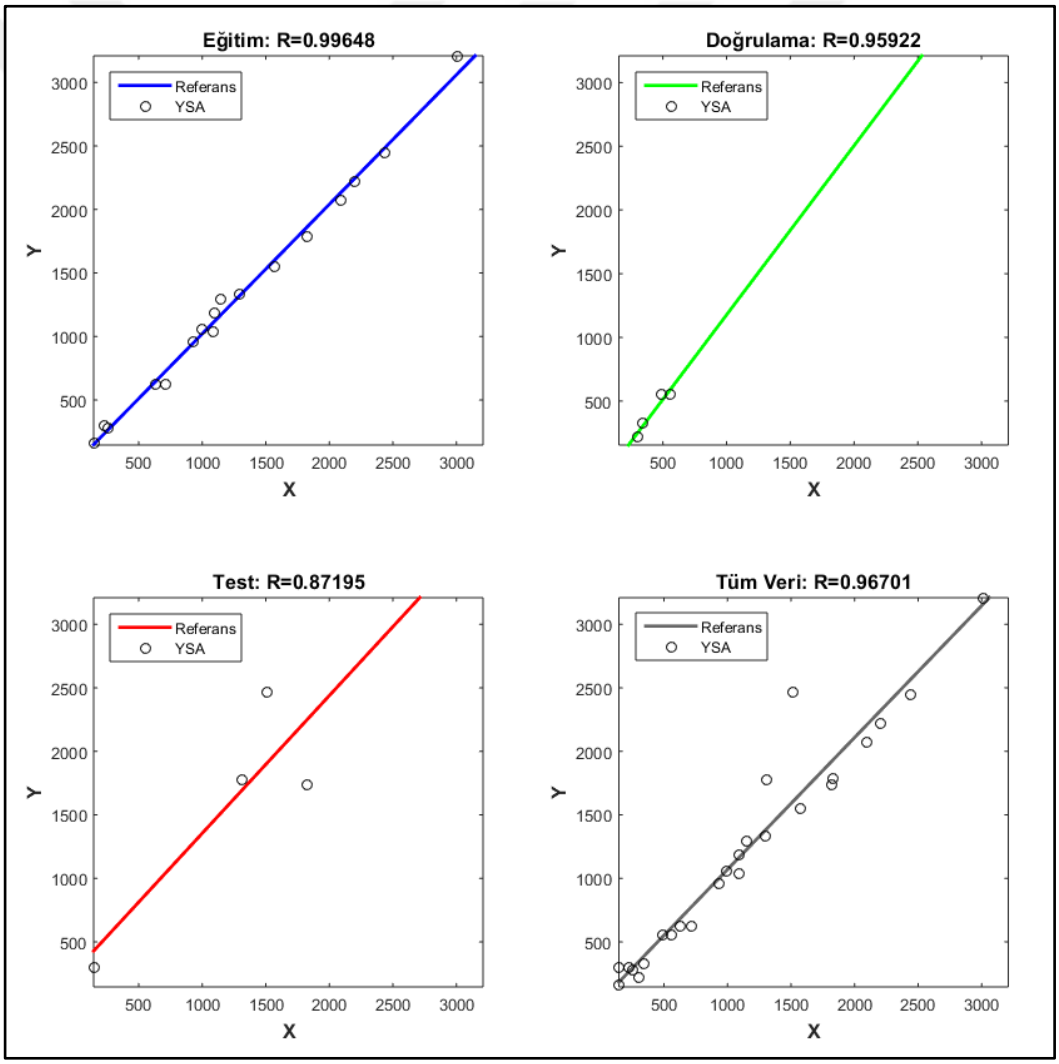
Şekil 3. 8. YSA' nın Scaled Conjugate Gradient algoritması ile eğitilmesi

(a) Eğitim, (b) Doğrulama, (c) Test, (d) Hepsi

Şekil 3.8 (a) da toplam verinin %70' i kullanılarak Scaled Conjugate Gradient algoritması ile ağ eğitilmiş ve eğitim sonucunda % 94' lük bir başarım elde edilmiştir. Daha sonra, eğitilmiş olan bu ağa toplam verinin % 15'ini oluşturan doğrulama verileri uygulanarak ağ tarafından geliştirilmiş olan modelin başarımı Şekil 3.8 (b) de görüldüğü gibi % 72 olarak bulunmuştur. Şekil 3.8 (c) de ise toplam verinin % 15' i test verisi olarak uygulanmıştır ve % 88' lik başarı elde edilmiştir. Son olarak deneysel

verilerin tamamı uygulandığında YSA ‘ nın modelleme başarımı şekil 3.8 (d) de görüldüğü gibi % 87 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.9’da Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilmiş YSA sonuçları paylaşılmıştır. Grafiklerde X ekseni, akım taşıma kapasiteleridir ve hedeflenen gerçek verilerdir. Y ekseni ise YSA’nın Levenberg-Marquardt algoritması ile ürettiği sonuçlardır. Referans yani Şekil 3.9 (a)’da mavi, (b)’de yeşil, (c)’de kırmızı ve (d)’de gri renkli olan doğrusal çizgiler ideal sonuçları temsil etmektedir.



Şekil 3. 9. YSA’nın Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilmesi

(a) Eğitim, (b) Doğrulama, (c) Test, (d) Hepsi

Şekil 3.9 (a)'da toplam verinin %70'i kullanılarak Levenberg-Marquardt algoritması ile ağ eğitilmiş ve eğitim sonucunda % 99'luk bir başarım elde edilmiştir. Daha sonra, eğitilmiş olan bu ağa toplam verinin % 15'ini oluşturan doğrulama verileri uygulanarak ağ tarafından geliştirilmiş olan modelin başarımı Şekil 3.9 (b)'de görüldüğü gibi % 95 olarak bulunmuştur. Şekil 3.9 (c)'de ise toplam verinin % 15'i test verisi olarak uygulanmıştır ve % 87'lik başarı elde edilmiştir. Son olarak deneysel verilerin tamamı uygulandığında YSA ' nın modelleme başarımı şekil 3.9 (d)'de görüldüğü gibi % 96 olarak bulunmuştur.

Benzetim sonuçları mukayese edildiğinde Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilen YSA'nın, Scaled Conjugate Gradient tabanlı YSA' ya göre daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, Levenberg-Marquardt algoritması ile optimal modelleme süresi 500 ms iken bu süre Scaled Conjugate Gradient algoritması için 5 s olarak ölçülmüştür.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA SONUÇ VE ÖNERİLER

İletim hatlarında bulunan iletkenler sarkma, titreşim direnci, iletkenlik, çalışma sıcaklığı, korozyon ve mukavemet gibi birçok iç ve dış etken altında çalışmalarını sürdürmektedir. Belirtilen etkenlerin bazıları elektriksel özellikleri bazıları ise mekanik özellikleri nedeniyle iletkenlerin kullanımını ve performanslarını etkilemektedir. İletkenlik malzemenin kendine has bir özelliği olması nedeniyle kullanılan malzemenin türü genellikle bakır veya alüminyum olarak tercih edilmektedir. Bakırın iletkenliği alüminyuma göre daha yüksek olmasına rağmen ekonomik nedenlerden dolayı daha az kullanılmaktadır. İletkenlerde enerji taşınması ile ısınmalar gerçekleşmekte ve sonuç olarak sarkmalar meydana gelmektedir. Sarkmaların fazla olmasını engellemek amacıyla direkler arası mesafe azaltılmaktadır ki bu da ilk kurulum maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen HTLS iletkenlerinden birisi olan ACSS/Wabash/TW iletkeni ile mevcutta kullanılan ACSR Drake/RW teline daha güçlü bir alternatif üretilmiştir. İlk olarak iletkendeki çelik teller ekstra güçlendirilerek ACSR tellere göre daha dayanıklı hale getirilmiş ve böylece sarkma miktarlarının azalması sağlanmıştır. Sarkma miktarının azalmasının bir sonucu olarak da direkler arası mesafeler uzatılabilmektedir. Alüminyum teller üzerinde gerçekleştirilen bir diğer iyileştirme ise şekilsel olarak yuvarlak yerine trapez olarak üretilmeleri olmuştur. Trapez şekilli üretim sayesinde bükümden sonra boşluksuz bir yapı elde edilerek toplam alüminyum kesit alanı artırılmıştır. Üçüncü iyileştirme olarak alüminyum trapez tellere uygulanan tavlama işlemi ile tellerin iletkenliği ve sünekliği geliştirilmiştir. İletkenliğin % 61,2 IACS' den % 63 IACS seviyesine yükseltilmesiyle akım ve güç taşıma kapasiteleri artırılmıştır. Sünekliğin iyileştirilmesi sonucunda ise telin yüksek

sıcaklıklarda ve mekanik yük durumlarında ekstra güçlendirilmiş çeliğin mukavemet değerlerine kadar kopmadan çalışmasını sürdürebilmesi sağlanmıştır. Yine bu iyileştirme sayesinde iletken soğuduğunda bile sarkma miktarının alüminyumdaki uzun sünmeden etkilenmemesi sağlanmıştır.

ACSR Drake/RW iletkeni genel olarak 100 ℃'nin altındaki sıcaklıklarda çalışabilmekte iken bu tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan ACSS/Wabash/TW iletkeni mekanik özelliklere zarar vermeden 250 ℃'ye kadar sıcaklıklarda çalışabilmektedir. Hem yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi hem de üretimden kaynaklanan avantajlarından dolayı akım taşıma kapasiteleri açısından geliştirilmiş olan Wabash iletkeninin Drake iletkenine göre 600 A daha yüksek akım taşıma kapasitesi sunduğu görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalarda ve benzetimlerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde mevcut ACSR iletkenlerinin ACSS iletkenleri ile değiştirilmesinin birçok yönden önemli avantajlar sağlayacağı görülmüştür. Bununla birlikte, ACSS iletkenlerde hem çelik hem de alüminyum tellerin ilk üretim maliyetlerinin ek üretim prosesleri içerdikleri için geleneksel yöntemlerle üretilen ACSR tellere göre daha fazla olacağı görülmüştür.

MATLAB programında yapay sinir ağları ile benzetimi yapılarak öğrenmesi sağlanan akım taşıma kapasitelerinde kullanılan algoritmalardan Levenberg-Marquardt algoritması ile öğrenme tüm veriler için daha başarılı olmuştur. Ayrıca çözümleme süreleri açısından da yine Levenberg-Marquardt algoritması daha çok daha hızlıdır.

Bu tez çalışmasının devamı olarak daha sonraki çalışmalarda öncelikle ACSS/TW iletkenlerinin 250 ℃'nin üzerindeki performansları analiz edilecektir. Bu çalışmalar esnasında ayrıca havai iletim hatlarını oluşturan ekipmanlar arasında yer alan bağlantı elemanlarının daha yüksek sıcaklıklara dayanabilecek ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek şekilde geliştirilmesi üzerine çalışmalar da yapılacaktır.

KAYNAKÇA

1. Enerji sistemleri. (Web sayfası: **ee.tek.f.rat.edu.tr/sites/ee.tek.firat.edu.tr/files/enerji%20sistemleri%20ders%20notu.pdf**) , (Erişim tarihi: Eylül 2021).

2. Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş. Enerji kabloları ürün kataloğu. (Web sayfası: **kablo.hascelik.com.tr/online-katalog/?sef_link=online-katalog.**), (Erişim tarihi: Eylül 2017).

3. Enerji iletim hatları. (Web sayfası: **https://www.elektrikport.com/makale-detay/enerji-iletim-hatlari-1-bolum/4176#ad-image-0.**), (Erişim tarihi: Eylül 2015).

4. Noor B., A.M.A., 2018. An investigation of temperature and wind impact on ACSR transmission line sag and tension. **Engineering, Technology & Applied Science Research, 8**: 3009-3012.

5. Kul, M., ,Uyaroğlu, Y., Ayasun, S., Vatansever, F., Eminoğlu, U., İmal, N., 2013. Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı. Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 200 s.

6. TEİAŞ, 2005. Çelik Özlü Alüminyum İletkenler Tip Teknik Şartnamesi. TEİAŞ, Türkiye.

7. Rashmi, Shivashankar, G. S., Poornima,, 2017. Overview of different overhead transmission line conductors. **Materials Today: Proceedings, 4**: 11318-11324.

8. Sheshagiri, M., Ram, V. S., 2016. Enhancement of power transfer capability of transmission lines using HTLS conductor. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 5**: 9225-9231.

9. Karabay, S., 2009. ACSS/TW aerial high-temperature bare conductors as a remedy for increasing transmission line capacity and determination of processing parameters for manufacturing. **Materials & Design, 30**: 816-825.

10. Kumar M., R.R., 2018. Enhancement of power transfer capability of transmisson line using HTLS conductor. **International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 4**: 81-89.

11. Thrash, F.R., 1999. ACSS TW - an improved conductor for upgrading existing lines or new construction, in 1999 Ieee Transmission and Distribution Conference, 852-857.

12. Reddy, B.S., Chatterjee, D., 2016. Analysis of high temperature low sag conductors used for high voltage transmission, in 5th International Conference on Advances in Energy Research (Icaer) 2015, 179-184.

13. TEİAŞ, 2018. Özel İletkenler Teknik Şartnamesi, TEİAŞ, Türkiye.

14. Giannini, L., 2017. Live working on ACSS conductors, in 2017 12th International Conference on Live Maintenance (Icolim).

15. Southwire. ACSS/TW. 2014. (Web sayfası: **www.southwire.com.**), (Erişim tarihi: Eylül 2021).

16. ASTM, 2014. Standard Specification for Shaped Wire Compact Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Coated-Steel Supported (ACSS/TW) - B857 - 14, US.

17. Gentry, B.C., 1993. Overhead transmisson conductor. Southwire Company, US.

18. Kopsidas, K., Rowland, S. M., Boumecid, B., 2012. A holistic method for conductor ampacity and sag computation on an OHL structure. **IEEE Transactions on Power Delivery, 27**: 1047-1054.

19. Zhang, M., Xu, J., Zhao, G., Hao, G., 2018. Enhanced heat transfer characteristics and ampacty analysis of a high-voltage overhead transmisson line under aeolian vibration. **The Institution of Engineering and Technology, 12**: 2918-2925.

20. Silva, A.A.P., Bezerra, J. M. B., 2012. Applicability and limitations of ampacity models for HTLS conductors. **Electric Power Systems Research, 93**: 61-66.

21. Alawar, A., Bosze, E. J., Nutt, S. R., 2005. A composite core conductor for low sag at high temperatures. **IEEE Transactions on Power Delivery, 20** : 2193-2199.

22. Milli Eğitim Bakanlığı, 2011. Havai Enerji Hatları, Ankara.

23. Goldworthy, W.B., Korzeniowski G., 2006. Gift Technologies, Composite Reinforced Electrical Transmisson Conductor, US.

24. Kumar M., R.R., 2018. Comparative analysis of ACSR and HTLS conductor. **International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering, 4** : 29-35.

25. D.A., D., 2004. Practical applications of high-temperature low sag transmission conductors. Technical Report Power Delivery Consultants.

26. Alwar A., B.E.J., Nutt S. R., A composite core conductor for low sag at high temperatures.

27. IEEE, 2013. IEEE Standard for Calculating The Current- Temperature of Bare Overhead Conductors.

28. Taylor S. C., H.H.E., 1956. Emissivity and its effects on the current carrying capacity of stranded aluminium conductors. **AIEE Transactions, 75** : 970-976.

29. Douglass D. A., 1986. Radial and axial temperature gradients in bare stranded conductors IEEE Transactions on Power Delivery, 1: 7-15.

30. Morgan, V.T., 1990. The radial temperature distribution and effective radial thermal conductivity in bare solid an stranded conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery, 5**: 1443-1452.

31. Black W. Z., C.S.S., Hall J. F., 1998. Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery, 3**: 707-715.

32. Gorur R., O.R., 2009. Characterization of composite cores for high temperature-low sag conductors, in Final Project Report.

33. Harvey J. R., 1969. Creep of transmission line conductor. **IEEE Transactions Power Apply and Systems, 88**(11) : 1690-1695.

34. Roest C. A., 1969. Creep studies of aluminum conductor alloys. **IEEE Transactions Power Apply and Systems, 88**(4) : 281-286.

35. Brandbury J., D.P., Orawski G., Pickup K. H., 1975. Long term creep assessment for over head line conductors. **Proceedings of the IEEE, 122**: 1146-1152.

36. Pohlman H., T.R., 1993. Sag increase resulting from conductor creep on medium voltage transmission line and the problem of measuring sag on live overhead lines, 12th International Conference on Electrical Distribution.

37. Harvey J. R., L.R.E., 1970. Use of elevated-temperature creep data in sag-tension calculation. **IEEE Transactions Power Apply and Systems, 89**(3): 380-386.

38. Gerald, 2012. White paper electric energy challenges of the future project, in Technical Report.

39. Munaswamy, K., Haldar, A., 2000. Self-damping measurements of conductors with circular and trapezoidal wires. **IEEE Transactions on Power Delivery, 15**: 604-609.

40. Zhao, G.Q., Wang, J. Y., Hao, W. F., Luo, Y., Guo, G. P., 2017. Creep life evaluation of aluminum conductor composite core utilized in high voltage electric transmission. **Polymer Testing, 63**: 573-581.

41. Nahman, J., Tanaskovic, M., 2002. Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method. **Electric Power Systems Research, 61**: 109-117.

42. Reddy, S.B., Chatterjee, D., 2016. Performance evaluation of high temperature high current conductors. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23**: 1570-1579.

43. Chen, S.L., Black, W. Z., Fancher, M. L., 2003. High-temperature sag model for overhead conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery, 18**: 183-188.

44. Luhlanga, L.P., 2015. Round Wires Versus Trapezoidal Wires in ACSR and ACSS Overhead Power Transmission Conductors, in Electrical Engineering. University of Kwazulu Natal. p. 85.

45. Mbuli, N., Xezile, R., Motsoeneng, L., Ntuli, M., Pretorius, J. H., 2019. A literature review on capacity uprate of transmission lines: 2008 to 2018. **Electric Power Systems Research, 170**: 215-221.

46. ASTM, 2018. Standard Specificaiton for Shaped Wire Compact Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Steel-Reinforced (ACSR/TW) - B779-18, US.

47. ASTM, 2018. Standard Specification for Concentric-Lay-Stranded Aluminum Conductors, Coated Steel Supported (ACSS) - B856 - 18, US.

48. ASTM, 2004. Standard Specification for Aluminum 1350 Round Wire, Annealed and Intermediate Tempers for Electrical Purposes - B609, US.

49. ASTM, 2016. Standard Specification for Extra-High-Strength and Ultra-High-Strength Zinc-Coated (Galvanized) Steel Core Wire for Overhead Electrical Conductors - B957/B957M - 16, US.

50. Çekme Kopma Test Cihazı. (Web sayfası: **http://www.kutlultd.com.tr/files/laboratuar/L07s.jpg.**), (Erişim tarihi: Eylül 2021).

51. IEC, 2021. Overhead Electrical Conductors - Calculation Methods For Stranded Bare Conductors, in IEC TR 61597.

52. Hava Hattı İletkenleri - Çinko Kaplanmış Çelik Teller, TS EN 50189. 2002.

53. Hava Hattı İletkenleri, TS EN 50182.

54. Bulucu U., Kavas A., 2007. Kablosuz ağ kapsaması için YSA(yapay sinir ağ) modeli kullanılarak propagasyon kayıplarının hesaplanması, İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu, 2007, EMO.

55. Özkaya N., Sağıroğlu Ş., 2008. Parmak izinden yüz tanıma, **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23**(4) ; 785 – 793.

56. Okkan U., Serbes Z. A., Gedik N., 2017. MATLAB Levenberg-Marquardt algoritması tabanlı YSA uygulaması: Aylık yağış-akış modellemesi, **Dicle Üniversitesi Mühendilik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 9**(1) : 351-362.

57. Özbayrak A., 2019. Deprem etkisi altındaki betonarme kirişsiz plak döşemelerin eğilme momentlerinin YSA analizi ile tahmin edilmesi, **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8**(2) : 979 -991.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Murat GÜREK

Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	**Kurum**	**Mezuniyet Tarihi**
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği	2011
Lise	Nuh Mehmet Baldöktü Anadolu Lisesi, Kayseri	2003

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görev**
2012-Halen	Hasçelik Kablo San. Tic. A.Ş.	Kalite Kontrol Mühendisi, Satış Mühendisi, Ar-Ge Müdürü