

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSENEL YÜKLÜ TEL HALAT DEMETLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABDULLAH TOMBAK

HAZİRAN 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKSENEL YÜKLÜ TEL HALAT DEMETLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdullah TOMBAK

DANIŞMAN: Doç. Dr. Yusuf Aytaç ONUR

ZONGULDAK
Haziran 2019

KABUL:

Abdullah TOMBAK tarafından hazırlanan “Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Modellenmesi ve Analizi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 19/06/2019


Danışman: Doç. Dr. Yusuf Aytaç ONUR

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Prof. Dr. Hamdi Alper ÖZYİĞİT

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şenol MERT

Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2019



Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Atombak .

Abdullah TOMBAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSENEL YÜKLÜ TEL HALAT DEMETLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Abdullah TOMBAK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yusuf Aytaç ONUR

Haziran 2019, 93 sayfa

Kullanım yerine göre birçok farklı malzemeden üretilen halatlar, yüklerin kaldırılması, taşınması ve bağlanması gibi ağır işlerde kullanılmaktadır. Çelik tel halatlar, her türlü sanayi dalında taşıyıcı eleman olarak görev almaktadır. Asansör, kren, teleferik ve telesiyej sistemlerinde, maden işletmelerinde, denizcilikte yük kaldırma ve iletme elemanı olarak sıklıkla kullanılan tel halatlar, sahip oldukları avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle esnek bir yapıya sahip olması ve çok sayıda telden oluştuğundan dolayı yükü bu tellere dağıtması, işletme emniyetini yükseltir.

Çelik tel halatların emniyetli taşıma aralıkları ve taşıyabileceği maksimum yüklerin bilinmesi oldukça önemlidir. Literatürü incelediğimizde yaklaşık 50 yıldır, halatların taşıyabileceği yükleri ve gerilmeleri tespit edebilmek için çeşitli deneysel, analitik ve üç boyutlu model analizi çalışmaları yapıldığı görülebilir.

ÖZET (devam ediyor)

Bu çalışmada, merkezde bir öz etrafına helisel olarak sarılan 6 telden oluşan bir çelik halat demeti incelenmiştir. İlk olarak, Love'nun denge denklemleri ve Costello'nun Çubuk Teorisi ile analitik hesaplar yapılmıştır. Halatın maruz kaldığı maksimum aksenal kuvvet, burulma momenti ve gerilmeler hesaplanmıştır. Daha sonra ANSYS programında çelik tel halat demeti modellenerek sürtünmeli ve sürtünmesiz durumlar için sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Elde edilen analitik sonuçlar ile ANSYS'de elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılıp, tartışılmıştır. Sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çelik tel halat demetleri, Sonlu elemanlar metodu (SEM),

Bilim Kodu: 625.02.00

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

AXIALLY LOADED WIRE ROPE STRANDS MODELING AND ANALYSIS

Abdullah TOMBAK

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Yusuf Aytaç ONUR

June 2019, 93 pages

Ropes are used for hard works lifting loads, such as transportation and sling where those are manufactured by many different materials in accordance with place of use. Steel wire ropes are used as carrier elements in all branches of industry. Wire ropes, which are frequently used in elevator, crane, aerial ropeway systems, mine hoisting, offshore systems as material shandling equipment which are preferred because of their advantages. In particular, it has a flexible structure and consists of many wires to distribute the load on these where it. Increases operational safety. It is very important to know the safely transport ranges and maximum load lifting capacities of steel wire ropes. When we examine literature, for about 50 years. In order to determine rope lifting capacity and stresses occurred on ropes, various experimental, analytical and three-dimensional model analysis studies can be seen.

In this study, which consists of six outer wires wrapped helically around are a steel rope strand has been investigated. First, analytical calculations have been conducted by using Love's equilibrium equations and Costello's bar theory. Maximum axial force, twisting moment and stresses occurred on rope have been calculated.

ABSTRACT (continued)

Then, steel wire rope strand has been modelled and finite element analyses have been performed by frictional and frictionless conditions. Results obtained by ANSYS and results obtained by analytical calculations have been compared and discussed. The results have been found consistent with each other.

Key Words: Steel wire rope strands, Finite element method (FEM)

Science Code: 625.02.00



TEŞEKKÜR

Bu alıŐmaya baŐladıđım günden itibaren desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen tez danıŐmanım sayın Do. Dr. Y. Ayta ONUR'a katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

En baŐından beri gosterdikleri büyük sabır, özveriden dolayı ve umutsuzluğa kapıldığım anlarda motive ederek yüksek lisans tezimi bitirmemi sağladığından dolayı sevgili eŐim Zeynep TOMBAK ve biricik oğlumuz Yusuf Enes TOMBAK'a teŐekkürü borç bilirim.

BaŐta rahmetli babam Yusuf TOMBAK ve kayınpederim Remzi TAŐTEKİN olmak üzere beni bu hayata hazırlayan tüm aileme canı yürekten teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 HALATLAR.....	11
2.1 TEL HALATLARIN YAPISI	15
2.1.1.Halat Adımı (Hatvesi).....	16
2.1.2 Halat Çapı Ölçümü	17
2.1.3 Halat Sarım Yönü	17
2.1.4 Halat Anma Dayanımı	19
2.1.5 Tel Halat İmalatında Kullanılan Malzemeler	19
2.1.5.1 Parlak Alaşimsız Tel	19
2.1.5.2 Parlak Alaşımlı Tel.....	20
2.1.5.3 Çinko Kaplı Tel.....	20
2.1.6 Tel Halatların İmalat Yöntemleri.....	21
2.2 TEL HALAT ÇEŞİTLERİ	22
2.2.1 Yuvarlak Demetli Halatlar	22
2.2.2 Üçgen Demetli Halat.....	22
2.2.3 Oval Demetli Halat	23

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.2.4 Kapalı Tip Halatlar	24
2.2.5 Dönmez Tip Halatlar.....	24
2.3 DEMET KOMPOZİSYONLARINA GÖRE HALATLAR.....	25
2.3.1 Tek Operasyonlu Tel Halatlar.....	25
2.3.1.1 Standart Demetler.....	26
2.3.1.2 Seale Demetler	26
2.3.1.3 Warrington Demeti.....	27
2.3.1.4 Warrington-Seale Demetler.....	27
2.3.1.5 Filler Demetler	28
2.3.1.6 Seale-Filler Demeti	28
2.3.2 Çok Operasyonlu Tel Halatlar	29
BÖLÜM 3 HALAT TELİNİN DENGESİ.....	31
3.1 HALAT TELİNİN KİNEMATİĞİ.....	31
3.2 İNCE BİR TELİN Denge Denklemleri.....	33
3.3 İNCE BİR TELİN Denge Denklemleri.....	38
BÖLÜM 4 HALAT DEMETİNİN STATİK DAVRANIŞI	41
4.1 BASİT HALAT DEMETİNİNİ GEOMETRİSİ	41
4.2 BASİT DÜZ BİR HALAT DEMETİNİN EKSENEL DAVRANIŞI	44
4.3 HALAT DEMETİNDE OLUŞAN GERİLMELERİN BULUNMASI.....	51
BÖLÜM 5 HALAT DEMETİNİN YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ.53	
BÖLÜM 6 EKSENEL YÜKLÜ HALAT DEMETİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ. 65	
6.1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ.....	65
6.2 SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (ANSYS WORKBENCH)	66
6.2.1 Yapısal Analiz İçin Malzemenin Özelliklerinin Tanımlanması	67

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
6.2.2 Sınır Şartlarının ve Çözüm Yöntemlerinin Belirlenmesi.....	70
6.2.2.1 Kontakların Tanımlanması.....	71
6.2.2.2 Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	72
6.2.2.3 Gerilme Analizinin Çözümü	75
BÖLÜM 7 SONUÇLAR.....	77
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ	93





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1	Gebze-Orhangazi-İzmir Otoyol Projesi'nde 21 Mart 2015 tarihinde halat kopmasından kaynaklanan bir kaza	2
Şekil 1.2	Stonava ve arkadaşlarının modellediği spiral 2 katmanlı oval halat.....	8
Şekil 2.1	M.Ö. 2000 Mısır'da halat üretimi	11
Şekil 2.2	Mısır'da halat uygulaması (M.Ö. 2000)	12
Şekil 2.3	San.Pietro Meydanı'na dikili taşın taşınması (1586).....	13
Şekil 2.4	Albert halatı.....	14
Şekil 2.5	Tel Halatın Yapısı	16
Şekil 2.6	Tel halata ait değerler.....	16
Şekil 2.7	Halat çapını doğru ölçme yöntemi.....	17
Şekil 2.8	Halat sarım yönleri.....	18
Şekil 2.9	IWRC (Bağımsız Tel Özlü Halat) Sarım yönlerinin modellenmesi	18
Şekil 2.10	Yuvarlak demetli halat	22
Şekil 2.11	Yuvarlak demetli halat	23
Şekil 2.12	Oval demetli halat	23
Şekil 2.13	Kapalı tip halat	24
Şekil 2.14	(a)Dönmez tip halatı, (b) Dönmez tip halatta yük altında oluşan döndürme momentleri.....	25
Şekil 2.15	Tek operasyonlu tel halatlar.....	25
Şekil 2.16	Standart halatlar	26
Şekil 2.17	a) Çelik özlü seale halat demeti, b) Lif özlü seale halat demeti.....	26
Şekil 2.18	Warrington halatı	27
Şekil 2.19	Warrington-Seale halatı	27
Şekil 3.1	Eğilmiş ince telin deformeli ve deformesiz hali	31
Şekil 3.2	Dikdörtgen kesite sahip yüksüz helisel tel.....	32
Şekil 3.3	İnce bir halat teline etki eden yükler	34

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.4	İnce bir halat telinin, y eksenini aşağı dönük vaziyette, merkez eksen çizgisi	34
Şekil 3.5	İnce bir halat telinin, x eksenini aşağı dönük vaziyette, merkez eksen çizgisi	35
Şekil 3.6	İnce bir halat telinin, y ekseninden bakıştaki momentleri ve merkez hattı (kuvvetle hariç).....	36
Şekil 3.7	İnce bir halat telinin, x ekseninden bakıştaki momentleri ve merkez hattı (kuvvetler hariç)	36
Şekil 4.1	Yük altındaki basit halat demetinin geometrisi.....	41
Şekil 4.2	Demet eksenine dik ince tel kesiti.....	42
Şekil 4.3	Helisel halat teline etki eden yükler	46
Şekil 4.4	Dış tellerin merkez eksenlerinin çizdiği helisel açı	47
Şekil 5.1	Tez çalışmasında kullanılan tel halat demetinin iç, dış çapı ve hatvesi.....	53
Şekil 5.2	Eksenel yükün merkez ve dış tellere dağılım oranları	61
Şekil 6.1	1+6 Helisel ASTM A416 öngerilmeli halat demeti ve kesiti	66
Şekil 6.2	1+6 Ansys Workbench programının arayüzü	66
Şekil 6.3	Ansys programında girilen malzeme özelliklerin görseli (Engineering data adımı).....	67
Şekil 6.4	Solid programında çizilen geometrinin görseli.....	68
Şekil 6.5	Ansys programında girilen geometrinin görseli.....	69
Şekil 6.6	Solid 186 elemanı.....	69
Şekil 6.7	Geometrik modelleme üzerinden yapılan mesh görüntüleri	70
Şekil 6.8	Sürtünlü gerilme analizi için kontak tanımı	71
Şekil 6.9	Sürtünmesiz gerilme analizi için kontak tanımı.....	71
Şekil 6.10	Sınır şartlarının tanımı	72
Şekil 6.11	Halatın merkez ve dış tellerine uygulanan kuvvetler.....	73
Şekil 6.12	Connections bölümünden kontak ayarlarının yapılması	74
Şekil 6.13	Ansys programında solution bölümü	75
Şekil 7.1	Demete ait, merkez tel, dış teller ve toplam eksenel kuvvet ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki.....	79
Şekil 7.2	Demete ait, merkez teldeki çekme gerilmesi ve dış tellerdeki çekme gerilmesi ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki.....	80
Şekil 7.4	Sürtünlü halat için eş değer gerilim sonuçları.....	84

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 7.5	Sürtünmesiz halat için eş değer gerilim sonuçları	84
Şekil 7.6	Demete ait emniyet faktörü ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki	85





ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Tel halat çeliğinin içerisinde bulunan elementlerin yüzde oranları.....	19
Çizelge 3.1 Kuvvetlerin doğrultu kosinüsleri	35
Çizelge 3.2 Momentlerin doğrultu kosinüsleri.....	37
Çizelge 5.1 Hesaplamalarda kullanılan halat demetinin özellikleri	53
Çizelge 5.2 Costello Denklemleri kullanılarak elde edilen değerler.....	63
Çizelge 6.1 ASTM A416 sınıf 270 PC Malzeme Mekanik Özellikleri	67
Çizelge 6.2 Mesh Karakteristik Özellik Tablosu	70
Çizelge 6.3 Kontak tespit yöntemleri ve kullanım yerleri	74
Çizelge 7.1 Costello ile sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırılması	77
Çizelge 7.2 Demete ait, merkez tel, dış teller ve toplam eksenel kuvvet ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki.....	81
Çizelge 7.3 Demete ait, merkez teldeki çekme gerilmesi ve ,dış tellerdeki çekme gerilmesi ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki	82
Çizelge 7.4 Demete uygulanan maksimum burulma momenti ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki	83
Çizelge 7.5 Demete ait emniyet faktörü ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki.....	85



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

s	: Tel boyundaki yay uzunluğu
N	: x Ekseni ekseni doğrultusundaki kesme kuvveti bileşeni
N'	: y Ekseni ekseni doğrultusundaki kesme kuvveti bileşeni
T	: Teldeki aksenal çekme kuvveti
G	: x Ekseni doğrultusundaki eğilme momenti bileşeni
G'	: y Ekseni doğrultusundaki eğilme momenti bileşeni
X, Y, Z	: Sırası ile x, y, z eksenleri doğrultusundaki telin merkez çizgisi üzerinde birim boydaki dış yükleri
H	: Teldeki burulma momenti
K	: x Ekseni doğrultusunda birim boydaki dış moment
K'	: y Ekseni doğrultusunda birim boydaki dış moment
Θ	: z Ekseni doğrultusunda birim boydaki dış moment
κ	: x Ekseni doğrultusunda eğrilik bileşeni
κ'	: y Ekseni doğrultusunda eğrilik bileşeni
τ	: Telin birim boydaki burulması
E	: Halat malzemesinin elastisite modülü
ν	: Halat malzemesinin poisson oranı
ε	: Halatın birim şekil değişimi
ξ	: Halat tellerinin aksenal uzaması
β	: Halatın yada telin dönme değeri
α	: Tel sarım açısı (Helis açısı)
θ	: Burulma açısı
r	: Halatın Helis yarıçapı
R	: Halat tellerinin yarıçapı
h	: Halat yay boyu
l	: Halat tel boyu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

P	: Helisel tel hatvesi
P, q	: Birim boydaki çizgi yükü
M	: Halat burulma momenti
F	: Halata etki eden eksenel kuvvet
m	: Halat katmanlarındaki tel sayısı
σ_i	: i nolu teldeki çekme gerilmesi
$M\sigma_i$: i nolu Teldeki burulma gerilmesi
$T\sigma_i$: i nolu Teldeki çekme gerilmesi
$G'\sigma_i$: i nolu Teldeki maksimum eğilme gerilmesi
$H\sigma_i$: i nolu Teldeki burulma gerilmesi

KISALTMALAR

BTHÖ	: Bağımsız tel halat özü
SEM	: Sonlu elemanlar Metodu
WCS	: Çelik özlü halat

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tel halatlar, dayanıklılık ve esneklik özelliklerini bir arada bulundurmasıyla çok farklı mühendislik disiplinlerinde kendine önemli bir yer bulmuştur. Kullanım alanları incelendiğinde, asansör, köprü, vinç, teleferik, denizcilik, maden işletmeleri gibi alanlarda hareketin bir noktadan başka bir noktaya açısal ya da düzlemsel olarak iletilmesi, yükün bağlanması, taşınmasında ve taşıyıcı sistemlerde kullanılır.

Tel halatların, çalıştıkları ortamlara göre farklı özellikte imal edilebilmesi işletme personeli açısından çok önemli bir avantajdır. Örneğin denizcilik alanında kullanılacak halatlar tuzlu suyun ve nemin korozyon etkisinden izole edilmesi gerekir. Bu şekilde dış etkilerden etkilenmeyen, uzun kullanım ömürlerine sahip, periyodik bakımları dışında başka bir iyileştirme işlemine gerek duymayan halatlar üretilebilir. Düzenli bakımları yapılan tel halatların hizmet ömürleri önemli ölçüde artacaktır [1].

Mekanik özellikleri ve işletme ömürleri tam olarak bilinmeyen tel halatların kullanımı işletmelerde çok ciddi zararlara yol açmaktadırlar. Şekil 1.1'deki Gebze-Orhangazi-İzmir Otoyol Projesi'nde 21 Mart 2015 tarihinde halat kopmasından kaynaklanan kaza örnek olarak gösterebilir. Meydana gelen kazada, asma köprü kablo montajı esnasında çalışma platformu olarak kullanılmak üzere inşası süren ve kedi yolu diye adlandırılan sistemin kablosu koparak maddi zarara neden olmuştur. Bu örnekteki gibi kazaların önlenmesi için bir tel halat işletme personeli, halatın, bakımı, kontrolü, dayanım sınırı, taşıyacağı maksimum yük, esnekliği vb. gibi özelliklerini bilmesi gerekmektedir.



Şekil 1.1 Gebze-Orhangazi-İzmir Otoyol Projesi'nde 21 Mart 2015 tarihinde halat kopmasından kaynaklanan bir kaza [2]

Tel halatlar, çelik tellerin belirli bir kompozisyonunda bir araya gelmesiyle meydana gelir. Bu şekilde çelik tellerin oluşturduğu yapıda, taşınacak yükün çelik tellere homojen olarak dağıtılması sağlanır. Böylece yerel kırılmaları önlemek amacıyla yapıyı bölerek çeliğin daha yüksek gerilme değerlerine ulaşmasına imkân sağlar. Yapının bölünmüş olması yerel hasarları da tolere edeceğinden halatların tokluk değerlerini de artırmış olur [3].

Tel halatların eğilme ve burulması ile ilgili yapılan hesaplamaların temeli 1906 yılına A.E.H. Love tarafından geliştirilen denge denklemine dayanır. Fiziksel koşullardan kaynaklanan sınır şartlarına bağlı olarak birçok halat problemi, Love'nın denge denklemleriyle çözülebilmektedir [4].

Costello'nun geliştirdiği denklemlerde, tel halatların yapısının karmaşıklığından dolayı, sürtünme ve temas etkilerinin izole edildiği basit demet kesitleri şeklinde ele alınması problemin çözümünde yardımcı olmuştur. Ayrıca kullanılan modelleme ve sonlu elemanlar analizi yapan bilgisayar programları ihmal edilen her türlü çalışma koşullarında sonuç almayı mümkün kılmaktadır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde halatların öneminden bahsedilerek, halatların analitik hesapları ve model analizleri ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar

kronolojik sıra ile sunulmuştur. İkinci bölümde, halatların tarihsel gelişiminden bahsedilmiştir. Daha sonra halatların yapısal özellikleri, çeşitleri ve kompozisyonları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, halat telinin kinematığından bahsedilerek, halatı oluşturan tellere ait denge denklemleri verilmiştir. Dördüncü bölümde ise, basit bir halat demetinin geometrisi incelenerek, aksel davranışı, gerilim değerleri ve yük altındaki deformasyonu incelenmiştir. Konu ile ilgili denklemler sunulmuştur.

Beşinci bölümde, ASTM A416 sınıf PC 270 malzemesinden elde edilen bir halat demetine ait gerilme hesabı yapılarak, ölçüleri bilinen halat demetinin maruz kaldığı maksimum aksel yükler, maksimum burulma momentleri ve gerilmeler hesaplanarak tablo halinde verilmiştir. Altıncı bölümde, analitik denklemlerle elde edilen sonuçların doğruluğunun kanıtlamak amacıyla, bir halat demeti modeli çizilerek, Ansys programı kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Yapılan gerilme analizinde sürtünmeli ve sürtünmesiz durumlar için ayrı ayrı ele alınarak tablo halinde sunulmuştur. Sürtünmeli durum için, sürtünme katsayısı 0.115 olarak alınmıştır [5, 6].

İnsanlar, tarih boyunca, buldukları bölgenin özelliklerine göre çok farklı malzemelerden halat üretmişlerdir. M.Ö.7.yy'ın sonlarında Ninavah Harabeleri'nde bakır bir kablo kalıntısına rastlanmıştır [7]. Fakat bugün kullandığımız tel halatların temelini 19. yy'ın başlarında Wilhelm August Julius Albert isimli bir Alman Mühendis tarafından geliştirilerek madenlerde kullanılmıştır [8].

A.E.H. Love'un 1944 yılında yayınladığı çalışmada "Klasik Tel Halat Teorisi'nin" temellerini atmıştır. Love, yaptığı çalışmada sürtünme etkisi olmadan halat geometrisini daha basite indirgemeye çalışmıştır. Daha sonra 1977'de Costello'nun da kullanıp geliştireceği "Denge denklemlerini" literatüre kazandırmıştır [4]. Costello ve Sinha, 1977 yılında bir merkez tel ve etrafına sarılı tellerden oluşan bir halat demeti üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Costello ve Sinha halatların statik tepkisini belirlerken halattaki tellerin arasında sürtünme olmadığı kabulünü yapmışlardır. Halattan ölçtükleri gerilmeler ile aksel yük miktarı arasında doğrusal bir fonksiyon olduğunu göstermişlerdir [9].

1971 yılında Wettstein'in yaptığı çalışmada, seçilen 12 ülkede orman ürünlerinin taşınmasında kullanılan tel halatların dayanım sürelerini ve gerilme değerlerini incelemiştir. Elde edilen

sonuçların tahmini olduğu ve özellikle taşıyıcı tel halatlar için güvenilir bir sonuç vermenin güçlüğü işaret edilmiştir [10].

Knapp'ın 1975 yılında yayınladığı makalede, ilk ikisi geleneksel çelik kablolardan ve üçüncüsü Kevlar-79 zırh tellerinden üretilen üç farklı halatı incelemiştir. Bu halat tasarımlarının laboratuvar testleri ile teorik hesaplamalarını karşılaştırmıştır. Kablonun çekirdeğinin sert ve bölgesel yer değiştirmelerin yeterince küçük olduğu kabul edilirse doğrusal halat denklemlerinin daha iyi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Tel halatlara ait bazı mekanik özelliklerini saptamaya çalışmıştır [11].

1981 yılında Butson tarafından yayınlanan doktora tezinde, tel halatların gerilmelere dayanıklı olduğu halde bükülmeye karşı çok fazla direnç gösteremediği vurgulanmıştır. Ayrıca, Costello'nun geliştirdiği tel halat teorisini kullanarak halatların statik davranışlarını incelemiştir. Ayrıca halatlarda titreşimin etkisi araştırmıştır [12].

1981 tarihinde Velinsky'nin yayınladığı doktora tezinde BTHÖ (Bağımsız tel halat özü) halat demeti üzerinde Love'nun denge denklemlerini kullanarak teorik hesaplar yapılmıştır. BTHÖ ve lif özlü halatlara ait deneysel sonuçları ve teorik sonuçları karşılaştırmış ve birbirleriyle tutarlı olduğunu gösterilmiştir [13]. Velinsky 1985 yılında yazdığı makalede Costello'nun geliştirdiği klasik halat teorisi üzerinde çalışmalar yapmıştır [14]. Benzer bir çalışmayı da 1986 yılında LeClair yazdığı doktora tezinde de görebiliriz. LeCair halat telleri üzerindeki gerilme ve enine kayma miktarları ile ilgili hesaplamalar yapmıştır [15].

Costello, 1983 yılında yayınladığı bir makalede çok katmanlı halat kablolarının maruz kaldığı gerilmelerinin hesaplanmasını sağlayan bir teori geliştirmiştir. Ayrıca bir kasnağa sarılı halatlar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Costello'ya göre halatlar iyi yağlandığında ve eksenel yükler çok büyük olmadığında sürtünme ihmal edilebilirdi. Eksenel yükler ve eksenel burulma momentinin, eksenel gerilmenin doğrusal bir fonksiyonu olduğunu işaret etmiştir [16].

1984 yılında yayınlanan doktora tezinde Chien, tel halatların en önemli sorunlarından birinin halat ömürlerinin doğru belirlenememesi olduğunu vurgulamış ve halat ömürleri ile halat içindeki tellerde meydana gelen kırılmalar üzerinde çalışmıştır [17]. Zhang, 1994 yılındaki çalışmasında telin titreşim ve yorulma değerlerini incelemiştir. Costello'nun tel halat teorisine dayanan bir yorulma teorisi geliştirmiştir [18]. 1996 yılında Sathikh ve arkadaşları simetrik

modeller oluşturarak halatların mekanik özelliklerini hesaplamışlardır. Daha sonra analitik sonuçlarla karşılaştırmışlardır [19].

Fekr, 1999 yılında sonlu elemanlar yöntemiyle 3 katmanlı bir halatı modelleyerek halatların mekanik özelliklerini çıkarmaya çalışmıştır. Fekr, hem sürtünmeli hemde sürtünmesiz olarak hesap yapmıştır. Sonuçların laboratuvar sonuçlarıyla uyumlu olduğunu göstermiştir. Sürtünmenin, halattaki titreşimi sönümlenmesine yardımcı olduğunu vurgulamıştır [20].

Yardibi'nin 2000 yılındaki yüksek lisans çalışmasında, Love'nun denge denklemleri ve Costello'nun halat teoremi kullanılmıştır. Çeşitli örneklerle tel halat demetini ve tambur üzerine sarılmış halatların mekanik özelliklerinin hesaplanması yapılmıştır. Sonuçlar grafik üzerinde verilmiştir [21]. Costello, 2003 yılında yazdığı makalede tel halatların kullanım yerleri ve öneminden bahsetmiştir. Ayrıca 1977 yılında literatüre kattığı klasik halat teoremini tekrar incelemiştir [22].

Elata, Eshkenazy ve Weiss'in 2004 yılında yaptıkları çalışmada, çeşitli halat demetlerinin simülasyonunu hazırlayıp, halatların mekanik özelliklerini yorumlamışlardır. Ayrıca ürettikleri test aparatlarıyla deforme ettikleri halatları test edip sonuçları, analiz programları ile elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır[23]. Aynı yıl, Ghoreishi ve arkadaşları benzer bir çalışmayı sentetik demirleme halatları ile yapmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerin sonuçları ile Costello'nun teoremi kullanılarak bulunan değerleri karşılaştırmışlardır [24]. Ghoreishi ve arkadaşları 2007 yılında sentetik halatların mekanik özelliklerinin saptanması amacıyla modelleme ve deneylerle desteklenen 2 bölüm halinde makaleler yayınlamışlardır [25, 26].

Ziegler ve Wehking, 2006 yılında bir konferansta sundukları makalede, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak halat ömürlerini tespit etmeye çalışmışlardır. Ayrıca 32 farklı tel tipi kullanarak yaklaşık 5000 fazla tel numunesini büküm test aletleri ile test etmişlerdir. Dayanıklılık limitlerini ve servis ömürlerini belirlemek için burulma ve ters büküm testleri yapmışlardır [27].

Yılmaz (2007), sunduğu yüksek lisans tezinde, tel halatların yapısal ve mekanik özellikleri, özellikle madencilikte kullanılan halatlarının seçimi, depolanması, bakımı, muayene yöntemleri ve kullanımı sırasında karşılaşılan sorunlar hakkında detaylı bir çalışma yapmıştır [28]. 2016 yılında

Singh ve arkadaşları madenlerde kullanılan iki halat türünün olumsuz sonuçlarından ve sebeplerinden bahsetmişlerdir [29].

Şentürk'ün 2007 yılında hazırladığı yüksek lisans çalışmasında, sonlu elemanlar metodu kullanılarak genel bir halat demeti modeli oluşturulmuştur. Hazırlanan modelde, yerel plastik davranış, temas, kesme, burulma ve uzama etkileri dikkate alınmıştır. Analitik olarak çıkartılması zor olan gerilim dağılımı bu model ile çıkartılmıştır. Elde edilen analiz sonuçları Costello teorisi ve Utting ile Jones'in deneysel sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür [7].

2007 yılında Ghoreishi ve arkadaşları sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen farklı açılardaki 6+1 tek katmanlı tel modellerini incelemiş ve daha önce literatürde yapılmış olan model ve analitik çözümler ile karşılaştırılmıştır[30].Usabiaga ve Pagalday'ın 2008 yılında yayınladıkları makalede, 7 x 7 WCS (Çelik Özlü Halat) modellenmiştir. Daha sonra Love'nun denge denklemleri ve Costello'nun teoremi ile bulunan sonuçlar kıyaslanarak, çekme kuvvetinin benzerliğiyle tutarlılığı vurgulanmıştır [31]. Usabiaga ve Durville, 2009 yılındaki makalede, halat ömürlerinin ve mekanik özelliklerinin saptanmasında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan modellemenin, analitik yaklaşıma göre daha avantajlı olduğunu savunmuştur. Çünkü yapılan modelde çalışırken sınır şartlarını değiştirebilmek kolayken, analitik yöntemde bazı kabuller yaparak basitleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca oluşturulan modele nesne veya bileşenleri daha kolay ekleyebiliriz [32].

Kösemen'in 2008 yılında sunduğu yüksek lisans tezinde, çelik tel halatların statik yük altındaki gerilme durumunu ortaya çıkarmak için 3 farklı çelik halat numunesi, çekme testine tabi tutulmuştur. Yapılan çekme testi, tel, demet ve halata ayrı ayrı uygulanarak, sonuçları karşılaştırmıştır. Kösemen'in elde ettiği sonuçlara göre, her bir telin kopma kuvvetlerinin toplamı, demetin kopma kuvvetini vermektedir. Benzer şekilde her bir demetin kopma kuvvetinin toplamı halatın kopma kuvvetini vermektedir [33].

2010 yılında Onur'un yayınladığı doktora tezinde, makara sistemiyle kullanılan tel halatların, eğilme yorulmasına maruz kaldıkları vurgulanmıştır. Ayrıca halatların işletme ömürlerine etki eden parametreleri açıklanmıştır. Halatların yanlış kullanımı, hatalı üretimi ve kullanıldığı ortam şartları, tel halatların işletme ömürlerine etkileri, teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerde, 10 milimetre çapa sahip 39 demetli dönme dirençli halat ve 6 x 36 Warrington-Seale halat konstrüksiyonlarına 4 farklı yükte eğilme, yorulma testleri yapılmıştır [1].

Salman'nın 2010 yılında yazdığı yüksek lisans tezinde, çelik tel halatların statik yük altındaki gerilme durumunu deneysel olarak incelemiştir. Yapılan deneylerde, teller ve demetler ayrı ayrı çekme testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlarına göre tel ve demetler karşılaştırılmıştır [34].

2010 yılında Erdönmez'in sunduğu doktora tezinde, bağımsız tel halat özünün (BTHÖ) matematiksel modelinin geliştirilmesi, üç boyutlu katı modelinin oluşturulması, belli yükleme koşulları için nümerik çözümünün yapılması ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Daha önce literatürde bulunmayan bağımsız tel halat özünün (BTHÖ) ve Seale tipi BTHÖ'nün üç boyutlu analizi yapılmıştır. Ayrıca teller arasındaki temastan dolayı oluşan deformasyonlar incelenerek, tel yarıçapı ile deformasyon arasındaki ilişkiyi göstermiştir [35]. İmrak ve Erdönmez'in 2010 yılında yayınladıkları makale, bağımsız tel halat özünün (BTHÖ) modellenme tekniklerinin tanıtılması ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla yazılmıştır. Yapılan çalışmada çift helisli bir tel halat modeli geliştirilmiş ve literatürdeki daha önce yapılan analiz sonuçlarıyla kıyaslanmıştır [36].

İmrak ve Salman'ın 2011 yılında sundukları bildiri 6, 8 ve 10 mm çapında (6x7) kompozisyonundaki çelik halatları, özel olarak hazırlanmış bir çekme düzeneğinde teste sokmuşlardır [37]. İmrak ve Erdönmez'in 2011 yılındaki çalışmalarında bağımsız tel halat özünün (BTHÖ) modellenmesi için yeni bir teknik geliştirmişlerdir ve literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Halat modellenirken merkez demeti ve dış demetlerin modellenmesinde farklı modellenme tekniği sunulmuştur. Sonlu elemanlarla yapılan analizlerin analitik sonuçlarla mukayesesi yapılmıştır [38]. Ayrıca yaptıkları analiz sonuçlarında birim şekil değişiminin etkisini incelemişlerdir [5].

2011 yılında Argatov'un bir çalışmasında, basit bir halat demetinin çözümünü yapmıştır. Ayrıca teller arasındasın meydana gelen deformasyon ve poisson oranındaki değişikliklerin demetteki enine daralmaya etkisini incelemiştir. Demetteki tellerde meydana gelen deformasyonu tanımlayan iki boyutlu modeli formülize etmiştir [39]. 2016 yılında Meng ve arkadaşlarının çalışmalarında, bir halatın mekanik performansına teller arasındaki temasın etkisini incelemişlerdir. Bunun için yarı analitik bir metod geliştirilmiştir [40].

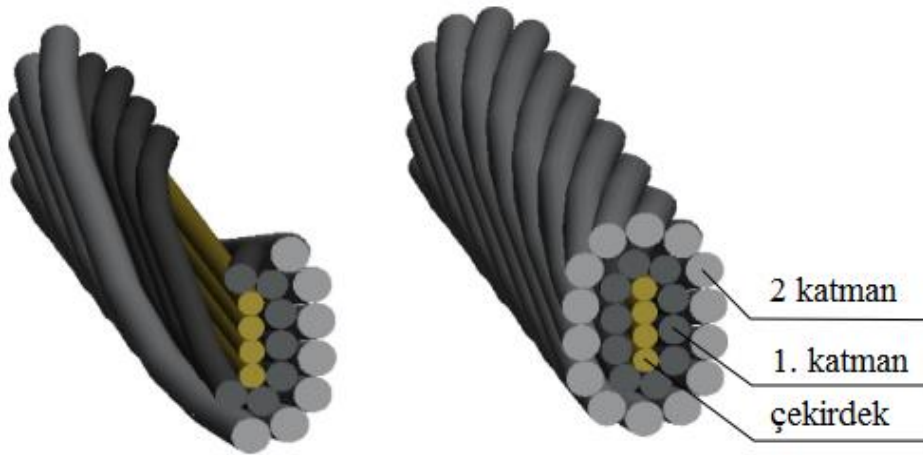
Stanova ve arkadaşları 2011 yılında iki bölümden oluşan bir makale yayınladılar. Birinci bölümde, tek ve çift katmanlı tel halatların sonlu elemanlar yöntemi kullanarak CATIA V5 yazılımıyla matematiksel modelini oluşturduklarını belirtmişlerdir. CATIA V5 yazılımında model oluştururken

gerekli öneriler verip, sonuçları oluşturulan parametrik denklemlerle kıyasladılar [41]. İkinci bölümde ise, sonlu elemanlar metodu kullanılarak ABAQUS/Explicit yazılımı ile modelleme yaptılar. Çok katmanlı halatların elastik davranış analizleri, deney sonuçları ve analitik çözümler ile kıyasladılar [42].

Gnanavel ve Parthasarathy, 2011 yılındaki çalışmalarında, tek katmanlı bir halatın ara yüzelerindeki sürtünmelerini hesaba katarak, kuvvet ve gerilmelerin hesaplanabilmesi için bir model geliştirmişlerdir. Mevcut modelden elde ettikleri sonuçları, Costello'nun klasik halat teorisi ile karşılaştırmışlardır [43]. Ayrıca sürtünme katsayısını bu çalışmalarda 0,5 olarak almıştır [44].

Ramteke ve Yenalkar, 2014 yılındaki çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi ile yaptıkları model ile tel halat analizi yapmışlar ve analitik yolla yapılan hesaplarla karşılaştırmışlardır. Ayrıca halatların dönmeye karşı sınırlı olduğu durum ile dönmeye izin verildiği durumları incelemişlerdir [45].

2015 yılında Stonava ve arkadaşları, yeni bir geometrik model olarak bir veya iki katmanlı oval tel halat üretmişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak ABAQUS/Explicit yazılımı ile hazırlanan model Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Oluşturulan model ile aksenal yükler, gerilme ve deformasyonlar hesaplanmıştır [46].



Şekil 1.2 Stonava ve arkadaşlarının modellediği spiral 2 katmanlı oval halat [46]

Wang ve arkadaşlarının 2015 yılındaki çalışmasında, CATIA ve MATLAB kullanılarak halat modellenmesi yapılmış ve prosedürlerinden bahsedilmiştir. Halatların farklı sarım yönlerinde ve farklı yükler oranlarında mekanik davranışları hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemiyle üretilen model analizinin, ampirik formüllerden çıkan sonuçlardan daha üstün olduğu vurgulanmıştır [47]. Wu ve Cao'nun 2016 yılında yayınladıkları makalede sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturdukları modelin analizinden elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlardan %8'den daha az sapma olduğunu göstermişlerdir [48].

Onur'un 2016 yılında yazdığı makalesinde, eğilen ve burulan helisel ince çubukların genel teorisi incelenmiş, Love'nun literatüre kazandırdığı ve Costello tarafından geliştirilen ince çubuk teorisi detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Örnek bir uygulama yapılarak sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Toplam yükün %15.58'ini merkez tel, %84.42'ini dış tellerin taşıdığı tespit edilmiştir [49]. Abdullah ve arkadaşlarının 2016 yılında sundukları makalede, sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturdukları halat modelini incelemişler. Özellikle halat telleri arasındaki sürtünmenin etkisini inceleyip, halat içinde tellerin kopması durumunda oluşabilecek durumları araştırmışlardır. Sonuçları literatürde bulunan analitik sonuçlar ile kıyaslamışlardır [50].

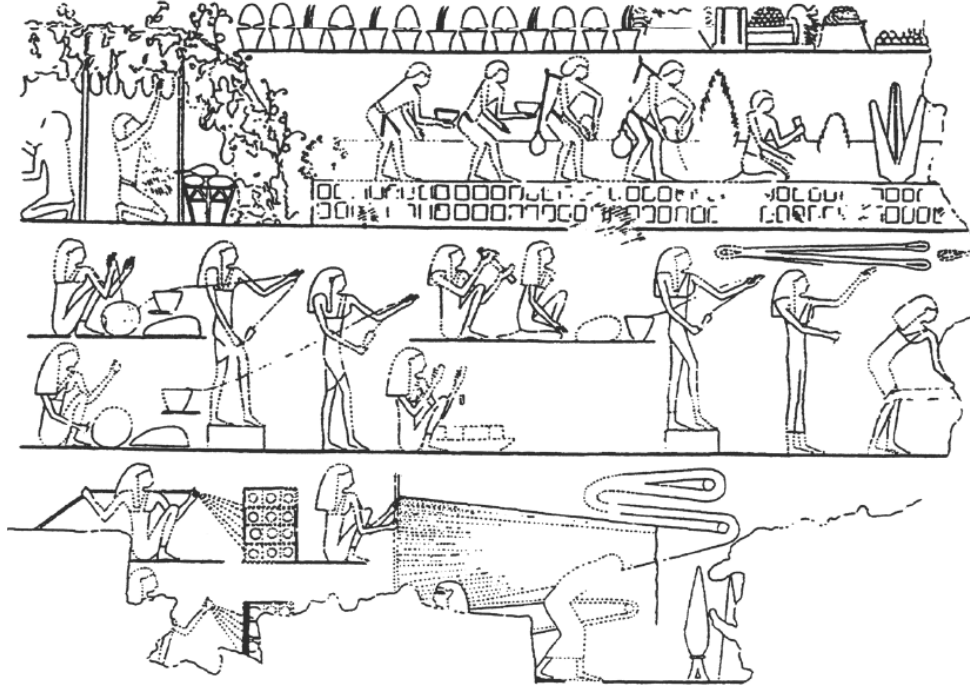
Demir ve Ala'nın 2017 yılında yaptıkları çalışmada, farklı tip ve çaplardaki ön gerilmeli monoton halatların doğal frekans analizi teorik ve deneysel olarak yapılmıştır. Teorik analiz yaparken daha önce literatürde bulunan analitik formüllerden yararlanılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak halatların katı modelleri oluşturularak doğal frekans analizi yapılmıştır [3, 51].



BÖLÜM 2

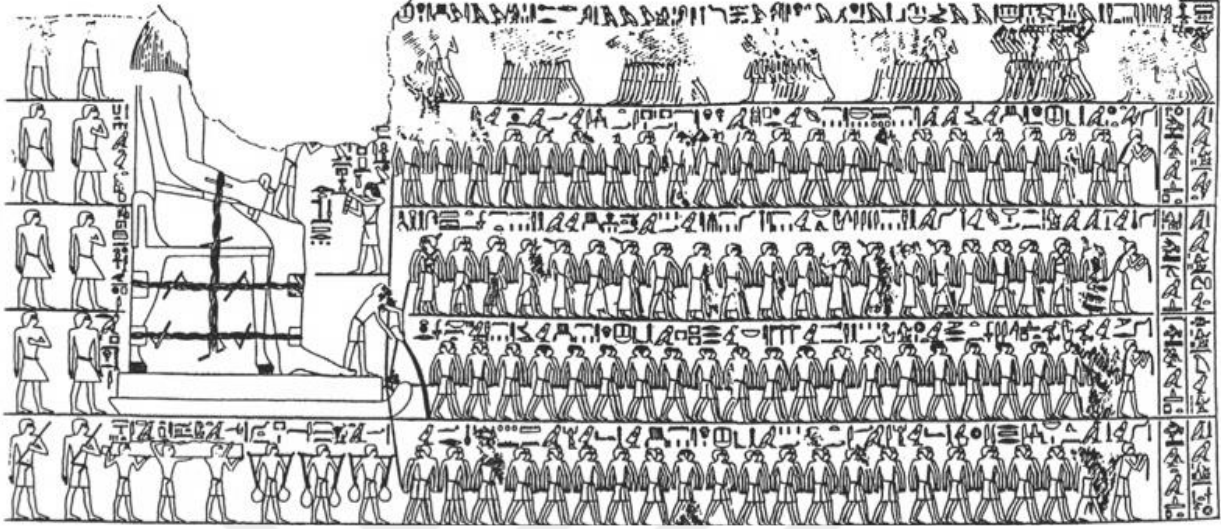
HALATLAR

Tel ya da liflerin belirli kompozisyona göre bir öz etrafında demetler halinde sarılmasıyla elde edilen taşıma ve iletim araçlarına halat denir. İnsanoğlunun kullandığı nesnelere taşıma ve kaldırma gereksinimleri, halatlarının doğuşuna ve bu sayede ihtiyaçları halatlar vasıtasıyla daha rahat taşıma kaldırmalarına imkân vermiştir. İnsanlık tarihini incelediğimiz zaman, doğada kolayca bulunabilen deri, saç ya da bitkisel malzemelerden yapılmış çok çeşitli halat örneklerini görmemiz mümkündür. Yapılan araştırmalar sonucu Fransa'da Paleolitik Döneme (M.Ö. 12000) ait iki ipten oluşan 7 mm çapında basit halat kalıntıları bulunmuştur. Finlandiya yakınlarında Mezolitik Dönem'den (M.Ö. 9000-3000) kaldığı düşünülen halat kalıntıları ve Mısır'da M.Ö. 2000 yıllarından öncesine ait deve tüyünden imal edilen halatlara rastlanmıştır [52]. Şekil 2.1.de M.Ö. 2000 yıllarına ait Mısır'daki duvar resimlerinde, papirüs, deri, ya da palmye elyafından üretilen halatlar görülmektedir [34].



Şekil 2.1 M.Ö. 2000 Mısır'da halat üretimi [37]

Halatlar, balık ve benzeri çeşitli hayvanları avlamak için tuzak hazırlamak, ağır yükleri kaldırmak ve sürüklemek gibi amaç için sürekli kullanılmıştır. Şekil 2.2 devasa bir heykelin 200 adam tarafından kızak üzerinde 4 halat yardımıyla sürüklendiğini göstermektedir [52].



Şekil 2.2 Mısır'da halat uygulaması (M.Ö. 2000) [35]

Halatların tarihsel gelişimi incelemeye devam ettiğimizde, M.Ö 200 yıllarına kadar geçen yaklaşık 2000 yıllık süre içerisinde halatların yapısında ve üretim yöntemlerinde çok fazla değişiklik gözlemleyemeyiz.

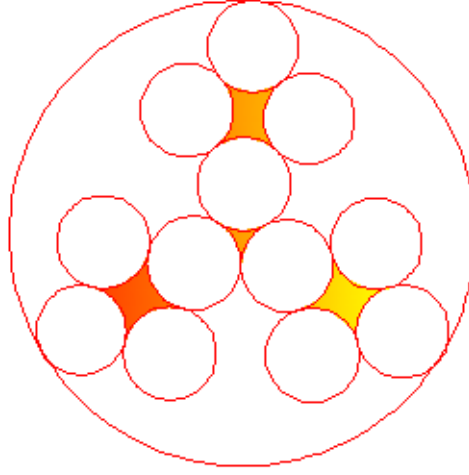
Orta Çağın ünlü bilim adamlarından Leonardo Da Vinci halat yöntemlerini anlatan taslaklar hazırlamıştır [53]. Yine 15-16 yüzyıllarında yaşayan Agricola, kaleme aldığı De Re Metallica isimli eserinde madenlerin taşınmasında halatların ne kadar önemli olduğundan bahsetmiştir. 1543-1607 yılları arasında yaşamış olan papalık baş mimarı Domastico Fontana, Roma'da bulunan San.Pietro Meydanı'na bir dikili taşın getirilip, yerine yerleştirilmesini organize etmiştir. Oldukça uzun süren bir planlama sürecinden sonra 327 ton ağırlığındaki yapıt yerleşimi, 1000 civarındaki işçi ve 75 atın çalışması ile makara sistemlerinden de faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.3'te bu taşıma operasyonunu gösteren resim bulunmaktadır.



Şekil 2.3 San.Pietro Meydanı'na dikili taşın taşınması (1586) [53]

Takip eden yüzyıllarda sanayi devriminin de etkisiyle hammadde ihtiyacını karşılamak amacıyla çok sayıda maden açıldı. 19. yüzyılda maden kuyularında zincirler ve kenevirden üretilen halatlar kullanılıyordu [8]. Wilhelm August Julius Albert isimli Alman maden mühendisi, madenlerde kullanılan bu iki taşıma aracını incelemesiyle şu sonuçları elde etti; Kenevir halat kullanımı ile yatakların paralel yüklenmesi sağlanıyor ve zincirler ise yüksek çekme dayanımı elde edilmesine imkân veriyordu. Albert bu iki elemanın üstünlüklerini bir araya toplayarak ilk tel halat üretimini yapmış oldu [8, 54].

Albert'in ürettiği ilk halat çok basit bir yapıya sahipti. Aynı ölçülerde 4 tane tel demet elde etmek için elle birbiri etrafına sarılmıştır. Daha sonra bu demetlerden 3 yada 4 tanesi halat elde etmek için sarılmıştır. İlk üretilen tel halat 18 mm çapındaydı ve 4 telden meydana gelen 3 demetten oluşmaktaydı [8]. Şekil 2.4, Albert halatına ait bir çizim verilmiştir.



Şekil 2.4 Albert halatı [52]

Üretilen bu halat ilk kez 1834 yılında 484 m derinliğinde bir madende denendi. Elde edilen sonuçlara göre, aynı ölçüde kenevir halatından 6 kat, zincirden 4 kat ve kendi ağırlığından 8 kat daha fazla yükleme kapasitesine ulaşmıştır [53].

Aynı dönemde İngiliz ve Amerikalı bilim adamları çeşitli sanayi dallarında kullanmak amacıyla benzer formlarda halatlar üretmeye başladılar. Albert'in ilk teli icadından günümüze kadar tel halatlar, genel mühendislik, vinçler, asansörler ve hava teleferikleri, otomobil ve uçak mühendisliği, köprü inşaatı gibi yük taşıma, hareketin ve gücün iletimi ile ilgi birçok alanda kullanılmıştır [54].

Kullanım amaçları ve çalıştığı ortamlara göre tel halatları incelersek çok farklı türlerde üretildiklerini saptayabiliriz. Denizcilik sektörünü örnek olarak ele alırsak; Gemiyi limana bağlamak amacıyla üretilen halatlar gemiciler tarafından gemiden limana atılabilmesi için hafif, limandaki babalara bağlanabilmesi için esnek ve deniz suyunun korozif etkisinden en az etkilenebilecek özellikte olması gerekmektedir [1].

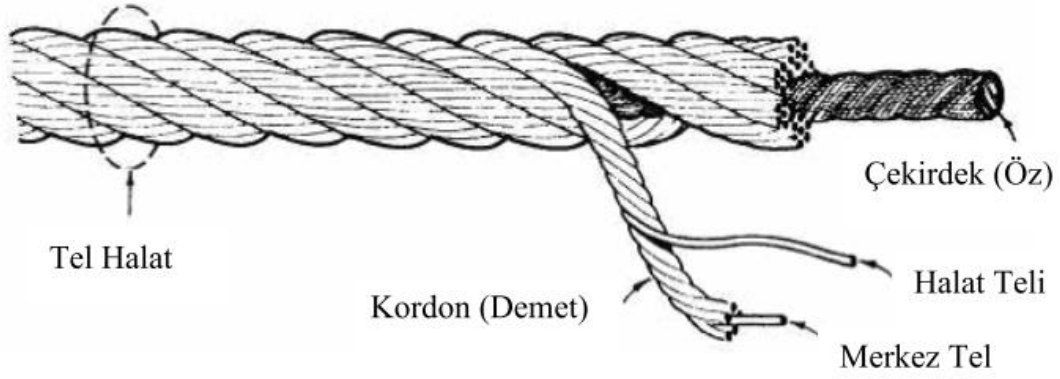
Bu çalışmada modelleme ve analizi de yapılan tel halatları, kendi kullanım şartlarına göre incelersek, aşağıdaki avantajlara sahip olduklarını söyleyebiliriz.

- Tel halatlar, çelik tellerin belirli bir kompozisyonunda bir araya gelmesiyle meydana gelir ve taşınacak yükün çelik tellere homojen olarak dağıtılması sağlanır. Böylece esas olarak yerel kırılmalardan korunmak için yapıyı bölerek, çeliğin yüksek gerilme değerlerinde kullanımına izin verir.

- Halatın içerisindeki tellerin zarar görmesi durumunda bu bölgesel hasarların tolere edilmesi tel halatın tokluk değerlerini olumlu yönde etkiler [52].
- Halat çok sayıda telden oluştuğu için yükü bu tellere dağıtır ve işletme emniyeti bu sayede yükselir.
- Tel halatların çalışma hızları oldukça yüksektir.
- Kendi ağırlıkları ile taşıma kapasiteleri arasında oldukça yüksek bir oran mevcuttur ve büyük bir elastik uzama miktarına sahiptirler.
- Tel halatlar işletme esnasında kolaylıkla gözle muayene yapılabilir. Olası deformasyon ve kırıklar hemen saptanabilir [37].
- Tel halatlar uygun yöntemlerle imal edilirse, iklim ve sıcaklık değişimlerinden etkilenmezler.
- Esnek bir yapıya sahip olduklarından dolayı tambur ve makara sistemlerinde kullanılmaya uygundur [28].

2.1 TEL HALATLARIN YAPISI

Tel halatların yapısını incelediğimizde, çoğunlukla merkezinde “ Öz veya Çekirdek ” adı verilen bir tel demeti ile bunu çevreleyen demetlerden oluşur. Bir halatın imalatına halat özünü oluşturarak başlanır. Çeşitli örme yöntemleri ile bağımsız tellerin birbiri üzerine sarılmasıyla halat özü oluşturulur. Daha sonra halat özü etrafına sarılmak üzere, yine tellerin örülmesiyle üretilen demetler hazırlanır. Kullanılacak yere ve işletme yüklerine göre halatların çapı ve bünyesindeki tel sayısı da değişiklikler göstermektedir. Şekil 2.5’te basit bir tel halatın kısımları verilmiştir [1].

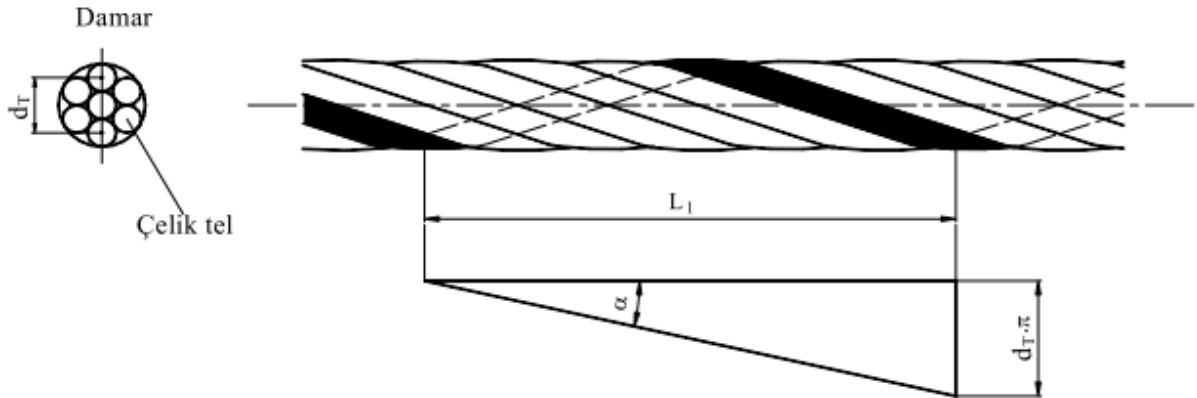


Şekil 2.5 Tel Halatın Yapısı [55]

Şekil 2.5’deki halat çizimini incelersek; her biri 7 birbirinden bağımsız telden oluşan 7 demet görülmektedir. Bu demetlerden biri merkezde olup halatın özünü oluşturmuştur. Kalan 6 demet ise özün etrafına sarılmış durumdadır. Böylece 49 telden oluşan 1x6 helisel tel halat örneği görülmektedir.

2.1.1 Halat Adımı (Hatvesi)

Tel halat içerisinde, bir telin bağlı olduğu demet içerisinde ya da bir demetin halat içerisinde tam helisel büküm yaptığında yatay eksen üzerinde aldığı yola halat adımı yada halat hatvesi denir. Bulunan bu değeri halatın çapına bölersek halatın adım oranını elde ederiz. Tellerin ekseni ile demet ekseni arasındaki açiya da demet sarma açısı adı verilir. Standart bir tel halat içerisinde her demetin ve demetleri oluşturan tellerin kendi içerisinde halat adımları aynı olması gerekir [1, 56]. Şekil 2.6’da bir tel halata ait halat adımı ve halat sarma açısı gösterilmiştir.

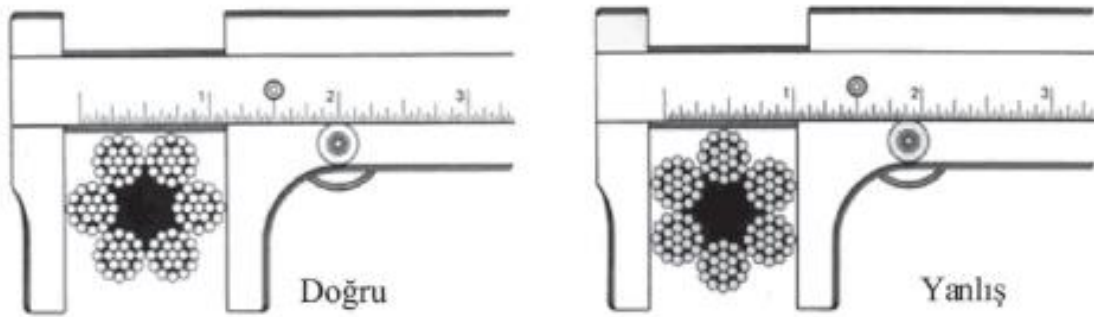


Şekil 2.6 Tel halata ait değerler [57]

Şekil 2.6’da verilen değerlerden; L_1 , halat adımı ya da halat hatvesini, α , derece cinsinden demet sarma açısını, d_T , demet tellerinin merkezinden geçen dairenin çapı olarak verilmiştir.

2.1.2 Halat Çapı Ölçümü

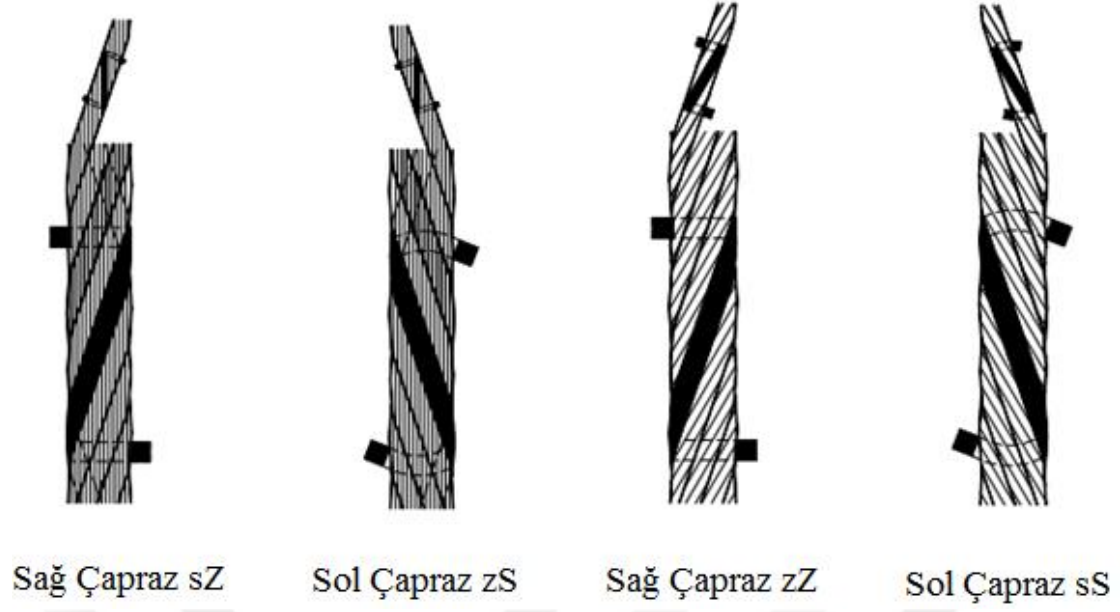
Halat çapı, halatı oluşturan en dıştaki tel ve demetleri çevreleyen ve tüm halat kesitini içine alan çemberin çapıdır. Halat çapının ölçümü yapılırken mutlaka en dış iki demete teması gereklidir. Şekil 2.7’de halat çapının doğru ölçümü gösterilmiştir. Halat çapının doğru ölçülmesi için, en az 1 mm aralıklarla ve en az dört defa yapılarak ortalaması alınması gerekir [56].



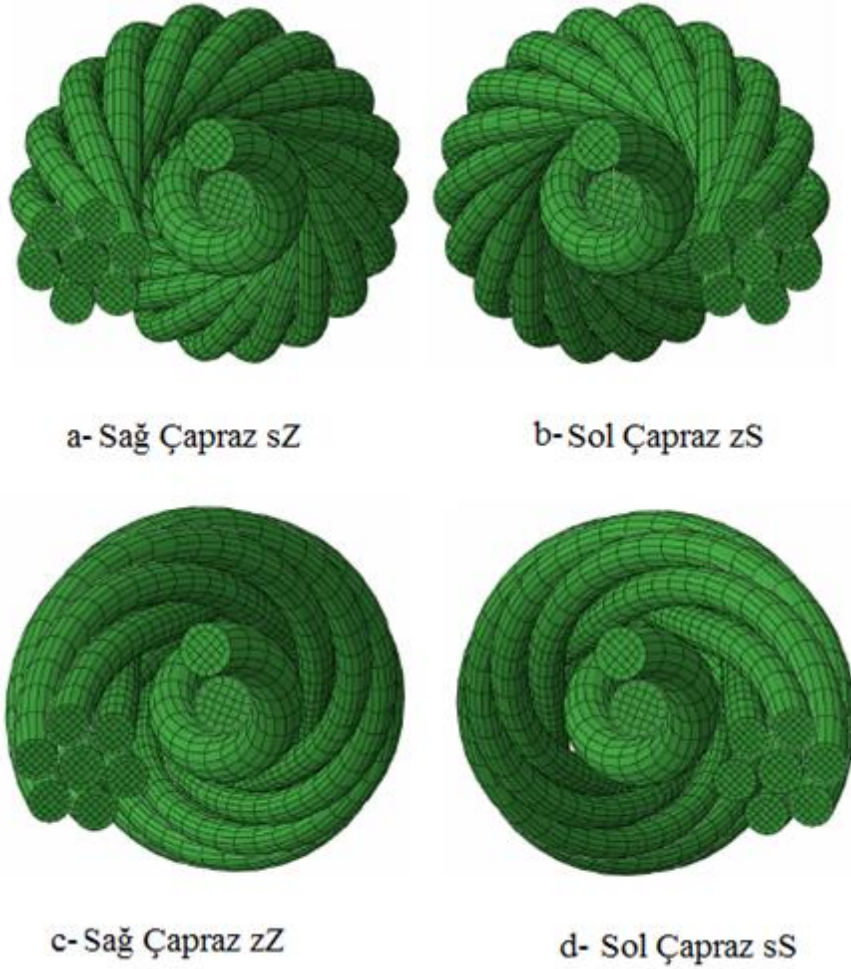
Şekil 2.7 Halat çapını doğru ölçme yöntemi [55]

2.1.3 Halat Sarım Yönü

Halatı oluşturan teller ve demetler farklı kompozisyonlarda sarılarak farklı halat çeşitleri oluştururlar. Buna göre demeti oluşturan teller sağa sarımlı ise “z”, sola sarımlı ise “s” harfleri ile sembolize edilirler. Demetlerin sarımında ise, sağ tarafa doğru sarılmış ise “Z”, sol tarafa sarılmış ise “S” ile sembolize edilirler. Bu tanımdan yola çıkarak, halatı oluşturan teller ve demetler sağ doğru sarılmış ise “zZ” ile gösterilir ve sağa düz sarımlı halat denir. Yine teller ve demetler sola sarımlı ise “sS” ile gösterilir ve sola düz sarımlı halat denir. Benzer şekilde eğer halatı oluşturan teller ile demetler farklı yönlerde sarılı ise önce telin sarım yönü daha sonra demetin sarım yönü yazılarak “zS” yada “sZ” ile gösterilir. Burada, “zS” gösterimi çapraz sola sarımı, “sZ” gösterimi çapraz sağa sarımı ifade eder. Şekil 2.8’de halatların sarım yönlerine göre görünüşleri verilmiştir [1, 33]. Şekil 2.9’da ise halatların sarım yönlerini veren bir programın simülasyon görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 2.8 Halat sarım yönleri [57]



Şekil 2.9 IWRC (Bağımsız Tel Özlü Halat) Sarım yönlerinin modellenmesi [36]

2.1.4 Halat Anma Dayanımı

Halatı oluşturan tellerin çekme dayanımının alt sınırlarını belirten değere halat anma dayanımı denir. Birimi kgf/mm^2 yada MPa olarak verilir. Telin anma değeri attıkça sünekliği düşerek halat gevrekleşir [1].

2.1.5 Tel Halat İmalatında Kullanılan Malzemeler

Halatlardan, bulunduğu ortamın çalışma koşullarında görevlerini yerine getirebilmeleri için bir takım mekanik özelliklere sahip olması beklenir. Genellikle halatlar, parlak alaşımsız tel, parlak alaşımlı tel, çinko kaplı tel olmak üzere üç farklı kimyasal içerikte ve DIN 17140, DIN 1548 ve DIN 2078 standartlarına uygun olarak üretilmeleri gerekmektedir [34].

2.1.5.1 Parlak Alaşımsız Tel

Yüksek mukavemet değerine sahip çok sayıda ince telden meydana gelen tel halatlar, ark çeliği, Siemens-Martin çeliği veya oksijen çeliğinden, 5.50 mm ile 16 mm arasında değişen çaplarda yüksek karbonlu filmaşinlerden üretilir. Kullanılacak yerin özelliklerine göre saflık derecesi değişmekle birlikte tel halat çeliğinin içerdiği elementler genellikle Çizelge 2.1’de verilen sınırlar içerisinde kalmaktadır [21].

Çizelge 2.1 Tel halat çeliğinin içerisinde bulunan elementlerin yüzde oranları [1]

Tel Halat Çeliğinde Bulunan Elementlerin Yüzde Oranları	
Manganez	%0,30 - % 0,70
Silisyum	%0,10 - % 0,30
Forfor	Maksimum %0,045
Kükürt	Maksimum %0,046
Azot	Maksimum %0,008

Parlak alaşımsız çelik malzeme SM-ocagında, LD-konvertöründe veya indüksiyon ocaklarında ergitilerek Çizelge 2.1’deki elementler eklenir ve bloklar halinde dökülür. Dökülen

bu bloklar haddelenerek 5 mm çapında tel haline getirilir. Eğer 5 mm'den daha küçük çapta retilenirse soğuk haddeleme ile yapılır [34].

Telin mukavemeti, çeliğin içerindeki element miktarı, uygulanan ısıl işlem ve soğuk haddeleme sırasındaki kesit daralması ile belirlenir. Çeliğin içerisindeki karbon miktarının artması ve tel kesitinin daralması ile telin mukavemeti artar, fakat elastik uzaması, eğilme ve burkulma özellikleri azalmaktadır. Bu nedenle ince telin çekme mukavemeti 4000 N/mm²'ye ulaşabilmekte iken beraber bu teller 2000 N/mm² mukavemet değeri üzerinde çalıştırılmamaktadır [1, 58].

2.1.5.2 Parlak Alaşımlı Tel

Yüksek sıcaklık, korozyon ve aşınmaya dayanıklı, düşük mıknatıslanma özelliklerine sahip parlak alaşımlı teller, Krom (Cr), Nikel (Ni), Molibden (Mo) gibi alaşım elemanlarını bünyesinde bulundurur [34].

2.1.5.3 Çinko Kaplı Tel

Korozyona karşı yüksek dayanıklılık sağlamak amacıyla tellerin üzerine son çekme işleminden sonra çinko kaplanır. Yapılan bu işleme “ Son inko Kaplama ” denir. Bunun yerine tel çinko kaplı olarak haddeleme yapılırsa “ inko Kaplı Olarak çekilmiş ” olarak isimlendirilir [1, 58].

Korozyona karşı dayanıklılık, telin üzerindeki çinko kaplamanın kalınlığı ile doğru orantılı olarak artar. Yapılan bu kaplama işlemi iki farlı yöntem ile yapılır. Bunları, alevle kaplama ve elektroliz ile kaplama olarak sıralayabiliriz. Alevle yapılan çinko kaplama sonucu malzeme çok yüksek ısıya maruz kaldığından dolayı çekme mukavemeti parlak tellere kıyasla %10 oranında düşmektedir. Fakat alevle yapılan çinko kaplamada telin eğilme ve burulma değerlerinin parlak tele göre azalmasının, halat ömrüne negatif bir etkisinin olmadığı yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır [34].

Alevlenme ile yapılan çinko kaplama yönteminde telin çapı ile kaplama kalınlığı doğru orantılıdır. Elektroliz ile kaplama yönteminde çinko kalınlığı ise elektroliz süresine bağlıdır. Elektroliz süresi arttıkça kaplama kalınlığı artar. Elektroliz kaplama yönteminde yapılan

kaplamada mukavemet değerlerinde bir azalma görülmez, parlak tel ile aynı değerler ölçülebilir. Dolayısıyla çinko kaplı tellerde en yüksek mukavemet değeri elektroliz yolu ile çinko kaplı tellerin çekilmesi neticesinde elde edilir [1, 58].

2.1.6 Tel Halatların İmalat Yöntemleri

İstenilen kesitte çelik teli imal etmek için bir takım işlem sırasının takip edilmesi gerekmektedir. Bu işlem sırası, aşağıda maddeler halinde açıklanacaktır.

- Patentleme – Tavlama: Çelik telin üretileceği filmaşın parça atomik yapısının değişeceği bir sıcaklığa kadar ısıtılır. Ardından yaklaşık 450-500 °C'deki kurşun banyosunda soğutulur. Böylelikle “İzotermik Patentleme” adı verilen ısı işlem uygulanmış olur. Bu işlemin yapılmasındaki amaç, malzemeye troostitik veya sorbitik yapı kazandırarak, tel çekme işlemini daha sağlıklı gerçekleşmesini sağlamaktır [33].
- Dekapaj: Patent fırınından çıkan filmaşının daha sonraki işlem basamağı asit banyosudur. Asit banyosunda, filmaşının yüzeyinde bulunan tufal ve oksitlerden temizlenir. Daha sonrada malzemenin üzerindeki asit moleküllerinden temizlenmesi amacıyla sıcak ve soğuk yıkama yapılır [33].
- Kaplama: Yüzeyi temizlenmiş filmaşın, hava ile tepkimeye girerek oksitlenmemesi ve daha iyi soğuk çekme yapılabilmesi için önce fosfat kaplama banyosu ardından boraks banyosundan geçer. Son olarak da hidrojen ve nem kalıntıları temizlenir [7].
- Soğuk Tel Çekme: Soğuk şekil verme işlemi tel halat imalatının son aşamasıdır. Burada telin istenilen kesit çapına indirgenmesi sağlanır [7].

Telin mukavemeti, telin içerdiği alaşım miktarı, çelik tele uygulanan ısı işlemler ve soğuk haddeleme aşamasında tel kesitinin inceliğiyle belirlenir. Kesit daralması ve karbon miktarındaki artış her ne kadar telin mukavemetini artırsa da elastik uzama, eğilme ve burulma kabiliyeti azaltmaktadır. %0,40 karbon içeren bir telin mukavemeti 80 kg/mm² iken %0,85 karbonlu telin mukavemeti yaklaşık 130 kg/mm² olmaktadır [21].

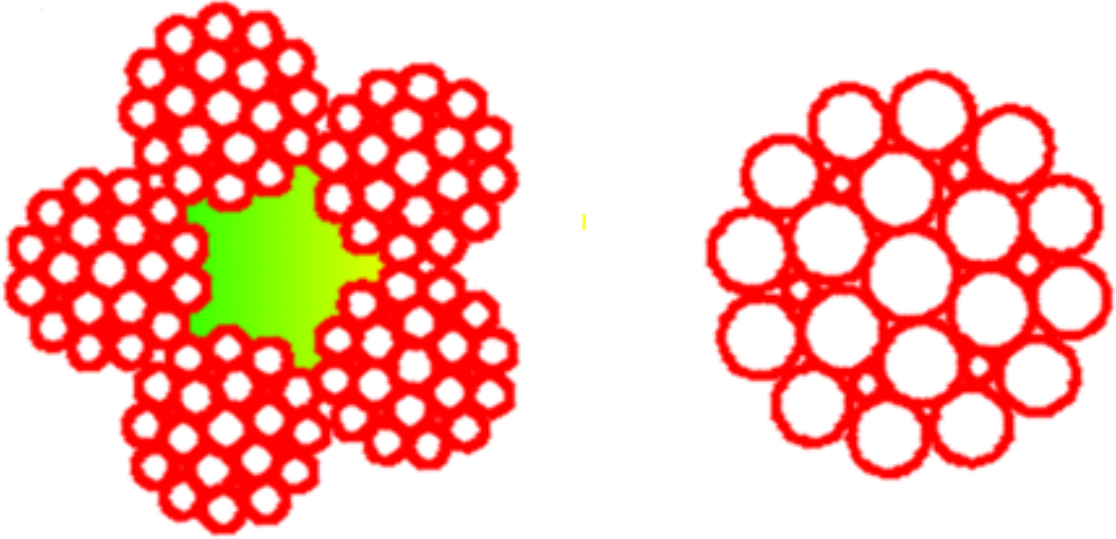
Bütün bu işlemlerden sonra herhangi bir malzeme ile kaplanmamış “Çıplak Tel” ya da korozyon ve aşınmalara karşı dirençli olması için çinko ile kaplanmış “Kaplmalı Tel” imal edilir [33].

2.2 TEL HALAT ÇEŞİTLERİ

Tellerin diziliş durumlarına göre incelediğimizde tel halat profilinin farklı şekillere sahip olduğunu görebiliriz. Tel halatları, profillerinin şekillerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz.

2.2.1 Yuvarlak Demetli Halatlar

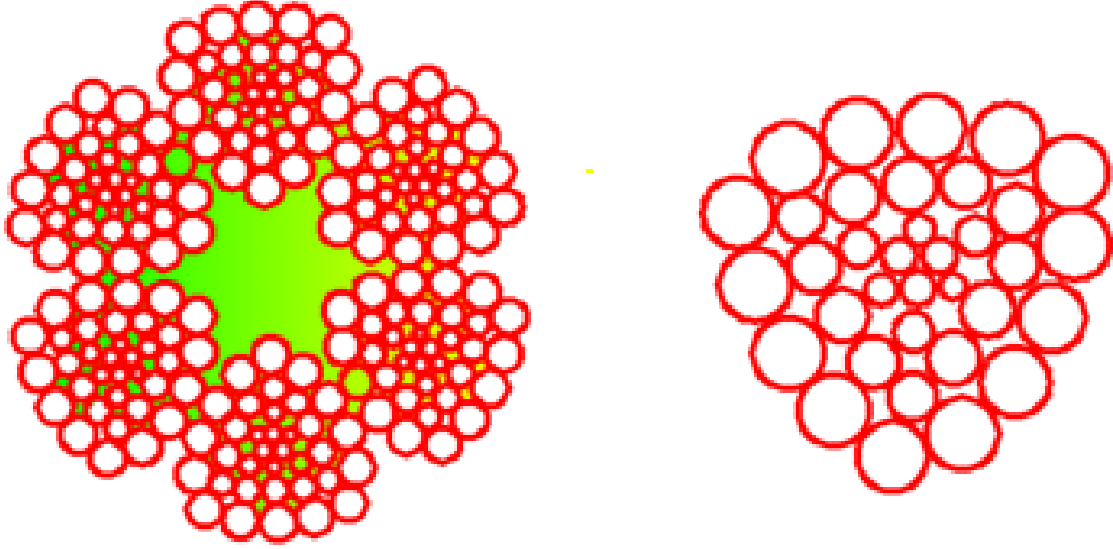
Yuvarlak demetli halatların kesitlerinde, halatı oluşturan teller daire şeklinde yerleştirilmiştir. Şekil 2.10'da yuvarlak demetli bir halat kesiti görülmektedir [21].



Şekil 2.10 Yuvarlak demetli halat [33]

2.2.2 Üçgen Demetli Halat

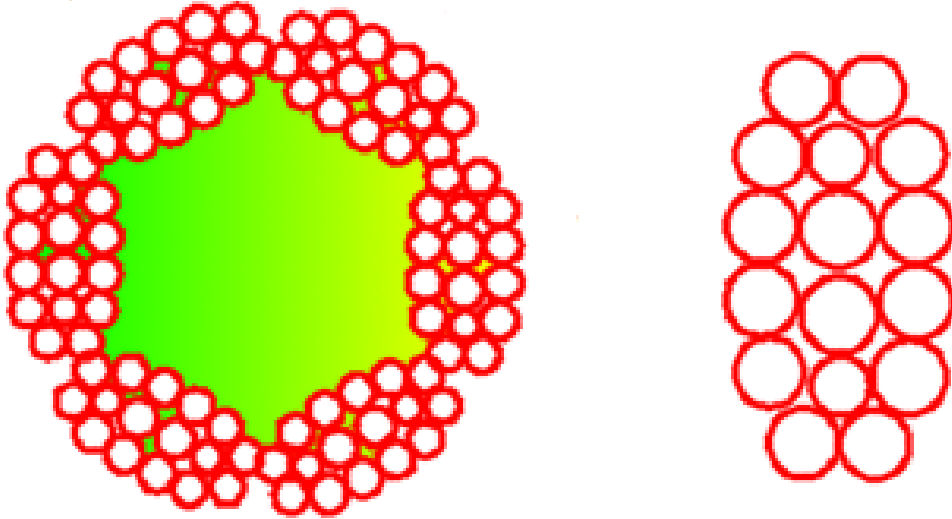
Üçgen demetli halatların, profilleri üçgen biçimindedir. Her zaman 6 demetten meydana gelen eşkenar üçgen kesitindeki bu halat yapı özellikle makaralara sarılarak yapılan taşıma operasyonlarında aşınmaya karşı gösterdiği dirençten dolayı tercih edilirler. Şekil 2.11'de üçgen kesitli bir halatın gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.11 Yuvarlak demetli halat [21]

2.2.3 Oval Demetli Halat

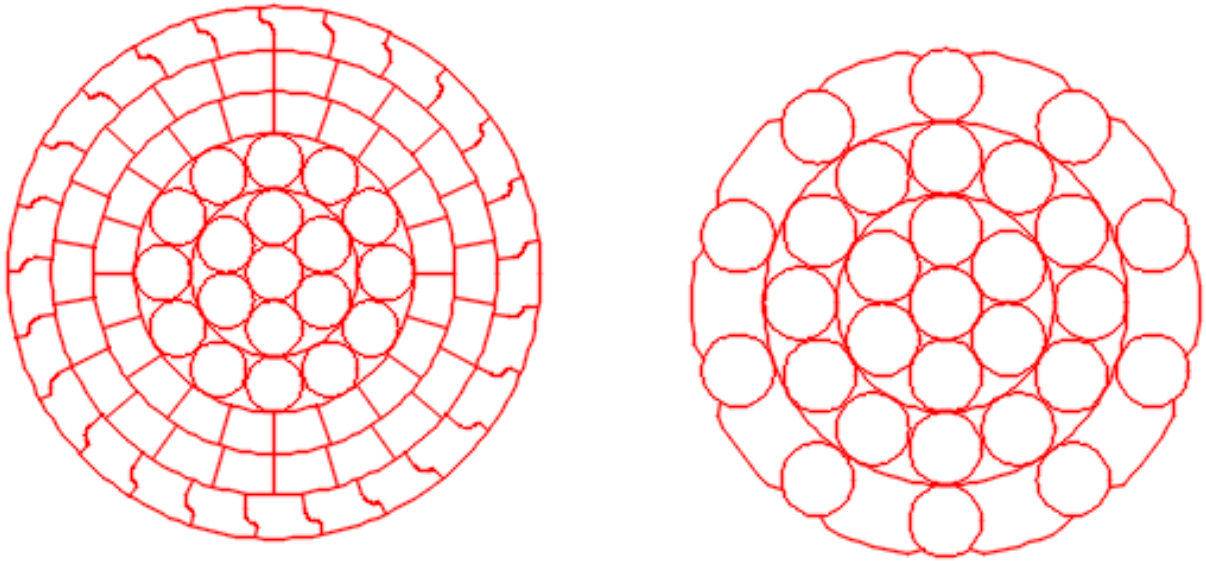
Demet sayıları en az 6 olmak daha yüksek rakamlara çıkabilen bu halat çeşidinin en kesiti incelendiğinde oval bir yapıya sahip olduğu görülür. Şekil 2.12 verilen resimde bir oval halat örneği verilmiştir [33].



Şekil 2.12 Oval demetli halat [21]

2.2.4 Kapalı Tip Halatlar

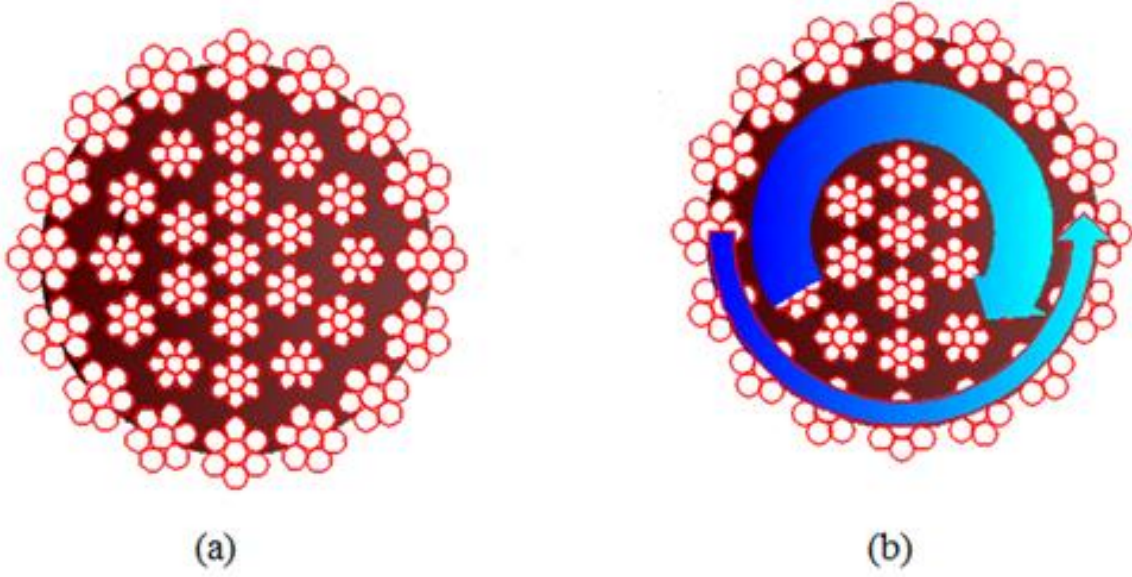
Halatı oluşturan tellerin en dış katmanını oluşturan teller, diğer halatların aksine yuvarlak değildir. Birbirlerine kenetlenebilecek bir yapıya sahip oldukları için, halatta düz bir yüzey oluştururlar. Bu sayede teleferik gibi taşıyıcıyı araçlarda kullanıma elverişlidirler. Bu tür halatlar dış etkilere karşı daha dirençli oldukları için aşınmaya ve dönmeye karşı mukavemetleri yüksektir. Şekil 2.13'te kapalı tip halatın kesiti gösterilmektedir [7].



Şekil 2.13 Kapalı tip halat [1]

2.2.5 Dönmez Tip Halatlar

Çok katmanlı halat demetinden meydana gelen dönmez tip halatlar, yük altında dönme eğilimi diğer halatlara nazaran çok azdır. Dönme dirençli halatlarda, katmanları oluştururken teller ters yönlere üst üste sarılırlar. Dolayısıyla yük altında oluşan dönme momentleri, katmanlar arasında zıtlık gösterir ve toplam dönmeyi sönümlendirir. Özellikle çok yüksek inşaat ve vinçle kaldırma operasyonlarında asılı yükün dönmelerini engellemek amacıyla tercih edilir. Şekil 2.14'te bu halatlara ait bir kesit ve yük altında oluşan döndürme momentleri verilmiştir.



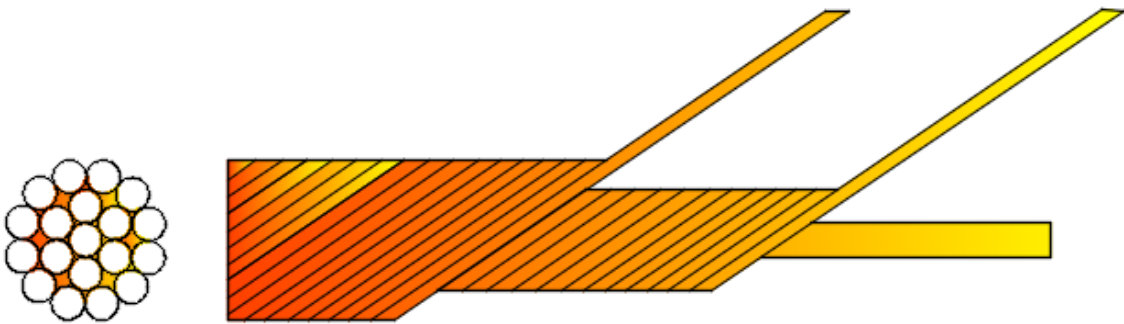
Şekil 2.14 (a) Dönmez tip halatı [59], (b) Dönmez tip halatta yük altında oluşan döndürme momentleri [1]

2.3 DEMET KOMPOZİSYONLARINA GÖRE HALATLAR

Çelik halat demetlerinin geometrilerine ve sarım yöntemleri ele alındığında tel halatlar, tek operasyonlu demetler ve çok operasyonlu demetler olarak iki ayrı başlık altında ele alınabilir.

2.3.1 Tek Operasyonlu Tel Halatlar

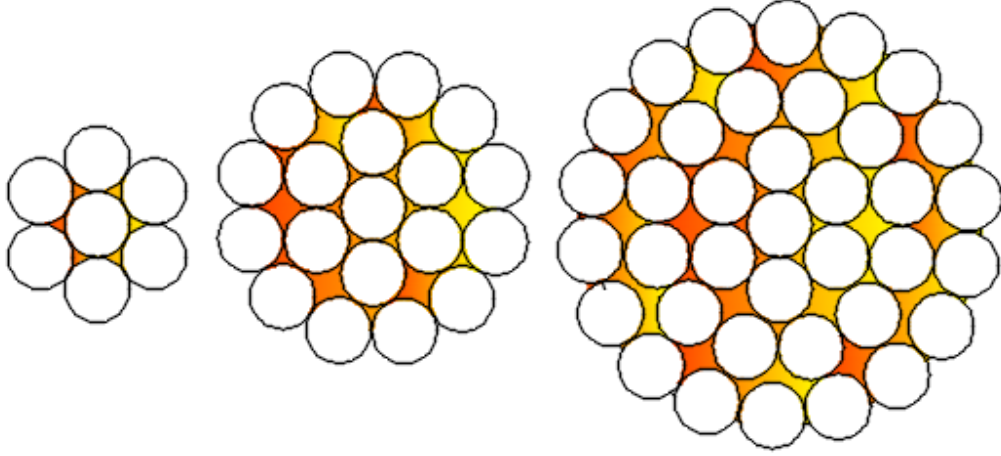
Basit tel sarımlı halatlar olarak da anılan bu halatlar, tek bir operasyonda en az iki kat olmak üzere aynı açı ve yönde örülerek üretilen halatlardır. Demet örme şekilleri incelendiğinde; Seale, Filler, Warrington, Warrington-Seale, Seale-Filler olarak 5 farklı çeşidi bulunmaktadır. Şekil 2.15’de verilen resimde tek operasyonlu halat örneği verilmiştir [1].



Şekil 2.15 Tek operasyonlu tel halatlar

2.3.1.1 Standart Demetler

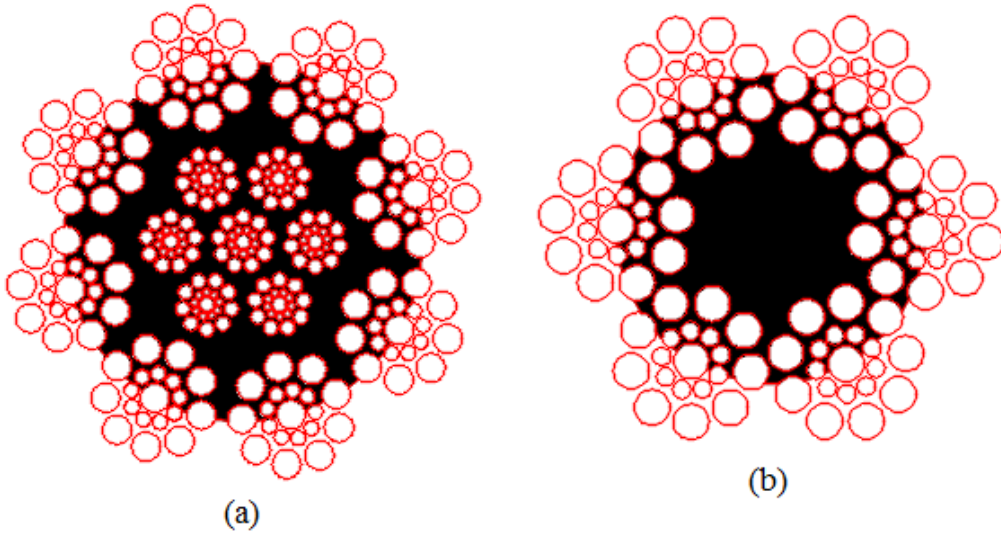
Bu halat türünde, halatı meydana getiren tellerin çapları birbirine eşittir. Ayrıca halat demetindeki bütün teller halat eksenine göre aynı yön ve açıda sarılmıştır. Şekil 2.16’da standart halat demetlerine örnek verilmiştir [1].



Şekil 2.16 Standart halatlar

2.3.1.2 Seale Demetler

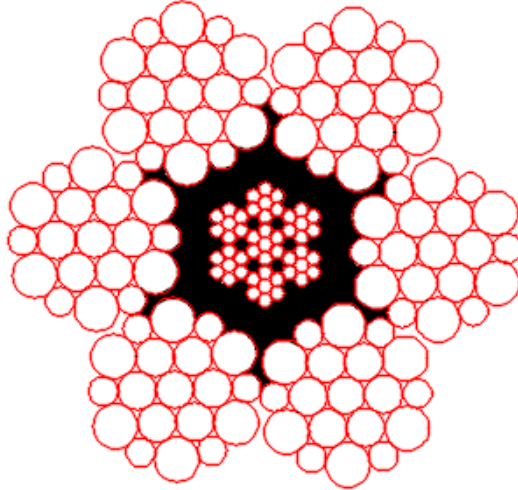
Seale demetlerini özelliği, bitişik iki katmanda bulunan tel sayısının sabit olmasıdır. Bu durumda demeti oluşturan katmanlardaki tel çapı farklı olacaktır. Katmanlardaki tellerin hatvesi ve sarım yönü aynıdır. Şekil 2.17’de seale demeti gösterilmektedir [60].



Şekil 2.17 a) Çelik özlü seale halat demeti [61], b) Lif özlü seale halat demeti [62]

2.3.1.3 Warrington Demeti

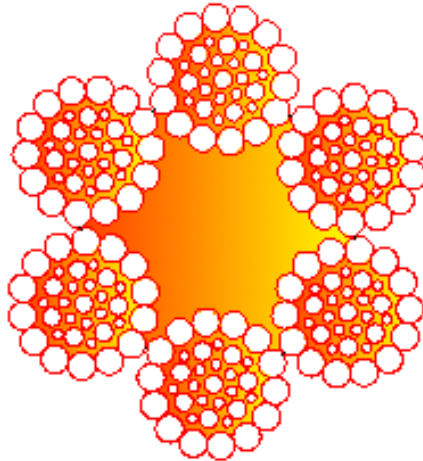
İki katmandan oluşan bu halat yapısında, en dıştaki katmanda eşit sayıda fakat farklı çapta iki farklı çelik tel kullanılır. İç katmanda tel sayısı yarıya düşer bu katmanda tel çapı değişmez. Bu halat tipinin dış yüzeyi diğer halat türlerine göre daha az pürüzlüdür. Yuvarlak bir yapıya sahiptir. Şekil 2.18’de Warrington halatına örnek verilmiştir [7, 60].



Şekil 2.18 Warrington halatı

2.3.1.4 Warrington-Seale Demetler

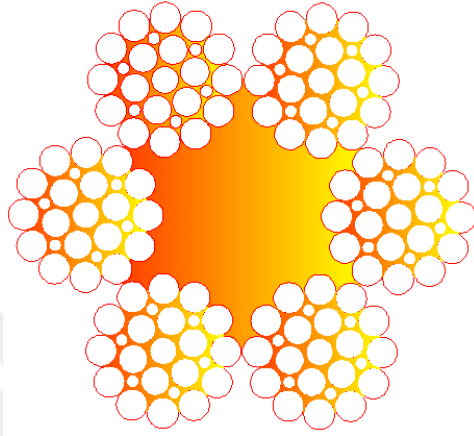
Warrington ve Seale demetlerini bir karışımı olan bu halat demetinde, en dıştaki tabaka seale yapısında iken alt katman warrington demeti şeklinde sarım yapılmıştır. Şekil 2.19’da warrington-seale demetine sahip bir halat kesiti bulunmaktadır [1].



Şekil 2.19 Warrington-Seale halatı [63]

2.3.1.5 Filler Demetler

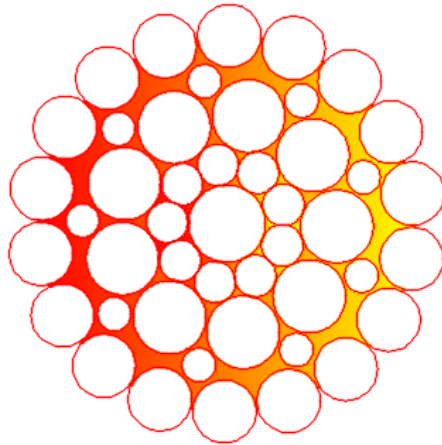
Filler demetler, aynı zamanda dolgu demetler olarak anılmaktadır. Bu demet kompozisyonunda halatın en dış katmanında bulunan tellere yataklık yapmak amacıyla, dış katmandaki tel sayısı kadar bir alt katmanda dolgu telleri bulunur. Şekil 2.20’de Filler demetlerine ait bir kesit verilmiştir.



Şekil 2.20 Filler demeti [64]

2.3.1.6 Seale-Filler Demeti

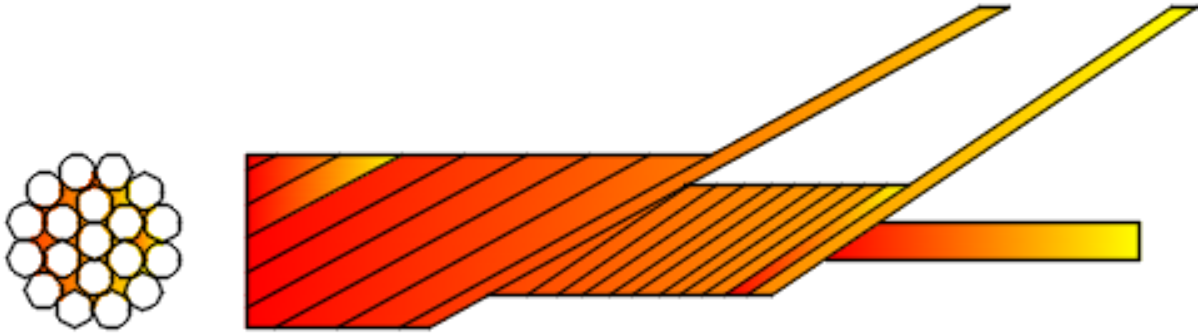
Seale-Filler demeti yapı itibariyle, seale demetinin özelliklerine sahip olup 2 katmanda da aynı tel sayısına sahiptir. Ayrıca filler demetini özelliği olarak, alt katmanda en son katmana yatak görevi yapan dolgu telleri bulunur. Dolayısıyla en son katmanda dolgu telinin iki katına eşit sayıda tel bulunur. Şekil 2.21’de seale-filler demeti gösterilmiştir [33].



Şekil 2.21 Seale- Filler demeti

2.3.2 Çok Operasyonlu Tel Halatlar

Bu halat çeşidinde halatı oluşturan bir katman farklı açılarda fakat aynı örülürler. Bu yöntemde her bir katman farklı bir operasyon ile örülmektedir. Kat sarımında açının değişmesi ile katmanların birbirine batmaması önlenirken ani yük değişimlerinde katmanlar arasında tel kaymaları olabilmektedir. Şekil 2.22’de çok katmanlı halatların sarımını gösteren bir örnek bulunmaktadır [21].



Şekil 2.22 Çok operasyonlu tel halatlar



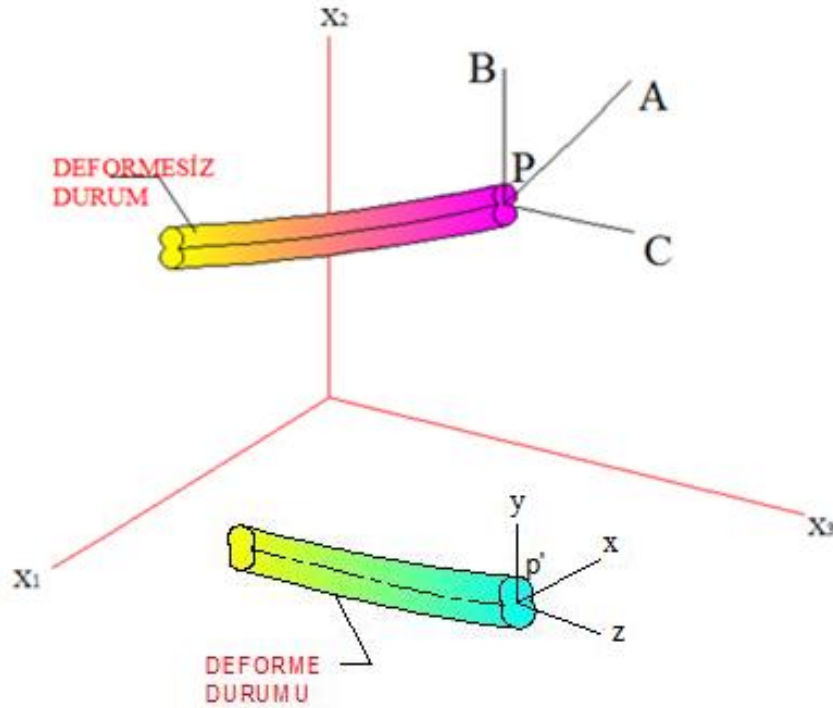
BÖLÜM 3

HALAT TELİNİN DENGESİ

Bu bölümde tel halatı meydana getiren ince bir telin yüksüz durumu ve yük altındaki davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar, Love'un 1944 yılında geliştirdiği "Klasik Tel Halat Teorisi" ile Costello'nun 1990 yılındaki yayınları temel alınarak oluşturulmuştur.

3.1 HALAT TELİNİN KİNEMATİĞİ

Ön gerilimi olmayan, bükülmüş, üniform kesitli bir tel ele alınacaktır. Buradaki ince bir tel, maksimum karakteristik kesit uzunluğunda, çap uzunluğunun, eğrilik çapına ve tel boyuna oranla çok küçük olması şeklinde ifade edilir.

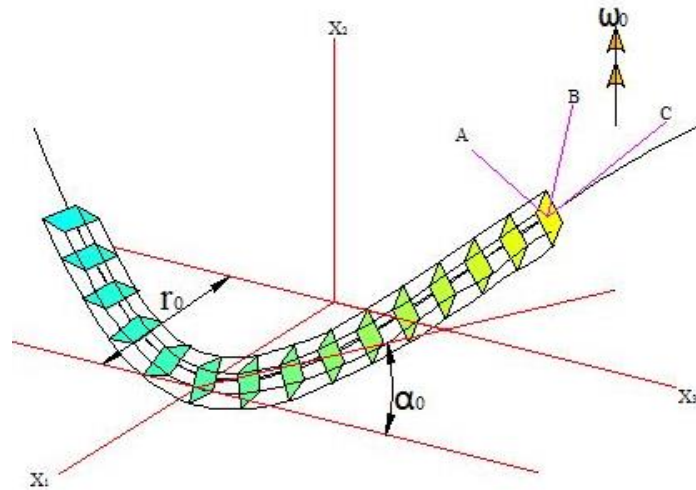


Şekil 3.1 Eğilmiş ince telin deformeli ve deformsiz hali [21]

Şekil 3.1'deki resimde de görüldüğü gibi, eğilmiş bir telin deformsiz ve deforme olduktan sonra olmak üzere iki simetri eksenini bulunmaktadır. Bu eksenler kesitimizin ana eksenleri olarak kabul edilecektir. Bu eksen takımlarından ilk olarak **A,B,C** eksen takımını ele alalım. **C** eksenini, eğri telin eğrilik merkez çizgisinin **P** noktasından teğet uzantısı, **A** ve **B** eksenleri ise **C** eksenine dik eksenleri temsil edecektir. **a, b, c** sembolleri ise **P** noktasından itibaren **A, B, C** doğrultusundaki sonsuz küçük çizgi elemanlarını temsil eder [21].

Üzerinde çalıştığımız teli deforme olmuş durumda düşünürsek, **a, b, c** elemanlarının birbirlerine göre diklik durumları genellikle ortadan kalkar. Bu durumda **a** ve **c** deforme durumunda da dik kalmaya devam ederek bir düzlem oluşturur. **x** eksenini **a-c** düzleminde ve **z** eksenine diktir. **z** eksenini, deforme **c** eksenini doğrultusunda, **y** eksenini de **x-z** eksenlerine diktir. Böylece **x-y-z** eksen takımı, sağ el ortogonal eksen sistemi haline gelir. Dolayısıyla deforme bir telin merkez eksenini doğrultusunda **x-y-z** eksen sistemi mevcuttur. Deforme olmuş eksen takımı üzerinde rastgele seçilen bir nokta için, bu kurulan eksen takımına “Prinsiple Torsion-Flexure Axes” yani “Ana Burulma Eğilme Eksenleri” adı verilir [4].

P', **x-y-z** eksen takımının merkezi olmak üzere, deforme telin merkez eksenini üzerinde birim hızda hareket ettiğini kabul edelim. Bu hareket $\vec{\omega}$ açısal hızı meydana getirir. Bu vektörün **x-y-z** eksenlerindeki iz düşümleri, eğrilik " κ, κ' " ve birim boyda burulma " τ " bileşeni ile ifade edilir. Bu durumu deformsiz durumdaki tel için benzer şekilde ele alırsak, açısal hız $\vec{\omega}_0$, **X-Y-Z** eksenlerindeki iz düşümleri ise eğrilik " κ_0, κ'_0 " ve birim boydaki burulma " τ_0 " sembolleri ile ifade edilir [21].



Şekil 3.2 Dikdörtgen kesite sahip yüksüz helisel tel [65, 66]

Şekil 3.2’de ifade edilen yüksüz durumdaki bir dikdörtgen kesitli bir tel numunesini incelersek, kesitin merkezinden geçen eksen çizgisinin teğeti ile \mathbf{X}_1 ve \mathbf{X}_2 ’nin oluşturduğu düzlemin kesişiminden oluşan açıya α_0 ile ifade ederiz. Aynı telin helisel yarıçapı ise r_0 olarak kabul ederiz. Eğer, **A-B-C** eksen takımı birim hız ile hareket ederse bu eksen takımının çevresel dönme hızı, aşağıdaki Denklem 3.1’deki gibi olur. Denklemdeki \vec{k} ifadesi \mathbf{X}_3 eksenini doğrultusundaki birim vektör olmak üzere [43, 39]:

$$\vec{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi r_0 / \cos \alpha_0} \vec{k} = \frac{\cos \alpha_0}{r_0} \vec{k} \quad (3.1)$$

Sonuç olarak:

$$\kappa_0 = 0 \quad (3.2a)$$

$$\kappa'_0 = \frac{\cos \alpha_0}{r_0} \quad (3.2b)$$

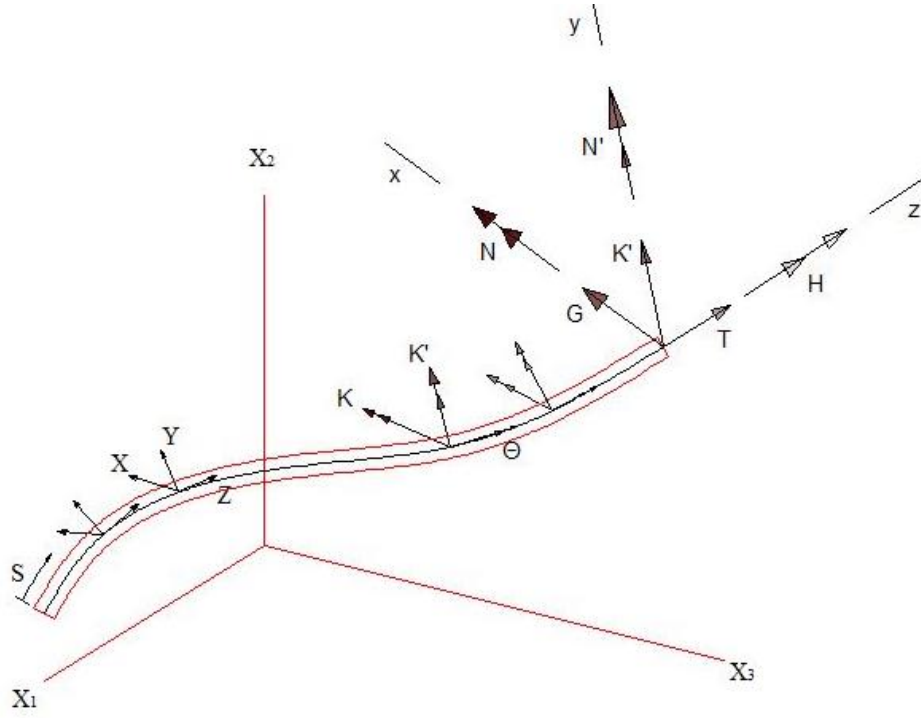
$$\tau_0 = \frac{\sin \alpha_0 \cos \alpha_0}{r_0} \quad (3.2c)$$

3.2 İNCE BİR TELİN DENGE DENKLEMLERİ

Yüklü durumdaki ince bir telin davranışı Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Burada;

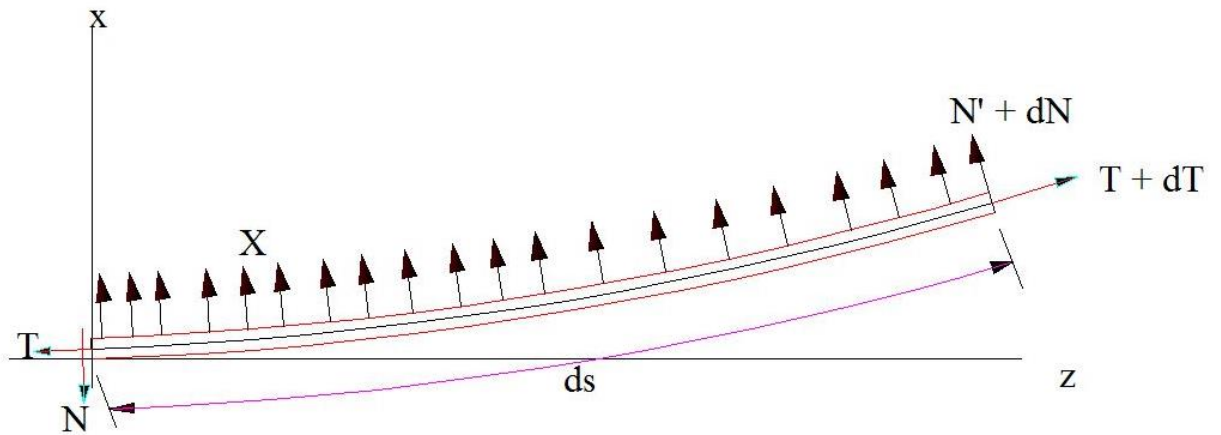
- s , tel boyundaki yay uzunluğu,
- \mathbf{N} ve \mathbf{N}' sırası ile x ve y eksenini doğrultusundaki kesme kuvveti bileşenleri,
- \mathbf{T} , teldeki eksenel çekme kuvveti,
- \mathbf{G} ve \mathbf{G}' sırası ile x ve y eksenini doğrultusundaki eğilme momenti bileşenleri,
- \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} sırası ile x , y , z eksenleri doğrultusundaki telin merkez çizgisi üzerinde birim boydaki dış yükleri,
- \mathbf{H} , teldeki burulma momenti,
- \mathbf{K} , \mathbf{K}' ve $\mathbf{\Theta}$, sırasıyla x - y - z eksenleri doğrultusunda birim boydaki dış momentler,
- κ ve κ' sırası ile x ve y eksenleri doğrultusunda eğrilik bileşenleri,

- τ , telin birim boydaki burulması [49].

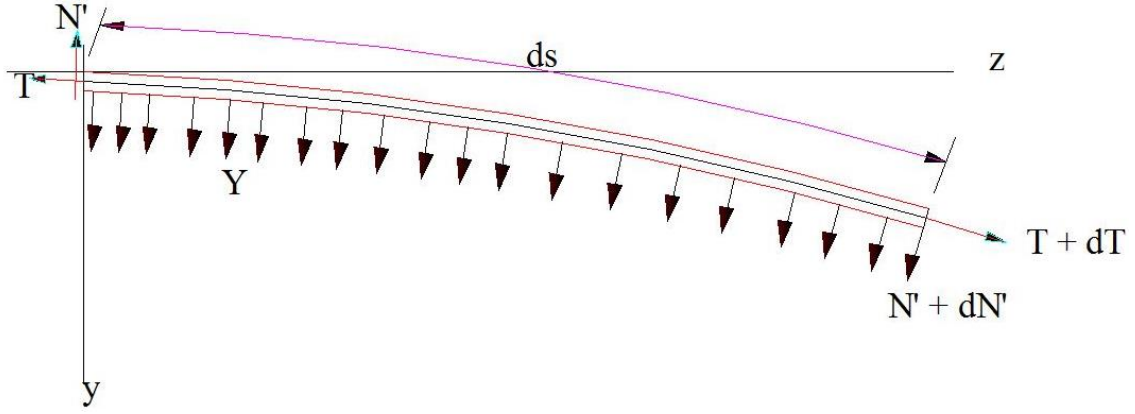


Şekil 3.3 İnce bir halat teline etki eden yükler [40,22]

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 incelendiğinde merkez çizgisinin uzunluğunu ds olan bir ince telin sırası ile y ve x eksenlerinin aşağı bakan görüntülerinin verilmiş olduğunu görebiliriz. Şekillerde karışıklığın ortadan kalkması için kuvvet çiftleri verilmemiştir [65].



Şekil 3.4 İnce bir halat telinin, y eksenini aşağıya döndürülmüş durumda, merkez eksen çizgisi [18, 49]



Şekil 3.5 İnce bir halat telinin, x eksenine aşağı dönük vaziyette, merkez eksen çizgisi [18, 49]

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'den yola çıkarak $N+dN$, $N'+dN'$ ve $T+dT$ kuvvetlerinin x, y, z doğrultularındaki kosinüslerini veren Çizelge 3.1'i oluşturabiliriz.

Çizelge 3.1 Kuvvetlerin doğrultu kosinüsleri [21]

Doğrultu Kosinüsleri	$N+dN$	$N'+dN'$	$T+dT$
l	1	$-\tau ds$	$\kappa' ds$
m	τds	1	$-\kappa ds$
n	$-\kappa ds$	κds	1

Çizelge 3.1'den yola çıkarak x doğrultusundaki kuvvetleri bir araya getirirsek [35],

$$Xds + dN - N'\tau ds + T\kappa' ds = 0 \quad (3.3)$$

Denklemdaki ds'leri sadeleştirsek,

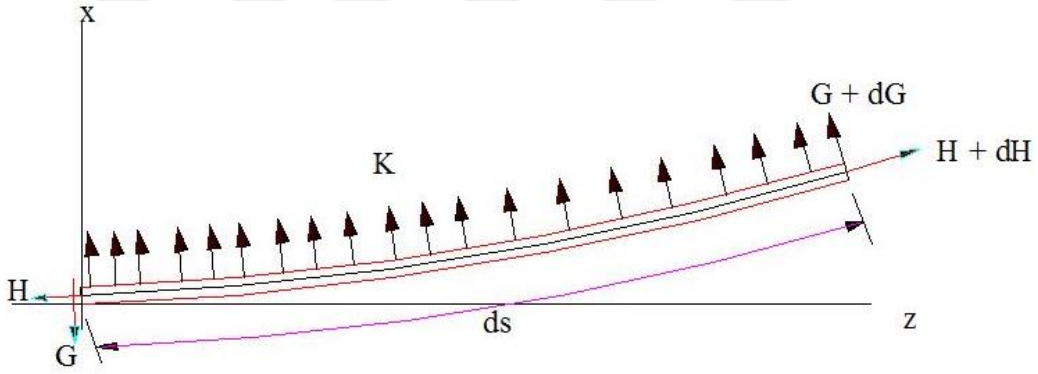
$$\frac{dN}{dS} - N'\tau + T\kappa' + X = 0 \quad (3.4)$$

Yukarıda x doğrultusunda oluşturduğumuz denklemi ve sadeleştirme işlemini benzer şekilde y ve z doğrultusundaki kuvvetler için tekrarlanırsa aşağıdaki ifadeler yazılabilir[35],

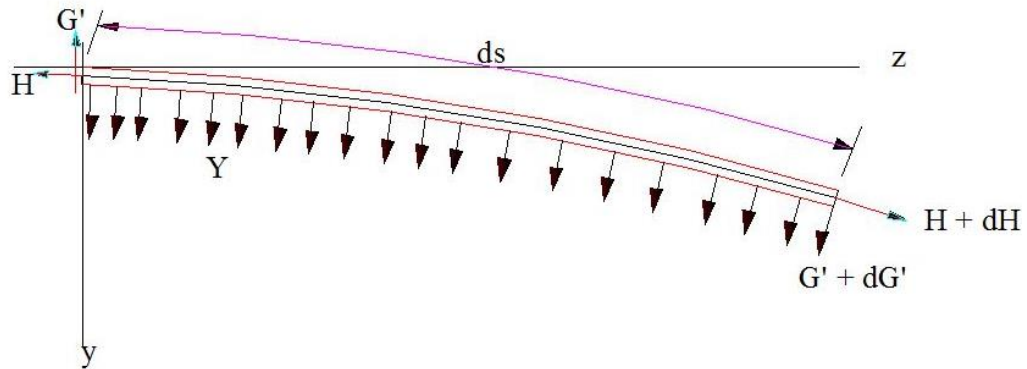
$$\frac{dN'}{ds} - T\kappa + N\tau + Y = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{dT}{ds} - N\kappa' + N'\kappa + Z = 0 \quad (3.6)$$

Kuvvet çiftlerine benzer olarak moment çiftlerini de incelersek Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'yi oluşturabiliriz. Burada $G+dG$, $G'+dG'$ ve $H+dH$ moment çiftlerini göstermektedir. Moment çiftlerinin x, y, z eksenleri ile yaptığı açı, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'teki kuvvet çiftlerinin x, y, z eksenleriyle yaptığı açıya eşittir. Dolayısıyla Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'den yola çıkarak moment çiftlerinin x, y, z doğrultularındaki kosinüslerini veren Çizelge 3.2'yi oluşturabiliriz.



Şekil 3.6 İnce bir halat telinin, y ekseninden bakıştaki momentleri ve merkez hattı (kuvvetler hariç) [18]



Şekil 3.7 İnce bir halat telinin, x ekseninden bakıştaki momentleri ve merkez hattı (kuvvetler hariç) [18]

Çizelge 3.2 Momentlerin doğrultu kosinüsleri [35]

Doğrultu Kosinüsleri	G+dG	G'+dG'	H+dH
<i>l</i>	1	-τds	κ'ds
<i>m</i>	τds	1	-κds
<i>n</i>	-κds	κds	1

Çizelge 3.2'deki değerleri kullanarak x eksenini doğrultusundaki momentleri bir araya getirebiliriz. Daha sonra da ds'lere sadeleştirerek denklem (3.7) ve (3.8) oluşturulabilir[22].

$$dG - G'\tau ds - N'ds + H\kappa'ds + \kappa ds = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{dG}{ds} - G'\tau - N' + H\kappa' + \kappa = 0 \quad (3.8)$$

Bu işlemleri y ve z doğrultusundaki moment bileşenleri için de tekrarlırsak aşağıdaki denklemleri elde edebiliriz [22].

$$\frac{dG'}{ds} - H\kappa + G\tau + N + \kappa' = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{dH}{ds} - G\kappa' + G\kappa + \Theta = 0 \quad (3.10)$$

Yukarıda verilen denklemler, (3.4), (3.5), (3.6) ve (3.8), (3.9), (3.10), Şekil 3.3'de gösterilen ince bir tele ait altı diferansiyel denklemdir [21].

3.3 İNCE BİR TELİN DENGE DENKLEMLERİ

x ve y doğrultularında I_x ve I_y atalet momentlerine sahip elastik yapıda ince bir halat teli elemanımı ele alalım. “ C ” burulma rijitliği ve “ E ” elastisite modülü olmak üzere, tel ağırlığındaki değişme ve birim boydaki burulma değerinin iç kuvvetler ile bağlantısı Denklem (3.11)'de verilmiştir [65].

$$G = EI_x (\kappa - \kappa_0) \quad (3.11a)$$

$$G' = EI_y (\kappa' - \kappa_0') \quad (3.11b)$$

$$H = C(\tau - \tau_0) \quad (3.11c)$$

Eğer telin kesiti R yarıçaplı bir daire olursa Denklem 3.12'yi oluşturabilir;

$$G = \frac{\pi R^4}{4} E(\kappa - \kappa_0) \quad (3.12a)$$

$$G' = \frac{\pi R^4}{4} E(\kappa' - \kappa_0') \quad (3.12b)$$

$$H = \frac{\pi R^4 E}{4(1-\nu)} (\tau - \tau_0) \quad (3.12c)$$

Burada; ν , poisson oranı ve $I_x = I_y = \frac{\pi R^4}{4}$ (Daire için atalet momenti)'dir.

A, telin kesit alanı, ξ , telin aksenal uzaması olarak kabul edersek, T, kuvveti, Denklem 3.13'de verilmiştir.

$$T = AE\xi \quad (3.13a)$$

$$T = \pi R^2 E\xi \quad (3.13b)$$

Basit bir demeti, merkezde R_1 ve m_2 sayıdaki R_2 yarıçaplı telin sarılması ile oluştuğunu söyleyebiliriz. Bu bölümde verilen denklemler F aksel kuvvet ve M aksel burulma momenti etkisi altında kalan basit bir demetin aksel dayanımı oluşturulmasında kullanılacaktır [65].

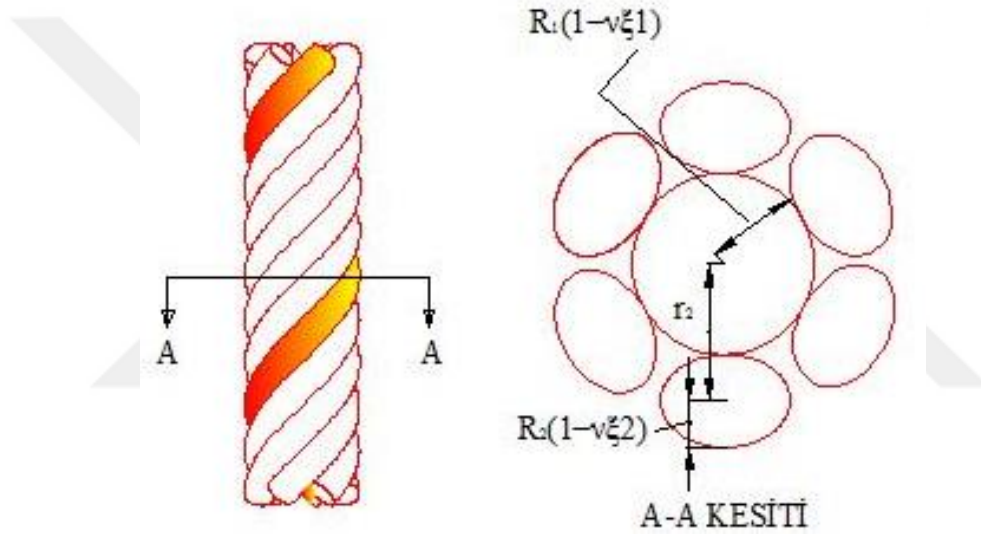




BÖLÜM 4

HALAT DEMETİNİN STATİK DAVRANIŞI

Costello'ya ait aksenal yüklü halat demetinin davranışına yönelik denklemler bu bölümde ele alınacaktır. Bu denklemlere ait halat geometrisi aşağıda Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Yük altındaki basit halat demetinin geometrisi [24, 49]

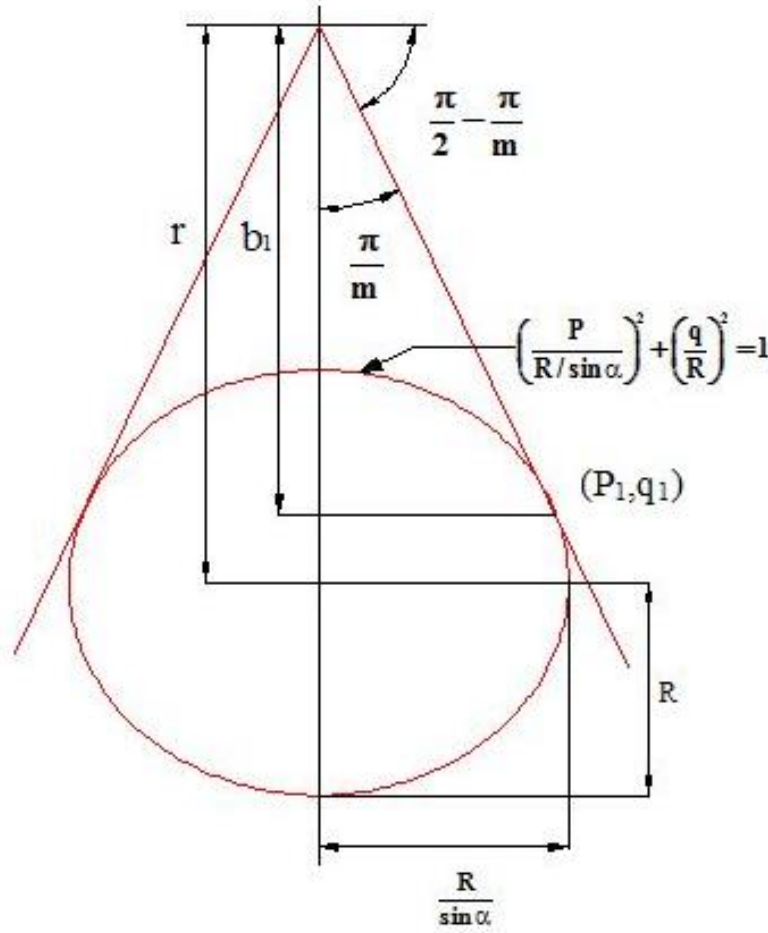
4.1 BASİT HALAT DEMETİNİNİ GEOMETRİSİ

Modelleme ve analiz hesaplamalarında kullanılacak olan basit halat demetinin geometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir. R_1 yarıçaplı düz bir teli merkez teli kabul edersek, m_2 tane R_2 yarıçaplı telin merkez telin etrafına sarılmasıyla basit düz demet oluşturulur. Bu çalışmada ele alınacak demetin dış telleri ilk aşamada birbirine temas etmediği kabul edilecektir. Bu kabuller doğrultusunda demetin helis yarıçapının yüksüz haldeki değeri aşağıdaki gibi ifade edilir [24, 65].

$$r_2 = R_1 + R_2 \quad (4.1)$$

Dış tellerin arasında sürtünme direnci olmaması için gereken R_1 değerinin bulunabilmesi amacıyla aşağıdaki bir dizi denklem sırasının takip edilmesi gerekmektedir [21].

m_2 tane helisel telden oluşan demette, teller birbirlerine noktasal temas halinde olduğunu kabul edelim. Helis açısı α ve tel yarıçapı R olan tele ait Şekil 4.2'yi incelersek, eksen çizgisine dik olan bir telin kesiti görülmektedir. Burada telin kesiti elips kabul edilerek Denklem 5.2'yi yazabiliriz [35].



Şekil 4.2 Demet eksenine dik ince tel kesiti [52]

$$\left(\frac{p}{R/\sin \alpha}\right)^2 + \left(\frac{q}{R}\right)^2 = 1 \quad (4.2)$$

(p,q) elips şeklindeki telin üzerinde herhangi bir nokta ise (p,q) için genel denklem,

$$\frac{dp}{dq} = \pm \frac{p \sin \alpha}{R \sqrt{1 - \left(\frac{p \sin \alpha}{R} \right)^2}} \quad (4.3)$$

Şekil 4.2'den yola çıkarak, elips kesitindeki tele (p_1, q_1) noktasından teğet bir doğrunun eğimi, m_{Tel} denklem 4.4'te gösterildiği gibidir.

$$m_{Tel} = -\tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) \quad (4.4)$$

Denklem 4.3 ile Denklem 4.4 birleştirerek Denklem 4.5'i yazabiliriz.

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) = \frac{p_1 \sin \alpha}{R \sqrt{1 - \left(\frac{p_1 \sin \alpha}{R} \right)^2}} \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'in çözümünden p_1 'i elde edebiliriz. Bulduğumuz p_1 değerini Denklem 4.2'de yerine koyarak q_1 değerini bulabiliriz.

$$p_1 = \frac{R}{\sin \alpha} \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) \frac{1}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right)}} \quad (4.6)$$

$$q_1 = \frac{R \sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right)}} \quad (4.7)$$

Şekil 4.2'yi tekrar incelersek;

$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) = \frac{b_1}{p_1} \quad (4.8a)$$

$$r = b_1 + q_1 \quad (4.8b)$$

Yukarıda yapılan bütün kabulleri Denklem 4.9'da bir araya getirebiliriz.

$$q_1 = \frac{R \sin \alpha}{\sqrt{\sin^2 \alpha + \tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right)}} \quad (4.9)$$

Denklem 4.9 ile hesaplanan R değeri, bize dış tellerin birbirleriyle noktasal temas ettiği durumu veren helis açısı için hesaplanmıştır. Dolayısıyla dış tellerin birbirine temas etmemesi için aşağıdaki şartı sağlaması gerekmektedir [49, 65].

$$R_1 \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_2} \right)}{\sin^2 \alpha_2}} < R_1 + R_2 \quad (4.10)$$

4.2 BASİT DÜZ BİR HALAT DEMETİNİN EKSENEL DAVRANIŞI

Yük altındaki bir tel demetinin yapısı ve enine kesitini gösteren Şekil 4.1'i tekrar incelersek, dış tellerin oluşturduğu başlangıç helis açısı α_2 aşağıdaki denklem 4.11'deki gibi yazabiliriz [49].

$$\tan \alpha_2 = \frac{P_2}{2\pi r_2} \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'deki P_2 değeri halat demetinin yüksüz durumdaki (başlangıç şartlarındaki) dış telinin hatvesidir (halat adımı). Denklem 3.2'de ince bir halat teli için yazdığımız eğrilik ve birim boydaki burulma değerini aşağıdaki gibi yazabiliriz [21, 67].

$$\kappa_2 = 0 \quad (4.12a)$$

$$\kappa'_2 = \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2} \quad (4.12b)$$

$$\tau_2 = \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2} \quad (4.12c)$$

Halat demetimiz F aksenal kuvveti ile M aksenal burulma momenti etkisi altına girerse, r_2 yarıçap değeri yerine \bar{r}_2 ve α_2 helisel çap yerine $\bar{\alpha}_2$ değeri kullanılacaktır. Bu şekilde üst çizgili gösterim şekli halatın deformasyon durumunu ifade edecektir. Denklem 5.11'i bu yaklaşım ışığında yeniden düzenlersek [21, 66];

$$\bar{\kappa}_2 = 0 \quad (4.13a)$$

$$\bar{\kappa}'_2 = \frac{\cos^2 \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2} \quad (4.13b)$$

$$\bar{\tau}_2 = \frac{\sin \bar{\alpha}_2 \cos \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2} \quad (4.13c)$$

Demeti oluşturan dış tellere etki eden T_2 , dış tellerdeki aksenal kuvvetin tel boyunca sabit olduğunu ve birim boyda hiçbir harici eğilme momentine maruz kalmadığını ($\kappa_2 = \kappa'_2 = 0$) kabul edelim. Denklem 3.12 (a-b-c), Denklem 4.12 (a-b-c) ve Denklem 4.13 (a-b-c)'ü kullanarak daha önce yazılan denge denklemlerini (Denklem 3.4 – 3.5 – 3.6 ve Denklem 3.8 – 3.9 – 3.10) yeniden düzenleyebiliriz. Aşağıdaki denklemlerde bulunan 2 indisi dış telleri belirtmek için kullanılmıştır [9, 65].

$$-N'_2 \bar{\tau}_2 + T_2 \bar{\kappa}'_2 + X_2 = 0 \quad (4.14)$$

$$Y_2 = 0 \quad (4.15)$$

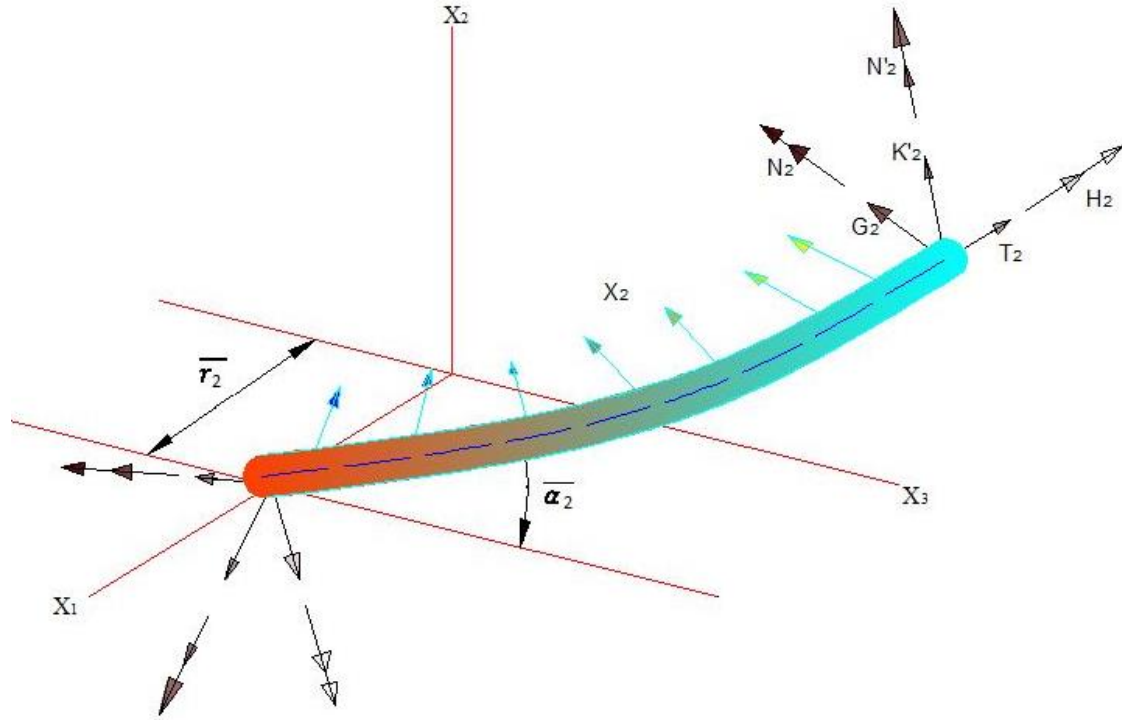
$$Z_2 = 0 \quad (4.16)$$

$$-G'_2 \bar{\tau}_2 + H_2 \bar{\kappa}'_2 + N'_2 = 0 \quad (4.17)$$

$$N_2 = 0 \quad (4.18)$$

$$\Theta_2 = 0 \quad (4.19)$$

Şekil 4.3'te helisel bir tele etki eden yüklerin pozitif yönleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Helisel halat teline etki eden yükler [26, 39]

Yukarıda yazılan Denklem 4.14a ile Denklem 4.15a helisel dış tele ait denge denklemleridir. Burada X_2 ve N'_2 değerleri ile $\bar{\alpha}_2$, \bar{r}_2 , T_2 , değerleri dengededir. Dolayısıyla N'_2 ve X_2 değerlerinin bilinmesi önemlidir [65].

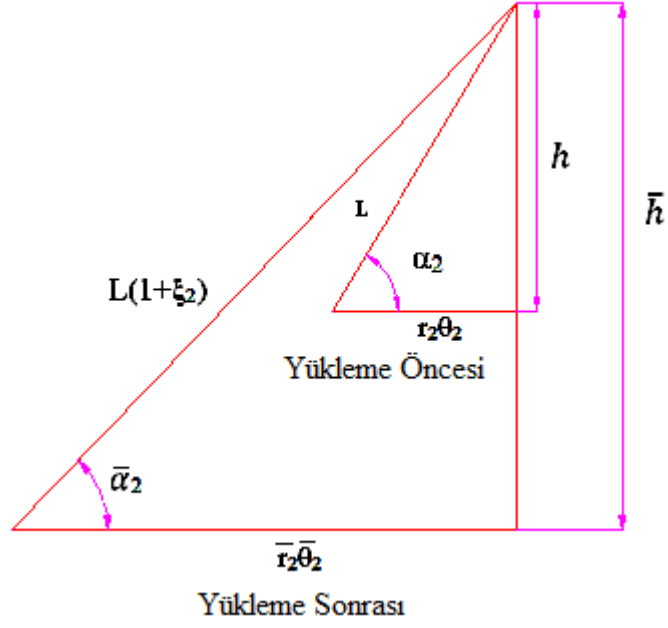
Demetteki dış tellerin oluşturduğu helisel açı α_2 ve demet aksenal yük altına girdikten sonraki helisel açısı $\bar{\alpha}_2$ olmak üzere helisel açıdaki değişim miktarı $\Delta\alpha_2$ ile gösterilir [49].

$$\Delta\alpha_2 = \bar{\alpha}_2 - \alpha_2 \quad (4.20)$$

h demetin ilk boyu, \bar{h} demetin yükleme sonrasındaki boyu olmak üzere, düz bir telin aksenal kuvvetin uygulandığı yönde birim şekil değiştirme miktarı ε , Denklem 4.21'deki gibi olur [65].

$$\varepsilon = \frac{\bar{h} - h}{h} \quad (4.21)$$

Şekil 4,4'te dış tellerin, başlangıçtaki yüksüz durumdaki ve yüklendikten sonraki merkez ekseninin çizdiği helisin açılmasıyla aldığı şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Dış tellerin merkez eksenlerinin çizdiği helisel açı [35, 40]

Dış telin açısal şekil değiştirmesi β_2 aşağıdaki gibi hesaplanabilir [49].

$$\beta_2 = r_2 \frac{(\bar{\theta}_2 - \theta_2)}{h} \quad (4.22)$$

Denklem 4.22'deki θ_2 ve $\bar{\theta}_2$, başlangıç ve yükleme sonrası burulma açılarıdır. Benzer şekilde halat demetinin birim boydaki burulma miktarı ise;

$$\tau_2 = \frac{\bar{\theta}_2 - \theta_2}{h} \quad (4.23)$$

Şekil 4.3'ün çözümlenmesiyle düz demete ait dış tellerin açısal şekil değiştirmesi β_2 ve demetin birim şekil değiştirmesi ε değerleri aşağıdaki gibi yazılabilir [65].

$$\beta_2 = r_2 \tau_2 = \frac{r_2}{\bar{r}_2} \frac{(1 + \xi_1)}{\tan \bar{\alpha}_2} - \frac{1}{\tan \bar{\alpha}_2} \quad (4.24)$$

ve

$$\varepsilon = \frac{\bar{h} - h}{h} = \xi_1 = (1 + \xi_2) \frac{\sin \bar{\alpha}_2}{\sin \alpha} - 1 \quad (4.25)$$

Yukarıdaki denklemlerde verilen ξ_1 , merkez telin aksenal uzaması ($\varepsilon=\xi_1$) ve ξ_2 dış telin aksenal uzamasıdır. Bu arada $\Delta\alpha$ için aşağıdaki bağıntı yazılabilir;

$$|\Delta\alpha_2| = |\bar{\alpha}_2 - \alpha_2| \ll 1 \quad (4.26)$$

$\sin\bar{\alpha}_2$ ve $\cos\bar{\alpha}_2$ değeri yerine denklemlerde kullanmak üzere aşağıdaki bağıntıyı kullanabiliriz.

$$\sin\bar{\alpha}_2 = \sin(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) = \sin\alpha_2 + \Delta\alpha_2 \cos\alpha_2 \quad (4.27a)$$

$$\cos\bar{\alpha}_2 = \cos(\alpha_2 + \Delta\alpha_2) = \cos\alpha_2 - \Delta\alpha_2 \sin\alpha_2 \quad (4.27b)$$

Denklem 4.25'i yukarıdaki bağıntıyı kullanarak tekrar yazabiliriz [13].

$$\xi_1 = \xi_2 + \frac{\Delta\alpha_2}{\tan\alpha_2} = \varepsilon \quad (4.28)$$

ξ_1 ve ξ_2 değerlerinin çok küçük olduğu kabul edilir. Aynı işlemleri Denklem 4.24 için de tekrar yapıp, yeniden düzenlersek Denklem 4.29'u yazabiliriz.

$$\beta_2 = \left(\frac{r_2}{\bar{r}_2} \frac{1 + \xi_2}{\tan\alpha_2} - \Delta\alpha_2 \right) - \frac{1}{\tan\alpha_2} \quad (4.29)$$

ν poisson oranını kullanarak hesaplanan, son durumdaki (yüklenmiş) telin helis yarıçap \bar{r}_2 değeri, Denklem 4.30'da gösterilmiştir [48].

$$\bar{r}_2 = R_1(1 - \nu\xi_1) + R_2(1 - \nu\xi_2) \quad (4.30)$$

Bu işlemleri yaparken demetin merkez teli ve dış teller arasında oluşabilecek temas deformasyonu ihmal edilmiştir. Dolayısıyla Denklem 4.10'nun sağlandığını varsayılmıştır. ξ_1 ve ξ_2 çok küçük değerler olduğunu kabul ederek r_2 / \bar{r}_2 oranı tekrar düzenlenip aşağıdaki gibi yazılabilir [21];

$$\frac{r_2}{\bar{r}_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 - \nu(R_1\xi_1 + R_2\xi_2)} = 1 + \nu \frac{(R_1\xi_1 + R_2\xi_2)}{r_2} \quad (4.31)$$

Denklem 4.31'deki bağıntıyı Denklem 4.29'da kullanırsak, aşağıdaki Denklem 4.32 yazılabilir.

$$\beta_2 = r_2 \tau_s = \frac{\xi_2}{\tan \alpha_2} - \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1\xi_1 + R_2\xi_2)}{r_2 \tan \alpha_2} \quad (4.32)$$

Bununla birlikte birim boyda burulma değişimi $\Delta\tau_2$ ve eğrilikteki değişim $\Delta\kappa_2'$ doğrusal (lineer) hale getirebiliriz. Dolayısıyla aşağıdaki Denklem 4.33 ve Denklem 4.34'ü yazabiliriz.

$$\begin{aligned} R_2 \Delta\kappa_2' &= \frac{\cos^2 \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2 / R_2} - \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2 / R_2} \\ &= -\frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2} \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1\xi_1 + R_2\xi_2)}{r_2} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2 / R_2} \end{aligned} \quad (4.33)$$

ve

$$\begin{aligned} R_2 \Delta\tau_2 &= \frac{\sin \bar{\alpha}_2 \cos \bar{\alpha}_2}{r_2 / R_2} - \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2} \\ &= \frac{(1 - 2 \sin^2 \alpha_2)}{r_2 / R_2} \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1\xi_1 + R_2\xi_2)}{r_2} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Sonuç olarak dış teller için aşağıdaki bağıntılar yazılabilir [43, 65, 67].

$$\frac{G_2'}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4} R_2 \Delta\kappa_2' \quad (4.35)$$

$$\frac{H_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_2 \Delta\tau_2 \quad (4.36)$$

$$\frac{N'_2}{ER_2^2} = \frac{H_2}{ER_2^3} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2/R_2} - \frac{G'_2}{ER_2^3} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2/R_2} \quad (4.37)$$

$$\frac{T_2}{ER_2^2} = \pi \xi_2 \quad (4.38)$$

$$\frac{X_2}{ER_2} = \frac{N'_2}{ER_2^2} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2/R_2} - \frac{T_2}{ER_2^2} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2/R_2} \quad (4.39)$$

Yukarıda yazılan Denklem 4.37 ve Denklem 4.39 oluştururken daha önce yazılan Denklem 4.14 ve Denklem 4.17'den yararlanılmıştır.

Demeti oluşturan m_2 adet dış tele etki eden toplam eksenel kuvvet F_2 'yi bulmak için, demet eksenine yönünde dış tellere etki eden kuvvetlerin izdüşümleri alınır. Benzer şekilde dış tellere etki eden toplam burulma momenti de hesaplanır [65].

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = m_2 \left[\frac{T_2}{ER_2^2} \sin \alpha_2 + \frac{N'_2}{ER_2^2} \cos \alpha_2 \right] \quad (4.40)$$

ve

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = m_2 \left[\frac{H_2}{ER_2^3} \sin \alpha_2 + \frac{G'_2}{ER_2^3} \cos \alpha_2 + \frac{T_2}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \cos \alpha_2 - \frac{N'_2}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \sin \alpha_2 \right] \quad (4.41)$$

Dış tellere etki eden F_2 ve M_2 ifadeleri yukarıda gibi iken merkez tellere etki eden etki eden eksenel kuvvet F_1 ve Burulma momenti M_1 aşağıdaki Denklem 4.42 ve Denklem 4.43'de verilmiştir [21].

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi\xi_1 \quad (4.42)$$

ve

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_1 \tau_s \quad (4.43)$$

Demeti oluşturan tellere etki eden toplam aksenal kuvvet F ve toplam aksenal burulma momenti M'yi Denklem 4.44 ve Denklem 4.45 de yazabiliriz.

$$F = F_1 + F_2 \quad (4.44)$$

ve

$$M = M_1 + M_2 \quad (4.45)$$

4.3 HALAT DEMETİNDE OLUŞAN GERİLMELERİN BULUNMASI

Yukarıdaki bölümlerde verilen denklemler ile halat demetindeki iç ve dış tellere etki eden yükler hesaplanabilir ve tellere göre dağılımları gösterilebilmektedir. Bu bölümde ise yükler karşısında halattaki iç ve dış tellerde meydana gelen gerilmelerini hesaplayabileceğimiz denklemler verilmiştir. Yapılacak hesaplarda tellerin ön gerilmesiz olduğu varsayılacaktır. Aşağıdaki denklemlerde 1 indisi merkez tel, 2 indisi dış telleri belirtmek için kullanılmıştır [65].

- Merkez teldeki aksenal gerilme;

$${}_F\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi R_1^2} \quad (4.46)$$

- Merkez tele ait kesitteki maksimum burulma gerilimi;

$${}_M\sigma_1 = \frac{2M_1}{\pi R_1^3} \quad (4.47)$$

Demeti oluşturan dış teller, N'_2 kesme yükü ile birlikte aksenal, eğilme ve burulma yüklerine maruz kalırlar. N'_2 kesme yükünden kaynaklanan gerilmeler, diğer gerilmelere kıyasla çok küçük olduğundan dolayı ihmal edilecektir.

- T_2 yükünden kaynaklanan aksenal gerilme;

$$\tau \sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} \quad (4.48)$$

- G'_2 eğme momentinin oluşturduğu normal gerilme;

$$g' \sigma_2 = \frac{4G'_2}{\pi R_2^3} \quad (4.49)$$

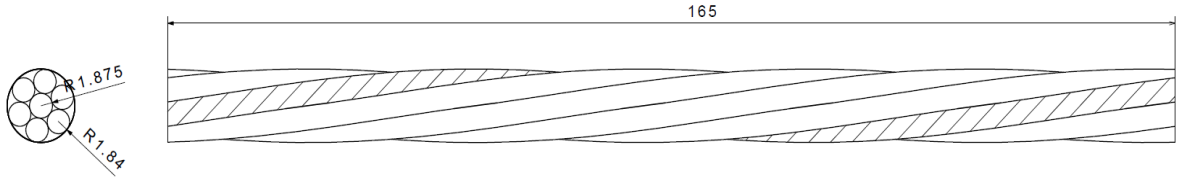
- Demetteki dış tellerden bir tanesi için H_2 burulma momentinin oluşturduğu maksimum burulma gerilmesi [65];

$$h \sigma_2 = \frac{2H_2}{\pi R_2^3} \quad (4.50)$$

BÖLÜM 5

HALAT DEMETİNİN YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Bu çalışmada Bölüm 4 ve Bölüm 5 verilen denklemler kullanılarak ASTM A416 Prestressing Strand sınıfı halat demetinin maksimum aksenal kuvvet F , maksimum burulma momenti M ve maksimum gerilme değerleri hesaplanacaktır. Şekil 5.1’de, çalışmada kullanılacak halat örneği verilmiştir. Çizelge 5.1’de kullanılacak halat demetinin özellikleri tablo halinde verilmiştir. Bu bölümdeki yapılan hesaplamalarda, başlangıçta dış tellerin noktasal temas halinde olduğu varsayılacaktır.



Şekil 5.1 Tez çalışmasında kullanılan tel halat demetinin iç, dış çapı ve hatvesi

Çizelge 5.1 Hesaplamalarda kullanılan halat demetinin özellikleri [68]

ASTM A416 sınıf PC 270 Malzeme Mekanik Özellikleri			
1+6 Helisel Halat Demeti			
İç Tel Yarıçap (mm)	1,875	Merkez Telin Birim Şekil değıştirmesi (ξ_1)	0,003
Dış Tel Yarıçap (mm)	1,840	Elastisite Modülü (Mpa)	196500,582
Halat Hatvesi (mm)	165	En küçük kopma mukavemeti (Mpa)	1860
Dış Tel Sayısı m_2	6	En küçük Akma mukavemeti (Mpa)	1580
Poison Oranı	0,3	Yoğunluk (kg/m^3)	7850

Denklem 4.1 kullanılarak halat demetinin helis yarıçap değerini hesaplayalım.

$$r_2 = R_1 + R_2 \quad (4.1)$$

$$r_2 = 1,875\text{mm} + 1,840\text{mm}$$

$$r_2 = 3,715\text{mm}$$

Dış tellerin yüksüz haldeki helis açısı Denklem 4.11'ünü kullanarak bulunabilir.

$$\tan \alpha_2 = \frac{P_2}{2\pi r_2} \quad (4.11)$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{165}{2\pi \cdot 3,715} = 7,06879$$

- $\alpha_2 = 81,947976^\circ$

α_2 değerini kullanarak hesaplamalarda kullanmak üzere aşağıdaki değerleri yazabiliriz.

- $\sin \alpha_2 = 0,99014$
- $\sin^2 \alpha_2 = 0,98038$
- $\cos \alpha_2 = 0,14007$
- $\cos^2 \alpha_2 = 0,01962$
- $\frac{r_2}{R_2} = 2,01902$
- $\frac{r_2}{R_2} = 2,01902$

Yapılacak işlemlerde demetteki dış tellerin arasında sürtünme olup olmadığını kontrol etmek için Denklem 4.10'un sağlayıp sağlamadığını kontrol etmemiz gerekmektedir.

$$R_1 \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m_2} \right)}{\sin^2 \alpha_2}} < R_1 + R_2 \quad (4.10)$$

$$1,8400 \sqrt{1 + \frac{\tan^2 \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{6} \right)}{\sin^2 (81,94798)}} < 1,8750 + 1,8400$$

- $3,70751 < 3,71500$

Denklem 4.10'nun sağlanması ile dış tellerin birbiriyle temas etmediği ve aralarında sürtünme olmadığı kabul edilecektir.

Denklem 4.12 (a, b, c)'de demetin başlangıçta, yüksüz durumdaki eğrilik ve birim boydaki gerilme değerlerini vermektedir. Benzer şekilde demete F aksenal kuvvet ve M aksenal burulma momenti altında deforme olmuş durumdaki eğrilik ve birim boydaki burulma değerlerini Denklem 4.13 (a, b, c) ile hesaplayabiliriz.

$$\kappa_2 = 0 \quad (4.12a)$$

- $\kappa_2 = 0$

$$\kappa'_2 = \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2} \quad (4.12b)$$

- $\kappa'_2 = \frac{0,01962}{3,71500} \Rightarrow \kappa'_2 = 0,005281$

$$\tau_2 = \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2} \quad (4.12c)$$

- $\tau_2 = \frac{0,99014 * 0,14007}{3,71500} \Rightarrow \tau_2 = 0,037332775$

$$\bar{\kappa}_2 = 0 \quad (4.13a)$$

- $\bar{\kappa}_2 = 0$

$$\bar{\kappa}'_2 = \frac{\cos^2 \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2} \quad (4.13b)$$

- $\bar{\kappa}'_2 = \frac{0,01947}{3,71170} \Rightarrow \bar{\kappa}'_2 = 0,00525$

$$\bar{\tau}_2 = \frac{\sin \bar{\alpha}_2 \cos \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2} \quad (4.13c)$$

- $\bar{\tau}_2 = \frac{0,99022 * 0,13954}{3,71170} \Rightarrow \bar{\tau}_2 = 0,03723$

Demetin dönmeye karşı sınırlandırılmış olduğunu kabul ediyoruz. Dolayısıyla demetin birim boydaki burulma değeri $\tau_s=0$ olacaktır. Ayrıca demetin aksenal uzaması $\varepsilon=\xi_1=0,003$ olarak işlemlerimize devam ediyoruz. Denklem 4.28 ve Denklem 4.32'yi kullanırsak, karşımıza Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 olmak üzere iki tane iki bilinmeyenli denklem çıkacaktır, bu denklem takımını çözerek, helis açısındaki değişim $\Delta\alpha_2$ ve dış tellerin aksenal uzaması ξ_2 değerlerini bulabiliriz.

$$\xi_1 = \xi_2 + \frac{\Delta\alpha_2}{\tan \alpha_2} \quad (4.28)$$

$$\bullet \quad \xi_2 + \frac{\Delta\alpha_2}{7,06879} - 0,003 = 0 \quad (5.1)$$

$$\beta_2 = r_2 \tau_s = \frac{\xi_2}{\tan \alpha_2} - \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2)}{r_2 \tan \alpha_2} \quad (4.32)$$

$$\bullet \quad \frac{\xi_2}{7,06879} - \Delta\alpha_2 + 0,3 \frac{(0,005625 + 1,8400 * \xi_2)}{22,41867} = 0 \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve Denklem 5.2'yi çözümlersek;

- $\Delta\alpha_2=0,0005382$
- $\xi_2=0,0029239$

Helisel eğrilikteki değişim $\Delta\kappa_2'$ ve boyda burulma değişimi $\Delta\tau_2$ değerleri Denklem 4.33 ve Denklem 4.34 kullanılarak bulunabilir.

$$\begin{aligned} R_2 \Delta\kappa_2' &= \frac{\cos^2 \bar{\alpha}_2}{\bar{r}_2 / R_2} - \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2 / R_2} \\ &= - \frac{2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2} \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2)}{r_2} \frac{\cos^2 \alpha_2}{r_2 / R_2} \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} R_2 \Delta\kappa_2' &= - \frac{2 * 0,99014 * 0,14007}{3,71500 / 1,8400} * 0,0005382 \\ &+ 0,3 \frac{(1,8750 * 0,003 + 1,8400 * 0,0029239)}{3,71500} \frac{0,01962}{3,71500 / 1,8400} \end{aligned}$$

- $R_2\Delta\kappa'_2 = -6,52977 * 10^{-05}$

$$R_2\Delta\tau_2 = \frac{\sin \bar{\alpha}_2 \cos \bar{\alpha}_2}{r_2 / R_2} - \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2}$$

$$= \frac{(1 - 2 \sin^2 \alpha_2)}{r_2 / R_2} \Delta\alpha_2 + \nu \frac{(R_1 \xi_1 + R_2 \xi_2)}{r_2} \frac{\sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{r_2 / R_2}$$
(4.34)

$$R_2\Delta\tau_2 = \frac{(1 - 2 * 0,98038)}{3,71500 / 1,8400} * 0,0005382$$

$$+ 0,3 * \frac{(1,8750 * 0,003 + 1,8400 * 0,0029239)}{3,71500} \frac{0,99014 * 0,14007}{3,71500 / 1,8400}$$

- $R_2\Delta\tau_2 = -0,000195035$

Demeti oluşturan dış tellere ait, G_2' , y eksenini doğrultusundaki eğilme momenti bileşeni, H_2 , burulma momenti, N_2' , y eksenini doğrultusundaki kesme kuvveti bileşeni, T_2 , eksenel çekme kuvveti, X_2 , telin merkez çizgisi üzerinde birim boyağıdaki dış yükleri olmak üzere, Denklem 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 ve 4.39'daki formülleri kullanarak çözebiliriz.

$$\frac{G'_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4} R_2\Delta\kappa'_2$$
(4.35)

$$\frac{G'_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4} * -6,52977 * 10^{-05}$$

- $\frac{G'_2}{ER_2^3} = -5,12847 * 10^{-05}$

- $G'_2 = -62,77764 \text{Nmm}$

$$\frac{H_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_2\Delta\tau_2$$
(4.36)

$$\frac{H_2}{ER_2^3} = \frac{\pi}{4(1+0,3)} * -6,52977 * 10^{-05}$$

- $\frac{H_2}{ER_2^3} = -0,000117831$
- $H_2 = -144,2371269\text{Nmm}$

$$\frac{N'_2}{ER_2^2} = \frac{H_2 \cos^2 \alpha_2}{ER_2^3 r_2 / R_2} - \frac{G'_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{ER_2^3 r_2 / R_2} \quad (4.37)$$

$$\frac{N'_2}{ER_2^2} = (-0,000117831) * \frac{0,01962}{3,71500 / 1,8400} - (-5,12847 * 10^{-05}) * \frac{0,99014 * 0,14007}{3,71500 / 1,8400}$$

- $\frac{N'_2}{ER_2^2} = 2,37782 * 10^{-06}$
- $N'_2 = 1,581896497\text{Nmm}$

$$\frac{T_2}{ER_2^2} = \pi \xi_2 \quad (4.38)$$

$$\frac{T_2}{ER_2^2} = \pi * 0,0029239$$

- $\frac{T_2}{ER_2^2} = 0,009185607$
- $T_2 = 6110,930426\text{Nmm}$

$$\frac{X_2}{ER_2} = \frac{N'_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2}{ER_2^2 r_2 / R_2} - \frac{T_2 \cos^2 \alpha_2}{ER_2^2 r_2 / R_2} \quad (4.39)$$

$$\frac{X_2}{ER_2} = 2,37782 * 10^{-06} * \frac{0,99014 * 0,14007}{3,71500 / 1,8400} - 0,009185607 * \frac{0,01962}{3,71500 / 1,8400}$$

- $\frac{X_2}{ER_2} = -8,90995 * 10^{-05}$
- $X_2 = -32,21491051\text{Nmm}$

Demetin dış tellerine etki eden F_2 eksenel kuvvetini bulmak için, dış tellere etki eden kuvvetin F_2 kuvvetinin yönündeki iz düşümlerini almamız gerekir. Benzer şekilde, M_2 toplam burulma momentinin hesaplanması yapılabilir. Bu işlemleri Denklem 4.40 ve Denklem 4.41'i kullanarak yapabiliriz.

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = m_2 \left[\frac{T_2}{ER_2^2} \sin \alpha_2 + \frac{N'_2}{ER_2^2} \cos \alpha_2 \right] \quad (4.40)$$

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = 6 * \left[(0,009185607 * 0,99014) + (2,37782 * 10^{-06} * 0,14007) \right]$$

- $\frac{F_2}{ER_2^2} = 0,054572$
- $F_2 = 36305,43683N$

ve

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = m_2 \left[\begin{array}{l} \frac{H_2}{ER_2^3} \sin \alpha_2 + \frac{G'_2}{ER_2^3} \cos \alpha_2 \\ + \frac{T_2}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \cos \alpha_2 - \frac{N'_2}{ER_2^2} \frac{r_2}{R_2} \sin \alpha_2 \end{array} \right] \quad (4.41)$$

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = 6 * \left[\begin{array}{l} (-0,000117831 * 0,99014) + (-5,12847 * 10^{-05} * 0,14007) \\ + (0,009185607 * 2,01902 * 0,14007) - (2,37782 * 10^{-06} * 2,01902 * 0,99014) \end{array} \right]$$

- $\frac{M_2}{ER_2^3} = 0,014815$
- $M_2 = 18135,03846Nmm$

Halat demetinin merkez teline etki eden F_1 eksenel kuvvet ve M_1 burulma momenti Denklem 4.42 ve Denklem 4.43 kullanılarak hesaplanabilir. Demet dönmeye karşı sınırlandırılmış olduğu kabulünü yapılmıştır. Dolayısıyla $\tau_s=0$ olacaktır. Şekil 5.1'de hesaplanan eksenel yükün merkez ve dış tellere dağılımı verilmiştir.

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi \xi_1 \quad (4.42)$$

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi * 0,003$$

- $\frac{F_1}{ER_1^2} = 0,009425$
- $F_1 = 6510,84736N$

ve

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_1 \tau_s \quad (4.43)$$

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+0,3)} * 1,8750 * 0$$

- $\frac{M_1}{ER_1^3} = 0$
- $M_1 = 0$

İncelediğimiz halat demetinin maruz kaldığı maksimum aksenal kuvvet F ve aksenal burulma momenti M, Denklem 4.44 ve 4.45 ile hesaplanabilir.

$$F = F_1 + F_2 \quad (4.44)$$

$$F = 6510,84736 + 36305,43683$$

$$F = 42816,28419N$$

ve

$$M = M_1 + M_2 \quad (4.45)$$

$$M = 0 + 18135,03846$$

- $M = 18135,03846Nmm$



Şekil 5.2 Eksenel yükün merkez ve dış tellere dağılım oranları

Denklemlerin lineer olmasından dolayı eksenel uzamanın (ϵ) artması veya azalması, yüklerin de doğru orantılı artmasına ya da azalmasına yol açacaktır. Örneğin yapılan tez çalışmasında eksenel uzama değeri 0,003 iken hesaplanan maksimum eksenel kuvvet 42816,28 N'dur. Eğer eksenel uzama değeri 0,0003 alınırsa idi, maksimum eksenel kuvvet 4281,628 N olacaktır [21]. Çizelge 5.2'de bu bölümde Costello denklemlerini kullanarak elde edilen sonuçlar tablo halinde verilmiştir.

Yukarıda hesaplanan maksimum eksenel kuvvet ve eksenel burulma momenti etkisi altındaki halat demetine ait gerilmeleri aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz. Gerilme hesaplamaları yapılırken Denklem 4.46 – 4.50 arasındaki denklemler kullanılmıştır.

Merkez teldeki eksenel gerilme;

$${}_F\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi R_1^2} \quad (4.46)$$

$${}_F\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi R_1^2} = \frac{6510,84736}{\pi * 1,875^2}$$

- ${}_F\sigma_1 = 589,5017474 \text{Mpa}$

Merkez tele ait kesitteki maksimum burulma gerilimi;

$${}_M\sigma_1 = \frac{2M_1}{\pi R_1^3} \quad (4.47)$$

$${}_M\sigma_1 = \frac{2M_1}{\pi R_1^3} = \frac{2*0}{\pi*1,875^3}$$

- ${}_M\sigma_1 = 0\text{Mpa}$

T₂ yükünden kaynaklanan aksenal gerilime;

$${}_T\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} \quad (4.48)$$

$${}_T\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} = \frac{6110,930426}{\pi*1,840^2}$$

- ${}_T\sigma_2 = 574,5420511\text{Mpa}$

G'₂ eğme momentinin oluşturduğu normal gerilme;

$${}_G'\sigma_2 = \frac{4G'_2}{\pi R_2^3} \quad (4.49)$$

$${}_G'\sigma_2 = \frac{4G'_2}{\pi R_2^3} = \frac{62,77764}{\pi*1,840^3}$$

- ${}_G'\sigma_2 = 12,83103262\text{Mpa}$

Demetteki dış tellerden bir tanesi için H₂ burulma momentinin oluşturduğu maksimum burulma gerilmesi;

$${}_H\sigma_2 = \frac{2H_2}{\pi R_2^3} \quad (4.50)$$

$${}_H\sigma_2 = \frac{2H_2}{\pi R_2^3} = \frac{2*144,2371269}{\pi*1,840^3}$$

- ${}_H\sigma_2 = 14,74021156\text{Mpa}$

Çizelge 5.2 Costello Denklemleri kullanılarak elde edilen değerler

Costello Denklemleri İle Hesaplanan Değerler		
Birim Şekil Değişirme Miktarı ε		0,003
Y Eksenine Doğrultusundaki Eğilme Momenti Bileşeni G'_2	Nmm	-62,77763629
Dış Teldeki Burulma Momenti H_2	Nmm	-144,2371269
Dış Teldeki Kesme Kuvveti Bileşeni N_2	N	1,581896497
Dış Teldeki Eksenel Çekme Kuvveti T_2	N	6110,930426
X Eksenine Doğrultunda Birim Boydaki Dış Yükler X_2	Nmm	-32,21491051
Merkez Teldeki Çekme Gerilmesi $F\sigma_1$	Mpa	589,5017474
Merkez Teldeki Burulma Gerilmesi $M\sigma_1$	Mpa	0
Dış Teldeki Çekme Gerilmesi $T\sigma_2$	Mpa	574,5420511
Dış Teldeki Maksimum Eğilme Gerilmesi $G'\sigma_2$	Mpa	12,83103262
Dış Teldeki Burulma Gerilmesi $H\sigma_2$	Mpa	14,74021156
Merkez Teldeki Maksimum Kuvvet F_1	N	6510,847356
Dış Teldeki Maksimum Kuvvet F_2	N	36305,43683
Halat Demetinin Toplam Eksenel Kuvveti F	N	42816,28419
Merkez Teldeki Maximum Burulma Moment M_1	Nmm	0
Dış Teldeki Maximum Burulma Moment M_2	Nmm	18135,03846
Halat Demetinin Toplam Maximum Burulma Momenti M	Nmm	18135,03846



BÖLÜM 6

EKSENEL YÜKLÜ HALAT DEMETİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Bölüm 5’te Costello Denklemleri kullanılarak özellikleri bilinen bir tel halata ait analitik hesaplamalar yapılmıştır. Tel halata ait maksimum eksenel kuvvet, burulma momenti ve gerilmeleri hesaplanarak tablo halinde verilmiştir. Bu bölümde ise analitik hesaplar neticesinde bulunan sonuçları doğrulamak üzere tel halatın modellenmesi yapılarak, Ansys programı ile gerilme analizi yapılmıştır. Daha sonra bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6.1 SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Bir problemin çözümünde, başlangıçta karmaşık olan problemi, çözümü bilinen yada formülize edilebilen alt problemlere ayırmak, daha sonra da bu çözümleri kullanarak asıl problemi çözmek oldukça pratik bir yöntemdir. Özellikle mühendislik hesaplarında, doğada karşılaşılan cisimler, hiçbir bilindik kalıba uymaz. Bu durumda üzerinde çalışılan iş parçasını küçük geometrik şekillere bölünmesi gerekir. Günümüzde bu yöntemi uygulamak için çeşitli Bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan ANSYS paket programı, sonlu eleman yöntemi kullanarak verilen şeklin gerilme analizini yapmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminde, “Parçadan bütüne gitmek (Tümevarım)” prensip olarak benimsenmiştir. Üzerinde çalışılan geometrik şekil ne kadar küçük parçalara ayırıp düğüm noktası oluşturursak, o kadar yaklaşık sonuçlar elde edebiliriz.

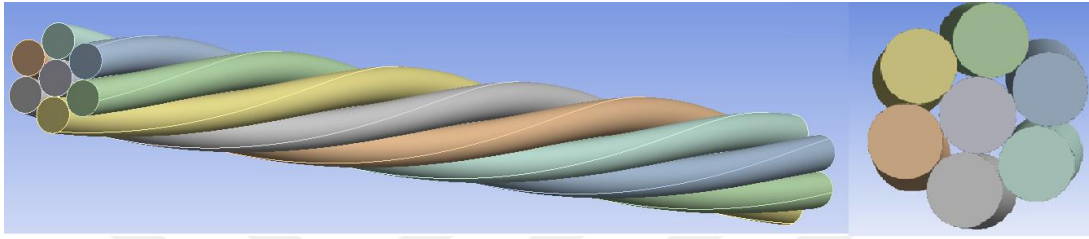
Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak, bir paket programı aracılığı ile gerilme analizi yapmak için programa bir takım değerler girmek gerekmektedir, bunlar;

- Cismin hazırlanmış geometrik bir modeli çizilmelidir.
- Çalışılacak elemanın, malzeme özellikleri, elastisite modülü ve poisson oranı değerleri girilmelidir.
- Başlangıç ve sınır şartları ile yükleme koşulları girilmelidir.

- Yapılacak olan analiz tipi belirlenmelidir [69].

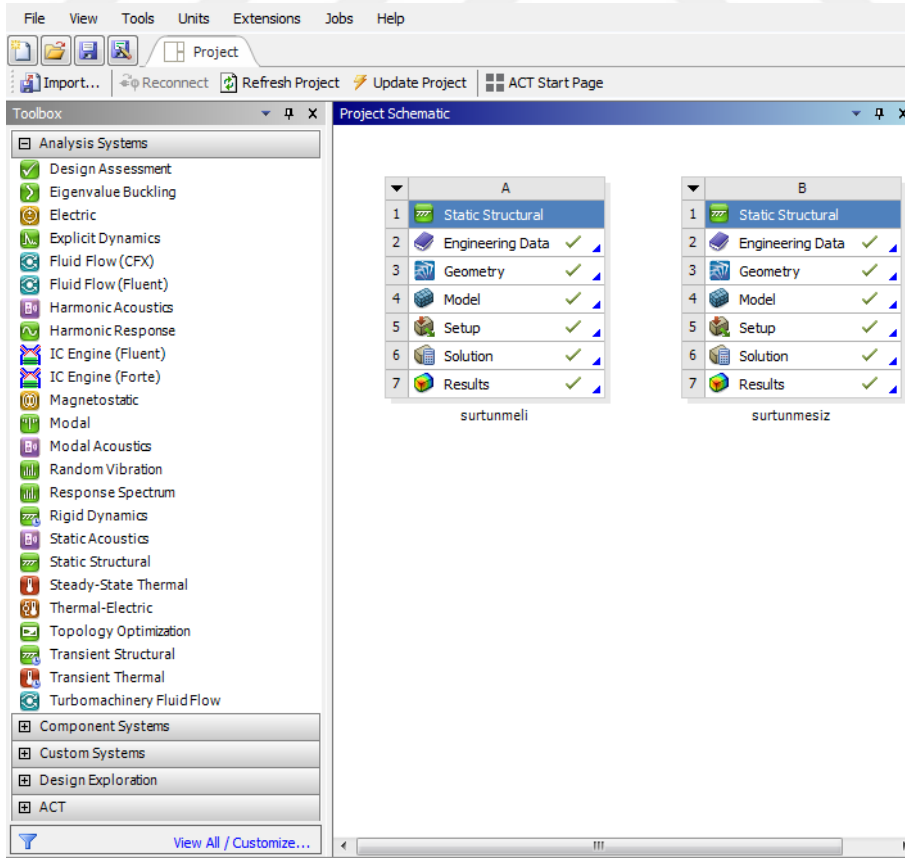
6.2 SONLU ELEMANLAR ANALİZİ (ANSYS WORKBENCH)

3 Boyutlu tasarımı gerçekleştirilen halat modeli Şekil 6.1’de verilmiştir. Şekli incelediğimizde Bölüm 5’te Costello dneklemleriyle analitik hesapları yapılan 1+6 helisel ASTM A416 önerilmeli halat demetinin ANSYS WORKBENCH’te modellenmiş ve Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 1+6 Helisel ASTM A416 önerilmeli halat demeti ve kesiti

Gerilme analizi yapmak için, paket program olan Ansys Mechanical – Static Structural(Ansys Workbench) kullanılmıştır. Şekil 6.2’ de bu paket programın arayüzü görülmektedir.



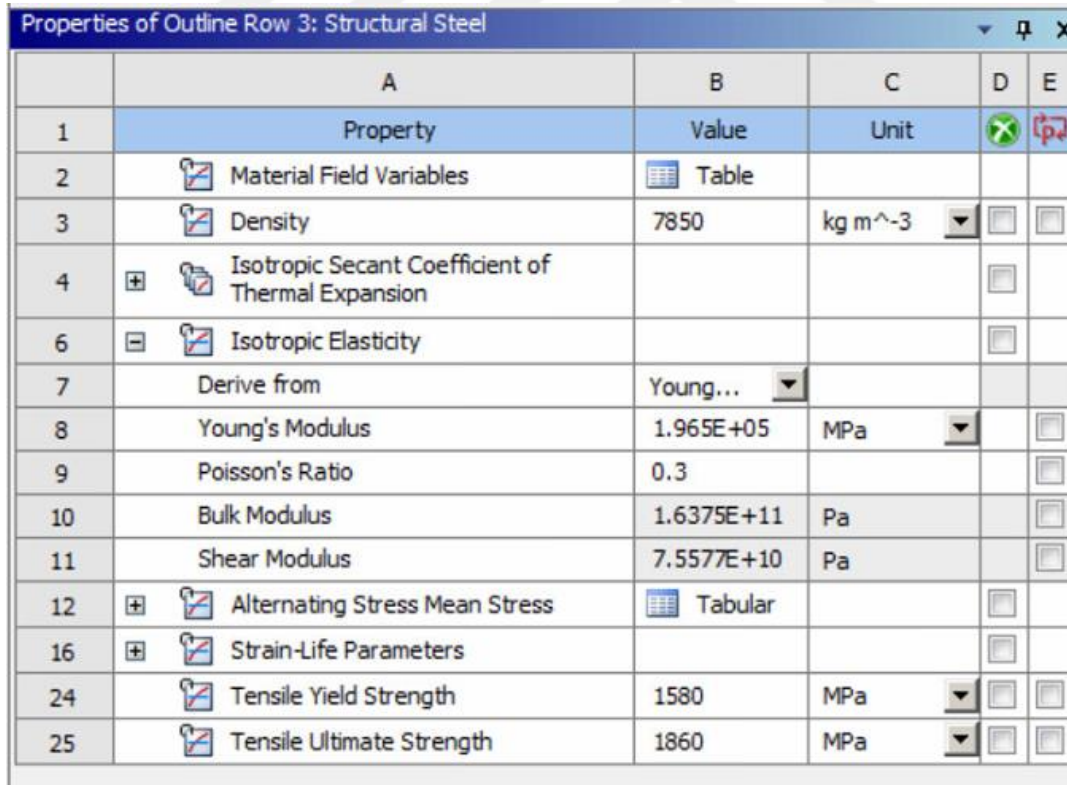
Şekil 6.2 1+6 Ansys Workbench programının arayüzü

6.2.1 Yapısal Analiz İçin Malzemenin Özelliklerinin Tanımlanması

Bu bölümde, gerilme analizi yapılacak malzemenin mekanik özellikleri tablolar halinde verilir, analiz programına girilmiştir. Çizelge 6.1’de malzemenin teknik özellikleri verilmiştir. Ardından Şekil 6.3’te Ansys Workbench programında girilen malzeme özelliklerin görseli verilmiştir.

Çizelge 6.1 ASTM A416 sınıf 270 PC Malzeme Mekanik Özellikleri

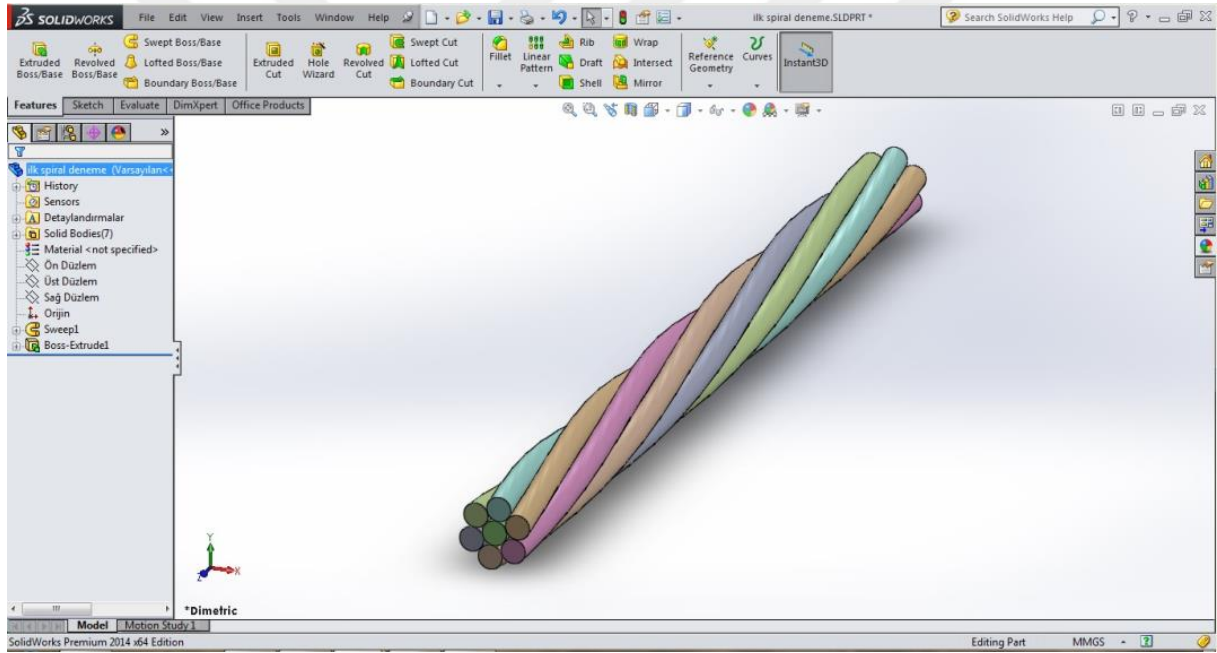
ASTM A416 sınıf PC 270 Malzeme Mekanik Özellikleri	
Elastisite Modülü	196,5 GPa
Poisson Oranı	0,3
En küçük kopma mukavemeti	1860 MPa
En küçük Akma mukavemeti	1580 MPa
Yoğunluk	7850 kg/m ³



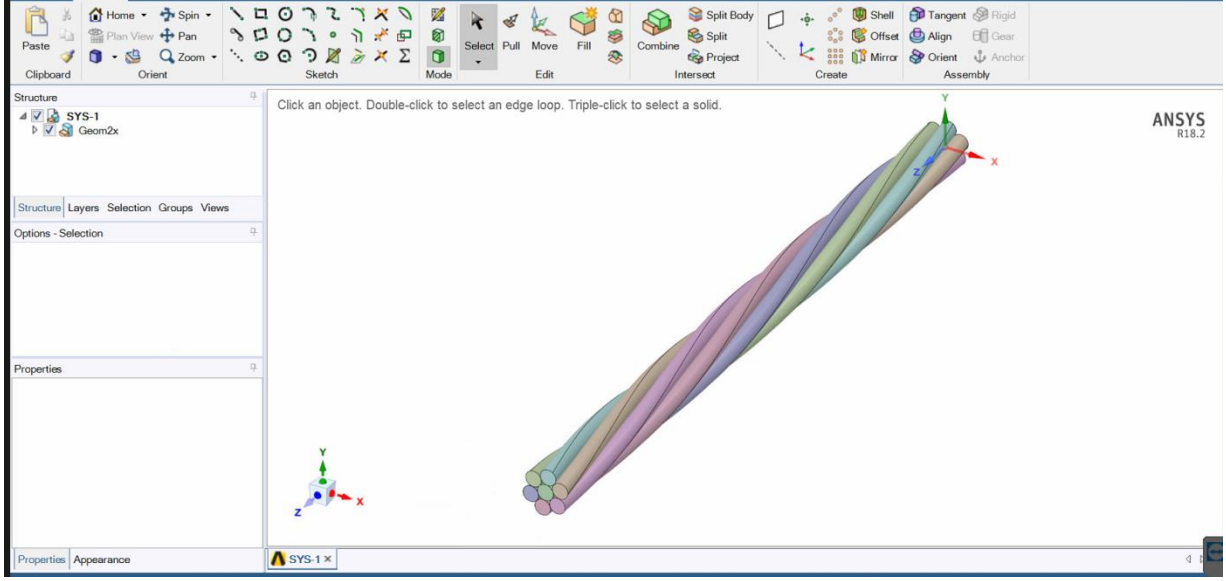
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	<input checked="" type="checkbox"/> Material Field Variables	<input checked="" type="checkbox"/> Table			
3	<input checked="" type="checkbox"/> Density	7850	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input type="checkbox"/>	
6	<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young...			
8	Young's Modulus	1.965E+05	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Poisson's Ratio	0.3			<input type="checkbox"/>
10	Bulk Modulus	1.6375E+11	Pa		<input type="checkbox"/>
11	Shear Modulus	7.5577E+10	Pa		<input type="checkbox"/>
12	<input checked="" type="checkbox"/> Alternating Stress Mean Stress	<input checked="" type="checkbox"/> Tabular		<input type="checkbox"/>	
16	<input checked="" type="checkbox"/> Strain-Life Parameters			<input type="checkbox"/>	
24	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	1580	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	<input checked="" type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	1860	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Şekil 6.3 Ansys programında girilen malzeme özelliklerin görseli (Engineering data adımı)

İkinci aşamada ise, problemde yüklemenin yapıldığı cismin geometrisinin oluşturulduğu veya problem tanımına göre ayarlandığı aşamadır. Bu adımda bu probleme özel bir işlem yapılmayıp sadece Solidworks programında oluşturulan 1 hatvelik halat modeli .step formatında kaydedilip girilmiştir. Şekil 6.2’de verilen arayüzdeki “Geometry” bölümünden çizilen halatın geometrisine ulaşılabilir. Geometry bölümünde, sonlu elemanlar analizi yapılacak halat için tek hatvelik kısım modellenmiştir. Halat boyu ve dolayısıyla hatve sayısı halatın aktaracağı burulma momentini ve taşıyacağı eksenel yükü etkilememektedir. Bununla birlikte hatve sayısını artırarak çözüme gidilmesi durumunda, sistemde kullanılacak eleman ve node (düğüm) sayılarının artmasına neden olacaktır. Dolayısıyla analiz çözüm süresinde artış olacağı beklenmektedir [5]. Şekil 6.4’te halat modelinin Solidworks programındaki görseli verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.5’te Ansys programına girilen halatın üç boyutlu modeli görülmektedir.



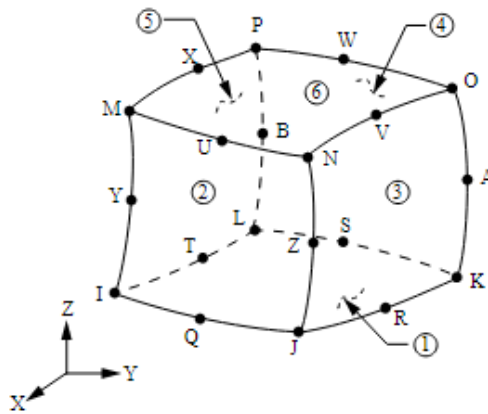
Şekil 6.4 Solid programında çizilen geometrinin görseli



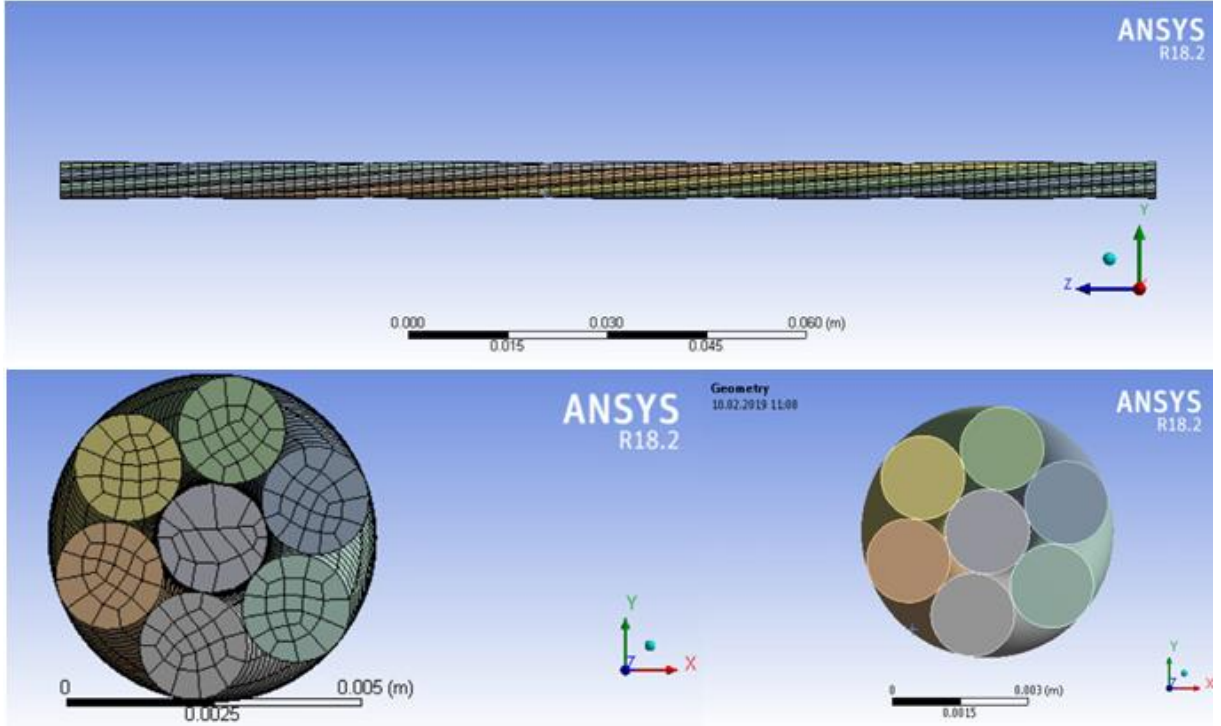
Şekil 6.5 Ansys programında girilen geometrinin görseli

Devam eden aşamada ansys arayüzündeki “Model” bölümününü kullanarak geometrik modelden sonlu elemanlar modeline dönüşümün yapıldığı adımdır. Geometrik model sınırları içerisinde boyutları ve özellikleri önayarlar ile belirlenmiş elemanlar ile örülerek (meshing), problemde yük altında her eleman diferansiyel bir çözüm içerisinde lineer (veya non-linear) denklem takımları oluşturularak detaylı sonuçların elde edilmesine imkan tanımaktadır.

Analiz yapmak için halata uygulanacak ağ yapısını (mesh), seçerken temelde en uygun kübik yapılı mesh elemanı uygulanmıştır. Sweep Mesh Metodu kullanılarak oluşturulan ağ yapısında ara node (düğüm) ihtiva eden çözüm elemanı Solid 186 mesh elemanı kullanılmıştır ve homojen bir mesh dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Şekil 6.6’da Solid 186 mesh elemanı ve Şekil 6.7’de ansys programında model üzerinde görülen mesh dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.6 Solid 186 elemanı [3]



Şekil 6.7 Geometrik modelleme üzerinden yapılan mesh görüntüleri

Ansys programında model üzerinde kullanılan ağ yapısı (mesh) özellikleri ve boyutları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Mesh Karakteristik Özellik Tablosu

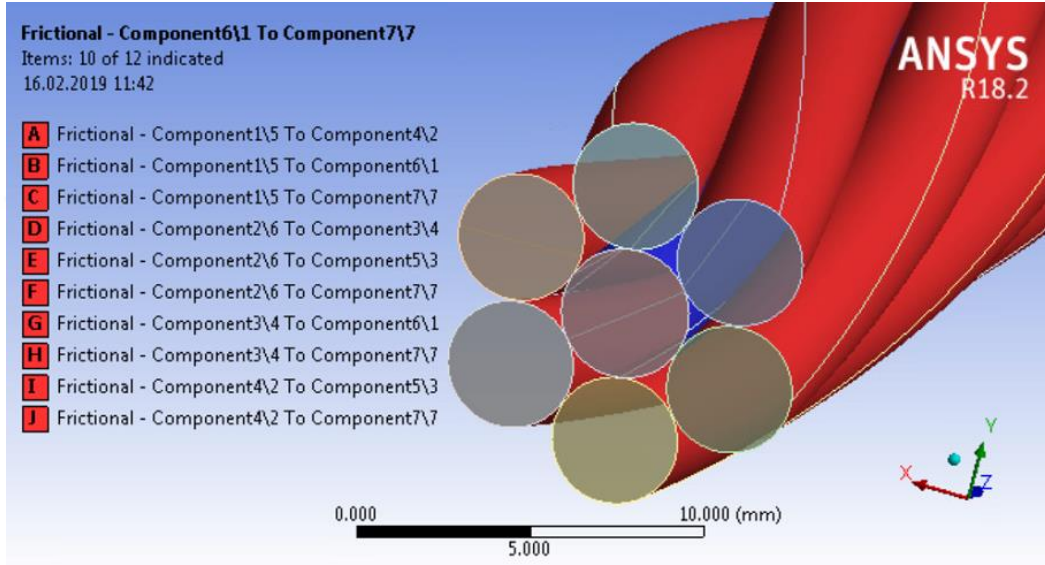
Mesh Karakteristik Özellikleri	
Uygulanan Metot	Sweep Metot / Hex
Uygulanan Eleman Tipi	Solid 186 tip (Hex20 node)
Eleman Sayısı	25463
Node (Düğüm) Sayısı	126308
Eleman Ortalama En-Boy Oranı	3,88

6.2.2 Sınır Şartlarının ve Çözüm Yöntemlerinin Belirlenmesi

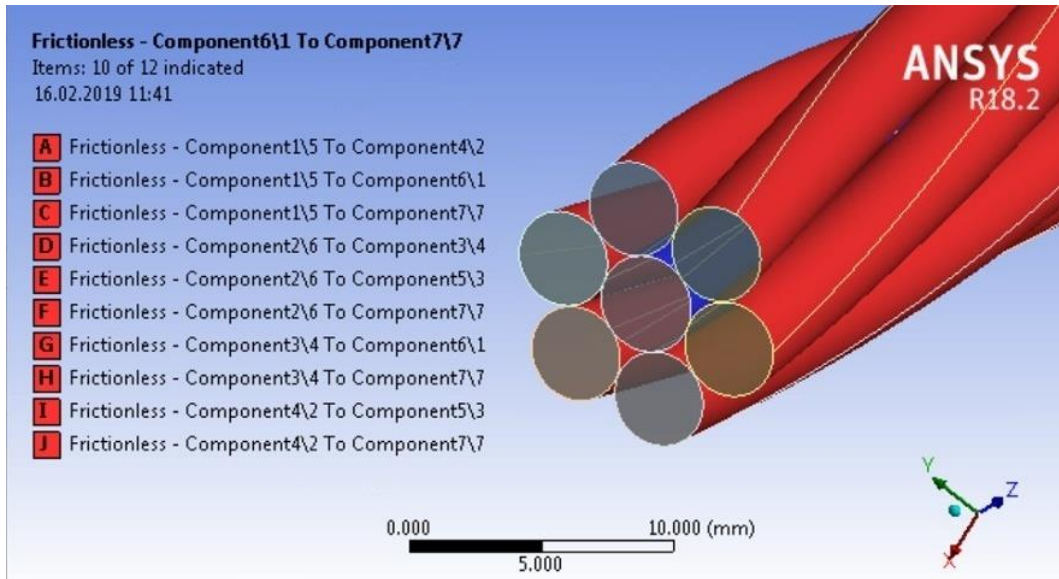
Sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra, Ansys Workbench programının arayüzündeki “Setup” bölümünü kullanarak sınır şartları ve çözüm yöntemleri belirlenir.

6.2.2.1 Kontakların Tanımlanması

Gerilme analiz yapmak amacıyla oluşturulan halata ait tellerin birbirlerine temasını, farklı biçimlerde tanımlama imkanı bulunmaktadır. Problemdeki sürtünme katsayısı değerlerine göre sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak iki farklı tanımlama üzerinden iki farklı çözüm yapılmıştır. Şekil 6.8’de sürtünmeli durum için tanımlanan kontaklar ve Şekil 6.9’da sürtünmesiz durum için tanımlanan kontaklar verilmiştir. Sürtünme katsayısı olarak 0,115 değeri alınmıştır [5, 6].



Şekil 6.8 Sürtünmeli gerilme analizi için kontak tanımı

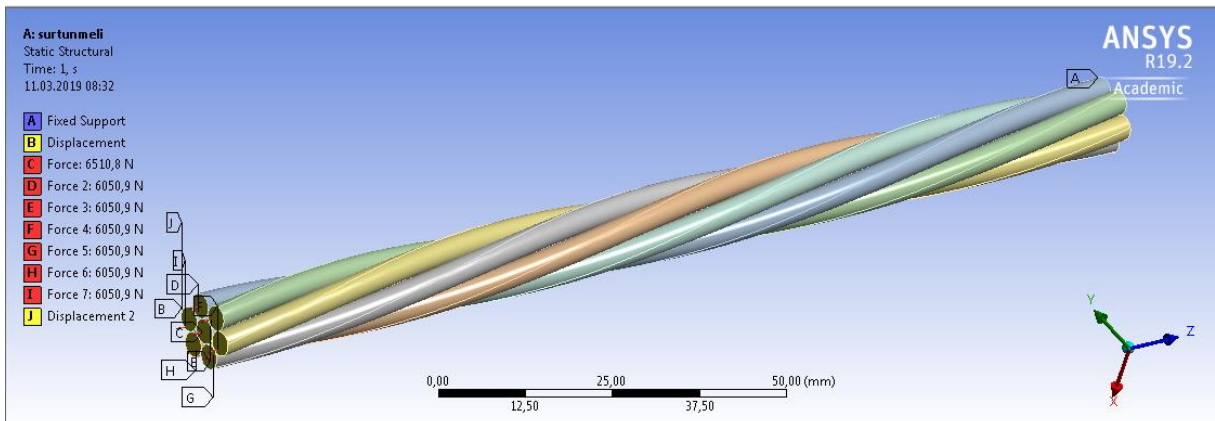


Şekil 6.9 Sürtünmesiz gerilme analizi için kontak tanımı

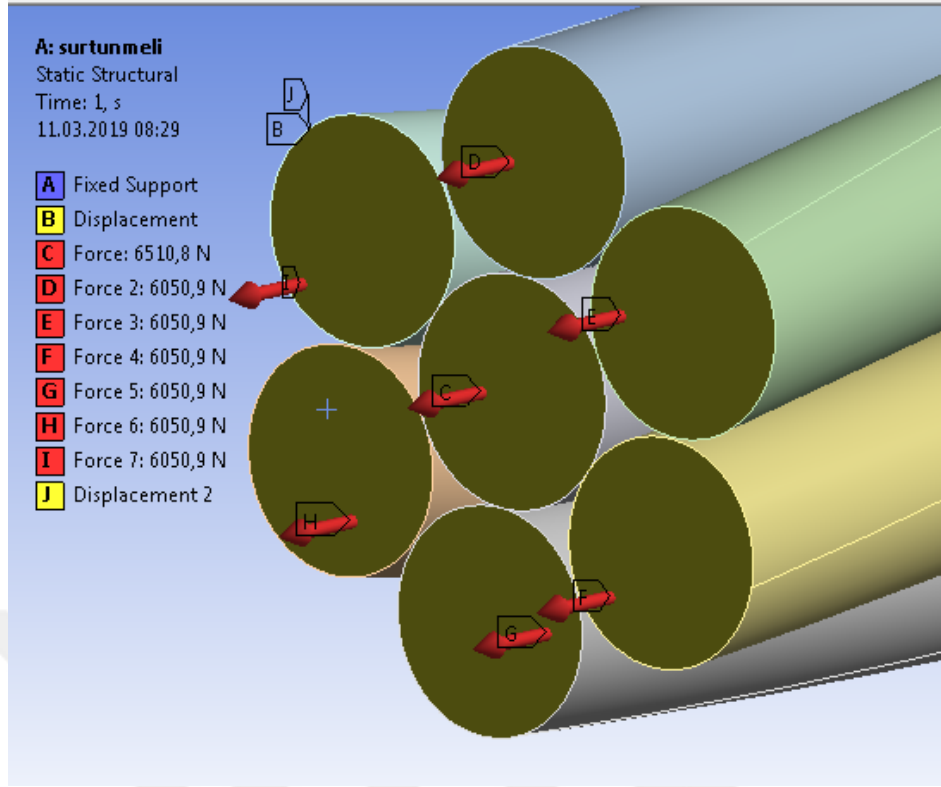
6.2.2.2 Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Problemin çözümü için gerekli sınır şartları ve kuvvetler, ansys programında “setup” bölümünde bulunan “Static Structural” alt bölümden tanıtılmaktadır. Mevcut problemde halat demeti belirli bir aksenal uzama miktarı ele alınarak Costello’nun Çubuk Teorisi ile analitik hesaplar yapılmış ve halata etki eden toplam aksenal kuvvet bulunmuştur. Sonlu elemanlar yönteminde ise, çözüm kararlılığı açısından problem tanımında, kuvvet etkisi kullanılmıştır. Analitik hesaplarda ele alınan aksenal uzama miktarı, ansys programında yapılan gerilme analizi sonucunda da elde edilmiştir. Şekil 6.10’da aşağıdaki maddelerde sıralanan sınır şartlarının tanımları gösterilmiştir:

- Halatın bir ucu sabitlenmiştir: Fixed Support
- Halatın diğer ucunda ise
 - Şekil 6.10’da gösterilen (J) Displacements 2 koşulu tanımlanarak, z ekseninde deplasman serbest bırakılarak, dönme sabitlenmiştir.
 - Şekil 6.10’da gösterilen (B) Displacements koşulu tanımlanarak, x ve y eksenlerinde deplasmanlar ve dönmeler sabitlenmiştir.
- Halatın ucundan Costello’nun Çubuk Teorisi yöntemiyle elde edilen kuvvet halatın iç ve dış tellerine ayrı ayrı uygulanmıştır, buna göre;
 - Halatın merkez teline 6510.847 N kuvvet uygulanmıştır.
 - Halatın dış tellerinin her birine 6050,906 N kuvvet uygulanmıştır. Şekil 6.11’de uygulanan kuvvetler verilmiştir.

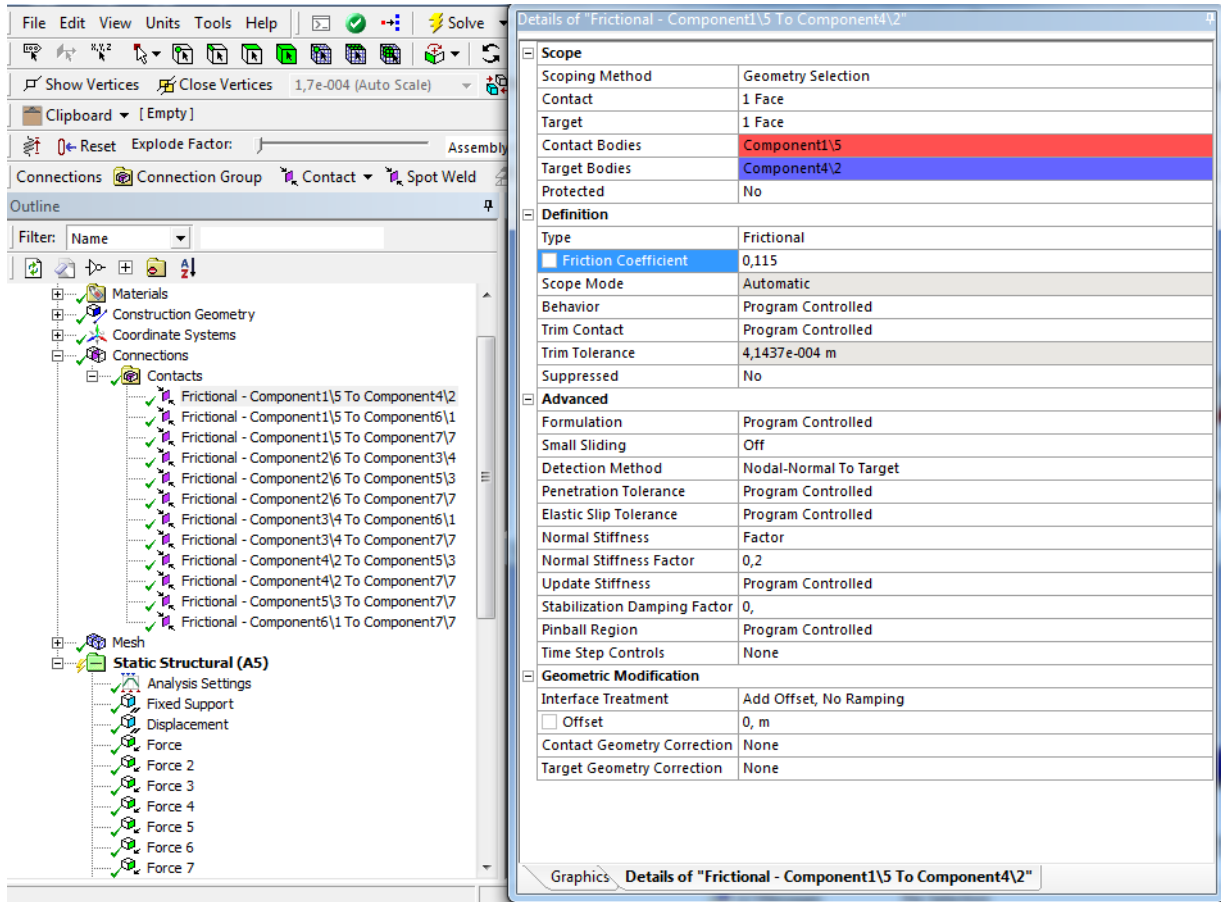


Şekil 6.10 Sınır şartlarının tanımı



Şekil 6.11 Halatın merkez ve dış tellerine uygulanan kuvvetler

Programda, “Connections” bölümünün içinde tellerin birbirleri ile kontaklarının tanımlandığı “Contacts” alt bölümü bulunmaktadır. Bu bölümde yapılan kontak optimizasyonu ayarı Şekil 6.12’de gösterilmiş olup, kontak tespit yöntemi standart ayar yerine “Nodal - Normal To Target” şekline getirilmiştir. Kontak tespit yöntemleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.



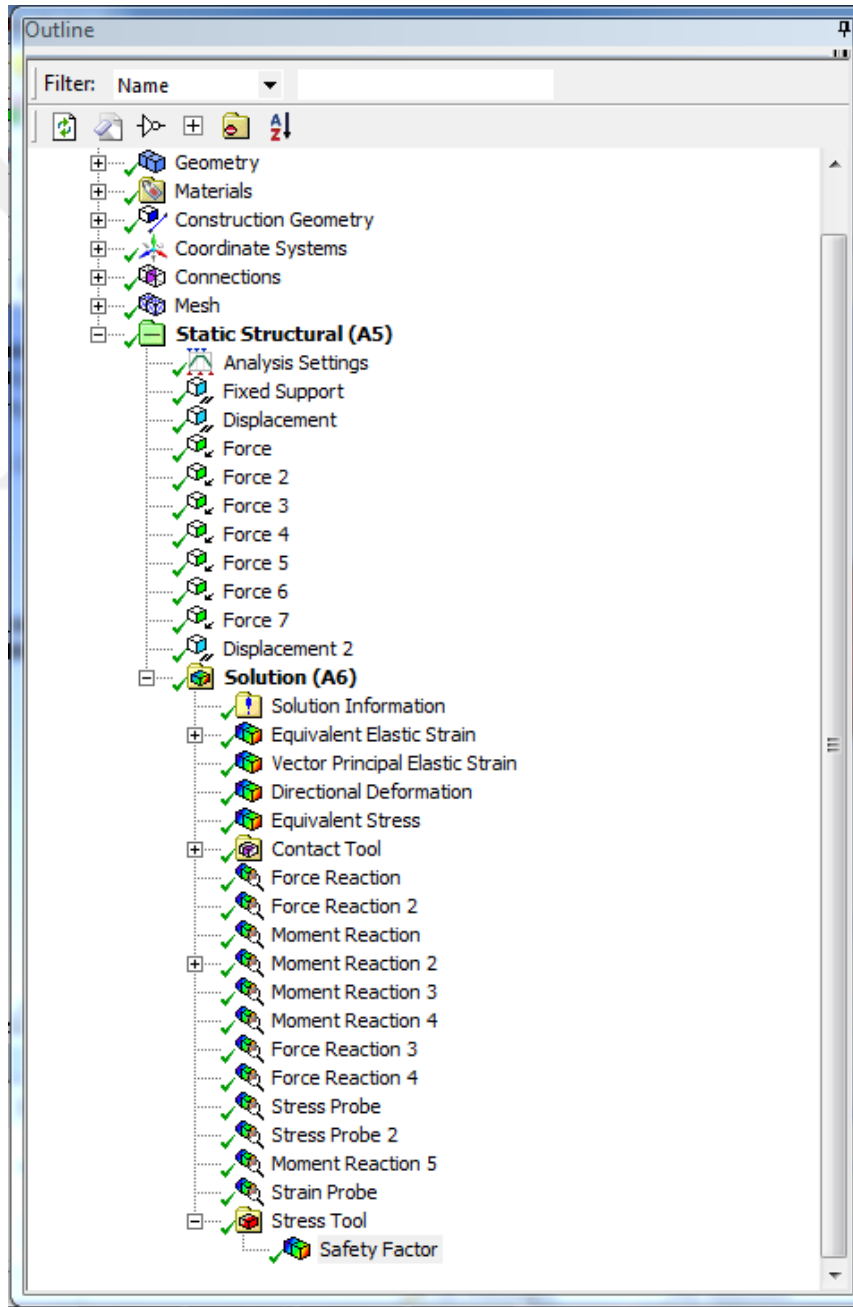
Şekil 6.12 Connections bölümünden kontak ayarlarının yapılması

Çizelge 6.3 Kontak tespit yöntemleri ve kullanım yerleri [70]

Özellik	Açıklama
Program Controlled	<ul style="list-style-type: none"> Başlangıçta kabul edilen ayardır. Uygulama, Pure Penalty ve Augmented Lagrange olarak ayarlandığında "On Gauss Point" seçeneği tercih edilir. MPC ve Normal Lagrange formülasyonları için "Nodal-Normal to Target" kullanır.
On Gauss Point	<ul style="list-style-type: none"> Kontak tespit yöntemi, Gauss entegrasyon noktalarındadır. Bu seçenek MPC veya Normal Lagrange formülasyonu ile temaslarda kullanılmaz
Nodal - Normal From Contact	<ul style="list-style-type: none"> Kontak tespit yöntemi, normal temasın, temas yüzeyine dik olduğu düğüm noktası üzerindedir.
Nodal - Normal To Target	<ul style="list-style-type: none"> Kontak tespit yöntemi, temas normalinin hedef yüzeye dik olduğu düğüm noktası üzerindedir.
Nodal - Projected Normal From Contact	<ul style="list-style-type: none"> Temas tespit yöntemi, temasın ve hedef yüzeylerin örtüştüğü bir bölgedeki temas noktasındadır (Projection-Based Method).

6.2.2.3 Gerilme Analizinin Çözümü

Gerilme analizinin çözümüne ulaşmak için “Solution” bölümüne gitmemiz gerekmektedir. Bu aşamada, daha önce tanımlanan halat değerleri ve yapılan ayarlar ile otomatik olarak programda ön tanımlı denklemlerin çözümü oluşturulmaktadır. Ayrıca, denklemlerin çözüm sonuçları ve uyarı/hata benzeri mesajları metin olarak sistemden alınabilir. Şekil 6.13’de Solution bölümü ve alt bölümleri verilmiştir. Yapılan gerilme analizinin sonuçları Bölüm 7’de tablolar halinde verilerek Costello denklemleriyle yapılan analitik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.13 Ansys programında solution bölümü



BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Gerilme analizi sonuçları, üç boyutlu ve zaman fonksiyonu olarak inceleme ve görüntülemeleri yapılabilir. Bu problemin çözümüne, Ansys programında yer alan “Results” bölümünden ulaşabiliriz. Temel olarak gerilme, gerinim, uzama, kontak durumları, kuvvet ve moment reaksiyonlarına ait sonuçları görüntülenebilmektedir. Çözüm sonuçlarının Costello Denklemleri kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılması Çizelge 7.1’de verilmiş olup diğer sonuç görselleri de sırayla paylaşılmıştır.

Çizelge 7.1 Costello ile sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırılması

Halat Demetinin Hesaplanan Değerleri	Birim	Costello Gerilme Analizi	Sonlu elemanlar Yöntemi	
			Sürtünlü (Sürtünme katsayısı 0,115)	Sürtünmesiz
Birim Şekil Değiştirme Miktarı ϵ	m/m	0,003	0.00324	0,00322
Dış Teldeki Eksenel Çekme Kuvveti T_2	N	6110,930	6084,0	6109,4
Merkez Teldeki Çekme Gerilmesi $F\sigma_1$	Mpa	589,502	661,020	661,460
Dış Teldeki Çekme Gerilmesi $T\sigma_2$	Mpa	574,542	584,480	584,530
Merkez Teldeki Maksimum Eksenel Kuvvet F_1	N	6510,8	6510,8	6510,8
Dış Teldeki Maksimum Eksenel Kuvvet F_2	N	36305,4	36305,4	36305,4
Halat Demetinin Toplam Eksenel Kuvveti F	N	42816,3	42816,3	42816,3
Merkez Teldeki Maximum Burulma Moment M_1	Nmm	0	4	18
Dış Teldeki Maximum Burulma Moment M_2	Nmm	18135,038	18608	18631
Halat Demetininin Toplam Maximum Burulma Momenti M	Nmm	18135,038	18604	18649

Yapılan bu çalışmada, ASTM A416 standardına göre PC 270 sınıfı bir halat demeti kullanılmıştır. Halatın merkezinde yarıçapı 1,875 mm olan bir çelik tel bulunmaktadır. Merkez telin etrafında 1,840 mm yarıçapında 6 adet tel halat helisel olarak sarılmıştır. Costello hesaplarında kullanılan denklemlerde, halat boyu sadece dış tellerin oluşturduğu başlangıç helis açısı α_2 'yi bulurken kullanılmıştır. Denklem 4.11'de bu hesaplama için denklem verilmiştir. Halat boyu ve dolayısıyla hatve sayısı halatın aktaracağı burulma momentini ve taşıyacağı aksenal yükü etkilememektedir. Bununla birlikte hatve sayısını artırarak çözüme gidilmesi durumunda, sistemde kullanılacak eleman ve node (düğüm) sayılarının artmasına neden olacaktır. Bu nedenle, yapılan çalışmada halat boyu 1 hatve alınmıştır [5].

Öncelikle, Bölüm 4'te analitik hesaplarda kullanılacak, Love'nun denge denklemlerinin Costello tarafından geliştirilmesiyle oluşturulan, denklemler detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu açıklamalar ışığında, Bölüm 5'te, halat demetine ait analitik hesaplar yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2'de tablo halinde sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde, merkez tele ait maksimum aksenal kuvvet 6510,847 N ve Dış tellerin her birine ait maksimum aksenal kuvveti 6050,906 N olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla dış tellerin toplam maksimum aksenal kuvveti 36305,44 olmuştur. Bütün halat demetinin maksimum aksenal kuvveti, merkez ve dış tellerin aksenal kuvvetlerini toplayarak, 42816,3 N olarak bulabiliriz. Şekil 5.1'de verilen grafiği inceleyerek, hesaplanan aksenal yükün merkez ve dış tellere dağılım oranı, merkez telde % 15,21 iken dış tellerde % 84,79 olarak tespit edilmiştir.

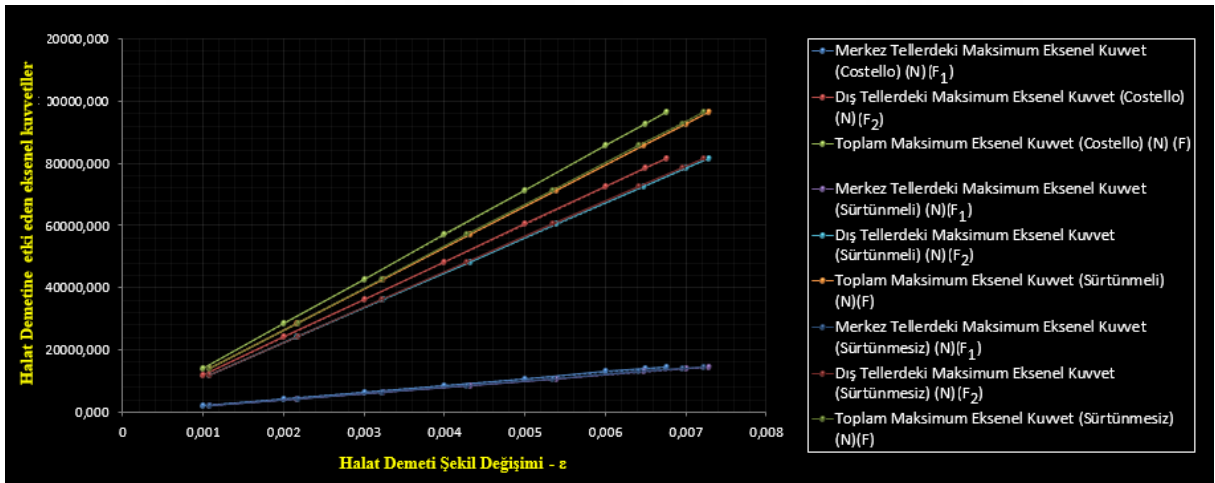
Bölüm 5'te halat demetine ait maksimum burulma momentleri de ayrıca hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre, beklendiği gibi halat merkezinde burulma olmadığı için merkez teldeki maksimum burulma momenti 0 olarak verilmiştir. Dış tellerde hesaplanan maksimum burulma momenti 18135,038 Nmm olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla halat demetinde oluşan maksimum burulma momenti, dış tellerdeki toplam maksimum momente eşit olarak 18135,038 Nmm olarak saptanmıştır.

Bölüm 6'da Ansys analiz programı kullanılarak Costello denklemleriyle yapılan analitik hesaplamaların doğruluğu teyit edilmiştir. Bu bölümde Costello denklemleriyle bulunan maksimum yükler, Ansys analiz programına girilerek 2 adet gerilme analiz yapılmıştır. Yapılan ilk analizde Costello denklemlerinde olduğu gibi sürtünme ihmal edilerek yapılmıştır. İkinci analizde ise sürtünme katsayısı 0.115 olarak sisteme girilmiş ve bu şekilde gerilme analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar analitik hesaplarla uyumlu çıkmıştır. Çizelge 7.1'de Costello

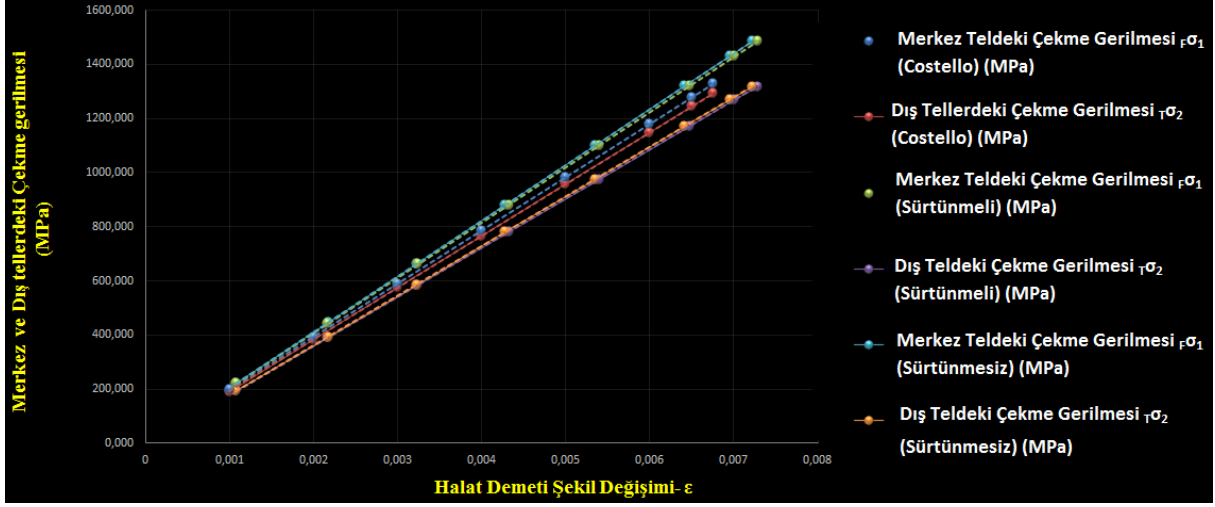
denklemleriyle hesaplanan sonuçlar ile Ansys programında hesaplanan sonuçlar karşılaştırılarak, tablo halinde verilmiştir.

Ayrıca, Ansys programında, 0,115 sürtünme katsayısı kullanılarak yapılan gerilme analizi ile sürtünmesiz olarak yapılan gerilme analizi kendi içinde içerisinde karşılaştırılabilir. Çizelge 7.1'de görüldüğü üzere her iki analizinde sonucu oldukça yakın çıkmıştır.

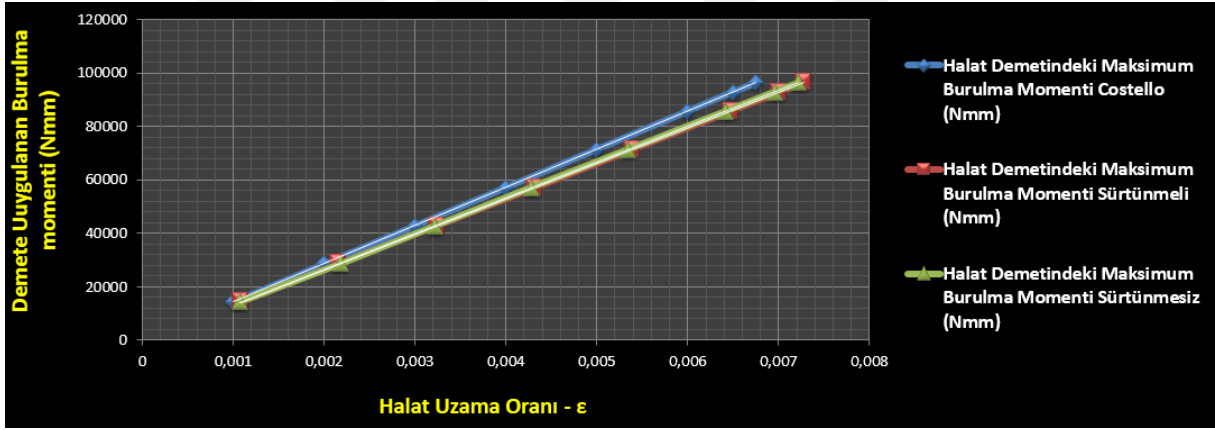
Bölümde 5'te yapılan hesaplamalarda halat demetinin birim şekil değiştirme (ϵ) değeri 0,003 alınarak işlem yapılmıştır. Dolayısıyla Bölüm 6'da yapılan gerilme analizinde de Bölüm 5'de elde edilen değerler kullanılarak gerilme analizi yapılmıştır. Benzer şekilde öncelikle halat demetinin birim şekil değiştirme (ϵ) değerleri olarak, 0,001, 0,002, 0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,0065, 0,00675, kullanılarak Costello denklemleriyle analitik hesaplar yapılmıştır. Bulunan aksenal kuvvetler kullanılarak Ansys programında sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak gerilme analizleri yapılarak Şekil 7.1, 7.2 ve 7.3'deki grafikler elde edilmiştir. Elde edilen grafiklere ait sayısal değerler Çizelge 7.2, 7.3 ve 7.4'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde, sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu ve halat demetinin birim şekil değiştirme (ϵ) değeri ile doğru orantılı değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.1 Demete ait, merkez tel, dış teller ve toplam aksenal kuvvet ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki



Şekil 7.2 Demete ait, merkez teldeki çekme gerilmesi ve dış tellerdeki çekme gerilmesi ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki



Şekil 7.3 Demete uygulanan burulma momenti ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

Çizelge 7.2 Demete ait, merkez tel, dış teller ve toplam eksenel kuvvet ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

COSTELLO DENKLEMLERİ İLE ANALİTİK HESAPLAR			
Merkez Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Costello) (N)(F₁)	Dış Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Costello) (N)(F₂)	Toplam Maksimum Eksenel Kuvvet (Costello) (N) (F)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Costello)
2170,282	12101,812	14272,095	0,001
4340,565	24203,625	28544,189	0,002
6510,847	36305,437	42816,284	0,003
8681,130	48407,249	57088,379	0,004
10851,412	60509,061	71360,474	0,005
13021,695	72610,874	85632,568	0,006
14106,836	78661,780	92768,616	0,0065
14649,407	81687,233	96336,639	0,00675
ANSYS SÜRTÜNME Lİ GERİLME ANALİZİ			
Merkez Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmeli) (N)(F₁)	Dış Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmeli) (N)(F₂)	Toplam Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmeli) (N)(F)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmeli)
2170,282	12101,812	14272,095	0,00108
4340,565	24203,625	28544,189	0,00216
6510,847	36305,437	42816,284	0,00324
8681,130	48407,249	57088,379	0,00432
10851,412	60509,061	71360,474	0,00540
13021,695	72610,874	85632,568	0,00647
14106,836	78661,780	92768,616	0,00701
14649,407	81687,233	96336,639	0,00728
ANSYS SÜRTÜNME SİZ GERİLME ANALİZİ			
Merkez Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmesiz) (N)(F₁)	Dış Tellerdeki Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmesiz) (N)(F₂)	Toplam Maksimum Eksenel Kuvvet (Sürtünmesiz) (N)(F)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmesiz)
2170,282	12101,812	14272,095	0,00107
4340,565	24203,625	28544,189	0,00218
6510,847	36305,437	42816,284	0,00322
8681,130	48407,249	57088,379	0,00428
10851,412	60509,061	71360,474	0,00535
13021,695	72610,874	85632,568	0,00642
14106,836	78661,780	92768,616	0,00695
14649,407	81687,233	96336,639	0,00722

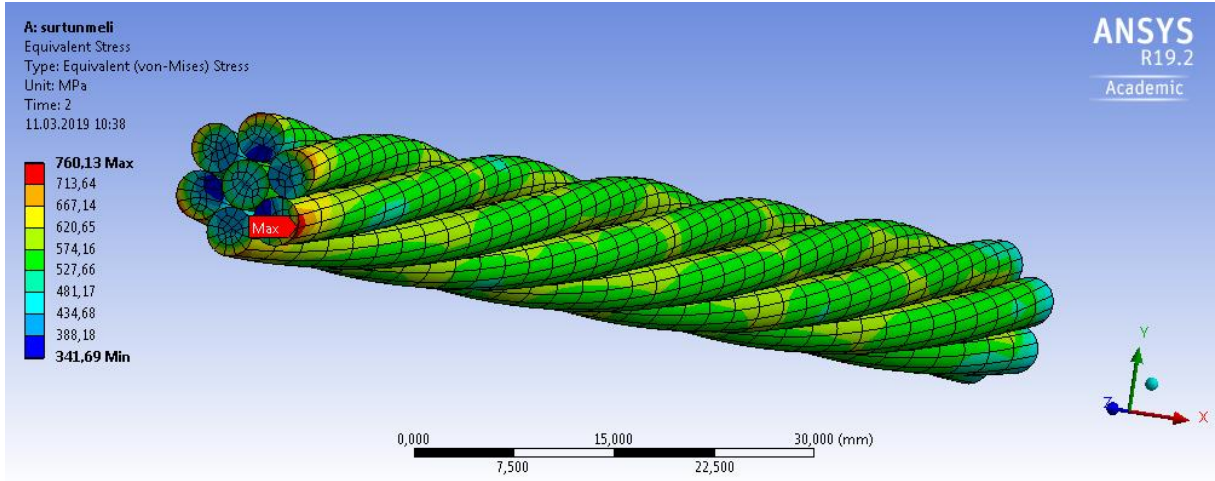
Çizelge 7.3 Demete ait, merkez teldeki çekme gerilmesi ve ,dış tellerdeki çekme gerilmesi ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

COSTELLO DENKLEMLERİ İLE ANALİTİK HESAPLAR		
Merkez Teldeki Çekme Gerilmesi $F_{\sigma 1}$ (Costello) (MPa)	Dış Tellerdeki Çekme Gerilmesi $T_{\sigma 2}$ (Costello) (MPa)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Costello)
196,501	191,514	0,001
393,001	383,028	0,002
589,502	574,542	0,003
786,002	766,056	0,004
982,503	957,570	0,005
1179,003	1149,084	0,006
1277,254	1244,841	0,0065
1326,379	1292,720	0,00675
ANSYS SÜRTÜNME Lİ GERİLME ANALİZİ		
Merkez Teldeki Çekme Gerilmesi $F_{\sigma 1}$ (Sürtünmeli) (MPa)	Dış Teldeki Çekme Gerilmesi $T_{\sigma 2}$ (Sürtünmeli) (MPa)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmeli)
221,540	194,660	0,00108
440,920	389,470	0,00216
661,020	584,480	0,00324
880,330	779,690	0,00432
1100,100	975,090	0,00540
1319,800	1170,700	0,00647
1429,600	1268,600	0,00701
1484,500	1317,500	0,00728
ANSYS SÜRTÜNMESİZ GERİLME ANALİZİ		
Merkez Teldeki Çekme Gerilmesi $F_{\sigma 1}$ (Sürtünmesiz) (MPa)	Dış Teldeki Çekme Gerilmesi $T_{\sigma 2}$ (Sürtünmesiz) (MPa)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmesiz)
221,470	194,670	0,00107
445,690	389,500	0,00218
661,460	584,530	0,00322
880,330	779,760	0,00428
1100,200	975,190	0,00535
1320,400	1170,800	0,00642
1430,700	1268,700	0,00695
1486,500	1318,100	0,00722

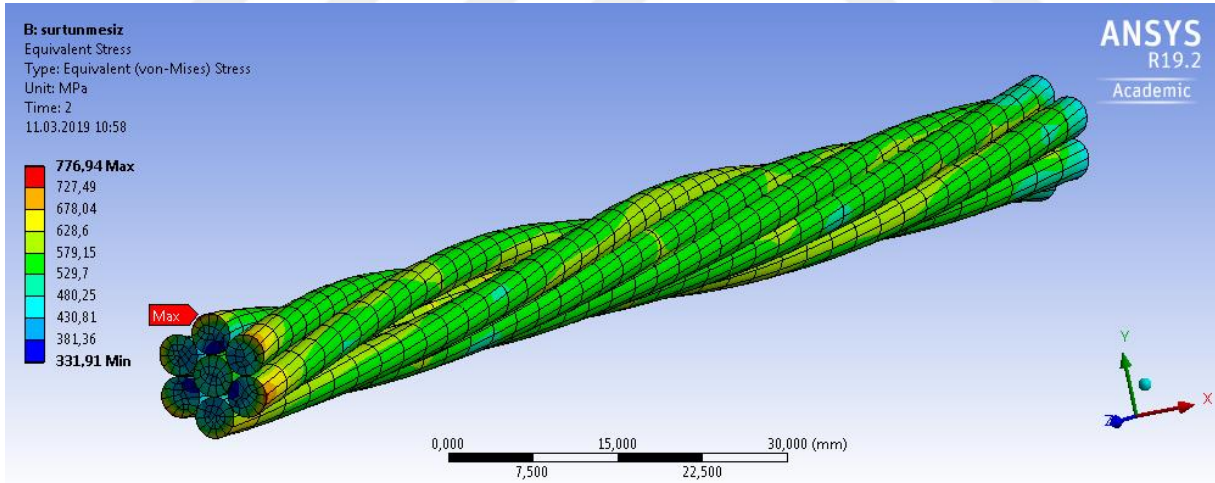
Çizelge 7.4 Demete uygulanan maksimum burulma momenti ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

COSTELLO DENKLEMLERİ İLE ANALİTİK HESAPLAR	
Halat Demetindeki Burulma Momenti (Costello) (Nmm)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Costello)
14272,09473	0,001
28544,18946	0,002
42816,28419	0,003
57088,37892	0,004
71360,47365	0,005
85632,56838	0,006
92768,61574	0,0065
96336,63942	0,00675
ANSYS SÜRTÜNME Lİ GERİLME ANALİZİ	
Halat Demetindeki Burulma Momenti (Sürtünmeli) (Nmm)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmeli)
14272,000	0,00108
28544,000	0,00216
42816,000	0,00324
57088,000	0,00432
71360,000	0,00540
85633,000	0,00647
92769,000	0,00701
96337,000	0,00728
ANSYS SÜRTÜNME SİZ GERİLME ANALİZİ	
Halat Demetindeki Burulma Momenti (Sürtünmesiz) (Nmm)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmesiz)
14272	0,00107
28544	0,00218
42816	0,00322
57088	0,00428
71360	0,00535
85633	0,00642
92769	0,00695
96337	0,00722

Halat demeti birim şekil değıştirme (ϵ) değeri 0,003 alınarak yapılan gerilme analizi ile bulunan eşdeğer gerilme sonuçları Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te gösterilmiş olup sürtünlü ve sürtünmesiz durumlar için maksimum gerilme noktası yaklaşık olarak aynı yerde sabit uca yakın bir noktada gerçekleşmiştir.

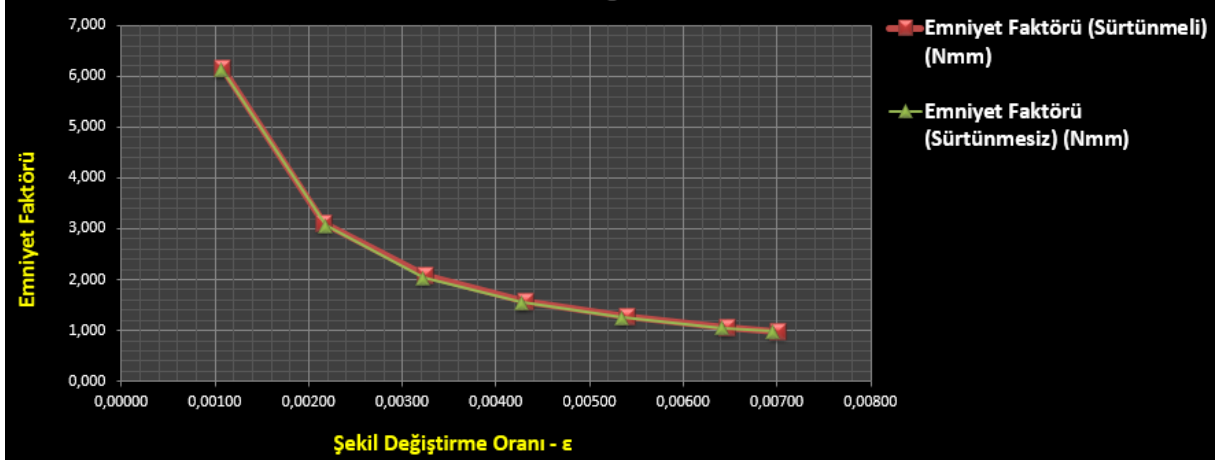


Şekil 7.4 Sürtünlü halat için eş değeri gerilim sonuçları



Şekil 7.5 Sürtünmesiz halat için eş değeri gerilim sonuçları

Sonuçlar kısmında yapılan çalışmalar sonucu emniyet faktörünün 1'in altına ineceği birim şekil değıştirme değeri sürtünlü gerilme analizi için 0,00701 ve sürtünmesiz gerilme analizi için 0,00695 olarak tespit edilmiştir. Emniyet faktörünün 1 altına düşmesi emniyetsiz bir çalışmanın oluşacağına işaret etmektedir. Emniyet faktörü ile halat demeti şekil değışimi (ϵ) arasındaki ilişki, Şekil 7.6'te grafik şeklinde ve Çizelge 7.5 'te tablo halinde verilmiştir.



Şekil 7.6 Demete ait emniyet faktörü ile halat demeti şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

Çizelge 7.5 Demete ait emniyet faktörü ile halat demeti birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişki

ANSYS SÜRTÜNME Lİ		ANSYS SÜRTÜNME SİZ	
Emniyet Faktörü (Sürtünmeli)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ (Sürtünmeli)	Emniyet Faktörü (Sürtünmesiz)	Halat Demeti Birim Şekil Değişimi - ϵ Sürtünmesiz
6,161	0,00108	6,1332	0,00107
3,104	0,00216	3,0575	0,00218
2,079	0,00324	2,0336	0,00322
1,572	0,00432	1,5519	0,00428
1,266	0,00540	1,2514	0,00535
1,0598	0,00647	1,0558	0,00642
0,980	0,00701	0,97666	0,00695



KAYNAKLAR

- [1] **Onur Y A** (2010) Halat Ömrüne Etki Eden Parametrelerin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 199 s.
- [2] **URL-1** <<https://www.haberler.com/izmit-korfez-gecisi-asma-koprusu-ndeki-halat-koptu-7103513-haberi/>>, Ziyaret tarihi: 19.09.2018
- [3] **Demir C ve Ala E** (2017) Ön gerilmeli monoton tipi halatın deneysel ve teorik doğal frekans analizi. *Sak. Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Dergisi*, 21 (5): 978-989.
- [4] **Love A E H** (1944) A Treatise On The Mathematical Theory Of Elasticity, fourth edition. *Dover Publications*, New York.
- [5] **Erdoğmuş C and İmraç C E** (2011) A Finite Element Model For Independent Wire Rope Core With Double Helical Geometry Subjected To Axial Loads. *Indian Acad. Sci*, 36 (6): 995-1008.
- [6] **Jiang W G, Yao M S, and Walton J M** (1999) A concise finite element model for simple straight wire rope strand. *International Journal of Mechanical Sciences*, 41 (2): 143-161.
- [7] **Şentürk Ö** (2007) Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Sonlu Elemanlar Metodu İle Modellenmesi ve Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 99s.
- [8] **URL-2**<http://www.dep-engineering.fr/pdf/Modern_History_of_Wire_Rope-1A.pdf> Ziyaret tarihi: 12.09.2018.
- [9] **Costello G A, and Sinha S K** (1977). Static behavior of wire rope. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103 (6): 1011-1022.
- [10] **Wettstein R**, (1973) Çelik Tel Halatların Konstrüksiyon ve Dayanma Süreleri. *İstanbul Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi*, 178-193.
- [11] **Knapp R H** (1975) Nonlinear Analysis Of A Helically Armored Cable With Nonuniform Mechanical Properties In Tension And Torsion. *Ocean 75 Conference*, 155-164

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Butson G J** (1981) Static And Dynamic Analysis Of Axially loaded Wire Ropes. *Ph.d. thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 99 p.
- [13] **Velinsky S A** (1981) Analysis Of Wire Ropes With Complex Cross Sections. *Ph. D. Thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 86 pp.
- [14] **Velinsky S A** (1985) General Nonlinear Theory For Complex Wire Rope. *Pergamon Press Ltd*, 27: 497-507.
- [15] **LeClair R A** (1986) Bending Of An Axially Loaded Strand With Friction And The Mechanics Of Wire Rope Reinforced Cylinders. *Ph. d. thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 48 pp.
- [16] **Costello G** (1983) Stresses in Multilayered Cables. *J. Energy Resour. Technol.*, 105 (3): 337-340.
- [17] **Chien C H** (1984) Effective Length Of Fractured Wires And A Fatigue Analysis Of Wire Rope. *Ph. d. thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 104 pp.
- [18] **Zhang Z** (1994) Vibration analysis and fatigue design of wire rope. *Ph. d. thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 71 pp.
- [19] **Sathikh S, Moorthy M B K, and Krishnan M** (1996) A Symmetric Linear Elastic Model For Helical Wire Strands Under Axisymmetric Loads. *J. Strain Anal*, 3: 1–15.
- [20] **Fekr M R** (1999) Stress Analysis Of An Optical Ground Wire. *Ph. d. thesis*, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill University, 153 pp.
- [21] **Yardibi E** (2000) Eksenel Yüklü Eğilmeye Maruz Tel Halatlarda Oluşan Tel Gerilmelerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, 96 s.
- [22] **Costello G A** (2003) Mechanics of wire rope. *Wire J. Int*, 36: 56–63.
- [23] **Elata D, Eshkenazy R and Weiss M P** (2004) The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core. *International Journal of Solids and Structures*, 41 (5–6): 1157–1172.
- [24] **Ghoreishi S R, Messenger T, Cartraud P and Davies P** (2004) Assessment of cable models for synthetic mooring lines. *Proc. 14th International Offshore and Polar Engineering Conference*, 184–190.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [25] Ghoreishi S R, Cartraud P, Davies, P and Messenger T (2007) Analytical modeling of synthetic fiber ropes subjected to axial loads. Part I: A new continuum model for multilayered fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures*, 44 (9): 2924–2942.
- [26] Ghoreishi S R, Cartraud P, Davies P and Messenger T (2007) Analytical modeling of synthetic fiber ropes. Part II: A linear elastic model for 1 + 6 fibrous structures. *International Journal of Solids and Structures*, 44 (9): 2943–2960.
- [27] Wehking K H and Ziegler S (2006), Calculation Of Rope Stresses Using The Finite Element Method. *OIPEEC Conference*, 121–136.
- [28] Yılmaz M (2007) Taşıyıcı Sistem Çelik Halatları ve Madencilik Sektöründeki Uygulamaları. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojileri Bilim Dalı, 88 s.
- [29] Singh R P, Mallick M and Verma M K (2016), Studies on failure behaviour of wire rope used in underground coal mines. *Engineering failure analysis*, 70: 290–304.
- [30] Ghoreishi S R, Messenger T, Cartraud P and Davies P (2007) Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3D FE model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49 (11): 1251–1261.
- [31] Usabiaga H and Pagalday J M (2008) Analytical procedure for modelling recursively and wire by wire stranded ropes subjected to traction and torsion loads. *International Journal of Solids and Structures*, 45 (21): 5503–5520.
- [32] Usabiaga H and Durville D (2009) A Finite Element Approach For Modelling Wire Ropes. *OIPEEC Conference / 3rd International Ropedays*, Stuttgart, 299-312.
- [33] Kösemen Ö (2008) Asansör Taşıyıcı Halatların Statik Yük Altında Deneysel Gerilme Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 88 s.
- [34] Salman Ö (2010) Taşıyıcı Halatların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 93 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [35] **Erdönmez C** (2010) Mathematical Modeling And Stress Analysis Of Wire Ropes Under Certain Loading Conditions. *Ph. D. Thesis*, Istanbul Technical University, Istanbul, 223 pp.
- [36] **İmrak C E ve Erdönmez C** (2010), On the problem of wire rope model generation with axial loading. *Mathematical and Computational Applications*, 15 (2): 259–268.
- [37] **İmrak C E ve Salman Ö** (2010) Taşıyıcı Halatların Deneysel Gerilme Analizi. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 606 (51): 9 s.
- [38] **Erdönmez C ve İmrak C E** (2011) Tel halatların parametrik denklemler ile modellenmesi ve gerilim analizi. *İtü dergisi/d mühendislik*, 10 (3): 93–104.
- [39] **Argatov I** (2011) Response of a wire rope strand to axial and torsional loads: Asymptotic modeling of the effect of interwire contact deformations. *International Journal of Solids and Structures*, 48 (10): 1413–1423.
- [40] **Meng F, Chen Y, Du M and Gong X** (2016) Study on effect of inter-wire contact on mechanical performance of wire rope strand based on semi-analytical method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 115–116: 416–427.
- [41] **Stanova E, Fedorko G, Fabian M, and Kmet S** (2011) Computer modelling of wire strands and ropes Part I: Theory and computer implementation. *Advances in Engineering Software*, 42 (6): 305–315.
- [42] **Stanova E, Fedorko G, Fabian M, and Kmet S** (2011) Computer modelling of wire strands and ropes part II: Finite element-based applications. *Advances in Engineering Software*, 42 (6): 322–331.
- [43] **Gnanavel B K and Parthasarathy N S** (2011) Effect of Interfacial Contact Forces in Lateral Contact Wire Strand. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 7 p.
- [44] **Gnanavel B K, and Parthasarathy N S** (2011) Effect of interfacial contact forces in radial contact wire strand. *Archive of Applied Mechanics*, 81 (3): 303–317.
- [45] **Ramteke E G and Yenarkar L** (2014) Analysis of Wire Rope. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3 (10): 14–19.
- [46] **Stanova E, Fedorko G, Kmet S, Molnar V and Fabian M** (2015), Finite element analysis of spiral strands with different shapes subjected to axial loads. *Advances in Engineering Software*, 83: 45–58.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [47] Wang X Y, Meng X B, Wang J X, Sun Y H and Gao K (2015) Mathematical modeling and geometric analysis for wire rope strands. *Applied Mathematical Modelling*, 39 (3–4): 1019–1032.
- [48] Wu W and Cao X (2016) Mechanics model and its equation of wire rope based on elastic thin rod theory, *International Journal of Solids and Structures*, 102–103: 21–29.
- [49] Onur Y A (2016) Halat Demetinin Statik Davranışının İncelenmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6 (1): 136–143,
- [50] Abdullah A B M, Rice J A, Hamilton H R and Consolazio G R (2016) An investigation on stressing and breakage response of a prestressing strand using an efficient finite element model. *Engineering Structures*, 123: 213-224.
- [51] Ala E (2017) Öngerilmeli Tel Halatların Deneysel Ve Teorik Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 84 s.
- [52] Anıl A S (2011) Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Bilgisayar Ortamında Yorulma Ömürlerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 165 s.
- [53] Verreet R (2002) A short history of wire rope. *Wire Rope Technology*, Aachen, Germany.
- [54] Salman-Çiçek Ö (2016) Modelling And Analysis Corrosion Fatigue Behaviour Of Steel Wire Rope. *Ph. D. Thesis*, Istanbul Technical University, Istanbul, Graduate School Of Science Engineering And Technology, Department of Mechanical Engineering, 94 p.
- [55] URL-3 <<http://www.adivarcelikhalat.com>>, Ziyaret tarihi: 15.10.2018.
- [56] URL-4 <<http://www.celikhalat.com.tr/uploads/teknik-katalog-rvz1.pdf>>, Ziyaret tarihi: 14.10.2018.
- [57] URL-5 <http://www.guven-kutay.ch/vinc/40_00_NasilVincYaparim.pdf>, Ziyaret tarihi: 15.10.2018.
- [58] Demirsoy M (1991) *Transport tekniği-kaldırma makinaları* cilt I, Birsen Yayınevi, İstanbul.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [59] **URL-5** <<http://www.dogukancelikhalat.com/urun/36x7-donmez-tip-celik-halat.html>>, Ziyaret tarihi: 10.02.2019.
- [60] **URL-5** <<http://www.izmitcelikhalat.com/tag/ceLIK-halat-cesitleri>>, Ziyaret tarihi: 13.02.2019.
- [61] **URL-6** <<https://old.gover.com.tr/8x19-iwrc-seale-celik-ozlu-celik-halat.html>>, Ziyaret tarihi: 12.02.2019.
- [62] **URL-7** <<http://www.izmitcelikhalat.com/6x19-seale-lif-ozlu-celik-halat>>, Ziyaret tarihi: 12.02.2019.
- [63] **URL-8** <<http://www.celsancelik.com/urunler/6x36-warrington-seale/>>, Ziyaret tarihi: 14.02.2019.
- [64] **URL-9** <<http://www.celsancelik.com/urunler/6x19-filler>>, Ziyaret tarihi: 14.02.2019.
- [65] **Costello G A** (1997). Theory Of Wire Rope. 2nd ed. *Springer Science & Business Media*.
- [66] **Chien C H** (1984) Effective Length Of Fractured Wires And A Fatigue Analysis Of Wire Rope. *Ph. d. thesis*, University of Illinois at Urbana-Campaign, 104 p.
- [67] **Phillips J W and Costello G A** (1985) Analysis Of Wire Ropes With Internal-Wire-Rope Cores. *Am. Soc. Mech. Eng.*, 52 (3): 510-516.
- [68] **URL-10** <<https://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3843&context=etd>>, Ziyaret tarihi: 25.02.2019.
- [69] **Güler M S ve Sadri Ş** (2015) Sonlu Elemanlar Yöntemi Hakkında Genel Bilgiler. *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg*, 5 (1): 56–66.
- [70] **URL-10** <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.2/en-us/help/wb_sim/ds_Contact_Advanced.html>, Ziyaret tarihi: 27.02.2019

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah Tombak, 1984 yılında Erzurum’da. 1990 yılında Selçuklu İlkokulu’nda eğitim hayatına başladı. 1998 yılında Mahmut Esat Ortaokulu’ndan mezun oldu. Ardından Enis Şanlıoğlu Lisesine başladı ve 2002 yılında birincilikle lise öğrenimin tamamladı. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı Ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü’ne girdi. 2017 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi’den mezun olduktan sonra 2011 yılına kadar özel sektörde proje mühendisliği yaptı. 2011 yılında Bartın Üniversitesi, Bartın Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılından itibaren Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Alaplı meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
Alaplı Meslek Yüksekokulu, Motorlu
Araçlar ve Ulaştırma teknolojileri Bölümü
Tepeköy Mevkii
Alaplı/Zonguldak

Tel : (+90) 505 230 60 19

E- Posta: tombak_abdullah@yahoo.com