HAFİFLETİLMİŞ KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE TESTLERLE DOĞRULANMASI

KUTTYKYZ KURBANBAYEVA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİFLETİLMİŞ KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE TESTLERLE DOĞRULANMASI

Kuttykyz KURBANBAYEVA
0000-0009-2624-1447

Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HAFİFLETİLMİŞ KOMPOZİT ENERJİ DİREKLERİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU VE TESTLERLE DOĞRULANMASI

Kuttykyz KURBANBAYEVA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

Bu tez, hafifleştirilmiş kompozit enerji direklerinin tasarımı, modellemesi, simülasyonu ve testlerle doğrulanması konusunu ele almaktadır. Günümüzde enerji direkleri, elektrik enerjisi iletim hatlarının taşınmasında kritik bir role sahiptir. Ancak, mevcut enerji direklerinin ağırlığı ve maliyeti gibi faktörler, iletim hatlarının performansını ve verimliliğini etkileyebilir. Bu nedenle, hafifleştirilmiş kompozit malzemelerin kullanımı, enerji direklerinin geliştirilmesinde potansiyel bir çözüm sunmaktadır.

Modelleme ve simülasyon adımında, hafifleştirilmiş kompozit enerji direkleri için analitik veya sayısal yöntemler kullanılarak modellenir. Bu adımda, malzeme özellikleri, yük koşulları ve diğer parametreler dikkate alınarak, direğin gerilme, deformasyon ve davranışı simüle edilir.

Bu tez, test edilen enerji direğin sonlu eleman modelin oluşturulmasını içermektedir. Elde ettiğimiz sonlu elemanlar sonuçları ile test edilen direk sonuçları doğrulanmaktadır. Elde ettiğimiz sonlu elemanlar modeli iki farklı optimizasyon yöntemleri kullanarak geometrik parametrelerinin optimize edilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın ana amacı direk ağırlığının azaltması, dolaysıyla maliyetinin düşürülmesidir. Yukarıda bahsedilen optimizasyon sistemi, sadece geometrik parametrelere sınırlama olmadan sonlu eleman modelinde, diğer parametreleri de (örneğin, malzeme, yükler, mesh boyutları vs.) optimize edilmesine olanak tanır.

Anahtar Kelimeler: Hafifletilmiş enerji direği, kompozit, optimizasyon, simülasyon, slsqp.
2023, viii + 53 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN, MODELLING, SIMULATION AND TEST VALIDATION OF LIGHTWEIGHT COMPOSITE POLE

Kuttykyz KURBANBAYEVA

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

This thesis includes design, modelling, simulation, and accurate evaluation of lightweight composite energy poles by testing. The energy poles have a critical role in the transmission of electrical power transmission cables. However, factors such as the weight and cost of existing energy poles affect their performance and efficiency. Therefore, the use of lightweight composite materials offers a potential solution in the construction of energy poles.

In the modelling and simulation step, the lightweight composite is modelled using analytical or numerical methods for the energy poles. In this step, the stress, deformation and behavior of the pole are simulated, taking into account the material properties, load conditions and other parameters.

This thesis includes the structure of the finite element model of the tested energy pole. The direct results tested with the finite element results we obtained are confirmed.
Two different optimization methods are aimed to optimize the geometry parameters by using the finite element model we have obtained.

The main purpose of this work is the direct reduction of the weight of the energy poles, and therefore the reduction of the total cost. The above-mentioned optimization system allows optimization of other parameters that require it in the finite element model (material, loads, mesh sizes etc.), without limitation to only geometric parameters.

Keywords: Lightweight energy pole, composite, optimization, simulation, slsqp.
2023, viii + 53 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, benimle sabırla ilgilenip her aşamada bana yol göstererek, benimle deneyimli bakış açısı ve önerilerinde bulunan hocam Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ'a teşekkür ederim. Bana tez konusu seçiminde yardımcı olduğunuz ve araştırma hedeflerimi belirlememe rehberlik ettiğiniz için de teşekkür etmek istiyorum.

Tez çalışmam sırasında bana yardımcı olan Mekanik Ana bilim dalı doktora öğrencisi, Aiman TARIQ'a da ve bölüm hocalarına teşekkür etmek istiyorum. Sizin önerileriniz ve katkılarınız, eğitimim ve çalışmamın daha kapsamlı ve nitelikli olmasını sağladı.

Bu tez konusun seçmekte, iş tecrübe ve niteliklerimi arttıran "Vimansys LTD" şirketine, iş arkadaşlarıma da teşekkür etmek istiyorum.

Benden desteklerini esirgemeyen gerek akademik ortamda gerek özel hayatta bana sürekli destek olan dostlarıma ve ayrıca sevgilime saygılarımı sunarım. Sizlerin sürekli moral verici sözleriniz ve inancınız, beni bu tez çalışmasının süreci boyunca motive etti.

Hayatımın her adımında hiçbir zaman desteğin azaltmayan, sen yapabilirsin diye motive eden aileme, özellikle canım anneme Kanum BEISENBAYEVA'ya bu Yüksek Lisans Tezini armağan ediyorum.

Kuttykyz Kurbanbayeva
/ /2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ v
ŞEKİLLER DİZİNİ vii
ÇİZELGELER DİZİNİ viii
1. GİRİŞ 1
1.1. Tez Çalışmanın Amacı 2
2. KURUMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI 4
2.1. Direkler 4
2.2. Kullanım Amacına Göre Direk Çeşitleri 5
2.3. Yapıldıkları Malzemeye Göre Direk Çeşitleri 5
2.4. Direklerin Hesabında Dikkate Alınacak Kuvvetler 8
2.5. Direkler Çeşitlerinin Kaynak Araştırması 9
2.6. Optimizasyon Yöntemin Uygulayarak Yapılan Çalışmalar 13
3. MATERYAL VE YÖNTEM 16
3.1. Kompozit Malzemeler 16
3.1.1 Polimer Kompozitler 17
3.2. Kompozit Malzeme Üretimi 19
3.3. Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması 21
3.3.1. Python Komut Dosyası İle Abaqus Modelin Oluşturma 22
3.3.2. Sınır Şartları ve Yüklerin Uygulanması 25
3.4. Geometrik Optimizasyon 27
3.4.1. SciPy Kütüphanesi 28
3.4.1.1. SLSQP Yöntemi 28
3.4.2. Test Edilen Direğin Analitik Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyonu 32
3.4.3. Test Edilen Direğin Sonlu Eleman Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyonu 34
4. BULGULAR 38
4.1. Test Edilen Direğin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları 38
4.2. Test Edilen Direğin Analitik Çözüm Sonuçları 41
4.3. Test Edilen Direğin Sonlu Eleman Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyon Sonuçları.. 45
4.4. Optimizasyon Sonuçların Kullanarak Sonlu Eleman Modelinin Karşılaştırılması 46
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 48
KAYNAKLAR 50
ÖZGEÇMİŞ 53

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
E	Elastisite Modülü
F	Kuvvet
I	Atalet momenti
L	Uzunluk
A	Alan
t	Kalınlık
m	Kütle
m	Kütle [kilogram]
V	Hacim
δ	Deplasman
ρ	Yoğunluk
υ	Poisson oranı
r_0	Yarıçapı

Kısaltmalar	**Açıklama**
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
kg	Kilogram
m	Metre
mm	Milimetre
N	Newton
kN	Kilonewton
FTP	Elyaf (Fiber) Takviyeli Polimerler
CFTP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
GFTP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
SOSS	Yapısal Optimizasyon Yazılım Sistemi
CAD	Bilgisayar Tabanlı Tasarım
CAE	Bilgisayar Tabanlı Analiz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Fiber takviyeli kompozit direk 4
Şekil 2.2. Ağaç direkler 6
Şekil 2.3. Beton direkler 7
Şekil 2.4. Demir direk çeşitleri 8
Şekil 3.1. Kompozit malzeme 16
Şekil 3.1.1. Fiber yönlerdirme açısı 18
Şekil 3.2. Pultrüzyon düzeneği ve yöntemi 19
Şekil 3.3. Direk kesiti geometrisi AutoCAD'de çizilmiştir 21
Şekil 3.4. Abaqus Python komut dosyası 22
Şekil 3.5. Abaqus Python modülünün içe aktarılması 23
Şekil 3.6. Python ile Abaqus modelinin oluşturulması 23
Şekil 3.7. Python ile malzeme ve alan tanımlaması 24
Şekil 3.8. Mesh satırlarının belirlenmesi 24
Şekil 3.9. Sınırlarının ve yüklerin belirlenmesi 24
Şekil 3.10. Python ile Abaqus modelinin geometrik ve malzeme özelliklerinin oluşturulması 25
Şekil 3.11. Direk şekli ve test kurulumu 26
Şekil 3.12. Direğin teste hazırlanma şekli 26
Şekil 3.13. Sonlu elemanlar modelinin yükleme ve sınır koşulları 27
Şekil 3.14. Sonlu elemanlar yönteminin mantıksal akış şeması 34
Şekil 4.1. Test edilen direk sonucu 38
Şekil 4.2. Test edilen GFTP direği 39
Şekil 4.3. Test edilen direğin yük uygulama aşaması 39
Şekil 4.4. Sonlu elemanlar analizleri sonucu 40
Şekil 4.5. Sonlu elemanlar direk modeli deplasman sonucu 40
Şekil 4.6. Test edilen direk ve sonlu elemanlar direk sonuçlarının doğrulanması ... 41
Şekil 4.7. SLSQP yöntemin kullanarak optimizasyon sonuçları 43
Şekil 4.8. Sonlu elemanlar yöntemin kullanarak optimizasyon sonuçları 45
Şekil 4.9. Analitik çözüm sonucu 47
Şekil 4.10. Sonlu elemanlar çözüm sonucu 47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Takviye edici elyafların özellikleri..... 17
Çizelge 3.2. Elyaflı kompozitlerinin özellikleri 18
Çizelge 3.3. Direğin geometrik ve malzeme bilgileri 22
Çizelge 4.1. Test edilen ve sonlu elemanlar direklerinin sonuçlarının doğrulanması 41
Çizelge 5.1. Elektrik direklerinnin sonuçlarının doğrulanması..... 48
Çizelge 5.2. Analitik çözüm ve optimum parametreleri kullanarak direkler sonuçlarının karşılaştırılması 48
Çizelge 5.3. Analitik çözüm ile sonlu elemanlar çözüm kullanarak direklerinin sonuçlarının karşılaştırılması 49

1. GİRİŞ

Bu bölümde elektrik direklerine genel bilgi verilip ve bu tez çalışmasının amacının özetleri yer almaktadır.

Enerji iletim hatları, elektrik enerjisinin nüfus yoğunluğu yüksek alanlardan taşınmasını sağlayan önemli altyapı elemanlarıdır. Geleneksel olarak, çelik veya beton direkler kullanılarak inşa edilen enerji iletim hatları, yüksek maliyet, ağırlık ve karmaşık montaj süreçleri gibi bazı dezavantajlarla karşılaşmaktadır. Türkiye'de toplam direk sayısı 220.000'den fazladır (Bozkurt, 2019). Son yıllarda işletmeye alınan, enerji iletim hatlarında kullanılan, yeni direk tiplerinin yapıları ve malzemeleri önceki yıllarda temin edilen enerji iletim hatlarındaki direkler, yapı ve malzeme kalitelerine göre daha yüksek oldukları bilinmektedir (Bozkurt, 2019).

Türkiye'de elektrik iletim sisteminde kullanılan direklerin çoğunluğu şiddetli hava koşulları neticesinde ve her seneye göre şiddetin artma eğilimi göstermesi sebebiyle elektrik iletim sisteminde kullanılan direklerin üretim malzemesinin değişmesi söz konusudur. Elektrik dağıtım ve iletim sistemleri kritik altyapı sektörlerine bir örnektir. Elektrik ve telekomünikasyon altyapıları (yani kuleler, direkler ve H-çerçeveler iskeleler) genellikle çelik, beton veya ahşap malzemelerden yapılır. Bu geleneksel malzemelerin, özellikle çevresel koşullar altındaki dirençleri ile ilgili birçok eksikliği vardır (Mohamed ve Benmokrane, 2019). Hizmette kalmaları için sık sık zehirli kimyasallarla muamele edilmeleri gerektirmektedir. Beton direkler ahşap direklere göre daha dayanıklıdır ancak en büyük dezavantajı ağır olmalarıdır bu da özellikle sert arazilerde nakliye ve montaj maliyetlerini arttırmaktadır. Ayrıca çelik donatıların korozyona uğraması beton direklerin ana sakıncalarından biridir. Çelik direkler beton direklere göre çok daha hafif olmasına rağmen beton ve ahşap direklere göre oldukça pahalıdır. Ayrıca korozyona karşı koruma için boyanmaları veya galvaniz işlemi gerekirken, uzun süreli bir koruma garanti edilmez.

Tasarım ve geliştirme ile uğraşan bir tasarım mühendisi genellikle tamamen yeni yapılar tasarlamak zorundadır. Belirli bir tasarım görevi için yük ve mesnet koşulları genellikle

önceden bilinir, ancak tasarımcı gerçek yapının nasıl görünmesi gerektiğinden emin değildir (Özkal, 2006). Yapısal optimizasyon, mühendislik tasarımlarında önemli bir rol oynar. Bu yöntem, yapıların performansını artırırken malzeme kullanımını optimize etmek, enerji ve maliyet tasarrufu sağlamak, üretim süreçlerini iyileştirmek ve daha sürdürülebilir yapılar tasarlamak için kullanılır. Ancak, yapının gerçek dünya koşullarında karşılaşabileceği diğer faktörleri (örneğin, titreşim, darbe, termal etkiler) dikkate almak da önemlidir. Bu nedenle, yapısal optimizasyon, mühendislik deneyimi ve sağlam analiz yöntemlerine dayanan çok disiplinli bir yaklaşım gerektirmektedir.

Yapısal optimizasyon, bilgisayar tabanlı tasarım (CAD) ve analiz (CAE) araçlarıyla desteklenir. Bu araçlar, karmaşık matematiksel algoritmalar kullanarak yapıyı analiz eder, malzeme özelliklerini, yükleri, sınırlamaları ve diğer tasarım parametrelerini dikkate alır. Analiz sonuçlarına dayanarak, en iyi yapısal konfigürasyonu belirlemek için optimize edilmiş bir tasarım elde edilir. Yapısal optimizasyon, otomotiv, havacılık, yapısal mühendislik, enerji sektörü ve daha birçok alanda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde, mühendisler daha iyi performansa sahip, daha hafif, daha güvenli ve daha sürdürülebilir yapılar tasarlayabilirler. Ancak, yapısal optimizasyon sürecinde, doğru giriş parametrelerinin seçimi, modelin doğruluğu ve gerçek yükler ve sınır koşullarının dikkate alınması gibi faktörlere önem verilmesi gerekmektedir.

1.1. Tez Çalışmanın Amacı

Sık sık yaşanan doğal ve insan kaynaklı felaketlerle karşı karşıya kalan mühendisler, çeşitli kritik altyapı sektörlerinde esneklik felsefesini içeren yapıları analiz etmek, tasarlamak ve işletmekle giderek daha fazla görevlendiriliyor.

Fiber Takviyeli Polimer (FTP) direklerin kullanımı, hafif olmaları, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına sahip olmaları, korozyon direnci özellikleri sunmaları, belirli mukavemet ve sapma gereksinimlerini karşılamak üzere uyarlanabilmeleri ve düşük inşaat ve bakım ömrü maliyetlerine sahip olmaları nedeniyle artmaktadır.

Bu tez, test edilen enerji direğin sonlu eleman modelin oluşturulması içermektedir. Elde ettiğimiz sonlu elemanlar sonuçları ile test edilen direk sonuçları doğrulanmaktadır. Elde ettiğimiz sonlu elemanlar modeli iki farklı optimizasyon yöntemleri kullanarak geometri parametrelerin optimize etmek hedeflenmiştir. Birinci optimizasyon yönteminde, geometri parametrelerini optimize etmek için basit mesnetli kiriş teorisini kullanarak analitik çözümü yapılmıştır. İkinci optimizasyon yönteminde ise, geometri parametrelerini optimize etmek için Python programlama dili ile oluşturulmuş komut dosyaları Abaqus sonlu elemanlar programında çalıştırarak gerçekleştirilir.

Bu çalışmanın ana amacı direk ağırlığının azaltması, dolayısıyla maliyetinin düşürülmesidir. Yukarıda bahsedilen optimizasyon sistemi, sadece geometrik parametrelere sınırlama olmaksızın sonlu eleman modelinde, gerektiren diğer parametrelere de (örneğin, malzeme, yükler, mesh boyutları vs.) optimize edilmesine olanak tanır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, elektrik direklerin kullanım amacına göre direk çeşitleri malzemeye göre türleri ve bu alanda yapılan kaynak araştırmalarının özetleri yer almaktadır.

İnşaat mühendisliği uygulamalarında fiber takviyeli plastiklerinin (FTP) kullanımı son birkaç yılda hızla arttı. Bu büyüme esas olarak kullanılan liflerin bazı mükemmel özelliklerine, mukavemetine, sertliğine ve düşük ağırlığına katkıda bulunmaktadır. FTP'nin tasarım kabiliyetindeki esnekliği, imalat ve nakliye kolaylığı ve korozyon direnci ile birleşen üstün özellikleri, onları 21. yüzyıl malzemesi olarak ayırdı.



Şekil 2.1. Fiber takviyeli kompozit direk
https://www.rspoles.com/testimonials/teco

2.1. Direkler

İletim ve dağıtım hatlarında kullanılan, iletkenleri havada belirli bir mesafede tutmak için tasarlanmış, hat boyunca uygun mesafe ve yükseklikte yerleştirilmiş şebeke ekipmanlarına direk denir.

2.2. Kullanım Amacına Göre Direk Çeşitleri:

Taşıyıcı Direkler (T):

İletkenin yalıtkana taşıyıcı bantla bağlandığı düz bir iletkeni desteklemeye yarayan direğe taşıyıcı direk denir. (Köknar, 2010)

Köşede Taşıyıcı Direkler (KT):

Hattın büyük bir açıyla (veya küçük bir açıyla) kesildiği ve iletkenlerin bir kiriş bağlantısında yalıtım yoluyla bağlandığı yerlerde kullanılan direklere köşe kiriş direkleri denir. (Köknar, 2010)

Normal Durdurucu Direkler (D):

Güzergâh boyunca belirli aralıklarla, taşıyıcı direklere asılan ve taşıyıcı direkler tarafından taşınan hat iletkenleri sabitlenmeli ve gerdirilmelidir. Tel kopması, direk devrilme vs. bu tip sorunlar sadece iki durdurucu tipi direk arasında (durdurucu, köşede durdurucu ve nihayet direklerin hepsi durdurucu tip direklerdir) meydana gelir ve hava hattın diğer bileşenlerini etkilemez. Bu nedenle düz hatlarda ve iletken yalıtkanların son bir bağ ile bağlandığı yerlerde kullanılan direklere durdurucu direk adı verilir. (Köknar, 2010)

Köşede Durdurucu Direkler (KD):

Hattın dar bir açıyla (veya geniş bir açıyla) kesildiği ve iletkenin sonunda yalıtkanla birleştiği yerde kullanılan bir direğe köşe durdurma direği denir. Ancak, koşullardan biri taşıyıcı olarak geçmek için iyi bir köşe durdurucu olmasıysa, bu tür dönüşlerde bir köşe durdurucu çubuk kullanılır. (Köknar, 2010)

Nihayet Direkleri (N):

Bir havai hattın başında ve sonunda, ayrıca iletkenlerin gerildiği veya yalıtkanlara bağlandığı noktalarda kullanılan direklerdir.

Branşman Direkleri (B):

Dağıtım hattı kollara ayrıldığında bu lokasyonlarda direkler kullanılmaktadır. Ek olarak, dağıtım için gereken ekstra birleştirme ekipmanına ve ayırıcılara/kesicilere sahip olabilirler.

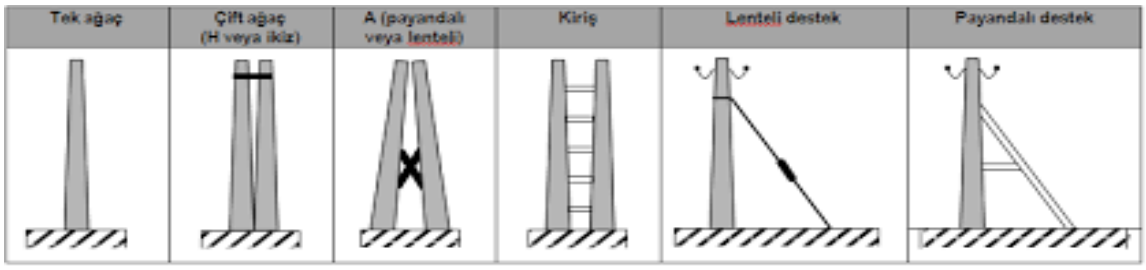
2.3. Yapıldıkları Malzemeye Göre Direk Çeşitleri:

1. Ağaç Direkler
2. Beton Direkler
    1. Vibre beton (VBA) direkler
    2. Santrifüj betonarme (SBA) direkler
3. Demir Direkler
    1. Boyalı-kaynaklı demir direkler
    2. Galvaniz-cıvatalı demir direkler

Ağaç Direkler:

Köknar, çam, ardıç ve karaçam gibi sert ağaçlardan yapılmış direklerdir. Hava şartlarından ve böceklerden kötü etkilendikleri için özel işlemlerden geçerler. Yağmur ve kar sularından az da olsa zarar görmemesi için direğin tepesi 45 derecelik açıyla kesilmektedir.

- Tek ağaç
- Çift ağaç (H veya ikiz)
- A (payandalı veya lenteli)
- Kiriş
- Lenteli destek
- Payandalı destek



Şekil 2.2. Ağaç direkler

Beton Direkler:

Yüksek mukavemetli çelik tel veya çelik çubuklar kullanılarak, doğru miktarlarda çimento, su ve katkı maddelerinin birleştirilmesiyle yapılan beton oluşturulur. Beton ve

çelik malzemelerin gözeneksiz uyumu santrifüj veya vibrasyon yöntemleri ile sağlanır. Betonarme direkler bu yöntem kullanılarak yapılan direklere verilen isimdir.

Beton direkler maksimum dayanımlarına göre ağırlıkları 250 kg ile 3500 kg arasında değişebilmektedir. 8 m ila 26 m uzunluğunda ve 50 cm çapında koniktir; bu çaptan sonra silindiriktir.

İki şekilde üretimleri gerçekleştirilmektedir:

- Vibre Direkler
- Santrifüj Direkler



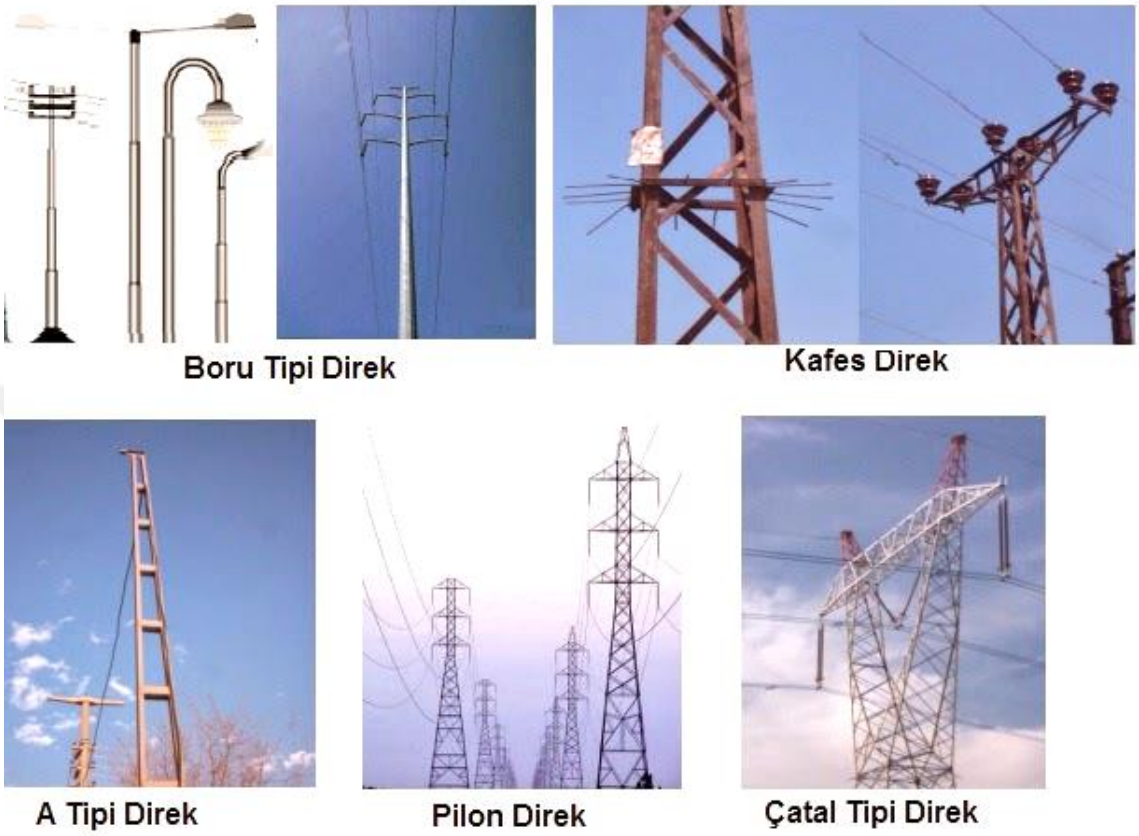
Şekil 2.3. Beton direkler

Demir Direkler:

Çeşitli gerilim derecelerinde kullanılabilen, demir çelikten yapılmış direklerdir. Çelik direkler boyalı kaynak (ortak ve alçak gerilim için A ve kafes direkler) ve galvaniz saplama (yüksek gerilim ve kimyasal saldırıya maruz kalan yerlerde kullanılır) olarak imal edilmektedir. Yapılarında I, U, L şekillerinde profiller kullanılır.

Demir direkler genelde üç çeşittir:

- Boru direkler
- A ve kafes direkler
- Putrel (pilon, çatal) direkler.



Şekil 2.4. Demir direk çeşitleri

2.4. Direklerin Hesabında Dikkate Alınacak Kuvvetler

Genelde direk hesabı yapılırken yatay ve düşey kuvvetler önemlidir.

Düşey kuvvetler, şunlardır:

- Direğin kendi ağırlığı,
- Konsol (travers) ağırlığı,
- Donanımlar ve izolatör ağırlığı,
- Donanımlar ve ek malzeme ağırlığı,
- En az 80 Kg. montör ağırlığı,
- Koruyucu tel ve iletkenlerin ağırlığı.
- Koruyucu telinde ve iletkenlerde oluşan kar ve buz yüklerinin ağırlıkları.

Yatay kuvvetleri ise şu şekilde sıralayabiliriz:

- İletkenlerle nötr ve koruma tellerinin çekme kuvvetleri,

İletkenler, nötr ve koruyucu iletkenler, konsollar, izolatörler ve direkler üzerine etkiyen rüzgâr kuvvetleri.

Bildiğimiz gibi iletkenlerin çekme ve rüzgâr kuvvetleri direğe yatay olarak etki etmektedir. Direğin tepe gücü bu faktörleri dikkate alınarak hesaplanır. Direklerin tepe gücü, rüzgâr ve rüzgâr olmayan tepe gücüne bölünmüştür. Bir direğin tepe kuvveti, rüzgarın olmadığı durumda dayanabileceği maksimum kuvvettir ve genellikle -50°C'de buz yüklü olarak hesaplanır. Tepe rüzgâr kuvveti ise rüzgarın etkisi altında direğin dayanabileceği maksimum kuvvettir ve genellikle +5°C'de hesaplanır.

Durdurucu direk tepe kuvveti,

$$P_t = \frac{S.\delta_{max}.n.h_o}{h_d} \quad \text{(Kg)}, \tag{2.1}$$

denklem 2.1 ile bulunur.

P_t = Direk tepe kuvveti (Kg)

S = İletken kesiti (mm^2)

δ_{max} = En büyük çekme kuvveti (Kg/mm^2)

n = Direklerdeki iletken sayısı

h_0 = Ortalama iletken yüksekliği (m)

h_d = Toprak üstü direk boyu (m)

Direğin koruyucu iletkeni veya nötr iletkeni varsa, o iletkenin direk üzerinde oluşturduğu tepe kuvveti hesaplamalara eklenmelidir.

2.5. Direk Çeşitlerinin Kaynak Araştırması

Elyaf Takviyeli Polimerler, metaller gibi geleneksel malzemelere göre hafiflik avantajları nedeniyle askeri uçaklarda ve cihazlarda kullanılmaya başlandı. 1940'larda endüstriyel tasarımdaki ilk uygulamalarından bu yana uzun bir geçmişe sahiptir (Ballinger 1990). Modern zamanlarda bu teknoloji, dayanıklılığının farklı endüstri türlerini kapsayan birçok uygulamada oldukça değerli olduğu görünmektedir. Birkaç örnek vermek gerekirse, havacılık mühendisliği, otomobil üretimi ve spor malzemeleri

gibi birçok sektörde yaygın kullanıma yol açacak şekilde önemli ölçüde geliştirilmiştir. Üretim verimliliği oranlarını iyileştiren yenilikler sayesinde, FTP'leri eski nesil metalik elemanlara kıyasla günümüzde çok daha uygun hale getirerek önemli fiyat düşüşlerine yol açmıştır. Tarım makineleri, telekomünikasyon yapıları, nakliye ekipmanları ve depolama tankları gibi sektörlerde FTP'nin geniş uygulama olanakları, düşük maliyeti nedeniyle onu cazip bir seçenek haline getiriyor Mohamadi (2016). FTP direklerin kullanımı, hafif olmaları, yüksek mukavemet-ağırlık oranlarına sahip olmaları, korozyon direnci özellikleri sunmaları, belirli mukavemet ve sapma gereksinimlerini karşılamak üzere uyarlanabilmeleri, ayrıca düşük inşaat ve bakım maliyetlerine sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedir.

Fouad ve Mullinax (2000), elektrik dağıtım hatları için fiber takviyeli kompozit direklerin kullanımına genel bir bakış sunmuşlardır. Filament sarımı, pultrüzyon ve santrifüjlü döküm gibi yöntemler kullanılarak FTP direklerinin nasıl üretildiğini tartıştılar. Ayrıca, sahada FTP direklerinin kullanımıyla ilgili bazı hususları delinebilirlik ve kullanışlılık olduğunu belirttiler (Sara, 2016). Şu anda FTP kompozit elektrik direkleri için ulusal standartlar mevcut değildir, ancak yazarlar otoyol tabelalarında ve sokak aydınlatmasında kullanılan FTP kompozit direkleri için ilgili standartları tartışmışlardır. Ayrıca, FTP kompozit direklerin ahşap, çelik ve betona kıyasla avantajlı olması için bir gerekçe sağladılar. Başlıca nedenleri arasında kolay kurulum, yüksek mukavemet, pürüzsüz doku, yüksek elektrik yalıtım özellikleri ve kurulum açısından ekonomik maliyet sayılabilir. Yazarlar, ahşap direklerin aksine, FTP kompozit direklerin yeniden yükleme sırasında sabit sertliğe sahip olduğunu ve nihai mukavemet ve uzun sapma açısından güvenilir olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir deyişle, ahşap direklerle karşılaştırılabilirler ve hatta daha hafif olmanın ek faydasını sağlarlar.

Desai ve Yuan (2006), tarafından Fiber Takviyeli Polimer elektrik direklerinin burkulma ve bükülme davranışını incelemek için yapılan bir çalışmayı özetlemektedir. Bu çalışmada, direklerin uzunluğu boyunca iki parçaya ayrılarak sayısal bir model kullanılmıştır. Ayrıca direklerin bölüm değişkenleri, uzunlukları, kesitlerindeki değişiklikler ve atalet momenti oranları gibi faktörlerin burkulma davranışı üzerindeki

etkileri incelenmiştir. Çalışmada Karbon Elyaf Takviyeli Polimer ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer direkleri kullanılarak farklı konfigürasyonlarda bükülme analizleri gerçekleştirilmiştir. Özellikle, CFTP direklerin üst ve alt bölümleri arasındaki atalet momenti oranının burkulma davranışını etkilediği ve CFTP direklerin GFTP direklere göre daha yüksek burkulma yüklerine dayanabildiği bulunmuştur. Sertlik uzunluk oranının ise uzun direklerin burkulma davranışı üzerinde daha az etkili olduğu görülmüştür. Burkulma analizi için CFTP direklerde sertlik uzunluk oranının bükülme gerilimi üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Ahşap direklerin kompozit malzemelerle güçlendirilmesiyle ilgili olarak, Saafı ve Asa (2010), hasarlı ahşap direklerin servis ömrünü onarmak ve uzatmak için yerinde bir FTP güçlendirme sisteminin fizibilitesini araştırmıştır. FTP güçlendirmesinin yük kapasitesinin %85'ine kadar geri kazandığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, hasarlı direğin sünekliğini geri getirmedi. Dört adımı içeren bir kurulum prosedürü önerdiler: FTP sargısının kalınlığının belirlenmesi, ahşap direğin temizlenmesi, yüzey alanının eski haline getirilmesi ve FTP sargısının direğe tutturulması. Ek olarak, hasarlı direklerin FTP katmanı ile onarılmasının, yeni bir direğin değiştirilmesinden yaklaşık altı kat daha uygun maliyetli olduğu gösterilmiştir (Saafi ve Asa, 2010). Bununla birlikte, FTP kompozit direkleri dikkate değer mekanik, yapısal ve elektriksel özellikler sunduğundan ve elektrik direkleri olarak kullanılmak üzere özel mühendislik gereksinimlerini karşıladığından, elektrik şirketleri FTP'nin faydaları hakkında daha fazla bilgi edindikçe gelecekte bu tür direklerin kullanımının artması beklenmektedir.

Masmoudi ve Metiche (2013), cam elyaf takviyeli polimer direkler için, servis açıklıkları alanının yakınında yerel bir burkulma arıza modunu içeren yeni bir tasarım yöntemi sunmuşlardır. Çeşitli kalınlıklarında içi boş dairesel kesitli direkler üzerinde deneyler yaptılar. Tüm test prototipleri, filament sarma işlemi sırasında tek bir ünitede üretilen üç bölgeden oluşuyordu. Her bölgedeki katman sayısı ve her katmanın lif yönlendirme açısı farklı mekanik özelliklerle sonuçlandı. Tüm prototipler, arızaya kadar eğilme eğilmesinde test edildi. Tasarım yöntemlerinin nihai eğilme momentini, maksimum üst direk sapmasını, nihai uzunlamasına gerilimi ve sıkıştırma gerilimini, direğin tabanında belirli bir (E I / L ρ) oranı ile servis açıklığı seviyesinde öngördüğü

sonucuna vardılar, ρ lifin doğrusal kütlesidir. Tabandaki nihai eğilme momentinin doğrusal lif kütlesi ile ters orantılı olduğu ve direk tabanında belirli bir değer üzerinde (E I / L ρ) bir oran için arıza meydana geldiği sonucuna vardılar.

Sara Mohamadi (2016) tez çalışmasında, FTP direklerinin SE modellerinin geliştirilmesi, bu direklerin tepkisinin daha iyi anlaşılmasını araştırmış. Bu araştırma hem statik hem de dinamik yüklere maruz kalan konik FTP elektrik direklerin sonlu elemanlar analizini sunmaktadır. Araştırma ayrıca, çeşitli kesit ve malzeme özelliklerinin seçilen FTP direklerinin genel yapısal tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için yapılan parametrik çalışmalardan sonuçlar sunmaktadır. Bu özellikler arasında lif yönelimi, koniklik oranı, katman sayısı, lamina kalınlığı ve uygulanan yanal yükün yeri bulundurmaktadır. Bu bilgi, mühendislerin geleneksel malzemeler için güvenilir bir yedek olarak benimsenmesi için FTP direklerine aşina olmalarında rol oynayacaktır.

Mohamed ve ark. (2019) çalışmasında, çekme dayanımı ve hafifliği nedeniyle geleneksel ahşap veya çelik direklere göre bir alternatif olarak kullanılan cam elyaf takviyeli polimer (GFTP) direklerin yan yüklere karşı davranışını araştırmaktadır. Bu direkler, pultrüzyon işlemi ile üretilmektedir ve ayrıca diğer birçok endüstriyel uygulamada da kullanılmaktadır. Çalışma, yan yüklere karşı GFTP direklerin davranışını incelemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, çeşitli direk boyutları ve malzeme özellikleri üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, GFTP direklerin yan yük altında davranışlarının geleneksel ahşap veya çelik direklere benzer olduğunu göstermiştir. Makale ayrıca, GFTP direklerin yan yüklere karşı davranışının, direk boyutu ve malzeme özellikleri gibi faktörlere bağlı olduğunu da belirtmektedir. Bu faktörler, direk tasarımında dikkate alınması gereken önemli parametrelerdir. Sonuç olarak, makale GFTP direklerin yan yük altında davranışlarının, geleneksel ahşap veya çelik direklere benzer olduğunu ve bu direklerin gelecekte elektrik hatları, telekomünikasyon hatları ve diğer endüstriyel uygulamalarda daha sık kullanılması gerektiğini önermektedir.

Hamdy M. Mohamed (2021) çalışmasında, hafif, cam elyaf takviyeli polimer (GFTP), direk yapılarının teorik bir analizini sunmaktadır. GFTP direklerinin statik eğilme davranışını modellemek için doğrusal olmayan bir sayısal analiz gerçekleştirmek için bir sonlu elemanlar (SE) programı kullanılmaktadır. SE analizinin sonuçları, tam ölçekli özdeş GFTP direkleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Fiber oryantasyonunun ve takviye katman sayısının yük taşıma kapasitesi ve sapma davranışı üzerindeki etkisini göstermek için 12 m (40 ft) GFTP direkler üzerinde parametrik bir çalışma yapıldı. Sonuçlar, SE analizi ile deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğunu göstermektedir. Teorik model, bir CTP direğin performansını değerlendirmek ve GFTP direk yapısının yüksekliği boyunca üç farklı bölgede optimum kesit boyutlarını belirlemek için kullanılmaktadır.

2.6. Optimizasyon Yöntemi Uygulayarak Yapılan Çalışmalar

Yapıların bilgisayarlı analizi, 1960'lı yıllarda yapıları sonlu elemanlar olarak adlandırılan çok sayıda parçaya ayıran modeller aracılığıyla yaygınlaştı. Sonlu eleman modellerine dayalı sayısal optimizasyon, 1960'ların başında Schmit ve öğrencileri tarafından başladı (Haftka, 2009). Son yıllarda, bilgisayar bilimi ve optimizasyon algoritmalarındaki ilerlemeler sayesinde büyük veri kümeleri üzerinde çalışabilen ve sonlu elemanlar analizi yapabilen bilgisayarlar alanında ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerlemeler, modelleme araçları, optimizasyon yöntemleri ve kapsamlı hesaplama araçlarını entegre eden ticari yapısal optimizasyon yazılım paketlerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır. Sonlu elemanlar çözücü geliştirildi ve piyasaya sürüldü. Endüstride yapısal tasarım problemlerini çözmek için Nastran, TOSCA, ANSYS, Isight ve Abaqus/CAE optimizasyon yazılım modülü gibi bazı önemli yazılımlar kullanılmaktadır (Choi, 2016).

Yongyan Sun (2019) tezi, mühendislere tasarım optimizasyonu iş akışları oluşturmak için esnek ve özelleştirilebilir bir çerçeve sağlayan Yapısal Optimizasyon Yazılım Sisteminin (SOSS) komut dosyası oluşturma yeteneklerinin ana hatlarını çiziyor. Kullanıcılar, Python veya MATLAB gibi kodlama dillerini kullanarak tasarım değişkenlerini, kısıtlamaları ve hedefleri tanımlayabilir ve alana özgü bilgileri kolayca

optimizasyon sürecine dahil edebilir. Optimizasyonu otomatikleştirerek ve betik oluşturma yeteneklerinden yararlanarak SOSS, birden fazla hedefi ve kısıtlamayı göz önünde bulundurarak verimli ve yüksek performanslı tasarımların oluşturulmasını sağlar. Araştırma, SOSS kullanmanın potansiyel faydalarını vurgular ve yapısal mühendislik optimizasyonunda daha fazla ilerleme için bir temel sağlar. Sonuç olarak tez, Yapısal Optimizasyon Komut Dosyalı Yazılım Sistemi (SOSS) yapı mühendisliği alanındaki etkisi hakkında kapsamlı bir çalışma sunmaktadır.

Mohamed ve Masmoudi'nin (2019) makalesi, Cam Elyaf Takviyeli Polimerden (GFTP) yapılan direk yapılarının Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak tasarım optimizasyonuna odaklanmaktadır. Yazarlar, GFTP direk yapılarını modellemek ve simüle etmek için karmaşık yapıların davranışını analiz etmekte yaygın olarak kullanılan sayısal bir teknik olan Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanışlardır. SEM'ni uygulayarak, farklı yükleme senaryoları altında direklerin yapısal tepkisini, gerilmelerini ve deformasyonlarını analiz etmektedir. Makale, direğin geometrisi, enine kesiti ve malzeme özellikleri dahil olmak üzere tasarım optimizasyon sürecinde dikkate alınan temel parametreleri tartışmaktadır. Çalışma, GFTP direk yapıları için tasarım optimizasyon sürecinin sonuçlarını sunarak sona ermektedir. Ağırlık azaltma, gelişmiş performans ve maliyet etkinliği açısından elde edilen iyileştirmeleri makalede tartışmaktadır. Ayrıca, ek optimizasyon teknikleri keşfetmek ve GFTP direk yapılarının dinamik yükler altındaki davranışını araştırmak için daha fazla araştırma yapma potansiyelinden de bahsetmektedir.

Emilio ve ark. (2017) makalesi, sonlu elemanlar analizi (SEA) sonuçlarının sonradan işlenmesi için Abaqus2Matlab adlı bir aracın faydasını ve etkinliğini tartışmaktadır. Çalışma, son işleme görevleri için bir SEA yazılımı olan Abaqus'u kullanmanın sınırlamalarını vurgulayarak başlamaktadır. Abaqus ile yaygın olarak kullanılan bir programlama ve analiz ortamı olan Matlab arasındaki boşluğu doldurduğu için Abaqus2Matlab devreye giriyor. Makale, Abaqus2Matlab'ı SEA sonrası işleme için uygun bir araç haline getiren birkaç temel özelliği vurgulamaktadır. Bu özellikler, Abaqus sonuç dosyalarını doğrudan Matlab'a aktarabilme, veri formatlarının otomatik dönüştürülmesi, büyük ölçekli veri işleme desteği ve kullanıcı dostu bir arayüz içerir.

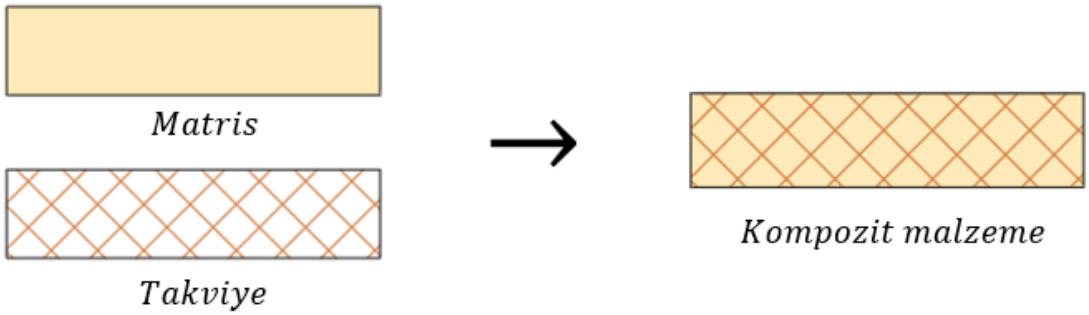
Araç ayrıca bilgilendirici ve görsel olarak çekici çıktılar oluşturmak için çeşitli çizim ve görselleştirme işlevleri sunmaktadır. Özet olarak, Matlab ile sorunsuz entegrasyon sağlayarak mühendislere ve araştırmacılara SEA sonuçlarını analiz etmek ve görselleştirmek için daha esnek, verimli ve özelleştirilebilir bir ortam sunmaktadır ve sonuç olarak mühendislik simülasyonlarının doğruluğunu ve etkinliğini artırmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kompozit malzemelerin temelleri, elektrik direklerinde kompozit malzemelerin kullanımı ve bu direkler üzerinde yapılan statik analizleri ile ilgili bilgi verilmektedir. Ayrıca, SE modelinin statik analizi ve doğrulanması için ABAQUS programında (2017) FTP direğinin sonlu eleman modellemesini sunmaktadır. Çeşitli özelliklerin FTP direklerin genel yapısal tepkisi üzerindeki etkisini değerlendirmek için geometrik optimizasyon çalışmalar ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla bileşenin birleştirilmesiyle yapılır. Bu parçalar tipik olarak bir matris (reçine, polimer) ve bir takviye edici (elyaf, malzeme) malzemeden oluşur. İki ana mikro bileşen, matris ve takviye elemanıdır.



Şekil 3.1 Kompozit malzeme

Matris, polimer, seramik ve metal gibi çeşitli tiplerde olabilir. Takviye elemanı, çeşitli şekillere (lifler, sürekli tabakalar, vb.), kimyasal yapıya (cam, karbon, aramid, vb.) ve çok sayıda lif yerleştirme yönüne (tek yönlü, çift yönlü, vb.) sahip olabilir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, metal malzemelere göre daha hafif ve daha güçlü olmaları nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu nedenle otomotiv, inşaat sektörleri ve havacılık gibi birçok mühendislik alanında kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFTP) kompoziti, bir polimer matrisinden ve bir elyaf formundaki bir cam takviye elemanından yapılır.

Kompozit Malzeme Türleri:

1. Polimer Kompozitler
2. Metal Kompozitler
3. Seramik Kompozitler

3.1.1 Polimer Kompozitler

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, endüstride kapsamlı bir uygulama yelpazesine sahiptir. Kompozit malzemeler arasında, polimer matrisli kompozitler en yaygın ve gelişmiş olanlardır. Bunun sebepleri ise diğer matris malzemelere göre maliyetinin düşük olması, elde edilebilecek yüksek dayanım değerleri ve basit imalat sürecidir. Takviye olarak karbon, kevlar, cam ve boron lifleri kullanılmaktadır.

Fiber takviyeli polimerlerin ana bileşenleri şunlardır:

Polimer Matris: Temel polimer malzemesidir ve genellikle termoplastik veya termoset malzemelerdir. Matris, genellikle malzemenin dayanıklılığını artırmak, şekillendirilebilirliği ve işlenebilirliği sağlamak için kullanılır.

Lif Takviyeler: Bu lifler, matrisin içine yerleştirilir ve malzemeye yüksek mukavemet ve sertlik kazandırmak için tasarlanmıştır. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf gibi farklı lif türleri kullanılabilir. Lifler genellikle düz veya dokuma şeklinde düzenlenir ve malzemenin istenen mekanik özelliklere ulaşmasını sağlar.

Çizelge 3.1 Takviye edici elyafların özellikleri

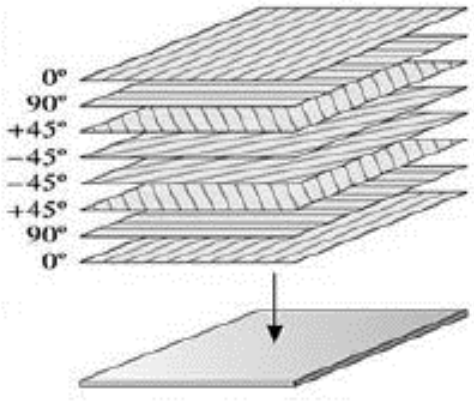
Malzeme	Yoğunluk g/cm^3	Çekme mukavemeti N/mm^2	Elastisite mödülü N/mm^2
Cam elyafı	2,54	2410	70000
Karbon elyafı	1,75	3100	220000
Aramid elyafı	1,46	3600	124000

Polyester ve epoksi, polimer kompozitlerde kullanılmakta olan en önemli iki bağlayıcı malzemedir. Takviye edici elyaf miktarının arttırılması, kompozitin mukavemetini arttırır. Yüksek özgül mukavemet (mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülü, polimer kompozitlerin en önemli iki özelliğidir.

Çizelge 3.2 Elyaflı kompozitlerinin özellikleri

Malzeme	Yoğunluk g/cm^3	Çekme mukavemet N/mm^2	Elastik mukavemet N/mm^2
Cam elyafı - polyester	1,5 – 2,1	200 – 340	55000 – 130000
Karbon elyafı - epoksi	1,5 – 1,8	1860	145000
Kevlar elyafı - epoksi	2,36	2240	76000
Boron elyafı - epoksi	1,4	1240	176000

Kompozit malzemelerin genel özellikleri büyük ölçüde fiber ve reçinenin özelliklerine, fiber hacim fraksiyonuna (liflerin kompozit ürünün toplam hacmine oranı) ve fiberlerin yönüne bağlıdır. İkincisi, malzemenin mukavemeti ve sertliğinde çok önemli bir parametredir ve açı değiştirilerek kompozitlerden farklı mekanik özellikler elde edilebilir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, lifler reçineye 0 ile ±90 derece arasında herhangi bir açıyla yerleştirilebilir.



Şekil 3.1.1. Fiber yönlendirme açısı

Kompozitin mekanik özellikleri büyük ölçüde takviye tipi, şekli ve yönü ile belirlenir. Yüksek lifli takviye içeriği, lifin uzunluğuyla birlikte artan, ancak yüksek sertlik sağlamayan yüksek bir gerilme mukavemeti üretir. Yüksek mineral içeriği, yüksek rijitlik, ancak nispeten zayıf çekme mukavemeti verebilir. Reçine ve takviye arasındaki denge, bir kompozit yapının özelliklerini etkileyen ana faktördür. Lifli malzemeler, stresi polimerden life aktararak matris malzemesini güçlendirme görevi görür. (Lübin, 1969).

Elyaf takviyeli polimer kompozitler, özellikle cam türü, inşaat mühendisliği yapılarında defalarca kullanılmıştır ve düşük ağırlık-dayanım oranı ve yüksek dayanıklılık özellikleri nedeniyle kullanımları etkileyici bir oranda artmaya devam etmektedir.

3.2. Kompozit Malzeme Üretimi

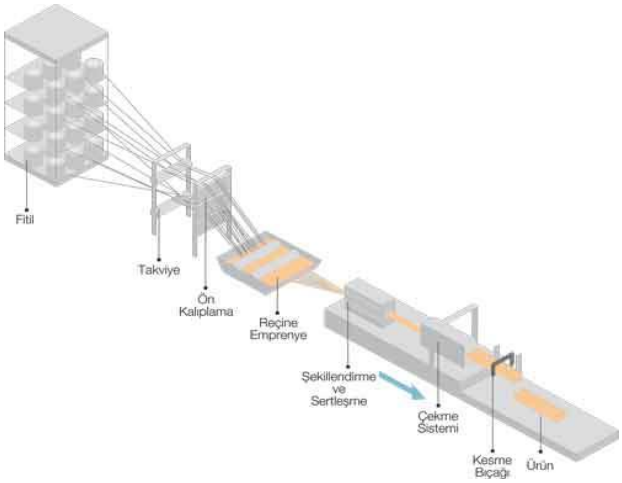
Kompozit malzemeler üretmek için en yayın süreçlerden bazıları aşağıda listelenmiştir:
Filament Sarma: Bu teknikte, uzun lifler bir sarma makinesi kullanılarak bir kalıp üzerine sarılır. Bundan sonra, lifler matris malzemesi ile kaplanır. Yüksek mukavemetli ve yüksek performanslı kompozitler sıklıkla bu teknik kullanılarak üretilir. (Şahin, 2022)

Enjeksiyon Kalıplama: Termoplastik matrisli malzemeler için enjeksiyonla kalıplama yaygın bir tekniktir. Isıtılmış enjeksiyon kalıbında takviye ve matris malzemesi enjekte edilir ve soğuduktan sonra katılaşır. Bu teknik, karmaşık geometrilere sahip büyük miktarlarda parça üretmek için iyi çalışır.

Sürekli Elyaf Yöntemi: Uzun elyaf takviyeleri, bir matris malzemesine yerleştirilir ve sürekli elyaf yöntemlerinde sürekli bir işleme adımından geçirilir. Örneğin, sürekli fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde sürekli entegre proses (CIP) ve kısmi ıslak sarma yöntemleri sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı, ürünün tasarımına, boyutuna, mukavemet özelliklerine ve diğer gereksinimlere bağlı olarak değişebilir.

Öte yandan, sürekli elyaf takviyesi, bir matris malzemede çekmeyi içeren pultrüzyon yöntemiyle şekillendirilir. Bu teknik sıklıkla yüksek mukavemetli kompozitler üretmek için kullanılır ve uzun, düz parçalar üretebilir.



Şekil 3.2. Pultrüzyon düzeneği ve yöntemi
(https://www.fiberr.com.tr/pultruzyon)

Pultrüzyon işlemi, kompozit malzemeler oluşturmak için kullanılır. Bu teknikle, bir matris malzemesi sürekli güçlendirilmiş liflere çekilir. Yüksek mukavemetli kompozitler üretmenin verimli bir yoludur ve sıklıkla uzun, düz parçaların üretiminde kullanılır.

Pultrüzyon yöntemi için takviye malzemesi, cam elyafı, karbon elyafı veya diğer tipler gibi sürekli elyaflardır. Bu lifler, önceden belirlenmiş bir kalıp veya matris içinden geçirilir. Termoset reçineler, özellikle polyester veya epoksi reçineler, tipik olarak matris malzemeleri olarak tercih edilir.

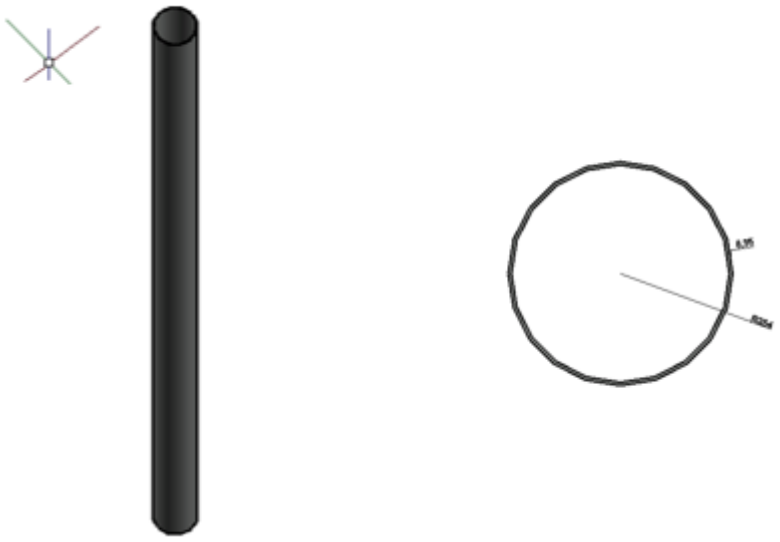
Aşağıdaki adımlar pultrüzyon işlemini oluşturur:

1. Takviye besleme sistemi: Sistem, sürekli elyaf bobinlerini veya düzeneklerini besler.
2. Matris malzemesinin enjeksiyonu: Matris malzemesinin enjekte edilmesi için elyaf takviyeleri bir enjeksiyon sisteminden geçer. Bu noktada, elyaf takviyesine, elyafı kaplayan reçine nüfuz eder.
3. Şekillendirme kalıbı: Matris malzemesi, bir biçimlendirme kalıbı kullanılarak çekilir ve şekillendirilir. Bu kalıp kullanılarak istenilen profil veya şekle sahip bir ürün üretilir.
4. Kürleme: Sertleştirmek için, şekillendirilmiş ürünle birlikte bir sıcaklık fırını veya ısıtma sistemi kullanılır. Termoset reçineler kullanıldığında ürün, kimyasal reaksiyonlarla yürütülen kürleme işlemi sırasında katılaşır.

Sürekli üretim yöntemi olan pultrüzyon ile yüksek üretim oranları mümkündür. Seri üretim gerektiren sektörlerde tercih edilen ve yüksek adetli üretimler için iyi bir tercihtir. Yüksek mukavemet, üretim hızı, enerji verimliliği ve özelleştirile bilirlik gibi avantajları nedeniyle pultrüzyon yöntemi birçok endüstride kullanılmaktadır. Ancak, herhangi bir üretim yönteminde olduğu gibi dikkatli süreç planlaması, malzeme seçimi ve kalite kontrol gibi değişkenleri hesaba katmak çok önemlidir.

3.3. Sonlu Eleman Modelin Oluşturulması

Bu çalışmada Mohamed ve ark. (2019) iletim hatlarında kullanılmak üzere hafif direkler geliştirmek için Sherbooke Üniversitesi'nde yürütülen daha önceki kapsamlı bir araştırma projesinden alınan iyi belgelenmiş malzeme özellikleri ele alınmıştır.
Elektrik direk, PoleTrusion Group Corporation tarafından pultrüzyon tekniği kullanılarak tam ölçekli bir GFTP direği üretilip, Mohamed ve arkadaşları (2019) tarafından test yapılmıştır. Mohamed (2019) test yaptığı direğin geometri ve malzeme özelliklerini Abaqus (2017) programını kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Direğin geometrisi şekil 3.3'te gösterilip malzeme bilgileri çizelge 3.3'de verilmiştir.



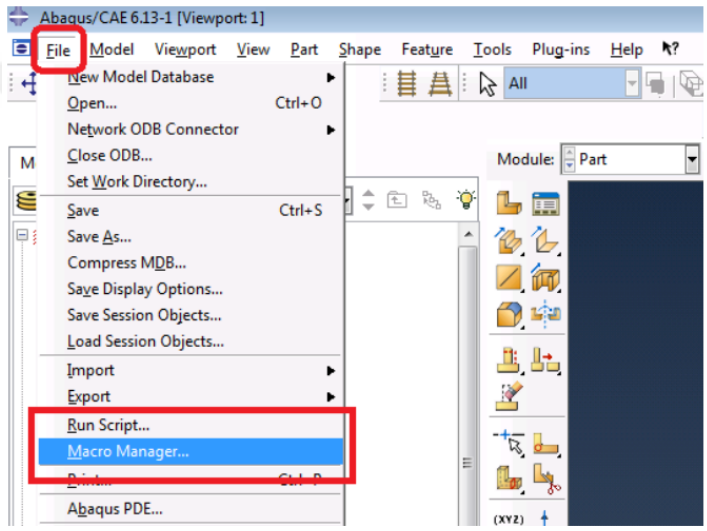
Şekil 3.3. Direk kesiti geometrisi AutoCAD'de çizilmiştir.

Çizelge 3.3. Direğin geometrik ve malzeme bilgileri (Mohamed, ve ark., 2019)

Geometri		Malzeme	
Uzunluk (mm)	10500	Elastisite Mödülü (MPa)	26000
Çap (mm)	254	Poisson Oranı	0.25
Kalınlık (mm)	6.35		

3.3.1. Python Komut Dosyası İle Abaqus Modelin Oluşturma

Abaqus'de model oluşturmanın iki yöntemi vardır. Birinci yöntem Abaqus üzerinde Model oluşturmak, ikinci yöntem ise yani dosyayı içeri aktarmak.



Şekil 3.4. Abaqus Python komut dosyası

Abaqus'de Python komut dosyasın içeri aktararak, görevleri otomatikleştirmek, simülasyonları özelleştirmek ve Abaqus yazılım ortamında çeşitli işlemleri gerçekleştirmek için Abaqus Komut Dosyası Arayüzü'nün kullanılmasını içermektedir. Abaqus'un Python API'sı aracılığıyla Abaqus modelleri oluşturabilmektedir.

Abaqus kabuğunda Python etkileşimli bir şekilde kullanabilmektedir. Bunu yapmak için Abaqus Command satırı açılır ve "abaqus cae" veya "abaqus viewer" gibi bir Abaqus modülünü başlatılır. Ardından, "Python script" bölümünü kullanarak Python komutları girebilir veya Python betikleri çalıştırabilir.

Abaqus Python modülünü içe aktararak yapılmaktadır. Abaqus ile çalışmak için abaqus adlı Python modülünü içe aktarılması gerekecektir. Bu modül, Abaqus işlevlerine erişim sağlamaktadır.

```python
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
```

Şekil 3.5. Abaqus Python modülünün içe aktarılması

Öncelikle modelin oluşturulmasından başlamaktadır. Geometrik tasarım Python ile Abaqus modeli oluştururken, parametrik tasarım ve otomasyon yeteneklerinden yararlanabilmektedir. Değişkenleri ve döngüleri kullanarak farklı geometrileri oluşturabilir veya analizleri otomatikleştirebilmektedir.

```python
def Create_Part_3D_Cylinder(radius,length,thickness,part,model):
    s1 = mdb.models[model].ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=200.0)
    g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
    s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
    s1.CircleByCenterPerimeter(center=(0.0, 0.0), point1=(radius, 0.0))
    s1.CircleByCenterPerimeter(center=(0.0, 0.0), point1=(radius-thickness, 0.0))
    p = mdb.models[model].Part(name=part, dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
    p = mdb.models[model].parts[part]
    p.BaseSolidExtrude(sketch=s1, depth=length)
    s1.unsetPrimaryObject()
    p = mdb.models[model].parts[part]
    del mdb.models[model].sketches['__profile__']


def Create_Datum_Plane_by_Principal(type_plane,part,model,offset_plane):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    myPlane = p.DatumPlaneByPrincipalPlane(principalPlane=type_plane, offset=offset_plane)
    myID = myPlane.id
    return myID

def Create_Partion_by_Plane(model,part,id_plane):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    c = p.cells[:]
    d = p.datums
    p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[id_plane], cells=c)

def Create_Set_All_Cells(model,part,set_name):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    c = p.cells[:]
    p.Set(cells=c, name=set_name)
```

Şekil 3.6. Python ile Abaqus modelinin oluşturulması

Bu satırlarla çizim ve model oluşturulur.

```python
def Create_Set_All_Cells(model,part,set_name):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    c = p.cells[:]
    p.Set(cells=c, name=set_name)


def Create_Material_Isotropic(model,material_name_isotropic,e,nu):
    mdb.models[model].Material(name=material_name_isotropic)
    #mdb.models[model].materials[material_name_isotropic].Density(table=((rho, ), ))
    mdb.models[model].materials[material_name_isotropic].Elastic(table=((e, nu), ))

def Create_Isotropic_Section(model,section_name,material_name_isotropic):
    mdb.models[model].HomogeneousSolidSection(name=section_name, material=material_name_isotropic, thickness=None)

def Assign_Isotropic_Material(model,part,set_name,section_name):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    region = p.sets[set_name]
    p.SectionAssignment(region=region, sectionName=section_name, offset=0.0, offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='', thicknessAssignment=FROM_SECTION)

def Create_Set_Face(x,y,z,model,part,set_name):
    face = ()
    p = mdb.models[model].parts[part]
    f = p.faces
    myFace = f.findAt((x,y,z),)
    face = face + (f[myFace.index:myFace.index+1], )
    p.Set(faces=face, name=set_name)

def Create_Set_Edge(x,y,z,model,part,set_name):
    edge = ()
    p = mdb.models[model].parts[part]
    e = p.edges
    myEdge = e.findAt((x,y,z),)
    edge = edge + (e[myEdge.index:myEdge.index+1], )
    f = p.Set(edges=edge, name=set_name)
```

Şekil 3.7. Python ile malzeme ve alan tanımlaması

Malzeme ve alan tanımlaması yukarıdaki satırlarla yapılır.

```python
def Create_Mesh_Solid(model,part,size):
    p = mdb.models[model].parts[part]
    elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=C3D8, elemLibrary=STANDARD)
    elemType2 = mesh.ElemType(elemCode=C3D6, elemLibrary=STANDARD)
    elemType3 = mesh.ElemType(elemCode=C3D4, elemLibrary=STANDARD)
    cells = p.cells[:]
    pickedRegions =(cells, )
    p.setElementType(regions=pickedRegions, elemTypes=(elemType1, elemType2, elemType3))
    p.seedPart(size=size, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
    p.generateMesh()
```

Şekil 3.8. Mesh satırlarının belirlenmesi

Bu satırlar mesh kontrolünü, eleman tipini ve meshleri oluşturacaktır.

```python
def Create_Boundary_Condition_by_RP(model,RP_name,BC_name,step_name):
    a = mdb.models[model].rootAssembly
    region = a.sets[RP_name]
    mdb.models[model].EncastreBC(name=BC_name, createStepName=step_name, region=region, localCsys=None)


def Create_Constraint_Coupling(model,constraint_name,set_name,surface_name):
    a = mdb.models[model].rootAssembly
    region1=a.sets[set_name]
    a = mdb.models[model].rootAssembly
    region2=a.instances['Cylinder-1'].surfaces[surface_name]
    mdb.models[model].Coupling(name=constraint_name, controlPoint=region1,
        surface=region2, influenceRadius=WHOLE_SURFACE, couplingType=KINEMATIC,
        localCsys=None, u1=ON, u2=ON, u3=ON, ur1=ON, ur2=ON, ur3=ON)


def Create_Concentrated_Load(model,instance_name,load_name,step_name,reference_point,load):
    a = mdb.models[model].rootAssembly
    region = a.sets['RP-1']
    mdb.models[model].ConcentratedForce(name=load_name, createStepName=step_name, region=region, distributionType=UNIFORM, field='',  cf2=load, amplitude=UNSET)
```

Şekil 3.9. Sınırlarının ve yüklerin belirlenmesi

Sınırlar, bağlantılar ve yük uygulanır.

```
# create model


myString = "Pole_Analysis"

myRadius = 127.0
myThickness = 6.35


myLength = 10500.0
myModel = mdb.Model(name=myString)
myPart = "Cylinder"

myRho = 2.5e-9
myE = 27500
myNu = 0.25

Mesh_Size = 25.0

myEdge_name = "BC_Surface"

myReference_point = "RP-1"

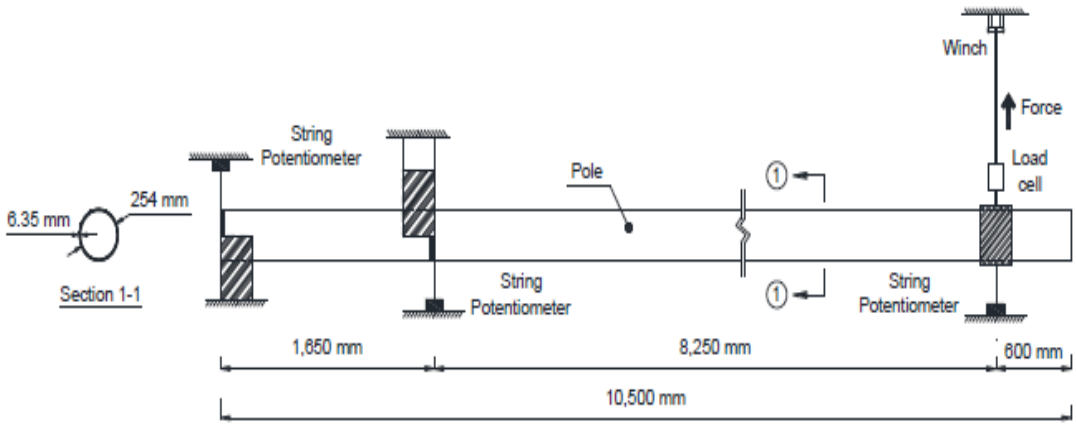
Create_Part_3D_Cylinder(myRadius,myLength,myThickness,myPart,myString)
```

Şekil 3.10. Python ile Abaqus modelinin geometrik ve malzeme özelliklerinin oluşturulması

3.3.2. Sınır Şartları ve Yüklerin Uygulanması

Direk zemine yatay olarak yerleştirildi ve birinci uçtan 0.0 ve 1.65 m'de karşılıklı iki sabit destek kullanılarak sabitlendi. Direğin sabit kısmı (1,65 m), direğin zemine gömülü derinliğini temsil etmekte olup, genellikle (direk uzunluğunun %10'u + 600 mm) olarak hesaplanmaktadır. Sabitlemeyi doğrulamak için iki desteğe iki dizi potansiyometre yerleştirildi. GFTP direği, ANSI C 136.20-2005'e göre şekil 3.6'da gösterildiği gibi vinç ve çelik halat kullanılarak serbest uçtan 600 mm'de dikey yüklemeye tabi tutuldu. (Mohamed, 2019). ANSI 05.1'e göre Sınıf 5 için bir direğin standart gerekli yük kapasitesi 8,45 kN'dir. Mohamed ve ark., (2019) "Test edilen direğin yük kapasitesi, gerekli dayanımdan yaklaşık %11 daha yüksek" olduğunu hesaplamıştır.

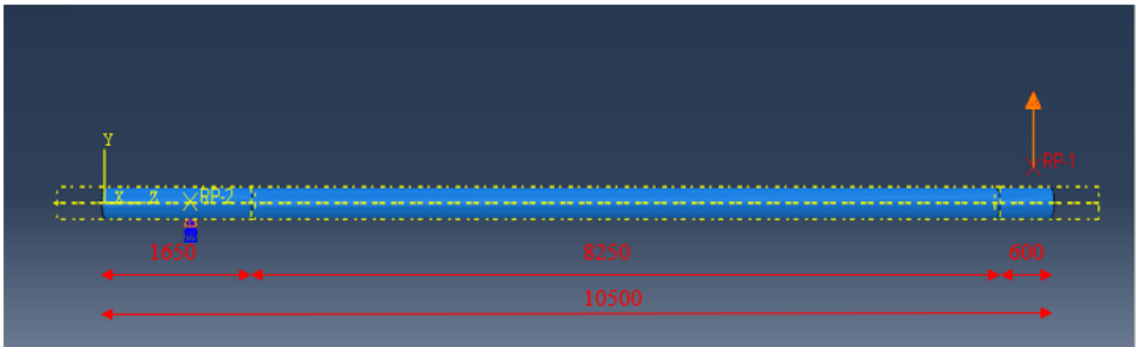
Şekil 3.7'de test yapılan direğin yükleme ve sinir koşullarının aynısını sonlu eleman modeli uygulanmış hali gösterilirmiştir.



Şekil 3.11. Direk şekli ve test kurulumu
(Mohamed ve ark., 2019)



Şekil 3.12. Direğin teste hazırlanma şekli
(Mohamed ve ark., 2019)



Şekil 3.13.: Sonlu elemanlar modelinin yükleme ve sınır koşulları

3.4. Geometrik Optimizasyon

Geometrik optimizasyon, genellikle mühendislik uygulamalarında ve birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, otomotiv endüstrisinde araç şasilerinin, uçak mühendisliğinde kanatların, yapısal mühendislikte binaların ve köprülerin optimizasyonunda kullanılabilir.

Parametrik modelleme, yapısal optimizasyon sürecindeki modelleme aşaması için düzenli bir yaklaşımdır. İlk olarak 1962 yılında Sutherland tarafından geliştirilmiştir (Yongyan, 2019). Bir yapısal optimizasyon probleminde amaç ve kısıt fonksiyonları optimum çözüm elde edilene kadar tekrar tekrar değerlendirilmiştir. Ancak, yapısal optimizasyon ilerledikçe, modeli oluşturmak için kullanılan bağımsız parametreler değişmeye devam etmektedir.

Bir optimizasyon probleminin amacı, üretim maliyetini ve üretim ağırlığını en aza indirmek veya en iyi performansı elde etmek için formüle edilmektedir. Optimize edilmiş tasarım parametreleri, tüm gereksinimler karşılanırken ölçülebilir ve en iyi performansı elde etmek amacıyla belirlenir (Aurora, 2012). Ağırlık azaltma, tasarım yapısal optimizasyon alanında en sık tartışılan hedeflerden biridir.

Uygulamaların çoğunda, amaç fonksiyonu ve kısıtlama fonksiyonları yüzlerce veya binlerce kez değerlendirilir. Bu nedenle, doğru algoritmaları ve uygun tasarım değişkenlerini kullanmak için uyarlanmış verimli bir simülasyon ve uygun bir optimizasyon süreci, hesaplama süresini önemli ölçüde azaltabilir ve optimizasyon sonucunun kalitesini artırabilir (Yang ve Koziel, 2011). Bu çalışmanın amacı,

performans ve tasarım sınırlamalarını karşılarken direğin ağırlığını dolaysıyla maliyetini en aza indirmektir.

3.4.1. SciPy Kütüphanesi

SciPy.optimize, muhtemelen kısıtlamalara tabi olan objektif işlevleri en aza indirmek (veya maksimum değer bulmak) için işlevler sağlar. Doğrusal olmayan problemler için çözücüler (hem yerel hem de küresel optimizasyon algoritmalarını destekler), doğrusal programlama, kısıtlı ve doğrusal olmayan en küçük kareler, kök bulma ve eğri uydurma algoritmalar sağlar (Gael Varoquaux, ve ark.).

3.4.1.1. SLSQP Yöntemi

Sequential Quadratic Programming (SQP) kısıtlanmamış doğrusal problemleri çözmek için kullanılır ve en verimli yöntemlerden biri olarak kabul edilir. Esas olarak, SQP yöntemi bir sorunu yinelemeli olarak çözmeye çalışır ve küçük veya büyük sorunlar için kullanılabilir (Mungan, 2019). SLSQP, "Sequential Least Squares Programming" anlamına gelir ve kullanılarak kısıtlı optimizasyon gerçekleştirir. Bu yöntem, özellikle amaç fonksiyonu ve kısıtlamaların düzgün olduğu ve bir dizi doğrusal olmayan denklem veya eşitsizlik olarak ifade edilebildiği optimizasyon problemleriyle uğraşırken kullanışlıdır. SLSQP'de her adım iki alt problemi çözer: bir doğrusal program (LP) ve eşitlik kısıtlamalı ikinci dereceden program (EQP), aktif bir kümeyi belirlemek için kullanılan doğrusal program ve toplam adımı hesaplamak için kullanılan ikinci dereceden program. Problem üzerindeki kısıtlamaları işleyebilir, bu nedenle algoritmanın sergilenmesi için genel bir doğrusal olmayan programlama üzerinde çalışır (Gupta ve Gupta, 2018).

SLSQP'nin genel açıklaması aşağıda gösterilmiştir. Temel olarak SLSQP, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarını göz önünde bulundurarak $f(x)$ işlevini en aza indirmeye çalışır:

$$\min_x f(x)$$

genel eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamalarına bağlı,

$$g_j(x) = 0, \qquad j = 1, \dots, m_e$$
$$g_j(x) \geq 0, \qquad j = m_e + 1, \dots, m$$

ve değişkenler üzerinde alt ve üst sınırlar,

$$l_\iota \leq x_\iota \leq u_\iota, \qquad i = 1, \dots, N$$

g_j kısıtlamaları, m_e eşitlik kısıtlamalarının sayısını, m toplam kısıtlama sayısını, l_ι ve u_ι alt ve üst sınırları temsil eder (Kraft, 1988).

Minimize (method='SLSQP') işlevinin nasıl çalıştığına dair genel bir bakış:
Başlangıçta, algoritma, sağlanan ilk tahmine dayalı olarak parametreleri ve kısıtlamaları bularak başlar. Tez çalışmasında kullandığımız algoritmada en önemli parametrelerinin iki tanesi parametre sınırların ve kısıtlamaların belirlemekti.

Kısıtlamalar: Optimizasyon problemi kısıtlamalar içeriyorsa, bunları başlatma sırasında tanımlamamız gerekmektedir. Kısıtlamaların iki türü olabilir: eşitlik kısıtlamaları ve eşitsizlik kısıtlamaları. Eşitlik kısıtları, sağlanması gereken denklemlerdir, eşitsizlik kısıtları ise belirli sınırlar içinde sağlanması gereken koşullardır. Kısıtlamaları, optimizasyon probleminin özel gereksinimlerine bağlı olarak uygun işlevleri veya ifadeleri kullanarak belirtilir.

Sınırlar: Kısıtlamalara ek olarak, parametre değerleri üzerinde sınırlar da sağlanmaktadır. Sınırlar, parametre değerlerini belirli bir aralıkla sınırlar. Örneğin, bir parametreyi belirli bir aralıkta olacak şekilde sınırlamak istenilebilir. Sınırların belirtilmesi, optimizasyon sürecini yönlendirmeye ve yakınsama verimliliğini artırmaya yardımcı olabilir.

$$l_\iota \leq r_0 \leq u_\iota,$$
$$l_\iota \leq t \leq u_\iota,$$

Minimize (method='SLSQP') işlevindeki başlatma işlemi, yinelemeli optimizasyon işlemi başlamadan önce parametreler ve kısıtlamalar için başlangıç değerlerinin ayarlanmasını içerir. Başlatma sürecinin bazı önemli yönleri şunlardır:

Başlatma işlemi sırasında simge durumuna küçültme işlevi, sağladığımız girdilere dayalı olarak ilk parametre değerlerini, kısıtlamaları, sınırları ve diğer ilgili parametreleri ayarlar. Bu ilk değerler, yinelemeli optimizasyon süreci için başlangıç

noktası görevi görür. Sonraki iterasyonlar, belirtilen kısıtlamaları sağlarken amaç fonksiyonunu en aza indiren optimal bir çözüme yakınsamak için bu ilk değerleri iyileştirir.

Sonraki adım yinelemeli süreci. Yinelemeli süreç, algoritma verilen kısıtlamaları yerine getirirken amaç fonksiyonunu en aza indirmek için parametreleri yinelemeli olarak ayarlar. Algoritma, eşitlik ve eşitsizlik kısıtlamaları için 1. dereceden yaklaşımları ve işlevi en aza indirmek için 2. dereceden yaklaşımları kullanır. SLSQP, Han-Powell yöntemi ile Quasi-Newton yöntemlerinde sıklıkla kullanılan BFGS güncellemesini birleştirerek ikinci dereceden bir yaklaşım kullanarak arama vektörleri oluşturur (Mungan, 2019).

Her yinelemede aşağıdaki adımları gerçekleştirir:

- Amaç Fonksiyon Değerlendirmesi: Algoritma, amaç fonksiyonunu mevcut parametre değerlerinde kullanılabilir.
- Gradyan Hesaplaması: Algoritma, amaç fonksiyonunun gradyanını parametrelere göre hesaplar. Eğim açıkça belirtilmemişse, sayısal yaklaşımlar değerlendirir.
- Kısıt Değerlendirmesi: Algoritma, mevcut parametre değerlerindeki kısıtlamaları değerlendirir.
- Kısıt Jacobian Hesaplaması: Algoritma, parametrelere göre kısıtlamaların Jacobian matrisini hesaplar.
- Yön Hesaplaması: Algoritma, amaç fonksiyonu gradyanına, kısıtlama değerlendirmelerine ve kısıtlama Jacobian'a dayalı olarak, parametre uzayında hareket edilecek yönü belirler.
- Adım Uzunluğu Belirleme: Algoritma, seçilen yöne göre güncelleme için uygun bir adım uzunluğu belirler.

Temel algoritma, x_k'nin belirli bir vektörden başlayarak yinelemeli olarak bulunabileceğini belirtir,

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de α_k adım uzunluğu ve d_k arama yönüdür. Arama yönünü belirlemek için Lagrange fonksiyonunun ikinci dereceden yaklaşımı kullanılır. İkinci dereceden programlama alt problemi şu şekilde oluşturulur:

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{j=1}^{m} \lambda_j g_j(x) \tag{3.2}$$

Denklem 3.2'de λ, Lagrange katsayısı ve g kısıtlamalardır. Bu yaklaşımı kullanılarak, problem aşağıdaki forma dönüştürülür,

$$\min_{d \in R^n} \frac{1}{2} d^T B_k d + \nabla f(x_k) d \tag{3.3}$$

ve ;

$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e$$
$$\nabla g_j(x) d + g_j(x) \geq 0, \quad j = m_e, \dots, m$$

burada B şöyle bulunur,

$$B = \nabla^2_{xx} L(x, \lambda) \tag{3.4}$$

- Parametre Güncelleme: Algoritma, hesaplanan adım uzunluğunu ve seçilen yönü kullanarak parametreleri günceller.
- Yakınsama Kontrolü: Algoritma, amaç fonksiyonundaki ve kısıtlamalardaki değişikliği inceleyerek yakınsamayı kontrol eder. Yakınsama kriterleri karşılanırsa, optimizasyon süreci sona erer; aksi takdirde, bir sonraki yinelemeye geçer.

En son aşama ise sonlandırma. Algoritma, aşağıdaki koşullardan biri karşılandığında sona erer:

- Yakınsama: Yakınsama kriterlerinin karşılanması, optimizasyon sürecinin tatmin edici bir çözüme ulaştığını gösterir.
- Maksimum Yinelemeler: Algoritma, yakınsama olmadan belirtilen maksimum yineleme sayısına ulaşır.
- Uygulanamazlık: Kısıtlamalar verilen tolerans dahilinde karşılanamazdır.

Optimizasyon işlemi tamamlandıktan sonra, algoritma, kısıtlamaları karşılarken amaç fonksiyonunu en aza indiren optimize edilmiş parametre değerlerini, amaç fonksiyonunun optimumdaki değeri ve optimizasyonun başarı durumu gibi ek bilgilerle birlikte döndürür.

Belirli uygulama ayrıntılarının değişebileceğini ve algoritmanın performansının ilk tahmin seçimi, tolerans değerleri ve amaç fonksiyonunun ve kısıtlamaların özellikleri gibi faktörlerden etkilenebileceğini dikkate almaktadır. Yukarıda bahsedilen yöntemi kullanarak daha önce test edilen enerji direğin parametreleri optimize edilecektir.

İki tane optimizasyon çözüm ile direk tasarımı optimize edilecektir.

Bunlar: 1. Analitik çözüm kullanarak parametre optimizasyonu
2. Sonlu eleman çözüm kullanarak parametre optimizasyonu

3.4.2. Test Edilen Direğin Analitik Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyonu

Pek çok farklı yapı türü tasarım analizlerinde basit mesnetli kiriş teorisini kullanır. Kısıtlar, amaç fonksiyonu için kabaca bir çözüm bulmak amacıyla gerilmeler ve sapmalar için kiriş teorisi formüllerinden elde edilir. Tezde kullanılan denklemler aşağıda tanıtılmıştır, denklemlerin detaylı açıklaması ve türetilmesi kaynak araştırmalarında bulunabilir (Dowling, 2013), (Budynas, 2011).

Düzgün bir eksenel gerilim dağılımı varsayımı, direğin düz ve homojen bir malzemeden olmasını ve kuvvetin etki çizgisinin kesitin ağırlık merkezini içermesini gerektirir. Eksenel gerilim $\sigma_{eksenel}$ aşağıdaki denklemden hesaplanır:

$$\sigma_{eksenel} = \frac{P}{A} \tag{3.5}$$

I kesit alanının merkezinden geçen eksene göre alan atalet momentidir. İçi boş bir silindirik bölüm için alan atalet momenti şu şekilde hesaplanabilir:

$$I = \frac{\pi(r_0^4 - (r_0 - t)^4)}{4} \tag{3.6}$$

Bu silindir direğine uygulanan enine F kuvvetinin neden olduğu dikey sapma $\delta_{vertical}$ şu şekilde verilir:

$$\delta_{vertical} = \frac{FL^3}{3EI} \tag{3.7}$$

Amaç Fonksiyonu

Tezin amacı, performans ve tasarım sınırlamalarını karşılarken direğin ağırlığını en aza indirmektir. Direk ağırlığın minimize etmek problemimizin amaç fonksiyonudur.

Dik içi boş bir silindirin hacmini aşağıdaki denklemden bulmaktayız;

$$V = \pi((r_0^2 - (r_0 - t)^2)h \tag{3.8}$$

Kütle oranı hacim oranı ile tanımlanırsa;

$$\omega = \rho V \tag{3.9}$$

amaç fonksiyonumuz;

$$\omega = \rho\pi((r_0^2 - (r_0 - t)^2)L \tag{3.10}$$

formülüne denk gelmektedir.

Tasarım Değişkenleri

Direğin dış yarıçapı r_0 ve duvar kalınlığı t, problemin tasarım değişkenleri olarak belirlenmektedir, çünkü bunlar direğin ağırlığı kadar V hacmiyle doğrudan ilişkili olan A kesit alanını tanımlamaktadır. Problem sayısal bir yöntem kullanılarak çözüldüğünde, $r_0 > t$ olarak temsil edilen bir $x1 > x2$ kısıtlaması uygulanmalıdır, çünkü bazı optimizasyon yöntemleri tasarımı, $t > r_0$ olan tasarım uzayının mümkün olmayan bölgesine götürebilir. Kalınlık t, dış yarıçap r_0'nun büyüklüğüne eşitse, yani iç yarıçap r_i'nin büyüklüğü 0 ise, içi boş direğin katı bir çubuk olarak kabul edilmelidir ve bu problemde kullanılan denklemler artık uygulamamaktadır. $t > r_0$ ise tasarım fiziksel olarak imkansızdır. Problemin formülasyonunu göstermek için, tasarım değişkenlerinin şu şekilde tanımlanır:

$x1$= dış yarıçapı, r_0

$x2$ = duvar kalınlığı, t

$$x1 > x2$$

$$a_\iota \leq x1 \leq b_u$$

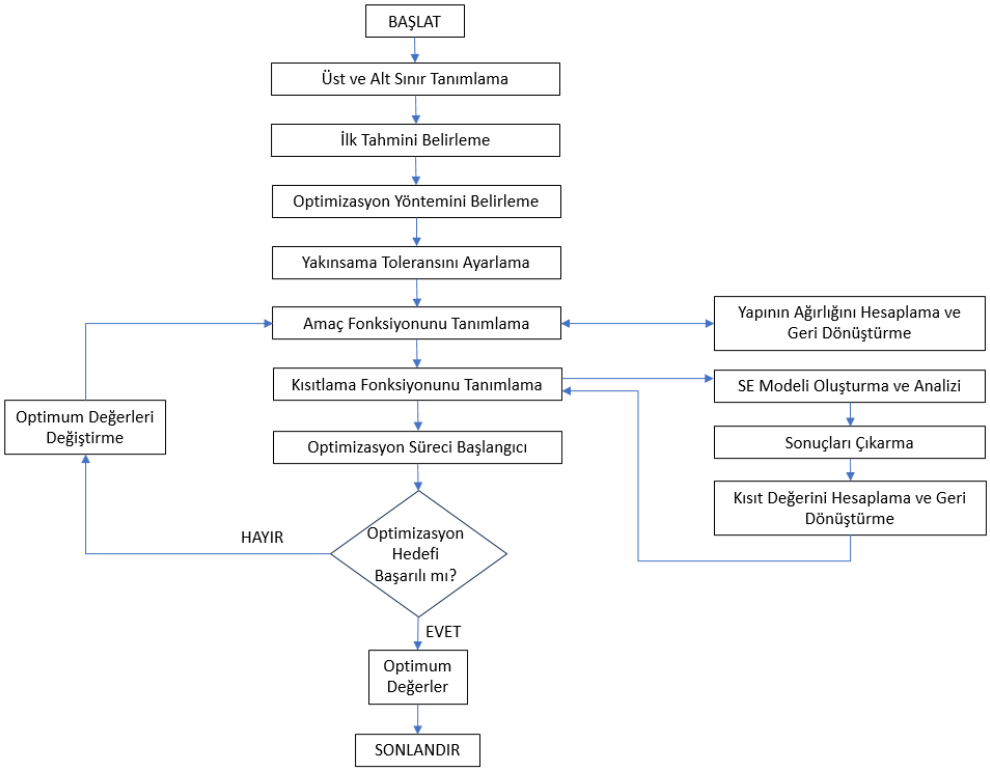
$$c_\iota \leq x2 \leq d_\iota$$

Tasarım Kısıtlamaları

Bu problem için tasarım kısıtlamaları, güvenlik faktörlerine ve yapısal sapmalara odaklanır. Bu kısıtlamalar şu şekilde tanımlanır:

$$\delta_{vertical} = \frac{FL^3}{3EI} \leq \delta_{max} \tag{3.11}$$

3.4.3. Test Edilen Direğin Sonlu Eleman Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyonu



Şekil 3.14.: Sonlu elemanlar yönteminin mantıksal akış şeması

Başlat: Optimizasyon sürecini başlatmak için bu adımda işlem başlamaktadır.

Üst ve Alt Sınır Tanımlama: Optimizasyon sürecinde optimize edilecek değişkenlerin (parametrelerin) alabileceği üst ve alt sınırlarını belirlemektedir. Bu adım, optimize edilecek değişkenlerin belirli bir aralıkta kalmasını sağlar ve optimizasyon algoritmasının bu sınırlar içinde çözüm aramasını temin eder.

İlk Tahmini Belirleme: Optimizasyon algoritmasının işleme başlamadan önce başlangıç değerlerine ihtiyacı vardır. Bu adımda, optimizasyonun başlangıcında kullanılacak varsayılan başlangıç değerlerini belirlemektedir.

Optimizasyon Yöntemini Belirleme: Bu adımda, optimizasyon sürecinde hangi algoritmanın veya yöntemin kullanılacağının belirlendiği adımdır. Bu adım, optimize edilecek problemin türüne, hedef fonksiyonun yapısına ve kısıtlamalara bağlı olarak seçilen en uygun algoritmayı tanımlar. Örnek olarak, genetik algoritma, gradyan tabanlı yöntemler, doğrusal programlama, vb. kullanılabilir.

Yakınsama Toleransını Ayarlama: Optimizasyon algoritmalarının belirli bir hedefe ulaşmak için kullanılan önemli bir parametredir. Optimizasyon sürecinde, hedef fonksiyonunun (amaç fonksiyonunun) değeri, belirli bir başlangıç noktasından başlayarak iteratif olarak güncellenir. Algoritma, hedef fonksiyonun değerini minimize etmeye çalışırken, belirlenen yakınsama toleransına ulaşmak için adımlar atar. Bu, optimizasyon algoritmasının ne zaman durması gerektiğini kontrol eder.

Amaç Fonksiyonunu Tanımlama: Bu adımda, optimize edilecek amaç fonksiyonunu tanımlamaktadır. Optimizasyon süreci, bu fonksiyonun değerini en küçük veya en büyük yapmak için çalışır.

Yapının Ağırlığını Hesaplama ve Geri Dönüştürme: Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum değerlere göre, yapı veya sistem için en uygun ağırlık hesaplanır ve sonuç döndürülür.

Kısıtlama Fonksiyonunu Tanımlama: Optimizasyonun, belirli kısıtlamalar altında gerçekleşmesi gerekiyorsa, bu adım kısıtlama fonksiyonlarını tanımlamaktadır. Bu fonksiyonlar, optimizasyonun belirli sınırlar içinde kalmasını sağlamaktadır.

SE Modeli Oluşturma ve Analizi: Bu adımda, optimize edilen yapı veya sistem için sonuçlar kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi modeli oluşturulur ve analiz edilir.

Sonuçları Çıkarma: Sonlu Elemanlar analizinden deplasman sonuçlarını elde etmektedir. Bu sonuçlar sistem performansını ve davranışını göstermektedir.
Kısıt Değerini Hesaplama ve Geri Dönüştürme: Belirli kısıtlamalar altında optimize edilen yapı veya sistem için kısıtlama değeri hesaplanır ve sonuca göre algoritma döndürülür.

Optimizasyon Süreci Başlangıcı: Optimizasyon algoritması belirlenen amaç fonksiyonunu optimize etmek için optimizasyon algoritmasının çalışmaya başladığı adımdır. Bu adım, önceden belirlenen başlangıç değerleri ve sınırlarla optimizasyon algoritmasının işlemi başlatmasını içerir.

Optimizasyon süreci, iteratif ve tekrar eden bir süreçtir. İlk başta belirlenen başlangıç değerleri ve sınırlar, algoritmanın hangi çözüm alanını arayacağını ve en iyi çözümü ne kadar süre içinde elde edebileceğini etkiler. Bu nedenle, doğru başlangıç değerlerinin ve sınırların seçilmesi, optimizasyon sürecinin başarısı ve verimliliği için kritik öneme sahiptir.

Optimizasyon Hedefi Başarılı mı? Bu adımda, optimizasyonun belirlenen hedefe ulaşılıp ulaşılmadığını kontrol etmektedir. Eğer belirlenen yakınsama toleransı, yani hedef fonksiyonunun iki ardışık adımda değişimi, belirli bir eşik değer altına düşerse veya belirlenen maksimum iterasyon sayısına ulaşılırsa, optimizasyon süreci sona erer. Bu durumda, optimizasyon hedefinin başarıyla gerçekleştirildiği kabul edilir.

Eğer hedef fonksiyonu belirlenen yakınsama toleransına veya maksimum iterasyon sayısına ulaşılmadan durmazsa, optimizasyon süreci başarısız olabilir veya hala daha iyi

bir çözüm alanı aramaya devam edebilir. Bu durumda, başlangıç değerleri veya diğer optimizasyon parametreleri değiştirilebilir ve süreç yeniden başlatılabilir.

Eğer hedefe henüz ulaşılmadıysa, "Hayır" olarak işaretlenir ve süreç devam etmektedir.

Optimum Değerleri Değiştirme: Bu adım, genellikle deneme-yanılma sürecinin bir parçasıdır. Optimizasyon algoritması hedefe ulaşamazsa, başlangıç değerlerini veya sınırları değiştirerek farklı bir çözüm alanı aramak için birden fazla iterasyon yapmak gerekir.

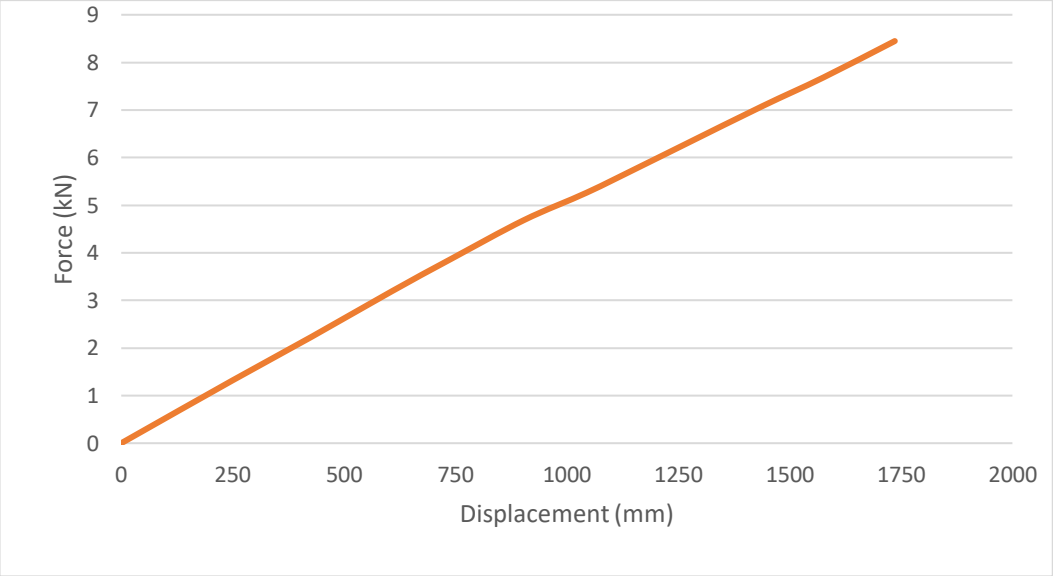
Optimizasyon Süreci Sonlandırarak optimizasyon süreci tamamlanmıştır.

4. BULGULAR

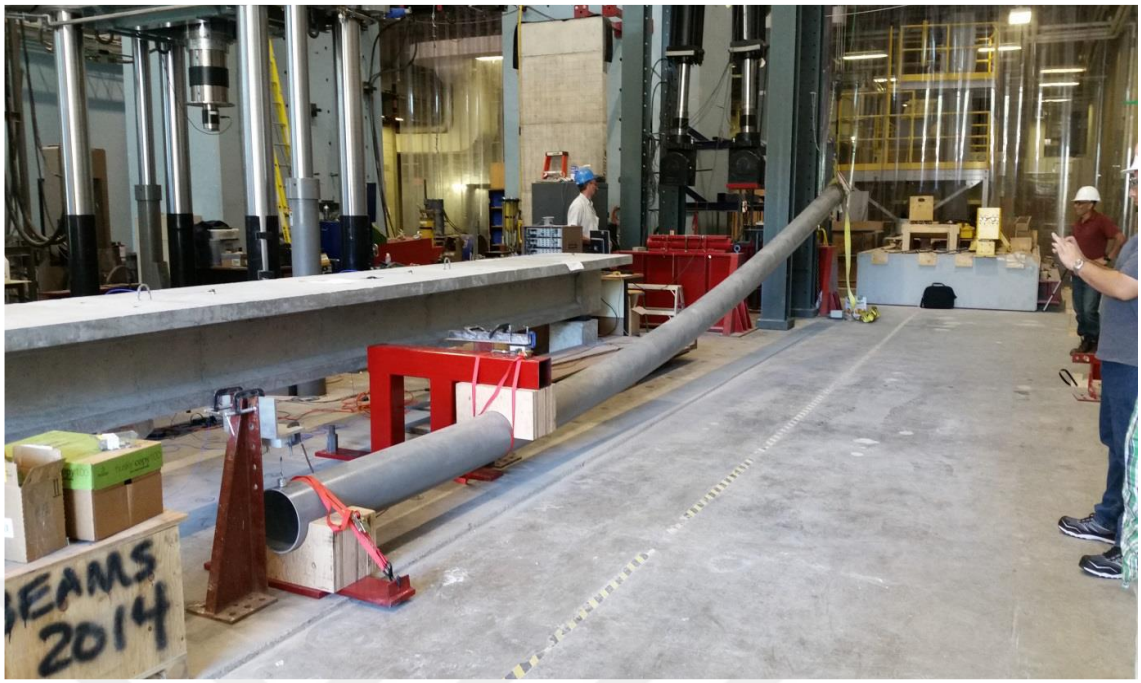
4.1.Test Edien Direğin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Mohamed ve ark., (2019) makalesinde, elektrik direkler, Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü (ANSI) 05.1'e dair yanal yük kapasitesine göre on dört sınıfa ayrılır. Direk 254 mm çapında, 6.35 mm kalınlığında ve 10.5 m uzunluğundadır. Direği tasarladıktan sonra, bu makalede paylaşılmakta olan test sonuçları ile ABAQUS sonlu elemanlar analizi sonuçlarıyla doğrulamak hedeflenmektedir.

Şekil 4.3, uygulanan maksimum yükte (standart tasarım yükü) test edilen direği göstermektedir. ANSI 05.1'e göre Sınıf 5 için bir direğin standart gerekli yük kapasitesi 8.45 kN'dir. Deplasman ise 1736.06 mm eşittir. İncelenen direk, eğilme yüklemesi sırasında iyi bir performans göstermiştir (Mohamed ve ark., 2019).



Şekil 4.1: Test edilen direk sonucu

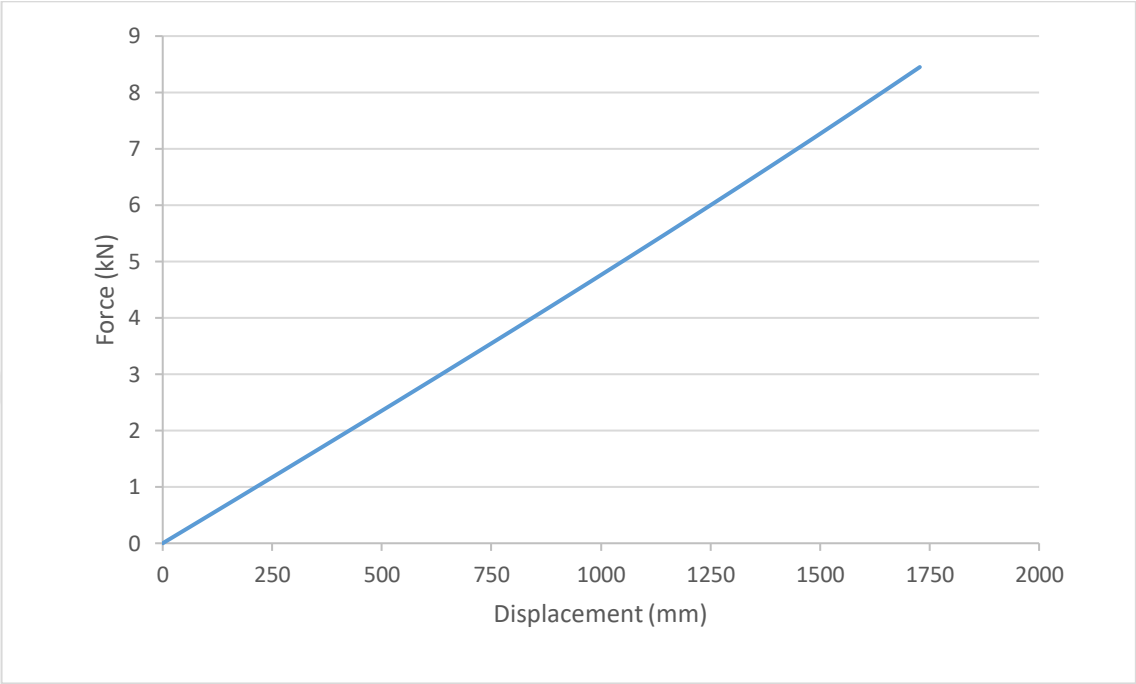


Şekil 4.2: Test edilen GFTP direği

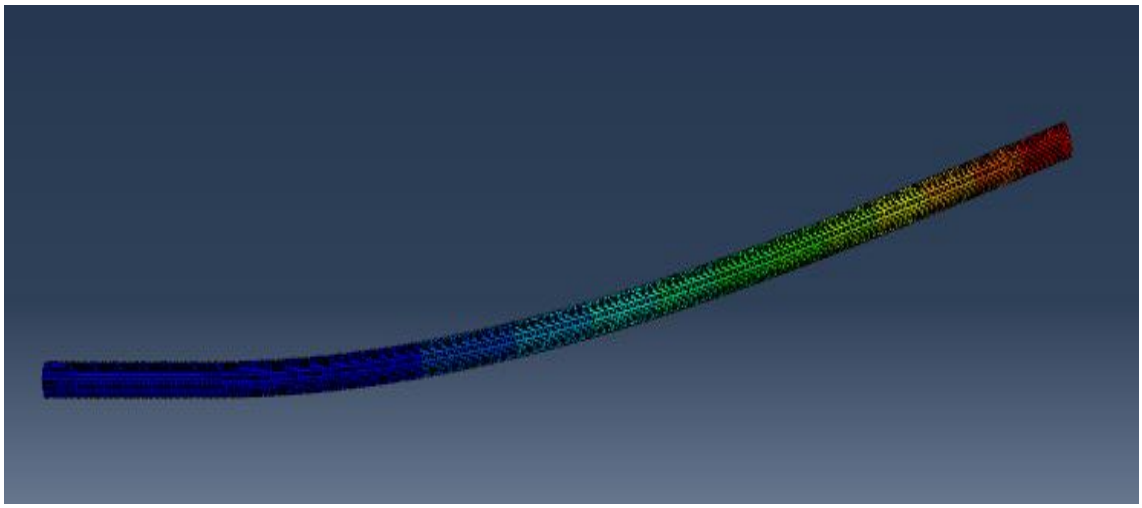


Şekil 4.3: Test edilen direğine yük uygulama aşaması

Aynı geometri ve materyal özellikleri kullanarak ABAQUS sonlu elemanlar tasarımı ve analizi yapılmaktadır. Analiz sonuçları 8.45 kN aynı yükü uyguladığında deplasman 1727.84 mm eşittir.



Şekil 4.4: Sonlu elemanlar analizleri sonucu

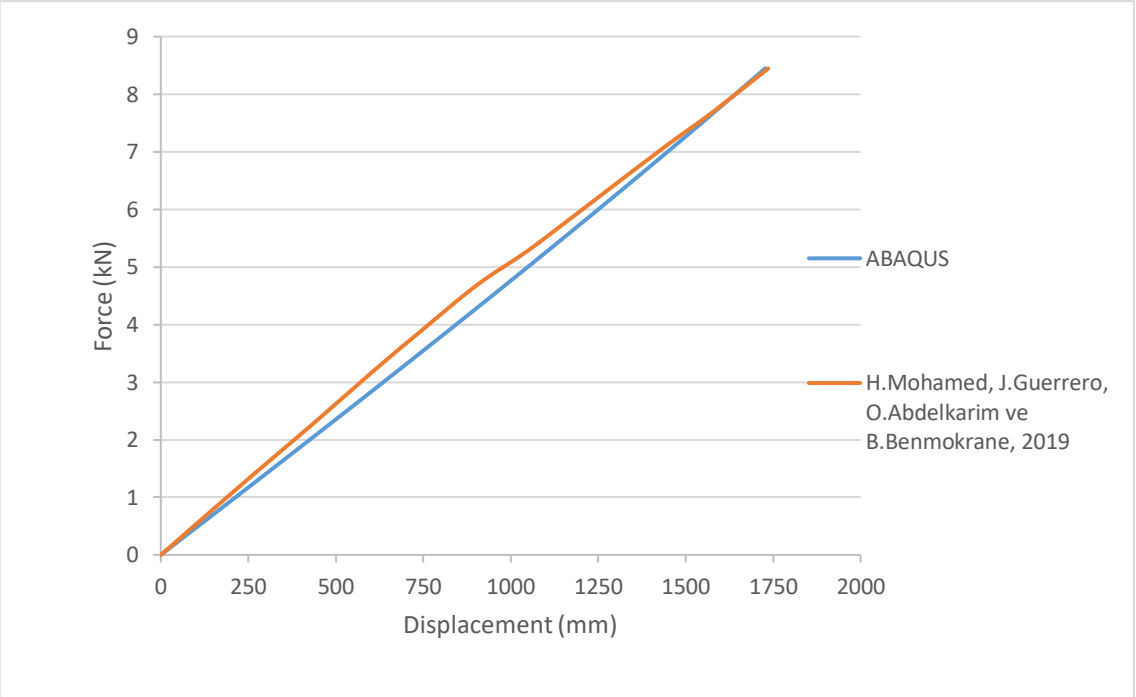


Şekil 4.5: Sonlu elemanlar direk modeli deplasman sonuçları

Çizelge 4.1. Test edilen ve sonlu elemanlar direklerinin sonuçlarının doğrulanması

Sonuçlar	Mohamed ve ark., (2019)	ABAQUS'te yaptığımız çalışmanın sonucu
Max.sehim (mm)	1736,06	1727,84
Max.düşey yük (kN)	8,45	8,45

Şekil 4.6 da, bu araştırmanın sonuçlarını Mohamed ve ark., (2019) sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak göstermektedir. ABAQUS'te r_0= 127 mm, t = 6.35 mm parametreleri kullanılarak elde edilen sonlu elemanlar sonuçları, test sonuçlarıyla iyi bir şekilde örtüşmektedir.



Şekil 4.6: Test edilen direk ve sonlu elemanlar direk sonuçlarının doğrulanması

4.2. Test Edilen Direğin Analitik Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyon Sonuçları

Amaç Fonksiyonu

Amaç fonksiyonu, genellikle en düşük ağırlık, en yüksek mukavemet veya minimum deformasyon gibi performans ölçütlerini temsil eder. Tasarım kısıtları ise tasarımın karşılaması gereken gereklilikleri belirtir, örneğin malzeme sınırlamaları veya yük

taşıma kapasitesi gibi. Direk ağırlığın minimize etmek problemimizin amaç fonksiyonudur.

Dik içi boş bir silindirin hacmini aşağıdaki denklemden bulmaktadır;

$$V = \pi((r_0^2 - (r_0 - t)^2)L \tag{3.7}$$

$$V = 3.14((127^2 - (127 - 6.35)^2) \times 10500$$

Bu denklemde;

r_0 = dış yarıçapı,

t = kalınlık.

Hacim bulduktan sonra, kütle oranın hacim oranı ile tanımlamaktadır;

$$\omega = \rho V \tag{3.8}$$

amaç fonksiyonu ise;

$$\omega = \rho\pi((r_0^2 - (r_0 - t)^2)L \tag{3.9}$$

$$\omega = 2.5 \times 10^{-9} \times 3.14((127^2 - (127 - 6.35)^2) \times 10500$$

formülüne denk gelmektedir.

Tasarım Değişkenleri

Direk modelinin geometrik değişkenleri r_0= 127 mm, t = 6.35 mm parametreleri kullanılarak, aşağıda tanımlanan tasarım değişkenlerin belirlemektedir.

Problem sayısal bir yöntem kullanılarak çözüldüğünde, $r_0 > t$ olarak temsil edilen bir $x1 > x2$ kısıtlaması uygulanmalıdır, çünkü bazı optimizasyon yöntemleri tasarımı, $t > r_0$ olan tasarım uzayının mümkün olmayan bölgesine götürebilir. $t > r_0$ ise tasarım fiziksel olarak imkansızdır. Problemin formülasyonunu göstermek için, tasarım değişkenlerinin şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$x1 > x2,\ 127 > 6.35,$$

$$a_\iota \leq x1 \leq b_u,$$

$$50 \leq 127 \leq 200,$$

$$c_\iota \leq x2 \leq d_\iota$$

$$3 \leq 6.35 \leq 9$$

ve, $x1$= dış yarıçapı, r_0

$x2$ = duvar kalınlığı, t.

Tasarım Kısıtlamaları

Bu problem için tasarım kısıtlamaları, test sonuçlarından elde ettiğimiz deplasman değeri maksimum olarak kabul ederek amaç fonksiyonun kısıtlanmaktadır;

$$\delta_{vertical} = \frac{FL^3}{3EI} \leq \delta_{max} \tag{3.10}$$

İçi boş bir silindirik bölüm için alan atalet momenti şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$I = \frac{\pi(r_0^4 - (r_0 - t)^4)}{4} \tag{3.11}$$

$$I = \frac{3.14(127^4 - (127 - 6.35)^4)}{4}$$

Atalet momentin dikey sapma formülüne koyarak formülüne denk gelmektedir;

$$\delta_{vertical} = \frac{FL^3}{3EI} \leq 1736$$

Sonuçlardan elde edilen deplasman değeri $\delta_{vertical} \leq 1736$ mm'den her zaman eşit ya da küçük olması gerekmektedir.

```
Optimization terminated successfully    (Exit mode 0)
            Current function value: 0.065056256422830 85
            Iterations: 18
            Function evaluations: 62
            Gradient evaluations: 18
Optimal solution (X) : [161.09961139   3.         ]
Objective function value (fun) : 0.065056256422830 85
Optimization output (messgae): Optimization terminated
successfully
Optimization Success: True
```

Şekil 4.7. SLSQP yöntemin kullanarak optimizasyon sonuçları

Python tarafından verilen optimizasyon sonuçlarının açıklanması:

"Optimizasyon başarıyla sonlandırıldı (Çıkış modu 0)": Optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlandı ve çıkış kodu 0 olarak belirlendi. Bu, optimizasyon algoritmasının uygun bir sonuç ürettiğini ve işlemi başarıyla tamamladığını gösterir.

"Geçerli fonksiyon değeri": 0.06505625642283085": İterasyonun sonunda, optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen fonksiyon değeri 0.06505625642283085 olarak hesaplandı. Bu, optimizasyonun hedef fonksiyonun bu değere yakın bir minimumunu bulduğunu gösterir.

"İterasyonlar: 18" ifadesi, optimizasyon algoritmasının 18 kez bu değerlendirme ve güncelleme adımlarını gerçekleştirdiğini gösterir. Her iterasyonda, algoritma mevcut çözümünü iyileştirmeye çalışır ve hedef fonksiyonun değerini azaltmaya çalışır. Optimizasyon algoritması, her iterasyonda mevcut çözümünü güncellerken, belirli bir durma kriterine veya konverjans koşuluna ulaşıncaya kadar iterasyonları devam ettirir. Bu durma kriteri, genellikle belirli bir iterasyon sayısı, fonksiyon değerindeki değişim eşiği veya başka bir durumun gerçekleşmesidir.

"Fonksiyon değerlendirmeleri: 62": Optimizasyon algoritması, çözümü değerlendirmek için toplam 62 fonksiyon değerlendirmesi gerçekleştirdi. Bu, optimizasyon algoritmasının çeşitli noktalarda fonksiyonun değerini hesaplayarak en iyi çözümü bulmaya çalıştığını gösterir. Optimizasyon algoritması, fonksiyon değerlendirmeleri sayesinde hedef fonksiyonunun davranışını anlar ve en iyi çözümü bulmak için stratejisini ayarlar. Fonksiyon değerlendirmeleri, optimizasyon sürecinde önemli bir rol oynar ve daha iyi bir çözüm elde etmek için hedef fonksiyonunun değerini en aza indirmeyi hedefler.

" Gradyan değerlendirmeleri: 18": Optimizasyon algoritması, 18 kez gradyan değerini hesapladı. Gradyan, fonksiyonun eğimini gösteren bir vektördür ve optimizasyon algoritması, bu eğimi kullanarak çözüm alanında daha iyi yönlendirme yapmaya çalışır.

"En uygun çözüm (X): [161.09961139, 3]": Optimizasyonun en iyi çözümü [161.09961139, 3] olarak bulundu. Bu, optimizasyon algoritmasının, verilen kısıtlar ve hedef fonksiyon altında bu çözüme ulaştığını gösterir.

"Amaç fonksiyonu değeri (fun): 0.06505625642283085": Hedef fonksiyonun değeri, en iyi çözümün fonksiyonunun bu değerini alır. Bu, optimizasyonun en iyi çözümünün hedef fonksiyonun bu değerine karşılık geldiğini gösterir.

"Optimizasyon çıktısı: Optimizasyon başarıyla sonlandırıldı": Optimizasyon işlemi başarıyla tamamlanmasıyla oluşan bir bilgilendirme mesajıdır.

"Optimizasyon Başarısı: Doğru": Optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmaktadır.

4.3. Test Edilen Direğin Sonlu Eleman Çözüm Kullanarak Parametre Optimizasyon Sonuçları

```
Optimization terminated successfully    (Exit mode 0)
            Current function value: 0.07771439921651654
            Iterations: 11
            Function evaluations: 41
            Gradient evaluations: 10
Optimal solution (X) : 158.56197821735566 , 3.000000000026642
Objective function value (fun) : 0.07771439921651654
Optimization output (messgae): Optimization terminated successfully
Optimization Success: True
```

Şekil 4.8. Sonlu elemanlar yöntemin kullanarak optimizasyon sonuçları

Tabloda, bir optimizasyon işleminin başarıyla tamamlandığını ve en iyi çözümün verildiğini görmekteyiz. Tablodaki bilgiler şunları içermektedir:

"Optimizasyon başarıyla sonlandırıldı (Çıkış modu 0)": Optimizasyon işlemi başarıyla sonlandırıldığını belirtir. Çıkış modu 0, başarılı sonuçları ifade eder.

"Geçerli fonksiyon değeri: 0.7771439921651654": Şu anki işlev değeri, optimizasyon işleminin sonucunda elde edilen en iyi değerdir. Bu örnekte, işlevin değeri 0.7771439921651654 olmaktadır.

"İterasyonlar: 11": Optimizasyon algoritması, en iyi çözüme ulaşmak için toplamda 11 iterasyon yapmaktadır. Her iterasyon, bir önceki noktadan türetilen bilgileri kullanarak

hedef fonksiyonun değerini ve gradyanını hesaplar. Gradyan, fonksiyonun belirli bir noktadaki değişim hızını ve yönünü temsil eder. Gradyanı kullanarak, algoritma bir sonraki adımda nereye yönleneceğini belirler ve bu şekilde daha iyi bir çözüme yaklaşır.

"Fonksiyon değerlendirmeleri: 41": Toplam 41 fonksiyon değerlendirmesi yapıldı. Optimizasyon algoritması, bu sayıda işlev değerini hesaplamak için çeşitli noktaları denemektedir.

"Gradyan değerlendirmeleri: 10": Toplam 10 gradyan değerlendirmesi yapıldı. Bazı optimizasyon algoritmaları, gradyan bilgisini kullanarak daha hızlı ve doğru bir şekilde optimum noktayı bulur.

"En uygun çözüm (X): 158.56197821735566, 3.000000000026642": En iyi çözüm, X değeri 158.56197821735566 ve Y değeri 3.000000000026642 olarak elde edildi. Bu, optimizasyon işleminin sonucunda elde edilen en uygun noktadır.

"Amaç fonksiyonu değeri (fun): 0.7771439921651654": Hedef işlev değeri, en iyi çözümde elde edilen işlev değeridir ve yukarıdaki "Geçerli fonksiyon değeri" ile aynıdır.

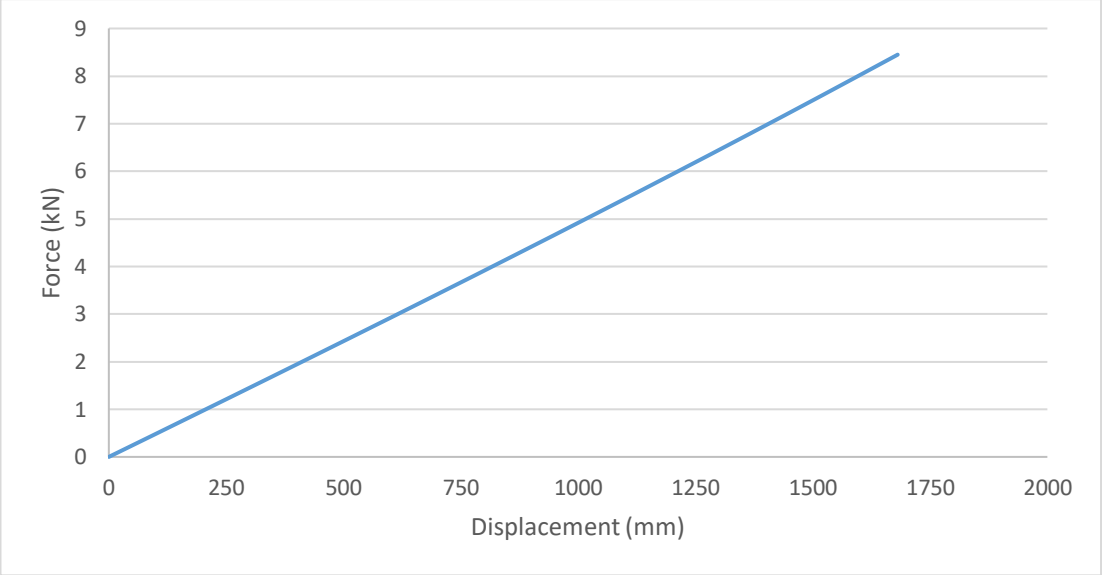
"Optimizasyon çıktısı: Optimizasyon başarıyla sonlandırıldı": Optimizasyon işlemi başarıyla sonuçlanarak bu mesajı gelmektedir.

"Optimizasyon Başarısı: Doğru": Optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmaktadır. Bu sonuçlar, optimizasyon sürecinin iyi çalıştığını ve en uygun çözümün verildiğini göstermektedir.

4.4. Optimizasyon Sonuçların Kullanarak Sonlu Eleman Modelinin Karşılaştırması

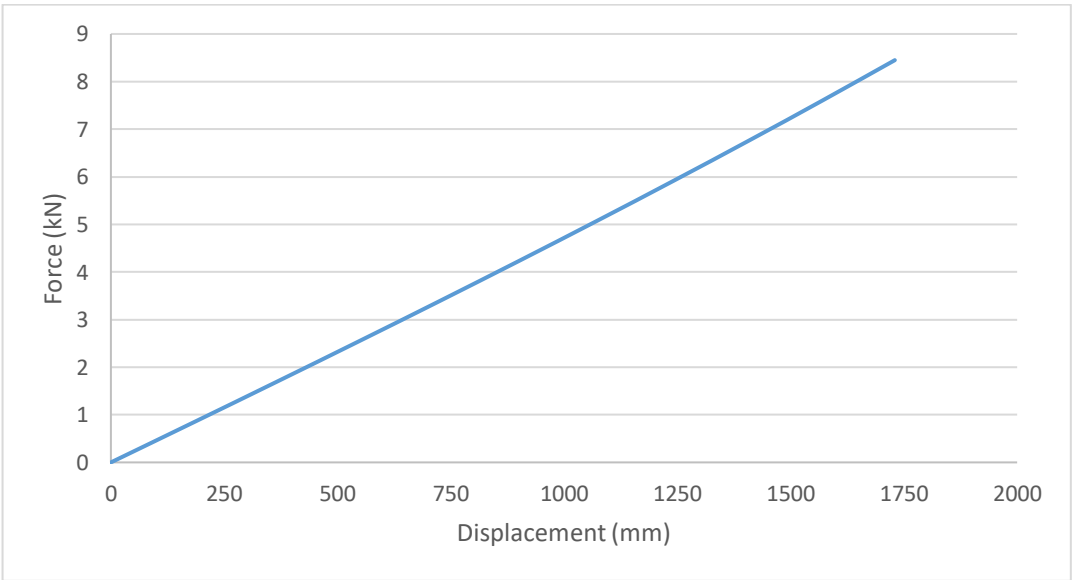
Python Analitik çözümüne göre optimizasyon sonuçları $r_0 = 161\,mm,\ t = 3\,mm$ parametreleri elde edilmektedir. Aynı materyal, yükleme ve sınır koşulların kullanarak

ABAQUS sonlu elemanlar tasarımı ve analizi yapılmaktadır. Analiz sonuçları 8.45 kN yükü uyguladığında deplasman 1681.02 mm eşit olmaktadır.



Şekil 4.9. Analitik çözüm sonucu

Python Sonlu elemanlar yöntemi ile optimizasyon sonuçları $r_0 = 158.56\,mm$, $t = 3\,mm$ parametreleri elde edilmektedir. Aynı materyal, yükleme ve sınır koşulların kullanarak ABAQUS sonlu elemanlar tasarımı ve analizi yapılmaktadır. Analiz sonuçları 8.45 kN yükü uyguladığında deplasman 1730.06 mm eşit olmaktadır.



Şekil 4.10. Sonlu elemanlar çözüm sonucu

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Test edilen direğin analitik çözümü ile direk modelinin r_0= 127 mm, t = 6.35 mm parametreleri kullanılarak elde edilen sonuçlar paylaşılmaktadır. Sonuçlar ise, 8,45kN dikey yük olarak uygulandığında oluşan deplasman 1727.84 mm'dir. Mohamed ve ark., (2019) aynı yük ve sınır koşulların uygulayarak yapılan test direğinin Çizelge 4.1'de göstermiş olup ve sonuçların doğrulanmış olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.1. Test edilen ve sonlu elemanlar direklerinin sonuçlarının doğrulanması.

Sonuçlar	Mohamed ve ark., (2019)	Test edilen modelinin sonlu elemanlar sonucu
Max.sehim (mm)	1736.06	1727.84
Max.düşey yük (kN)	8.45	8.45

Analitik çözüm kullanarak optimum parametreleri [r_0, t] = [161.0, 3.0] olarak sonuçlanmaktadır. Optimizasyon sorunu, optimizasyon algoritmasının 18 kez değerlendirme yaparak SLSQP yöntemi ile çözülmektir. Optimizasyon algoritması, çözümü değerlendirmek için toplam 62 fonksiyon değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.2. Analitik çözüm ve optimum parametreleri kullanarak direklerinin sonuçlarının karşılaştırılması.

Sonuçlar	Test edilen modelinin sonlu elemanlar sonucu	Optimum değer sonuçları
Max.sehim (mm)	1727.84	1681.02
Max.düşey yük (kN)	8.45	8.45
Ağırlık (ton)	0.130	0.0789

Sonlu elemanlar çözüm kullanarak optimum parametreleri [r_0, t] = [158.56, 3] olarak sonuçlanmaktadır. Optimizasyon algoritması, en iyi çözüme ulaşmak için toplamda 11 iterasyon yapmaktadır. Optimizasyon sorunu, optimizasyon algoritmasının 10 kez değerlendirme yaparak SLSQP yöntemi ile çözülmektir. Optimizasyon algoritması, çözümü değerlendirmek için toplam 41 fonksiyon değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Böylece, optimizasyon işlemi başarılı bir şekilde tamamlanmaktadır.

Çizelge 5.3. Analitik çözüm ile sonlu elemanlar çözüm kullanarak direklerinin sonuçlarının karşılaştırılması.

Sonuçlar	Analitik çözüm ile optimum değer sonuçları	Sonlu elemanlar çözüm ile optimum değer sonuçları
Max.sehim (mm)	1681.02	1730.06
Max.düşey yük (kN)	8.45	8.45
Ağırlık (ton)	0.0789	0,077

Python analitik çözüm SLSQP algoritması ile çözülen elektrik direk sonlu eleman modelinin optimum ağırlığı 0,0789 ton'dur. Elektrik direğinin sonlu elemanlar çözümü ile çözülen modelinin ağırlığı 0,077 ton'dur.

Test çalışmasının amacı performans ve tasarım sınırlamalarını karşılayarak direğin ağırlığını dolaysıyla maliyetini en aza indirmektir. Mohamed ve arkadaşları, (2019) oluşturduğu makalede kullanılan parametreler ile yapılmakta olan direğin ağırlığı 0.130 ton'dur. Sonlu elemanlar çözümü ile elde edilen optimum direk ağırlığı ise 0.077 ton olmaktadır. Deplasman sonuçları 1736.06 mm iken Sonlu elemanlar çözümü ile elde edilen deplasman sonuçları 1730.06 mm'dir. Dolaysıyla, bu tez çalışması performans ve tasarım sınırlamalarını hesap ederek hem ağırlığı minimize etmekte hem de deplasmanı azaltmaktadır. Elektrik direklerinin ağırlığını azaltmak, enerji ve maliyet tasarrufu sağlamak, daha kolay taşınabilirlik, montaj imkânını sunmak ve çevresel etkileri azaltmak gibi birçok avantaj sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

Abaqus, V. 2017. 6.14 Documentation/User Manual, Dassault Systemes Simulia Corporation

Kaw, A.K. (2006). Mechanics of Composite Materials. CRC Press.

Şahin Y. (2022). Kompozit Malzemelere Giriş, Ankara

Ballinger, C., (1990), *Structural FTP Composites,* ASCE Civil Engineering, July 1990, pp.63-66.

Emrecan Köknar (2010). "Elektrik Enerji Sistemlerinin İstatistiksel Veriler Kullanılarak Ekonomik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Fouad H.F. and Mullinax, Jr., E.C., (2000). *FRC Poles for Distribution Power Lines*. Advanced Technology in Structural Engineering.

Lin ZM. (1995). "Analysis of pole-type structures of fibre-reinforced Plastics by finite element method", Ph.D. Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.

Lubin G., "Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites", New York (1969)

Desai, N. and Yuan, R. (2006). *Investigation of Bending/Buckling Characteristics for FTP Composite Poles*. Proceedings of Earth & Space, American Society of Civil Engineers.

Saafi, M. ve Asa, E (2010). *Extending The Service Life of Electric Distribution and Transmission Wooden Poles Using a Wet Layup FTP Composite Strengthening System*. Journal of Performance of Constructed Facilities, American Society of Civil Engineers, Vol. 24, No. 4.

Metiche, S. and Masmoudi, R (2013). Analysis and Design Procedures for the Flexural Behavior of Glass Fiber-reinforced Polymer Composite Poles. Journal of Composite Material, Vol. 47, No.2, pages 207-229.

Sara Mohamadi (2016). "Finite Element Analysis of Fiber-Reinforced Polymer Composite Electric Poles", MSc.D. Thesis, George Mason University Fairfax, VA

Yapı Malzemesi Ders Notları Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL

Hamdy M. Mohamed. (2021). *Analysis of Fibre Reinforced Polymer –Poles Made Using Filament Winding Technique*. Quest Journals, Journal of Architecture and Civil Engineering, Volume 6 ~ Issue 12 (2021) pp: 20-25

Omar I. Abdelkarim, Jose M. Guerrero, Hamdy M. Mohamed, Brahim Benmokrane. (2019). *Behavıour of pultruded glass fibre-reınforced polymer utılıty poles under lateral loads*. CSCE Annual Conference, June 12 - 15, 2019.

Grant A. E. Soremekun. (1997). "Genetic Algorithms for Composite Laminate Design and Optimization", MSc.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Hamdy M. Mohamed, R. Masmoudi. (2009). Design Optimization of GFTP Pole Structures Using Finite Element, COMPOSITES & POLYCON 2009, American Composites Manufacturers Association, January 15-17, 2009.

Hasan Bozkurt. (2019). "Türkiye elektrik iletim şebekesinde kullanılan kafes direklerin darbe empedanslarının analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Abaqus, V., 2017, "Abaqus Scripting Reference Guide" Retrieved from http://docs.software.vt.edu:8080/abaqus/v2017/English/DSSIMULIA_Established.htm

Abaqus, V., 2017, "Parametic Modeling," Retrieved from https://abaqusdocs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMODRefMap/simamod-c-parinput.htm

Overvelde, J.T.B. Learn Abaqus Script in One Hour. (2010). Retreieved from bertoldi.seas.harvard.edu/files/bertoldi/files/learnabaqusscriptinonehour.pdf.

ABAQUS version 6.6 Documentation. 15.1.1 Scripting parametric studies. https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt04ch15.html#usbpchapter

Yongyan Sun (2019). "A Structural Optimization Scripted Software System", MSc.D. Thesis, Blacksburg, VA.

Jasbır S. Aurora, "Introduction to optimum design", 2012, Iowa. 3. Basım

Yang, X. S. and S. Koziel (2011). Computational Optimization: An Overview. Computational Optimization, Methods and Algorithms. 356: 1-11.

George Papazafeiropoulos, Miguel Muñiz-Calvente ve Emilio Martínez-Pañeda (2017) Abaqus2Matlab: *A suitable tool for finite element post-processing*. Advances in Engineering Software.

Gupta, M., Gupta, B., 2018. An Ensemble Model for Breast Cancer Prediction Using Sequential Least Squares Programming Method (SLSQP). 2018 *Eleventh International Conference on Contemporary Computing* (IC3), Noida, Hindistan, 2- 4 Ağustos.

Han, S. P. (1977). A globally convergent method for nonlinear programming. Journal of Optimization Theory and Applications, 22(3), 297-309.

Tahir Eren MUNGAN. (2019). “An Optımızatıon Approach To Autonomous Parallel Parkıng”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

O.Abdelkarim, H.Mohamed, B.Benmokrane, (2019). “Flexural Testing of Pultruded Fiber-Reinforced Polymer Composite Distribution Poles Class C5”. Technical Report

Dowling, N. E. (2013). Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Boston, Pearson.

Budynas, R. G., et al. (2011). Shigley's mechanical engineering design. New York, McGraw-Hill.

Gael Varoquaux, Emmanuelle Gouillart, Olav Vahtras et al. Scipy Lecture Notes, https://hal.inria.fr/hal-01206546, 2015

Dieter KRAFT, (1988). A Software Package for Sequential Quadratic Programing, Forschungsbericht

Schmit LA Jr (1971) Structural synthesis 1959–1969: A decade of progress, Recent Advances in Matrix Methods of Structural Analysis and Design. Univ. Alabama Press, Tuscaloosa, pp 565–634

Choi, W. H., et al. (2016). Comparison study of some commercial structural optimization software systems. Structural and Multidisciplinary Optimization. 54: 685-699.

Raphael T. Haftka, Jaroslaw Sobıeszczanskı-Sobıeskı. (2009), Structural Optimization: History. University Florida, Gainesville, USA.

Fatih Mehmet ÖZKAL. (2006). “Evrimsel Yapı Optimizasyonu İle Kirişlerde En Uygun Tasarımın Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye.