T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERİLMELİ TEL HALATLARIN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

ERKAN ALA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. CİHAN DEMİR

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖNGERİLMELİ TEL HALATLARIN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

Erkan ALA tarafından hazırlanan tez çalışması 25/10/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri
Doç. Dr. Cihan DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Şenol ATAOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mehmet BOZCA
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Tek helis açısına sahip monotron tel halatların teorik ve deneysel titreşim analizinin yapıldığı bu tez çalışmasında akademik bilgi birikimi ve tecrübesiyle benim için zaman ayırıp bana her konuda destek olan tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Cihan DEMİR'e çok teşekkür ederim.

Sonlu elemanlar analizi konusunda önerileriyle ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği laboratuvarını kullanmamızda bize yardımcı olan hocalarım Yrd. Doç. Dr. Özgür DEMİR'e ve Yrd. Doç. Ali DOĞRUL'a teşekkür ederim. Deneyde kullandığımız halat numunelerini bizim için hazırlayan ve halat teknik bilgilerini bizimle paylaşan Köşkerler Halat firmasından Mustafa KÖŞKER'e teşekkür ederim. Tez dönemim boyunca bana her zaman destek olan değerli arkadaşlarım Makine Mühendisi Salih YÖNCE'ye ve Elektronik-Haberleşme Mühendisi Mert ÇAM'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Mayıs, 2017

Erkan ALA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 6
1.3 Hipotez 6

BÖLÜM 2

HALATLAR 7
2.1 Halat Tipleri 9
2.1.1 Çok Operasyonlu Halatlar 10
2.1.2 Tek Operasyonlu Halatlar 11
2.3 Tel Halatların Gösterimi 13

BÖLÜM 3

TEORİK MODELLEME 17
3.1 Halat Üzerinde Oluşan Enine Titreşimler 17
3.2 Doğal Frekans Formülünün Elde Edilmesi 20

BÖLÜM 4

MODAL ANALİZ 23
4.1 Teorik Modal Analiz 23
4.2 Deneysel Modal Analiz 27
4.3 Modal Analiz Uygulama Alanları 28

BÖLÜM 5

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ 30
5.1 Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması 34
5.1.1 Halat Katı Modelinin Oluşturulması 34
5.1.2 Malzeme Özellikleri 58
5.1.3 Temas Özellikleri 59
5.1.4 Çözüm Ağı Özellikleri 61
5.1.5 Sınır Şartları 64
5.2 Ansys'de Lineer Olmayan Bir Analizin Çözüm Aşamaları 64

BÖLÜM 6

DENEYSEL ANALİZ 68
6.1 Deneysel Doğal Frekans Ölçümü 68
6.2 Ölçümde Kullanılan Ekipmanlar 69

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 73

KAYNAKLAR 82

ÖZGEÇMİŞ 84

SİMGE LİSTESİ

Q	Kesme kuvveti
M	Eğilme momenti
q	Halatın birim ağırlığı
g	Yerçekimi ivmesi
I	Eylemsizlik momenti
S	Öngerilme kuvveti
E	Elastisite Modülü
a	Dalga hızı
m_r	Halat birim uzunluğunun kütlesi
L	Halat uzunluğu
λ	Dalga boyu
n	Döngü sayısı
t	Zaman
T	Dalganın periyodu
i	Dalga karnı sayısı
f	Titreşim frekansı
Φ	Z ekseni etrafındaki döne açısı
α_j	Halat sarım açısı
q’	Halat sarım yönünü gösteren katsayı
r	Halat sarım yarıçapı
h	Halat adımı
h_m	Model halatın uzunluğu
δ	Tel çapı
γ	Katı modeli oluşturulan ilk telin x ekseni ile yaptığı açı
ξ	Halatın herhangi iki katmanı arasındaki tellerin merkez eksenleri arasındaki açı
j	Katman numarası
K	Katılık matrisi
u	Yerdeğiştirme
F	Kuvvet
L_e	Lagranjian
T_e	Sistemin genelleştirilmiş koordinatlarda yazılan toplam kinetik enerjisi
V_e	Sistemin genelleştirilmiş koordinatlarda yazılan toplam potansiyel enerjisi
M_e	Kütle matrisi

KISALTMA LİSTESİ

DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite Element Method
FRF	Frequency Response Functions
TS	Türk Stanartları

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Halat üzerinde tel, öz ve kordon gösterimi…….....…….8
Şekil 2.2 Düz sarımlı ve çapraz sarımlı halat tipleri…….....……..9
Şekil 2.3 Dönmeyen halatlara örnekleri……..……....……10
Şekil 2.4 Çok operasyonlu bir halatın kordon ve halat kesiti…....……...11
Şekil 2.5 Standart çelik halat kesiti……...……12
Şekil 2.6 Filler demetli halat……...……...12
Şekil 2.7 Seale demetli halat……...……..12
Şekil 2.8 Warrington demetli halat……...……....12
Şekil 2.8 Warrington-Seale demetli halat.....13
Şekil 2.9 Ekleme yöntemi kullanımı.....14
Şekil 2.10 Tespit cıvatası kullanımı.....14
Şekil 2.11 Taurit kovanı kullanımı.....15
Şekil 2.12 Halat kovanı yapım aşamaları.....15
Şekil 2.13 Kamalı kilit yöntemi kullanımı.....16
Şekil 3.1 Uç noktalardan gerilme uygulanan halat modeli.....17
Şekil 3.2 Halat üzerinde oluşan kuvvetler ve momentler.....18
Şekil 3.3 Halat üzerinde oluşan dalganın anlık gösterimi.....19
Şekil 3.4 Halat üzerinde oluşan ilk 5 mod şekli.....22
Şekil 4.1 Mod Şekilleri.....24
Şekil 4.2 Modal test sistemi.....28
Şekil 4.3 Modal analizi yapılan bir sistemden ölçümlerin alınması.....29
Şekil 5.1 Yapının elemanlara ayrılması.....32
Şekil 5.2 Parametrik eğri denklemlerinin Catia programına Law Editor komutu ile girilmesi.....35
Şekil 5.3 Catia yazılımında eğriden halat katı modelli oluşturulma adımları.....37
Şekil 5.4 Parametrik denklemde kullanılan ξ ve γ açıları.....38
Şekil 5.5 Halat kesitinde δ_1, δ_0 ve r_1 parametrelerinin gösterimi.....39
Şekil 5.6 1x7 5 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü.....42
Şekil 5.7 1x7 8 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü 44
Şekil 5.8 Halat kesitinde δ_1, δ_0 ve r_1 parametrelerinin gösterimi.....46
Şekil 5.9 1x19 3 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü.....47
Şekil 5.10 1x19 5 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü.....51
Şekil 5.11 1x19 8 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü.....54
Şekil 5.12 Halat kesitinde δ_3, δ_2, δ_1, δ_0, r_1, r_2 ve r_3 parametrelerinin gösterimi.....56

Şekil 5.13 Galvanizleme işlemi yapılmış çelik halat.....59
Şekil 5.14 Teller arasında temasın gösterimi.....60
Şekil 5.15 Solid186 elemanı (a) ve Solid187 elemanı (b).....61
Şekil 5.16 Halat modelinin ağ yapısı görünümü.....62
Şekil 5.17. Kuvvetlerin halatın uç noktalarından uygulanması (a-c) ve yer değiştirme sınır şartının uygulanması (b).....64
Şekil 5.18 Hooke yasasının elastik yay üzerinde gösterimi.....65
Şekil 5.19 Nonlinear sistem için kuvvet yer değiştirme grafiği.....65
Şekil 5.20 Ansys Workbench'de işlem adımlarını gösteren ürün ağacı.....66
Şekil 5.21 Newton Raphson Methodu.....66
Şekil 6.1 Deney standı genel görünümü.....69
Şekil 6.2 Frekans cevabı ve faz eğrisi ilişkisi.....69
Şekil 6.3 Deneyde kullanılan ivmeölçer.....70
Şekil 6.4 Darbe çekici.....70
Şekil 6.5 Analizör.....71
Şekil 6.6 dBFA Suite programı.....72
Şekil 6.7 Sinyal işleme parametreleri penceresi.....72
Şekil 7.1 1000 N ön gerilme altında 1x7 3 mm halatın analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....74
Şekil 7.2. 1000 N ön gerilme altında 1x19 3 mm halatın analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....74
Şekil 7.3. Aynı çap ölçüsündeki farklı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.....76
Şekil 7.4. Farklı çap ölçüsündeki aynı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması.....77

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bazı eleman tipleri.....33
Çizelge 5.2 Sürtünmeli temas ve ayrılmasız temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması.....60
Çizelge 5.3 Sürtünmeli temas ve yapışık temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması.....60
Çizelge 5.4 Çözüm ağı yakınsama analizi.....62
Çizelge 7.1 Farklı uzunluklardaki modellerin karşılaştırılması.....76
Çizelge 7.2 1x7 3 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....77
Çizelge 7.3 1x7 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....78
Çizelge 7.4 1x7 8 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....78
Çizelge 7.5 1x19 3 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....79
Çizelge 7.6 1x19 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....79
Çizelge 7.7 1x19 8 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....80
Çizelge 7.8 1x37 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması.....80
Çizelge 7.9 5 mm çapındaki halatların kopma dayanımı değerleri.....81

ÖZET

ÖNGERİLMELİ TEL HALATLARIN DENEYSEL VE TEORİK ANALİZİ

Erkan ALA

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Cihan DEMİR

Monotron tipindeki çelik halatlar günümüzde asma köprüler, teleferik hatları ve vinçler gibi pek çok yapıda kullanılmaktadır. Halatların montajı sırasında uygulanması gereken ön gerilme miktarı halatın doğal frekansının ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada farklı tiplerdeki ve farklı büyüklükteki çaplara sahip monotron halatların doğal frekans analizi deneysel ve teorik olarak yapılmıştır. Teorik analizde analitik formüllerden ve sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. Deneysel çalışmada, ön gerilmeli kablonun basit mesnetli sınır şartları oluşturularak çeşitli yükler altında darbe çekici ile doğal frekans analizi analizi gerçekleştirilmiştir. Halat modellerinin farklı ön gerilme yükleri altındaki doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Sonlu elemanlar analizi için gereken halat katı modelleri halat imalatçısı firmalardan alınan bilgiler ve halat numuneleri kullanılarak katı modelleme yazılımında oluşturulmuştur. Bu katı modeller sonlu elemanlar analizi için sonlu elemanlar programına aktarılmıştır. Katı modelin sonlu elemanlar ağına ayırma işlemleri, sınır şartlarının uygulanması ve sonlu elemanlar modelinin çözümü Ansys programında yapılmıştır.

Deneysel ve teorik analizlerin sonuçları değerlendirilerek halatların doğal frekanslarının uygulanan gerilme kuvvetinde halat çapına ve türüne bağlı olarak nasıl değiştiği tablolar ve grafikler yardımıyla gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tel halatlar, doğal frekans analizi, sonlu elemanlar yöntemi

ABSTRACT

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PRESTRESSED WIRE ROPE

Erkan ALA

Department of Mechanical Engineering
MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Cihan DEMİR

Nowadays, monotron type steel ropes are used in many structures such as suspension bridges, cable car lines and cranes. The amount of prestress that must be applied during the installation of the ropes is calculated by measuring the natural frequency of the wire rope. In this study, the natural frequency analysis of monotron wire ropes of different types and diameters is experimentally and theoretically done. In the theoretical analysis, analytical formulas and finite element method were used. In the experimental study, the natural frequency analysis was carried out by using the impulse hammer under various loads by establishing simple constrained boundary conditions of the prestressed cable. The natural frequency values under different pre-tension loads of the rope models were compared.

The rope solid models needed for finite element analysis were created in solid modelling software using information from rope manufacturers and rope samples. These solid models have been transferred to the finite element program for finite element analysis. Finite element meshing of the solid model, application of boundary conditions, and finite element modeling have been done in the program.

The results of experimental and theoretical analyzes have been evaluated and illustrated with the help of tables and graphs showing how the natural frequencies of the ropes change depending on the applied rope diameter and number of wires at the applied tensile strength.

Keywords: Wire ropes, natural frequency analysis, finite element method

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tel halatlar pek çok mühendislik uygulamasında yüksek dayanım/ağırlık oranları nedeniyle kullanılmaktadır. Büyük açıklığa sahip asma köprüler, stadyum çatıları, teleferik hatları ve vinçler gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır.

Halatlarda yük taşıma kapasitesi teller arasında dağıtılmaktadır ve bunun iki faydası bulunmaktadır. Yüksek eksenel dayanım ve rijitlik ile eğilme esnekliğinin birleşimi sağlanmaktadır. Böylece esas olarak yerel kırılmalardan korunmak için yapıyı bölerek çeliğin yüksek gerilme değerlerinde kullanımına izin verir. Özellikle tellerin kırılması durumunda yerel hasarların telafi edilmesi bakımından tel halatın tokluğunun sağlanması önemlidir. Yükün halat içindeki çok sayıda tele dağıtılması nedeniyle işletme emniyeti oldukça yüksektir. Kendi ağırlıklarıyla taşıma kapasiteleri arasında uygun bir oran mevcuttur ve büyük bir elastik uzama miktarına sahiptirler. İşletme sırasında kolaylıkla gözle kontrol edilebilmeleri mümkündür. [1]

Tel halatlar kullanıldıkları yapıda emniyet açısından kritik öneme sahip elemanlardır. Kablolara yapının montajı ve bakımı esnasında uygulanacak gergi kuvvetinin doğru tespit edilmesi yapının emniyeti ve sağlıklı bir şekilde kullanımı açısından önemlidir. Kablolardaki gergi kuvvetinin tespiti statik ve dinamik yöntemler olmak üzere 2 farklı yöntemle yapılmaktadır. Statik metotta yük hücresi kullanılarak halatın gerinim ölçülmesi yapılarak buradan gergi kuvveti hesaplanmaktadır. Dinamik metotta ise kabloların titreşim frekansı ivmeölçer yardımıyla ölçülmektedir ve frekans değeri kullanılarak gergi kuvveti analitik formüle göre hesaplanmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

(Jiang vd. [2]), tel halatların eksenel yük altındaki davranışını ve gerilmelerin dağılımını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemiştir. Sonlu elemanlar modelini

basitleştirmek için tel halatın ve uygulanacak yükün simetrik olmasından faydalanmıştır. Analizleri tel halatın katı modelinin basit bir sektör kısmında yapmıştır. Sonlu elemanlar modeli ve analizi Ansys yazılımında oluşturmuştur. Analiz sonucu elde edilen verileri Costello tarafından geliştirilen analitik teoriyle ve Utting ve Jones tarafından elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırmış ve sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Sonlu elemanlar analiziyle tel halatta eksenel yük altında oluşan temas gerilmeleri, artık gerilmeleri, sürtünme ve plastik deformasyonlar üzerinde çalışmıştır.

(Ghoreishi vd. [3]), basit düz tel demetlerinin eksenel yük altındaki davranışını incelemek üzere geliştirilen 9 adet analitik modeli ve daha önce elde edilmiş olan deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları tüm analitik modeller için yeterli olmadığı için lineer elastik, izotropik malzeme için sonlu elemanlar modeli oluşturularak karşılaştırmıştır. Böylece tel halatların analitik modellerinin geçerli olduğu bölgeleri tespit etmiştir. Cosmos sonlu elemanlar yazılımında yapılan analizlerin deneysel çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu olduğu için analitik modellerin karşılaştırılmasında kullanmıştır. 35° sarım açısına kadar tel halatların eksenel yük altında elastik davranışını incelemiştir. Analitik modellerin 20°'nin altındaki sarım açısına sahip olan tel halatların elastik katılık sabitlerini doğru bir şekilde elde ettiğini göstermiştir. Sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlar ile analitik modellerle elde edilen sonuçlar arasındaki farkların %10'dan daha az olduğunu tespit etmiştir. Halat sarım açısının 20°'den büyük olduğu halatlarda sonlu elemanlar modeli ile elde edilen katılık katsayısı değerleri ile analitik modellerle elde edilen katılık katsayısı değerleri arasındaki farkın % 45'e kadar çıktığı sonucuna ulaşmıştır. 15°'nin üzerindeki sarım açısına sahip halatlar için Poisson katsayısının etkisi ile halat geometrisinin değişimini de hesaba katan analitik modeller sonlu elemanlar modeline daha yakın sonuçlar ortaya çıkarmıştır.

(Spak vd. [4]), tel halatların davranışını incelemek için geliştirilen ince çubuk modeli, yarı sürekli model ve kiriş modeli olmak üzere 3 ana modelleme yaklaşımını incelemiştir. İncelemede tel halatların iç sönümü üzerinde çalışmıştır. Teller arası sürtünme, değişken eğilme katılığı ve iç viskoelastik kayıplar nedeniyle oluşan fiziksel sönümü modellerde kullanılan belirli terimlerle açıklamıştır. Gerçekçi bir tel halat modelinde kesme kuvveti etkileri, değişken eğilme katılığı ve sürtünme kuvvetleri dahil edilmelidir. Bunlar dışında tel halat modeline etki eden pek çok faktör vardır ve her bir faktör belirli bir miktarda sonucu etkilemektedir. (Spak vd. [4]), modellemede tasarımcı

tarafından hangi etmenlerin ihmal edilebileceği ve modelin hem doğru hem de daha az karmaşık olması için ideal kombinasyonun nasıl yapılacağı konusunda çalışmıştır.

(Stanova vd. [5-6]), tel halatların geometrik modellerinin çıkarılması için gerekli matematiksel modelleri hem tek helis açısına hem de çift helis açısına sahip halatlar için çıkarmıştır. Tel halatın hem demetleri için hem de demetlerin içerisindeki tellerin merkez eksenlerini gösteren parametrik denklemleri elde etmiştir. Elde edilen parametrik denklemler sayısal örneklerle gösterilmiştir ve bu denklemler Catia V5 yazılımında kullanılarak tel halat geometrisi oluşturmuştur. Böylece parametrik denklemlerin doğruluğu ve performansı görselleştirmelerle kontrol etmiştir. Catia V5 yazılımı kullanarak oluşturduğu tel halat katı modeli daha sonra sonlu elemanlar analizi yapılmasında kullanmıştır. Çok katmanlı halat demetinin çekme yükü altındaki elastik davranışını incelemek için sonlu elemanlar analizi yazılımı olan Abaqus/Explicit programı kullanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçlar teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların uyumluluğu geometriyi oluşturmak için kullanılan parametrik denklemlerin doğruluğunu ve geliştirilen sonlu elemanlar modelinin önemini göstermiştir. Yapılan bu çalışmayla tel halatların karmaşık geometrilerinin modellenmesi ve daha sonra yapılacak daha kapsamlı analizler (yorulma, plastik şekil değiştirme ve eğilme gibi) için yeni bir yöntem geliştirmiştir.

(Jun vd. [7]), tel halatların demetleri arasındaki şekil değiştirme dağılımını tespit etmek için çalışmalar yapmıştır. Bunun için 6x19 IWS tipindeki halatın hem katı modelini hem de sonlu elemanlar modelini Ansys yazılımı kullanarak oluşturmuştur. Çapraz sağ sarımlı ve düz sağ sarımlı olmak üzere 2 farklı tipte halat katı modeli oluşturmuş ve bir ucu tüm yönlerde sabitlenerek diğer ucundan kuvvet uygulayarak çekme yükü altında analiz yapmıştır. Sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için 6x19 IWS tipindeki çapraz sağ sarımlı halat için çekme testi uygulamış ve sonuçların uyumlu olduğunu göstermiştir. Düz sağ sarımlı halatlarda çapraz sağ sarımlı halatlara göre deformasyonlar daha fazla ortaya çıkmıştır. Ayrıca dış ve iç katmanlarındaki tellerin farklı miktarlarda şekil değiştirdiğini tespit etmiştir. Bunun sonucunda halatın içteki ve dıştaki katmanları arasında bağıl hareket ortaya çıkmaktadır.

(Wu [8]), 1x37 tipinde spiral halatın çekme yükü altında sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiştir. Bunun için ilk önce halatların geometrik modeli için gerekli olan parametrik denklemleri elde etmiştir. Bu denklemleri Pro Engineer yazılımında kullanarak sadece katmanlardaki tellerin sarım yönleri birbirinden farklı olan 3 model oluşturmuştur. Ansys/Workbench yazılımı kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizi

ile deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırmıştır ve uyumlu olduğu görülmüştür. Daha önceden oluşturulan 3 modelin sonlu elemanlar analizi sonuçları birbirleriyle karşılaştırmıştır. Çalışmanın sonunda spiral halatlar için 1., 2. ve 3. katmanların sarım yönlerinin önemli olduğu sonucuna ulaşmıştır. Oluşturulan 2. modelde 2. ve 3. katmandaki tellerin sarım yönleri aynıdır. Diğer iki modelde 2. ve 3. katmandaki tellerin sarım yönleri birbirine göre terstir. Sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırıldığında 2. modelde eşdeğer gerilmelerin ve uzamanın daha fazla olduğu ortaya çıkmıştır. 1x37 tipindeki spiral halatlarda en dıştaki katmandaki teller ile 2. katmandaki tellerin sarım yönlerinin mutlaka birbirinin tersi olması gerektiği ancak ilk katmandaki tellerin sarım yönünün önemli olmadığı sonucuna ulaşmıştır.

(Erdönmez ve İmrak [9]), bazı halat tiplerinin özünü oluşturan bağımsız tel halat çekirdeğinin ve bunun öz olarak kullanıldığı Seale tipindeki tel halatın eksenel yük altında sonlu elemanlar analizini yapmıştır. Bağımsız tel halat çekirdeği basit düz bir demet ve onu çevreleyen altı helisel demetten oluşmuştur. Bağımsız tel halat çekirdeğinin ortasında yer alan düz demetin merkezindeki teli çevreleyen teller tek helis açısına sahipken, bağımsız tel halat çekirdeğinin dışındaki demetlerin ortasındaki teller tek helis açısına, dış demetlerin dış katmanlarında yer alan teller çift helis açısına sahiptir. Daha önceden oluşturulan analitik modellerde çift helis açısına sahip teller için parametrik denklemler çıkarılmıştır. Ancak bu denklemleri kullanarak oluşturulan halat katı modeli yoktur. Bu çalışmada Matlab yazılımı kullanılarak oluşturulan tel halatı iskeleti programında halatı oluşturan her bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler kullanmıştır. Tel halatı iskeleti yazılımı yardımıyla halatın katı modelini oluşturmak için gerekli olan kontrol noktalarını elde etmiştir. Bu kontrol noktaları Hypermesh yazılımında kullanarak halatı oluşturan tellerin katı modelini ve elemanlara bölünmesini gerçekleştirmiştir. Abaqus yazılımı kullanılarak halatı oluşturan teller bir araya getirilmiş ve bağımsız tel halat çekirdeği oluşturulmuştur. İlk olarak bağımsız tel halat çekirdeğinin merkezinde yer alan düz demetin sonlu elemanlar analizini Abaqus/Explicit yazılımında yapmıştır. Analiz sonuçlarını Jiang ve Henshall tarafından yapılan sonlu elemanlar analizi sonuçları ile ve Costello'nun yaptığı analitik çözümleri, Utting ve Jones'un yaptığı deneysel çalışmanın verileri ile karşılaştırmıştır. Sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu ve sonlu elemanlar analizi ile daha duyarlı sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Bağımsız tel halat çekirdeğinin öz olarak kullanıldığı Seale tipi halatın sonlu elemanlar analizini bağımsız tel halat çekirdeğinin analizi gibi yapmıştır. Analiz sonucunda halattaki her bir tel için yük ve uzama grafiklerini elde

etmiştir. Yapılan bu modelleme ve analiz çalışmasıyla halatların kopma ve kaza analizlerinde kullanılabilecek yöntem geliştirilmiştir.

(Yu vd. [10]) tek helis açısına sahip 7 adet telden oluşan halat için yanal ve eksenel yükleme durumlarında temas bölgelerindeki halatların davranışı ve gerilim dağılımını incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Bunun için hem eksenel hem de yanal yükleme durumu için farklı sınır şartlarına sahip sonlu elemanlar modelleri Ls-Dyna yazılımı kullanarak oluşturmuştur. Tüm modellerde halat katı modelinin bir ucunu tamamen sabitlemiştir. Diğer ucu ise ilk modelde serbest bırakmış, ikinci modelde tüm yönlerde sabitlemiş ve üçüncü modelde özel olarak bir sınır şartı tanımlayarak uç bölgesini kısmen sabitlemiştir. Böylece gerçeğe daha yakın sonlu elemanlar modeli oluşturmuştur. Sonlu elemanlar analizini Ls-Dyna yazılımında gerçekleştirmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonuçlarını Utting ve Jones tarafından yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Sonuçların uyumlu olduğunu göstermiştir. Hem ekesenel hem de yanal yükleme durumunda hazırlanan üçer modeli de kendi aralarında karşılaştırmıştır. Yanal yükleme işlemini farklı sınır şartlarında, farklı ön gerilme kuvvetleri uygulayarak ve farklı yanal yükleme hızları altında incelemiştir. Temas bölgelerinde gerilim dağılımını ve sürtünme kuvvetinin etkisini değerlendirmiştir. Yanal yükleme durumunda eksenel yükleme durumuna göre sürtünme kuvvetinin etkisinin daha fazla olduğunu ancak bu etkinin de sınırlı olduğunu tespit etmiştir.

(Feyrer [11]), tel halatların sınıflandırılmasını, testlerinin ve test düzeneklerinin nasıl yapılması gerektiğini ve halatlarla ilgili önemli parametrelerin teorik olarak nasıl hesaplanacağını göstermiştir. Çekme yükü, eğilme yükü ve burulmada gerilimlerin hesaplanması, elastiklik modülünün hesaplanması, tork ve halatın makara üzerindeki hareketinde halat veriminin hesaplanmasını teorik denklemlerle ve uygulamalarla göstermiştir. Ayrıca halatın eksenel yüklemede ve eğilmede dayanabileceği yük çevrim sayısının hesaplanmasını göstermiştir.

Zweifel [12] tarafından yapılan çalışmada halat üzerinde oluşan enine bir dalganın ilerlemesi teorik olarak yapılmıştır. Halat doğal frekansı ile uygulanan gerilme arasındaki ilişki analitik olarak gösterilmiştir. Halat üzerinde oluşan gerilmenin pratikte nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Tek helis açına sahip monotron tipindeki tel halatların doğal frekansının basit mesnetli sınır koşullarında uygulanan çeşitli ön gerilme kuvvetleri altında halat çapına ve tel sayısına bağlı olarak değişiminin deneysel ve teorik incelenmesi.

1.3 Orijinal Katkı

Monotron tipindeki tel halatların doğal frekans incelemesi deneysel ve teorik olarak yapılmıştır. Literatür incelemelerinde monotron tel halatların doğal frekansının tel çapına ve toplam tel sayısına bağlı olarak teorik ve deneysel analizleri içeren bir çalışmaya rastlanmamıştır.

BÖLÜM 2

HALATLAR

Tel halatlar birçok küçük ve ince telin bir araya getirilip örülmesi ile üretilen, gerilebilir, güçlü,ve yapısal olarak en dayanıklı yük taşıma ve kaldırma araçlarından biridir. Tel halatlar büyük bir dayanıklılığa ve esnekliğe sahiptir. Tel halatlar yüksek mukavemetli (genellikle 1600-1800N/mm^2) çelik tellerden imal edilir.

Öz: Halatlarda etrafındaki damarlara, damarlarda ise çelik tellere yataklık yapan göbek kısmıdır. Öz kullanma amacına göre, bitkisel veya sentetik bir madde, çelik telli damar veya çelik telli halat olabilir.

Lif öz: Bitkisel veya sentetik liflerden yapılan özdür.

Çelik öz: Bir çelik tel, çelik telli bir damar veya biri kendi özünde olmak üzere 7 telli 7 damardan yapılmış özdür.

Öz teli: Halat damarının özünü meydana getiren bir teldir.

Ana tel: Halat damarında öz telinin etrafına sarılmış yük taşıyan teldir.

Dolgu teli: Ana telleri desteklemek ve hizalamak için bazı düz damarlarda kullanılan ve ana

telden daha ince olan bir teldir.

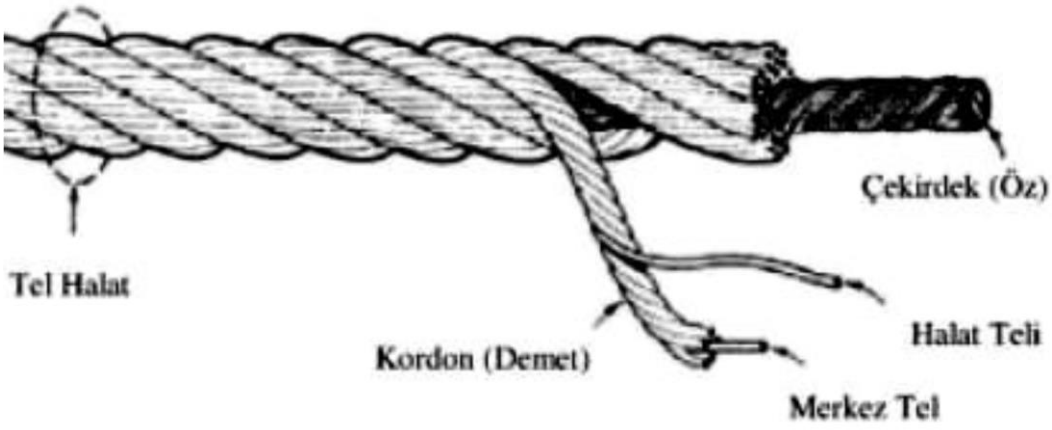
Halat adımı: Bir demetin halat ekseni etrafında tam bir tur dönerek oluşturduğu uzunluktur.

Tel halatlar yüksek mukavemetli ince çelik tellerden yapılırlar. Bu çelik teller, ark çeliği, Siemens-Martin çeliği veya oksijen çeliğinden mamul; çapları 5,50 ile 16 mm arasında değişen yüksek karbonlu finmaşinlerden imal edilirler. Finmaşinlerin saflık derecesi en son olarak kullanılacağı yerin özelliklerine göre seçilmekle beraber, aşağıdaki elementler çelik tel halat imalatında genellikle kullanılan limitleri teşkil ederler.

- Mangan : % 0,30 - % 0,70
- Silis : % 0,10 - % 0,30
- Fosfor : maksimum % 0,04
- Kükürt : maksimum % 0,04
- Fosfor + Kükürt : maksimum % 0,07
- Krom + Nikel + Bakır : maksimum % 0,25

Tel çapları 0,-2 ila 2,4 mm olan ince teller, bir çekirdek tel etrafında bir veya bir birkaç katlı olmak üzere helis şeklinde sarılmasıyla kordonlar, kordonların bir öz etrafında yine helis şeklinde sarılmasıyla halat meydana gelir. Şekil 2.1'de tipik bir halatta, öz, tel ve kordon gösterilmiştir.

Tel halatlar genellikle çelik ve pirinç gibi malzemelerden üretilir. Açık havada kullanılması planlanan farklı tipteki tel halatların korozyon nedeniyle paslanmasını önlemek amacıyla galvanizleme işlemi uygulanır.



Şekil 2.1 Halat üzerinde tel, öz ve kordon gösterimi

Tel halatı meydana getiren teller, TS 2162 normunda verilen şartlara sahip çelik tellerdir. Genellikle soğuk çekilerek veya haddelenerek elde edilirler. Tellerin etrafına sarıldıkları öz elyaf bir lif veya çelik tel olabilir. Her kordonun içinde ve halatı meydana getiren kordonların arasında öz bulunmaktadır. Halatın özü bitkisel elyaf öz ise daha kolay eğilebilir ancak çalışma ortamının sıcaklığının yüksek olduğu yerlerde çelik özlü halatlar kullanılmalıdır.

Halatların kordonlarında bulunan tellerin sarım şekline göre adlandırılır. Eğer teller kordon içinde aynı *sarım açısına*1 sahip değilse bu tip kordonlara *paralel sarımlı kordon* denir. Bu kordonlarda teller aynı *sarım adımına* sahiptir. Kullanılan tel çapları her katta farklılık gösterir. Bu tip kordonlara sahip halatlardan bazıları *Seale, Warrington* halatıdır. Bir kordonu oluşturan tellerin sarım açısı her tabakada aynı ise bu kordona *çapraz*

sarımlı kordon denir. Bu kordonlarda sarım adımı farklı olduğundan teller birbirini çapraz keser. Bu kordonları oluşturan tellerin yüzey basıncı yüksektir. Standart halatlar bu tip kordonlardan oluşur.

2.1 Halat Tipleri

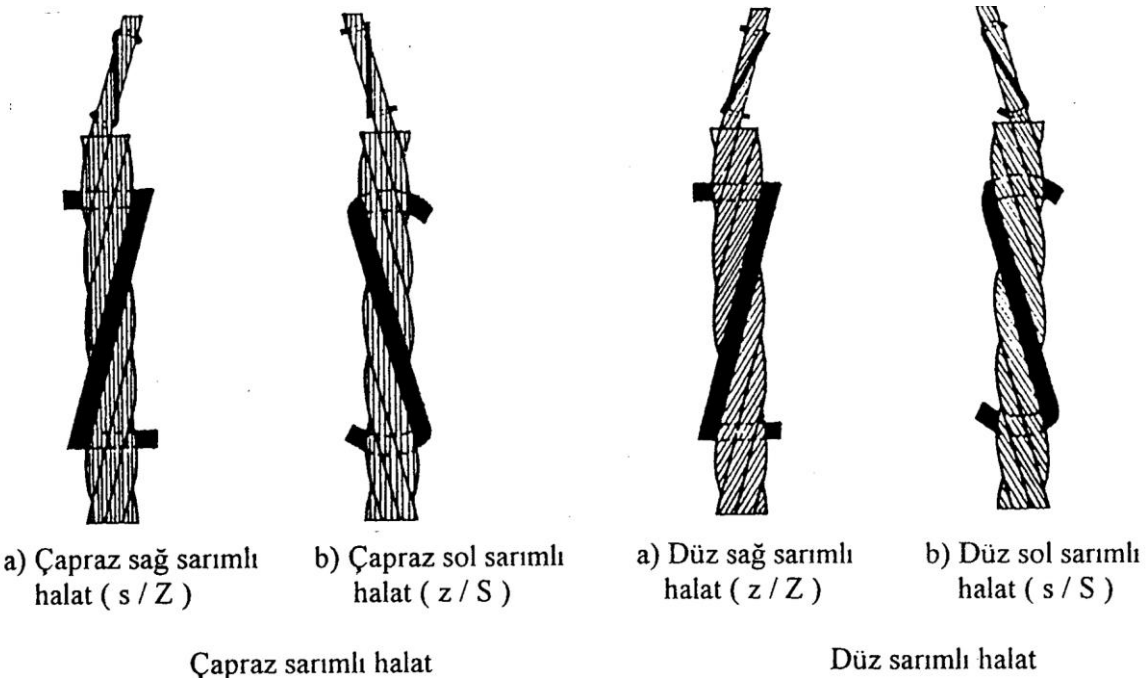
Halatlar kordonların sarılış yönlerine göre ve kordonları meydana getiren tellerin düzenleniş şekline göre sınıflandırılır. Kordonları meydana getiren teller ile halatı oluşturan

kordonların sarılış yönleri harflerle temsil edilir. Kordonu meydana getiren teller sağa sarılışlı ise « z », sola sarılışlı ise « s » harfleri ile gösterilir. Kordonların sarımı sağa doğru

ise « Z », sola doğru ise « S » harfleri ile gösterilir.

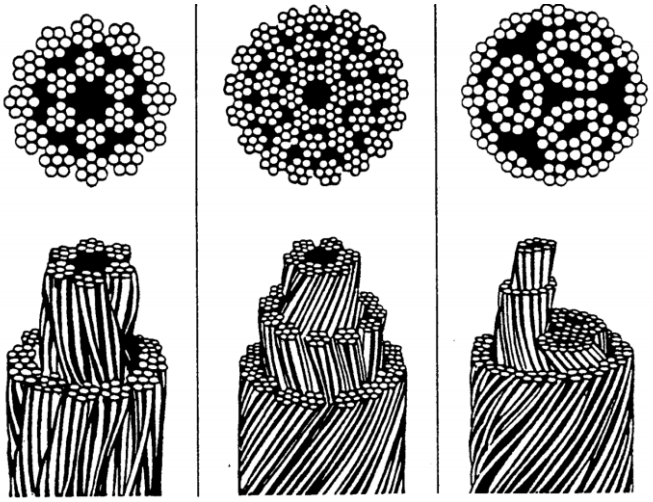
Eğer halatları meydana getiren kordonların sarımı ile kordonu meydana getiren tellerin sarımı aynı yönde ise *düz sarımlı*, farklı yönde ise *çapraz sarımlı* halat olarak adlandırılır Buna göre halatlar sarım şekillerine göre aşağıda gösterildiği şekilde sınıflandırılır:

- Çapraz sarımlı halatlar
  - Çapraz sağ sarımlı halat s/Z
  - Çapraz sol sarımlı halat z/S
- Düz sarımlı halatlar
  - Düz sağ sarımlı halat z/Z
  - Düz sol sarımlı halat s/S



Şekil 2.2 Düz sarımlı ve çapraz sarımlı halat tipleri

Yukarıda sayılan halatların dışında dönmeyen halat diye isimlendirilen ve çok sıralı kordonlu halatlar da mevcuttur. Bu halatların iç sıralardaki kordonlar düz sarımlı sol yönlü, dış sıradaki kordonlar ise çapraz sarımlı sağ yönlüdür. Dönmeyen diğer bir halat türü ise oval kordonlu halatlardır. Burada ise iç sıradaki kordonlar düz sarımlı sol yönlü, dış sıradaki kordonlar düz sarımlı sağ yönlü olarak sarılır. Şekil 2.3'te dönmeyen halatlara örnekler görülmektedir.

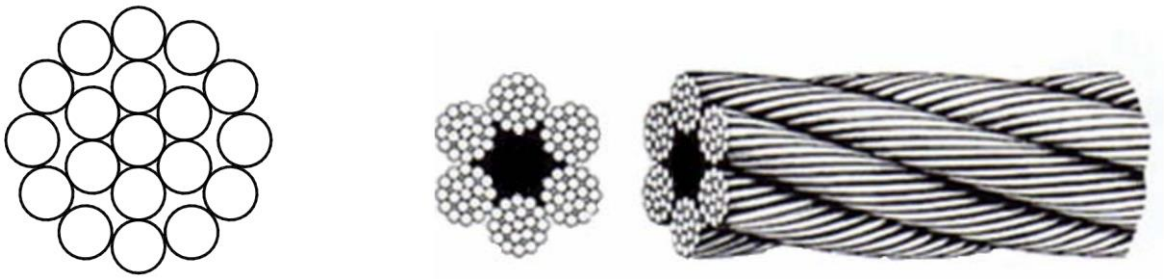


Şekil 2.3 Dönmeyen halatlara örnekleri

Öngerilmesiz halat olarak adlandırılan halatlar ise imal edilme aşamasında helis şeklinde sarılmadan önce ön gerilmeleri azaltmak için deforme edilir. Böylece kordon içinde helis şeklinde sarıldıklarında dönmeye yeltenmezler yani açılmazlar. Böylece daha uzun ömürlü halat elde edilir ve daha kolay eğilir. Tel halatlar imalat şekillerine göre çok operasyonlu halatlar ve çok operasyonlu halatlar olmak üzere 2 sınıfa ayrılır.

2.1.1 Çok Operasyonlu Halatlar

Bu sınıf halatlar standard kompozisyonlar olarak adlandırılır. Halattaki demetlerin tüm kat telleri aynı yönde fakat farklı açıyla örülüdür. Bu nedenle de her kat ayrı bir katsayısına göre imal edilen kompozisyonlardır. Bu açı farkı tellerin mütecanis sarılmasını, bir altındaki tel katına batmamasını sağlar. Ancak, halatın ani ve aşırı tazyike maruz kalması halinde katlar arasında tel kaymaları olabilir. Örneğin: 6x17, 6x19, ... gibi.



Şekil 2.4 Çok operasyonlu bir halatın kordon ve halat kesiti

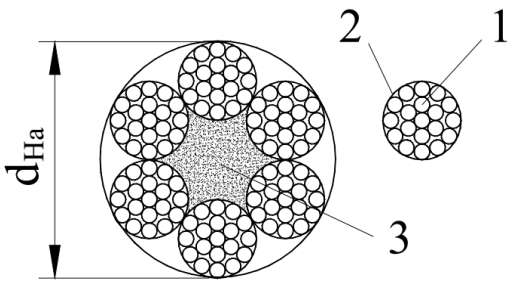
Vinçlerde en fazla kullanılan çelik halat tipi **standart çelik halat** şekil 2.5 de görülmektedir.

1.Halatteli

2. Halat demeti,

3. Halat özü

Halat çapı yaklaşık "d_{Ha} " mm olarak kabul edilir. Halatta her biri 19 halat telinden oluşan 6 adet halat damarı vardır. Halat özü genelde kendir lifidir.



Şekil 2.5 Standart çelik halat kesiti

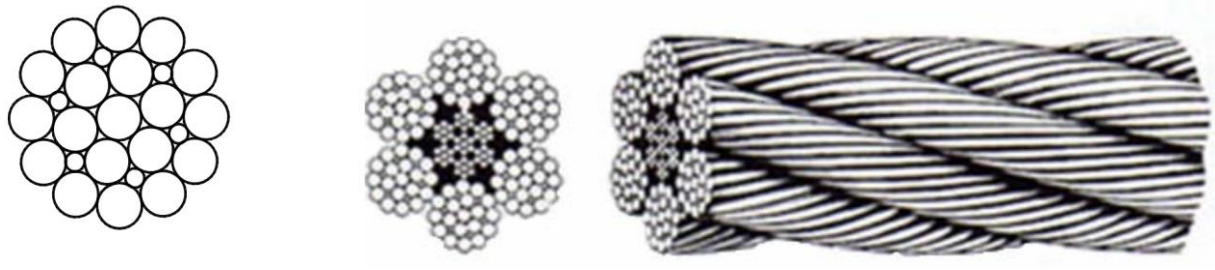
2.1.2 Tek Operasyonlu Halatlar

Halatın demetini teşkil eden teller aynı yönde ve aynı açıyla tek bir operasyonla örülüdür.

Demetin şekillerine göre Filler, Seale, Warrington, Warrigton-Seale diye adlandırılırlar.

2.1.2.1 Filler Demetli Halatlar

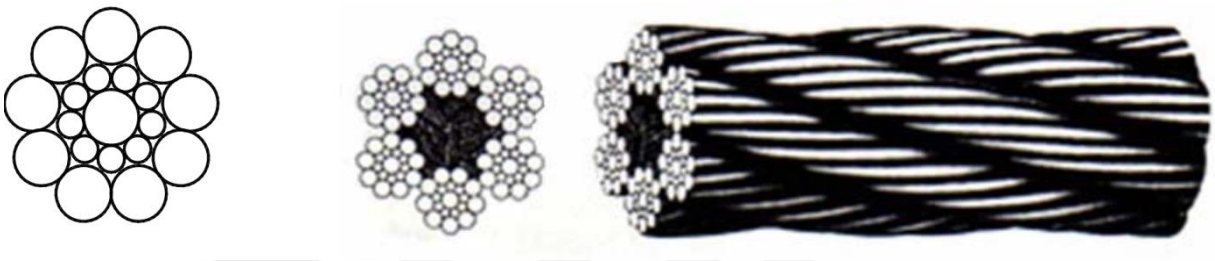
Demeti teşkil eden dış kat tellerinin alt katında, dış kat tellerinin yarısı adedinde ve bu tellere yataklık yapan dolgu telli konstrüksiyonlardır.



Şekil 2.6 Filler demetli halat

2.1.2.2 Seale Demetli Halatlar

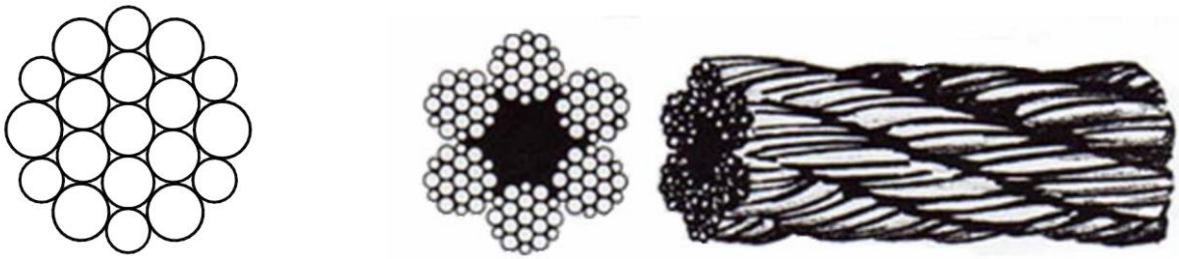
Damar teşkil eden en dış tellerin sayısı, bir alt kat tel sayısına eşit olan konstrüksiyondur.



Şekil 2.7 Seale demetli halat

2.1.2.3 Warrington Demetli Halatlar

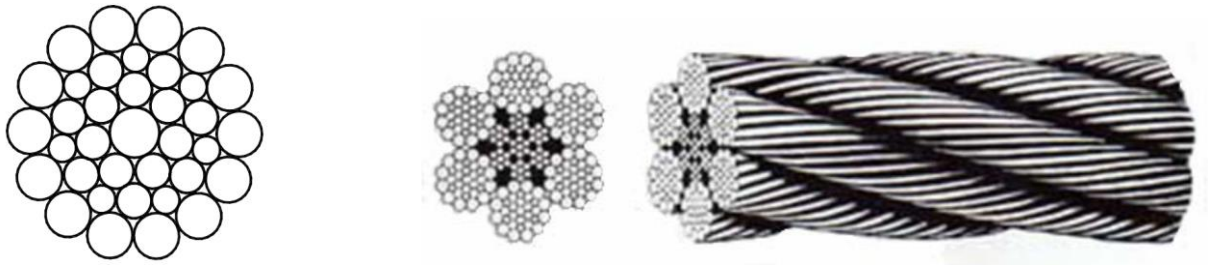
Damarı teşkil eden dış kat telleri birbirine eşit sayıda iki farklı çaptaki tellerden örülmüş konstrüksiyonlardır.



Şekil 2.8 Warrington demetli halat

2.1.2.4 Warrington-Seale Demetli Halatlar

Demeti teşkil eden dış kat telleri Seale, alt kat telleri ise Warrington dizilişli konstrüksiyonlardır.



Şekil 2.8 Warrington-Seale demetli halat

2.2 Tel Halatların Gösterimi

Tel halatlar TS 1918 normunda standartlaştırılmış hâldedir. Buna göre bir tel halatın gösterimi:

Halat 20 TS 1918/10 - LÖ ÇT 1570 s/Z

20 : Halat anma çapı [mm]

TS 1918/10 : Halatın kordon tipine göre bulunduğu norm ve föy numarası (örnek olarak standart halat föy numarası 10)

LÖ : Halatın öz malzemesini belirtir (Örnek: Lif Özlü)

ÇT : Halatı meydana getiren tellerin özelliğini gösterir (Örnek: Çıplak Tel)

1570 : Halatın kopma mukavemetini belirtir (Örnek: 1570 N/mm2)

s/Z : Halatın sarılış şeklini gösterir (Örnek: çapraz sağ sarımlı halat)

2.3 Halat Ömrüne Tesir Eden Etkenler

Halatların ömrüne tesir eden etkenler sekiz ana başlık altında toplanabilir:

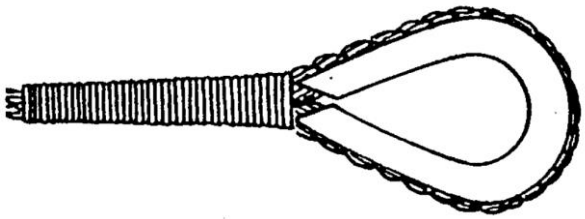
- İşletme şartları
- Halat eğilmesi
- Tel kopma mukavemeti: 1300 N/mm^{2}den 1600 N/mm^2 ye çıkarıldığında bir miktar artım görülür.
- Yiv şekli ve malzemesi: Telin yüzey basıncını etkileyeceğinden ömre etkisi olur.
- Halat yapı tipi ve imalat şekli
- Halatların yağlanması: TS 8153 normuna uygun yapılmalıdır.
- Korozyon: Etkisi ancak galvanizleme (çinko ile kaplama) ile azaltılır.
- Tel kalınlığı arttıkça halatın ömrü artar.

2.4 Halat Ucu Tespiti

Halatlar kullanılırken uçları serbest hâlde bırakılmaz ve taşıyıcı kısma tespit edilmesi gerekir. Bunun için uygulanan beş temel yöntem vardır. Bunlar ekleme yöntemi, tespit cıvataları ile birleştirme, talurit kovanı, halat kovanı ve kamalı kilit yöntemidir.

2.4.1 Ekleme Yöntemi

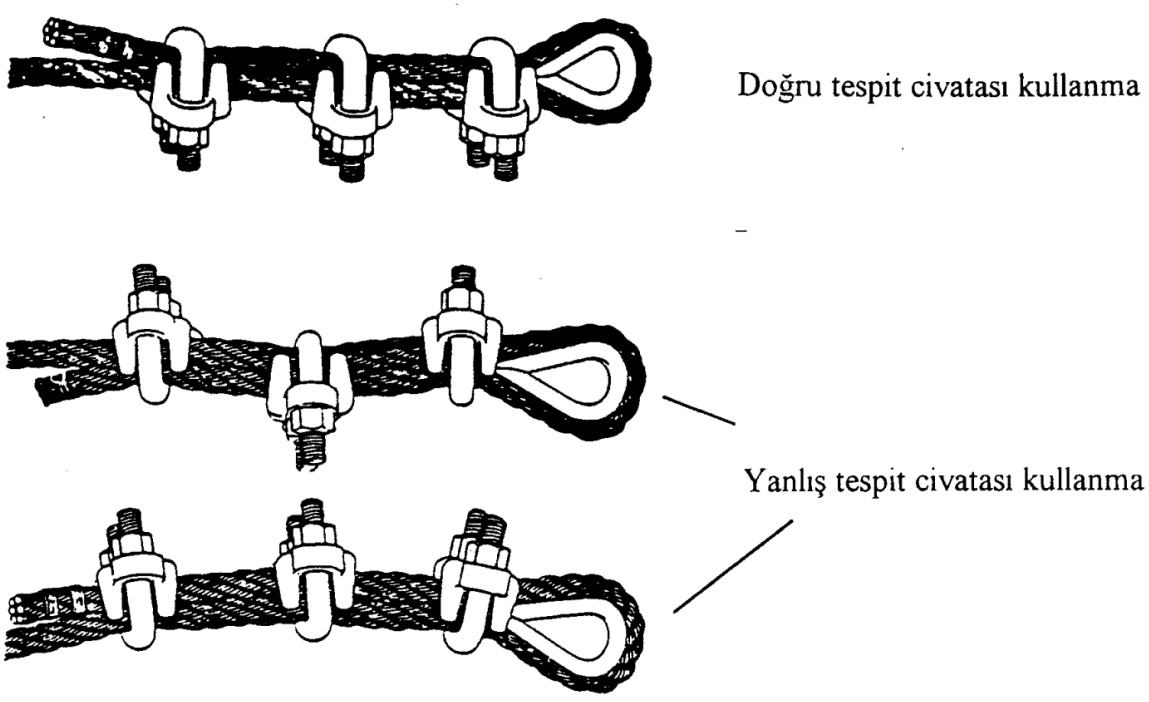
Eklenen kısmın uzunluğu halat çapının en az 20 – 25 katı olmalıdır. Detaylı bilgi DIN 83318 normunda verilmiştir.



Şekil 2.9 Ekleme yöntemi kullanımı

2.4.2 Tespit Cıvataları Kullanma

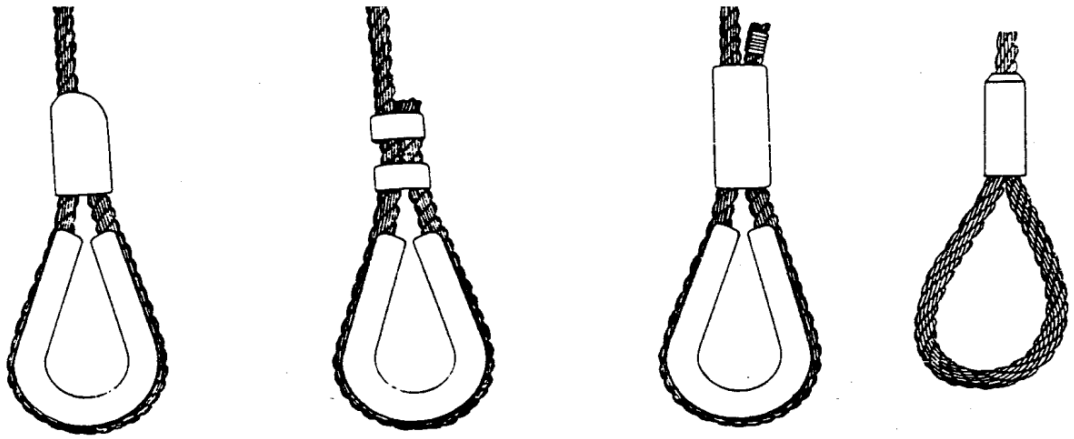
Bu yöntemde tespit cıvataları TS 6207 normunda gösterildiği tarzda kullanılarak halat ucu bağlanır. Bu yöntemin doğru ve yanlış uygulamaları Şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Tespit cıvatası kullanımı

2.4.3 Talurit Kovanı

Halat ucunun kopmaya karşı korunmasında en iyi yöntemdir. Özel preslerde basılarak serbest uç taşıyan kısma tespit edilir. Şekilde talurit kovanı uygulamalarına örnekler verilmiştir.

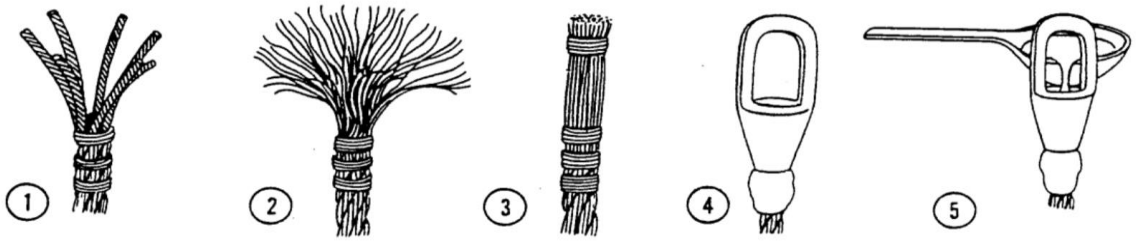


Şekil 2.11 Taurit kovanı kullanımı

2.4.4 Halat Kovanı

Bu yöntemde halat ucu kovan içine geçirildikten sonra tel uçları kanca şeklinde eğilir. Arada kalan boşluğa beyaz metal veya çinko dökülür. Bu tespit şekli ile ilgili detaylı bilgi

DIN 83315 normunda verilmiştir. Şekil 2.12'de halat kovanı yapım aşamaları görülmektedir.



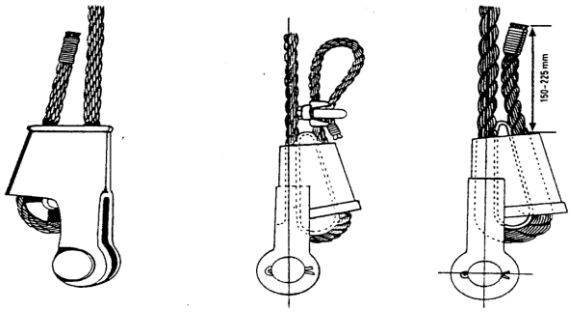
Şekil 2.12 Halat kovanı yapım aşamaları

2.4.5 Kamalı Kilit

Tutma görevini bir kama cebi içine yerleştirilen kama tarafından yapılmaktadır. Kolayca çözülebilir olması olumlu bir özelliğidir. Ancak ilave gerilmeler

oluşturduğundan

halatın taşıma kapasitesi azalır. Şekilde kamalı kilidin uygulanmasına ait şekiller verilmiştir.



Şekil 2.13 Kamalı kilit yöntemi kullanımı

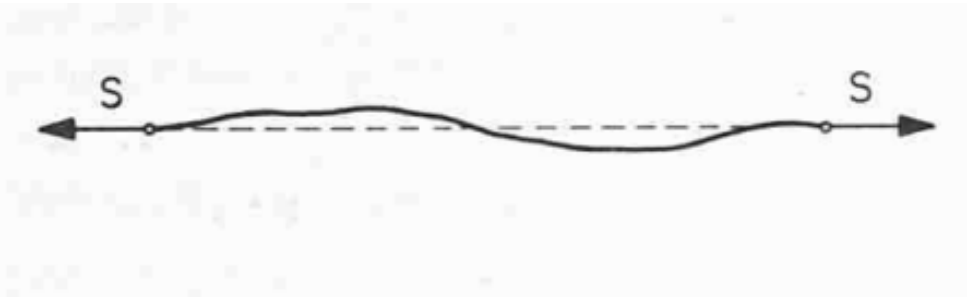
BÖLÜM 3

TEORİK MODELLEME

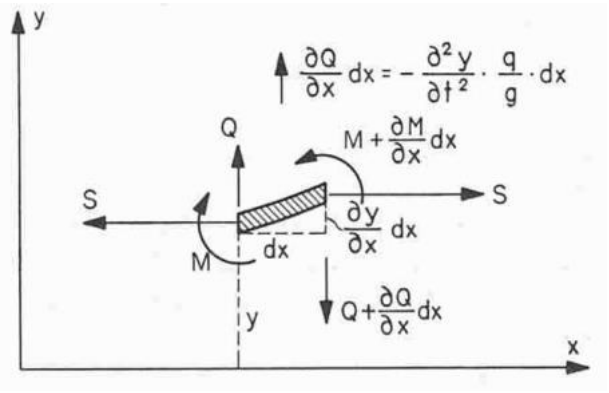
3.1 Halat Üzerinde Oluşan Enine Titreşimler

Halat boyunca oluşan kısa süreli yerel sapma hareketlerine dalga denir. Enine titreşimler de durgun dalgalar olarak anlaşılabilir. Dalga ilerleme hızı enine titreşimlerin frekansını hesaplamak için kullanılabilir. Öncelikle halat üzerinde oluşan bir dalga için hız ifadesinin çıkarılışı gösterilecektir. Daha sonra bu ifade kullanılarak öngerilmeli bir halatın doğal frekanslarını gösteren denklem elde edilecektir.

Denge konumunda küçük sapmaları olan S kuvveti ile gerilmiş bir tel halatın sonsuz küçük bir parçası üzerinde d'Alembert prensibine göre denge denklemleri çıkarılabilir. Halat parçasına etkiyen kuvvet ve momentler şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Uç noktalardan gerilme uygulanan halat modeli



Şekil 3.2 Halat üzerinde oluşan kuvvetler ve momentler

Burada Q, M ve $\frac{q}{g}$ ifadeleri sırasıyla halat parçası üzerindeki kesme kuvveti, eğilme momenti ve birim uzunluğun kütlesini göstermektedir. Eğilme momenti ve halat eğilme katılığı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$M = IE\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \tag{3.1}$$

Kesme kuvvetindeki büyüme sadece d'Alembert kütle kuvvetinden kaynaklanır.

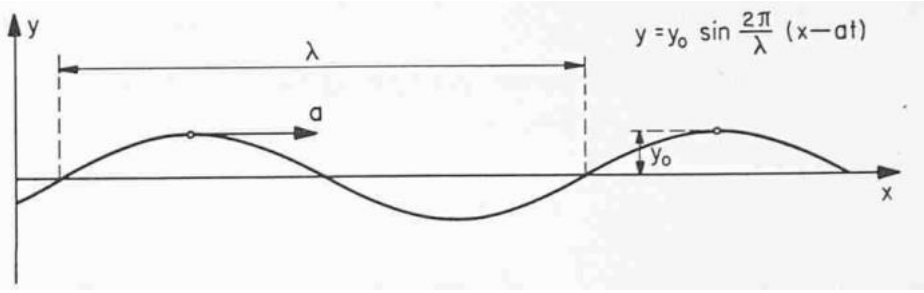
$$\frac{\partial Q}{\partial x}dx = \frac{-\partial^2 y}{\partial t^2}\frac{q}{g}dx \tag{3.2}$$

Birim halat elemanı için moment denge denklemine şekil 3.2' den faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial M}{\partial x} - Qdx - S\frac{\partial y}{\partial x}dx = 0 \tag{3.3}$$

Denklem (3.3)'deki kesme kuvveti ve eğilme momenti ifadeleri yerine denklem (3.1) ve denklem (3.2)'deki ifadeler yazılırsa tel halat hareketinin diferansiyel denklemi bulunur.

$$\frac{q}{g}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + IE\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - S\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \tag{3.4}$$



Şekil 3.3 Halat üzerinde oluşan dalganın anlık gösterimi

Tel halat üzerinde hareket eden bir dalganın anlık durumu şekil 3.3'te gösterilmiştir. Burada a dalga hızını, y_0 dalga yüksekliğini ve λ dalga boyunu göstermektedir.

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - at) \tag{3.5}$$

Halat hareketini gösteren diferansiyel denklem (3.4)'de y ifadesi yerine denklem (3.5) yazıldığında halat üzerinde oluşan tarafından enine bir dalganın hızı şu şekilde formüle edilebilir:

$$a = \sqrt{\frac{g.S}{q}[1 + \frac{E.I}{S}(\frac{2\pi}{\lambda})^2]} \tag{3.6}$$

a: Dalga hızı [m/s]

S: Halattaki gerilme kuvveti [N]

g: Yer çekimi ivmesi [m/s^2]

I: Eylemsizlik momenti [m^4]

λ: Dalga boyu [m]

q: Halatın birim uzunluğunun ağırlığı [N/m]

Zweifel'e göre halat üzerindeki gerilme kuvveti ölçülürken kurşun çekiç kullanılırsa halat üzerinde farklı dalga boylarında dalgalar oluşmaya başlayacaktır. Zweifel tarafından elde edilen denklem 6'da da görüleceği gibi halat ilerleme hızı halat dalga boyu azaldıkça artmaktadır. Farklı dalga boylarına sahip dalgalar topluluğu zaman ilerledikçe homojen olmayan dalgaların ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu yüzden kurşun çekiçle tahrik ederek halat gerilme kuvvetini tayin etmek uygun değildir. Zweifel mümkün olduğunca büyük ve homojen dalga boyuna sahip dalgalar üretecek darbelerle halatın tahrik edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Halat dalga boyu büyük ve

homojen olduğunda eğilme katılığının etkisi çok küçüktür ve ihmal edilebilir.[9] Hız formülü bu basitleştirmeyle şu şekilde yazılabilir:

$$a = \sqrt{\frac{g.S}{q}} \tag{3.7}$$

Halatın birim uzunluğunun kütlesi $m_r = \frac{q}{g}$ olarak yazılırsa hız formülü;

$$a = \sqrt{\frac{S}{m_r}} \tag{3.8}$$

3.2 Doğal Frekans Formülünün Elde Edilmesi

Halatta oluşan dalganın hızı ölçülen zaman aralığında (t) halat uzunluğu (L) ve döngü sayısı (n) kullanılarak şu şekilde de bulunabilir:

$$a = \frac{2.n.L}{t} \tag{3.9}$$

Enine dalganın ilerleme zamanı bir dalga için denklem (3.9) kullanılarak yazılırsa;

$t = \frac{2.L}{a}$ (n=1) ve $a = \sqrt{\frac{S}{m_r}}$ olduğu için bir dalga için ilerleme zamanı elde edilir:

$$t = 2.L\sqrt{\frac{m_r}{S}} \tag{3.10}$$

Durgun bir dalganın periyodu

$$T = \frac{t}{i} \tag{3.11}$$

Burada i halat uzunluğu boyunca oluşan dalga karnı (antinode) sayısıdır. Bu ifade ilerleme zamanı formülünde yerine konulursa dalganın periyodu aşağıdaki şekilde bulunur:

$$T = \frac{2.L}{i}\sqrt{\frac{m_r}{S}} \tag{3.12}$$

Dalganın frekansı periyot ifadesinden elde edilebilir:

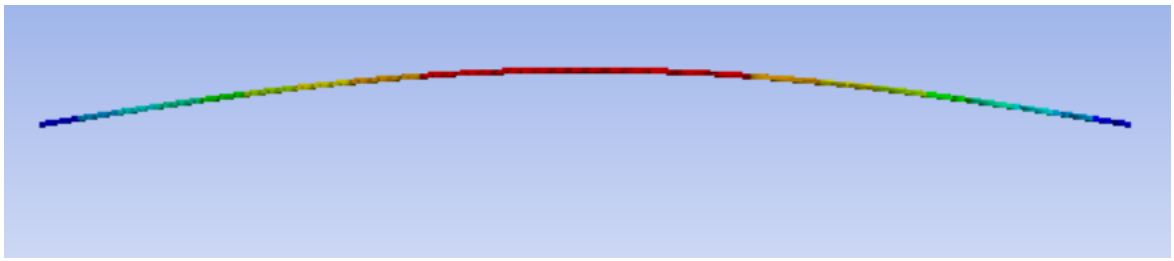
$$(f = \frac{1}{T}) \qquad f = \frac{i}{2.L}\sqrt{\frac{S}{m_r}} \tag{3.13}$$

f: Halatta oluşan titreşimin frekansı [Hz]

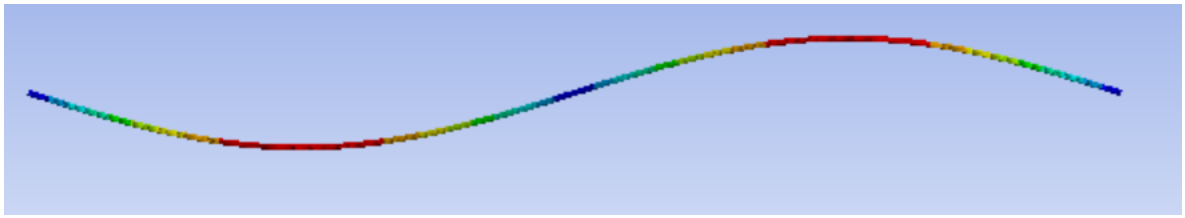
L: Halatın uzunluğu [m]

S: Gerilme kuvveti [N]

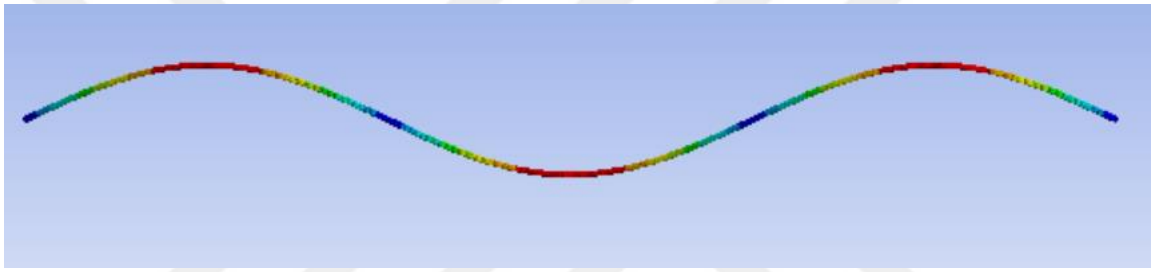
m_r: Halatın birim uzunluğunun kütlesi [kg/m]



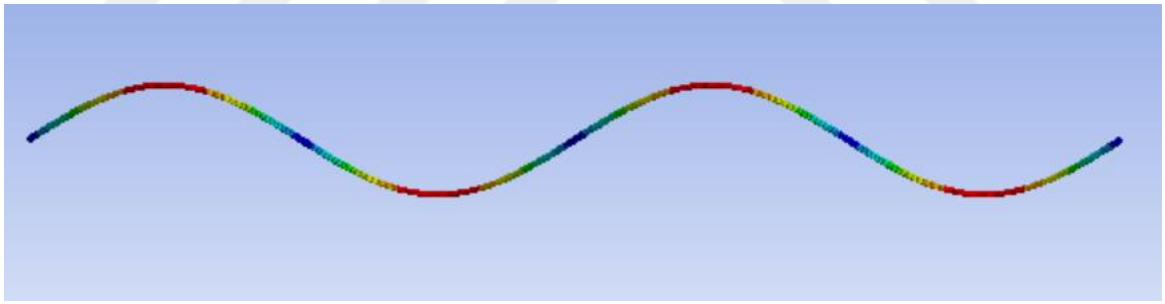
1.Mod şekli



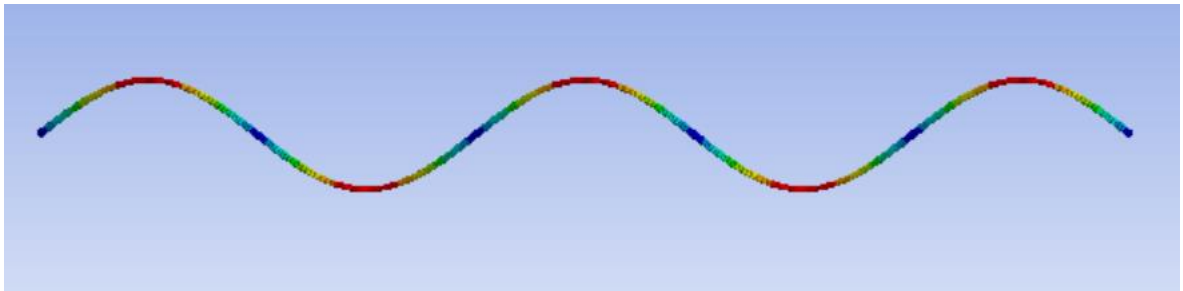
2.Mod şekli



3.Mod şekli



4.Mod şekli



5.Mod şekli

Şekil 3.4 Halat üzerinde oluşan ilk 5 mod şekli

BÖLÜM 4

MODAL ANALİZ

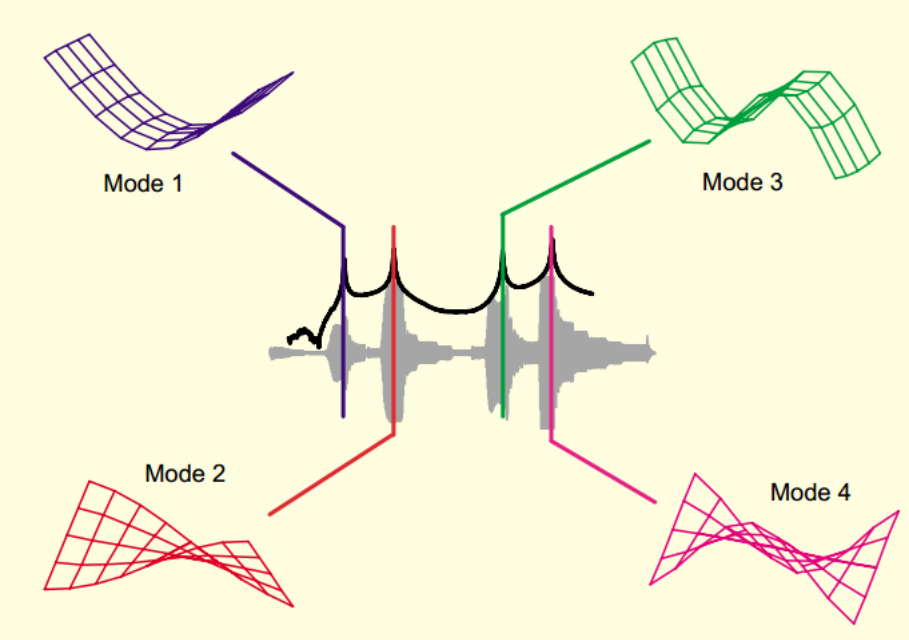
4.1 Teorik Modal Analiz

Modal analiz, bir sistemin doğal frekanslar, sönümleme faktörleri ve mod şekilleri biçimindeki doğal dinamik özelliklerini belirleme ve bunları dinamik davranış için matematiksel bir model oluşturmak için kullanma sürecidir. Formüle edilen matematiksel model, sistemin modal modeli olarak adlandırılır ve karakteristikler için olan bilgiler modal veri olarak bilinir.

Bir yapının dinamik özellikleri frekans ve konuma göre fiziksel olarak açıklanabilir. Bu açıkça, kirişler ve teller gibi sürekli sistemlerin kısmi türevli denklemlerinin analitik çözümü ile kanıtlanabilmektedir. Modal analiz, doğrusal bir zamanla değişmeyen dinamik sistemin titreşim tepkisinin, doğal titreşim modları adı verilen basit harmonik hareketlerin doğrusal bileşimi olarak ifade edilebilmesine dayanmaktadır. Bu kavram, karmaşık bir dalga formunu temsil etmek için sinüs ve kosinüs dalgalarının bir Fourier kombinasyonunun kullanımı ile benzerlik gösterir. Titreşimin doğal modları dinamik bir sistemin özünde bulunur ve tamamen fiziksel özellikleri (kütle, katılık, sönümleme) ve bunların mekansal dağılımları ile belirlenir. Her mod, modal parametreleri açısından tanımlanır: Doğal frekans, modal sönüm faktörü ve karakteristik yer değiştirme tipi, yani mod şekli. Mod şekli gerçek veya karmaşık olabilir. Her biri doğal bir frekansa karşılık gelir. Her bir doğal modun genel titreşime katılım derecesi, hem uyaran kaynakların ın özelliklerine, hem de sistemin mod şekillerine göre belirlenir.

Modal analiz hem teorik hem de deneysel teknikleri kapsar. Teorik modal analiz dinamik fiziksel bir sistemin modelinin katılık, sönümleme ve kütle özelliklerini kapsar. Bu özellikler kısmi diferansiyel denklem formlarında verilebilir. Örnek olarak, kütle dağılımı ve esneklik özelliklerinden yola çıkılarak oluşturulmuş tek biçimli bir titreşim

sicim dalga denklemidir. Denklemin çözümü sicime ait doğal frekansları, mod şekillerini ve zorlanmış titreşim cevabını sağlar. Bununla birlikte, daha gerçekçi bir fiziksel model genellikle uzaysal dağılımları, yani kütle, sertlik ve sönümleme matrisleri açısından kütle, sertlik ve sönümleme özelliklerini kapsar. Bu matrisler, hareketin normal diferansiyel denklem takımına dahil edilir. Doğrusal dinamik sistemin üstüste binme ilkesi, bu denklemleri tipik bir özdeğer problemine dönüştürmemizi sağlar. Özdeğer probleminin çözümü sistemin modal verisini sağlar. Modern sonlu elemanlar analizi neredeyse tüm lineer dinamik yapının ayrıklaştırılmasını kolaylaştırır, teorik modal analizin kapasitesini ve kapsamını büyük ölçüde geliştirmiştir. Öte yandan, veri toplama ve işleme yeteneklerinin son yirmi yıldaki hızlı gelişimi, modal test olarak bilinen analiz alanındaki deneysel alanda büyük gelişmeler sağlamıştır.



Şekil 4.1 Mod Şekilleri

Dinamik Analiz

Sistemin doğal frekanslarının ve mod şekillerinin çıkarılması için hareket denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Hareket denklemleri çıkarılırken Lagrange denklemleri kullanılabilir:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L_e}{\partial \dot{q}_i}\right)-\left(\frac{\partial L_e}{\partial q_i}\right)=0 \tag{4.1}$$

Burada L ifadesine Lagranjian denir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$L_e = T_e - V_e \tag{4.2}$$

T_e : Sistemin genelleştirilmiş koordinatlarda yazılan toplam kinetik enerjisidir.

V_e: Sistemin genelleştirilmiş koordinatlarda yazılan toplam potansiyel enerjisidir.

Serbestlik derecesi sayısı n olan bir sistem için Lagrange denklemleri, (1) ve (2) denklemleri kullanılarak şu şekilde elde edilir:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_e}{\partial \dot{x}_i}\right) - \frac{\partial T_e}{\partial x_i} + \frac{\partial V_e}{\partial x_i} = 0 \qquad \text{i=1,2,3……n} \tag{4.3}$$

x_i i. genelleştirilmiş koordinatı, $\dot{x}_i$ ise genelleştirilmiş koordinatlarda hızı göstermektedir. Çok serbestlik dereceli bir sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi matris formunda sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$T_e = \frac{1}{2}\{\dot{x}\}^T [M_e]\{\dot{x}\} \tag{4.4}$$

$$V_e = \frac{1}{2}\{x\}^T [k]\{x\} \tag{4.5}$$

$\{x\}$: Genelleştirilmiş koordinatlar vektörü

$[M_e]$: Kütle matrisi

$[k]$: Direngenlik matrisi

Lagrange denklemlerine göre hareket denklemlerinin elde edilebilmesi için kinetik ve potansiyel enerji ifadelerinin türevleri alınmalıdır.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \dot{x}_i} = [M_e]\{\dot{x}\} \tag{4.6}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T_e}{\partial \dot{x}_i}\right) = [M_e]\{\ddot{x}\} \tag{4.7}$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial x_i} = 0 \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial V_e}{\partial x_i} = [k]\{x\} \tag{4.9}$$

Elde edilen bu eşitlikler (3) denkleminde yazılırsa n serbestlik dereceli, sönümsüz bir sistemin serbest haldeki hareket denklemi elde edilir.

$$[M_e]\{\ddot{x}\}+[k]\{x\}=0 \tag{4.10}$$

Sistemin harmonik hareket yaptığı kabul edilerek $\{x\}$ vektörü yerine $\{x\}=\{\psi\}\sin wt$ eşitliği yazılırsa $\{\ddot{x}\}$ ifadesi $\{\ddot{x}\}=-\{\psi\}w^2\sin wt$ olarak elde edilir. $\{x\}$ ve $\{\ddot{x}\}$ ifadeleri (10) denkleminde yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$-[M_e]\{\psi\}w^2\sin wt+[K]\{\psi\}\sin wt=0 \tag{4.11}$$

Bu denklem düzenlenirse;

$$\{\psi\}\sin wt([K]-[M]w^2)=0 \tag{4.12}$$

(12) denkleminin sağlanması için $\{\psi\}\neq 0$ ve

$$\det\left([K]-[M_e]w^2\right)=0 \text{ olmalıdır.} \tag{4.13}$$

Bu denklem incelenen sisteme ait özdeğer denklemidir. Burada $w^2=\lambda$ olarak yazılırsa eşitlik şu hale gelir:

$$\{\psi\}\det\left([K]-[M_e]\lambda\right)=0 \tag{4.14}$$

(14) denklemi çözülürse λ değerleri sistemin özdeğerlerini, $\{\psi\}$ değerleri ise sistemin özvektörlerini verir. Sistemin doğal frekansları özdeğerlerinden elde edilir.

$$w_i=\sqrt{\lambda_i} \tag{4.15}$$

Sistemin serbestlik derecesi sayısı kadar özdeğer, özvektörü ve doğal frekansı vardır. Burada w_i sistemin i. doğal frekansıdır. Doğrusal elastik bir yapı serbest titreşimlerinde alacağı şekil onun normal modlarının lineer kombinasyonudur. Denklem (16)'daki gibi ifade edilir.

$$\{u\}=\sum_i\{\psi_i\}\zeta_i \tag{4.16}$$

Burada $\{u\}$ fiziksel yer değiştirme vektörünü, $\{\psi_i\}$ i. mod şeklini, ζ_i i. modal yer değiştirmeyi ifade eder.

4.2 Deneysel Modal Analiz

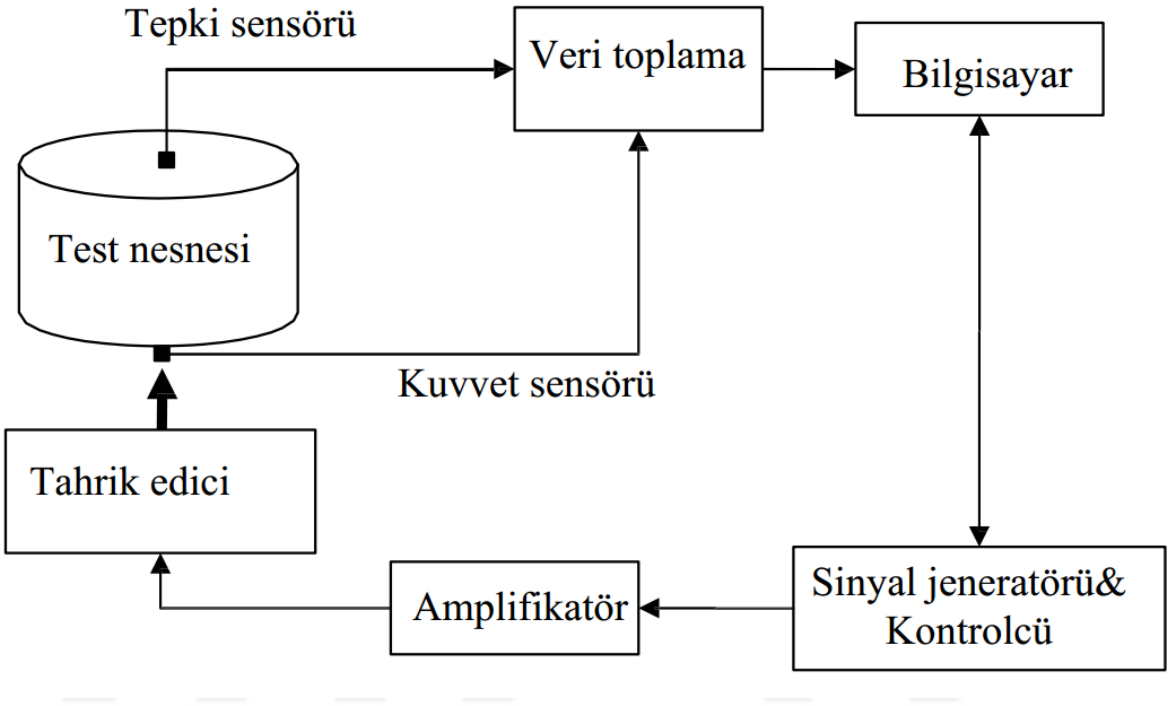
Modal test, doğrusal zamanla değişmeyen titreşim sistemi bir mod şekillerinin türetilmesi için kullanılan deneysel bir tekniktir. Tekniğin teorik temeli, bir konumdaki titreşim tepkisi ile uyarı frekansının bir fonksiyonu olarak aynı ya da başka bir konumdaki uyarım arasındaki ilişkinin oluşturulmasına daynır. Sıklıkla karmaşık bir matematiksel fonksiyon olan bu ilişki, kısaca frekans tepki fonksiyonu veya kısaca FRF olarak bilinir. Farklı lokasyonlarda uyarı ve tepki kombinasyonları, frekans tepki fonksiyonlarının (FRF) tam bir setine yol açar; topluca sistemin bir FRF matrisi ile temsil edilir. Bu matris genellikle simetriktir ve sistemin yapısal olarak karşılıklı ilişkisini yansıtır.

Modal test uygulaması, bir yapının FRF'lerini veya impuls yanıtlarını ölçmeyi gerektirir. FRF ölçümü, diğer uyaranların olmaması durumunda yapının bir lokasyonunda ölçülen bir uyarımı iddia ederek ve bir veya daha fazla lokasyonda titreşim tepkilerini ölçerek yapılabilir. Modern uyarılma tekniği ve modal analiz teorisinin son gelişmeleri daha karmaşık uyarıcı mekanizmalara izin verir. Uyarma seçilmiş bir frekans bandında, kademeli sinüzoidal, geçici, rassal veya beyaz gürültü olabilir. Yanıt genellikle ivmeölçer veya diğer sondalar ile ölçülürken, sürüş noktasında bir kuvvet dönüştürücü ile ölçülür. Hem uyarma hem de yanıt sinyalleri, FRF verilerini hesaplamak için bir araç olan bir analizöre beslenir.

Test edilen nesnenin modal modelini yeterli derecede oluşturmak için ne kadar FRF verilerinin bilinmesi gereklidir. Basit bir çekiç testi yapılırken, kuvvet uyarma noktalarını dönüşümlü olarak hareket ettirirken sabit bir yanıt konumu kullanılır. Ölçülen FRF verileri, FRF matrisinin bir satırını oluşturur. Bu veriler, modal modelin türetilmesi için teorik olarak yeterli olacaktır. Basit bir sarsıcı testi için, karşılık gelen yanıt toplama noktalarını veya eşzamanlı olarak puanlardan gelen yanıtları alırken sabit bir kuvvet giriş yeri kullanılır. Ölçülen FRF verileri, FRF matrisinin bir kolonunu oluşturur. Yeterli veri ile sayısal analiz modal parametreleri eğri uydurma yöntemleri ile türetir. Türetilen parametreler, test yapısı için modal modeli oluşturacaktır. Parametreler, tek tek FRF eğrilerinden veya bir dizi FRF eğrilerinden çıkartılabilir.

Özet olarak, deneysel modal analiz üç kurucu aşamayı kapsar: Teste hazırlık, frekans tepki ölçümleri ve modal parametre tanımlama. Test hazırlığı, bir yapının desteklerinin

seçimi, uyarma kuvveti tipini, uyarılma yerlerini, kuvvetleri ve tepkileri ölçmek için donanım seçilmesini içerir. Test esnasında, bir dizi FRF verisi ölçülür ve depolanır ve daha sonra test edilen yapının modal parametrelerini tanımlamak için analiz edilir.



Şekil 4.2 Modal test sistemi

4.3 Modal Analiz Uygulama Alanları

Modal analiz başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Dinamik bir yapının problem oluşturabilecek zayıf kısımları belirlenir.
- Sonlu elemanlar analizi ile yapılan modal analizin doğruluğunu teyit etmek için deneysel modal analiz yapılır.
- Yapının kütle, katılık ve sönüm değerlerini yeniden düzenleyerek sistemin optimize edilmesi sağlanır.
- Sistemin fiziksel parametrelerinin değişimine olan hassasiyeti belirlenir.
- Belirli bir uyarılma kuvvetinde sistem titreşim cevabının tahmin edilmesinde kullanılır.
- Sistemin uyarılmasına neden olan kuvvet uygulamada her zaman ölçülebilecek seviyede olmayabilir. Ancak bu kuvvetler titreşim cevabının ölçülmesiyle ve

modal modelin kullanılmasıyla ayırt edilebilir. Bu kuvvetler bazı uygulamalarda kritik öneme sahip olabilir. Örneğin, bir buhar türbininde gevşemiş bir yatak, aşırı titreşimi tetikleyen bir uyarma kuvvetini üretebilir.

- Yapının hasar görmüş fakat gözle görülmeyen kısımlarının tespit edilmesinde kullanılır. Günümüzde özellikle havacılık endüstrisinde ve köprüler gibi inşaat yapılarında kullanılır.



Şekil 4.3 Modal analizi yapılan bir sistemden ölçümlerin alınması

BÖLÜM 5

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Basit çubuklar, kirişler vs. gibi mekanik bileşenler, kapalı form çözümler sunan mekaniğin temel yöntemleriyle kolayca analiz edilebilirler. Öte yandan gerçek bileşenler nadiren çok basittir ve tasarımcı kapalı form çözümlerin daha az etkin olan yaklaşık tahminlerini, deneyi ve sayısal metotları kullanmak zorundadır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan bilgisayarların yararlı olduğu birçok sayısal yöntem vardır. Bilgisayar destekli tasarım yazılımlarının yoğun şekilde kullanıldığı mekanik tasarımda bilgisayar destekli tasarım yazılımıyla uyumlu analiz yöntemi sonlu elemanlar analizidir.

Gerçek bir mekanik bileşen sürekli elastik bir yapıdır. (sürekli ortam) Sonlu elemanlar analizi yapıyı küçük fakat sonlu, iyi tanımlanmış elastik alt yapılara (elemanlara) ayrıştırır. Matris işlemleriyle birlikte polinom fonksiyonları kullanılarak, her bir elemanın sürekli elastik davranışı, elemanın malzemesi ve geometrik özelliklerine göre geliştirilebilir. Yükler (yer çekimi, dinamik, ısıl vb.), eleman içinde, eleman yüzeyi üzerinde veya düğüm noktalarında uygulanabilir. Eleman düğüm noktaları, elemanın diğer elemanlarla belirlenen sınır şartlarına göre elemanın elastik özelliklerinin tamamen belirlendiği ve kuvvetlerin (temas ve kütle) en son noktada uygulandığı, elemanın esas yönetim öğeleridir. Bir düğüm serbestlik derecelerine sahiptir. Serbestlik dereceleri bir düğümde var olabilen bağımsız dönme ve öteleme hareketleridir. Bir düğüm en fazla üç öteleme ve üç dönme serbestlik derecesine sahip olabilir. Bir yapı içerisindeki her bir eleman yerel olarak matris formunda tanımlandığında tüm elemanların ortak düğümleri yardımıyla genel bir sistem matrisinde birleştirilir. Sonra

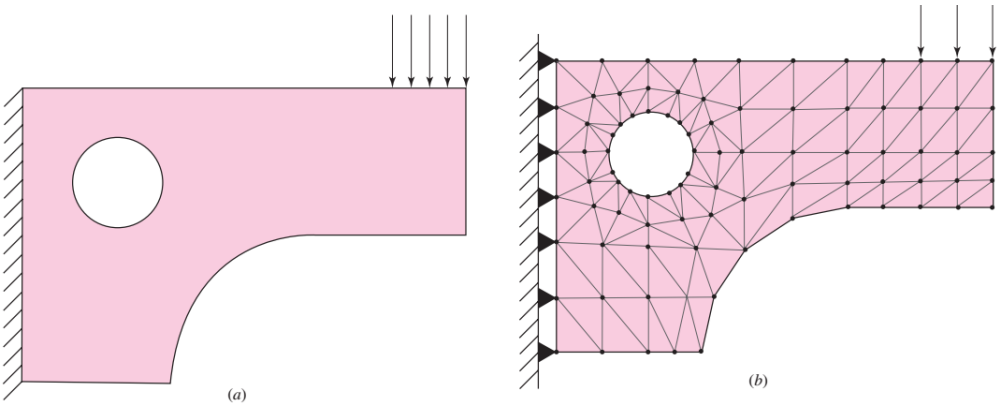
uygulamalı yükler ile sınır şartları belirlenir ve matris operasyonları kullanarak, bilinmeyen tüm yer değişim serbestlik derecelerine ulaşılır. Bu işlem bir kez yapılınca zorlanma ve gerilmeleri belirlemek için yer değişim değerlerinin, elastisitenin temel denklemeler üzerinden kullanımı kolaylaşır.

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli yapının oluştuğu bölgeyi ayrıştıran sayısal bir teknik olduğundan hatalar kaçınılmazdır. Bu hatalar:

1.Hesaplama Hataları: Bunlar bilgisayardaki ondalıklı hesaplamalardan ve sayısal integrasyon şemalarındaki formülasyonlardan kaynaklanan yuvarlatma hatalarıdır. Mesleğe yönelik sonlu eleman kodlarının çoğu bu hataları azaltmaya yoğunlaştığı için analiz yapan kişi genellikle ayrıştırma hatalarıyla ilgilenir.

2.Ayrıştırma Hataları: Gerçek bir yapının şekli ve yer değiştirme dağılımı sürekli değişir. Elemanların kendisinde bulunan matematiksel sınırlandırmalar nedeniyle geometri ve yer değiştirme dağılımının eşleştirilmesinde; yapının modelini oluşturmak için sonlu sayıda elemanların kullanılmasıyla hatalar ortaya çıkar.

Ayrıştırma hatalarına örnek olarak Şekil a ‘da gösterilen sabit kalınlıkta ince bir plaka ele alınmış olsun. Şekil b’de üç düğümlü düzlemsel gerilme tek yönlü üçgen elemanların kullanıldığı yapıya ilişkin bir sonlu eleman modeli gösterilmiştir. Bu eleman tipi iki temel problemi oluşturan bir kusura sahiptir. Eleman şekil değiştirme sonrasında da doğrusal kalan düzgün kenarlara sahiptir. Üçgen elemanın yüzeyindeki gerilme boyunca oluşan zorlanmalar sabittir. Yuvarlatılmış kenarların modellenmesinde karşılaşılan ilk problem şekilseldir. Uygun biçimde modelleneceği düşünülen delik yüzeyler gibi eğriliği büyük olan yüzeylerin modelleri de çok başarılı değildir. Çok daha büyük olan ikinci problem ise gerçek yapının farklı kısımlarındaki zorlanmanın sadece yaklaşık bir değerine ulaşmasıdır. Bu yüzden bu model tarafından tahmin edilen sonuçlar son derece yetersiz olacaktır. Sonuçlar eleman sayısını önemli ölçüde artırarak (ağ yoğunluğunu artırarak) iyileştirilebilir. Bir başka çözümde sekiz düğümlü dörtgen eleman gibi uygulamaya daha uygun daha iyi bir eleman kullanmak iyileştirilmiş sonuçlar sağlayacaktır.



Şekil 5.1 Yapının elemanlara ayrılması

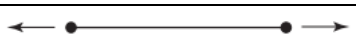
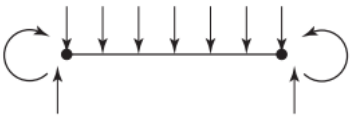
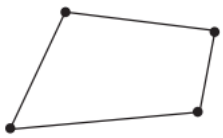
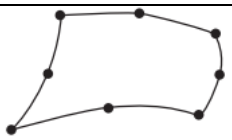
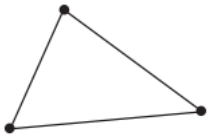
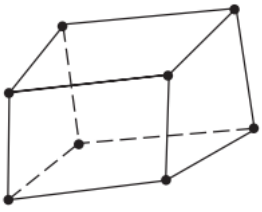
Yüksek dereceden interpolasyon fonksiyonlarından sekiz düğümlü dörtgen elemanın yuvarlatılmış uçlar modellemesi ve zorlanma dağılımı için yüksek dereceli bir fonksiyon sağlanmış olur.

Şekil b de üçgen elemanlar gösterilmiştir ve elemanların düğümleri siyah noktalarla temsil edilmiştir. Kuvvetler ve sınırlayıcılar sadece düğüm noktalarına yerleştirilebilir. Üçgen şeklindeki basit düzlemde öteleme hareketi yapan gerilme elemanlarının düğümleri sadece 2 serbestliğe sahiptir. Böylece içi dolu siyah noktalarla gösterilen sol köşedeki basit mesnetli üçgenler, modelin sabit mesnetini temsil eder. Ayrıca yayılı yük gösterildiği gibi sadece üç düğüme uygulanabilir. Modellenen yük gerçek statik yükle uyumlu olmalıdır.

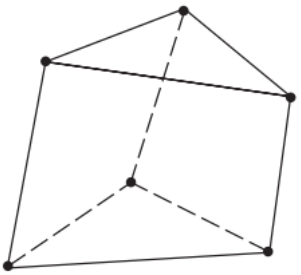
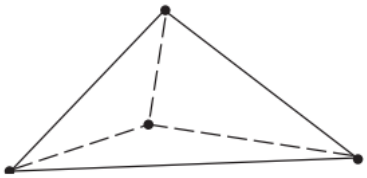
Elemanlardaki geometrik şekillerin birçoğu özel uygulamalar için sonlu elemanlar analizinde kullanılmıştır. Genel amaçlı ticari sonlu elemanlar yöntemi yazılım kodlarında kullanılan birçok eleman eleman kütüphanesi olarak bilinen kodu oluşturur. Elemanlar; çizgi elemanları, yüzey elemanları, katı elemanlar ve özel amaçlı elemanlar şeklinde sınıflandırılabilir. Tabloda yapı problemleri için sonlu elemanlar analizine uygun bazı eleman tiplerini içermektedir. Elemanların tümü serbestlik derecelerinin tamamını taşımaz. Örneğin 3 boyutlu kafes kiriş her bir düğümün sadece üç öteleme hareketinin serbestlik derecesini karşılar. Farklı serbestlik derecesine sahip bağlantı elemanları elemanları genelde elle yapılan bazı değişiklikler gerektirir. Örneğin bir kafes kiriş kare şeklinde bir elemana bağlandığında kare eleman her bir düğümdeki altı serbestlik derecesinin tamamını karşılar. Kare elemana bağlanan kafes kiriş elemanı bağlantı üzerinde serbestçe dönebilir. Tüm elemanlar tüm serbestlik derecelerini desteklemezler. Örneğin 3 boyutlu kafes elemanı her bir düğümde yalnızca üç öteleme serbestlik derecesini destekler. Farklı serbestlik dereceli elemanları birleştirme, genel

olarak elle yapılan bazı değişiklikler gerektirir. Örneğin bir kafes elemanının bir çerçeve elemana bağlanmasını göz önüne alınız. Çerçeve elemanı her bir düğümde altı serbestlik derecesinin tümünü destekler. Bir kafes elemanı bir çerçeve elemana bağlandığında bağlantıda serbestçe dönebilir.

Çizelge 5.1 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bazı eleman tipleri

Eleman Tipi	**Eleman Adı**	**Eleman Şekli**	**Düğüm Sayısı**
Çizgi	Kafes		2
Çizgi	Kiriş		2
Çizgi	Çerçeve		2
Yüzey	4 Düğümlü dörtgen		4
Yüzey	8 Düğümlü dörtgen		8
Yüzey	3 Düğümlü üçgen		3
Yüzey	6 Düğümlü üçgen		6
Katı	8 Düğümlü altıyüzlü (briket)		8

Çizelge 5.1 Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan bazı eleman tipleri(devamı)

Katı	6 Düğümlü beşyüzlü (kama)		6
Katı	4 Düğümlü dörtyüzlü (üçgen piramit)		4

5.1 Sonlu Elemanalar Modelinin Oluşturulması

Sonlu elemanlar modeli oluşturulan halat modellerinin tamamı tek helis açısına sahip monotron halat tipindedir. Halatların 500 mm uzunluğundaki modeli Catia V5 katı modelleme programında oluşturulduktan sonra step dosya formatında sonlu elemanlar analizi için Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Katı modellerin uzunluklarının deney numunelerinin uzunluklarıyla aynı olması için bazı düzenlemeler Ansys Workbench'deki Design Modeler uygulamasında yapılmıştır. Tüm modellerin ilk önce Ansys içerisindeki Static Structural bölümünde statik analizi yapılmıştır. Daha sonra burada el elde edilen veriler Modal bölümüne aktarılmıştır ve halatların ön gerilmeli doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ile ilgili ayrıntılar bu bölümde anlatılacaktır. Sonlu elemanlar analizi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1.Halat katı modelinin oluşturulması

2.Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

3.Katı yüzeyler arasındaki temas özelliklerinin seçilmesi

4.Katı modelin sonlu sayıda küçük elemana bölünmesi (Çözüm ağı oluşturulması)

5.Sistemin sınır şartlarının belirlenmesi

6.Çözüm

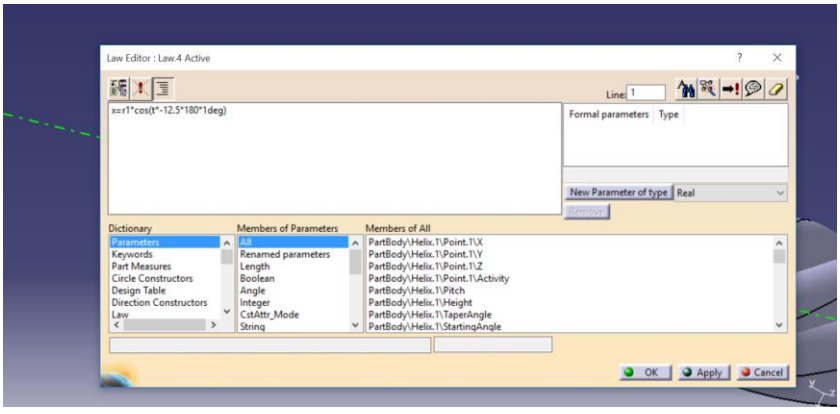
7.Sonuçların belirlenmesi

5.1.1 Halat Katı Modelinin Oluşturulması

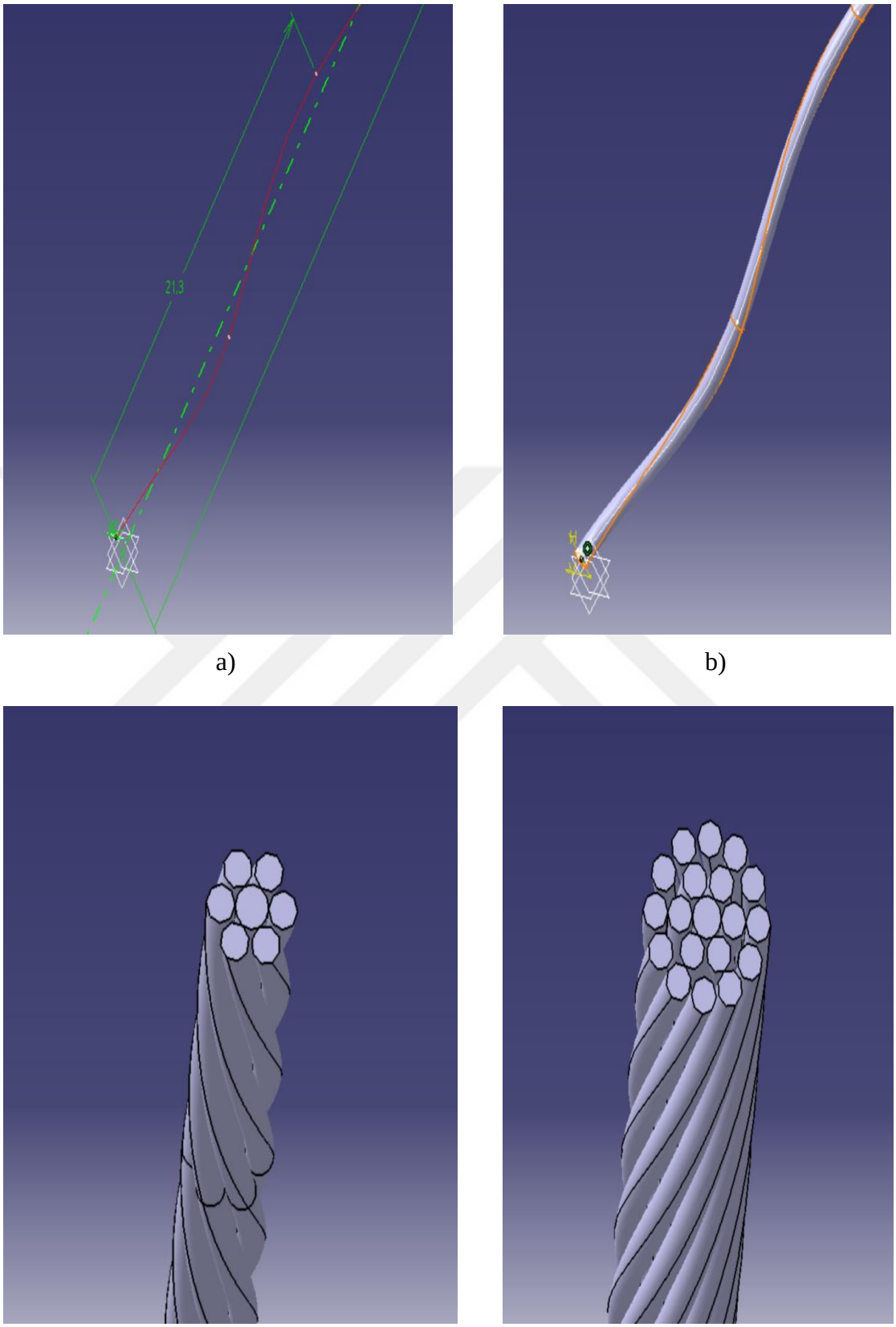
Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için gerekli olan halat katı modeli oluşturulurken Stanova vd. [ ] tarafından yapılan çalışmadan faydalanılmıştır. Katı modeli oluşturulan halat modellerinin tamamı tek helis açısına sahip monotron halat tipindedir. Halat tiplerinde kullanılan ikinci sayı halattaki toplam tel sayısını göstermektedir. Örneğin 1x7 monotron halatta 7 adet tel bulunmaktadır. Katı model oluşturmak için bilgisayar destekli tasarım programı olan Catia yazılımı kullanılmıştır.

Öncelikle halatı oluşturan her bir katmandaki birer telin merkezinden geçen helis parametrik denklemlerle ifade edilmiştir. Parametrik denklemler law editör komutu kullanılarak Catia programına aktarılmıştır ve helis eğrileri oluşturulmuştur. Bu helis eğrilerine tel çapına göre tel kesiti atanmıştır. Daha sonra bu tel kesiti rib komutu (sürükleyerek katı oluşturma) ile eğri boyunca sürüklenerek her bir katman için ayrı ayrı halat teli oluşturulmuştur. Oluşturulan teller katmandaki tel sayısına göre circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile katmanlar oluşturulmuştur. Her bir katman Catia programının montaj bölümünde birleştirilerek halat katı modeli elde edilmiştir. Katı modeli oluşturulan halat tipleri şunlardır:

- 1x7 3 mm çapında monotron halat
- 1x7 5 mm çapında monotron halat
- 1x7 8 mm çapında monotron halat
- 1x19 3 mm çapında monotron halat
- 1x19 5 mm çapında monotron halat
- 1x19 8 mm çapında monotron halat
- 1x37 5 mm çapında monotron halat



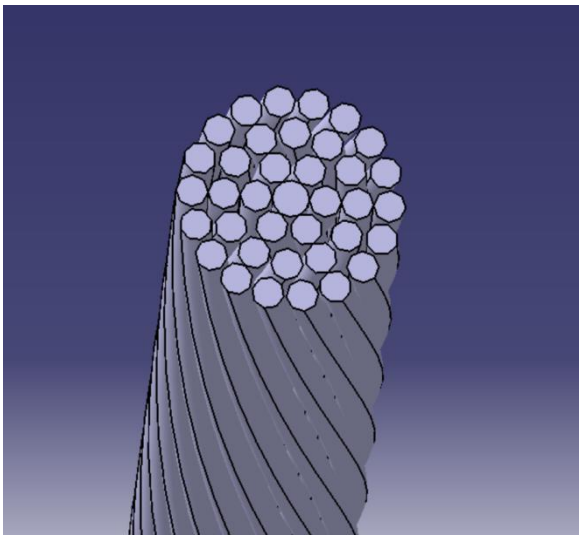
Şekil 5.2 Parametrik eğri denklemlerinin Catia programına Law Editor komutu ile girilmesi



a) b)

c) d)

Şekil 5.3 Catia yazılımında eğriden halat katı modelli oluşturulma adımları (a-e)



e)

Şekil 5.3 Catia yazılımında eğriden halat katı modelli oluşturulma adımları (a-e) (devamı)

Aşağıda monotron halat tipindeki tek helis açısına sahip bir halatın tellerinin merkezinden geçen ekseni ifade eden parametrik denklemler genel olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada analizi yapılan tüm halatların parametrik denklemleri çizelge 1'de gösterilmiştir.

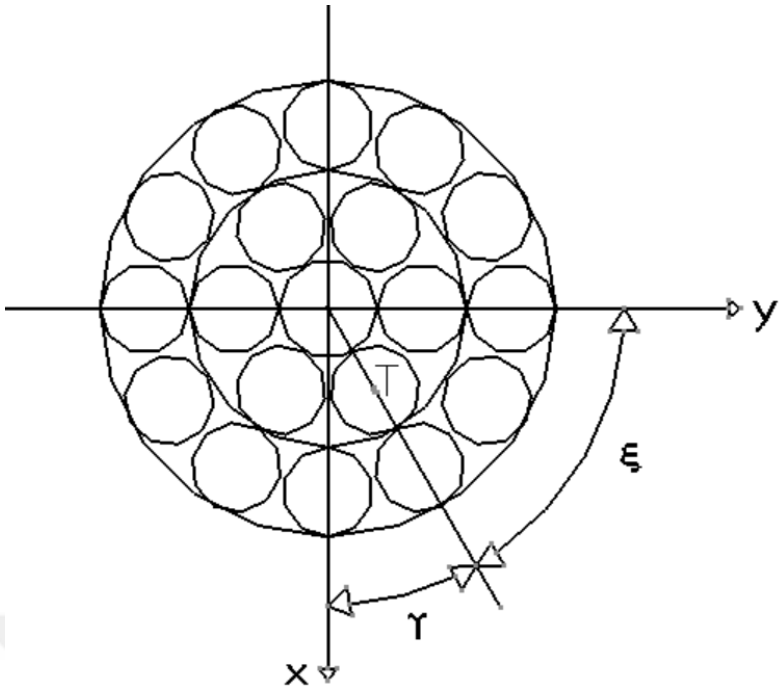
Monotron halatın herhangi bir katmanındaki bir telin merkez ekseninden geçen eğriyi gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_j.\cos(\gamma + \xi + q'.\phi) \tag{5.1}$$

$$y(\phi) = r_j.\sin(\gamma + \xi + q'.\phi) \tag{5.2}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_j}{\tan\alpha_j} \tag{5.3}$$

Burada Φ halat telinin merkez eksenini gösteren eğrideki noktaların z ekseni etrafındaki dönme açısıdır. α_j halatın herhangi bir katmanının sarım açısıdır. q halat katmanındaki tellerin sarım yönünü gösteren katsayıdır. Sağ dönüşlü halatlar için q'=1, sola dönüşlü halatlar için q'= -1'dir. ξ halatın herhangi bir katmanındaki herhangi iki telin merkez eksenleri arasındaki açıdır. γ herhangi bir katmandaki oluşturulan ilk telin merkez ekseninin x ekseni ile yaptığı açıdır. Şekil 5'de örnek bir halat için ξ ve γ açıları gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Parametrik denklemde kullanılan ξ ve γ açıları

δ_j halatın herhangi bir katmanındaki telin çapını ve r_j de halatın herhangi bir katmanının sarım yarıçapını göstermektedir. Alt indis j katman numarasını göstermektedir.
Her bir halat tipi için parametrik denklemlerdeki katsayılar farklı olduğu için her halat tipi için ayrı ayrı parametrik denklemlerin çıkarılışı gösterilmiştir.

5.1.1.1 1x7 3 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın dış katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için q =-1'dir.

Denklemlerin son hali şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-\phi) \tag{5.4}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-\phi) \tag{5.5}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.6}$$

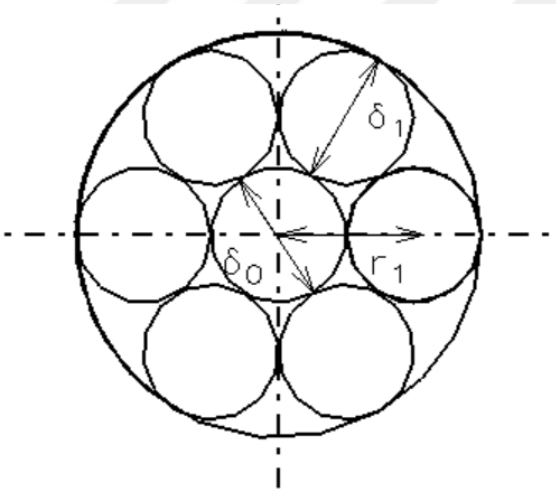
Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 0,93\,\text{mm}$

Halatın dış katmanındaki tellerin çapı = $\delta_1 = 0,93\ \text{mm}$

Halatın dış katmanı için sarım yarıçapı r_1 dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \tag{5.7}$$

$$r_1 = \frac{0,93 + 0,93}{2} = 0,93\ \text{mm}$$



Şekil 5.5 Halat kesitinde δ_1, δ_0 ve r_1 parametrelerinin gösterimi

Dış katmanın halat adımı = h_1=50 mm

Dış katmanın sarım açısı = α

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.8}$$

$$\tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

Dış katmanın sarım açısı = α

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.0,93}{50}) \qquad \alpha = 6,67°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk dış katman halat adımının 10 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,maks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 10.h_1 \qquad h_m = \frac{20.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{20.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.20.\pi$$

Halatın dış katmanı için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.20.\pi \qquad Q_{1maks} = 20.\pi \qquad Q_{1maks} = 20.180$$

1x7 5 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-20.180) \tag{5.9}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-20.180) \tag{5.10}$$

$$z(\phi) = \frac{20.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(6,67)} \tag{5.11}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*-20*180*1deg)

y=r1*sin(t*-20*180*1deg)

z=(t*20*180)*(PI/180)*r1*(cos(6,67*1deg)/sin(6,67*1deg))

5.1.1.2 1x7 5 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.

- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın dış katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için q = 1'dir.

Denklemlerin son hali şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(\phi) \tag{5.12}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(\phi) \tag{5.13}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.14}$$

Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 1,68\,\text{mm}$

Halatın dış katmanındaki tellerin çapı = $\delta_1 = 1,68$ mm

Halatın dış katmanı için sarım yarıçapı r_1 dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} = \frac{1,68+1,68}{2} = 1,68\partial \text{ mm}$$

Dış katmanın halat adımı = h_1=80 mm

Dış katmanın sarım açısı = α

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.1,68}{80}) \qquad \alpha = 7,52°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk dış katman halat adımının yaklaşık 6,25 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,maks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 6,25.h_1 \qquad h_m = \frac{12,5.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{12,5.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.12,5.\pi$$

Halatın dış katmanı için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.12,5.\pi = 12,5.\pi \qquad Q_{1maks} = 12,5.180$$

1x7 5 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(12,5.180) \tag{5.15}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(12,5.180) \tag{5.16}$$

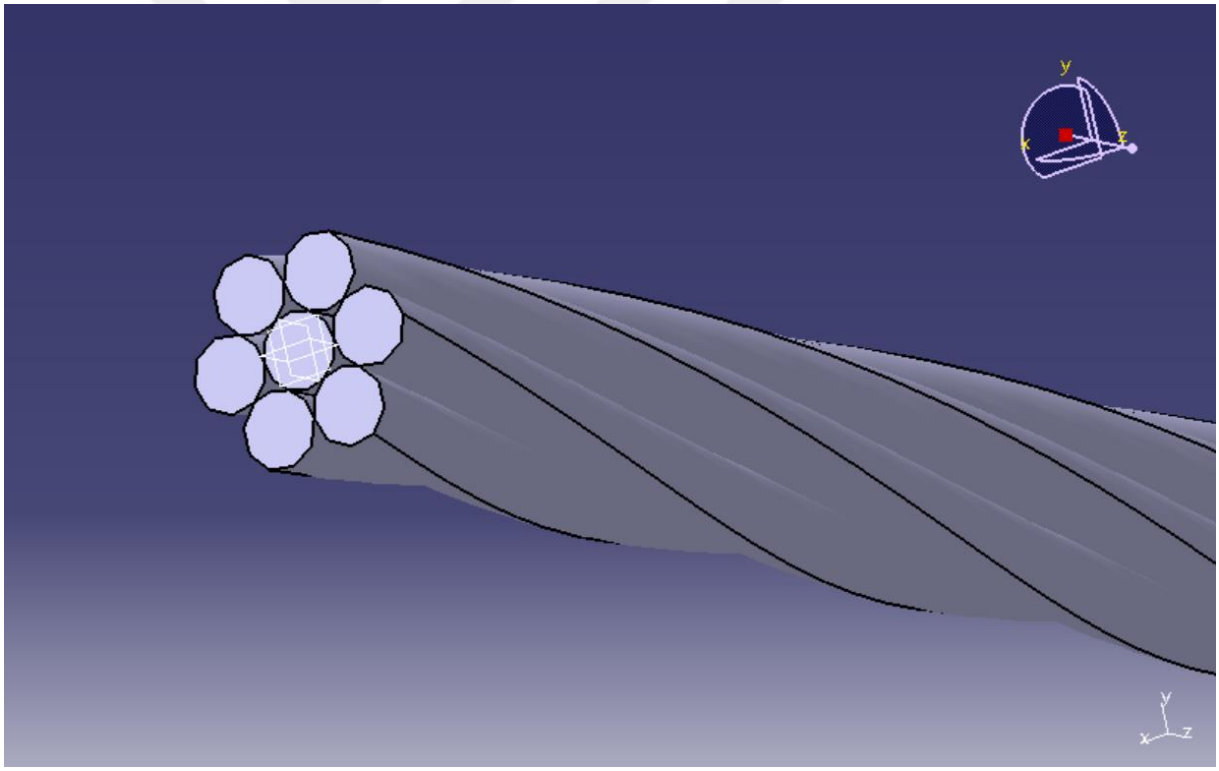
$$z(\phi) = \frac{12,5.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(7,52)} \tag{5.17}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*12.5*180*1deg)

y=r1*sin(t*12.5*180*1deg)

z=(t*12.5*180)*(PI/180)*r1*(cos(7,52*1deg)/sin(7,52*1deg))



Şekil 5.6 1x7 5 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü

5.1.1.3 1x7 8 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın dış katmanındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın dış katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için q = -1'dir.

Denklemlerin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-\phi) \tag{5.18}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-\phi) \tag{5.19}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.20}$$

Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 2,67$ mm

Halatın dış katmanındaki tellerin çapı = $\delta_1 = 2,67$ mm

Halatın dış katmanı için sarım yarıçapı r_1 dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} = \frac{2,67 + 2,67}{2} = 2,67 \text{ mm}$$

Dış katmanın halat adımı = h_1=80 mm

Dış katmanın sarım açısı = α

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.2,67}{80}) \qquad \alpha = 11,84°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk dış katman halat adımının yaklaşık 6,25 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,ma\,ks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 6,25.h_1 \qquad h_m = \frac{12,5.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{12,5.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.12,5.\pi$$

Halatın dış katmanı için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.12,5.\pi = 12,5.\pi \qquad Q_{1maks} = 12,5.180$$

1x7 8 mm halatın dış katmanındaki telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-12,5.180) \tag{5.21}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-12,5.180) \tag{5.22}$$

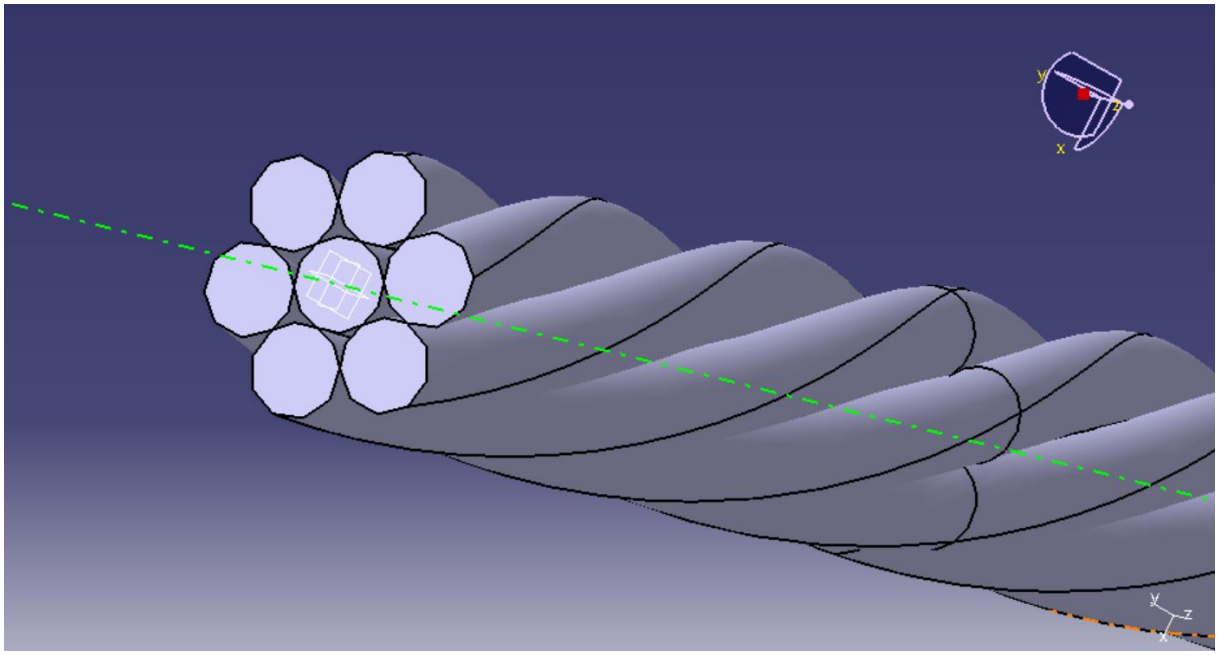
$$z(\phi) = \frac{12,5.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(11,84)} \tag{5.23}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*-12.5*180*1deg)

y=r1*sin(t*-12.5*180*1deg)

z=(t*12.5*180)*(PI/180)*r1*(cos(11.84*1deg)/sin(11.84*1deg))



Şekil 5.7 1x7 8 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü

5.1.1.4 1x19 3 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın dış katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için q' = -1'dir. Halatın iç katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için q'= 1'dir

Halatın 2. katmanı gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_2.\cos(-\phi) \tag{5.24}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(-\phi) \tag{5.25}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_2}{\tan\alpha} \tag{5.26}$$

Halatın 1. katmanını gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(\phi) \tag{5.27}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(\phi) \tag{5.28}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.29}$$

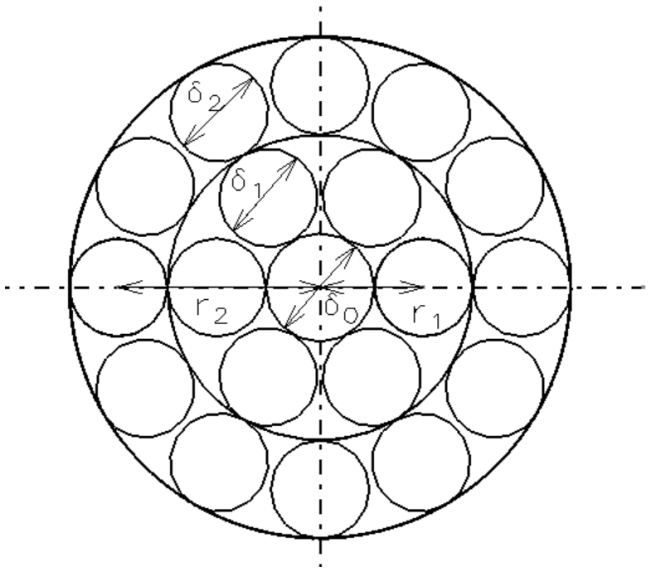
Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 0,65\,\text{mm}$

Halattaki diğer tüm tellerin çapı = $\delta_1 = \delta_2 = 0,59$ mm

Halatın 2. katmanı için sarım yarıçapı r_2, 1. katmanı için sarım yarıçapı r_1'dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \qquad r_1 = \frac{0,65 + 0,59}{2} = 0,62mm$$

$$r_2 = r_1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad r_2 = 0,62 + \frac{0,59 + 0,59}{2} = 1,21mm$$



Şekil 5.8 Halat kesitinde δ_1, δ_0 ve r_1 parametrelerinin gösterimi

Halatın 1. katmanının halat adımı $h_1 = 18$ mm'dir. Halatın sarım açısı α dır.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.0,62}{18}) \qquad \alpha = 12,21°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk 1. katman halat adımının yaklaşık 27,78 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,maks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 27,78.h_1 \qquad h_m = \frac{55,56.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{55,56.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.55,56.\pi$$

1. katman için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.55,56.\pi \qquad Q_{1maks} = 55,56.\pi \qquad Q_{1maks} = 55,56.180$$

2. katman için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_2}.55,56.\pi \qquad Q_{1maks} = \frac{0,62}{1,21}.55,56.\pi \qquad Q_{1maks} = 28,47.\pi$$

$Q_{1maks} = 28,47.180$

1x19 3 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(55,56.180) \tag{5.30}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(55,56.180) \tag{5.31}$$

$$z(\phi) = \frac{55,56.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(12,21)} \tag{5.32}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*55,56*180*1deg)

y=r1*sin(t*55,56*180*1deg)

z=(t*55,56*180)*(PI/180)*r1*(cos(12,21*1deg)/sin(12,21*1deg))

1x19 3 mm halatın 2. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_2.\cos(-55,56.180) \tag{5.33}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(-55,56.180) \tag{5.34}$$

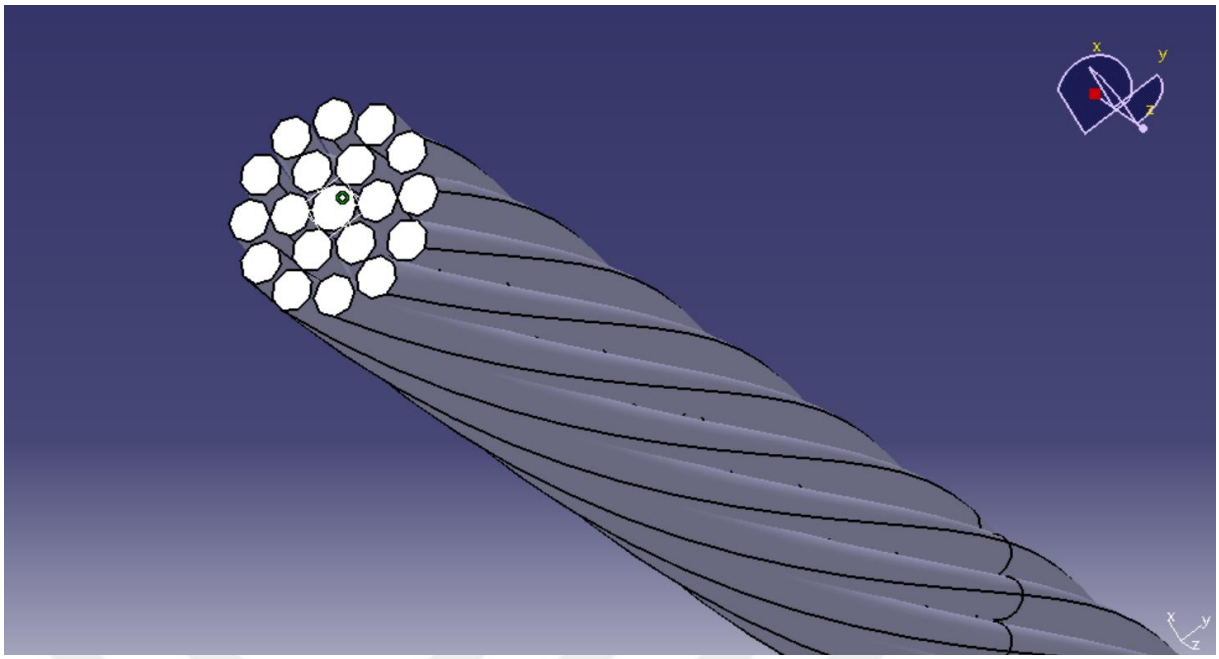
$$z(\phi) = \frac{55,56.180.\frac{\pi}{180}.r_2}{\tan(12,21)} \tag{5.35}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r2*cos(t*-55,56*180*1deg)

y=r2*sin(t*-55,56*180*1deg)

z=(t*55,56*180)*(PI/180)*r2*(cos(12,21*1deg)/sin(12,21*1deg))



Şekil 5.9 1x19 3 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü

5.1.1.5 1x19 5 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın 1. katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için q' =-1'dir. Halatın 2. katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için q' = 1'dir
- Alt indis j katman numarasını göstermektedir.

Halatın 2. katmanı gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_2.\cos(\phi) \tag{5.36}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(\phi) \tag{5.37}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_2}{\tan\alpha} \tag{5.38}$$

Halatın 1. katmanını gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-\phi) \tag{5.39}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-\phi) \tag{5.40}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.41}$$

Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 1,02\,\text{mm}$

Halatın 1. katmanındaki tellerin çapı $\delta_1 = 1,02$ mm

Halatın 2. Katmanındaki tellerin çapı $\delta_2 = 1,04$ mm

Halatın 2. katmanı için sarım yarıçapı r_2, 1. katmanı için sarım yarıçapı r_1'dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \qquad r_1 = \frac{1,02 + 1,02}{2} = 1,02mm$$

$$r_2 = r_1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad r_2 = 1,02 + \frac{1,02 + 1,04}{2} = 2,05mm$$

Halatın 1. katmanının halat adımı $h_1 = 40$ mm'dir. Halatın sarım açısı α dır.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.1,02}{40}) \qquad \alpha = 9,1°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk 1. katman halat adımının yaklaşık 12,5 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,maks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 12,5.h_1 \qquad h_m = \frac{25.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{25.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.25.\pi$$

1. katman için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.25.\pi \qquad Q_{1maks} = 25.\pi \qquad Q_{1maks} = 25.180$$

2. katman için

$$Q_{2maks} = \frac{r_1}{r_2}.25.\pi \qquad Q_{2maks} = \frac{1,02}{2,05}.25.\pi \qquad Q_{2maks} = 12,44.\pi$$

$$Q_{2maks} = 12,44.180$$

1x19 5 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-25.180) \tag{5.42}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-25.180) \tag{5.43}$$

$$z(\phi) = \frac{25.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(9,1)} \tag{5.44}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*-25*180*1deg)

y=r1*sin(t*-25*180*1deg)

z=(t*25*180)*(PI/180)*r1*(cos(9,1*1deg)/sin(9,1*1deg))

1x19 5 mm halatın 2. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_2.\cos(12,44.180) \tag{5.45}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(12,44.180) \tag{5.46}$$

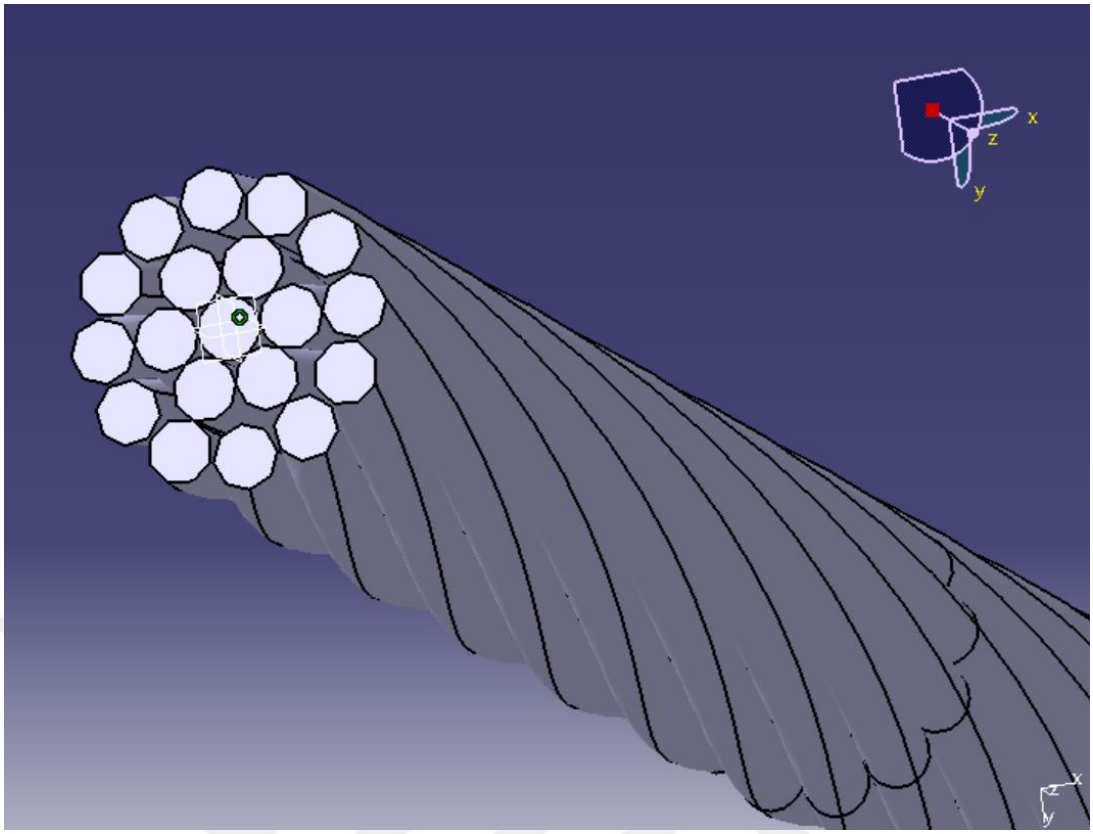
$$z(\phi) = \frac{12,44.180.\frac{\pi}{180}.r_2}{\tan(9,1)} \tag{5.47}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r2*cos(t*12.44*180*1deg)

y=r2*sin(t*12.44*180*1deg)

z=(t*12.44*180)*(PI/180)*r2*(cos(9.1*1deg)/sin(9.1*1deg))



Şekil 5.10 1x19 5 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü

5.1.1.6 1x19 8 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın 1. katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için q' = 1'dir. Halatın 2. katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için q' = -1'dir

Halatın 2. katmanı gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_2.\cos(-\phi) \tag{5.48}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(-\phi) \tag{5.49}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_2}{\tan\alpha} \tag{5.50}$$

Halatın 1. katmanını gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(\phi) \tag{5.51}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(\phi) \tag{5.52}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.53}$$

Halatın merkezindeki telin çapı = $\delta_0 = 1,74\,\text{mm}$

Halattaki diğer tüm tellerin çapı = $\delta_1 = \delta_2 = 1,58$ mm

Halatın 2. katmanı için sarım yarıçapı r_2, 1. katmanı için sarım yarıçapı r_1'dir.

$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \qquad r_1 = \frac{1,74 + 1,58}{2} = 1,66mm$$

$$r_2 = r_1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad r_2 = 1,66 + \frac{1,58 + 1,58}{2} = 3,24mm$$

Halatın 1. katmanının halat adımı $h_1 = 48$ mm'dir. Halatın sarım açısı α dır.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.1,66}{18}) \qquad \alpha = 12,25°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk 1. katman halat adımının yaklaşık 10,42 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri $\phi_{j\,maks}$ belirlenmelidir.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 10,42.h_1 \qquad h_m = \frac{20,84.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad \frac{Q_{jmaks}.r_j}{\tan\alpha} = \frac{20,84.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad Q_{jmaks} = \frac{r_1}{r_j}.20,84.\pi$$

1. katman için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.20,84.\pi \qquad Q_{1maks} = 20,84.\pi \qquad Q_{1maks} = 20,84.180$$

2. katman için

$$Q_{2maks} = \frac{r_1}{r_2}.20,84.\pi \qquad Q_{2maks} = \frac{1,66}{3,24}.20,84.\pi \qquad Q_{2maks} = 10,67.\pi$$

$$Q_{2maks} = 10,67.180$$

1x19 8 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(20,84.180) \tag{5.54}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(20,84.180) \tag{5.55}$$

$$z(\phi) = \frac{20,84.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(12,25)} \tag{5.56}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*20,84*180*1deg)

y=r1*sin(t*20,84*180*1deg)

z=(t*20,84*180)*(PI/180)*r1*(cos(12,25*1deg)/sin(12,25*1deg))

1x19 8 mm halatın 2. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_2.\cos(-10,67.180) \tag{5.57}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(-10,67.180) \tag{5.58}$$

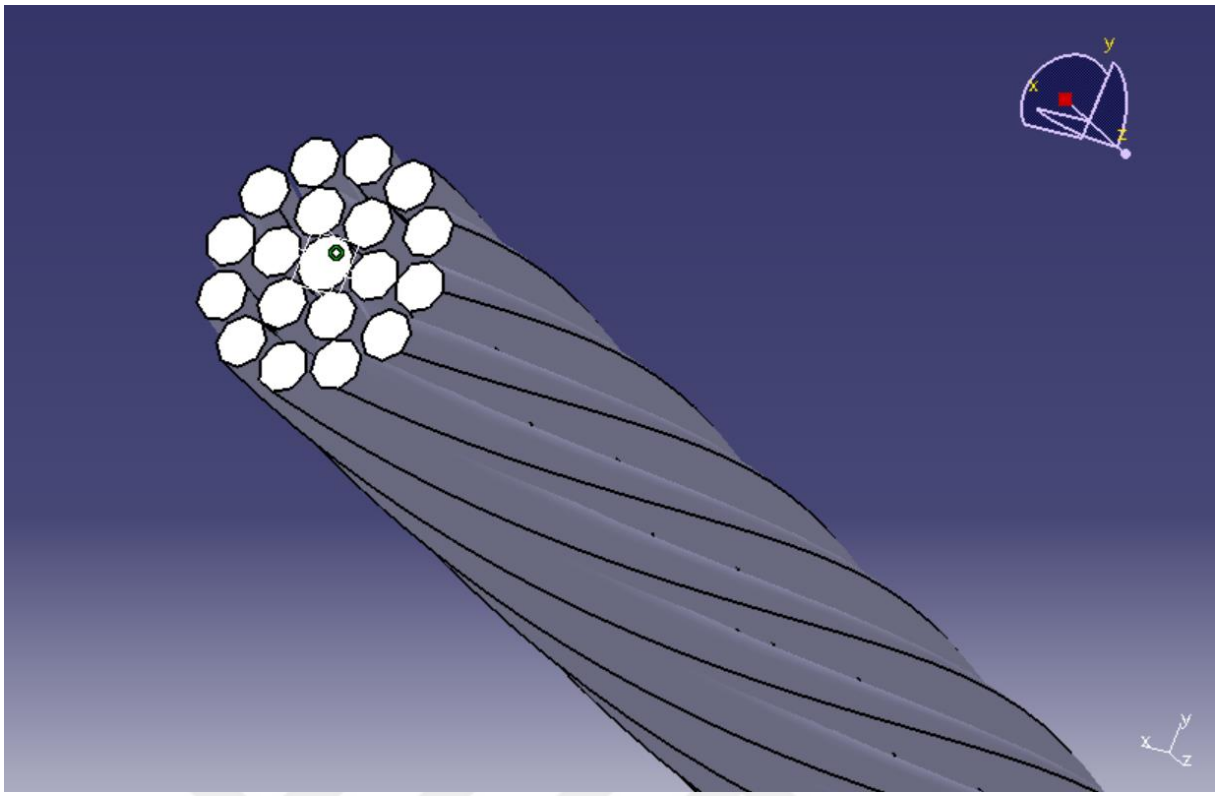
$$z(\phi) = \frac{10,67.180.\frac{\pi}{180}.r_2}{\tan(12,25)} \tag{5.59}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r2*cos(t*-10,67*180*1deg)

y=r1*sin(t*-10,67*180*1deg)

z=(t*10,67*180)*(PI/180)*r2*(cos(12,25*1deg)/sin(12,25*1deg))



Şekil 5.11 1x19 8 mm monotron halatın katı modelleme programındaki ekran görüntüsü

5.1.1.7 1x37 5 mm Çapında Monotron Halat Katı Modeli

Halatın dış katmanındaki bir telin merkezini gösteren parametrik denklemler denklem (5.1), (5.2) ve (5.3)'de gösterilmiştir.

- Halatın tüm katmanlarındaki ilk telin x ekseni üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Bu yüzden $\gamma = 0$ dır.
- Tüm halat katı modellerinde her katmanda sadece bir tel modellenmiştir. Diğer teller Catia programı içindeki circular pattern komutu (dairesel çoğaltma) ile çoğaltılmıştır. Bu nedenle $\xi = 0$ 'dır.
- Halatın 1. katmanının sarım yönü sola doğru olduğu için 1. katman için q' = -1'dir. Halatın 2. katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için 2. katman için q = 1'dir. Halatın 3. katmanının sarım yönü sağa doğru olduğu için 3. katman için q' = -1'dir.

Halatın 3. katmanı gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_3.\cos(-\phi) \tag{5.60}$$

$$y(\phi) = r_3.\sin(-\phi) \tag{5.61}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_3}{\tan\alpha} \tag{5.62}$$

Halatın 2. katmanı gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_2.\cos(\phi) \tag{5.63}$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(\phi) \tag{5.64}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_2}{\tan\alpha} \tag{5.65}$$

Halatın 1. katmanını gösteren denklemin son şekli şu şekildedir:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-\phi) \tag{5.66}$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-\phi) \tag{5.67}$$

$$z(\phi) = \frac{\phi.r_1}{\tan\alpha} \tag{5.68}$$

Halatın merkezindeki telin çapı $\delta_0 = 0,82\,\text{mm}$

Halatın tüm katmanlarındaki tellerin çapları $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 0,71$ mm

Halatın 1. katmanı için sarım yarıçapı r_1 dir.

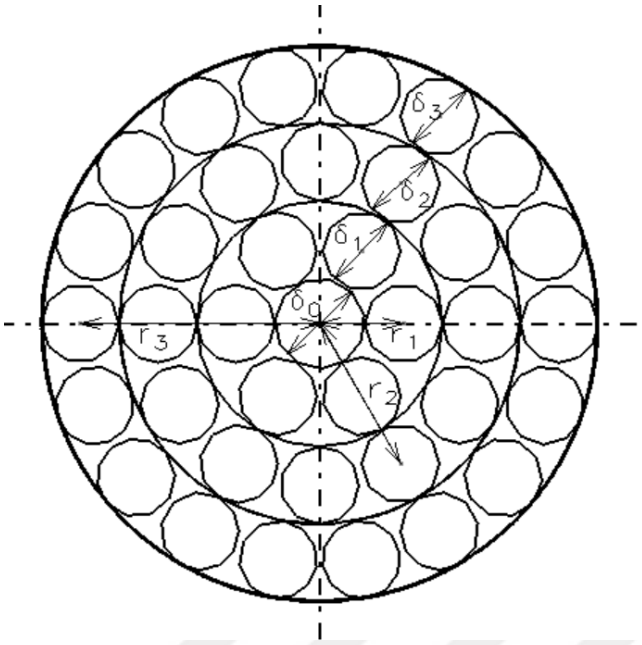
$$r_1 = \frac{\delta_0 + \delta_1}{2} \qquad r_1 = \frac{0,82 + 0,71}{2} = 0,765mm$$

Halatın 2. katmanı için sarım yarıçapı r_2 dir.

$$r_2 = r_1 + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \qquad r_2 = 0,765 + \frac{0,71 + 0,71}{2} \qquad r_2 = 1,475mm$$

Halatın 3. katmanı için sarım yarıçapı r_3 dir.

$$r_3 = r_2 + \frac{\delta_2 + \delta_3}{2} \qquad r_3 = 1,475 + \frac{0,71 + 0,71}{2} \qquad r_3 = 2,185mm$$



Şekil 5.12 Halat kesitinde δ_3, δ_2, δ_1, δ_0, r_1, r_2 ve r_3 parametrelerinin gösterimi

Halatın 1. katmanının halat adımı $h_1 = 21{,}3$ mm'dir. Halatın sarım açısı α dır.

$$h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad \tan\alpha = \frac{2.\pi.r_1}{h_1} \qquad \alpha = \arctan(\frac{2.\pi.r_1}{h_1})$$

$$\alpha = \arctan(\frac{2.\pi.0,765}{21,3}) \qquad \alpha = 12,71°$$

ϕ halatın dış katmanındaki telin merkez eksenindeki bir noktanın z eksenine göre pozitif yönde yaptığı dönme açısıdır. ϕ açısını belirlemek için model uzunluğu kullanılmıştır. Model uzunluğu (h_m) olarak 500 mm kabul edilmiştir. Bu uzunluk 1. katman halat adımının yaklaşık 47 katıdır. Her katmanın uzunluğunun aynı olabilmesi için ϕ açısının en büyük değeri ϕ_{jmaks} belirlenmelidir.

$$h_m = \frac{Q_{jmaks}.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_1 = \frac{2.\pi.r_1}{\tan\alpha} \qquad h_m = 47.h_1 \qquad h_m = \frac{94.\pi.r_1}{\tan\alpha}$$

1. katman için

$$Q_{1maks} = \frac{r_1}{r_1}.94.\pi \qquad Q_{1maks} = 94.\pi \qquad Q_{1maks} = 94.180$$

2. katman için

$$Q_{2maks} = \frac{r_1}{r_2}.94.\pi \qquad Q_{2maks} = \frac{0,765}{1,475}.94.\pi \qquad Q_{2maks} = 48,752.\pi$$

$Q_{2maks} = 48,752.180$

3. katman için

$Q_{3maks} = \frac{r_1}{r_3}.94.\pi$ $Q_{3maks} = \frac{0,765}{2,185}.94.\pi$ $Q_{3maks} = 32,91.\pi$

$Q_{3maks} = 32,91.180$

1x37 5 mm halatın 1. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_1.\cos(-94.180) \quad (5.69)$$

$$y(\phi) = r_1.\sin(-94.180) \quad (5.70)$$

$$z(\phi) = \frac{94.180.\frac{\pi}{180}.r_1}{\tan(12,71)} \quad (5.71)$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r1*cos(t*-94*180*1deg)

y=r1*sin(t*-94*180*1deg)

z=(t*94*180)*(PI/180)*r1*(cos(12,71*1deg)/sin(12,71*1deg))

1x37 5 mm halatın 2. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_2.\cos(48,752.180) \quad (5.72)$$

$$y(\phi) = r_2.\sin(48,752.180) \quad (5.73)$$

$$z(\phi) = \frac{48,752.180.\frac{\pi}{180}.r_2}{\tan(12,71)} \quad (5.74)$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r2*cos(t*48,752*180*1deg)

y=r2*sin(t*48,752*180*1deg)

z=(t*48,752*180)*(PI/180)*r2*(cos(12,71*1deg)/sin(12,71*1deg))

1x37 5 mm halatın 3. katmanındaki bir telin merkez eksenini gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_3.\cos(-32,91.180) \tag{5.75}$$

$$y(\phi) = r_3.\sin(-32,91.180) \tag{5.76}$$

$$z(\phi) = \frac{32,91.180.\frac{\pi}{180}.r_3}{\tan(12,71)} \tag{5.77}$$

Catia programında denklemlerin yazımı şu şekildedir:

x=r3*cos(t*-32,91*180*1deg)

y=r3*sin(t*-32,91*180*1deg)

z=(t*32,91*180)*(PI/180)*r3*(cos(12,71*1deg)/sin(12,71*1deg))

5.1.2 Malzeme Özellikleri

Sonlu elemanlar analizinde uygulanacak yükler ve sınır şartlarında dolayı halatta oluşacak şekil değişimlerinin elastik olacağı teorik formüllerden öngörülmüştür. Bu yüzden seçilecek malzemenin gerilme gerinim ilişkisinin lineer olduğu Ansys Workbench malzeme kütüphanesindeki yapısal çelik seçilmiştir. Lineer dinamik analizde malzemenin elastisite modülünün, özkütlesinin ve Poisson oranının bilinmesi yeterlidir. Malzemenin elastiklik modülü 200 GPa, Poisson oranı 0,3 ve öz kütlesi 7850 kg/m3 dür. Analizi yapılan tüm sonlu elemanlar modelleri homojen, izotropik ve doğrusal malzeme özellikleri taşımaktadır. Deneyde kullanılan halatlar yüksek karbonlu (karbon oranı % 0,65) ve alaşımsız çelikten üretilmiştir. Halat numunelerinin özellikleri halat imalatçısı firma olan Köşkerler Halat'tan alınmıştır. Deneyde kullanılan halat numunelerinin mekanik özellikleriyle sonlu elemanlar analizinde kabul edilen mekanik özellikler birbirleriyle uyumludur.

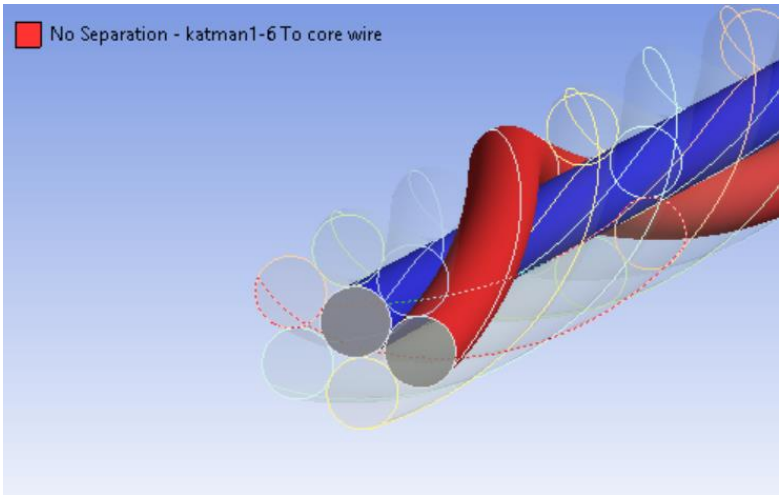
Çelik halatlar korozyon dayanımı için genellikle sıcak daldırma galvanizleme işlemiyle çinko ile kaplanır. Bu işlem ile halatın dış katmanı saf çinko ile kaplanır. Halatın dış katmanında kalın düzgün yüzey oluşturan bir çinko katmanı elde edilir. Çinko korozyona karşı güvenilir bir koruma sağlar. Çinko tabakası kısmen hasar görse bile çelik elektrokimyasal proses olarak korunmaya devam eder.



Şekil 5.13 Galvanizleme işlemi yapılmış çelik halat

5.1.3 Temas Özellikleri

Deneyde kullanılan çelik halatta çelik teller arasında sürtünme vardır. Sonlu elemanlar analizinde de bu sürtünme tanımlanmalıdır. Sürtünmeli temas tanımlanması analizin lineer olmamasına neden olmaktadır ve çözüm süresini uzatmaktadır. Katı modeldeki tellerin çapı çok küçük (0,82 mm, 0,65 mm gibi) olduğu için analizde kullanılacak eleman büyüklüğünün de çok küçük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle 500 mm uzunluğundaki bir modelde kullanılan eleman sayısı artmaktadır. Modeldeki eleman ve temas sayısının fazla olması ve analiz sırasında farklı tipteki birçok gerilme türünün birlikte ortaya çıkması nedeniyle laboratuvarda kullanılan bilgisayarların çözüm kapasitesi yetmemektedir. Bu problemden dolayı halat katı modellerinden en küçük çapta ve temas bölgesi sayısı en az olan model için Ansys'de bulunan sürtünmeli temas (frictional contact), ayrılmasız temas (no separation contact) ve yapışık temas (bonded contact) temas tipleri ile ayrı ayrı halat analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 500 mm uzunluğundaki 1x7 3 mm monotron halat için 500 N gergi kuvveti altında ayrılmasız ve yapışık temas tiplerinin sürtünmeli temas modelle karşılaştırılması sırasıyla çizelge 2 ve çizelge 3'de gösterilmiştir. Sonuçların birbirine yakın çıkması nedeniyle katı modeldeki teller ayrılmasız temas seçeneği ile tanımlanıştır. Ayrılmasız temas seçeneğinde birbirine temas eden yüzeylerdeki düğüm noktaları sadece yüzeyin normali yönünde birleştirilir. Temas yüzeyleri teğet yönünde küçük kaymalara izin verir. Bu durum ayrılmasız temas içeren modellerin sürtünmeli temas içeren modelde olduğu tel halatların birbiri üzerinden bir miktar kaymasına izin vermektedir. Sonuçlar bu nedenle sürtünmeli temas içeren modele yakın çıkmaktadır. Birbirine temas halinde olan iki yüzeyin Ansys programındaki gösterimi şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 5.14 Teller arasında temasın gösterimi

Çizelge 5.2 Sürtünmeli temas ve ayrılmasız temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması

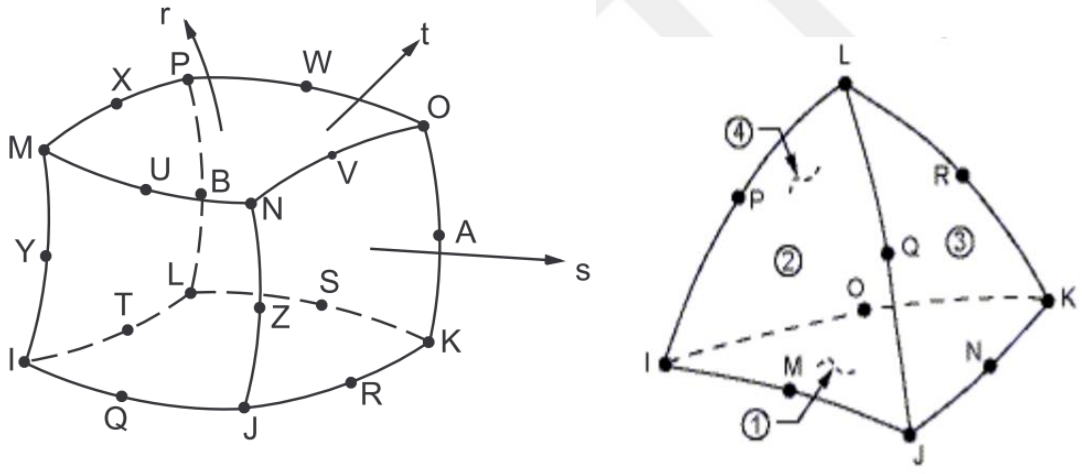
Sürtünmeli Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	**Ayrılmasız Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)**	**% Fark**
116,13	116,28	0,13
234,02	234,04	0,15
355,36	354,71	0,20
481,95	479,69	0,27
615,41	610,26	0,34

Çizelge 5.3 Sürtünmeli temas ve yapışık temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması

Sürtünmeli Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	**Yapışık Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)**	**% Fark**
116,13	131,13	12,9
234,02	270,83	15,7
355,36	429,27	20,8
481,95	611,43	26,9
615,41	820,47	33,3

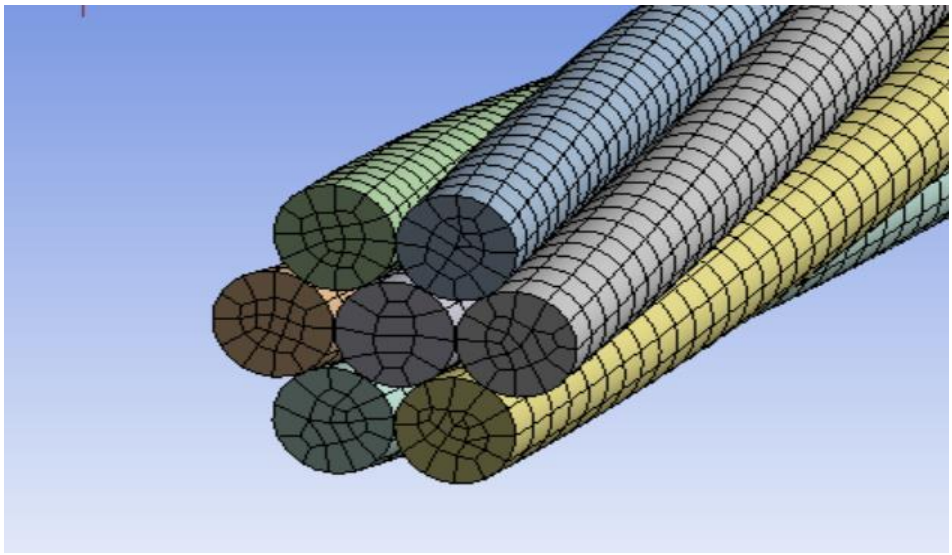
5.1.4 Çözüm Ağı Özellikleri

Ansys Workbench 3 boyutlu katı modelleri Solid186 ve Solid187 elemanları ile çözüm ağı oluşturmaktadır. Solid186 elemanı küp şeklinde ikinci dereceden bir elemandır ve küpün hem köşelerinde hem de kenarların orta noktalarında olmak üzere 20 adet düğüm noktasına sahiptir. Solid186 elemanı ve üzerindeki düğüm noktaları şekil 4.15'de gösterilmiştir. Eğer program katı model geometrisinden dolayı Solid186 elemanı oluşturamazsa dörtyüzlü şeklindeki Solid187 elemanı ile sonlu elemanlar ağını oluşturmaktadır. Solid187 elemanı da ikinci dereceden bir elemandır ve dörtyüzlünün hem köşelerinde hem de kenarların orta noktalarında olmak üzere 10 adet düğüm noktası vardır. Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Ansys'deki her üç boyutlu elemanın düğüm noktalarının x, y ve z eksenlerinde olmak üzere 3 öteleme serbestlik derecesi vardır. Sonlu elemanlar ağı oluşturulan 1x7 3 mm tipindeki halat katı modelinin görünümü şekil 4.16'daki gibi olmaktadır.



a) b)

Şekil 5.15 Solid186 elemanı (a) ve Solid187 elemanı (b)



Şekil 5.16 Halat modelinin ağ yapısı görünümü

Her bir halat sonlu elemanlar modeli için ağ yapısında kullanılan eleman boyutu küçültülerek ağ yapısı yakınsama analizi yapılmıştır. Doğal frekans sonuçları ile eleman boyutunun değişimini gösteren analiz çizelge 4'de gösterilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 Çözüm ağı yakınsama analizi

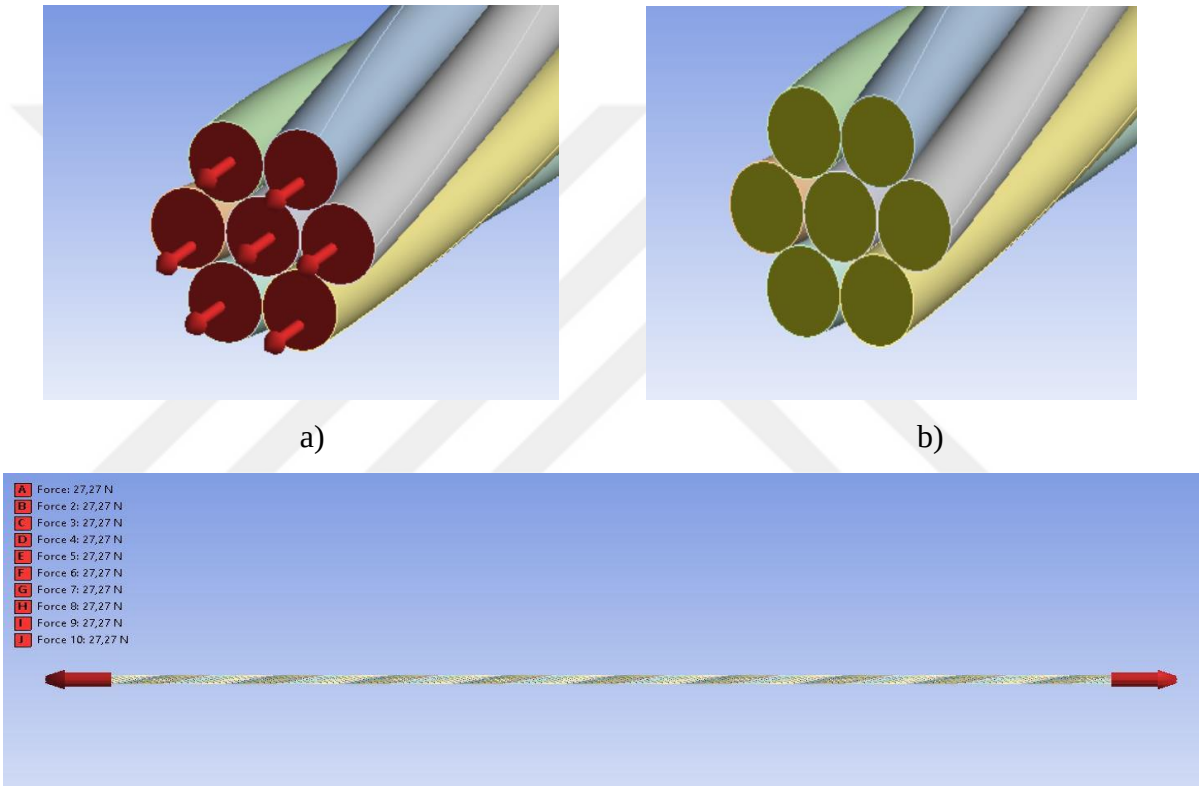
1x7 3 mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)	**1x7 3mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)**	**1x7 3mm 500 N (0,3 mm Eleman Boyutu)**
116,28	116,13	116,1
234,04	233,68	233,62
354,71	354	353,89
479,69	478,38	478,21
610,26	608,18	607,9
1x7 5mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)	**1x7 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)**	**1x7 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)**
65,512	65,501	65,499
138,91	138,9	138,83
226,65	226,66	226,5
333,31	333,33	332,96
461,69	461,58	461,06

Çizelge 5.4 Çözüm ağı yakınsama analizi (devamı)

1x7 8mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)	**1x7 8mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)**	**1x7 8mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)**
45,412	45,384	45,358
115,93	115,75	115,61
222,78	222,31	221,94
369,03	368,17	367,44
555,08	553,63	552,48
1x19 3mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)	**1x19 3mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)**	**1x19 3mm 500 N (0,3 mm Eleman Boyutu)**
111,44	111,48	111,35
229,76	229,67	229,04
361,37	360,59	358,98
511,51	509,32	506,19
683,78	680,14	674,27
1x19 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)	**1x19 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)**	**1x19 5mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)**
68,216	69,079	66,351
161,91	167,78	149,49
295,83	311,43	260,75
475,6	506,82	410
704,24	751,58	595,34
1x19 8mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)	**1x19 8mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)**	**1x19 8mm 500N (0,5 mm Eleman Boyutu)**
66,828	56,795	60,314
225,09	176,76	194,11
483,62	372,54	412,45
838,49	645,15	714,12
1169,1	994,73	1020,2
1x37 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)	**1x37 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)**	**1x37 5mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)**
71,599	72,976	72,782
173,6	182,15	180,98
321,73	344,52	341,6
523,49	565,88	559,97
779,02	846,04	836,74

5.1.5 Sınır Şartları

Sınır şartlarının deney düzeneğinde kullanılan sınır şartı ile uygun olması için 500 mm uzunluğundaki halat katı modelinin her iki ucundaki halat kesitine dik (Z ekseninde) eşit büyüklükte her bir analiz için ayrı ayrı olmak üzere 1000 N, 800 N, 500 N ve 400 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Halat katı modelinin diğer eksenler (X ve Y) de hareket etmemesi için bu eksenlerdeki hareketi yer değiştirme (displacement) komutu ile sınırlandırılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kurulan bu sınır şartları şekil 4.17'de gösterilmiştir.



a) b)

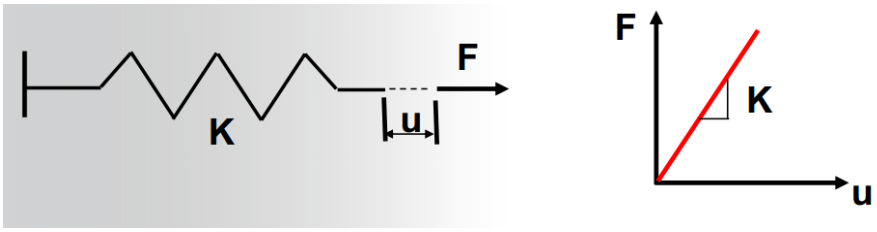
c)

Şekil 5.17. Kuvvetlerin halatın uç noktalarından uygulanması (a-c) ve yer değiştirme sınır şartının uygulanması (b)

5.2 Ansys'de Lineer Olmayan Bir Analizin Çözüm Aşamaları

Robert Hooke tarafından 1678'de kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişkiyi gösteren kanun keşfedilmiştir. Bugün bu yasa Robert Hooke un adına izafeten Hooke yasası

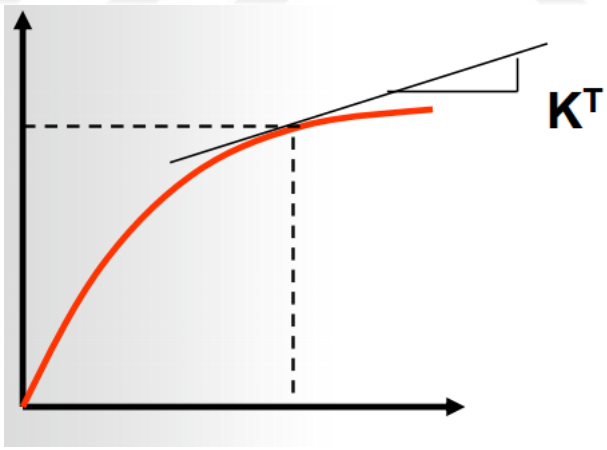
olarak anılmaktadır. Bu kanuna uyan maddelere lineer elastik maddeler denir ve bu durumu anlatmak için kullanılan en tipik örnek elastik yaydır.



Şekil 5.18 Hooke yasasının elastik yay üzerinde gösterimi

Şekil 4.18'de K ile gösterilen yayın katılığı, F ile gösterilen kuvvet ve u ile gösterilen yayın serbest ucunun yer değiştirmesidir.

Ansys programı lineer statik analizin çözümünü yaparken sistemin tek bir global katılık matrisini hesaplamaktadır. Ancak gerçek hayattaki sistemlerin çoğunda kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki lineer değildir. Bu tür sistemlere lineer olmayan sistemler (nonlineer sistemler) denir.

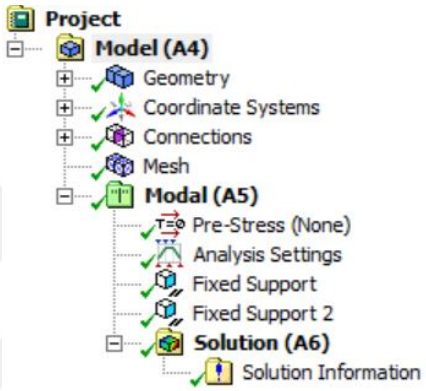


Şekil 5.19 Nonlinear sistem için kuvvet yer değiştirme grafiği

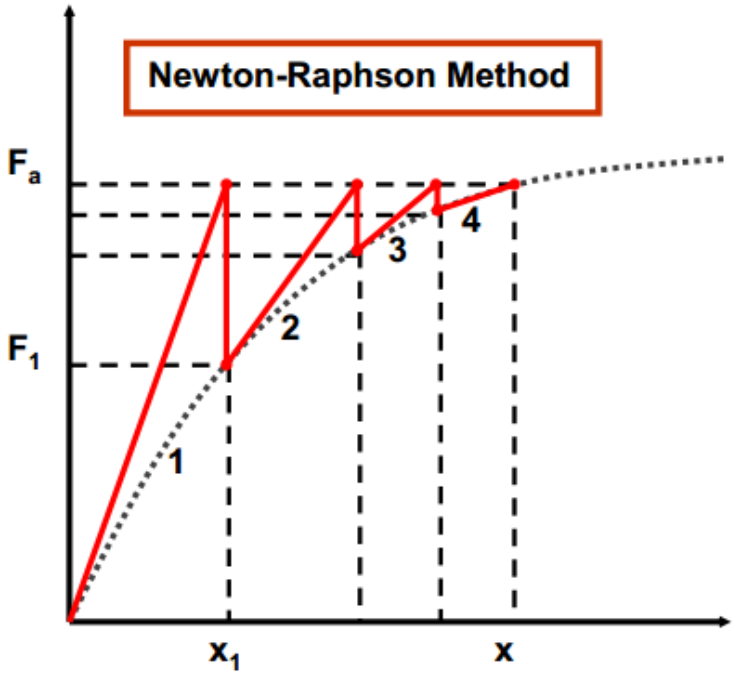
Lineer olmayan yapılarda sistemin katılık matrisi sabit değildir. Ansys çözüm sırasında girilen yük değerini yavaş yavaş uygulamaktadır ve sistemin katılık matrisi de yükleme durumuna göre değişmektedir. Bu yüzden katılık matrisi program tarafından tekrar tekrar hesaplanmaktadır. Şekil 4.19'da gösterilen grafikte K^T (teğetsel katılık) ile gösterilen yükleme durumunda herhangi bir noktadaki eğrinin teğetini ifade etmektedir. Eğer yükleme malzemenin katılığında önemli değişikliklere yol açıyorsa sistem

nonlineer kabul edilir. Elastik sınırın üstündeki kalıcı şekil değişimleri, büyük elastik şekil değişimleri ve temas durumlarının anlık değişmesi sistemin katılığını değiştiren tipik nedenlerdir. Kısaca söylemek gerekirse sistemin geometrisinden kaynaklanan nonlineerlikler, malzemeden kaynaklanan nonlineerlikler ve temas durumlarından kaynaklanan nonlineerliklerdir. Bu üç durum tamamı da aynı sistemde gerçekleşebilir.

Nonlineer analizde sistemin cevabı direkt olarak lineer denklemlerden tahmin edilemez. Bununla birlikte lineer olmayan sistem bir dizi lineer yaklaşım metodu kullanılarak analiz edilebilir. Ansys Mechanical programı iteratif bir süreç olan Newton-Raphson Metodu'nu kullanmaktadır.



Şekil 5.20 Ansys Workbench'de işlem adımlarını gösteren ürün ağacı



Şekil 5.21 Newton Raphson Methodu

Şekil 4.21'de tek bir yük arttırımı için 4 iterasyon yapıldığı görülmektedir. Bu grafikteki yük ve yer değiştirme arasındaki gerçek ilişkiyi gösteren noktalı çizgi çözümden önce bilinmemektedir. İterasyonlar kullanılarak lineer bir yaklaşım gerçekleştirilir. Grafikteki kırmızı çizgiler bu iterasyonları temsil etmektedir. Şekil 4.21'deki grafik incelenirse toplam yük F_a 1. iterasyonda uygulandığı görülmektedir. Bu durumda hesaplanan yer değiştirme x_1'dir. Elde edilen yer değiştirme değerinden iç kuvvet F_1 hesaplanır. Eğer $F_a \neq F_1$ ise yani hesaplanan iç kuvvetlerle uygulanan kuvvet eşit değilse sistem dengede değildir. Bu yüzden o anki sistem durumu kullanılarak yeni bir katılık matrisi hesaplanır. (2 numaralı teğet çizgisi) İç kuvvetlerle uygulanan kuvvetler arasındaki fark kalıntı kuvvetler olarak adlandırılır. Çözümün gerçekleşmesi için sonuçların bir değere yakınsaması gerekmektedir. Bunun için de kalıntı kuvvetlerin Ansys tarafından önceden eşik değerden küçük olmalıdır. Kuvvet dengesi için yakınsama kriteri Ansys'de varsayılan olarak iç kuvveti ve uygulanan kuvveti dikkate alarak programın hesapladığı değerin % 0,5'dir. İterasyonlar kalıntı kuvvetlerin eşik değerden küçük olana kadar devam eder. Şekil 20'deki örnekteki sistemde program 4 iterasyonda çözüme ulaşmıştır. Şekil 4.22'de Ansys tarafından çözüm sırasında oluşturulan çözüm bilgi ekranı görülmektedir. Burada yakınsama kriteri ve hesaplanan iç kuvvet ile uygulanan kuvvet farkı (F_a - F_1) kırmızı kutucuklar içinde gösterilmiştir.

```
EQUIL ITER   1 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.3269E-03
 LINE SEARCH PARAMETER =  0.9982     SCALED MAX DOF INC =  0.3263E-03
 FORCE CONVERGENCE VALUE  =  58.44      CRITERION=  9.017
EQUIL ITER   2 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.3632E-05
 LINE SEARCH PARAMETER =   1.000     SCALED MAX DOF INC =  0.3632E-05
 FORCE CONVERGENCE VALUE  =  9.204      CRITERION=  9.201
EQUIL ITER   3 COMPLETED.  NEW TRIANG MATRIX.  MAX DOF INC=  0.9539E-06
 LINE SEARCH PARAMETER =   1.000     SCALED MAX DOF INC =  0.9539E-06
 FORCE CONVERGENCE VALUE  =  5.769      CRITERION=  9.389     <<< CONVERGED
>>> SOLUTION CONVERGED AFTER EQUILIBRIUM ITERATION   3
```

Şekil 5.22 Ansys çözüm bilgi ekranı görünümü

BÖLÜM 6

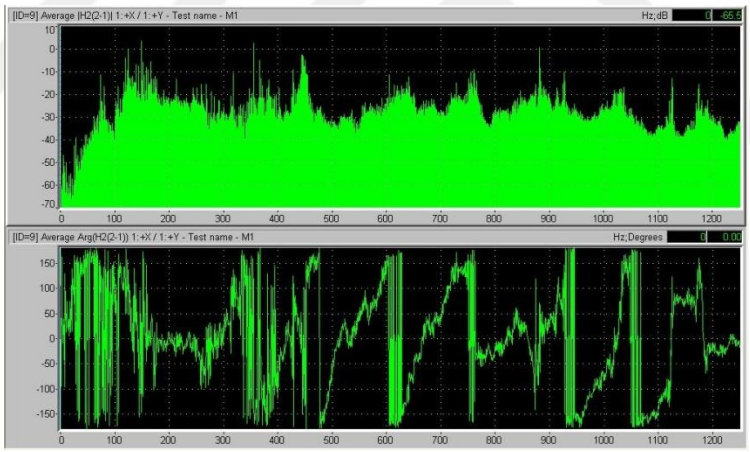
DENEYSEL ANALİZ

6. 1 Deneysel Doğal Frekans Ölçümü

Deney standına doğal frekans ölçümü yapılacak halat numunesi ve iki uçtan gergi kuvvetini oluşturacak ağırlıklar makaralar yardımıyla asılmıştır. Uygulamada köprü halatlarında da kullanılan basit mesnet sınır şartı elde edilmeye çalışılmıştır. Halat üzerinden ölçümleri almak için tek eksenli Dytran marka 3097A3T model ivmeölçer halatın orta noktasına yerleştirilmiştir. Darbe etkisi Brüel&Kjaer Type 8206-002 Modal Impact hammer ile elde edilmiştir. İvmeölçer yardımıyla alınan veriler Areva 01dB NetdB marka analizör yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Deney standının genel görünümü şekil 11'de gösterilmiştir. Bilgisayara ortamına aktarılan veriler kullanılan analizörün kendi yazılımı olan dBFA Suite programı yardımıyla grafiksel olarak elde edilmiştir. Sönüm etkisinin ihmal edildiğinde sistem rezonans durumunda ise yer değiştirme ve kuvvet vektörleri arasındaki faz farkı 180° olmaktadır. Deneyde elde edilen grafiklerden halatın doğal frekansları bulunurken faz açısı değişimi de dikkate alınmıştır. Frekans cevabı ve faz eğrisi ilişkisi şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Deney standı genel görünümü



Şekil 6.2 Frekans cevabı ve faz eğrisi ilişkisi

6.2 Ölçümde Kullanılan Ekipmanlar

6.2.1 Dytran 3097A3T Model İvmeölçer

Halat üzerinden yapılan titreşim ölçümlerinde Dytran marka 3097A3T model tek eksenli ivmeölçer kullanılmıştır. Ölçüm sırasında tek bir ivmeölçer kullanılmıştır. Halat üzerinde oluşan enine titreşimler tek yönlü olduğu için tek eksenli ivmeölçer

kullanılmıştır. İvme ölçerin hassasiyeti 51,02 mVs^2/m'dir. Ölçüm aralığı ise bu hassasiyet değerinde 0,15-5000 Hz'dir. İvmeölçer halatın iki makara arasında kalan orta noktasına plastik kelepçe yardımıyla tutturulmuştur. Şekil 6.3'de kullanılan ivmeölçer görülmektedir.



Şekil 6.3 Deneyde kullanılan ivmeölçer

6.2.2 Darbe Çekici

Ölçüm için halat üzerinde titreşim oluşturmak için Brüel & Kjaer marka 8206 model darbe çekici kullanılmıştır. Ölçüm yapılırken her bir ölçüm için halata iki kez vurulmuştur ve bu iki ölçümün ortalaması alınarak frekans cevabı elde edilmiştir. Darbe çekicinin voltaj hassasiyeti 22,7 mV/N'dur. Oluşturulacak kuvvetin en büyük değeri 220 N'dur. Çıkış voltajı ise 5 V'dur.



Şekil 6.4 Darbe çekici

6.2.3 Analizör



Şekil 6.5 Analizör

Deneyde kullanılan Areva marka 01dB NetdB analizör şekil 6.5'de görülmektedir. Ölçümde kullanılan ivmeölçer tek eksenli olduğu için sadece bir kanalı ivmeölçer için kullanılmıştır. İkinci kanal ise darbe çekici için kullanılmıştır. Analizörde elde edilen veriler usb bağlantısıyla bilgisayara aktarılmıştır. Analizörün özellikleri şunlardır:

- Veri giriş ve çıkışı için 12 adet kanal
- Örnekleme oranı 51,2 kHz, 25,6 kHz, 12,8 kHz
- Analizlerin eş zamanlı olarak bilgisayar ortamına aktarılıp değerlendirilebilmesi
- İşlemci hızı 600 MHz
- Giriş aralıkları 1 Vrms (-1,5 V'dan 1,5 V'a), 10 Vrms (-15 V'dan 15 V'a), 100 mVrms (-150 mV'dan 150 mV'a)

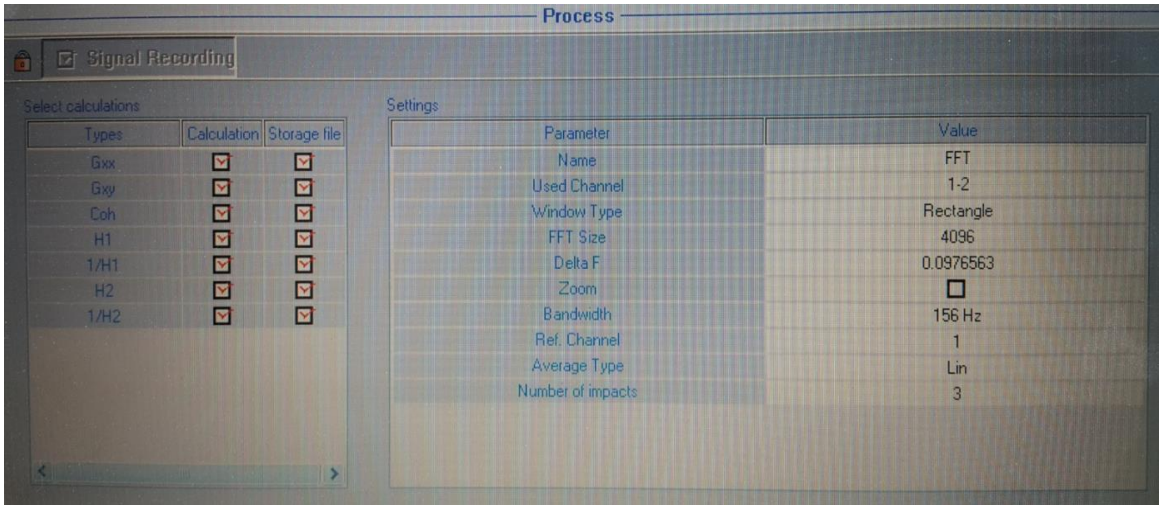
6.2.4 dBFA Suite Programı

Analizör vasıtasıyla bilgisayara aktarılan veriler dBFA Suite programıyla işlenip yorumlanmıştır. İvmeölçer ile darbe çekicinin örnekleme oranı ve hassasiyeti yazılımın

arayüzünde ayarlanabilmektedir. İvmeölçer kullanılarak ölçülen halat titreşimlerinden alınan veriler oldukça karmaşık yapıdadır. Bu karmaşık sinyallerin anlaşılıp yorumlanabilmesi için çeşitli matematiksel dönüşümlerin yapılması gerekmektedir. dBFA Suite programında alınan sinyaller FFT (Fast Fourier Transform) dönüşümleri sayesinde basitleştirilebilmektedir. İvmeölçer ile alınan sinyaller daha kolay yorumlanabilmesi için zaman düzleminden frekans düzlemine aktarılmıştır.



Şekil 6.6 dBFA Suite programı

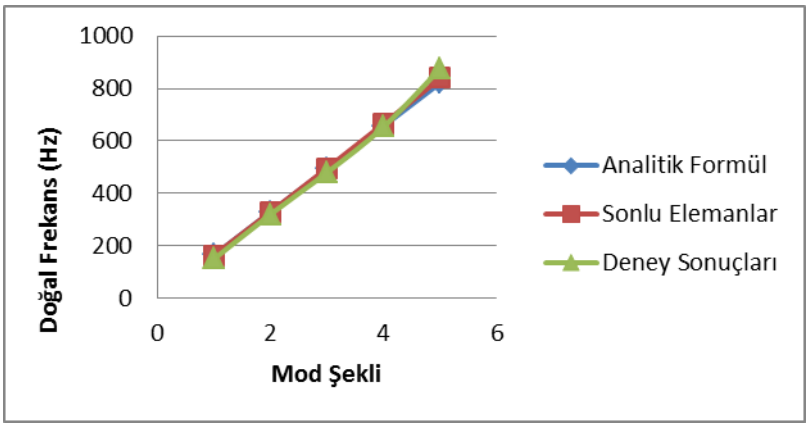


Şekil 6.7 Sinyal işleme parametreleri penceresi

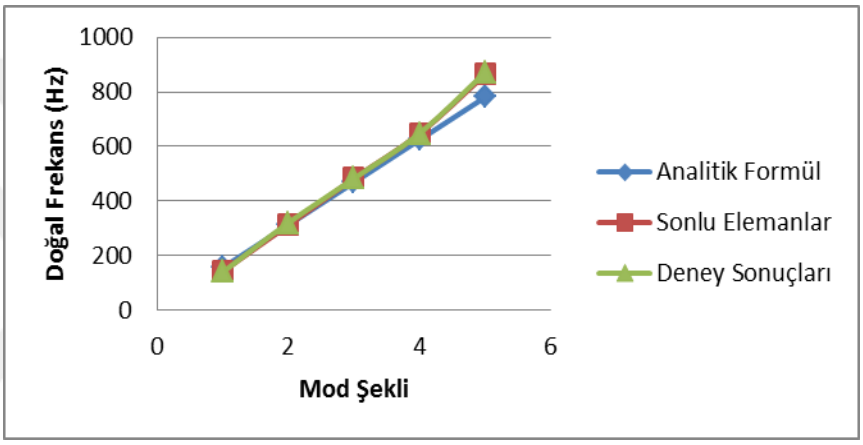
BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada deneysel, sonlu elemanlar ve analitik formül sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu şekil 7.1 ve şekil 7.2' deki grafiklerde görülmektedir. Analitik formül ile halatın doğal frekansı hesaplanırken doğal frekans değeri dalga karnı sayısına (antinod sayısı), halat uzunluğuna, ön gerilme kuvvetine ve halatın birim uzunluğunun kütlesine bağlıdır. Ancak bu hesaplamada halatın tipi dikkate alınmamaktadır. Yani aynı şartlarda incelenen birim uzunluğunun kütlesi aynı olan iki farklı halat tipinin doğal frekansı aynı çıkabilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde sistem gerçekteki duruma göre modellenebildiği için bu fark ortaya çıkarılabilir. Şekil 7.3'deki grafikte görüldüğü üzere halatlar aynı çapta olsa bile halattaki tel sayısı arttıkça aynı şartlardaki halatın doğal frekans değerleri artmaktadır. Bunun tam tersi durum olduğunda yani farklı çaplardaki fakat aynı tel sayısına sahip halatlarda halatın çapı arttıkça doğal frekans değeri düşmektedir. Şekil 7.4'de de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu durum analitik formül ile yapılan hesaplamalarda da öngörülebilir. Çünkü halattaki tel sayısı arttıkça halat birim uzunluğunun kütlesi artmaktadır. Halat doğal frekans değeri de formüle bağlı olarak düşmektedir.



Şekil 7.1 1000 N ön gerilme altında 1x7 3 mm halatın analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 7.2. 1000 N ön gerilme altında 1x19 3 mm halatın analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Tüm halat modelleri için yapılan analizler 400 N, 500 N, 800 N ve 1000 N olmak üzere 4 farklı ön gerilme durumu için yapılmıştır. Çizelge (7.1-7.8)'den de görülebileceği üzere uygulanan ön gerilme kuvveti arttıkça analizi yapılan halat tipi ve tel sayısı fark etmeksizin doğal frekans değerleri artmaktadır. Bu sonuç denklem 3.13'deki analitik formülden de direkt olarak görülebilir.

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizinde halattaki teller arasındaki temasların ayrılmasız temas olduğu kabulü yapılmıştır. Ansys'de doğrusal olmayan temas türleri statik analiz bölümünde tanımlanabilmektedir. Modal analiz kısmında doğrusal olmayan temas türleri, temas yüzeyleri arasındaki mesafeye ve sürtünme katsayısına göre doğrusal temas türlerine (ayrılmasız temas veya yapışık temas) program tarafından dönüştürülmektedir. Statik analiz bölümünde sürtünme kuvveti tanımlanması sistemde oluşan gerilme değerini değiştirmektedir. Sürtünme kuvveti analizde sönüm etkisi oluşturmaktadır. Analitik formül sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları

karşılaştırıldığında halattaki tel sayısı ve halat tel çapı arttıkça iki sonuç arasındaki farklar da artmaktadır. Yani halatın analitik formül sonuçlarında olduğu gibi titreşim davranışı doğrusal olmamaktadır. Bu nedenle oluşturulacak sonlu elemanlar modelinin sistemin doğrusal olmayan davranışına uygun olması gerekmektedir. Çizelge (6-12)'de tüm sonuçlar için karşılaştırmalar gösterilmiştir.

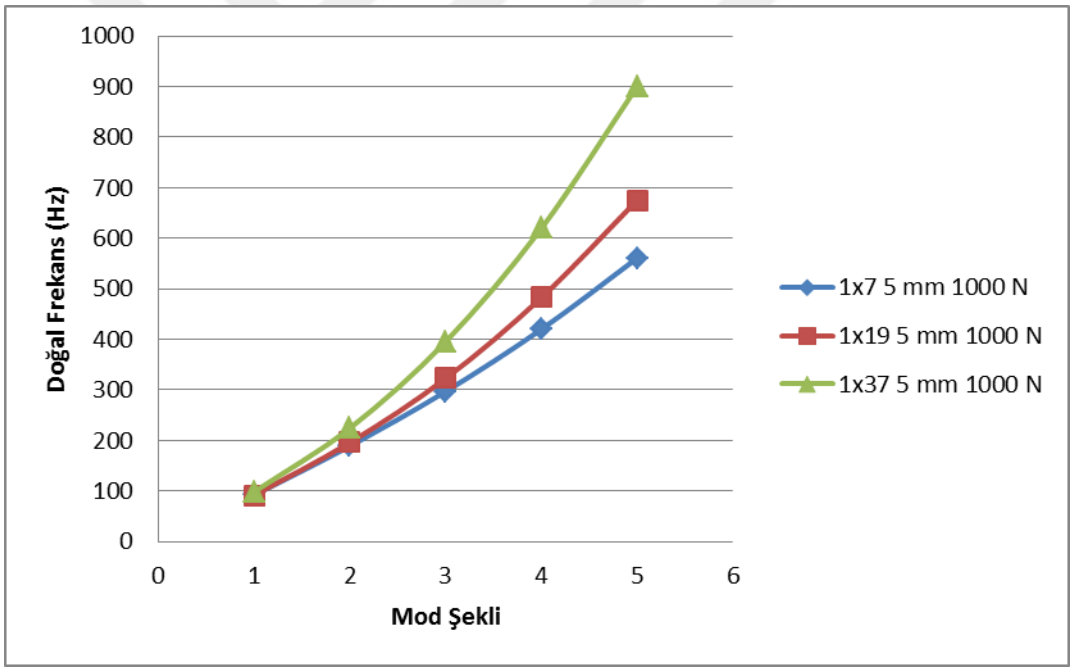
Sonlu elemanlar analizinde sistemin doğrusal olmayan temas seçeneği olan sürtünmeli temas seçeneği ile tanımlanması gerekmektedir. Bu durum sistemin doğru modellenmesini sağlamakla beraber çözümün gerçekleşmesi ve çözüm süresi analizin yapıldığı bilgisayarın hesaplama kapasitesine bağlıdır. Örneğin; 500 mm uzunluğundaki 1x7 3 mm tipindeki 500 N ön gerilme kuvveti uygulanan halat analizinde ayrılmasız temas içeren modelin çözüm süresi yaklaşık 10 saat olurken, sürtünmeli temas içeren modelin çözüm süresi yaklaşık 200 saat olmaktadır. Temas sayılarının daha fazla olduğu daha fazla telden oluşan halat analizlerinde sürtünmeli temas çözüm süresini daha da fazla arttıracaktır.

Sürtünmeli temas içeren model ile ayrılmasız temas içeren modelin karşılaştırılması yapılırken 500 mm uzunluğundaki katı model kullanılmıştır. İki analiz sonuçları arasındaki yüzdesel fark çizelge 2'de gösterilmiştir. Ancak 200 mm uzunluğundaki iki halat katı modelinin karşılaştırılması yapıldığında sürtünmeli temas içeren model ile ayrılmasız temas içeren modelin sonuçları arasındaki fark artmaktadır. Bu durum çizelge 5'de gösterilmiştir. Halat katı modelinin uzunluğu arttıkça doğrusal ve doğrusal olmayan temas içeren modellerin sonuçları arasındaki farkın azalması katı model boyutunun görece daha uzun olduğu modellerde çözüm süresini kısaltmak amacıyla sürtünmeli temas yerine ayrılmasız temas kullanılabilmesini sağlamaktadır.

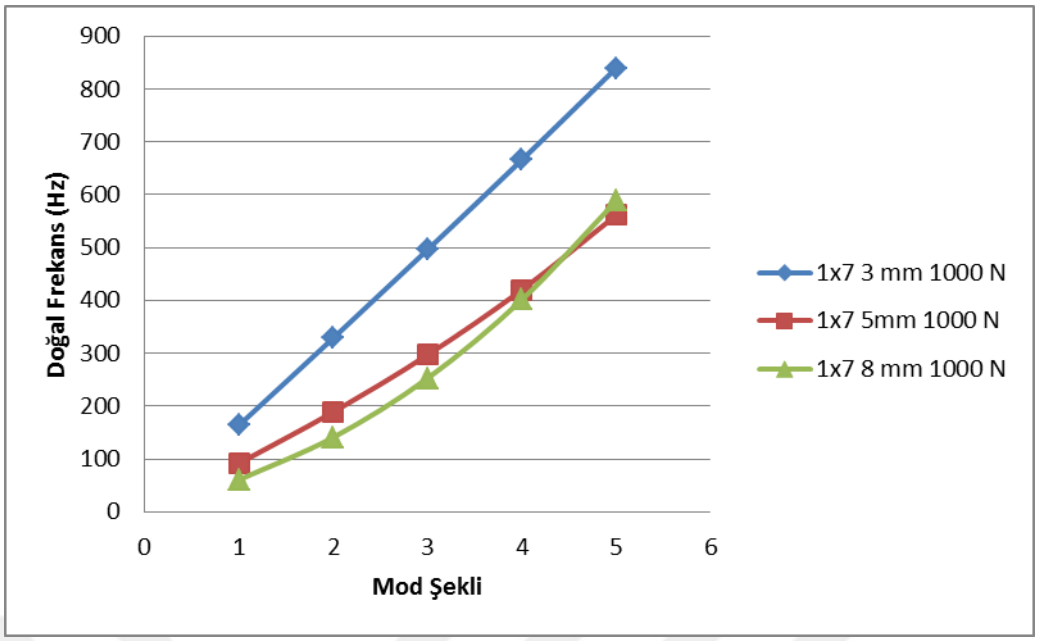
Aynı kopma dayanımına ve aynı çapa sahip halatlar içinde tel sayısına göre yapılan incelemede artan tel sayısıyla doğal frekansın artması nedeniyle düşük çalışma frekanslarında sarım sayısı daha fazla olan halat rezonans açısından tercih edilebilir. (Çizelge 7.9 ve şekil 7.3)

Çizelge 7.1 Farklı uzunluklardaki modellerin karşılaştırılması

	200 mm Uzunluğundaki Katı Model için Sürtünmeli ve Ayrılmasız Temas Sonuçları Farkı (%)	**500 mm Uzunluğundaki Katı Model için Sürtünmeli ve Ayrılmasız Temas Sonuçları Farkı (%)**
1	3,8	0,13
2	12,1	0,15
3	20,4	0,20
4	26,6	0,27
5	30,5	0,34



Şekil 7.3. Aynı çap ölçüsündeki farklı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması



Şekil 7.4. Farklı çap ölçüsündeki aynı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması

Çizelge 7.2 1x7 3 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x7 3mm							
1000 N				**800 N**			
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	164	164	150	1	147	147	161
2	329	329	320	2	294	295	300
3	493	496	480	3	441	445	442
4	658	666	654	4	588	598	600
5	822	840	875	5	735	756	735
500 N				**400 N**			
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	116	116	107	1	104	104	107
2	232	234	231	2	208	209	210
3	349	354	352	3	312	318	310
4	465	478	462	4	416	431	421
5	581	608	607	5	520	550	528

Çizelge 7.3 1x7 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x7 5 mm							
1000 N				**800 N**			
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	91	92	98	1	81	82	84
2	182	189	186	2	163	171	184
3	273	297	301	3	244	271	267
4	364	420	430	4	325	388	388
5	455	561	566	5	407	524	517
500 N				**400 N**			
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	64	65,499	66	1	57	59	45
2	129	139	128	2	115	127	135
3	193	227	223	3	172	210	211
4	257	333	337	4	230	313	321
5	321	461	451	5	287	439	429

Çizelge 7.4 1x7 8 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x7 8 mm							
	1000 N				**1x7 8 mm 800 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	57	61	-	1	51	55	-
2	114	141	-	2	102	131	-
3	171	253	-	3	153	241	-
4	228	401	-	4	204	388	-
5	285	588	-	5	255	574	-
	1x7 8 mm 500 N				**1x7 8 mm 400 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	40	45	-	1	40	42	-
2	81	116	-	2	81	110	-
3	121	222	-	3	121	215	-
4	161	367	-	4	161	360	-
5	202	552	-	5	202	545	-

Çizelge 7.5 1x19 3 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x19 3 mm							
	1000 N				**800 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	156	142	140	1	140	140	139
2	312	312	320	2	279	286	290
3	469	483	483	3	419	440	457
4	625	648	648	4	559	533	518
5	781	864	872	5	698	611	609
	500 N				**400 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	110	111	100	1	99	100	107
2	221	229	225	2	198	207	217
3	331	359	348	3	296	327	329
4	442	506	498	4	395	466	474
5	552	674	676	5	494	628	618

Çizelge 7.6 1x19 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x19 5 mm							
	1000 N				**800 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	89	92	93	1	80	83	92
2	179	196	197	2	160	179	176
3	268	323	322	3	240	300	298
4	358	483	483	4	320	455	455
5	447	675	691	5	400	645	642
	500 N				**400 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	63	66	56	1	57	60	54
2	126	149	144	2	113	138	135
3	190	261	257	3	170	246	254
4	253	410	408	4	226	394	401
5	316	595	597	5	283	578	571

Çizelge 7.7 1x19 8 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x19 8 mm							
	1000 N				**800 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	58	70		1	52	65	
2	116	195		2	104	188	
3	174	393		3	156	385	
4	232	666		4	208	658	
5	291	1016		5	260	1008	
	500 N				**400 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	41	60		1	37	54	
2	82	194		2	74	173	
3	123	412		3	110	368	
4	164	714		4	147	641	
5	205	1020		5	184	990	

Çizelge 7.8 1x37 5 mm halat tipi için analitik, sonlu elemanlar ve deney sonuçlarının karşılaştırması

1x37 5 mm							
	1000 N				**800 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	93	98	97	1	83	89	90
2	186	224	225	2	166	208	202
3	279	396	400	3	249	374	376
4	371	620	621	4	332	596	593
5	464	901	910	5	415	875	892
	500 N				**400 N**		
	Analitik	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**		**Analitik**	**Sonlu Elemanlar**	**Deney**
1	66	73	64	1	59	67	62
2	131	181	185	2	117	171	185
3	197	342	335	3	176	330	335
4	263	560	566	4	235	548	545
5	328	837	839	5	294	824	820

Çizelge 7.9 5 mm çapındaki halatların kopma dayanımı değerleri [19]

Halat Tipleri	**Kopma Dayanımı (N/mm^2)**
1x7 5mm	2180
1x19 5mm	2360
1x37 5mm	2310

KAYNAKLAR

[1] Kösemen, Ö., (2008), Asansör Taşıyıcı Halatlarının Statik Yük Altında Deneysel Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] Jiang, W., G., Yao, M., S., Walton, J., M., (1999), "A Concise Finite Element Element Model for Simple Straight Wire Rope Strand", International Journal of Mechanical Sciences, 41:143-161.

[3] Ghoreishi, S.R., Messager, T., Cartraud, P., 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, 49:1251-1261.

[4] Spak, K., Agnes, G., Inman, D., (2013), "Cable Modelling and Internal Damping Devolepments", Applied Mechanics Reviews, 65:1-18.

[5] Stanova, E., Federko, G., Fabian, M., Kmet, S., (2011), "Computer Modelling of Wire Stands and Ropes Part 1: Theory and Computer Implementation", Advances in Engineering Software 42:305-315.

[6] Stanova, E., Federko, G., Fabian, M., Kmet, S., (2011), "Computer Modelling of Wire Stands and Ropes Part 2: Finite Element Based Applications", Advances in Engineering Software 42:322-331.

[7] Jun, M. A., Shi-rong, G., De-kun, Z., (2008), "Distrubition of Wire Deformation within Strands of Wire Ropes", Journal of China University of Mining and Technology, 18:475-478.

[8] Wu, J., (2014), "The Finite Element Modelling of Spiral Ropes", International Journal of Coal Science Technology 1(3): 346-353.

[9] Erdönmez, C., İmrak, E., (2011), "Tel Halatların Parametrik Denklemler ile Modellenmesi ve Gerilim Analizi", İTÜ Dergisi, 10:93-104.

[10] Yu, Y., Chen, Z., Liu, H., Wang, X., (2014), "Finite Element Study of Behavior and Interface Force Conditions of Seven Wire Strand Under Axial and Lateral Loading", Construction and Building Materials, 66:10-18.

[11] Feyrer, K., (2015), Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability, Second Edition, Springer, Berlin.

[12] Zweifel, O., (1961), "Zugkraftmessung in Drahtseilen mit Transversalwellen", Schweizerische Bauzeitung, 79:347-358.

[13] Lee, H., (2014), Finite Element Simulations with Ansys Workbench 15, First Edition, SDC Publications, Kansas.

[14] Ansys Release 14.0 Mechanical User's Guide, Ansys Inc., 2011.

[15] Şentürk, Ö., (2007), "Eksenel Yüklü Tel Halat Demetlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz Edilmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[16] He, J., Fu, Z., (2001), Modal Analysis, First Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

[17] Kutay, G., Çelik Halat, http://www.guven-kutay.ch/vinc/40-1-1a-celik-halat.pdf, 25 Haziran 2016.

[18] Milli Eğitim Bakanlığı, MEB Mesleki ve Teknik Eğitim Programlar ve Öğretim Metaryelleri, Motorlu Araçlar Teknolojisi, Vinçler, http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Vin%C3%A7ler.pdf,20 25 Haziran 2016.

[19] Köşkerler Çelik Halat A.Ş, Halat Çeşitleri Monotron Halatlar, http://www.koskerler.com.tr/monotoron-1.asp.htm, 15 Nisan 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Erkan ALA

Doğum Tarihi ve Yeri : 04.05.1991 / Kırşehir

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : erknala@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Mühendisliği	YTÜ	2014
Lise	Fen Bilimleri	Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2009