

75116

**KONİK SÜRTÜNME DİSKLİ VARYATÖRÜN SONLU
ELEMENLAR METODU İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Serkan YÜRÜK

75116

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Haziran 1998

Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Haziran 1998

Tez Danışmanı

: Yrd. Doç. Dr. Serdar TÜMKOR

Diğer Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Aybars ÇAKIR

Yrd. Doç. Dr. Ata MUGAN

**Y.Ö. YÜKSEK
DOKÜMAN**

HAZİRAN 1998

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, sayısal çözüm yöntemlerinden biri olan sonlu elemanlar metodu kullanılarak sürtünmeli konik varyatör sisteminin analizi yapılmıştır. Burada öncelikle sonlu elemanlar metodu teorisine yer verilmiş, daha sonra bu method üzerine yazılmış olan ANSYS programı ana hatlarıyla tanıtılmaya çalışılmıştır. Tezin son aşamasında da tarif edilen işlem adımlarına uygun olarak varyatör mekanizmasının analizi gerçekleştirilmiştir.

Gerek öğrenim yaşıntım boyunca, gerekse tez çalışmam süresince bana destek olan aileme ve tezin hazırlanması süresince çalışmalarımı yönlendirerek bana yol gösteren Sayın Hocam Y.Doç. Dr. Serdar TÜMKOR' a teşekkürlerimi sunarım.

Adapazarı 1998

Serkan YÜRÜK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
NOTASYON LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. SONLU ELEMANLAR METODU.....	3
2.1 Genel Bilgi.....	3
2.2 Sonlu Elemanlar Metodunun tanımı.....	5
2.3 Eleman Şeklinin Seçimi.....	6
2.4 Sonlu Elemanlar Metodunun Üstünlükleri ve Sınırlamaları.....	12
2.5 Sonlu Elemanlar Metodunda Hata Kaynakları.....	13
2.6 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Alanları.....	14
2.7 Sonlu Elemanlar Metodunun Teorisi.....	15
2.7.1 Virtual Yer Değiştirme Prensibi.....	18
2.8 Sonlu Elemanların Elastik Sürekli Ortamlara Uygulanması.....	22
2.9 Değişken Fonksiyonları (İnterpolasyon Fonksiyonları)	23
BÖLÜM 3. ANSYS SONLU ELEMANLAR PAKET PROGRAMI.....	29
3.1 Genel Bilgi.....	29

3.2	ANSYS Menüleri ve Ana Ekran.....	30
3.3	ANSYS' de İşlemciler.....	34
3.4	ANSYS' de Kullanılan Koordinat Sistemleri.....	34
3.4.1	Global ve Lokal Koordinat Sistemi.....	34
3.4.2	Nodal Koordinat Sistemi.....	35
3.4.3	Eleman Koordinat Sistemi.....	36
3.4.4	Sonuç Koordinat Sistemi.....	37
3.4.5	Görüntü Koordinat Sistemi.....	37
3.5	ANSYS' de Analiz Adımları.....	38
3.5.1	İncelenen Yapının Modellenmesi ve Ağ Yapısının Oluşturulması.....	38
3.5.2	Yüklerin ve Sınır Şartlarının Uygulanması ve Çözümün Elde Edilmesi	41
3.5.3	Sonuçların İncelenmesi ve Gösterimi.....	43
BÖLÜM 4.	ANSYS PROGRAMI KULLANILARAK KONİK DİSKLİ VARYATÖR MEKANİZMASININ ANALİZİ	
4.1	Konik Varyatör.....	45
4.2	İncelenen Konik Varyatöre Ait Veriler.....	47
4.3	Ring Parçasının analizi.....	50
4.3.1	Ring Parçasına Ait Log Dosyası.....	52
4.4	Sürtünme Konisinin Analizi.....	63
4.4.1	Sürtünme Konisine Ait Log Dosyası.....	67
BÖLÜM 5.	SONUÇLAR.....	82

KAYNAKLAR.....84

ÖZGEÇMİŞ.....85



NOTASYON LİSTESİ

k	Yay katsayısı
F	Sisteme etki eden kuvvet
u	Şekil değişimi miktarı
f^e	Eleman kuvvet vektörü
k^e	Eleman rijidlik matrisi
u^e	Eleman yerdeğiştirme matrisi
K	Sistemin toplam rijidlik matrisi
δ	Noktasal yerdeğiştirme miktarı
W_E	Dış kuvvetlerin yaptığı iş
W_I	Sistemin iç enerjisi
l	Yay uzunluğu
A	Yayın kesit alanı
dx	Yayın birim uzunluğu
dv	Yayın birim hacmi
ε	Birim uzama miktarı
σ	Birim uzama miktarı
E	Elastisite modülü
ν	Poisson oranı
C	Elastisite matrisi
D	Differansiyel matrisi
N	Şekil fonksiyonu
B	Zorlanma şekil fonksiyonu matrisi
L	Çubuğun uzunluğu
v	Kartezyen koordinatlarda Y yönündeki yerdeğiştirme miktarı
w	Kartezyen koordinatlarda Z yönündeki yerdeğiştirme miktarı

Δ	Determinantın değeri
B	Bant genişliği
F	Düğüm noktaları arasındaki en büyük fark
S	Düğüm noktalarının serbestlik derecesi
n_g	Girişteki devir sayısı
n_{ϕ}	Çıkıştaki devir sayısı
i_{gr}	Çevrim oranı
P_g	Giriş gücü
M	Moment
F_t	Teğetsel kuvvet



ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 2.1 Analiz adımları. (S.4)
- Şekil 2.2a Üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim. (S.5)
- Şekil 2.2b Üçgen elemanlar sistemi haline getirilmiş iki boyutlu delikli cisim. (S.5)
- Şekil 2.2c Dikdörtgen prizma elemana ayrılmış üç boyutlu cisim. (S.5)
- Şekil 2.3 Birim üniform kalınlıklı iki düzlem sonlu eleman. (S.6)
- Şekil 2.4 Bir boyutlu sonlu eleman. (S.7)
- Şekil 2.5 İki boyutlu (düzlem) elemanlar. (S.7)
- Şekil 2.6 Üç boyutlu elemanlar. (S.7)
- Şekil 2.7 Aksisimetrik elemanlar. (S.8)
- Şekil 2.8 Üçgen ve dikdörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim. (S.8)
- Şekil 2.9 Uç noktasından yüklenmiş kiriş. (S.9)
- Şekil 2.10 Üçgen elemanlarla oluşturulmuş model. (S.10)
- Şekil 2.11 Kuadratik elemanlarla oluşturulmuş model. (S.10)
- Şekil 2.12 A noktasındaki miktarının düğüm sayısına göre değişimi. (S.11)
- Şekil 2.13 B noktasındaki gerilme durumunun düğüm sayısına göre değişimi. (S.11)
- Şekil 2.14 Bir boyutlu yay eleman. (S.15)
- Şekil 2.15 Yüklü haldeki yay eleman. (S.15)
- Şekil 2.16 Yaylardan oluşmuş bir sistem. (S.17)

Şekil 2.17	Yay sistemi. (S.18)
Şekil 2.18	Bir boyutlu çubuk eleman. (S.21)
Şekil 2.19	Bir boyutlu eleman ve düğüm sayısı. (S.24)
Şekil 2.20	Bant genişliğinin azaltılması. (S.28)
Şekil 3.1	Ön ayarlar ekranı. (S.31)
Şekil 3.2	Ansys açılış ekranı. (S.32)
Şekil 3.3	Ana menü ve alt menüler. (S.33)
Şekil 3.4	Global koordinat sistemleri. (S.35)
Şekil 3.5	Eleman koordinat sistemi. (S.36)
Şekil 3.6	Eleman koordinat sistemi. (S.36)
Şekil 3.7	Ansys’ de temel sonlu eleman çeşitleri. (S.39)
Şekil 4.1a	Konik varyatör mekanizmasının önden görünüşü. (S.46)
Şekil 4.1b	Konik varyatör mekanizmasının perspektif görünüşü. (S.46)
Şekil 4.2	Konik varyatör mekanizmasının açılmış durumu. (S.47)
Şekil 4.3	Konik varyatör mekanizmasının n dıştan görünüşü. (S.47)
Şekil 4.4	Ring’ e ait ana ölçüler. (S.48)
Şekil 4.5	Sürtünme konisine ait ana ölçüler. (S.48)
Şekil 4.6	Ring parçası. (S.50)
Şekil 4.7	Merkezden yüklenmiş basit bir kiriş elemanı. (S.51)
Şekil 4.8	Çap doğrultusunda yüklenmiş dairesel disk. (S.51)
Şekil 4.9	Simetrik parçalara ayrılmış ring parçası. (S.52)
Şekil 4.10	Ağ yapısı. (S.60)
Şekil 4.11	Deforme olmuş şekil. (S.60)
Şekil 4.12	Von-Mises kriterine göre eşdeğer gerilme dağılımı. (S.61)

- Şekil 4.13 Von-Mises kriterine göre eşdeğer gerilme dağılımı. (S.61)
- Şekil 4.14 Üçgen piramit elemanlarla gerilme dağılımı. (S.62)
- Şekil 4.15 İç kısma yiv açılması durumundaki gerilme dağılımı. (S.62)
- Şekil 4.16 Sürtünme konisinin perspektif görünüşü. (S.63)
- Şekil 4.17 Sürtünme konisinin deformasyon hali. (S.64)
- Şekil 4.18 Sürtünme konisindeki gerilme dağılımı. (S.64)
- Şekil 4.19 Sürtünme konisinin deformasyon hali. (S.65)
- Şekil 4.20 Sürtünme konisindeki gerilme dağılımı. (S.65)
- Şekil 4.21 Sürtünme konisinin deformasyon hali. (S.66)
- Şekil 4.22 Sürtünme konisindeki gerilme dağılımı. (S.66)

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Ansys’ de yük çeşitleri. (S.41)



ÖZET

Karşılaştığımız bir çok mühendislik probleminin çözümü için analitik çözümler elde etmek çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Analitik çözümler bir problemi basitleştirerek sonuca gitmeye çalışırlar.

Mekanik tasarımda karşımıza çıkan ve matematiksel olarak tanımlanması kolay olmayan şekiller, karmaşık malzeme özellikleri, değişik sınır koşulları vb.. gibi durumlar içeren problemler için yaklaşık fakat kabul edilebilir bir çözüme ihtiyaç vardır, bu da sayısal analiz yöntemleriyle mümkün olmaktadır.

Bir ürünün tasarım aşamasından, üretim ve test aşamalarına kadar her alanda kullanılan bir çok sayısal yöntem mevcuttur. Sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodu ve sınır elemanlar metodu mühendislik alanında en sık karşılaşılan sayısal analiz yöntemleridir.

Sonlu Elemanlar Metodu kırk yılı aşkın bir süredir differansiyel denklemlerin çözümü için bilim ve mühendislik alanında kullanılan nümerik bir yöntemdir. Bu metod çok geniş sahalarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Sonlu Elemanlar Metodunun yapısal analiz (Statik, Modal, Frekans, Harmonik, Dinamik, Tayf), termal analiz, elektromanyetik analiz, akışkanlar mekaniği ve akustik olmak üzere çok geniş bir yelpazede uygulama alanı bulması ve makul sonuçlar vermesi metoda olan ilgiyi arttırmış ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur. Burada nümerik yöntemlerle elde edilen çözümlerin gerçek çözümler için bir yaklaşım olduğu unutulmamalıdır. Gerçek çözümler ile yaklaşık çözümler arasındaki farkın derecesi çözülecek problemin yapısına ve ele alış tarzına bağlıdır.

Bir probleme, sayısal analiz yöntemlerini uygulayıp, gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için bir ön çalışmanın yapılması gereklidir. Analiz yapan kişinin sayısal analiz yöntemlerinin beraberinde getirdiği kısıtları, incelenen yapının maruz kaldığı gerilme tiplerini ve sınır şartlarını çok iyi bilmesi gereklidir. Daha önce yapılan benzer çalışmaların ve bunların sonuçlarının incelenmesi bu konuda analiz yapan kişiye yardımcı olabilir. Yöntemin tam olarak anlaşılması, problemin çözümünde yapılması gerekli olan kabüllerin doğru bir şekilde uygulanmasını sağlar.

Sayısal bir yöntem olan ve çok yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu çok basit problemleri çözmek için bile belirli bir programlama diline ihtiyaç duyar. Sonlu elemanlar metodunda elle çözülebilecek problemler sınırlı olduğundan daha komplike problemlerin çözümü için mutlaka bilgisayarlara ihtiyaç vardır. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişme, bilgisayarların kapasitelerinde bir artış, maliyetlerde de bir düşüş getirmiştir. Bu durum sonlu elemanlar metodunun gelişmesinde ve yaygınlaşmasında en büyük faktörlerden biri olmuştur.

Günümüzde sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm için yazılmış bir çok program mevcuttur. Bunların içinde en yaygın olarak kullanılanlardan biri de ANSYS (Analysis System) programıdır. İleriki bölümlerde sonlu elemanlar yöntemi ve ANSYS paket programı hakkında daha detaylı bilgi verilmiş ve ANSYS programı kullanılarak konik sürtünme diskli varyatörün analizi yapılmıştır.

THE ANALYSIS OF VARIABLE SPEED DRIVE WITH CONICAL DISKS USING FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

The solution method that the engineer has available for the design of structural system can be divided into two groups, analytical and numerical. Analytical solutions to the engineering and science problems are possible only if the geometry and boundary condition of the problem are simple.

In a lot of engineering problem, generally machine and structural systems consist of various structural element such as beams, links, plates, and shells or a combination of the these. Their overall geometry becomes extremely complicated and cannot be represented by a single mathematical expression. The solution problem with complex geometry, boundary condition and loading become possible only through numerical approximations. In spite of their versatility, however, numerical solutions are only approximation to the actual solution. The degree of correlation between these approximations and actual solution depend on complication of problem. Analytical solution also provides a means of checking numerical result for accuracy and convergence.

In recent years, numerical methods become popular due to rapid advancements in computer technology and its availability to engineer. In these methods, Finite Element Method is the most popular method in engineering science.

The roots of the method can be traced back to three separate research group; engineers, physicists and applied mathematicians. Although in principle published already, the finite element method obtained its real impetus from the independent developments carried out by engineers. Important original contributions appeared in papers by Turner and Argyris and Keksey. The name "finite element method" was presented for plane stress analysis. Since then, a large amount of research has been devoted to the technique, and a very large number of publications on the finite element method are available at present.

The rapid development of the finite element method as an analysis tool essentially began with the advent of the electronic digital computer. Using the finite element method on digital computer, the numerical solution of a complex structural problem that is including algebra equation becomes possible and very effective.

The basic concept of the finite element method is divide a solution region into so called finite element of several convenient shapes such as truss, triangles or rectangular, brick, tetrahedran, ring, etc. (Truss in one dimensional cases triangles or rectangularin two dimensional cases and tetrahedral or brick in three dimensional cases) The unknown field variable is expressed in term of values of the field variables at specified points called nodes. Nodes connect elements to the next elements. Nodes usually lie on the element boundaries. But some elements may have a few interior nodes. The more number of elements used to model, the

problem, and the better approximation to the solution obtained. Note that the data storage requirement and solution time rapidly with an increase in the number of element.

The finite element method of analysis has been recognised as a power tool and has been effectively used to obtain solution in structural analysis (Static, Modal, Harmonic, Transient, Dynamic, Spectrum etc.), thermal analysis and fluid dynamic etc.

One of the chief features of the finite element method is the way curved boundaries can be realistically treated by using higher order isoparametric elements. On the other hand, it has ability to treat anisotropic materials discontinuous and non-linear structural problems.

In spite of above advantages, there are some disadvantages of finite element method. It is that in order to solve even very simple problems a computational approach is needed. Also solution of complex problem is needed large high-speed digital computer. Sometimes solution time goes up further if the problem is non-linear.

An idealized analysis procedure will bring all steps into proper order. The procedure includes initial planning, deciding if a finite element analysis is needed, doing a needed analysis, and presenting the results. Following this procedure should allow the user to perform an effective and efficient analysis. A block diagram in the next page shows the analysis step.

When the engineer has created a conceptual design ready for analysis or has an existing design failure needing analysis, the first step is to define the analysis problem as clearly as possible. The definition includes the determination of what type of analysis is to be performed (static, dynamic, etc.), whether the solution will be two or three dimensional, and what the criteria will be for the analysis.

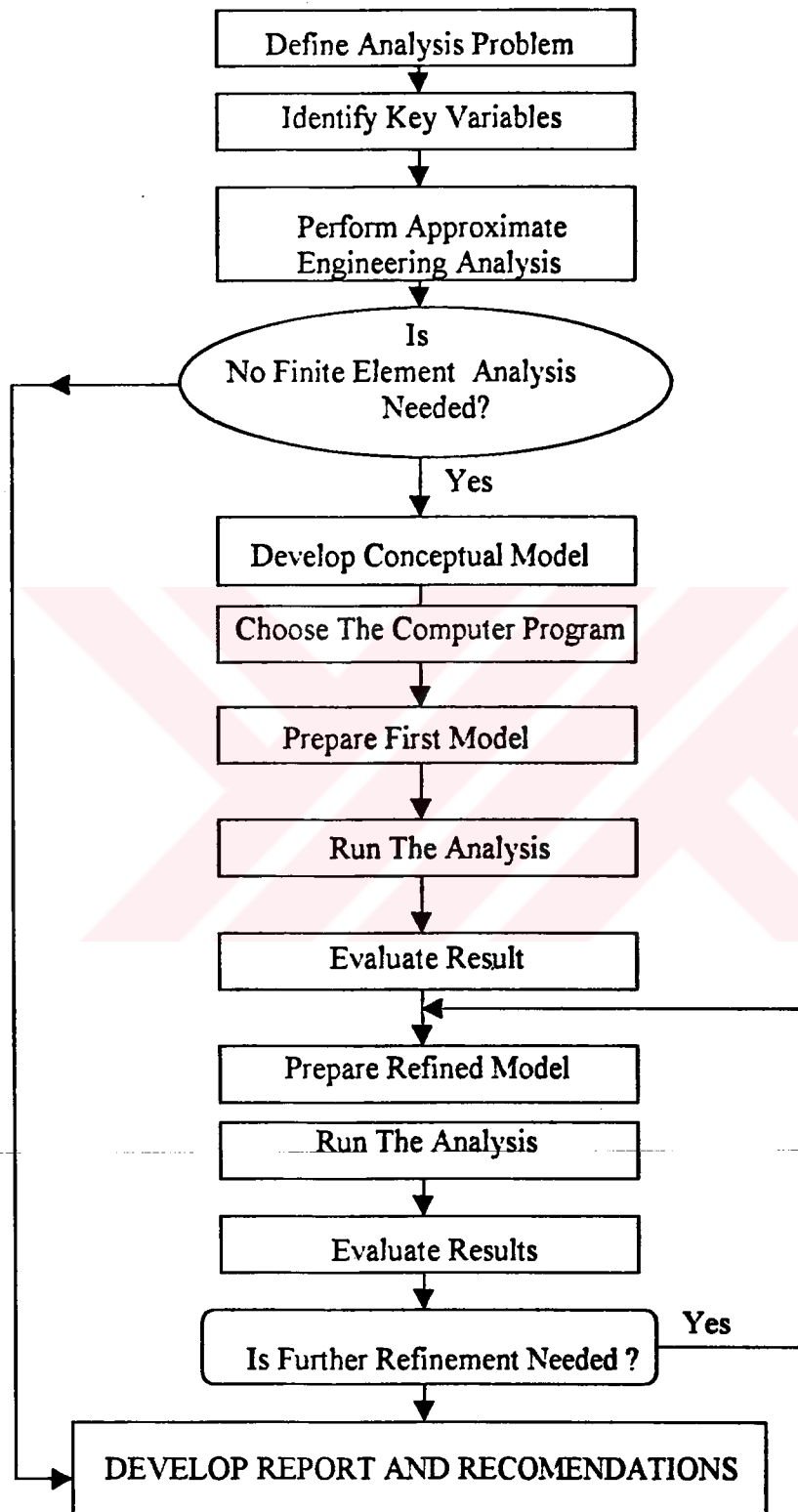
The criteria for the analysis identify the important variables for evaluation. These could include the maximum stress, the average stress, the strain, and the deformation, fracture load, yield load, critical stress location, or several other factors. The most critical of these serve to guide the modelling and to guide the presentation of result.

After completion of the problem definition, an approximate engineering analysis is defined. Using approximate solutions, estimate the values of critical variables identified in the problem. Based on these approximate results and the degree of confidence placed in the approximate solutions, determine if you need to do a finite element analysis.

If the decision is yes, begin by developing a conceptual finite element model. The analyst developing conceptual model will lay out the geometry of the model, choose the kind of element that would be best suited, and roughly plan the mesh for the model. Examine the structure for any symmetries that exist in the geometry and loading conditions, and from those symmetries select a repeating section that will define the model geometry. Exploiting symmetry reduces the effort required to create a model as well as reducing the number of computations and increasing the numerical accuracy.

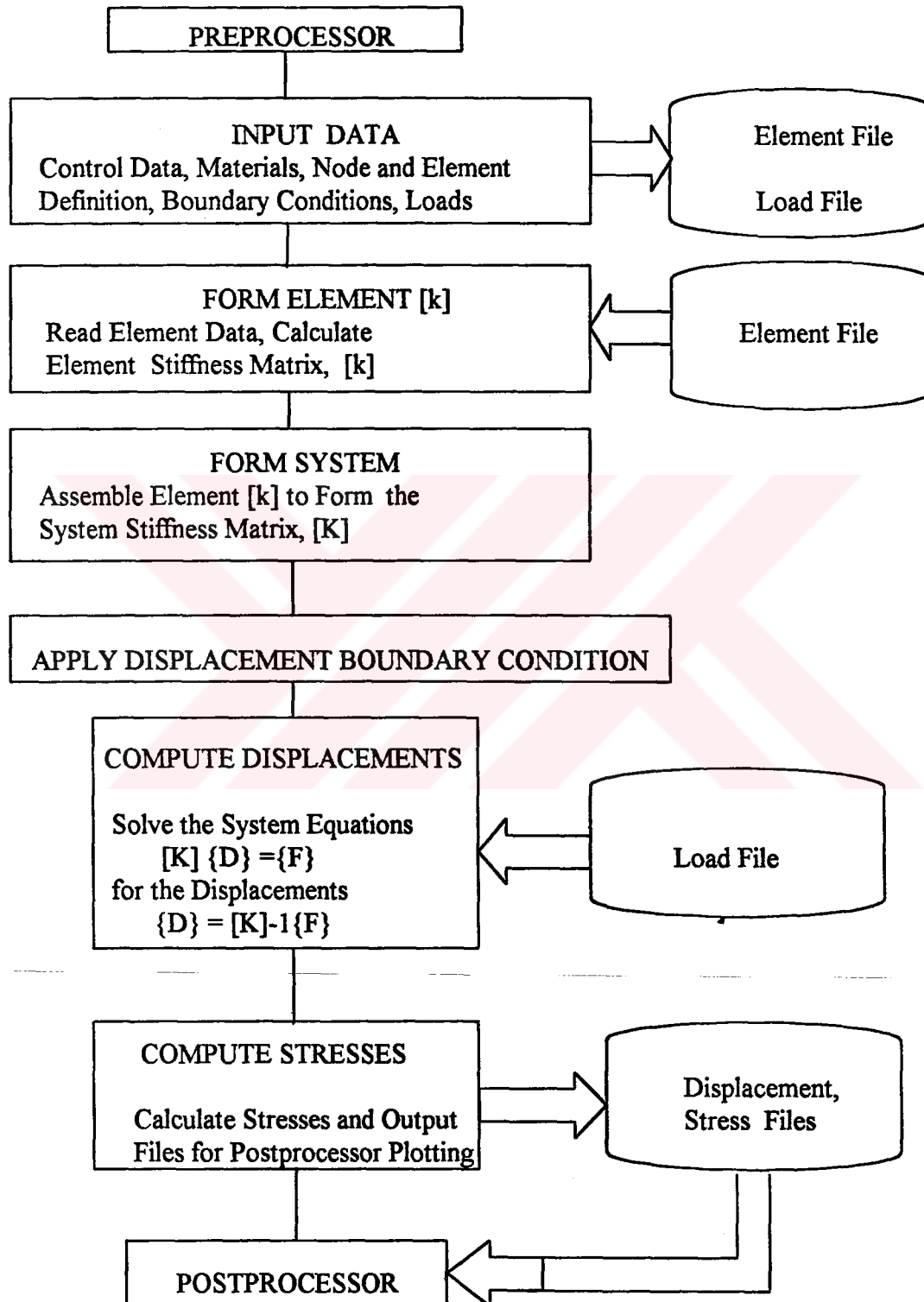
For the section model choose the type of finite element formulation needed to represent correctly the structural behaviour. Also, identify any supporting element types needed for special interfaces or boundary condition. Finally sketch a rough mesh plan making an effort to lay out the element subdivisions according to expected

solution variations. Completion of the conceptual model will provide the information needed to choose the proper computer program to use.



The Analysis Step by Step

There are three stages, which describe the use of any existing finite element program.



Finite Element Computer Program Block Diagram

The preprocessing stage creates the model of the structure from inputs provided by the analyst. A preprocessor then assembles the data into a format suitable for execution by the processor in the next stage. The processor is the computer code that generates and solves the system equations. The third stage is postprocessing. The solution in numeric form is very difficult to evaluate except in the simplest cases. The postprocessor accepts the numeric solution, presents selected data, and produces graphic displays of the data that are easier to understand and evaluate.

The sort history of ANSYS finite element analysis program can be explained briefly, as below.

Swanson Analysis System, Inc. (SASI) was founded in 1970 by Dr. John Swanson to develop computer-based technology for engineering analysis. The ANSYS finite element program is the major product of SASI. It was first developed for use by the power generation industry. The ANSYS program is one of the most widely recognised large-scale general-purpose programs for engineering analysis available today. It is used world wide for solutions to design challenges in the aerospace, automotive, power, consumer, machinery, chemical, biomechanics, and electrical/electronics industries. Especially ANSYS\Mechanical is used design analysis program for determining displacement, stress, forces, temperatures, and pressure distributions, such as thermal and structural characteristics of printed circuit board. To support this broad range of use, the ANSYS program includes powerful capabilities such as preprocessing, solid modelling, structural, thermal, magnetic, fluid flow and coupled field analysis postprocessing, premier graphics capabilities, and design optimization.

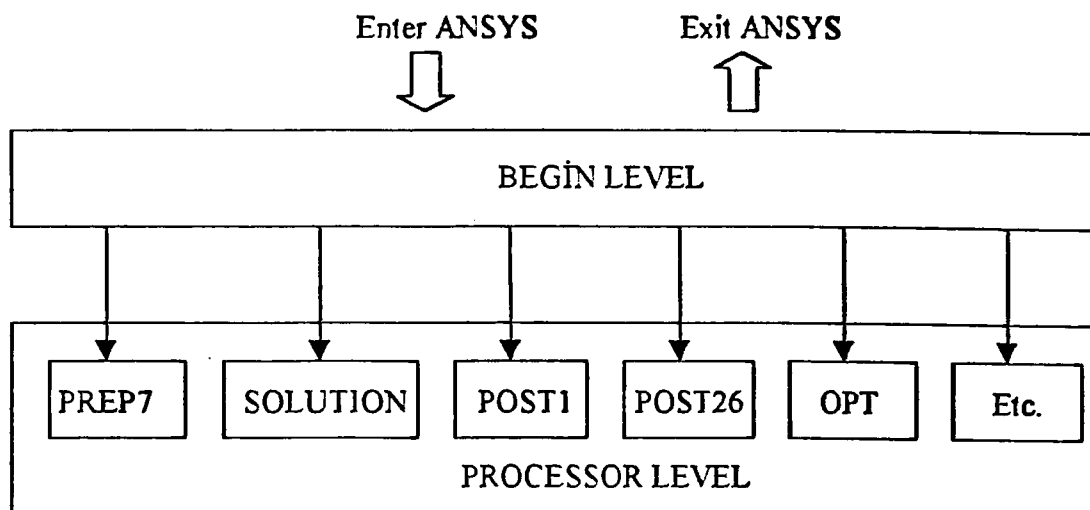
The ANSYS program is continually revised and updated to enhance existing features, to add new finite element analysis technology, and to make use of advancements in computer hardware. All of the powerful capabilities work together to increase productivity in model building, and provide high quality analysis tools.

The main idea of a lot of companies is the same. They try to produce the highest quality product at the lowest cost. The ANSYS program allows engineers to construct computer models of structure or machine components, apply operating loads to them, and study the physical responses such as stress levels or temperature distributions. This process gives design-engineering groups and firms an alternative to the multiple-prototype building, testing, and rebuilding. Thus, the design and manufacturing cost reduce.

The ANSYS program is organized into two basic levels: Begin level and Processor (or Routine) level.

The begin level acts as a gateway into and out of the ANSYS program. It is also used for certain global program controls such as changing the jobname, clearing the database, and making copies of binary files. When you first enter the program, you will be at the Begin level.

At the Processor level, several processors (routines) are available, each serving a specific purpose. For instance, the general Preprocessor (PREP7) is where you build the model, the solution processor (SOLUTION) is where you apply loads and obtain the solution, and the general postprocessor (POST1) is where you evaluate the results of solution.



ANSYS Program Organization

There are different analysis techniques in the ANSYS finite element program. Some of them are "Structural Analysis", "Thermal Analysis", "Flotran Analysis", and "Coupled Field Analysis"

Structural analysis is the most common application of the finite element method in Mechanical Engineering. There are many types of structural analysis in the ANSYS program. Such as static, modal, harmonic, transient dynamic, spectrum, and buckling.

A static analysis calculates the effects of steady loading conditions on a structure, while ignoring inertia and damping effects, such as those caused by time-varying loads. A static analysis can, however, include steady inertia loads (such as gravity and rotational velocity), and time-varying loads that can be approximated as static equivalent loads (such as the static equivalent wind and seismic loads commonly defined in many building codes).

Static analysis is used to determine the displacements, stresses, strain, and forces in structures or components caused by loads that do not induce significant inertia and damping effects. Steady loading and response conditions are assumed; that is, the loads and the structure's response are assumed to vary slowly with respect to time. The kinds of loading that can be applied in a static analysis include:

- Externally applied forces and pressures
- Steady-state inertial forces (such as gravity or rotational velocity)
- Imposed (non-zero) displacement
- Temperatures (for thermal strain)
- Fluences (for nuclear swelling)

The procedure for a static analysis consist of three main steps:

Build the model.

1. Apply loads and obtain the solution.
2. Review the results

In the first step to build the model, you specify the jobname and analysis title and then use PREP7 to define the element types, element real constants, material properties, and the model geometry. These tasks are common to most analysis.

In the second step, you define the analysis type and analysis option, apply loads, specify load step option and begin the finite element solution.

In the last step, results from a static analysis are written to the structural results file, Jobname.RST. They consist of following data:

- Primary data:
 - Nodal displacements (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ)
- Derived data:
 - Nodal and element stresses
 - Nodal and element strains
 - Element forces
 - etc.

You can review these results using POST1, the general postprocessor, and POST26, the time-history processor.

To review results in POST1 or POST26, the database must contain the same model for which the solution was calculated. The result file (Jobname.RST) must be available.

In this thesis, a computer program based on finite element method called ANSYS was used to determine stress; strain and displacement on the elements of variable speed drive mechanism (variator).

The main aim of this study is to show the designer to obtain the required dynamic characteristics of a structure by using the computer effectively.

Moreover in the thesis not only the ANSYS program was explained, but also the finite element theory that will help any user to understand structure of the program, was able to be presented. Therefore, in chapter 2 after giving general information about finite element method, the basic expressions of method for structural applications are presented.

In chapter 3, structure and content of ANSYS program were explained, after giving a general information on it.

In chapter 4, a general knowledge about variable speed drive with conical disks. In addition to, the solution are obtained for this mechanism. The results are shown as graphics.

In chapter 5 that is the last chapter of thesis, result were reviewed and generally discussed and suggestion were presented.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Sonlu elemanlar yöntemi son yıllarda hızla gelişen ve mühendislerin karşılaştığı karmaşık fiziksel problemlerin birçok çeşidine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal analiz yöntemlerinden biridir.

Çoğu mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin analitik çözümü yerine kabul edilebilir bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki tam çözüm imkansız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Sonlu elemanlar metodu karmaşık bir yapıya sahip olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle bölgenin tamamı için sonuçların elde edildiği sayısal bir analiz tekniğidir.

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli ortam problemlerine uygun bir sayısal çözüm tekniğidir. Sürekli ortam analiz edilecek fiziksel bir gövde, bir yapı veya cisimdir. Elastik sürekli ortamlarda bir çok mühendislik probleminin amacı, gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin hesaplanmasıdır. Sürekli ortam problemlerinde alan değişkeninin (basınç, yer değiştirme, sıcaklık, gerilme vb..) sonsuz sayıda değeri vardır. Çünkü alan değişkeni çözüm bölgesi içindeki her bir noktanın fonksiyonudur. Dolayısıyla problem sonsuz sayıda bilinmeyene sahiptir. Ana yapının sonlu elemanlara bölünmesi ve her bir eleman içinde alan değişkeninin değişiminin yaklaşım fonksiyonlarına bağlı olarak ifade edilmesiyle problemin sonlu sayıda bilinmeyene indirgenmiş olur.

Başlangıçta sonlu elemanlar yöntemi kompleks uçak yapılarındaki gerilmeleri incelemek suretiyle geliştirilmiştir ve özellikle 1960'lı yıllardan sonra uçak, uzay ve nükleer endüstride geniş ölçüde kullanılmaya başlanmıştır.

Makine mühendisliğinde de karmaşık yapılarıdaki gerilme hesabında, karma malzemelerin analizinde, çubuk, kiriş, plak ve bunun gibi elemanların titreşim problemlerinin çözümünde, burkulma yüklerinin saptanmasında, yorulma, sürünme gibi konularda, ısı transferinde ve akışkanlar mekaniğinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelmiş olduğu seviye sayesinde, sayısal çözüm yöntemlerinde karşımıza çıkan ve çok zaman alan karmaşık hesaplamaların altından kalkılmaktadır. Böylece bir problem değişik veriler göre defalarca çözülebilmekte ve sonuçlar bilgisayar ortamında grafik olarak gösterilebilmektedir.



BÖLÜM 2

SONLU ELEMANLAR METODU

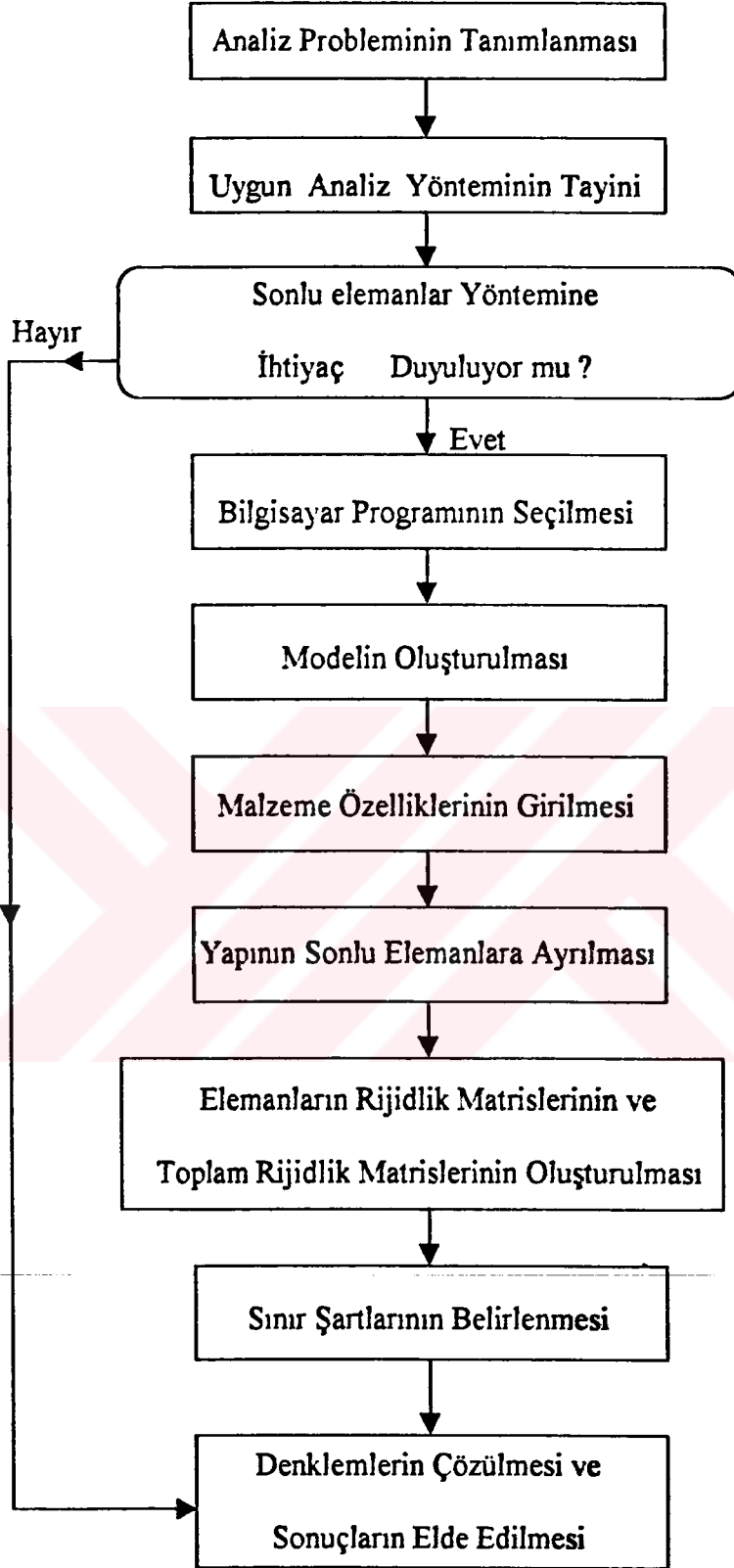
2.1 Genel Bilgi:

İdeal bir analiz işleminde bütün adımlar uygun bir sıra ile uygulanmalıdır. Analiz işlemi ön planlama, sonlu eleman analizine ihtiyaç olup olmadığının tespiti, gerekli analizlerin yapılması ve elde edilen sonuçların gösterilmesi işlemlerini içerir.[1]

Mühendis yeni bir dizayn oluştururken veya mevcut bir sistemde iyileştirmeye giderken ilk olarak yapması gereken işlem problemin tam olarak tanımlanmasıdır. Yapılacak analizin çeşidi (statik, dinamik, vb.), problemin kaç boyutta ele alınacağı analiz işleminde yer alan kriterler bu tanımlama işleminde yer alan işlemlerden bazılarıdır.

Kriterler analiz çeşidinin belirlenmesinde ve analizin ileri ki adımlarında önemli bir yer tutar. Müsaade edilen maksimum gerilme ve zorlanma değerleri kritik gerilme bölgeleri vb. diğer faktörler bu kriterleri oluşturmaktadır. Yine incelenen problemin zaman etkilişimli olup olmadığı problemin sınırlarını belirlemede yardımcı olmaktadır.

Problemin tanımlanmasından sonra uygulanacak olan en uygun analiz çeşidi belirlenir. Eğer sonlu eleman yaklaşımı uygun görülürse sonlu eleman analizinde kullanılan adımlar uygulanarak sonuca ulaşılır. Şekil 2.1, analiz adımlarının şematik durumunu göstermektedir.

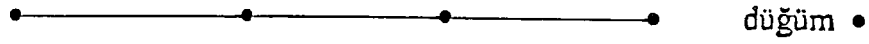


Şekil 2.1 Analiz Adımları

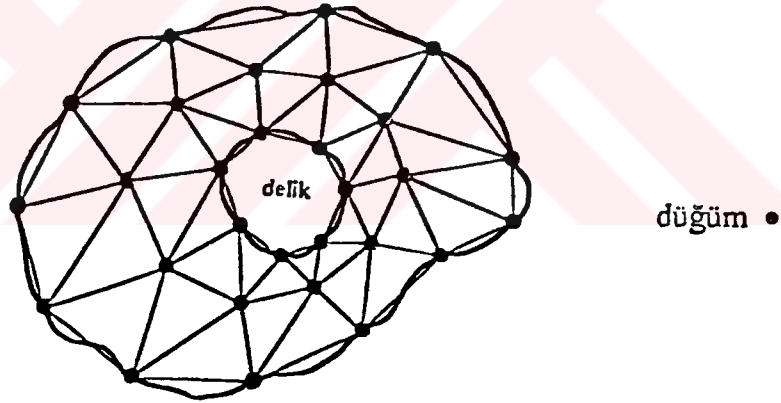
2.2 Sonlu Elemanlar Metodunun Tanımı:

Sonlu elemanlar yönteminde cismin “sonlu” boyutta çok sayıda “elemana” ayrıldığı tasavvur edilir. Metodun adı da buradan gelmektedir. Cisim uzayda n ($=1,2,3$) boyuta sahipse, n boyutlu sonlu elemanlar sistemine ayrılır.[2]

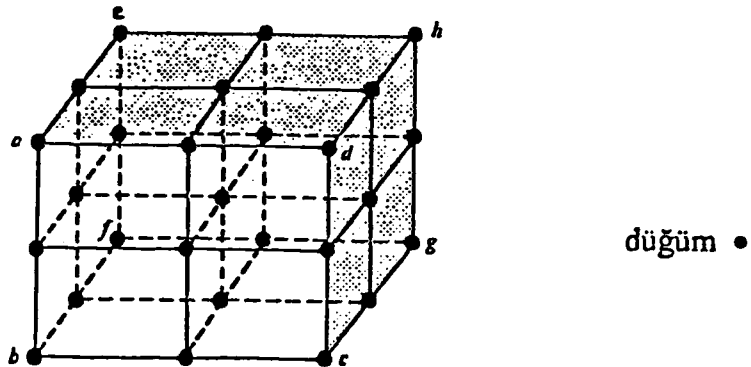
Bir boyutlu cisimler şekil 2.2a’ daki gibi düğümlere, iki boyutlu cisimler şekil 2.2b’ deki gibi çizgilerle, üç boyutlu cisimler şekil 2.2c’ deki düzlemlerle sonlu elemanlara ayrılır.[2]



Şekil 2.2a Üç doğrusal sonlu elemana ayrılmış bir boyutlu bir cisim



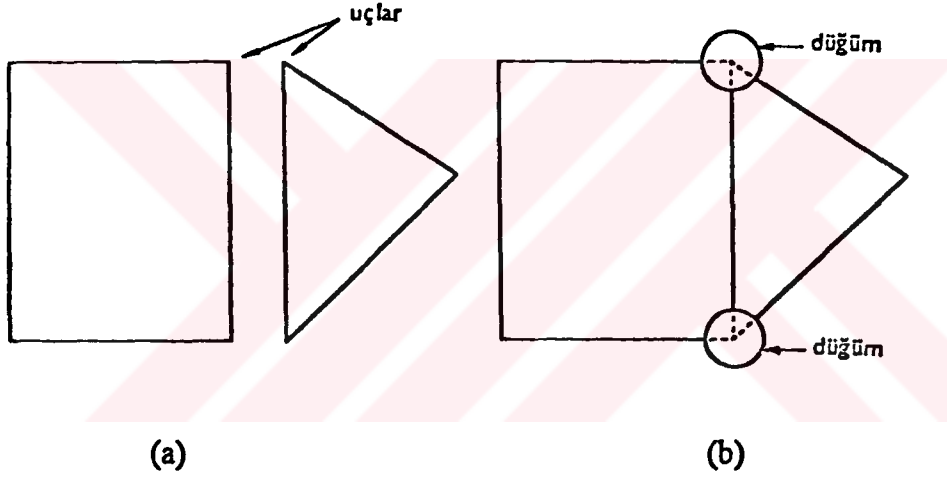
Şekil 2.2b Üçgen elemanlar sistemi haline getirilmiş iki boyutlu delikli cisim



Şekil 2.2c Dikdörtgen prizma elemana ayrılmış üç boyutlu cisim

Bir boyutlu cisimlerde sonlu elemanlar farklı uzunlukta olabilirler. Ancak iki veya üç boyutlularda elemanlar eşit olmayan boyutlarda olabileceği gibi farklı şekillerde de olabilirler. Bununla birlikte cismi temsil eden sonlu elemanlar şekil 2.2a, b ve c' deki gibi düğümlerle bağlanacaktır. Sonuçta cisim, sonlu elemanlar ve onları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan bir sistemle yer değiştirmiş olacaktır.[2]

Şekil 2.3' de elemanlar ayrı ayrı ve birbirine bağlanmış biçimde gösterilmiştir. Düğümleri, komşu elemanları uçlarından birbirine bağlayan ve onları bir arada tutan “somun-cıvata” bağlantısı gibi düşünebiliriz. (Şekil 2.3b)[2]

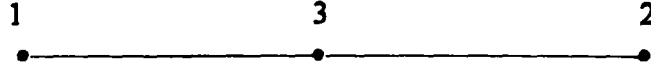


Şekil 2.3 Birim üniform kalınlıklı iki düzlem sonlu eleman

2.3 Eleman Şeklinin Seçimi:

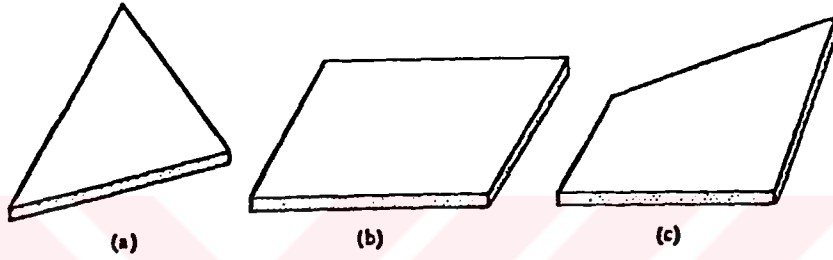
Bir sürekli ortamın ne şekilde sonlu elemanlara bölüneceğinin belirlenmesinde cismin boyutu, geometrisi, iç ve dış sınırlarının biçimi (şekil 2.2b'deki deliğin çevresi tipik bir iç sınırdır) geniş ölçüde yol gösterici olacaktır. [2]

Sürekli ortamın geometrisi, malzeme özellikleri, yükleri ve yer değişimleri bir bağımsız uzay koordinatları cinsinden ifade ediliyorsa, “bir boyutlu sonlu elemanlar” kullanılır. Söz konusu koordinat elemanın ekseni boyunca ölçülür. Şekil2.4' de bir boyutlu bir sonlu eleman gösterilmiştir. Bu sonlu elemanı komşu sonlu elemanlara bağlayan (1 ve 2) noktalarına dış düğüm noktaları, (3) noktasına iç nokta denir. [3]



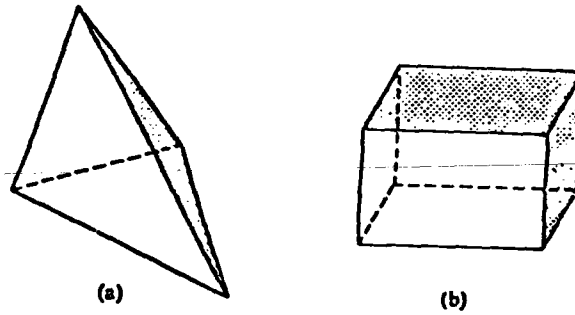
Şekil 2.4 Bir boyutlu sonlu eleman

İki boyutlu cisimlerde, eleman biçimi, cismin biçimine bağlı olarak bulunur. Eğri ve düzgün olmayan sınırlar içeren yapılarda, üçgen ve dörtgen elemanlar, dikdörtgen elemanlardan daha elverişlidir. (Şekil 2.5)



Şekil 2.5 İki boyutlu(düzlem) elemanlar: (a) üçgen, (b) dikdörtgen, (c) dörtgen

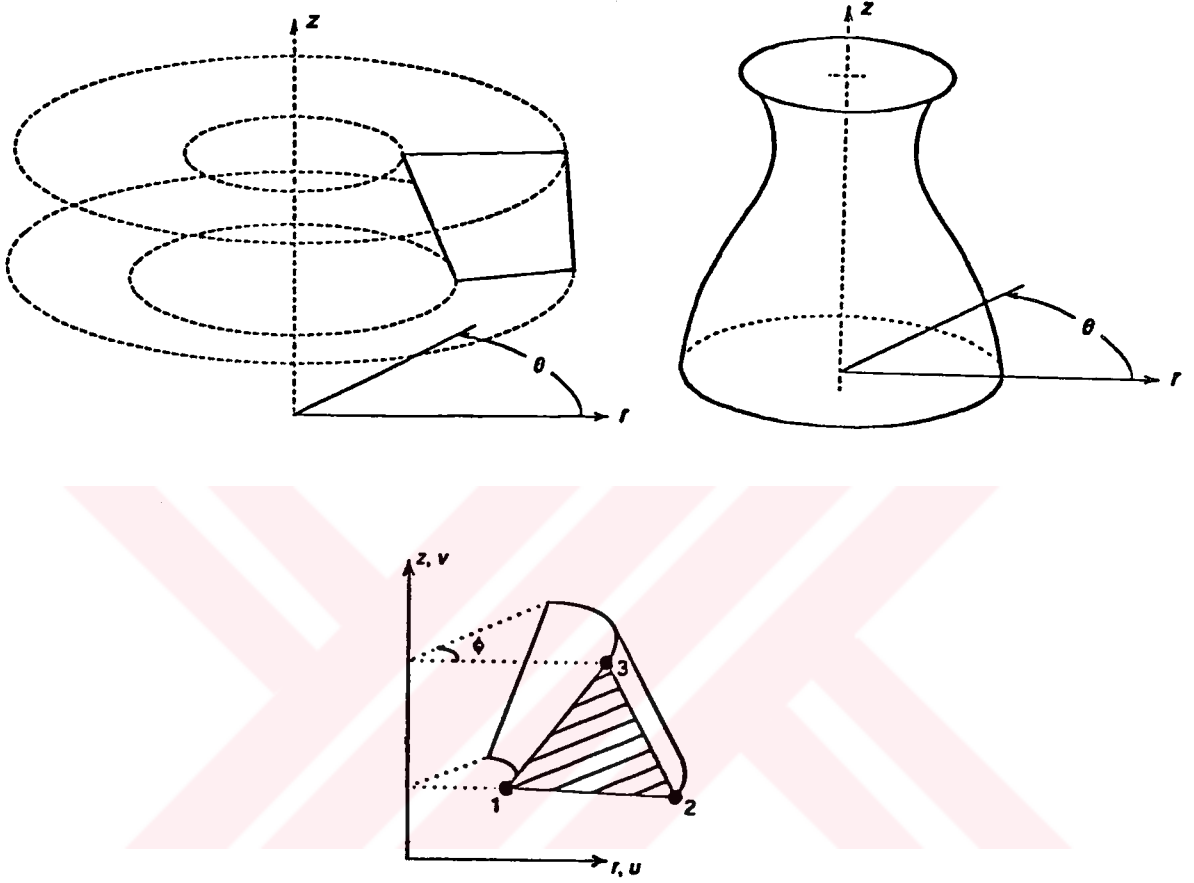
Çözüm bölgesi üç boyutlu olarak ele alınan problemlerde ise dörtyüzlü (üçgen prizma), dikdörtgen prizmadan daha iyi sonuç verir. (Şekil 2.6)



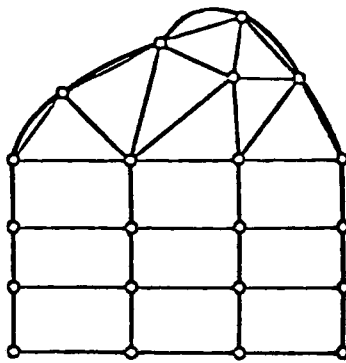
Şekil 2.6 Üç boyutlu elemanlar: (a) dörtyüzlü ve (b) dikdörtgen prizma

Eksenel simetriye sahip cisimlerde ise üçgen veya dörtgen kesitli toroid veya halka sonlu elemanlar kullanılır.(Şekil 2.7) Eksenel simetrik elemanların (aksisimetrik elemanlar) kullanılabilmesi için hem geometrinin hem de yük dağılımının y eksenine göre simetrik olması gerekmektedir. Burada silindirik koordinatlar kullanılır. Halka sonlu elemanda, özelliklerin ve değişkenlerin hiçbiri θ 'ya bağlı olmadığından bu elemanlar iki boyutlu gibi incelenebilir.

Uygulamada karışık bölme yapma belli bir eleman kullanmaktan daha uygun olabilir. (Şekil 2.8)



Şekil 2.7 Aksisimetrik Elemanlar

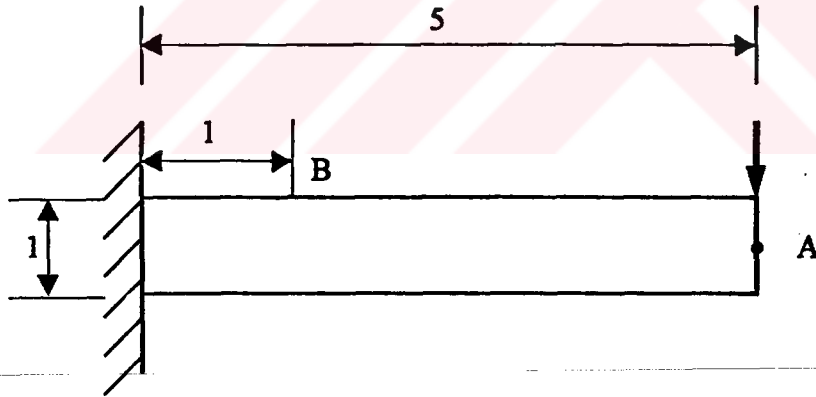


Şekil 2.8 Üçgen ve dikdörtgen elemanlara bölünmüş bir düzlemsel cisim

İncelenen cismin eğri kenarlı olduğu durumlarda gerçeğe yakın olması maksadıyla izoparametrik (eş parametrelili) elemanlar kullanılır. İzoparametrik elemanlarda sonlu elemanın her noktasının yeri ve değişimleri aynı mertebeden ve aynı şekil fonksiyonlarıyla ifade edilebilir. Böylece eğri kenarlı sonlu elemanlar kullanılarak geometrileri düzgün olmayan cisimleri veya bölgeleri daha az sayıda elemanla göstermek mümkün olmaktadır.

Kullanılan sonlu eleman sayısı arttıkça, sonuçlardaki hassasiyet o oranla artar. Fakat eleman sayısı arttıkça serbestlik derecesi de artacağından elde edilecek matrisin boyutu artacak, buda çözüm için gerekli zamanın artmasına sebep olacaktır. Bu nedenle hassas sonuçların istendiği bölgelerde ince ağ yapısı, diğer bölgelerde ise kaba bir ağ yapısına yer vermek uygun olacaktır.

Aşağıda örnek olarak kiriş teorisi ile sonlu eleman analiziyle elde edilen sonuçların A ve B noktalarındaki durumları kıyaslanmıştır.(Şekil 2.9) Burada A noktasındaki yerdeğiştirme miktarı ve B noktasındaki gerilme durumu ele alınmıştır.[1]

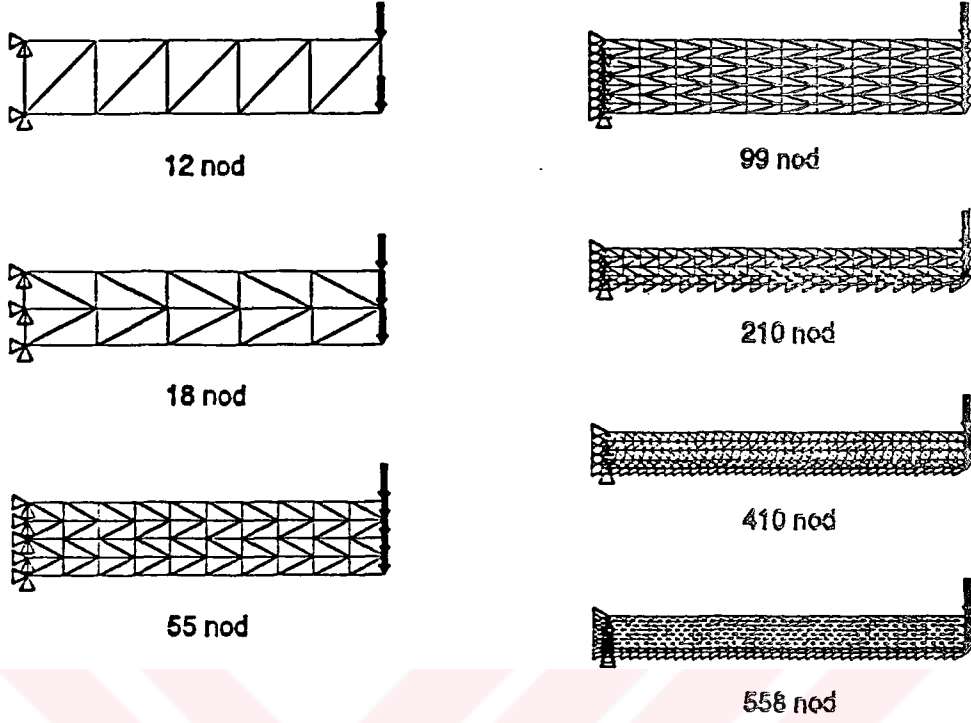


Şekil 2.9 Uç noktasından yüklenmiş kiriş

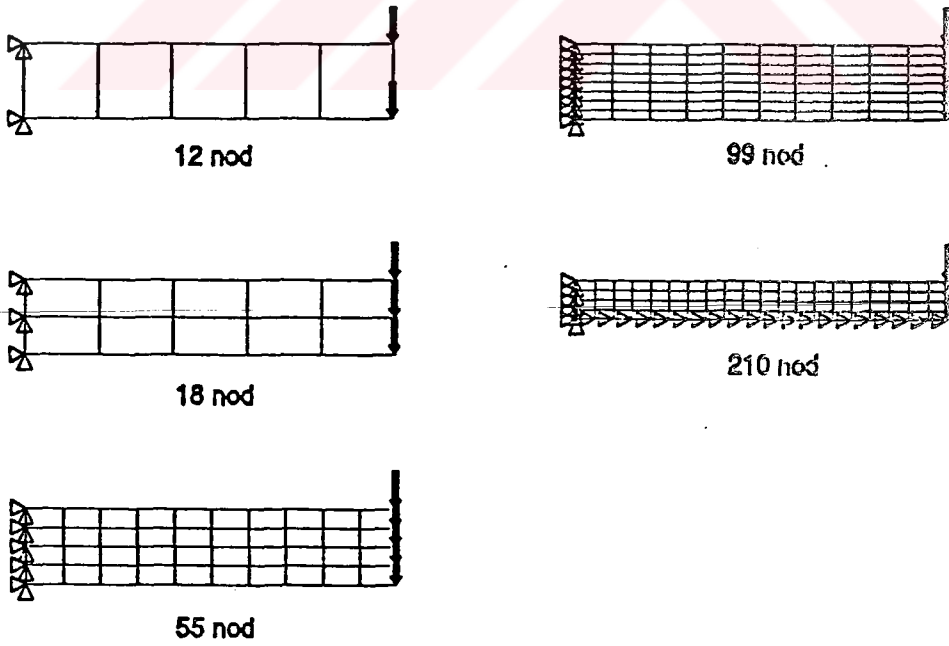
Kiriş analiz modeli başlangıçta kaba üçgen elemanlarla oluşturulmuş daha sonra ağ yapısı gittikçe ufaltılmıştır.(Şekil 2.10)

Diğer kiriş modelinde ise kuadratik elemanlar kullanılarak ağ yapısı elde edilmiştir.(Şekil 2.11)

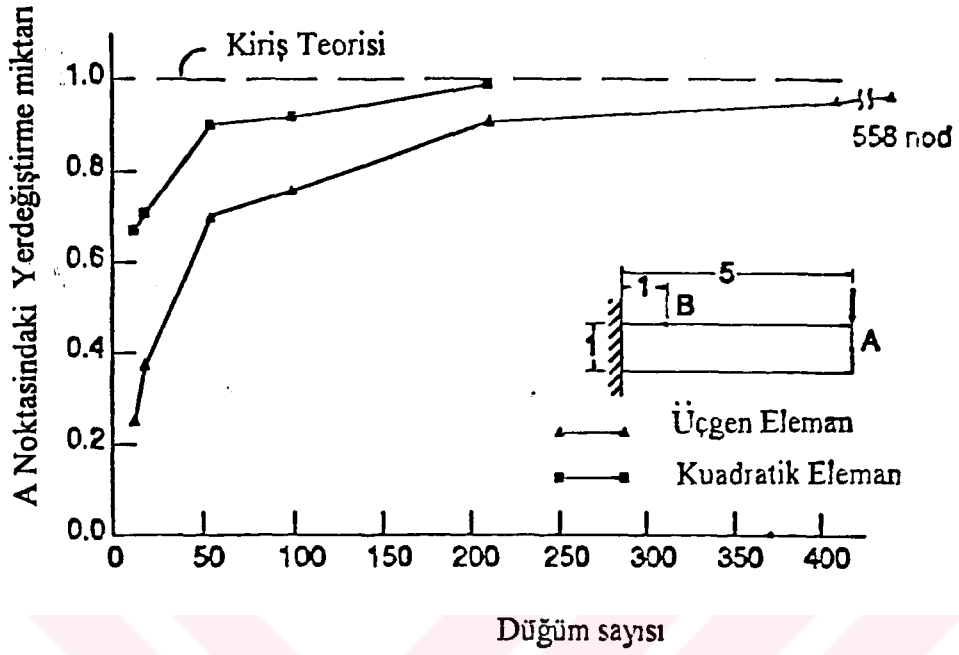
Elde edilen sonuçlarla kiriş teorisi arasındaki durum Şekil 2.12 ve Şekil 2.13 de gösterilmiştir.



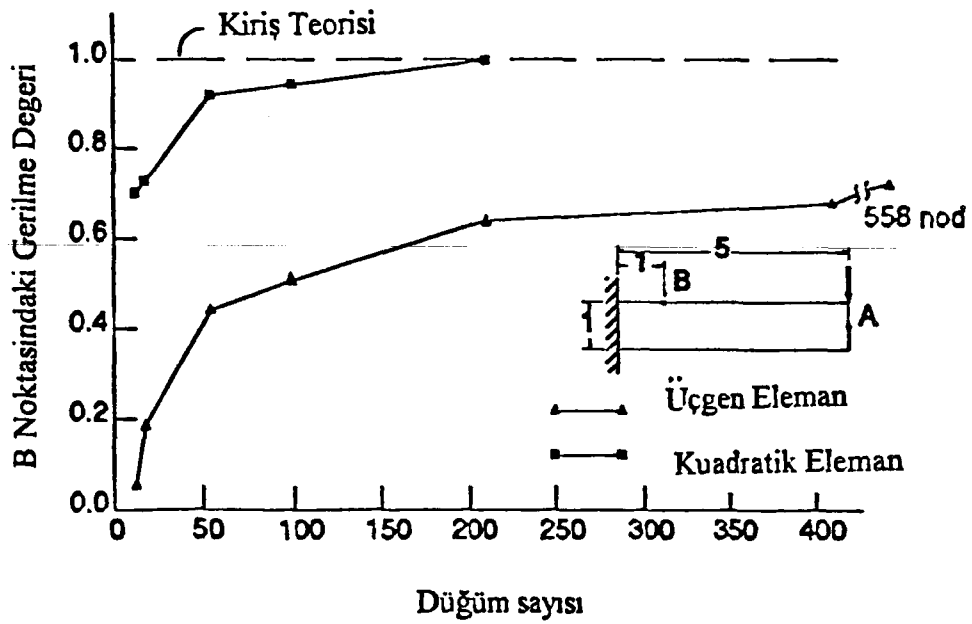
Şekil 2.10 Üçgen elemanlarla oluşturulmuş model



Şekil 2.11 Kuadratik elemanlarla oluşturulmuş model



Şekil 2.12 A noktasındaki yer değiştirme miktarının düğüm sayısına göre değişimi



Şekil 2.13 B noktasındaki gerilme durumunun düğüm sayısına göre değişimi.

Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi düğüm (nod) sayısı arttıkça teorideki sonuca yaklaşım artmaktadır.

2.4 Sonlu Elemanlar Metodunun Üstünlükleri ve Sınırlamaları:

Sayısal yöntemlerin çoğu, elektronik hesaplama çağı başlamadan önce gelişmiştir ve sonradan bu makinelere uygulanmıştır; mesela sonlu farklar yöntemi, ağırlıklı artıklar yöntemi gibi. Bu yöntemlerin aksine, sonlu elemanlar yöntemi, elektronik hesaplama çağının bir ürünüdür. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminin diğer sayısal yöntemlerle bazı ortak özelliklerinin yanında yüksek hızlı bilgisayarlara daha uygun gelen özellikleri vardır. Bu özellikler başlıca aşağıda belirtilmiştir :[3]

- a) Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık şekillerin incelenmesinde kolaylıklar sağlar. Çözüm ortamı alt bölgelere ayrılabilir, değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Bazı bölgeleri daha hassas hesaplama imkanları vardır. Bu yönleriyle sonlu elemanlar diğer sayısal yöntemlerden daha esnek ve kullanışlıdır.
- b) Sonlu elemanlar yöntemi, değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlere kolaylıkla uygulanabilir. Noktadan noktaya değişen, anizotropik, nonlineer, histerezis, zamana bağlı, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınabilir.
- c) Sonlu elemanlar yönteminde sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınabilir.
- d) Sınır şartları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra ve oldukça basit bir işlemle denklemlere dahil edilebilir. Bu sonlu elemanlar yönteminin en önemli özelliklerinden biridir.
- e) Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel olarak geliştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için güçlü ve çok yönlü bir araç olarak kullanılabilir. Bunun için genel amaçlı ve özel amaçlı bilgisayar programları geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar yönteminin yukarıda açıklanan faydalı yönlerinin yanında aşağıdaki sınırları da belirtilmelidir.[3]

- a) Bugünkü seviyesinde yöntemin bazı karmaşık olaylara uygulanmasında zorluklar vardır; Mesela çatlama (cracking), kırılma(fracture) davranışı, temas(contact) problemleri, yumuşayan (work-softening) nonlineer malzeme davranışı gibi. Bu konular üzerinde çalışmalar devam etmektedir.
- b) Sonlu elemanlar yöntemi, ancak malzeme parametreleri veya katsayıları iyi tanımlanmışsa, gerçekçi sonuçlar verir.
- c) Doğru sonuç elde edebilmek için sürekli ortamın bölünmesi ve çok sayıdaki giriş bölgesi hatasız olmalıdır.
- d) Sonlu elemanlar yöntemi genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zamanına ihtiyaç gösterir.
- e) Diğer yaklaşık sayısal yöntemlerde olduğu gibi, sonlu elemanlar yöntemi'nden alınan sonuçlar dikkatlice değerlendirilmelidir. Formülasyonda kullanılan varsayımlar, muhtemel sayısal zorluklar ve kullanılan malzeme özelliklerindeki yaklaşıklıklar üzerinde dikkatli davranılmalıdır.

2.5 Sonlu Elemanlar Methodunda Hata Kaynakları:

• Prensipten Hataları:

Gerçek modelin oluşturulması sırasında bazı bölgelerde büyük gerilme yığılmaları oluyorsa buralarda daha küçük boyutlu sonlu elemanlar kullanılmalıdır. Ayrıca gerilme uzama ifadelerine bağlı olarak sonuçlarda hatalar oluşmaktadır. Normal şartlarda Hook Kanunu bu ifadeyi yerine getirir. Ancak gerçek malzeme davranışları her zaman bu kanunda ifade edildiği gibi lineer değildir. Yöntemden mutlak suretle doğru netice beklenmemelidir. En iyi şartlarda bile %3'lük bir hata vardır.

• Geometrik Hatalar:

Gerçek yapı ile konstrüksiyon resimleri arasında oluşacak farklılıklar, imalat toleranslarından doğan kalınlık farkları, hafif eğri yüzeylerin düz yüzey olarak modellenmesi vb. durumlar geometrik hataları oluşturur.

• Malzemeye Özgü Hatalar:

Malzemenin kimyasal bileşimindeki farklılıklardan dolayı elastisite modülünde meydana gelen değişimler, haddeleme ve çekmeden doğan malzeme boşlukları

soğuk şekil verme hataları, ısıtma işlem sonucu akma sınırının değişmesi gibi durumlardır.

- *Sınır Şartlarına Özgü Hatalar:*

Bağlantı noktalarının esnekliğinin ihmal edilmesi vb.

2.6 Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulama Alanları:

Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanları genel olarak üç grupta toplanabilir; [3]

- a) Denge Problemleri (equilibrium or steady-state problems)
- b) Özdeğer Problemleri (eigenvalue problems)
- c) Yayılma Problemleri (propagation or transient problems)

Denge problemlerinde sistemin durumu zamanla değişmez, bunlara sabit (kararlı) hal problemleri de denir. Mesela makina ve inşaat yapılarının gerilme analizleri, katılarda ve sıvılarda kararlı sıcaklık dağılımları, sürekli akış problemleri gibi problemler bu gruba girer.

Özdeğer problemleri denge problemlerinin bir uzantısıdır. Gerçekte gerek denge ve gerekse özdeğer problemleri sınır değer problemleridir. Özdeğer problemlerinde bazı özel ve kritik değerlerde tayin edilmelidir. Mesela yapıların stabilitesi ve öz titreşimleri, lineer viskoelastik sönümleme, burkulma, göl ve limanlarda dalgaların serbest titreşimleri, katı ve esnek kaplarda akışkanların çalkalanması gibi problemler bu gruba girer.

Yayılma problemleri ise zamana bağlı olan problemlerdir; sistemin ardışık durumları başlangıç şartlarına bağlı olarak belirlenir. Bunlara başlangıç değer problemleri de denir. Mesela yapılardaki gerilme dalgaları, yapıların darbelere karşı davranışı, viskoelastik problemler, zeminlerden suyun geçişi, katılarda ve sıvılarda ısı geçişi , kararlı olmayan akışlar bu gruba girer.

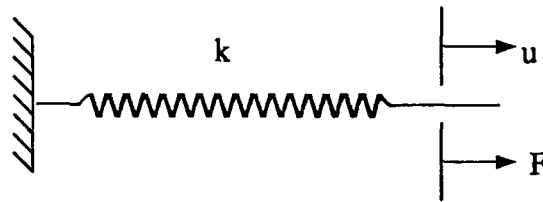
Sonlu elemanlar yönteminin yapı, zemin, ısı, hidrodinamik gibi çok çeşitli mühendislik alanlarında uygulanabilmesi ve bilgisayar ortamında kullanılabilmesi, yöntemin konstrüktörler ve araştırma mühendisleri tarafından geniş ölçüde benimsenmesine yol açmıştır.

Sonlu elemanlar yönteminin gerilme analiz programlarına uygulanmasında üç yaklaşım vardır. Bunlar yerdeğişim yöntemi; kuvvet yöntemi ve karma yöntemdir.

Bunlardan birincisinde yerdeşiştirmeleri, dönmeler ve deformasyonlar; ikincisinde kuvvetler ve gerilmeler; üçüncüsünde bazı yer değişimleri ve bazı kuvvetler bilinmeyenler veya serbest değişkenler olarak ele alınır. En çok kullanılan yerdeğişimi yaklaşımıdır.

2.7 Sonlu Elemanlar Methodunun Teorisi:

Gerçek yapılarda kullanılan sistemler iki veya üç boyutu olmasına karşın sonlu elemanlar yönteminin kolay bir şekilde anlaşılabilmesi için bir boyutlu yay elemanı esas alınmıştır. şekil 2.14 [4]



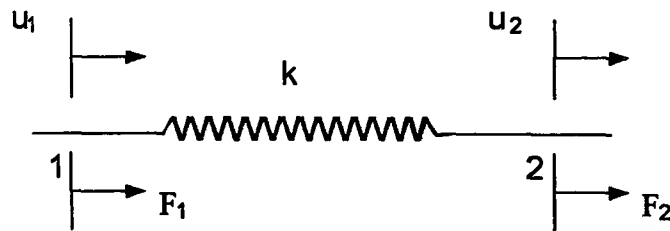
şekil 2.14 Bir boyutlu yay elemanı

Yukarıda görülen yay elemanının yay katsayısı k , sisteme etki eden kuvvet F , ve bu durum için yayda meydana gelen şekil değişimi u ile gösterilmiştir. O halde bu sistem;

$$F = k \cdot u \quad (2.1)$$

denklemiyle ifade edilebilir.

Aşağıda tek bir yaydan oluşmuş bir sistem ele alınmıştır. (şekil 2.15) Burada aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.[4]



şekil 2.15 Yüklü haldeki yay elemanı

$$F_1 + F_2 = 0 \quad F_2 = k \cdot (u_2 - u_1) = k \cdot u_2 - k u_1 \quad (2.2)$$

$$F_1 = -F_2 \quad F_1 = k \cdot (-u_2 + u_1) = -k u_2 + k u_1 \quad (2.3)$$

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\} \quad \{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad \{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad [k] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$$

Yay elemanının matris eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilebilir ;

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

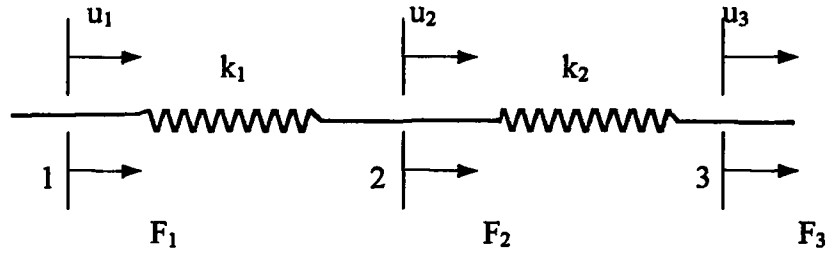
$$\{F\} = \{f^e\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad \text{Eleman kuvvet vektörü} \quad (2.5)$$

$$[k] = [k^e] = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \quad \text{Eleman katılık matrisi} \quad (2.6)$$

$$\{u\} = \{u^e\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \text{Eleman yerdeğiştirme matrisi} \quad (2.7)$$

$$\{f^e\} = [k^e] \{u^e\} \quad (2.8)$$

Eğer üç adet yay elemanını birbirine eklenirse Şekil 2.6' da görülen yay sistemi elde edilmiş olur.



Şekil 2.16 Yaylardan oluşmuş bir sistem

Her bir yay elemanının iki bağ noktasına (Şekil 2.16 da 1 ve 2 nolu noktalar) ve bu bağ noktalarının da birer tane bilinmeyene sahip olduğu (u yerdeğiştirme miktarı) görülmektedir. Bu durumda her bir yay elemanının iki bilinmeyeni (u₁ ve u₂) bulunmaktadır yani yay elemanının serbestlik derecesi iki, sistemin toplam serbestlik derecesi ise üç olmaktadır.

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0 \quad (2.9)$$

$$F_2 = -F_1 - F_3 = k_1 \cdot u_1 - (k_1 + k_2) \cdot u_2 + k_2 \cdot u_3 \quad F_1 = k_1 (u_1 - u_2) = k_1 \cdot u_1 - k_1 \cdot u_2$$

$$F_3 = k_2 (u_3 - u_2) = k_2 \cdot u_3 - k_2 \cdot u_2$$

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\}$$

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 \\ -k_1 & (k_1 + k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \quad \text{Sistemin toplam kuvvet vektörü} \quad (2.11)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} \quad \text{Sistemin toplam yerdeğiştirme vektörü} \quad (2.12)$$

$$[K] \longrightarrow \text{Sistemin toplam katılık matrisi} \quad (2.13)$$

$$[k_1] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad [k_2] = \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}_{2 \times 2} \quad [k] = \begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix}_{3 \times 3}$$

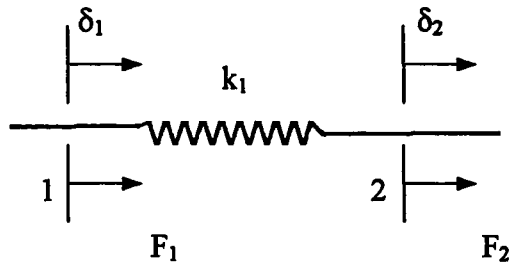
$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & (k_1+k_2) & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$$

2.7.1 Virtual Yer Değiştirme (Enerji) Prensibi :

(The Principle of Virtual Displacement (Energy))

İş prensibi kullanılarak eleman rijidlik matrisinin elde edilebilir. Bu prensip minimum potansiyel enerji prensibiyle aynıdır. Fakat anlaşılması daha kolay olduğundan bu prensip ele alınmıştır.[4]

Bu prensibe göre dengede bulunan bir sistemde dış kuvvetler tarafından yapılan hakiki iş, iç gerilmelerin oluşturduğu hakiki zorlanma enerjisine eşittir.



Şekil 2.17 Yay sistemi

$$\text{Dış kuvvetlerin yaptığı iş} \longrightarrow W_E = F_1 \cdot \delta_1 + F_2 \cdot \delta_2 \quad (2.14)$$

$$\text{Sistemin iç enerjisi} \longrightarrow W_I = -k \cdot (\delta_2 - \delta_1)^2 \quad (2.15)$$

Sistem dengede olduğundan yapılan toplam iş 0 olacaktır.

$$W_E + W_1 = 0 \quad (2.16)$$

$$F_1 \cdot \delta_1 + F_2 \cdot \delta_2 - k \cdot (\delta_2 - \delta_1)^2 = 0$$

$$F_1 \cdot \delta_1 + F_2 \cdot \delta_2 = k \cdot \delta_2^2 - 2k \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 + k \cdot \delta_1^2$$

$$\{\delta\}^T \cdot \{F\} = \{\delta\}^T \cdot [k] \cdot \{\delta\} \quad (2.17)$$

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} \quad \{F\} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} \quad K = \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix}$$

$$K \cdot (\delta_2 - \delta_1)^2 \longrightarrow \int_V \frac{(\delta_2 - \delta_1)}{l} \cdot \frac{k \cdot (\delta_2 - \delta_1)}{A} \cdot dV \quad (2.18)$$

l: Yayın uzunluğu

A: Yayın kesit alanı

dx: Yayın birim uzunluğu

dV: A. dx

$$\varepsilon = (\delta_2 - \delta_1) / l \quad (2.19), \quad \sigma = k \cdot (\delta_2 - \delta_1) / A \quad (2.20), \quad \sigma = k \cdot l \cdot \varepsilon / A \quad (2.21)$$

$$\boxed{\{\delta\}^T \cdot \{F\} = \int_V \{\varepsilon\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dV} \quad (2.22)$$

$$(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad \sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}] \quad \{\sigma\}^T = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]$$

$$\{\sigma\} = [C].\{\epsilon\} \quad (2.24)$$

$$[C] = E / ((1+\nu).(1-2\nu)) \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

E: Elastisite modülü

ν : Poisson oranı

$\{u\}^T = [u_x \ u_y \ u_z] \longrightarrow$ Herhangi bir noktadaki yerdeğiştirme miktarı

$$[D] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & \partial/\partial z \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$[D] = \text{Differansiyel Matrisi} \quad \{\epsilon\} = [D]^T . \{u\} \quad (2.27)$$

$$\{u^e\}^T = [u_1 \ u_2] \xleftrightarrow{[N]} \{u\}^T = [u_x \ u_y \ u_z] \quad (2.28)$$

$$\{u\} = [N].\{u^e\} \quad (2.29)$$

$[N]$ = Şekil Fonksiyonu $[N](x, y, z)$

$$\{\epsilon\} = [D]^T \cdot [N] \cdot \{u^e\} \quad (2.30)$$

$$\{\epsilon\} = [B] \cdot \{u^e\} \quad (2.31)$$

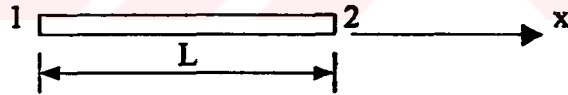
$$[B] = [D] \cdot [N] \quad (2.32)$$

$[B] \longrightarrow$ Zorlanma şekil fonksiyonu matrisi

$$\{\delta\}^T \cdot \{F\} = \{\delta\}^T \cdot [k] \cdot \{\delta\} = \int_V \{\epsilon\}^T \cdot \{\sigma\} \cdot dv \quad [k] = \int_V [B]^T \cdot [C] \cdot [B] \cdot dv \quad (2.33)$$

$[k] \longrightarrow$ Eleman Katılık Matrisi (Element Stiffness Matrix)

Basit bir tek boyutlu eleman üzerinde eleman katılık matrisinin elde edilmesi istenirse ;



Şekil 2.18 Bir boyutlu çubuk eleman

$$u(x) = \begin{bmatrix} (1 - x/L) & (x/L) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.34)$$

$$u(x) = (1 - x/L) \cdot \delta_1 + (x/L) \cdot \delta_2$$

$\longrightarrow$ Şekil fonksiyonları

$$[N] = \begin{bmatrix} (1 - x/L) & (x/L) \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$\epsilon_x = \partial u / \partial x$$

$$[D] = \partial / \partial x$$

$$\epsilon_x = \partial u / \partial x = \partial / \partial x \cdot \left[\begin{pmatrix} 1-x/L & x/L \end{pmatrix} \right] \cdot \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{Bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[B] = \left[\begin{pmatrix} -1/L & 1/L \end{pmatrix} \right] \quad (2.37)$$

$$[k^e] = \int_V \begin{bmatrix} -1/L \\ 1/L \end{bmatrix} [E] \cdot \begin{bmatrix} -1/L & 1/L \end{bmatrix} \cdot dV \quad (dV = A \cdot dx)$$

$$[k^e] = \int_V A \cdot E \begin{bmatrix} 1/L^2 & -1/L^2 \\ -1/L^2 & 1/L^2 \end{bmatrix} \cdot dx$$

$$[k^e] = (A \cdot E) / L \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

2.8 Sonlu Elemanların Elastik Sürekli Ortamlara Uygulanması:

Sonlu elemanlar yöntemi sürekli ve elastik ortamlara genellikle aşağıdaki adımlar ile uygulanır.[3]

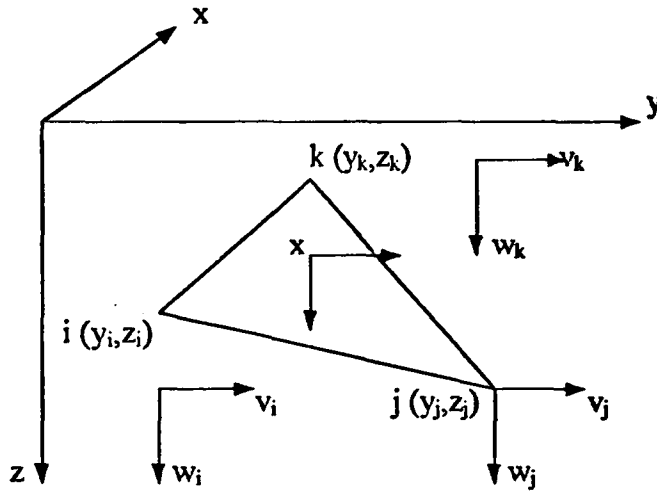
- Sürekli ortam, eğri veya yüzeylerle belli şekil ve sayıda sonlu elemana bölünür.
- Sonlu elemanlar birbirlerine ve sürekli ortama belli sayıda düğüm noktasıyla bağlıdırlar. Bu düğüm noktalarının yer değişimleri (veya dönmeleri) problemin bilinmeyenleri veya sistemin serbest (bağımsız) değişkenleridir.

- c) Her bir elemana ait katılık matrisleri hesaplanır
- d) Serbest değişkenlerin sonlu eleman içindeki değişimleri değişken (yerdeğişimi) fonksiyonları ile tanımlanır.
- e) Sonlu elemanın deformasyon hali, deformasyon-yerdeğişimi bağıntıları kullanılarak ; gerilme hali gerilme-deformasyon bağıntılarını kullanarak düğüm yerdeğişimi cinsinden ifade edilir.
- f) Sonlu elemana etki eden bütün iç ve dış yükler dengede olmalıdır. Bunun için minimum potansiyel enerji prensibi kullanmak suretiyle denge denklemleri kurulur. Mesela üçgen eleman için altı denge denklemi yazılır.
- g) Yukarıdaki inceleme her sonlu eleman için ayrı ayrı yapılır ve aynı düğüm noktasına komşu elemanlardan gelen tepkiler toplanır. Böylece sürekli ortamın çözüm bölgesi için bir denklem takımı elde edilir.
- h) Sürekli ortamın sınırındaki şartlar kullanılarak denklem takımı çözülür. Böylece düğüm yerdeğişimleri bulunur.
- i) Düğüm yerdeğişimleri yardımıyla elemanlardaki deformasyon hali, gerilme hali bileşenleri ve asal gerilmeler hesaplanır.

2.9 Değişken Fonksiyonları (İnterpolasyon fonksiyonları):

Sonlu elemanlarda düğüm noktalarında edilen sonuçlar dan hareketle alan değişkenlerinin çözüm bölgesi içinde nasıl değiştiği bir fonksiyon yardımıyla tanımlanır. Bu fonksiyon alan değişkeninin çözüm bölgesi içindeki yaklaşık değerini verir. İnterpolasyon fonksiyonu gerçeğe ne kadar yakın seçilirse çözümdeki yaklaşıklıkta o derece artar. Türev alma ve integrasyon işlemlerinin basitliğinden dolayı polinomlar sıklıkla tercih edilir.

Şekil 2.19 de iki boyutlu düzlem deformasyon hali için kullanılan bir sonlu eleman gösterilmiştir.[5]



Şekil 2.19 Bir üçgen eleman ve düğüm noktaları

Düzlem defarmasyon halinde üçgen eleman için yerdeğişimleri genellikle doğrusal (lineer) kabul edilir.

$$\{u^e\}^T = [v_i \ w_i \ v_j \ w_j \ v_k \ w_k] \quad (2.39)$$

$$v = \alpha_1 + \alpha_2 y + \alpha_3 z$$

$$w = \alpha_4 + \alpha_5 y + \alpha_6 z$$

→ Eleman fonksiyonları (2.40)

$$\left. \begin{aligned} v_i &= \alpha_1 + \alpha_2 y_i + \alpha_3 z_i \\ v_j &= \alpha_1 + \alpha_2 y_j + \alpha_3 z_j \\ v_k &= \alpha_1 + \alpha_2 y_k + \alpha_3 z_k \end{aligned} \right\} \quad \text{Üç bilinmeyenli üç denklem} \quad (2.41)$$

veya ;

$$\begin{bmatrix} V_i \\ V_j \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} \quad (2.42)$$

yazılabilir. Bu denklem sistemi aşağıdaki gibi çözülebilir.

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 1/2\Delta (a_i v_i + a_j v_j + a_k v_k) \\ \alpha_2 &= 1/2\Delta (b_i v_i + b_j v_j + b_k v_k) \\ \alpha_3 &= 1/2\Delta (c_i v_i + c_j v_j + c_k v_k)\end{aligned}\quad \text{Burada } \Delta \text{ üçgenin alanıdır.} \quad (2.43)$$

$$2\Delta = \begin{vmatrix} 1 & y_i & z_i \\ 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \end{vmatrix} \quad (2.44)$$

$$a_i = \det \begin{vmatrix} y_j & z_j \\ y_k & z_k \end{vmatrix} \quad b_i = - \det \begin{vmatrix} 1 & z_j \\ 1 & z_k \end{vmatrix} \quad c_i = \det \begin{vmatrix} 1 & y_j \\ 1 & y_k \end{vmatrix} \quad (2.45)$$

$$a_j = - \det \begin{vmatrix} y_i & z_i \\ y_k & z_k \end{vmatrix} \quad b_j = \det \begin{vmatrix} 1 & z_i \\ 1 & z_k \end{vmatrix} \quad c_j = - \det \begin{vmatrix} 1 & y_i \\ 1 & y_k \end{vmatrix} \quad (2.46)$$

$$a_k = \det \begin{vmatrix} y_i & z_i \\ y_j & z_j \end{vmatrix} \quad b_k = - \det \begin{vmatrix} 1 & z_i \\ 1 & z_j \end{vmatrix} \quad c_k = \det \begin{vmatrix} 1 & y_i \\ 1 & y_j \end{vmatrix} \quad (2.47)$$

$V = 1/2\Delta [(a_i + b_i y + c_i z) v_i + (a_j + b_j y + c_j z) v_j + (a_k + b_k y + c_k z) v_k]$ elde edilir. Aynı şekilde

$W = 1/2\Delta [(a_i + b_i y + c_i z) w_i + (a_j + b_j y + c_j z) w_j + (a_k + b_k y + c_k z) w_k]$ elde edilir. Burada ;

$$N_i = 1/2\Delta (a_i + b_i y + c_i z)$$

$$N_j = 1/2\Delta (a_j + b_j y + c_j z) \quad (2.48)$$

$$N_k = 1/2\Delta (a_k + b_k y + c_k z)$$

fonksiyonlarına şekil fonksiyonları denir. Şekil fonksiyonu bağ noktaları dışındaki bir noktada bilinmeyen değerleri bulmak için interpolasyon işleminde kullanılmaktadır.

Yukarıdaki ifadeler şu şekilde düzenlenebilir.

$$V = N_i V_i + N_j V_j + N_k V_k \quad (2.49)$$

$$W = N_i W_i + N_j W_j + N_k W_k \quad \text{yada ;} \quad (2.50)$$

$$\begin{Bmatrix} V \\ W \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_k & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i \\ W_j \\ V_j \\ W_j \\ V_k \\ W_k \end{Bmatrix} \quad (2.51)$$

Şekil fonksiyonlarının önemli bir özelliği bazı noktalarda 1 bazı noktalarda sıfır değerini almasıdır. Burada N_i i noktasında "1" diğer j ve k noktasında ise "0" değerini almaktadır. N_j ve N_k için de aynı durum geçerlidir.

Düzlem zorlanma durumunda zorlanma bileşenleri e_y , e_z , γ_{yz} noktasal yerdeğiştirmeler kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$e_y = \partial v / \partial y = (\partial N_i / \partial y) v_i + (\partial N_j / \partial y) v_j + (\partial N_k / \partial y) v_k \quad (2.52)$$

$$e_z = \partial w / \partial z = (\partial N_i / \partial z) w_i + (\partial N_j / \partial z) w_j + (\partial N_k / \partial z) w_k \quad (2.53)$$

$$\gamma_{yz} = \partial v / \partial z + \partial w / \partial y \quad (2.54)$$

$$= (\partial N_i / \partial z) v_i + (\partial N_j / \partial z) v_j + (\partial N_k / \partial z) v_k + (\partial N_i / \partial y) w_i + (\partial N_j / \partial y) w_j + (\partial N_k / \partial y) w_k$$

Sonlu eleman analizinde her bir elemana ait eleman katılık matrislerinin birleştirilmesiyle elde edilen toplam katılık matrisinde bant genişliği kavramı önemli bir yer işgal etmektedir.

Toplam katılık matrisinin köşegeni üzerinde ki terimlerde dahil olmak üzere sağa doğru bir satır üzerinde yer alan sıfırdan farklı elemanların sayısının en büyüğüne yarım bant genişliği denir.[3]

$$\text{Bant genişliği; } B = (F + 1) \cdot S \quad (2.55)$$

şeklinde ifade edilebilir.

B: Bant genişliği

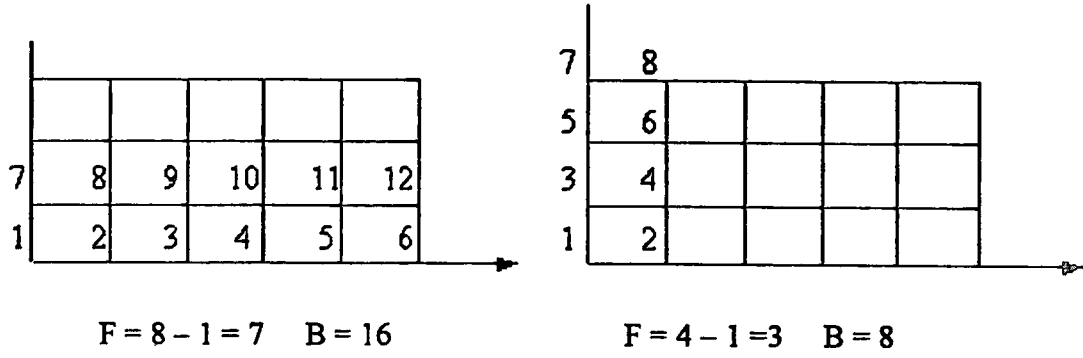
F: Sistemdeki bütün elemanlar dikkate alınarak tespit edilmiş, herhangi bir elemandaki düğüm numaraları arasındaki en büyük fark değeri

S: Düğüm noktasındaki serbestlik derecesi

$$\begin{bmatrix} X & X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & X & X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & X & X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X & X & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & X & X & X & X & 0 \end{bmatrix}$$

|----- B -----|

Bant genişliğinin durumu sonlu elemanların numaralandırılmasına göre değişir. Şekil 2.20' de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 1.20 Bant genişliğinin azaltılması

Bilgisayarda sistem katılık matrisinin bant şeklinde saklanması halinde yer ihtiyacı $N^2/2$ yerine sadece $N*B$ olur. Ayrıca şerit katılık matrisi ile denklem sisteminin çözüm zamanı yaklaşık $N*B^2/2$ ile orantılıdır, halbuki tam dolu bir katılık matrisi ile çözüm zamanı yaklaşık $N^3/6$ ile orantılıdır.[3]

BÖLÜM 3

ANSYS SONLU ELEMANLAR PAKET PROGRAMI

3.1 Genel Bilgi:

Teknolojinin hızla geliştiği günümüz çağında, bütün mühendislik dallarının ortak çabası maliyeti düşük, kalitesi yüksek dayanıklı ürünler ortaya çıkarmaktır. Bir sonlu eleman programı olan ANSYS yazılımı, makine mühendisliği alanında da, üretilmesi düşünülen makine parçalarının bilgisayar ortamında modellenmesi ve farklı dış yükler altındaki davranışlarının analizi için büyük kolaylıklar sağlar. Böylece en uygun malzeme ve boyut tayinine gidilerek optimum boyutlarda üretime geçilmiş olur.

Swanson Analiz Sistemi (SASI) 1970 yılında mühendislik analiz problemlerinin bilgisayar destekli çözümünü sağlamak amacıyla Dr. John Swanson tarafından geliştirilmiştir. ANSYS sonlu eleman programı SASI' nin geliştirmiş olduğu en önemli programlardan biridir. Başlangıçta güç üretim endüstrisinde kullanılmak üzere geliştirilmiş, fakat günümüzde otomotivden elektroniğe, havacılıktan kimyaya kadar çok çeşitli endüstrilerin ihtiyaçlarına cevap vermektedir. ANSYS programı bir çok üstünlüğünden dolayı dünya çapında tanınmış geniş kapsamlı ve genel amaçlı bir yazılım programıdır. 1970'li yıllarda az sayıda kullanıcıya sahip olan ANSYS programı şimdi 2000' in üzerindeki ticari sektörde ve 5500' ün üzerindeki üniversitede ve diğer akademik enstitülerde eğitim aracı olarak kurulu durumdadır ve ayrıca farklı alanlarda çalışan binlerce mühendis tarafından da kullanılmaktadır.[6]

ANSYS sonlu elemanlar programı süper bilgisayarlarda, workstation' larda kullanıldığı gibi kişisel bilgisayarlarda da rahatlıkla kullanılabilir ve birçok işletim sistemi tarafından da desteklenmektedir.

ANSYS sonlu elemanlar programının tam sürümü yanında farklı alanlar için, tam sürümden türetilmiş geniş bir ürün ailesine sahiptir. Bunlar kısaca aşağıda gösterilmiştir.[7]

- ANSYS / Lineer Plus
- ANSYS / Thermal
- ANSYS / Emag 3D
- ANSYS / Emag 2D
- ANSYS / Flotran
- ANSYS / PrepPost
- ANSYS / Ed

ANSYS / Lineer Plus : Statik ve dinamik analizde ürün dizaynı için kullanılan yapısal analiz programıdır. Dinamik analiz modal, harmonik, transient ve spektrum analizleri içerir. Ayrıca non-lineer durumlarda da kullanılmaktadır.

ANSYS / Thermal: Isı transferinde, ısıtım,taşınım problemlerinde lineer ve nonlinear analizlerde kullanılmaktadır

ANSYS / Emag : Elektromanyetik alan problemlerinde,elektrostatikte, akım iletim problemlerinde, devre simülasyonları vb. alnlarda kullanılmaktadır.

ANSYS / Flotran : Akışkanlar mekanikğinde, sıvı akışları ve ısı transferi analizlerinde vb, alanlarda kullanılmaktadır.

ANSYS / Prep Post : Çok büyük yapıların modellenmesinde ve analizinde kullanılır. Genellikle güçlü bilgisayarlara ihtiyaç duyar.

ANSYS / ED : Ansys'in eğitim amaçlı versiyonudur. Ansys programının tam sürümündeki bütün özellikleri içermesine karşın , boyutları ve limitleri sınırlı modellerin çözümünü gerçekleştirir. (En fazla 1000 noda kadar çözüm yapabilir)

3.2 ANSYS Menüleri ve Ana Ekran:

ANSYS 5.3 Versiyonunda program ilk olarak çalıştırıldığında karşımıza Şekil 3.1' de görülen ön ayarlar ekran çıkmaktadır. Burada kullanılacak olan ANSYS

ürün çeşidi, çalışmaların saklanacağı dizin, grafik çeşidi, çalışma ismi, program için ayrılacak çalışma alanları miktarı ve parametreler belirlenir.

The screenshot shows the 'INTERACTIVE' dialog box for ANSYS/MECHANICAL. The dialog is divided into several sections with various input fields and buttons. Annotations in Turkish point to specific fields:

- Ürün çeşidi seçilir** (Product type is selected) points to the 'Product' dropdown menu, which is set to 'ANSYS/Mechanical'.
- Yapılan çalışmaların saklanacağı dizin** (Directory where the work is saved) points to the 'Working directory' text field, which contains 'C:\'.
- Çalışma İsmi** (Work name) points to the 'Initial jobname' text field, which contains 'JOBNAME'.
- Hafıza Ayarları** (Memory settings) points to the 'Memory requested (megabytes)' section, which includes two sub-sections: 'for Total Workspace' (set to 64) and 'for Database' (set to 16).

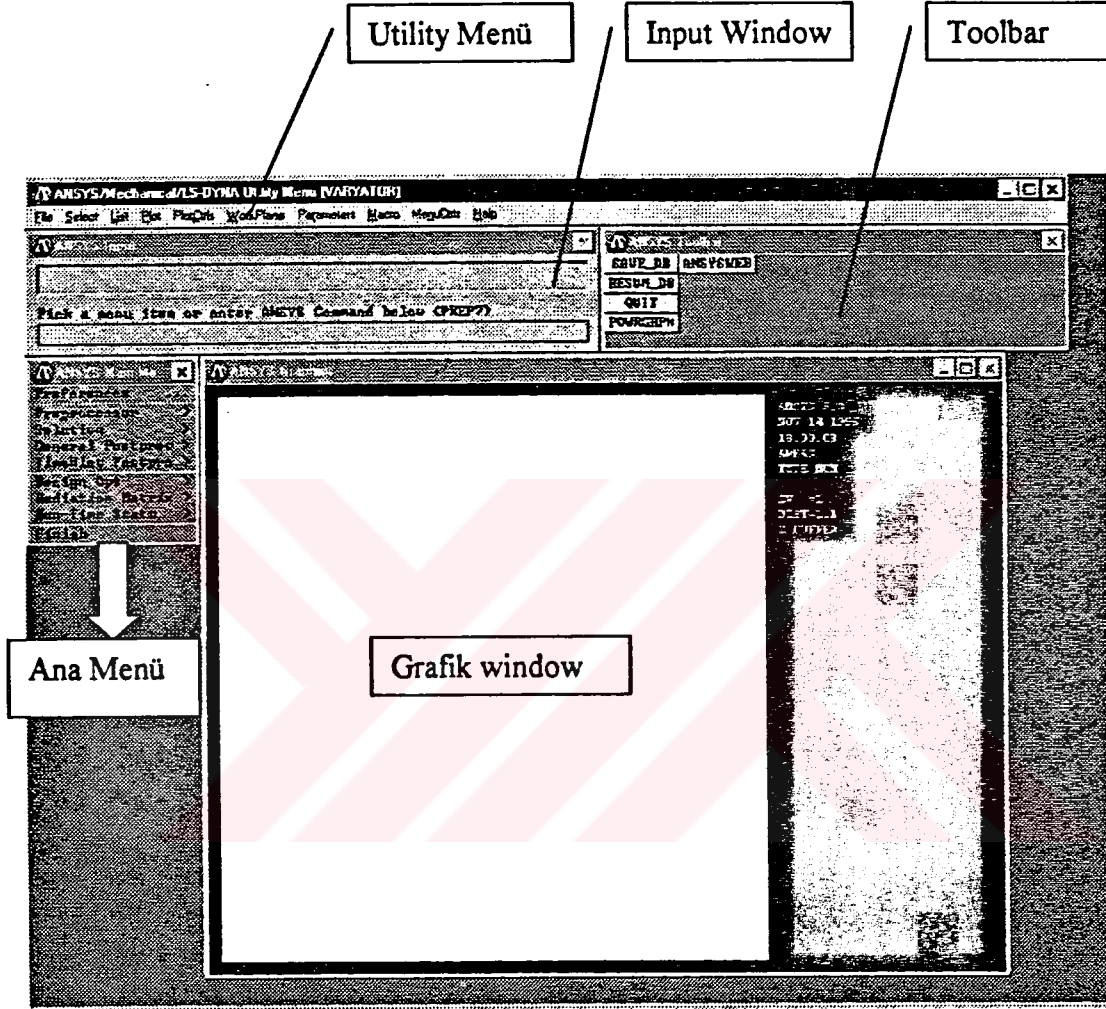
Other fields and buttons visible in the dialog include:

- 'Graphics device name' dropdown set to 'win32'.
- 'Read START.ANS file at start-up?' dropdown set to 'Yes'.
- 'GUI configuration' button.
- 'Parameters to be defined' text field with a hint '(par1 val1 -par2 val2 ...)'.
- Buttons at the bottom: 'Save & Run', 'Save & Close', 'Reset', 'Cancel', and 'Help'.

Şekil 3.1 Ön ayarlar ekranı

Yukarıdaki ekranda gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra 'Save & Run' butonuna basılarak program çalıştırılır ve karşımıza Şekil 3.2' de görülen açılış ekranı çıkar.

Açılış ekranı ana menü (main menü), yardımcı menü (utility menü), giriş penceresi(input window), grafik penceresi(graphic window) ve toolbar dan oluşmaktadır.



Şekil 3.2 ANSYS Açılış Ekranı

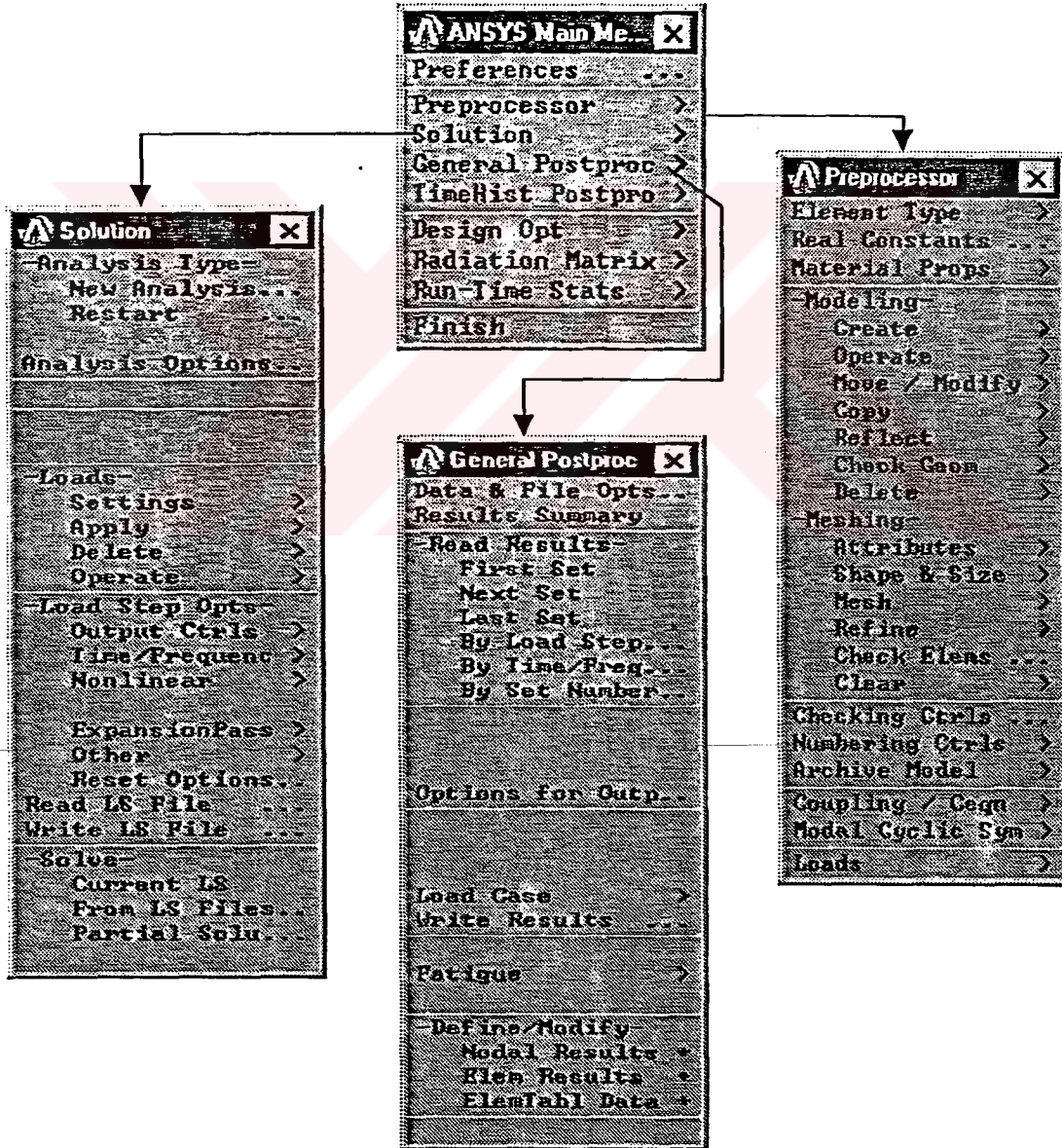
Ana menü diğer alt menülerin tümünü içeren bir üst menüdür. Bu menüden herhangi bir seçim yapıldığında bir alt seviyedeki menü seçeneği aktif hale gelmiş olur. ANSYS 'de modelin grafik ekranda oluşturulmasından çözüm ve çözüm sonrası işlemlere kadar yapılacak olan bütün işlemlerde ana menü içerisindeki alt menülerden faydalanılır. (Şekil 3.3)

Giriş penceresi (input window) ise, ANSYS 'de kullanılan komutların klavye yardımıyla direkt olarak girilmesi işlemine kullanılır.

Açılış ekranının en üstünde yer alan “UTILITY” menü ise birçok yardımcı fonksiyonları içermektedir. Dosyaların kaydedilmesi, okunması, koordinat sisteminin değiştirilmesi, modelin değişik özelliklere göre görüntülenmesi, büyütme küçültme işlemleri vb. işlemler hep utility menü kullanılarak gerçekleştirilir.

Toolbar da ise bazı komut veya komutlar topluluğu (makrolar) için kısayol seçenekleri oluşturulur.

Grafik penceresi (Graphic Window) ise yapılan işlemlerin görüntülediği grafik ekrandır. Modelin oluşturulması ve çözüm sonrası elde edilen verilerin görsel ifadeleri grafik penceresi üzerinde gösterilir.



Şekil 3.3 Ana Menü ve Alt Menüler

3.3 ANSYS' de İşlemciler:

ANSYS sonlu elemanlar programında birkaç çeşit işlemci mevcuttur. İstenen fonksiyonların çoğu bu işlemciler içinde yer alan komutlarla gerçekleştirilir. Bunlar “önişlemci”(preprocessor), “çözüm işlemcisi”(solution), “Post1” ve “Post26” olarak adlandırılan “sonişlemci” ler (Postprocessor) ve dizayn optimizasyonu gibi işlemleri gerçekleştiren yardımcı işlemcilerdir.

3.4 ANSYS' de Kullanılan Koordinat Sistemleri:

ANSYS herbiri farklı sebebler için kullanılan birçok koordinat sistemine sahiptir. Bunlar ; [8]

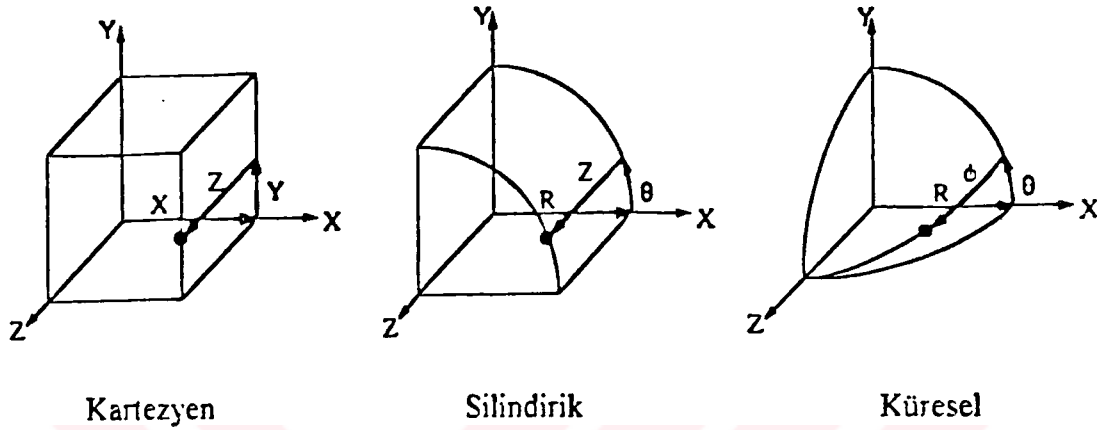
- Global koordinat sistemi
- Local koordinat sistemi
- Nodal koordinat sistemi
- Element koordinat sistemi
- Görüntü (Display) koordinat sistemi
- Sonuç (Results) koorninat sistemi

3.4.1 Global ve Lokal Koordinat Sistemi:

Global ve local koordinat sistemleri uzayda geometrik nesnelerin yerini saptamak için kullanılır. Bir nod yada keypoint tanımlandığında, onun koordinatları geçerli (default) olarak glabal kartezyen sisteminde yer alır. Fakat bazı modeller için global kartezyen koordinat sistemlerinin haricinde başka koordinat sistemlerine ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle ANSYS programında üç çeşit glabal koordinat sistemi hazır olarak bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Global kartezyen koordinat sistemi
- 2) Global silindirik koordinat sistemi
- 3) Global küresel koordinat sistemi

Her üç koordinat sistemi aynı orijini (0,0,0) paylaşırlar ve hepsinde sağ el kuralı geçerlidir. Global koordinat sistemleri koordinat sistemi numaralarıyla birbirlerinden ayrılır. (Şekil 3.4)



Şekil 3.4 Global koordinat sistemleri

Birçok durumda kullanıcı kendi belirleyeceği koordinat sistemine ihtiyaç duyar. Global orjinin başka bir yere taşınması ve x,y,z eksenlerinin ekrana göre doğrultularının değiştirilmesi gerekebilir. Bütün bunlar local koordinat sistemiyle mümkün olmaktadır. ANSYS programı maksimum 88 adet koordinat sistemi tanımlanmasına izin vermektedir.

Lokal koordinat sistemleri çalışma düzlemi (Workplane), nodlar veya keypointler kullanılarak aşağıda belirtilen menü yoluyla yaratılabilir.

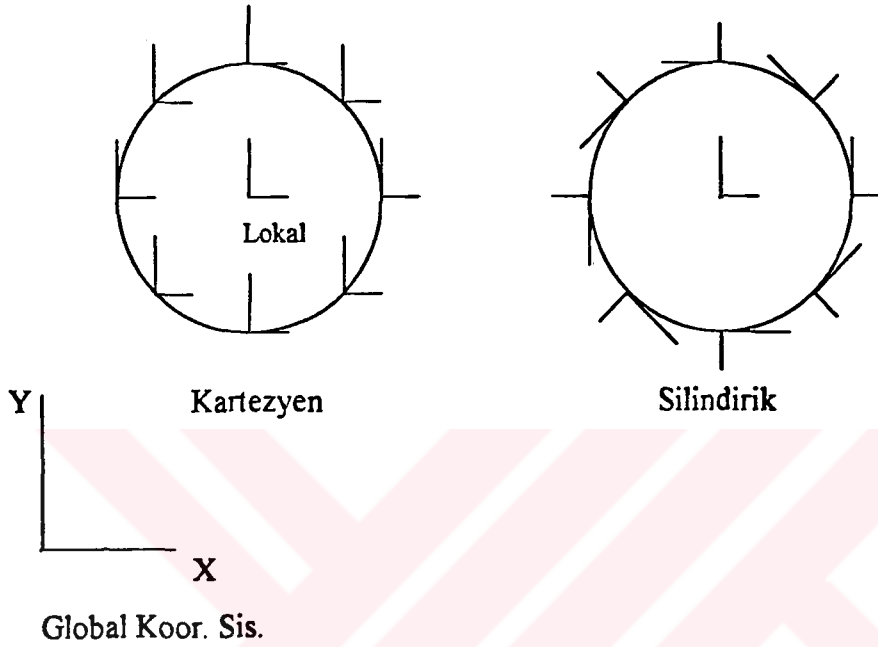
Utility Menü > Workplane > Local Coordinat System > Create Local CS

3.4.2 Nodal Kordinat Sistemi :

Nodal koordinat sistemi her bir nodun serbestlik derecesi doğrultularını belirler. Her bir nodun kendi koordinat sistemi mevcuttur. ANSYS' de bütün nodların koordinat sistemleri ön kabul olarak global kartezyen ile paralel durumdadır. Kullanıcı sonradan bu nodlardaki koordinat sistemini ve doğrultularını istediği şekilde değiştirebilir. Bunun için izlenecek yol ;

Main Menü > Preprocessor > Move/Modify > Rotate Node CS – To Active CS

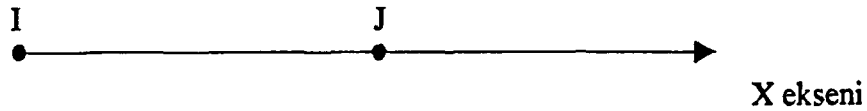
Şeklinde. Modelimize ait farklı sınır koşullarının tanımlanması aşamasında nodal koordinat sistemi oldukça sık kullanılır. Örneğin bir mil kesitinin dış yüzeyinde bulunan nodların koordinat sisteminin kartezyenden silindirik koordinat sistemine dönüştürülmesi Şekil 3.5' de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Nodal Koordinat Sistemi

3.4.3 Eleman Koordinat Sistemi:

Eleman koordinat sisteminde de anlayış nodal koordinat sistemiyle aynıdır. Çizgisel elemanlarda (Line Elements), x eksenini I nodundan J noduna doğru. Şekil 3.6



Şekil 3.6 Eleman Koordinat Sistemi

Kabuk (Shell) elemanlarda x eksenini I' dan J' ye doğru, z eksenini ise kabuk yüzeyine (Shell surface) dik yöndedir. Y eksenini de X ve Z eksenlerine dik doğrultuda uzanır. Burada da yine sağ el kuralı geçerlidir.

İki ve üç boyutlu katı elemanlarda eleman koordinat sistemi global kartezyene paraleldir.

3.4.4 Sonuç koordinat sistemi (Results coordinate system):

Çözüm işlemi sonucunda hesaplanan değerler veri tabanında sonuç dosyasına yazılır. Buradaki veriler geçerli (default) olarak global kartezyen sistemine göre dir. Sonuçlar istenirse başka koordinat sistemine dönüştürülebilir.

(Generalpostprocessor > Option)

3.4.5 Görüntü koordinat sistemi (Display coordinate system) :

Geçerli ön ayarlara göre nodların yada keypointların listelenmesi global kartezyen koordinat sistemine göre yapılmaktadır. Hatta bazı nodların koordinat sistemleri farklı olsa bile bu değişmez. Bunu değiştirmek için aşağıdaki yol izlenir ;

Utility Menü > Workplane > Change Display CS to > Global Cartesian
Global Cylindrical
Global Spherical
Specified Coord Sys

Bunların haricinde ANSYS programında sıkça karşımıza çıkan Çalışma Düzlemi (Workplane) ve Aktif Koordinat Sistemi (Active Coordinate System) kavramları vardır.

Aktif koordinat sistemi o an çalıştığımız koordinat sistemini tanımlamaktadır. Aktif koordinat sistemini yardımcı menüden (Utility Menü) değiştirebiliriz.

(Utility Menü > Workplane > Change Active Coordinate System >)

Çalışma düzlemi (Workplane) ise o anda üzerinde işlem yaptığımız hayali bir düzlemdir. Her yere taşınabilir ve eksenleri etrafında döndürülebilir. Özellikle hacim ve alanların bölünmesinde etkili bir şekilde kullanılabilir.

3.5 ANSYS' de Analiz Adımları:

ANSYS'te yapılan sonlu eleman analizi kısaca üç adımda tarif edilebilir;

- a) İncelenen yapının modellenmesi ve ağ yapısının oluşturulması
- b) Yüklerin ve sınır şartlarının uygulanması ve çözümün elde edilmesi
- c) Sonuçların incelenmesi ve grafik ekranda gösterilmesi

3.5.1 İncelenen Yapının Modellenmesi Ve Ağ Yapısının Oluşturulması:

Ele alınan problemin bilgisayar ortamına aktarılması işleminin ilk adımını modelin grafik ekranda oluşturulması teşkil eder. Bu kısım modelin geometrisine bağlı olarak en fazla uğraş gerektiren bölümlerden biridir. Modelin oluşturulmasına başlamadan evvel önce yapılacak olan çalışmaya bir isim (jobname) ve bir de başlık (title) verilir. Yapılan çalışmanın "database" (*.db) formatında kaydedilmesinde verilen bu isim (jobname) esas alınır. Verilen başlık ise grafik ekranın sol alt kısmında gösterilir.

İkinci adım olarak önreferanslar (preferences) kısmına girilerek yapılacak analizin çeşiti işaretlenir. Böylece ANSYS daha sonraki adımlarda kullanma ihtiyacı duymayacağımız seçenekleri pasif hale getirir.

" /UNIT " komutuyla istenilen birim sistemi seçilir. Herhangi bir birim sistemi seçilmezse birimler arasındaki dönüşüm kullanıcı tarafından yapılır.

Bir sonraki adım olarak ana menüden ön-işlemci (preprocessor) kısmına geçilerek bir dizi işlem gerçekleştirilir. Bu işlemler kısaca aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

- 1) Sonlu eleman tipinin seçimi
- 2) Sonlu elemene ait gerçel değerlerin (Real constant) belirlenmesi
- 3) İncelenen yapının malzeme özelliklerinin girilmesi
- 4) Modelin grafik ekranda oluşturulması
- 5) Ağ yapısının oluşturulması

Sonlu eleman tipinin seçiminde, incelenen modelin geometrisi ve problemin kaç boyutta ele alınacağı belirleyici faktörlerdir. Sonlu eleman modeli iki veya üç boyutlu olabilir ve noktasal, çizgisel, alansal elementler yada katı elementler kullanılarak oluşturulabilir. Sonlu elemanlar modelinde yukarıda belirtilen eleman tipleri karışık olarak da bulunabilir fakat burada serbestlik derecelerinin birbirleriyle uyumlu olmasına dikkat edilmelidir.

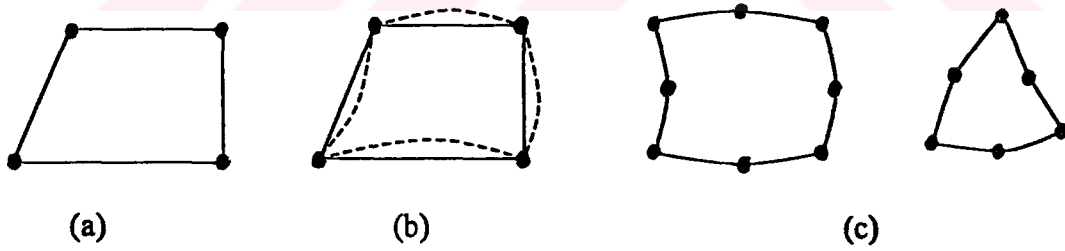
Çizgisel elemanlar iki yada üç boyutlu kiriş veya boru şeklindeki yapılarda ve üç boyutlu aksisimetrik kabuk(shell) yapıların iki boyutlu olarak modellenmesinde kullanılabilir.

İki boyutlu katı elemanlar ince düzlemsel yapılarda (düzlem gerilme ,düzlem zorlanma durumlarında), aksisimetrik katı yapılarda kullanılmaktadır.

Üç boyutlu kabuk (shell) elemanlar ise üç boyutlu uzayda yer alan ince yapılar için tercih edilmektedir.

Üç boyutlu elemanlar ise üç boyutlu uzayda yer alan karmaşık yapıya sahip kalın yapılar için kullanılmaktadır.

ANSYS programı sonlu eleman kütüphanesinde temel olarak iki çeşit eleman bulunmaktadır. Bunlar lineer (ekstra şekle sahip olabilir yada olmayabilir) ve kuadratik elemanlardır. Bu iki temel eleman tipi Şekil 3.7’ de gösterilmiştir.[8]



Şekil 3.7 Ansys’ de temel sonlu eleman çeşitleri

- (a) Lineer İzoparametrik
- (b) Lineer İzoparametrik (Ekstra şekilli)
- (c) Kuadratik

Yapısal analizlerde, ekstra şekilli lineer elemanlar genelde gerçeğe yakın sonuçlar verirler. Aynı zamanda daha az zamanda (CPU Time) çözüme ulaşırlar. Lineer

elemanları kullanırken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar mevcuttur. Mesela kiritik bölgelerde bu elemanları bozulmuş şekillerini kullanmaktan kaçınmak gerekmektedir. Yani üçgen, üçgen prizma ve tetrahedral formlardan kaçınmak gerekmektedir.

Eğri kenarlı yüzeylerin ağ yapısını oluşturmak için hem lineer hem de kuadratik elemanlar kullanılabilir. Bir çok durumda minimum komputer zamanı gerektiren lineer elemanlarla gerçek sonuca yaklaşılmaktadır. Liner elemanların 15 dereceden fazla genişlemesine izin verilmemelidir.

Lineer yapısal analizlerde üçgen, üçgen prizma veya tetrahedral şekle sahip kuadratik elemanlar genellikle lineer elemanlara oranla daha iyi sonuçlar verirler

Seçilen sonlu elemana ait gerçel değerler (real constant) mevcutsa (kalınlık atalet momenti vb.) bunların değerleri mutlaka girilmelidir.

İncelenen yapının malzeme özellikleri lineer, nonlinear, izotropik, orthotropik sabit yada sıcaklıkla değişen tipte olabilir. Kullanılan malzemeye göre bu değerler tayin edilir. Bu özellikler Elastisite Modülü (EX), Poisson Oranı (NUXY), Yoğunluk (DENS), Isıl Genleşme Katsayısı (ALPX) vb. özelliklerdir. İncelenen yapı birden fazla malzeme içeriyorsa bu bölgelere farklı malzeme özellikleri atanmalıdır.

Modelin grafik ekranda oluşturulması esnasında önışlemcide bulunan çizim komutlarından (keypoint, line, rectangular, block) ve ilave yardımcı komutlardan (divide, add, subtruct, intersection, extrude vb.) faydalanılır. Böylece modelimiz grafik ekrana aktarılmış olur.

Modelimizin tamamlanmasından sonra daha önceden belirlediğimiz elemanları kullanarak sonlu eleman ağı oluşturulur. Ağ yapısının oluşturulması otomatik olarak yaptırılabilceği gibi bizim belirlediğimiz kıstaslara göre de yaptırılabilir. Örneğin kullanılacak en büyük sonlu eleman boyutunun ne olacağı, modelin kaç parçaya bölüneceği, model üzerindeki çizgi ve noktalarda ağ yoğunluğunun ne olacağı analizi yapan kişi tarafından tayin edilebilir.

3.5.2 Yüklerin Ve Sınır Şartlarının Uygulanması Ve Çözümün Elde Edilmesi:

Bu aşamada analiz tipi belirlenir, sisteme etki eden yükler ve sistemi sınırlayan sınır şartları girilir. Sisteme etki edebilecek yükler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.[9]

Tablo 3.1 ANSYS de Yük Çeşitleri

Yük Çeşidi	Sınıfı	Komut Ailesi	Ana Menüdeki Yeri
Yerdeğiştirmeler UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ	Kısıtlamalar	D	MainMen >Solution> Loads–Apply>Displacement
Kuvvet ve Momentler FX, FY, FZ, MX, MY, MZ	Kuvvetler	F	MainMen >Solution> Loads–Apply> Force –Moment
Basınç (PRES)	Yüzey Yükleri	SF	MainMen >Solution> Loads–Apply>Pressure
Akışkan(FLUE) Sıcaklık (TEMP)	Yapı Yükleri	BF	MainMen >Solution> Loads–Apply> Temperature
Yerçekimi, dönme vb.	Eylemsizlik Yükleri	ACEL OMEGA VB.	MainMen >Solution> Loads–Apply>Structural Other

Yer değiştirmeler genellikle model sınırlarında yer alan rijid destek noktalarının belirlenmesinde kullanılır. Bunlar aynı zamanda simetri durumunun belirlenmesinde ve bilinen hareket noktalarının tayininde de kullanılır. Burada nodlara ait olan koordinat sistemi esas alınır.

Kuvvetler ve momentler genellikle modelin dış yüzeyinde belirlenen yoğunlaşmış yüklerdir. Uygulama doğrultuları nodların koordinat sistemlerine göredir.

Basınçlar genellikle modelin dış yüzeyine etkiyen yüzey yükleridir. Basıncın pozitif değerleri dışardan malzemeye yüzeyine doğrudur.

Sıcaklıklar termal genişleme ve büzülme etkilerini incelemek için kullanılır. Eğer termal gerilmeler hesaplanacaksa, termal genişleme katsayısı mutlaka girilmelidir.

Yerçekimi ve dönme gibi yükler bütün yapıya etkiyen eylemsizlik yükleridir. Eğer problem eylemsizlik etkilerini de içeriyorsa yoğunluk değeri mutlaka belirlenmelidir.

Çözüm işlemini gerçekleştirmeden önce buraya kadar yapılan çalışmaların kaydedilmesi faydalı olacaktır. (Utility Menü > File > Save as)

/ SOLVE komutuyla yada grafik ekrandaki komut satırlarını kullanarak (Main menü> Solution> Current LS) çözüm yaptırılır. Elde edilen sonuçlar yapılan analizin tipine göre uzantı alarak sonuç dosyasına yazılır. Örneğin yapılan analiz yapısal (Structural) analiz ise Filename.RST, ısı (Thermal) analizi ise Filename.RTH şeklini alır.

Çözüm işlemi gerçekleştirilirken ANSYS programı geçerli olarak “frontal çözümleyici” yi kullanmaktadır. Frontal çözümleyicinin ana özelliği toplam global matrisi oluşturmamasıdır. Bunun yerine çözümleyici her elemanı işlerken eşzamanlı olarak matrix oluşturma ve çözümleme basamaklarını gerçekleştirir. Metod aşağıda anlatıldığı gibi çalışır. Eleman matrisleri hesaplandıktan sonra ilk eleman için çözümleyici serbestlik derecelerini (DOF) okur. Diğer serbestlik dereceleri cinsinden ifade edilebilen serbestlik dereceleri elenir. Bu işlem tüm elemanlar için, bütün serbestlik dereceleri atılıp tam bir üçgenleştirilmiş matris formatı oluşuncaya kadar tekrarlanır. Nodal DOF çözümü bu matristen kolayca bulunur ve sonra her eleman matrisinden her bir eleman için çözüm bulunur.[10]

Frontal çözümleyicinin geçtiği metinlerde sıkça rastlanan bir terim de wavefront’tur. Wavefront basitçe üçgenleştirme sırasında henüz elenemediklerinden dolayı çözümleyici tarafından tutulan serbestlik derecelerinin sayısıdır. Çözümleyici her bir elemanı ve onun serbestlik derecelerini çözdükçe , wavefront artar yada azalır ve sonunda tüm DOF işlendiğinde sıfır olur. Wavefront’un en yüksek değerine maksimum wavefront denir ve ortalama karekök değerine de RMS wavefront denir.

Modelin RMS wavefront’u çözümleme zamanı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Değeri ne kadar küçük olursa çözümleme için gerekli olan CPU zamanıda o oranda azalır. Bu yüzden, çözümden önce daha küçük bir wavefront için elemanların yeniden sıralanması faydalı olabilir. Kullanıcı tarafından yeniden sıralanmadıkça yada otomatik sıralama opsiyonu kapatılmadıkça ANSYS programı çözümlemenin başında bunu otomatik olarak yapar.

3.5.3 Sonuçların İncelenmesi ve Gösterimi:

Sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen sonuç dosyaları aşağıdaki verileri içerir ;[9]

- Birincil veriler (Primary data)
- Türetilmiş veriler (Derived data)

Statik analiz için elde edilen birincil veriler düğüm yerdeğiştirmelerini içerir. Bunlar UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ ' den oluşmaktadır. Türetilmiş veriler ise şu şekilde sıralanabilir

- Düğüm ve elemanlardaki gerilmeler
- Düğüm ve elemanlardaki zorlanmalar
- Eleman kuvvetleri
- Düğüm noktalarındaki reaksiyon kuvvetleri
- vs.

Elde edilen bu sonuçlar, genel son işlemci POST1 ve zamana bağlı son işlemci POST26 kullanılarak görülebilir. POST26 non-lineer statik analizlerde değişik zamanlarda uygulanan yüklere karşılık gelen sonuçların gösteriminde kullanılır.

/POST1 komutuyla yada ana menüden (Main Menü) son işlemciyi (postprocessor) seçerek son işlemci çalıştırılmış olur. Son işlemci bize aşağıdaki imkanları sunar ;

Deforme edilmiş şekil:

PLDISP komutuyla yada ana menü den aşağıdaki yol izlenerek cismin deformasyona uğramış hali elde edilir

Main Menü > General Postprocessor > Plot Result > Deformed Shape

Reaksiyon kuvvetlerinin ve momentlerin listelenmesi:

PRRSOL komutuyla sınırlandırılmış nodlardaki reaksiyon kuvvetleri ve momentleri listelenir. Aynı sonuç aşağıdaki yol izlenerek elde edilebilir.

Main Menü > General Postprocessor > List Result > Reaction Solution

Tepki kuvvetlerini göstermek için /PBC,RFOR,,1 komutu girilir. Daha sonra node gösterimi için NPLOT, eleman gösterimi için EPLOT komutları uygulanır.

Nodal kuvvet ve momentlerin gösterimi:

Nodal kuvvet ve momentleri görmek için komut satırından PRESOL,F (or M) komutu girilmelidir. Yine seçilmiş bir node topluluğundaki kuvvet ve momentlerin toplamını listelemek için FSUM komutu girilir yada aşağıdaki yol izlenir.

Main Menü > General Postprocessor > Nodal Calcs > Total Force Sum

Aynı zamanda seçilen nodlardaki toplam moment ve kuvvetlerin kontrolünü yapmak için NFORCE komutu (yada Main Menü > General Postprocessor > Nodal Calcs > Sum @ Each Node) kullanılır. Denge halinde olan bir sistemde yüklerin uygulandığı yada reaksiyon yüklerinin bulunduğu yerler hariç, bütün nodlardaki toplam yük sıfırdır.

Bunların dışında son işlemcide en çok kullanılan komutlardan biride PLNSOL komutudur. (yada Main Menü > General Postprocessor > Plot Result > Contour Plot-Nodal Solution) Burada bütün sonuç öğelerinin görüntüsü ekrana çizdirilebilir. Örneğin stresler (SX, SY, SZ.....), zorlanmalar (EPELX,EPELY, EPELA,.....) ve yerdeğiştirmeler (UX, UY, UZ)

BÖLÜM 4 .

KONİK VARYATÖRLERİN ANSYS PROGRAMIYLA YAPISAL ANALİZİ

4.1 H Tipi Konik Varyatör:

Teknikte bir çok hallerde hızların belirli sınırlar içinde kademesiz olarak değiştirilmesi gerekir. Böyle mekanizmalarda giriş devir sayısı n_g sabit olduğu halde çıkış devir sayısı değişkendir ve mekanizmanın çevrim oranı ,

$$i_{g\zeta} = n_g / n_{\zeta} = \text{değişken}$$

olur. Bu çeşit mekanizmalara kademesiz hız ayar mekanizmaları (varyatör) denir.

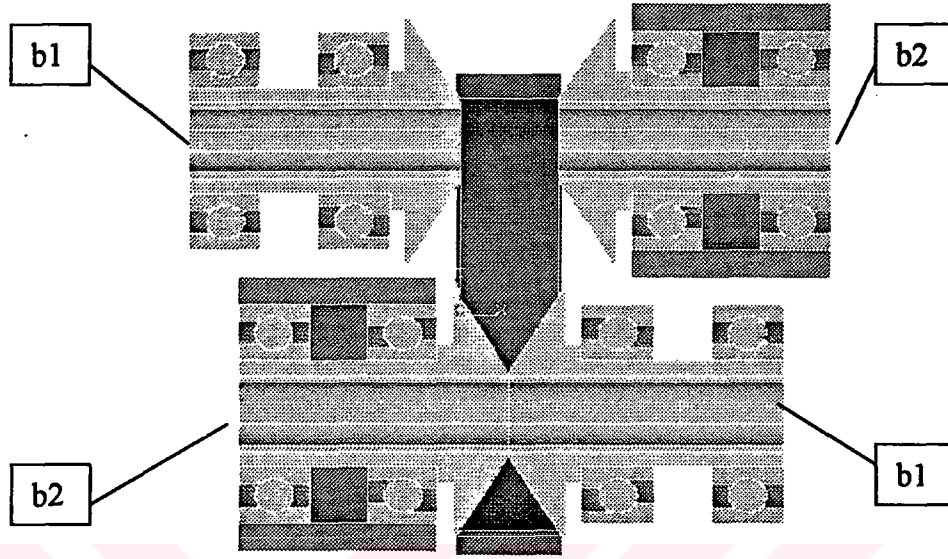
Varyatörlerde sabit bir n_g giriş hızına karşılık, çıkış hızları $n_{\zeta\min}$ ile $n_{\zeta\max}$ arasında değişir. Böylece, mekanizmanın çevrim oranı

$$i_{\max} = n_g / n_{\zeta\min} \text{ ve } i_{\min} = n_g / n_{\zeta\max}$$

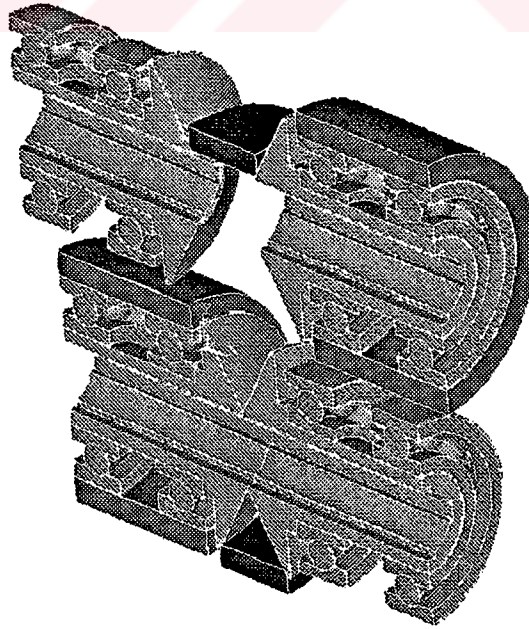
arasında değişim gösterir. Mekanik varyatörlerin sürtünmeli, kayışlı ve zincirli tipleri mevcuttur. Bu çalışmada mekanik sürtünmeli varyatörlerin bir çeşidi olan *konik ve ring elemanlı varyatör* mekanizması ele alınmıştır.

Şekil 4.1a' da görülen konik varyatör mekanizmasında, motor milinde (üstte) ve çıkış milinde (altta) iki tane sürtünme konisi bulunmaktadır. Burada b1 konileri sabit, b2 konileri ise hareketlidir. Hareketli koniler yatay eksen boyunca belirli bir mesafede ileri geri hareket edebilmektedir ve bu iki koniği birbirine bağlayan bir ara eleman mevcuttur. [11]

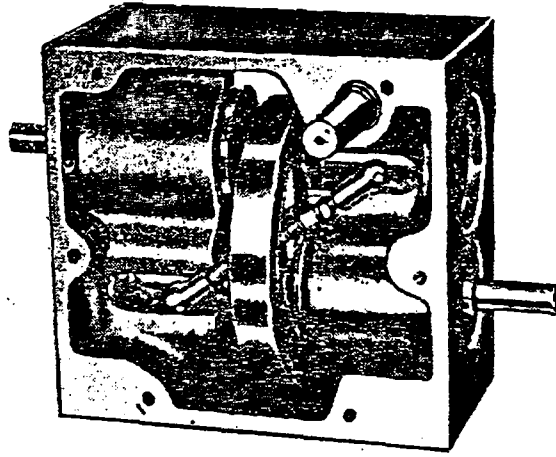
Üstteki b2, b1 sürtünme konileri açık iken, alttaki b2, b1 sürtünme konilerinin arası kapalı olur. Şekil 4.1b' de mekanizmanın perspektif görünümü, Şekil 4.2' de mekanizmanın açılmış durumu, Şekil 4.3' de de aynı mekanizmanın dıştan görünüşü görülmektedir.



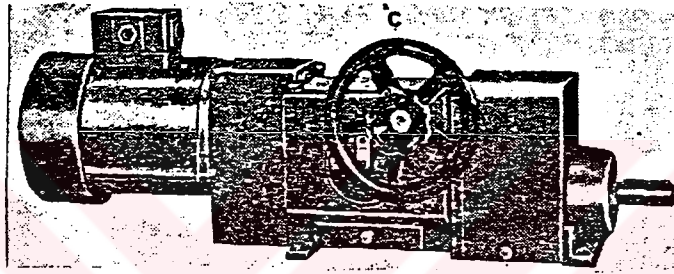
Şekil 4.1a H tipi konik varyatör mekanizmainin ön görünüşü



Şekil 4.1b H tipi konik varyatör mekanizmainin perspektif görünüşü



Şekil 4.2 Konik varyatör mekanizmasının açılmış durumu



Şekil 4.3 Konik varyatör mekanizmasının dıştan görünüşü

Kademesiz hız ayar mekanizmasının ayarlama alanı 1: 9 dur. Bunlar dan iki tanesi arka arkaya bağlanmak suretiyle bu alan 1: 18' e kadar yükseltilebilir. Her iki dönüş yönünde de çalışan bu mekanizmalar $n = 1400-1500$ dev/dak da 0.4-2.5 kw arasındaki güçlerde kullanılmaktadır.[11]

4.2 İncelenen H Tipi Konik Varyatöre Ait Veriler:

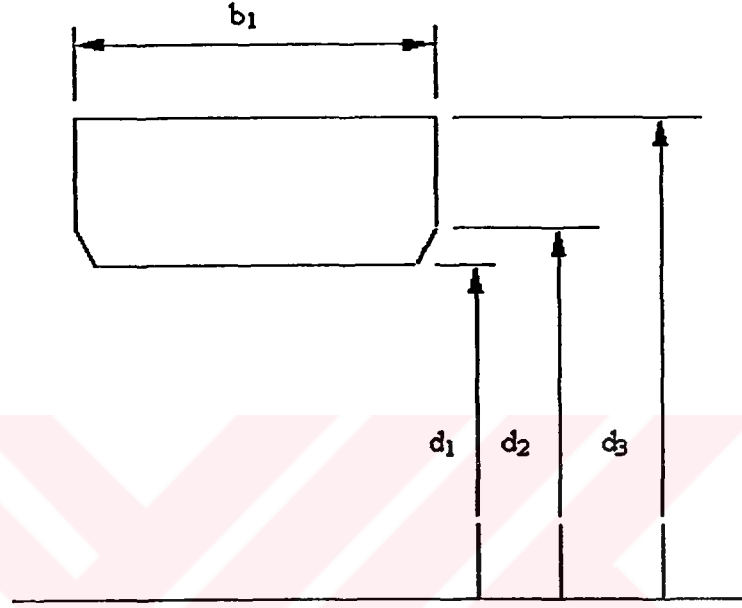
İncelenen H Tipi konik varyatör mekanizmasında motor milinden mekanizmaya iletilen giriş gücü P_g , motor milindeki devir sayısı n_g , ve çıkış milinden elde edilebilecek devir sayıları $n_{ç1}$ ve $n_{ç2}$ aşağıda verilmiştir.

$$P_g = 1 \text{ PS} = 0.735 \text{ kW}$$

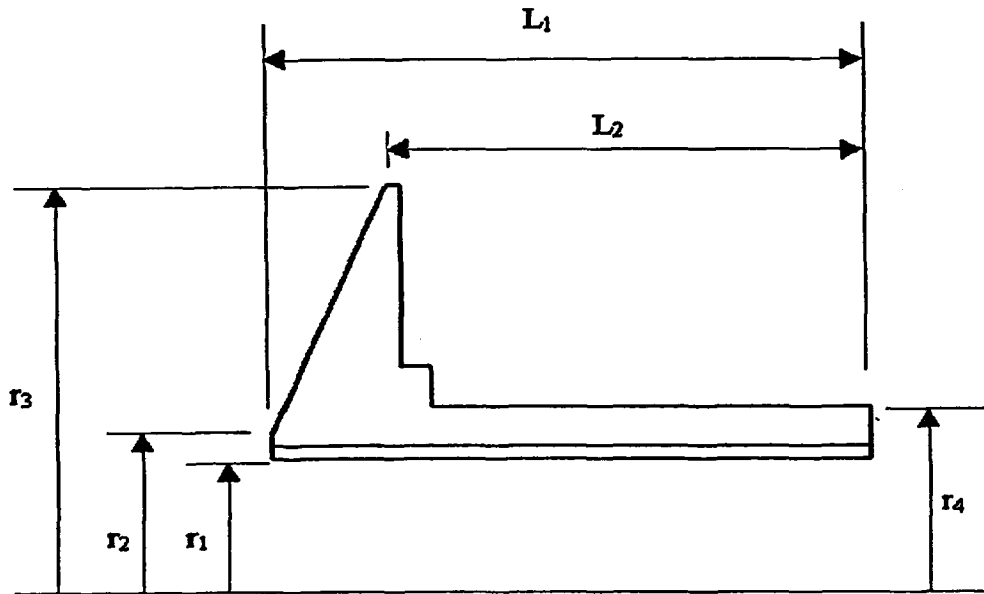
$$n_g = 1500 \text{ dev/dak} \quad n_{ç1} = 4350 \text{ dev/dak} \quad n_{ç2} = 517 \text{ dev/dak}$$

Sürtünme konisi ve Ring' deki koni açısı $\alpha = 60^\circ$ dir. Bileziğin ana boyutları aşağıda gösterilmiştir. (Şekil 4.4)

Burada $b_1 = 22 \text{ mm}$ $d_1 = 51.15 \text{ mm}$ $d_2 = 52.5 \text{ mm}$ $d_3 = 57.15 \text{ mm}$ dir.



Şekil 4.4 Ring' e ait ana ölçüler



Şekil 4.5 Sürtünme konisine ait ana ölçüler

Sürtünme Konisine ait ana ölçülerde aşağıdaki gibidir.

$$\begin{array}{llll} r_1 = 8 \text{ mm} & r_2 = 10 \text{ mm} & r_3 = 29 \text{ mm} & r_4 = 12.5 \text{ mm} \\ L_1 = 67 \text{ mm} & L_2 = 46 \text{ mm} & & \end{array}$$

Motordan mekanizma iletilen giriş gücü $P = 1 \text{ PS} = 0.735 \text{ kW}$ ve devir sayısı $n_g = 1500 \text{ dev/dak}$ olduğuna göre, mekanizmadaki moment M ve teğetsel kuvvet F_t aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$M = \frac{955 \cdot P}{g} = \frac{955 \cdot 0.735}{1500} = 4679.5 \text{ N mm}$$

$$M = r_2 \cdot F_t \longrightarrow F_t = \frac{M}{r_2} = \frac{4679.5}{10} = 467.95 \text{ N}$$

Sürtünme konisi ile Ring arasında kayma olmaması için iki yüzey arasındaki basma kuvveti F_n ,

$$F_n \cdot \mu = K_s \cdot F_t \quad \text{eşitliğinden bulunur.}$$

Burada K_s , kaymaya karşı emniyet faktörü; μ ise sürtünme katsayısıdır.

$$F_n = \frac{K_s \cdot F_t}{\mu} \quad F_n = \frac{1.5 \cdot 467.95}{0.2} = 3509.625 \text{ N}$$

F_n kuvvetinin bileşenleri F_x ve F_y ise,

$$F_x = F_n \cdot \cos(90 - \alpha) \quad F_y = F_n \cdot \sin(90 - \alpha) \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.}$$

Yukarıda verilen ifadeler Ansys programına aynen yazılabilir. Ansys sonlu elemanlar paket programında, incelenen varyatör mekanizmasındaki *sürtünme konisi*

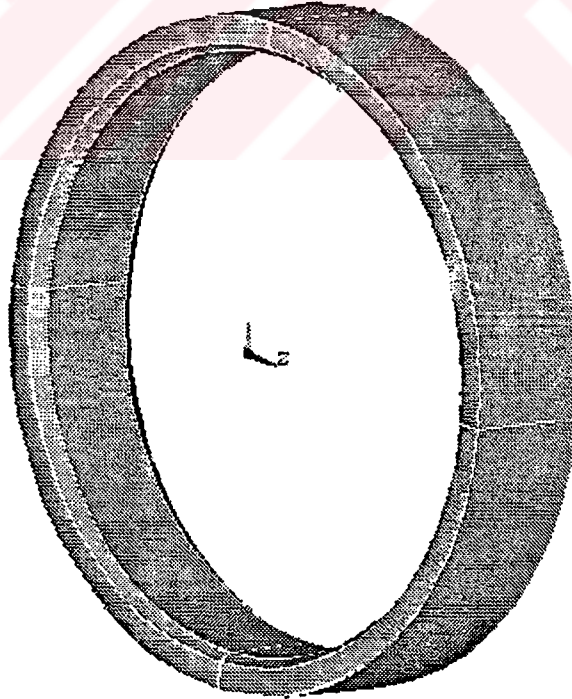
ve *Ring* parçaları üç boyutlu olarak oluşturulmuş ve bulunan yüklere göre farklı temas noktalarındaki yapısal analiz sonuçlarına ulaşılmıştır.

Analiz işlemine Şekil 4.6' da görülen *Ring* parçasıyla başlanmış daha sonra Sürtünme konisi incelenmiştir.

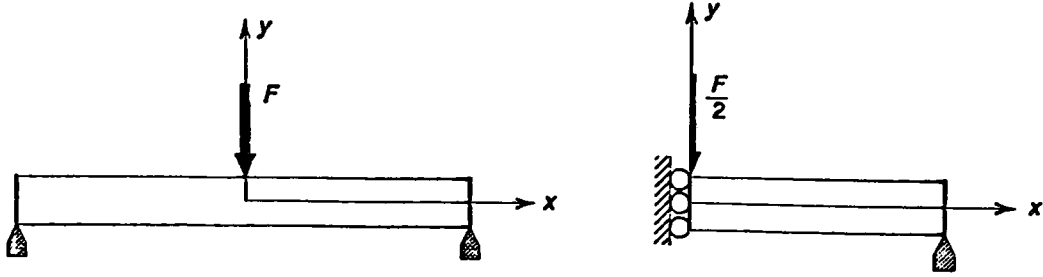
4.3 *Ring* parçasının analizi:

Bölüm 2' de de belirtildiği gibi analiz işleminin birinci adımını modelin bilgisayar ortamında oluşturulması teşkil etmektedir. Bunun için önışlemcide (Preprocessor) bulunan çizim komutları kullanılarak incelenen parça üç boyutlu olarak oluşturulur.(Şekil 4.6)

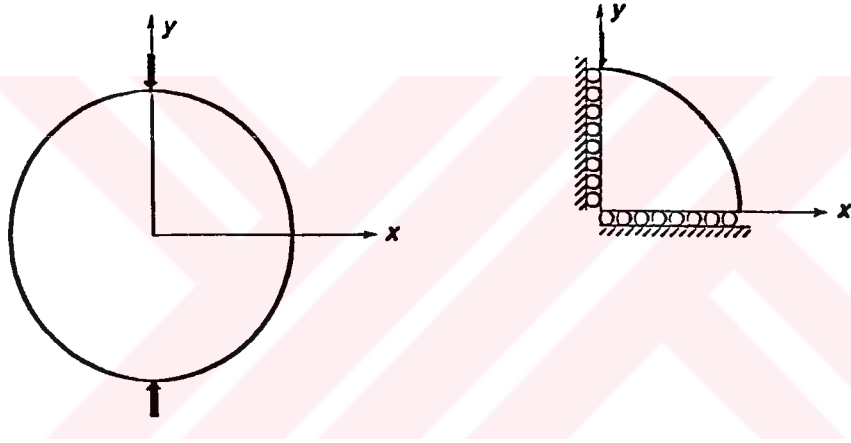
İncelen mekanizmade simetri durumu mevcut ise bu özelliği kullanmak çözüm aşamasında büyük kolaylıklar sağlayacaktır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de örnek olarak basit bir kiriş elemanı ve dairesel bir diskin simetri durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.6 *Ring* parçası



Şekil 4.7 Merkezden yüklenmiş basit bir kiriş elemanı

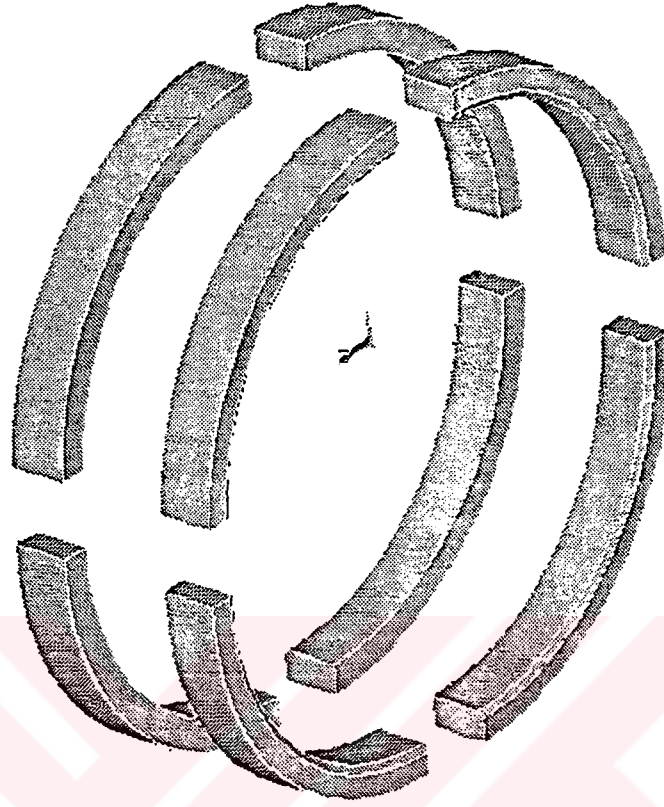


Şekil 4.8 Çap doğrultusunda yüklenmiş dairesel disk

İncelen parçanın geometrik yapısı ve sisteme etki eden yükler incelendiğinde ring parçası için simetri özelliğinin kullanılabileceği görülür. Ring parçası hem y-z, hem x-z, hem de x-y düzlemine göre simetrik olduğundan modelin 1/8'i incelemeye alınmıştır. (Şekil 4.9) Böylece daha az sonlu eleman ve işlem zamanına gerek duyulur.

Modelimiz belirlendikten sonra eleman tipi, gerçel sabitler ve malzeme özellikleri tanımlanır. Daha sonra sonlu eleman ağı oluşturma işlemine geçilir. Ağ oluştururken Ansys programının sağladığı özellikler de kullanılarak üç boyutlu ağ yapısı elde edilir. Ağ yapısının oluşturulmasıyla ön işlemcide yapılacak olan işlemler tamamlanır ve çözüm işlemcisine (solution) geçilir.

Çözüm işlemcisinde incelenen sistemi sınırlayan sınır şartları ile sisteme etki eden kuvvetler girilir ve programın çözüm işlemcisi çalıştırılarak problem çözülür.



Şekil 4.9 Simetrik parçalara ayrılmış ring parçası

Çözüm işleminden sonra sonuçların görsel olarak ifade edilebilmesi için sonişlemciye (postprocessing) geçilir. Son işlemcide sonuçlar listeler halinde veya grafiksel olarak gösterilebilir. Belirli bölgelerdeki sonuçlar iki boyutlu grafikler şeklinde çizdirilebilir.

Aşağıda ring parçasının oluşturulmasından, çözüm aşamasına kadar yapılan işlemleri içeren log dosyası ve burada kullanılan komutların açıklamasına yer verilmiştir.

4.3.1 Ring Parçasına Ait Log Dosyası:

/TITLE,RING	→	Çalışmaya Başlık Veriliyor.
KEYW,PR_SET,1	→	Yapısal Analiz Seçiliyor
KEYW,PR_STRUC,1		
KEYW,PR_THERM,0		

KEYW,PR_ELMAG,0

KEYW,PR_FLUID,0

KEYW,PR_MULTI,0

KEYW,PR_CFD,0

KEYW,LSDYNA,0

/PMETH,OFF

!*
 *

AFUN,DEG → Açı Birimi Dereceye Çevriliyor.

d1=102.3

d2=105

d3=114.3

b1=22

a=(60)

Geometrik Özellikler Giriliyor.

P=0.735

ng=1500

nc1=4350

nc2=517

i1=ng/nc1

i2=ng/nc2

Dmin=20

Dmax=58

Ks=1.5 → Kaymaya Karşı Emniyet Katsayısı

q=0.2 → Sürtünme Katsayısı

M=955*(P/ng)*10000

Ft=(M/(Dmin/2))/2

Fn=Ks*Ft/q

Moment, Teğetsel Kuvvet ve Normal Kuvvet Hesaplanıyor.

Fnu=(Ks*Ft/q)/2

Fx=Fnu*cos(90-a)

Fy=Fnu*sin(90-a)

Temas Yüzeyine Etkiyen Kuvvetler

k1x=b1/2

k1y=d1/2

k2x=b1-(1/tan(A))*((d2-d1)/2)

k2y=d1/2

k3x=b1

k3y=d2/2

k4x=b1

k4y=d3/2

k5x=k1x

k5y=d3/2

k6x=0

k6y=0

k7x=b1

k7y=0

/PREP7

K,1,k1x,k1y,0,

K,2,k2x,k2y,0,

K,3,k3x,k3y,0,

K,4,k4x,k4y,0,

K,5,k5x,k5y,0,

K,6,k6x,k6y,0,

K,7,k7x,k7y,0,

Anahtar Noktalar Giriliyor.

LSTR, 5, 1

LSTR, 1, 2

LSTR, 2, 3

LSTR, 3, 4

LSTR, 4, 5

Çizgiler oluşturuluyor.

FLST,2,5,4

FITEM,2,1

FITEM,2,2

FITEM,2,3

FITEM,2,4

FITEM,2,5

FLST,2,5,4

FITEM,2,1

FITEM,2,5

FITEM,2,4

FITEM,2,3

FITEM,2,2

AL,P51X → Alanlar oluşturuluyor.

FLST,2,1,5,ORDE,1

FITEM,2,1

FLST,8,2,3

FITEM,8,6

FITEM,8,7

VROTAT,P51X,,,,,P51X,-90,1 , → Alanın Bir Eksen Etrafında
Döndürülmesiyle Hacim Oluşturuluyor.

ET,1,SOLID73 → Eleman Tipi Seçiliyor

UIMP,1,EX,,2.1e5,

UIMP,1,DENS,,,,

UIMP,1,ALPX,,,,

UIMP,1,REFT,,,,

UIMP,1,NUXY,,0.3,

UIMP,1,PRXY,,,,

UIMP,1,GXY,,,,

UIMP,1,MU,,,,

UIMP,1,DAMP,,,,

UIMP,1,KXX,,,,

UIMP,1,C,,,,

UIMP,1,ENTH,,,,

UIMP,1,HF,,,,

UIMP,1,EMIS,,,,

UIMP,1,QRATE,,,,

UIMP,1,RSVX,,,,

UIMP,1,VISC,,,,

UIMP,1,SONC,,,,

Çelik İçin Malzeme
Özellikleri Belirlendi.

FLST,2,2,5,ORDE,2 → Ağ yapısı oluşturuluyor

```

FITEM,2,4
FITEM,2,-5
ACCAT,P51X
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , 1
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y

```

```
!*

```

```
ESHAPE,2,0

```

```
VMESH,_Y1

```

```
ESHAPE,0,0

```

```
!*

```

```
CMDEL,_Y

```

```
CMDEL,_Y1

```

```
CMDEL,_Y2

```

```
!*

```

```
APLOT
```

→ Simetri Alanları Seçiliyor

```
ASEL,S, , 1

```

```
CM,ON,AREA

```

```
ASEL,S, , 7

```

```
CM,ALT ALAN,AREA

```

```
ASEL,S, , 2

```

```
CM,YAN ALAN,AREA

```

```
LSEL,S, , 3

```

```
CM,UST KUV,LINE

```

```
/SOLU
```

→ Çözüm İşlemcisine Giriliyor.

```
FINISH

```

```
/SOLU

```

```
CMSEL,S,ON

```

ALLSEL,BELOW,AREA

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY
THE ALLSEL COMMAND

LSLA

KSLI

NSLA,,1

ESLN,,1

APLOT

NPLOT

DSYM,SYMM,Z, , —————> Birinci Simetri Girildi.

CMSEL,S,YANALAN

ALLSEL,BELOW,AREA

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY
THE ALLSEL COMMAND

LSLA

KSLI

NSLA,,1

ESLN,,1

APLOT

DSYM,SYMM,X, , —————> İkinci Simetri Girildi.

CMSEL,S,ALTALAN

ALLSEL,BELOW,AREA

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY
THE ALLSEL COMMAND

LSLA

KSLI

NSLA,,1

ESLN,,1

APLOT

DSYM,SYMM,Y, , —————> Üçüncü Simetri Giriliyor.

CMSEL,S,USTKUV

ALLSEL,BELOW,LINE

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY
THE ALLSEL COMMAND

KSL

NSLL,,1

ESLN,,1

LPL

FLST,2,4,1,ORDE,4 → Kuvvetler Giriliyor.

FITEM,2,117

FITEM,2,180

FITEM,2,195

FITEM,2,-196

F,P51X,FX,-fx/4,

FLST,2,4,1,ORDE,4

FITEM,2,117

FITEM,2,180

FITEM,2,195

FITEM,2,-196

F,P51X,FY,fy/4,

ALLSEL,ALL

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY
THE ALLSEL COMMAND

VSEL,ALL

ASEL,ALL

LSEL,ALL

KSEL,ALL

ESEL,ALL

NSEL,ALL

APLOT

/STAT,SOLU → Çözüm Yaptırılıyor.
SOLVE

/POST1 → Son işlemciye geçiliyor.
FINISH
/POST1

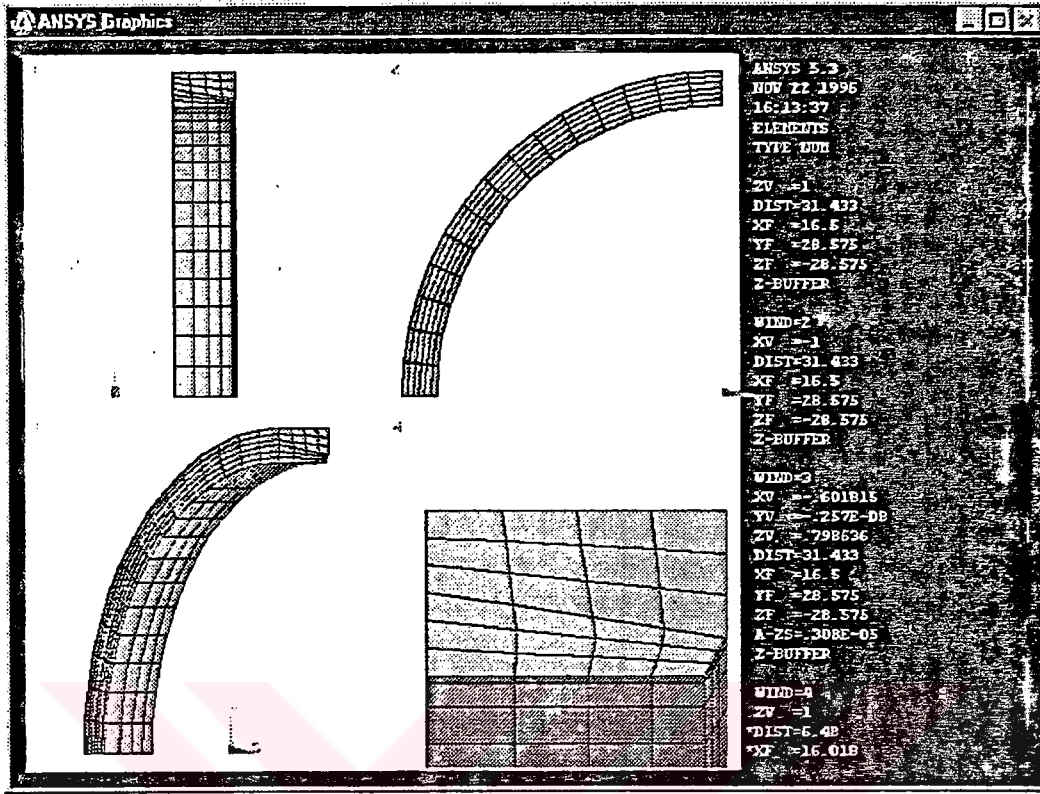
PLDISP,2 → Deforme Olmuş Şekil Görüntüleniyor.

Şekil 4.10 ring parçasının ağ yapısını, Şekil 4.11 ring parçasının aradaki gerekli yüzey basıncını sağlayacak şekilde monte edilmesi durumundaki deformasyon halini göstermektedir

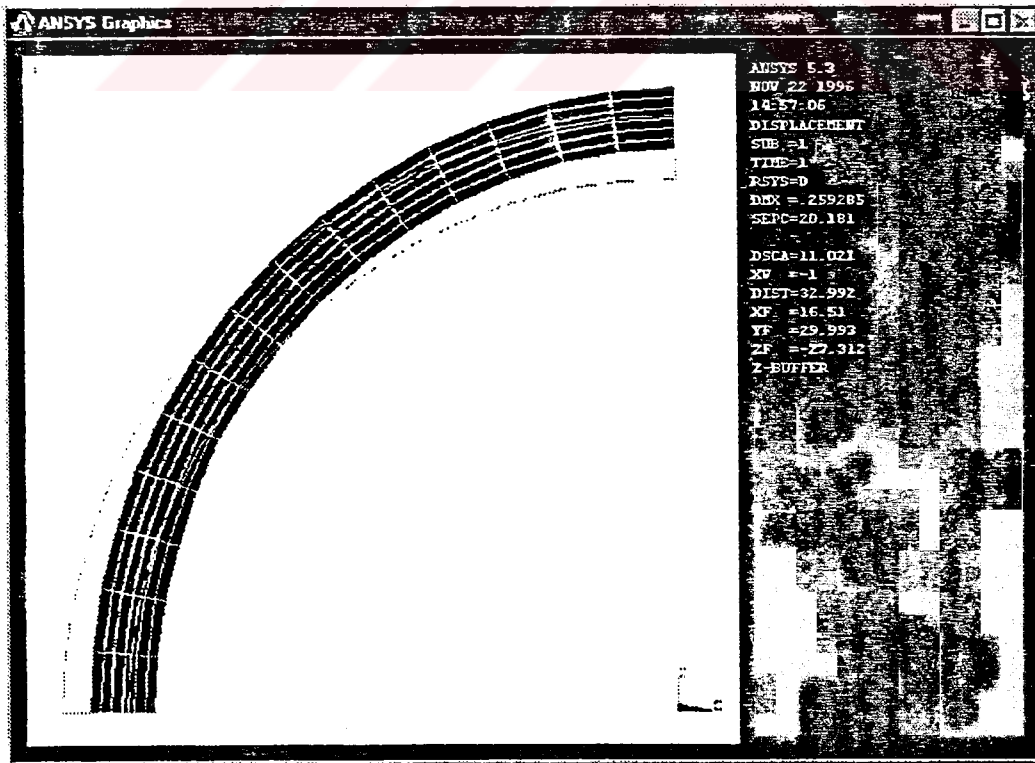
Şekil 4.12' de ise Von Mises Kriterine göre gerilme durumu, görülmektedir. Burada hata yüzdesi 20.181 olarak bulunmuştur. Eğer eleman boyutu daha da küçültülürse hata yüzdesinin 17' ye düştüğü görülür. (Şekil 4.13)

Şekil 4.14' de Solid73' ün üçgen formu (Tetrahedral) kullanılmış, Şekil 4.15' de ise iç kısma yiv açılması durumunda gerilme dağılımında ne gibi değişikliklerin olacağına bakılmıştır.

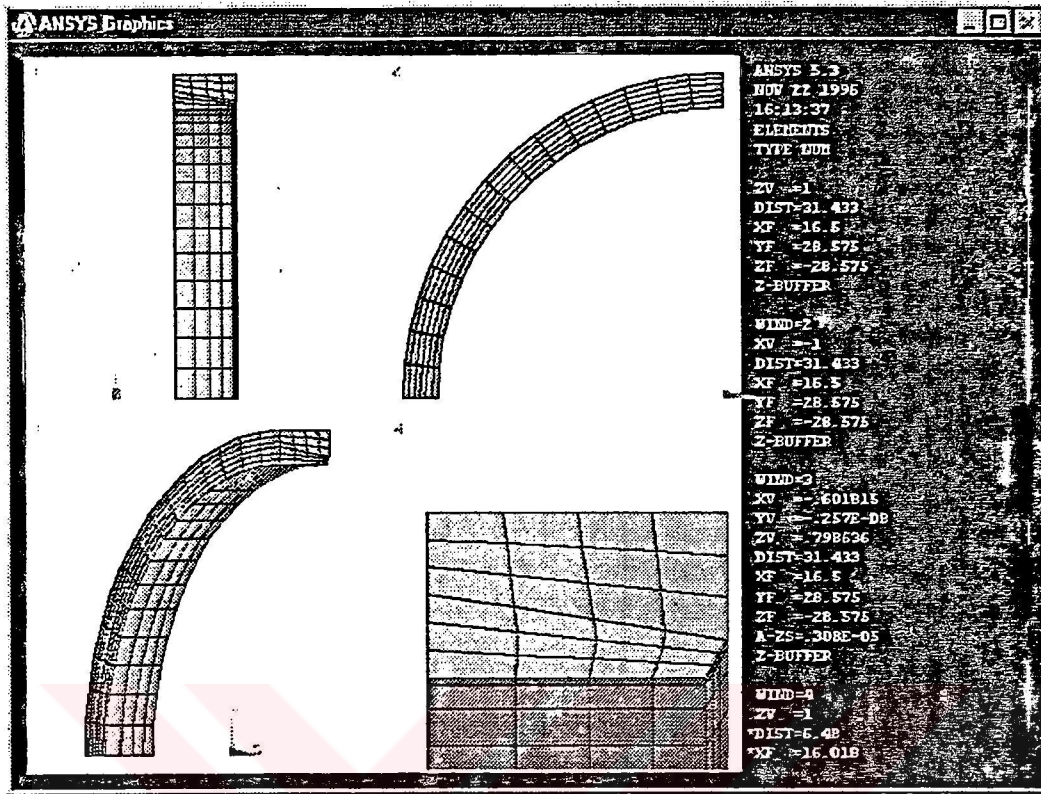
Üçgen piramit (Tetrahedral) kullanılması durumunda hata yüzdesinin arttığı görülür. Şekil 4.14 için hata yüzdesi 47' dir. Eğer incelenen yapının topolojisi izin veriyorsa hekzahedral elemanlar kullanılmalıdır. Eğer topoloji buna uygun değilse bu durumda tetrehedral elemanların sayısı arttırılarak sonuca gidilir.



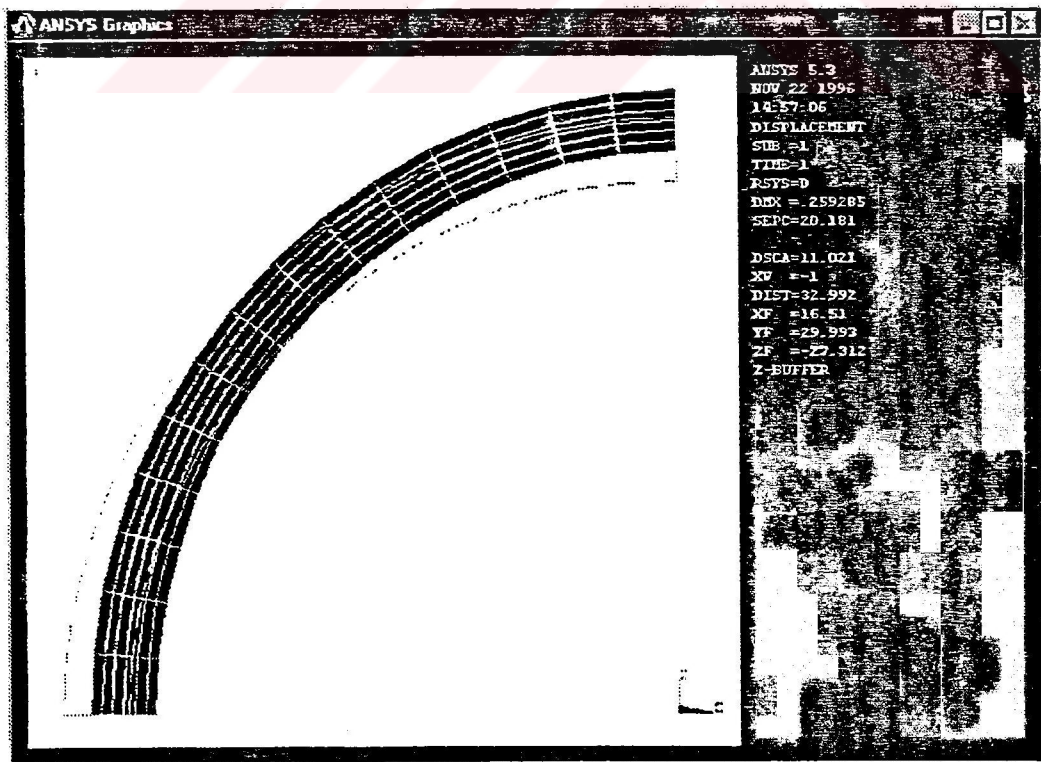
Şekil 4.10 Ağ Yapısı



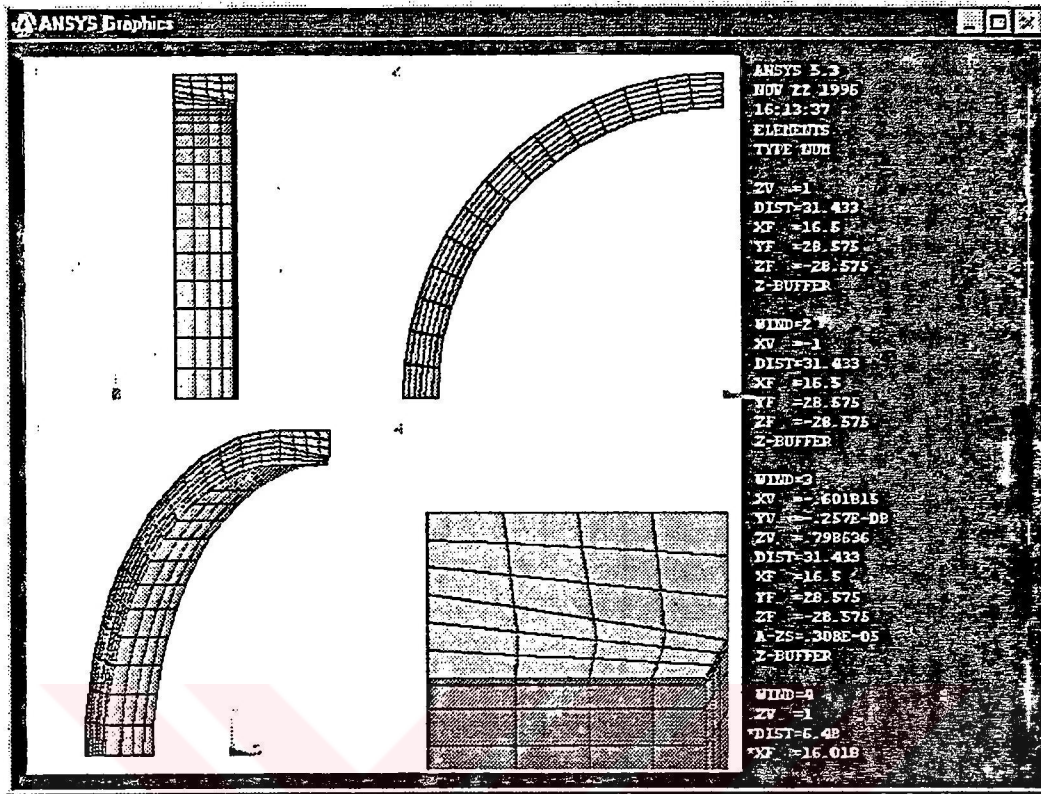
Şekil 4.11 Deforme Olmuş Şekil



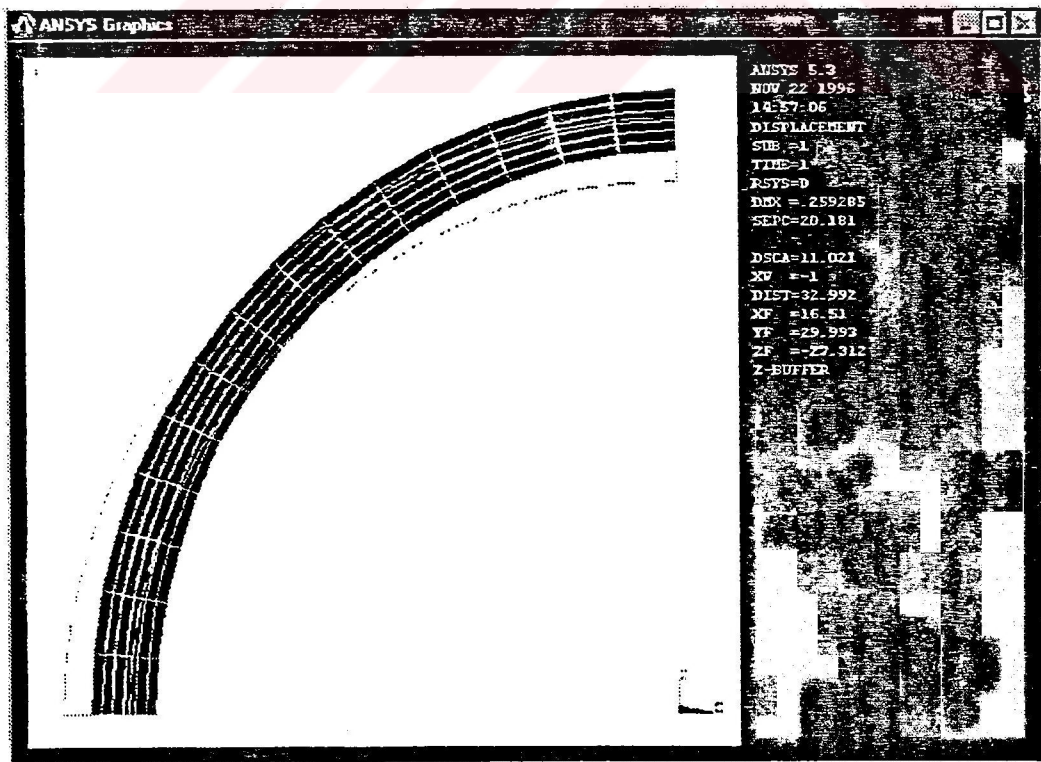
Şekil 4.10 Ağ Yapısı



Şekil 4.11 Deforme Olmuş Şekil



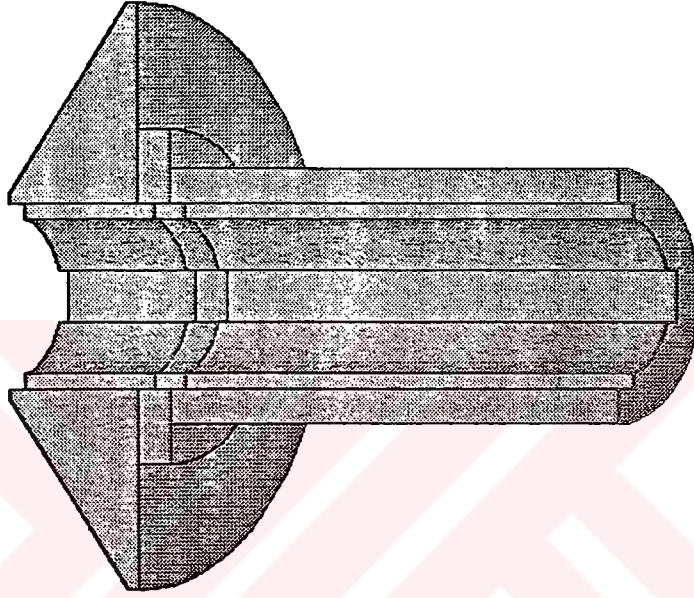
Şekil 4.10 Ağ Yapısı



Şekil 4.11 Deforme Olmuş Şekil

4.4 Sürtünme Konisinin analizi:

Şekil 4.16' da görülen sürtünme konisinin analizinde de ring parçasındaki adımların aynısı gerçekleştirilir.



Şekil 4.16 Sürtünme Konisinin perspektif görünüşü

Sürtünme konisinin ağ yapısı oluşturulurken Solid92 tipi kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Cismin topolojisi dörtgen elemanlarla ağ oluşturmaya imkan vermediğinden dolayı tetrahedral eleman kullanılmıştır.

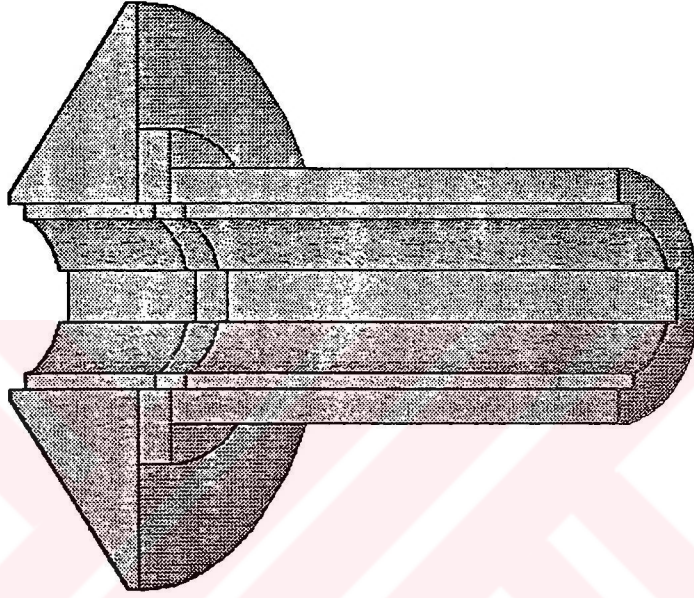
Lineer yapısal analizlerde iki yada üç boyutlu kuadratik elemanlar lineer elemanlardan daha iyi sonuç vermektedir.[8] Fakat burada bir kenar boyunca nodlara uygulanan kuvvet dağılımı homojen değil, orta nodlara kenar nodların dört katı fazla yük gelecek şekilde uygulanmalıdır.

Sürtünme konisinin, uygulanan yükler neticesinde yapısında meydana gelen deformasyon miktarının durumu, Şekil 4.17' de; Von- Mises kriterine göre gerilme dağılımı ise Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de ise diğer iki temas durumu için deformasyon miktarı ve gerilme dağılımı görülmektedir.

4.4 Sürtünme Konisinin analizi:

Şekil 4.16' da görülen sürtünme konisinin analizinde de ring parçasındaki adımların aynısı gerçekleştirilir.



Şekil 4.16 Sürtünme Konisinin perspektif görünüşü

Sürtünme konisinin ağ yapısı oluşturulurken Solid92 tipi kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Cismin topolojisi dörtgen elemanlarla ağ oluşturmaya imkan vermediğinden dolayı tetrahedral eleman kullanılmıştır.

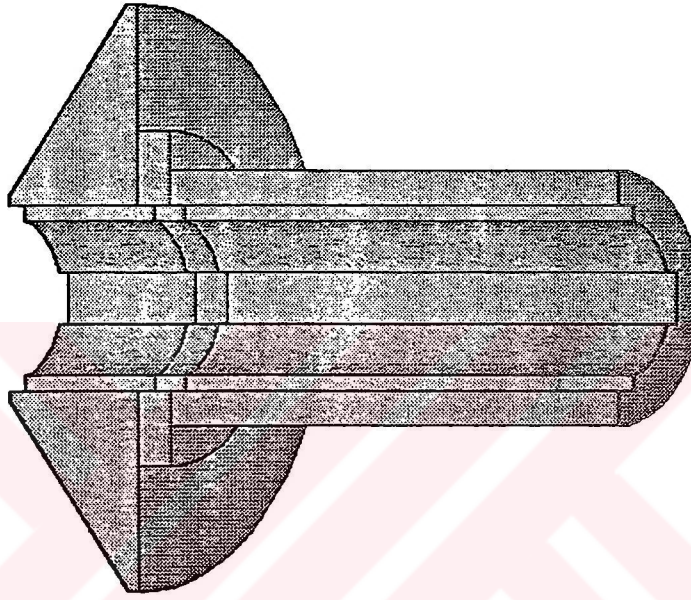
Lineer yapısal analizlerde iki yada üç boyutlu kuadratik elemanlar lineer elemanlardan daha iyi sonuç vermektedir.[8] Fakat burada bir kenar boyunca nodlara uygulanan kuvvet dağılımı homojen değil, orta nodlara kenar nodların dört katı fazla yük gelecek şekilde uygulanmalıdır.

Sürtünme konisinin, uygulanan yükler neticesinde yapısında meydana gelen deformasyon miktarının durumu, Şekil 4.17' de; Von- Mises kriterine göre gerilme dağılımı ise Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de ise diğer iki temas durumu için deformasyon miktarı ve gerilme dağılımı görülmektedir.

4.4 Sürtünme Konisinin analizi:

Şekil 4.16' da görülen sürtünme konisinin analizinde de ring parçasındaki adımların aynısı gerçekleştirilir.



Şekil 4.16 Sürtünme Konisinin perspektif görünüşü

Sürtünme konisinin ağ yapısı oluşturulurken Solid92 tipi kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Cismin topolojisi dörtgen elemanlarla ağ oluşturmaya imkan vermediğinden dolayı tetrahedral eleman kullanılmıştır.

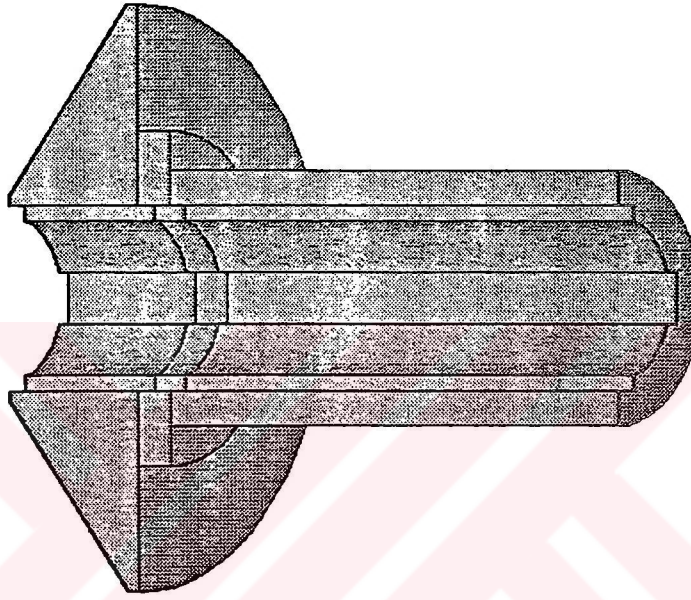
Lineer yapısal analizlerde iki yada üç boyutlu kuadratik elemanlar lineer elemanlardan daha iyi sonuç vermektedir.[8] Fakat burada bir kenar boyunca nodlara uygulanan kuvvet dağılımı homojen değil, orta nodlara kenar nodların dört katı fazla yük gelecek şekilde uygulanmalıdır.

Sürtünme konisinin, uygulanan yükler neticesinde yapısında meydana gelen deformasyon miktarının durumu, Şekil 4.17' de; Von- Mises kriterine göre gerilme dağılımı ise Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de ise diğer iki temas durumu için deformasyon miktarı ve gerilme dağılımı görülmektedir.

4.4 Sürtünme Konisinin analizi:

Şekil 4.16' da görülen sürtünme konisinin analizinde de ring parçasındaki adımların aynısı gerçekleştirilir.



Şekil 4.16 Sürtünme Konisinin perspektif görünüşü

Sürtünme konisinin ağ yapısı oluşturulurken Solid92 tipi kuadratik sonlu eleman kullanılmıştır. Cismin topolojisi dörtgen elemanlarla ağ oluşturmaya imkan vermediğinden dolayı tetrahedral eleman kullanılmıştır.

Lineer yapısal analizlerde iki yada üç boyutlu kuadratik elemanlar lineer elemanlardan daha iyi sonuç vermektedir.[8] Fakat burada bir kenar boyunca nodlara uygulanan kuvvet dağılımı homojen değil, orta nodlara kenar nodların dört katı fazla yük gelecek şekilde uygulanmalıdır.

Sürtünme konisinin, uygulanan yükler neticesinde yapısında meydana gelen deformasyon miktarının durumu, Şekil 4.17' de; Von- Mises kriterine göre gerilme dağılımı ise Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22' de ise diğer iki temas durumu için deformasyon miktarı ve gerilme dağılımı görülmektedir.

4.4.1 Sürtünme Konisine Ait Log Dosyası:

```

/TITLE,Sürtünme konisi  —————> BAŞLIK
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
KEYW,LSDYNA,0
/PMETH,OFF
/PREP7
UIMP,1,EX,,2.1E5, —————> Malzeme özellikleri giriliyor
UIMP,1,DENS,,,,
UIMP,1,ALPX,,,,
UIMP,1,REFT,,,,
UIMP,1,NUXY,,,0.3,
UIMP,1,PRXY,,,,
UIMP,1,GXY,,,,
UIMP,1,MU,,,,
UIMP,1,DAMP,,,,
UIMP,1,KXX,,,,
UIMP,1,C,,,,
UIMP,1,ENTH,,,,
UIMP,1,HF,,,,
UIMP,1,EMIS,,,,
UIMP,1,QRATE,,,,
UIMP,1,RSVX,,,,
UIMP,1,VISC,,,,
UIMP,1,SONC,,,,
*AFUN,DEG
d1=102.3 —————> Ölçüler giriliyor
d2=105
d3=114.3

```

$$b1=15$$

$$a=(60)$$

$$r1=16$$

$$r2=20$$

$$r3=58$$

$$P=0.735$$

$$ng=1500$$

$$nc1=4350$$

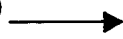
$$nc2=517$$

$$Dmin=20$$

$$Ks=1.5$$

$$q=0.2$$

$$M=955*(P/ng)*10000$$



Sonuç N/mm ye dönüştürüldü

$$i1=ng/nc1$$

$$i2=ng/nc2$$

$$Dmax=i2*Dmin$$

$$d11=20+4.05$$

$$Ft=(M/(d11/2))$$

$$Fn=Ks*Ft/q$$

$$Fx=Fn*\cos(90-a)$$

$$Fy=Fn*\sin(90-a)$$

$$Fxu=Fx/4$$

$$Fyu=Fy/4$$

$$k1x=b1-(1/\tan(A))*((d2-d1)/2)$$

$$k1y=d1/2-(r2-r1)/2$$

$$k2x=k1x$$

$$k2y=d1/2$$

$$k3x=k2x+(1/\tan(A))*((r3-r2)/2)$$

$$k3y=k2y+(r3-r2)/2$$

$$k31x=k3x+1$$

$$k31y=k3y$$

$$k4x=k3x+1$$

$$k4y=k3y-(r3-33)/2$$

$$k5x=k4x+3$$

$$k5y=k4y$$

$$k6x=k5x$$

$$k6y=k5y-(33-25)/2$$

$$k7x=k6x+42$$

$$k7y=k6y$$

$$k8x=k7x$$

$$k8y=k7y-(25-16)/2$$

$$k9x=k8x+2$$

$$k9y=k8y-(16/2)$$

$$k10x=k1x-2$$

$$k10y=k1y-(16/2)$$

/PREP7

K,1,k1x,k1y,0, —————> Anahtar noktalar girildi

K,2,k2x,k2y,0,

K,3,k3x,k3y,0,

K,31,k31x,k31y,0,

K,4,k4x,k4y,0,

K,5,k5x,k5y,0,

K,6,k6x,k6y,0,

K,7,k7x,k7y,0,

K,8,k8x,k8y,0,

K,9,k9x,k9y,0,

K,10,k10x,k10y,0,

LSTR, 1, 2 —————> Çizgiler oluşturuluyor.

LSTR, 2, 3

LSTR, 3, 31

LSTR, 31, 4

LSTR, 4, 5

LSTR, 5, 6

LSTR, 6, 7

LSTR, 7, 8

LSTR, 8, 1

FLST,2,9,4

FITEM,2,9

FITEM,2,8

FITEM,2,7

FITEM,2,6

FITEM,2,5

FITEM,2,4

FITEM,2,3

FITEM,2,2

FITEM,2,1

AL,P51X

KWPAVE, 4

wpstyle,0.05,1,-10,10,0.003,0,0,,5

wpro,,,30.000000

wpro,,,30.000000

wpro,,,30.000000

ASBW, 1 → Alanların bölünmesi

KWPAVE, 6

ASBW, 3

wpstyle,15,1,-10,10,0.003,0,0,,5

wpof,,,15.000000

LSBW, 7 → Çizgilerin bölünmesi

KWPAVE, 7

wpof,,, -15.000000

LSBW, 15

WPCSYS,-1

/RELOT

FLST,2,3,5,ORDE,3

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

FITEM,2,4

FLST,8,2,3

FITEM,8,10

FITEM,8,9

VROTAT,P51X, , , , ,P51X, ,-90, , → Hacmin elde edilmesi

KWPAVE, 10

wpro,,, -90.000000

CSWPLA,11,1,1,1, → KP 10 da silindirik CS tanımladı

CYL4,0,0,8

Mil kesitinin oluşturulması

BLC5,0,0,5,18.1

BLC5,0,0,18.1,5

FLST,2,3,5,ORDE,2

FITEM,2,22

FITEM,2,-24

AADD,P51X

VOFFST,25,-70, , → Mil kesitinin extrude edilmesi

FLST,2,3,6,ORDE,2 → Çarktan milin çıkarılması

FITEM,2,1

FITEM,2,-3

VSBV,P51X, 4

CSYS,0

WPCSYS,-1

/REPLOT

FLST,2,1,4,ORDE,1 → Çemberle çarkın temas yerinin belirlenmesi

FITEM,2,2

LDIV,P51X,1.558845726/21.93931, ,2,0

FLST,2,1,4,ORDE,1

FITEM,2,1

LDIV,P51X,1.558845726/20.38046427, ,2,0

ET,1,SOLID92 → Eleman tipinin seçimi

ESIZE,4,0,

SMRTSIZE,5

FLST,2,1,4,ORDE,1

FITEM,2,1

LESIZE,P51X, ,2,1,

FLST,5,3,6,ORDE,2 → Ağ yapısı oluşturma

FITEM,5,5

FITEM,5,-7

CM,_Y,VOLU

VSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,VOLU

CHKMSH,'VOLU'

CMSEL,S,_Y

VMESH,_Y1

CMDEL,_Y

CMDEL,_Y1

CMDEL,_Y2

!*

Component oluşturma

FLST,5,3,5,ORDE,3

FITEM,5,40

FITEM,5,49

FITEM,5,57

ASEL,S, , ,P51X

CM,mil,AREA

FLST,5,6,5,ORDE,6 → Mil üzerindeki kama ile çarkın temas alanı

FITEM,5,42

FITEM,5,44

FITEM,5,51

FITEM,5,53

FITEM,5,59

FITEM,5,61

ASEL,S, , ,P51X

CM,kamay,AREA

FLST,5,6,5,ORDE,6

FITEM,5,41

FITEM,5,43

FITEM,5,50

FITEM,5,52

FITEM,5,58

FITEM,5,60

ASEL,S,,P51X

CM,kamaz,AREA

FLST,5,2,5,ORDE,2 → Rulmanların temas alanı seçiliyor.

FITEM,5,6

FITEM,5,8

ASEL,S,,P51X

CM,rulman,AREA

LSEL,S,,, 1 → Kuvvetin uygulandığı line

CM,kuvvet,LINE

FLST,5,3,5,ORDE,3 → Simetri yüzeyi seçiliyor

FITEM,5,45

FITEM,5,54

FITEM,5,62

ASEL,S,,P51X

CM,smtralan,AREA

CMGRP,radyal,MIL,RULMAN → Gurup oluşturma

ALLSEL,ALL

! THE FOLLOWING SELECT COMMANDS WERE GENERATED BY THE
ALLSEL COMMAND

VSEL,ALL

ASEL,ALL

LSEL,ALL

KSEL,ALL

ESEL,ALL

NSEL,ALL

Component oluşturma sona erdi

CSYS,11, → Silindirik koordinat sistemi

WPCSYS,-1

/REPLOT

CMSEL,S,RADYAL
ALLSEL,BELOW,AREA
LSLA
KSL
ESLA
ESLL,A
ESLK,A
NSLE
APLOT
NSLA,S,1
/VIEW, 1, -1
/ANG, 1
/REP,FAST

FLST,2,1028,1,ORDE,30 → Düğüm noktalarının koordinat sistemi
değiştiriliyor.

FITEM,2,8
FITEM,2,-15
FITEM,2,21
FITEM,2,-24
FITEM,2,33
FITEM,2,-34
FITEM,2,39
FITEM,2,-40
FITEM,2,62
FITEM,2,-70
FITEM,2,90
FITEM,2,-98
FITEM,2,104
FITEM,2,-112
FITEM,2,118
FITEM,2,-174
FITEM,2,387
FITEM,2,-406

FITEM,2,447
FITEM,2,-535
FITEM,2,692
FITEM,2,-726
FITEM,2,873
FITEM,2,-901
FITEM,2,1495
FITEM,2,-1977
FITEM,2,2069
FITEM,2,-2212
FITEM,2,3460
FITEM,2,-3587
NROTAT,P51X
NPLOT
!*
/PSF,DEFA, ,1
/PBF,DEFA, ,1
/PSYMB,CS,0
/PSYMB,NDIR,1
/PSYMB,ESYS,0
/PSYMB,LDIR,0
/PSYMB,ECON,0
/PSYMB,DOT,1
/PSYMB,PCONV,
/PSYMB,LAYR,0
/PBC,ALL, ,1
/REP
CSYS,0
WPCSYS,-1
/REPLOT
APLOT
ALLSEL,ALL
VSEL,ALL

ASEL,ALL
LSEL,ALL
KSEL,ALL
ESEL,ALL
NSEL,ALL
APLOT
CMSEL,S,MIL
ALLSEL,BELOW,AREA
LSLA
KSL
ESLA
ESL,A
ESLK,A
NSLE
APLOT
/SOLU
FINISH
/SOLU
NSLA,S,1

Çözüm işlemcisine geçiliyor

FLST,2,636,1,ORDE,18
FITEM,2,21
FITEM,2,-24
FITEM,2,33
FITEM,2,-34
FITEM,2,39
FITEM,2,-40
FITEM,2,387
FITEM,2,-406
FITEM,2,447
FITEM,2,-535
FITEM,2,692
FITEM,2,-726

FITEM,2,873

FITEM,2,-901

FITEM,2,1495

FITEM,2,-1821

FITEM,2,3460

FITEM,2,-3587

D,P51X, , , , ,UX → r yönünde sınırlama

CMSEL,S,RULMAN

ALLSEL,BELOW,AREA

LSLA

KSL

ESLA

ESL,A

ESL,A

NSLE

APLOT

NSLA,S,1

NSLA,S,1

FLST,2,392,1,ORDE,14

FITEM,2,8

FITEM,2,-15

FITEM,2,62

FITEM,2,-70

FITEM,2,90

FITEM,2,-98

FITEM,2,104

FITEM,2,-112

FITEM,2,118

FITEM,2,-174

FITEM,2,1822

FITEM,2,-1977

FITEM,2,2069

FITEM,2,-2212

D,P51X, , , , ,UX,UZ → r ve Z yönünde sınırlama

CMSEL,S,KAMAY

ALLSEL,BELOW,AREA

LSLA

KSL

ESLA

ESL,A

ESL,A

NSLE

APLOT

NSLA,S,1

NSLA,S,1

FLST,2,387,1,ORDE,30

FITEM,2,25

FITEM,2,-28

FITEM,2,31

FITEM,2,-32

FITEM,2,35

FITEM,2,-36

FITEM,2,38

FITEM,2,41

FITEM,2,-42

FITEM,2,44

FITEM,2,407

FITEM,2,-412

FITEM,2,422

FITEM,2,-430

FITEM,2,536

FITEM,2,-621

FITEM,2,654

FITEM,2,-685

FITEM,2,727

FITEM,2,-741

FITEM,2,745

FITEM,2,-762

FITEM,2,779

FITEM,2,-796

FITEM,2,835

FITEM,2,-872

FITEM,2,1394

FITEM,2,-1494

FITEM,2,3408

FITEM,2,-3459

D,P51X, , , , ,UY → y yönünde sınırlama

CMSEL,S,KAMAZ

ALLSEL,BELOW,AREA

LSLA

KSL

ESLA

ESL,A

ESLK,A

NSLE

APLOT

NSLA,S,1

FLST,2,396,1,ORDE,20

FITEM,2,25

FITEM,2,-30

FITEM,2,35

FITEM,2,-37

FITEM,2,41

FITEM,2,-43

FITEM,2,407

FITEM,2,-421

FITEM,2,536

FITEM,2,-653

FITEM,2,727

FITEM,2,-759

FITEM,2,763

FITEM,2,-778

FITEM,2,797

FITEM,2,-834

FITEM,2,1293

FITEM,2,-1393

FITEM,2,3345

FITEM,2,-3407

D,P51X, , , , ,UZ → z yönünde sınırlama

CMSEL,S,SMTRALAN

ALLSEL,BELOW,AREA

LSLA

KSL

ESLA

ESL,A

ESLK,A

NSLE

APLOT

NSLA,S,1

NSLA,S,1

DSYM,SYMM,Z, , → Simetri giriliyor

CMSEL,S,KUVVET

ALLSEL,BELOW,LINE

KSL

ESL

ESLK,A

NSLE

LPL

NSLL,S,1

NPLOT

FLST,2,3,1,ORDE,3 → Kuvvetler giriliyor

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

FITEM,2,3641

F,P51X,FX,FX/11,

FLST,2,2,1,ORDE,2

FITEM,2,3640

FITEM,2,3642

F,P51X,FX,FX/2.75,

FLST,2,3,1,ORDE,3

FITEM,2,1

FITEM,2,-2

FITEM,2,3641

F,P51X,FY,-FY/11,

FLST,2,2,1,ORDE,2

FITEM,2,3640

FITEM,2,3642

F,P51X,FY,-FY/2.75,

ALLSEL,ALL

VSEL,ALL

ASEL,ALL

LSEL,ALL

KSEL,ALL

ESEL,ALL

NSEL,ALL

/STAT,SOLU → Çözüm yaptırılıyor

SOLVE

FINISH

/POST1

PLDISP,2 → Sonuçların gösterimi

BÖLÜM 5

5.1 SONUÇLAR VE ÖNERİLER:

Bilgisayar teknolojisindeki gelişme her alanda olduğu gibi mühendislik uygulamalarında da kendini göstermiş karşılaşılan problemlerin çözümünde mühendislere alternatif çözüm olanakları sunmuştur. Mühendislik alanında, özellikle de Makina Mühendisliğinde bilgisayar kullanımı artık bir tercih olmaktan çıkmış, bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bu çalışmada konik sürtünme diskli varyatör mekanizmasının yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada ANSYS programı kullanılmıştır. Analizin yapılması esnasında izlenen adımlar açıklanmıştır.

Problem Sonlu Elemanlar metodu mantığıyla ele alınmış ve belirli kabüllerle modellenmiştir.

Özellikle simetri ve aksisimetri durumları mevcut olduğu için bunların getirdiği avantajlar kullanılarak, çözüm zamanında büyük tasarruf sağlanmıştır.

Üç boyutlu katı modellerde ağ yapısı oluşturulurken mümkün olduğu yerlerde hegzahedral elemanlar kullanılmıştır. Eğer incelenen yapının topolojisi buna uygun değilse tetrahedral yada üçgen prizma elemanlar tercih edilmiştir, fakat bu durumda da gerçeğe yakın sonuçlara ulaşmak için ağ yapısı mümkün mertebe küçültülmüştür.

Yapılan analizde incelenen ring parçası iki farklı eleman tipi kullanılarak (hegzahedral ve tetrahedral) çözülmüş ve sonuçlardaki farklılıklar gösterilmiştir. Ansys programında yer alan hata tahmini özelliği kullanılarak sonuçlar karşılaştırıldığında tetrahedral elemanların daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Önemli olan diğer bir noktada hangi eleman tipi kullanılırsa kullanılsın gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için mümkün olduğu ölçüde ağ yapısı ufaltılmalı ve modelleme esnasında kullanılan elemanın aşırı şekil değiştirmesinden kaçınılmalıdır. Yani elemanın iç açılarının dar yada geniş açı halini almasından kaçınılmalıdır.

İncelediğimiz ring parçasının geometrisinin değiştirilmesi durumunda deformasyon miktarı ve gerilme dağılımında nasıl bir değişikliğin olacağını görmek için, ring parçasının iç kısmına bir yiv açılmış ve maksimum gerilme değerinin farklı bir bölgeye yöneldiği görülmüştür. Mühendislik çalışmalarında da ana hedeflerden biri en az malzeme kullanımı ile işletme yüklerini karşılayacak olan ürün şeklini belirlemektir. Burada da aynı yükleme koşullarında farklı geometriler kullanılarak en uygun gerilme dağılımı elde edilerek optimum şekle ulaşılabilir. Yine analiz sonuçlarına göre maksimum eşdeğer gerilmelerin oluştuğu bölgelerde farklı malzeme kullanımına veya yüzey sertleştirme yoluna gidilebilir.

Önceki bölümlerde anlaşılabileceği üzere sonlu elemanlar metoduyla istenilen sonuca ulaşmak için öncelikle problemin iyi anlaşılması gerekir. Böylece sonlu eleman analizinde problemin hangi boyutta ele alınacağı ve hangi tip elemanın kullanılacağı büyük ölçüde belli olmuş olur.

Gerek ring parçası gerekse sürtünme konisi için yazılmış olan “log” dosyalarındaki boyutlar parametrik olarak girilmiştir. Böylece sadece bu değerler değiştirilerek farklı geometride bir model kolaylıkla tekrar tekrar elde edilebilir. Bu tür çalışmalarda değişkenleri bir parametre ile tanımlamak ve programı parametrik ifadelerle oluşturmak alternatif çözüm yolları elde etmede zaman açısından büyük yararsağlar.

KAYNAKLAR

- [1] Charles E. Knight, The Finite Element in Mechanical Design, 1993
- [2] GÜNAY D. , Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri, Sakarya Üniversitesi Yayınları, Sayı:003, Adapazarı, 1993
- [3] KURTAY T. , Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, 1980
- [4] KURTAY T. , Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş Ders Notları, İ.T.Ü. Makina Fakültesi, 1996
- [5] R.J. Astley, Finite Elements in Solids and Structures Mechanical Engineering University of Carterbury, U.S.A, 1992
- [6] Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS Program. Technical Description of Capabilities, 1992
- [7] Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS User's Manual for Revision 5.3, 1994
- [8] Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS Basic Analysis Procedures Guide for Revision 5.3, 1994
- [9] Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS Structural Analysis Guide for Revision 5.3, 1994
- [10] Swanson Analysis Systems, Inc. ANSYS Modelling and Meshing Guide for Revision 5.3, 1994
- [11] OKTAY ŞEFİK. , Makina Elemanları, Cilt 3, 1964

ÖZGEÇMİŞ

Serkan YÜRÜK, 1973 yılında Adapazarı' da doğdu. Orta ve lise öğrenimini Adapazarı Atatürk Lisesi' de 1990 yılında tamamladıktan sonra, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü' ne girdi. 1995 yılında Mühendislik Fakültesinden ikincilikle mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Anabilim Dalı Konstrüksiyon Programı' nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

