

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KORİGE BORULARIN TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Adem GÜNEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Haziran 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KORİGE BORULARIN TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Adem GÜNEL
(501111003)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV

Haziran 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501111003 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Adem GÜNEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Korige Boruların Tasarımı**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Fethi KADIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mesut ŞİMŞEK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. Deniz GÜNEY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **6 Haziran 2013**

Eşime,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca her zaman desteğini gördüğüm, yüksek lisans çalışmalarım boyunca beni yönlendirerek yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü olanağı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU, Prof. Dr. Ziya ABDULALİYEV, ve çalışmamı destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırma Kurumuna ve DİZAYNGRUP 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hayatımdaki tüm dönemlerde olduğu gibi bu önemli dönemde de bana destek veren aileme çok teşekkür ederim.

Mayıs 2013

Adem GÜNEL
(İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. BORU TOPRAK ETKİLEŞİMİNİN FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ	15
4. YENİ ÜRETİLEN KORİGE BORULARIN YEREL BURKULMA HESABI	23
4.1 Sabit Enkesitli Ara Elemanlarının Burkulma Hesabı.....	27
4.1.1 V1 sinus dalgası ara rijitlik elemanının burkulma hesabı.....	29
4.1.2 Enkesit alanı değişken olan ara rijitlik elemanının burkulma hesabı.....	29
4.1.3 Gömülü korige borunun yerel burkulmasının incelenmesi.....	30
4.1.4 Gömülü borunun dış kabuğunun iki ara rijitlik elemanlarının arasındaki kısmının eğilmesinin incelenmesi.....	32
4.2 Ara Elemanlarının Stabilite Testleri ve Sayısal Hesapla Karşılaştırılması	33
4.3 Teorik ve Deneysel İncelenen Profillerin Sayısal Analizi.....	37
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ	49

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Borunun enkesitini kontrol için boyutsuz geometrik parameteler ve önerilen değerler.....	5
Çizelge 2.2 : Optimal korige profili enkesitlerindeki maksimum asal gerilme değerleri.....	13
Çizelge 2.3 : İncelenmiş teknik literatürde farklı kriterlere göre önerilen optimal korige profilleri.....	14
Çizelge 3.1 : Gömülü boru modelinde mutlak yerdeğiştirme ve birim Şekil değiştirme miktarları.....	17
Çizelge 3.2 : Gömülü boru modelinde yayılı yük altındaki düşey gerilme değerleri ve elastisite modülü.....	18
Çizelge 4.1 : Ara rijitlik elemanlarının eleman ve nod sayıları.....	41

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Borularda bölgelerin adlandırılması.	3
Şekil 2.2 : Borunun yetersiz rijitlikten dolayı en kesitinin deformasyon örnekleri.	4
Şekil 2.3 : Boruda duvar kırılması.....	4
Şekil 2.4 : Modifiye edilecek olan standart korige enkesiti.....	6
Şekil 2.5 : Borunun sayısal analizi için uygulanan model.....	6
Şekil 2.6 : Yapılan modifiye çalışmalarına göre önerilen korige enkesitleri.....	7
Şekil 2.7 : Karşılaştırmak için kullanılan düz tepeli, kutu ve borusal korige profillerin şeması.....	8
Şekil 2.8 : Korige profilin radyal baskıda deformasyonu.....	9
Şekil 2.9 : Standart korige profili.....	10
Şekil 2.10 : Önerilen korige profilleri.....	11
Şekil 2.11 : Önerilen kabuklu korige profilleri.....	12
Şekil 2.12 : Yarım daire şekilli korige profilleri.....	12
Şekil 2.13 : Optimal korige enkesitleri.....	13
Şekil 3.1 : Gömülü boru modelinin şeması.....	15
Şekil 3.2 : Gömülü boru modelinin yüklenmesi.....	16
Şekil 3.3 : Levhada yayılı yük dağılımı.....	17
Şekil 3.4 : Yayılı yük altındaki ahşap modelin şeması.....	19
Şekil 3.5 : Gömülü boru modelinde halkada oluşan fotoelastik dış şeritlerin dağılımı.	19
Şekil 3.6 : Gömülü boru modelinde halkada oluşan fotoelastik iç şeritlerin dağılımı	20
Şekil 3.7 : Gerilme-şerit sayısı grafiği.....	20
Şekil 3.8 : Gömülü boru modelinde halkanın dış hattında oluşan boyutsuz gerilme dağılımı.....	21
Şekil 3.9 : Gömülü boru modelinde halkanın iç hattında oluşan boyutsuz gerilme dağılımı.....	21
Şekil 4.1 : Korige boru ve yapımında kullanılan şeritin genel görünümü.....	23
Şekil 4.2 : a) Double Single ara rijitlik elemanı b) elemanın enkesitinin mukavemet karakteristikleri.....	24
Şekil 4.3 : a) V1 sinus dalgası ara rijitlik elemanı b) elemanın enkesitinin mukavemet karakteristikleri.....	25
Şekil 4.4 : a) Yayvari ara rijitlik elemanı, b) orta ve c) uç bölgesinin en kesitlerinin mukavemet karakteristikleri.....	27
Şekil 4.5 : Enkesit alanı değişmeyen rijitlik ara elemanlarının burkulma hesabı şeması.....	28
Şekil 4.6 : Enkesitinin alanı değişen ara rijitlik elemanının burkulma hesabı şeması.	30
Şekil 4.7 : Korige borunun yerel burkulmasının incelenmesi için hesap şeması.....	31

Şekil 4.8 : Çapı ϕ 1200 mm olan korige borunun enkesitinin zayıf bölgesinde ilgili atalet momentinin hesaplanması için şema.	31
Şekil 4.9 : Korige borunun dış kabuğunun iki ara rijitlik elemanı arasındaki kısmın eğilme hesabı için şema.	32
Şekil 4.10 : Basma deneylerinde kullanılan MTS Universal Test Cihazı.	34
Şekil 4.11 : Yeni üretilen korigelere ait ara rijitlik elemanı.	35
Şekil 4.12 : Double Single dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.	36
Şekil 4.13 : V1 Sinüs Dalgalı dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.	36
Şekil 4.14 : Yayvari dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.	37
Şekil 4.15 : Düz dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.	37
Şekil 4.16 : Analiz için özellikler belirleme.	38
Şekil 4.17 : Malzeme özelliklerinin ve analiz tipinin belirlenmesi.	39
Şekil 4.18 : Yüklerin uygulanması.	39
Şekil 4.19 : Sınır koşullarının belirlenmesi.	40
Şekil 4.20 : Mesh atanması.	40
Şekil 4.21 : Programın çalıştırılması.	41
Şekil 4.22 : Düz dikme için ABAQUS sonucu.	42
Şekil 4.23 : Double Single dikme için ABAQUS sonucu.	42
Şekil 4.24 : Yayvari dikme için için ABAQUS sonucu.	43
Şekil 4.25 : V1 Sinüs Dalgası için için ABAQUS sonucu.	43

KORİGE BORULARIN TASARIMI

ÖZET

Boru iletim hatları sanayinin gelişmesiyle birçok alanda kullanılmaya başlamıştır. Enerji iletim hatları, kanalizasyon, içme ve sulama suyu hatları, elektrik, vb. birçok mühendislik yapılarında gömülü boru hatları kullanılmaktadır. Gömülü boruların çeşitli alanlarda kullanılması araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Dolayısıyla bu konuda yüzlerce araştırma yapılmıştır. Gömülü boruların yük altında davranışları incelenip, daha mukavim borular elde edilmeye çalışılmıştır. Böylece daha ekonomik ve daha dayanıklı borular üretilebilmektedir.

Akışkanların düşük seviyeli basınçlarda nakli için çeşitli plastik malzemelerden, o cümleden HDPE (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)'den yapılmış farklı profilli (eksenel kesitli) korige borular yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Korige borular genel olarak silindirik kabukların dış yüzeylerine farklı profilli ince duvarlı(cidar kalınlıklı) bantların sarılması, birkaç silindirik kabuğun içiçe konsentrik yerleştirilmesi ve pozisyonlarının uygun ara elemanları ile sabitlendirilmesi yöntemleri ile yapılabilirler. Değişik şekillerde yapılan ara elemanları ilgili kabukların pozisyonlarının sabitlendirilmesi dışında borunun mukavemetinin artmasını da sağlar.

Korige borular tasarımları bakımından önemli farklılıklar gösterdiklerinden gerilme şekil değiştirme durumlarının hassas olarak incelenmesi için genel bir analitik yöntemin geliştirilmesi yönündeki çalışmalar kabul edilebilir bir zaman aralığında efektif sonuçlar vermeyebilir. Bazı yapılarda sayısal yöntemlerle alınmış sonuçlar mevcuttur fakat onların genelleştirilmesinin özel karakterli olduklarından verimsiz olacağı muhtemeldir. Problemin etkin çözüm yöntemlerinden biri incelemelerin rijitliği ilgili korige borunun rijitliğine eşit seçilmiş sürekli ve sabit enkesitli (düz) borular üzerinde yapılması olabilir. Korige borular gömülü durumda, ağırlıklı olarak, düşey yöndeki yüklerin etkisindedir. Bu bakımdan söz konusu boruların şekil değiştirme durumları genel olarak düşey diametral düzlem üzere ters yönlü eşit şiddette yüklerin etkisinde yapılan testlerle değerlendirilirler. Dolayısıyla, ince cidar kalınlıklı sonlu silindirik kabuğun diametral düzlem üzere ters yönlü eşit intensivli yayılı yüklerin etkisinde oluşan gerilme-şekil değiştirme durumunun incelenmesi faydalı olabilir.

Bu çalışmada ise boru toprak etkileşimi incenerek yeni farklı bir korige tasarımı yapılmıştır. Boru toprak etkileşimi fotoelastik yöntem kullanılarak deneysel olarak detaylı olarak incelenmiştir. Fotoelastik deneyde boru malzemesi olarak epoksi reçine özlü optik hassas malzeme kullanılırken toprak malzemesi olarak kayın ağacı kullanılmıştır. Ayrıca bilgisayar programı ABAQUS yardımıyla sayısal analiz yapılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile modelleme sonuçları büyük benzerlik göstermektedir.

DESIGN OF THE CORRUGATED PIPES

SUMMARY

Polymers have an increasingly important role for industry. These materials offer clear advantages in certain applications that they have been permanently replacing conventional materials like metals. Some of the advantages are lower density, resistance to corrosion and chemicals, relatively low cost and ease of processing into fairly intricate shapes. Polymers are used for the production of pipes prevalently due to its remarkable properties.

Thermoplastic pipes with different wall geometries have been manufactured to achieve effective utilization of pipe materials. A wide variety of wall geometries have been developed by the pipe manufacturing industry over the last few decades. However, the shapes of these profiles have led to questions regarding their impact on pipe performance.

High-density polyethylene is currently used for the production of plastic pipes for the transportation of liquids. High-density polyethylene offers important properties like flexibility, environmental attack resistance and ease of installation.

Underground pipe has been used to transport potable water to city dwellers and to remove wastewater from cities since the beginnings of human. Pipeline transmission lines began to be used in many areas by development of industry. Buried pipelines are used in many engineering structures such as power transmission lines, wasteway, drinking and irrigation water lines, electricity, etc. Embedded pipes used in various fields has attracted the attention of researchers. On this account, research has been done about it hundreds. Examined the behavior of buried pipes under the load, tried to be more resistant pipes. In this way, pipes can be manufactured more economically and more resistant.

The high-density polyethylene pipe has good potential for economic use for marine oil and gas pipelines, underdrains, storm sewers, culverts, and other subsurface drainage structures. In view of its inherent chemical and corrosion resistance, light weight, toughness, flexibility, easy splicing, and consequent easy handling and installation, HDPE piping is used extensively for gas pipelines. In the transportation industry, over forty states in the US use HDPE pipes as part of a 40% annual growth in the use of thermoplastic, HDPE and polyvinyl chloride (PVC) pipes in transportation construction projects.

Corrugated pipes made from different plastic materials with a various types of axially sectioned profiles are widely used for fluid transportation at lower pressures, for instance from this group high density polyethylene. Corrugated pipes, in general, are produced wrapping thin-walled tapes having different types of profile over outer surfaces of cylindrical shells, concentrically placing a number of cylindrical shells and fixing their positions with appropriate connection elements. Produced these

connection elements in a different types not only allow to fix the related cylindrical shells but also to increase the strength of pipes.

The efforts in order to develop a general analytical method for the precise examination of state of strain-stress of corrugated pipes may not give effective results in an acceptable period of time since pipes significantly display differences in terms of design. Some results obtained using numerical methods exist, but the generalization is likely to be inefficient due to their special characters. One of the effective solution methods of the problem can be that taking the stiffness of cross section of the related corrugated pipe is equal to another continuous and constant (flat) one.

As it known, corrugated pipes in embedded cases mainly are subjected to vertical loads. In this respect, state of strain of pipelines traditionally, in general are evaluated with the tests carried out under the influence of vertical loads, equal intensity but in the opposite directions in the diametrical plane. Therefore, the examination of state of strain-stress of thin-walled finite cylindrical shells under the equal distributed loads in the opposite directions in the diametrical plane may be useful.

Nowadays, demand for the large diameter plastic pipes, which are related to the important water transportation projects, increases. In this respect researches for the optimization of the corrugated profile geometry of the larger pipes, which are lighter and have enough strength, sustain its currency.

There are some studies about the plastic pipes and pipe-soil interaction in the technical literature. Reddy et al. defined the maximum tangential stress locations as the shoulder which was above 45° springline. It was stated by Moore that highest circumferential stresses were located at the springline. Moser and Folkman stated that dimpling occurs generally at 3 and 9 o'clock positions in the field performance tests of profile-wall HDPE pipes and beginning of wall crushing observed at the 9:30 and 2:30 o'clock positions. Experimental study of Dhar and Moore showed that maximum circumferential strain occurred at springline. McGrat and Schafer stated that maximum compressive circumferential strain occurred at crown and maximum tensile circumferential strain occurred at the springline as a result of their parallel plate simulation. Burgon and Keatley showed that maximum stress locations were at the springline. There is a need for the detailed investigation of state of stress for the buried pipe problems experimentally.

In this study, buried HDPE pipes were investigated using photoelasticity which allows analyzing in details state of stress on the buried pipe model. Investigations are carried out for the photoelastic plane models taking into account the analogy between plane state of stress and strain and independency of state of stress from Poisson's ratio in plane stress. Different type of corrugated profile pipes were compared. Also, covered corrugated profile pipes were investigated in terms of the local buckling and different types of strip geometries were analyzed numerically. Buried condition of the pipes is also an important issue and buried pipe was modeled by using photoelasticity in the final part of this study. , maximum stress locations in the pipe model were close to crown and about $\pm 20^\circ$ away from springline in terms of the differences between principal stress values.

New and different corrugated pipe is designed by examined the interaction of soil and pipe. Pipe-soil interaction experimentally investigated in detail using photoelastic method. In photoelastic experiment, epoxy resin which the optical sensitive material is used as pipe material. The beech tree is used as soil material. In

addition, numerical analysis done with the help of a computer program ABAQUS are compared with the experimental results. The experimental results show great resemblance with the modeling results.

The part of the model which imitates the pipe is made of the optical-sensitive material based on epoxy resin (araldite). Base of the model was placed on the horizontal smooth surface. Model was supported from right and left sides with plates which are designed do not prevent from its displacements. The set-up creates uniform axial compressive loading onto the models. Loading of the model was created by a prismatic lever. The load is transferred to the model with a ball. This ball satisfies the axial loading of the model. A steel bar is used for transferring the load to be distributed onto the model from the ball. The area of the contact surface between the bar and model is equal to 240mm^2 . Leica DM4500 P polarization research microscope was used in the work.

Material of the model has following optical-mechanical properties: modulus of elasticity, $E=3500\text{MPa}$ and the fringe value of optical sensitive material $\sigma_0^{1.0}=9.57\text{ N/mm}\cdot\text{fringe}$. The soil was modeled using wood having porous structure (beech). Parts of the model are prepared using tooling machines with the required specific tools and cooling taking care of no additional optical effect. Specifically, external diameter of the pipe and internal diameter of the wood part of the model are close fit.

As a result of the experiment, maximum stress locations on the pipe model were close to crown (above 84° springline at right shoulder) and invert (below 78° springline at right and left shoulder) in terms of the outer stress and 19° and 16° below the springline at left and right haunch and at the crown in terms of the inner stress. While these dimensionless stress values are the difference between principal stresses ($\sigma_\theta-\sigma_r$), dimensionless stresses in the inner surface of the pipe is dimensionless tangential stress component (σ_θ) only due to zero radial stress component in that region.

1. GİRİŞ

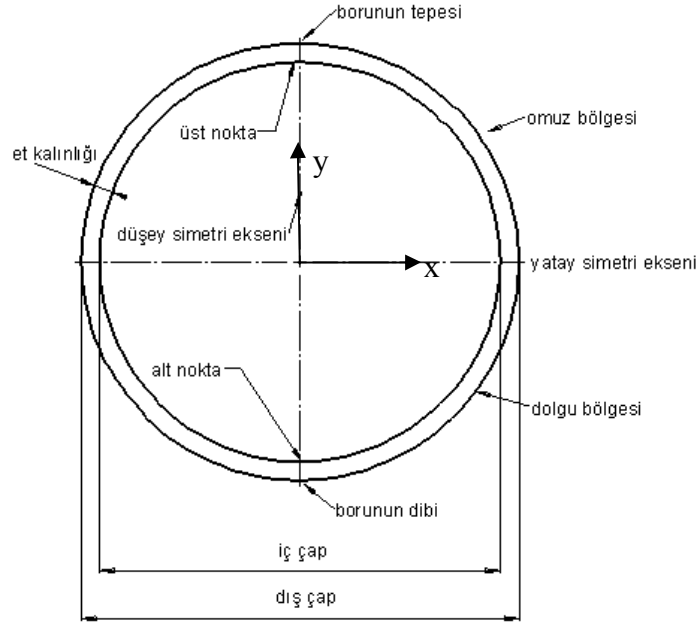
Sanayide çeşitli ürünlerin imalatında polimerlerin kullanımı hızla artmaktadır. Bu sınıf malzemeler üstünlükleriyle birçok alanda metaller gibi geleneksel malzemelerin uygulanmasını sınırlamaktadırlar. Üstünlükleri olarak düşük yoğunluk, korozyon ve kimyasallara karşı direnç, büyük bir kısmı için nispeten düşük maliyet ve oldukça karmaşık şekillere işlenebilme kolaylığı gösterilebilir [1-3]. Polimerler, dikkat çekilen özelliklerinden dolayı farklı amaçlarla kullanılan boruların imalinde de geniş olarak uygulanmaktadır.

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), sıvıların dağıtımı için kullanılan boruların üretiminde yaygın olarak kullanılan polimerlerdendir [4]. HDPE esneklik, kimyasal etkenlere karşı direnç ve kolay montaj gibi özelliklere sahiptir.

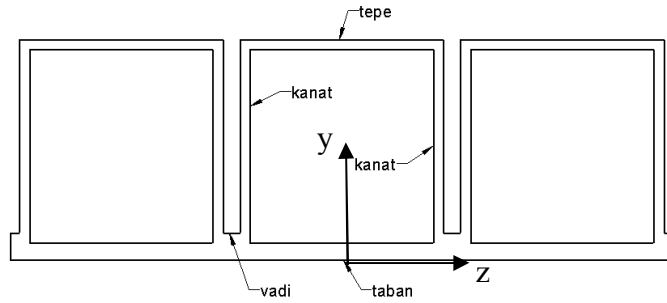
Yağmur ve atık su tahliye boruları, bunların et kalınlığını arttırmadan mukavemetlerini yükseltmek için korige profilli olarak tasarlanmaktadır. Plastik boruların gerilme-şekil değiştirme durumları ve korige kesit geometrisinin borunun mukavemet karakteristiklerine etkisi, birçok deneysel ve sayısal çalışmada ele alınmıştır [5-14]. Günümüzde, önemli su taşıma projeleri ile ilgili olarak büyük çaplı plastik borulara talep artmaktadır. Bu bakımdan, mevcut borulara göre daha hafif ve aynı zamanda mukavemet özellikleri talebi karşılayan, büyük çaplı boruların en kesit formlarının optimizasyon araştırmaları güncelliğini korumaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Korige plastik borularla ilgili olarak teknik literatürde yapılmış olan çalışmalarda korige profillerin geometrik şekilleri ile ilgili öneriler bulunmaktadır. Boru enkesitine ait karakteristik bölgeler ve korige profili enkesitinin yapısal elemanları sırasıyla Şekil 2.1 a ve b' de görülmektedir.



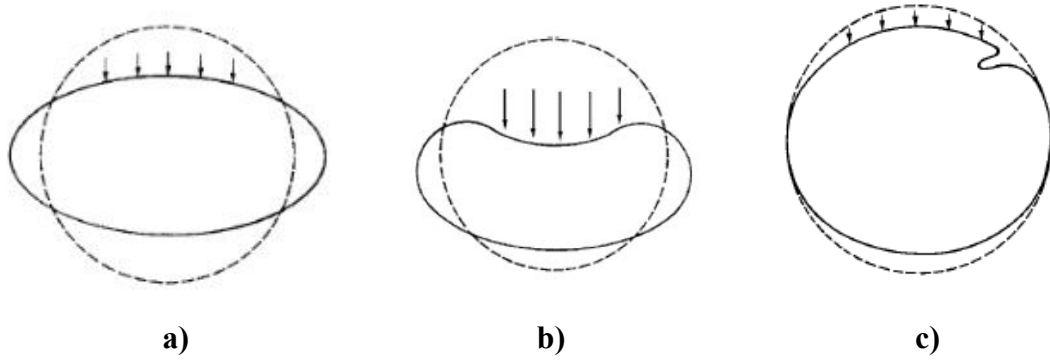
a)



b)

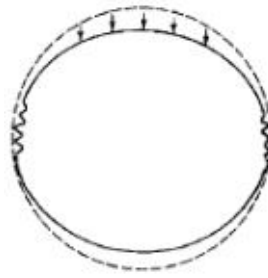
Şekil 2.1 : Borularda bölgelerin adlandırılması; a) Boru enkesitinin karakteristik bölgeleri, b) korige enkesitinin yapısal elemanları.

Gömülü esnek boruların dizayn ve mukavemet analizi için önemli parametreler, boruya etkiyen yük, toprağın ve borunun rijitliği ve korige profilin formudur [5]. Moser [5], borunun, duvar kalınlığını arttırmadan en kesit şeklini muhafaza edebilmesi için, dış yüzeyine rijitlik elemanlarının eklenmesini önermiştir. Borunun yetersiz rijitlikten dolayı en kesitinin deformasyon örnekleri Şekil 2.2’ de görülmektedir. Esnek borular için çökme limiti % 5-7.5 aralığında kabul edilmektedir [3].



Şekil 2.2 : Borunun yetersiz rijitlikten dolayı en kesitinin deformasyon örnekleri.
a) halkasal çökme b) ters çökme c) bölgesel burkulma.

Boruda gerilmelerin, malzemenin akma sınırına ulaşması durumunda duvarının yatay simetri eksenine kırılarak aldığı form Şekil 2.3’ de görülmektedir [5].



Şekil 2.3 : Boruda duvar kırılması.

Boru rijitliğini kontrol etmek için enkesiti dikkate alınarak Moser [5] tarafından incelenen boyutsuz geometrik parametreler ve önerilen değerler Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Borunun enkesitini kontrol için boyutsuz geometrik parameteler ve önerilen değerler [5].

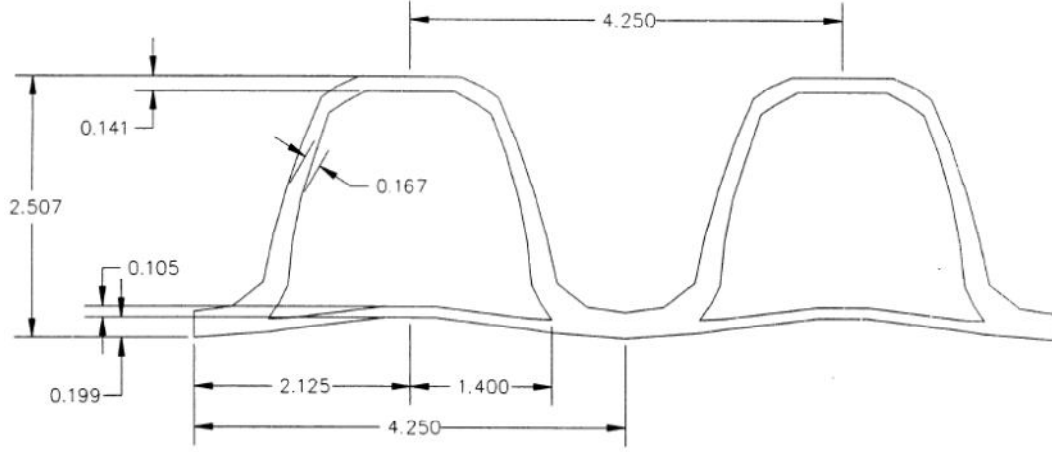
Boyutsuz parametreler	HDPE için olası değer
t_{\min}/r	≥ 0.005
t_{\min}/l_{uns}	≥ 0.02
I/r^3	$\geq 4 \times 10^{-5}$
A/r	≥ 0.02
L_p/r	≤ 0.3

Burada, t_{\min} profil kesitindeki minimum kalınlık, r borunun etkin yarıçapı (korigenin tarafsız eksenini ile boru eksenini arasındaki uzaklık), l_{uns} bir profil kesitinin taban üzerindeki iç genişliği, I ortalama birim uzunluktaki profil kesitinin atalet momenti, A profil kesitinin birim uzunluktaki alanı ve L_p incelenen korige kısmının uzunluğudur. Moser tarafından, profil kesitinin kalınlıklarının, taban da dahil, birbirine olabildiği kadar yakın olması ayrıca tavsiye edilmiştir.

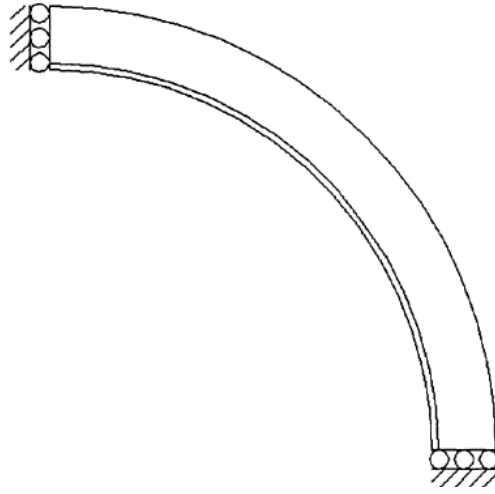
Gömülü borularda toprak basıncı etkisinde oluşan gerilme durumu Moore ve Hu [6] tarafından sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar Selig ve diğerlerinin [7] deneysel yöntemlerle buldukları veriler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma korige kanadı ile borunun birleşim bölgesinde oluşan yırtılmaların ortaya çıkan aksenal gerilmelerle ilgili olduğunu ve korige tabanında gözlemlenen dalgaların da bölgesel burkulmadan kaynaklandığını göstermiştir[6].

Bir sonraki çalışmasında Moore [8], farklı çaplı korige HDPE borunun gömme derinliği ve dolgu malzemelerini dikkate alarak, üç-boyutlu gerilme durumunu sonlu elemanlar metoduyla incelemiştir. Çalışmadaki modelde simetri dikkate alınarak korigenin yarısı ve üzerindeki toprak kullanılmıştır. Teğetsel gerilmelerin borunun yatay simetri ekseninde en yüksek değere ulaşmasıyla birlikte profilin tepe noktasında artma eğilimi gösterdiğini ve korige ile tabanın birleşim noktalarında gerilme konsantrasyonu olduğu gösterilmiştir; radyal gerilmelerin diğerlerinden düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca aksenal gerilmelerin boru tabanında olduğu ve borunun yatay simetri ekseninde maksimum değerine ulaştığı sonucuna varılmıştır. Dolgu rijitliğindeki artışın borunun deformasyonunu azalttığı ve gömme derinliğinin artması ile borudaki gerilmelerin de arttığı belirlenmiştir. Moore [8] boru malzemesinin (HDPE) elastisite modülünün toprak yükü altında zamanla azalan bir karaktere sahip olduğunu (değeri 152 ile 310 MPa arasında değişen ve genelde küçük olan değere yakın olan) ve hareketli yükler için 760 MPa' ya eşit kabul edilebileceğini önermiştir.

Hengprathanee [9] tarafından Şekil 2.4’ de görülmekte olan 30 in. çaplı standart bir HDPE borunun korige profili, modifiye edilerek sayısal yöntem paket programı MSC/Patran ile incelenmiştir. Borunun sayısal analizi için uygulanan model Şekil 2.5’ de görülmektedir. Şekillerdeki boyutlar inch cinsindedir.

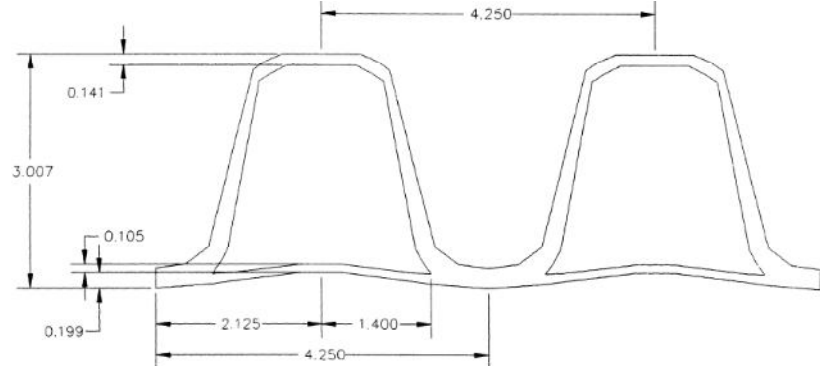


Şekil 2.4 : Modifiye edilecek olan standart korige enkesiti [8].

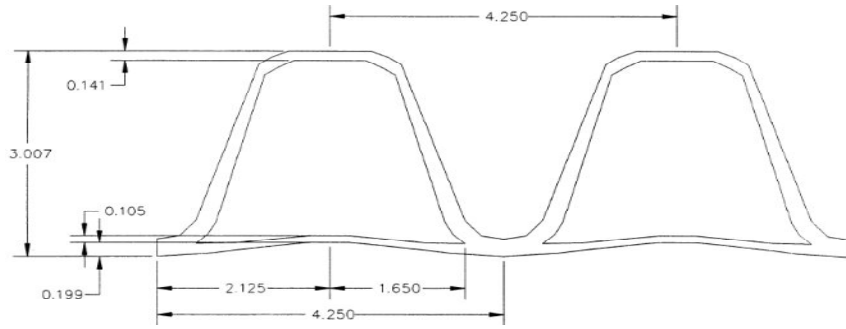


Şekil 2.5 : Borunun sayısal analizi için uygulanan model [9].

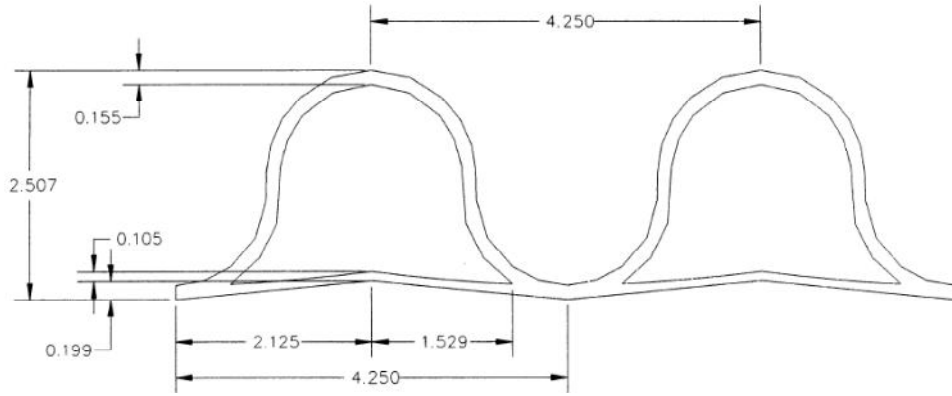
Hengprathanee elastik analizler için modeli birim kuvvet ile yüklemiştir. Hengprathanee çalışmasında 45 derece bölgelerindeki asal gerilme ve şekil değiştirme değerlerini dikkate almıştır ve elastik analizler için en küçük gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin korige profil tip 3 (Şekil 2.6.a, standart korige profilin yüksekliği 12.7 mm arttırılmış) ve tip 5 de (Şekil 2.6.b, standart profilin yüksekliği 12.7 mm ve taban genişliği de 12.6 mm arttırılmış) gözlemlenirken en büyük değerlerin profil tip 10’ da (Şekil 2.6.c, yarım daire şeklinde dizayn edilmiş) görüldüğünü belirtmiştir.



a)



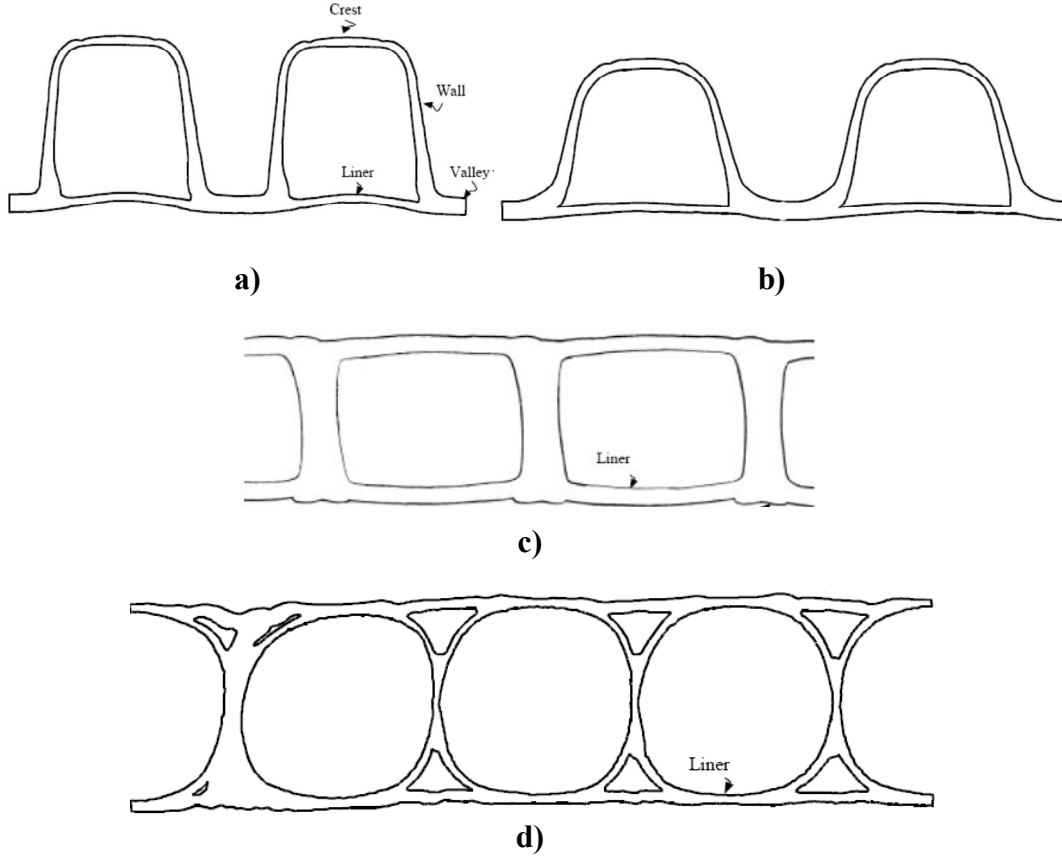
b)



c)

Şekil 2.6 : Yapılan modifiye çalışmalarına göre önerilen korige enkesitleri; a) yükseklik arttırılmış korige profili, b) yüksekliği ve taban genişliği arttırılmış korige profili, c) yarım daire şeklindeki korige profili.

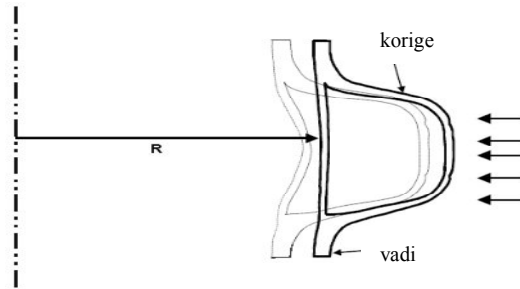
Dhar ve Moore [10] korige genişliği ve yüksekliğinin bölgesel davranışa olan etkisini bulmak amacıyla Şekil 2.7a (daha yüksek, daha az geniş), b' deki düz tepeli korigeleri ve Şekil 2.7c, d' deki kutu ve borsal korige profilleri üç-boyutlu durumda incelemiştir. Şekillerde verilen İngilizce terimlerin karşılıkları sıra ile verilmiştir; Crest:tepe, liner:taban, valley:vadi, wall:duvar.



Şekil 2.7 : Karşılaştırmak için kullanılan düz tepeli, kutu ve borusal korige profillerin şeması; a) 58.70 mm yükseklikli düz tepeli korige profil, b) 55.15 mm yükseklikli düz tepeli korige profil, c) kutu korige profil, d) borusal korige profil [10].

Araştırmalarında kutu ve boru şeklindeki korige profillerin normalde spirale benzer geometriye sahip olmasına rağmen modellemedeki zorlukları önlemek amacıyla doğrusal olduklarını kabul etmiş ve bu durumun boru davranışını önemli bir oranda etkilemeyeceğini beklediklerini ifade etmişlerdir. Araştırmalarında HDPE için elastisite modülünü 450 MPa (elastisite modülünün zamanla değişimini veren ifadelerden yararlanılarak beş saatlik periyot için kullanılan değer (Moore and Hu [11])), Poisson oranını 0.46 ve toprak için elastisite modülünü 30 MPa, Poisson oranını ise 0.25 olarak kullanmışlardır. Dhar ve Moore kutu ve boru şeklindeki profillerde teğetsel şekil değiştirmelerin duvarın iç yüzeyinde neredeyse değişmezken, korige şeklindeki profillerde vadilerden tabanın ortalarına doğru geldikçe azaldığını gözlemlemişlerdir. Bölgesel eğilme ve çekme şekil değiştirmelerinin kutu ve boru şeklindeki profiller için önemli boyutlarda olmadığı, uzun tabana sahip korige profilde bölgesel eğilmenin daha yaygın olduğu ifade edilmiştir.

Dhar ve Moore [12] tam ölçekli boru testleri kullanarak boruların profilindeki bölgesel eğilmeyi incelemeyi amaçlamış ve iki-eksenli test tertibatından yararlanmışlardır. Testler esnasında, Dhar ve Moore'un [12] bir başka çalışmasında da [10] kullanılan korige profiller ele alınmıştır. Dhar ve Moore [12] teğetsel sıkışmanın borunun bölgesel davranışı ile alakalı performansını etkileyeceğini dolayısıyla derin gömülü borunun davranışının incelenmesinin faydalı olacağını belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma iki eksenli testlerde borunun şekil değiştirmelerinin üst bölgede yatay simetri eksenine kıyasla daha fazla olduğunu göstermiş; iki korigenin içerisinden yüksekliği az, genişliği fazla olanda [Şekil 2.7b] tabandaki şekil değiştirmenin vadideki şekil değiştirmeye oranının daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Dhar ve Moore korigelerden Şekil 2.7b' dekinin vadiler arası mesafesinin daha uzun olduğu böylece bölgesel eğilme etkisinin daha fazla olduğuna dikkat çekmişlerdir. Şekil 2.8' de radyal baskı altındaki korige profilde meydana gelen yerdeğişirmelerin boru tabanındaki içe (boru merkezine) doğru hareketinin vadidekine oranla daha az olduğu gösterilmiştir.



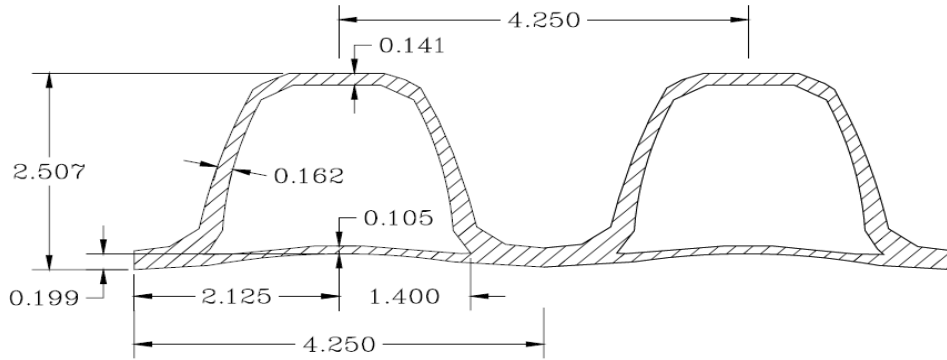
Şekil 2.8 : Korige profilin radyal baskıda deformasyonu [12].

McGrath ve Schafer [13] sayısal analiz program paketi MSC.NASTRAN ile korige profilinin dörtte birini kullanarak borunun paralel plaka testini modellemişlerdir. Analiz esnasında boru ile plaka arasındaki temasın sürtünmesiz olduğu kabul edilmiştir. Boru malzemesi (HDPE) ise viskoelastik-plastik ve elastik olarak modellenmiştir. Maksimum basma teğetsel şekil değiştirme bölgelerinin borunun üst kısmındaki korige profilin tepe bölümünün orta ve köşelerinde olduğu görülmüştür.

Burgon [14] boru çapı, profil yüksekliği, duvar kalınlığı, kemer yarıçapı, birleşim noktası açısı, duvar açısı gibi bazı profil boyutlarını kontrol ederek paralel plaka testi ve toprak yükleme koşullarını sonlu elemanlar yöntemi ile modellemiş ve deneysel olarak daha önce elde edilen paralel plaka ile toprak test hücresi sonuçlarını analiz

etmiştir. Çalışma esnasında lineer elastik analiz kullanılarak malzeme için sünme etkisinin ihmal edildiği ve bu durumda analizin nicel bir çalışmadan ziyade nitel bir çalışma olacağı, yani sadece hangi profilin diğerinden daha iyi olduğunun belirleneceği gösterilmiştir. Bu çalışma kavisli kemerlerin kutu şeklindeki profillerden daha dayanıklı olduğunu ve kutu şeklindeki profiller için yükseklik arttıkça kemer burkulma yükünün % 5 deformasyondaki yüke çok yaklaştığını göstermiştir. Bununla birlikte Burgon kutu şeklindeki profillerin, eşit yüksekliklerde kavisli kemere sahip profillerden daha rijit olduğunu belirtmiştir. Korige kanadı ile profilin ağırlık merkezinden geçen yatay eksen arasındaki açının, performansı diğer parametreler kadar çok etkilemediğini açıklayarak, dik kanatların (90 derece) daha rijit fakat kemer burkulmasının daha az dayanıklı olduğunu göstermiştir.

Ayche [15] korige profilini optimize etmek için Şekil 2.9’ da görülen 30 in. çaplı HDPE boruya ait standart korige profilinden oluşturduğu bazı geometrileri karşılaştırmıştır.

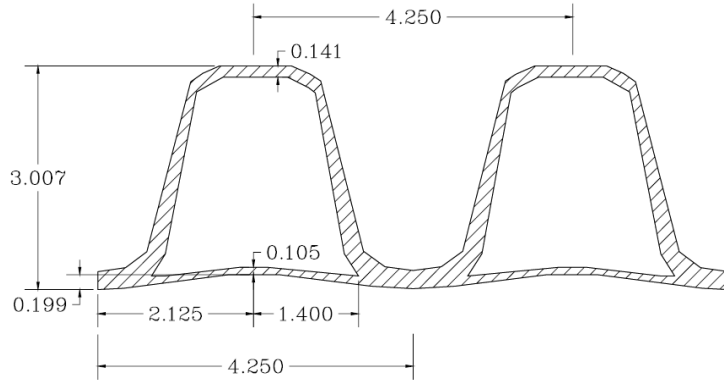


Şekil 2.9 : Standart korige profili [15].

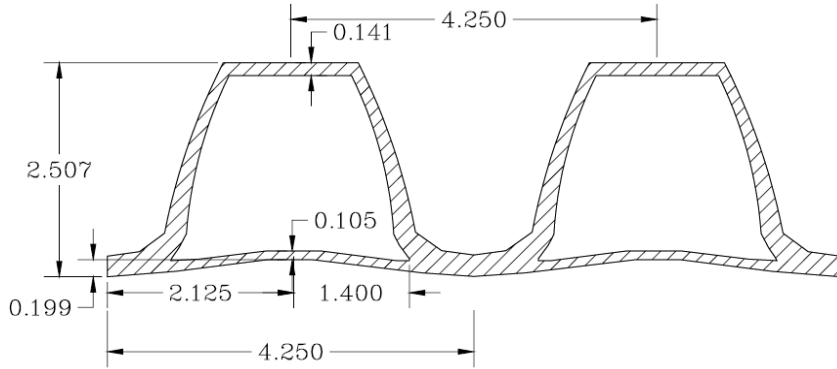
Korige profil geometrisinin gömülü borunun yapısal işlevine etkisi sayısal analiz programı Algor yardımıyla, borunun yarısı modellenerek, incelenmiştir.

Çalışmada HDPE boru için 868 MPa elastisite modülü, 0.45 Poisson oranı, 0.969 g/cm³ yoğunluk, boru çevresindeki toprak için 68.9 MPa elastisite modülü, 0.25 Poisson oranı, 2.075 g/cm³ yoğunluk değeri kullanılarak lineer elastik analiz yapılmıştır. Toprak yüzeyine 0.689 MPa değerinde yük uygulanmıştır. Çalışmada korige profiller maksimum asal çekme ve basma gerilme değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Kabuksuz korige profillerden daha yüksek göstergelere sahip olan geometriler Şekil 2.10’ da gösterilmiştir. Araştırmada aynı zamanda [15] korigelerin

tepelerini kabukla birleştirerek elde edilen yapının mukavemet analizi yapılmıştır. Kabuğun yapının rijitliğini yksettiiği gözlemlenmiştir.



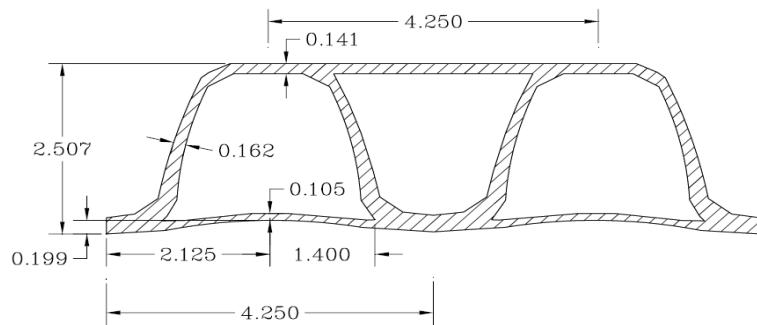
a)



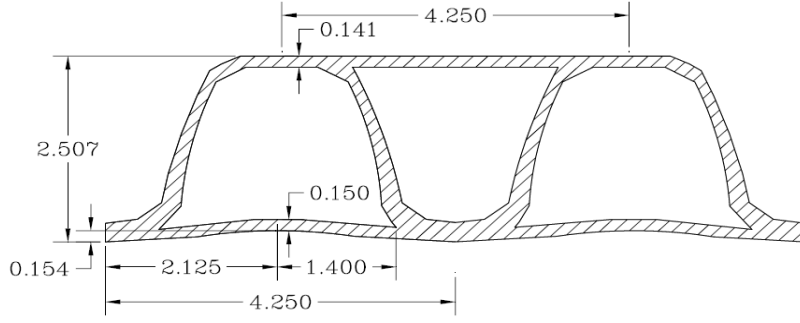
b)

şekil 2.10 : Önerilen korige profilleri; a) standart profile göre yüksekliği 12.7 mm arttırılmış, b) standart profile göre tepesi düzleştirilmiş [15].

Kabuklu korige profillerden daha yüksek göstergelere sahip olanlar şekil 2.11' de gösterilmiştir. Korigeler arasındaki kabuğun optimum formunun düzlem olduğu belirlenmiştir.

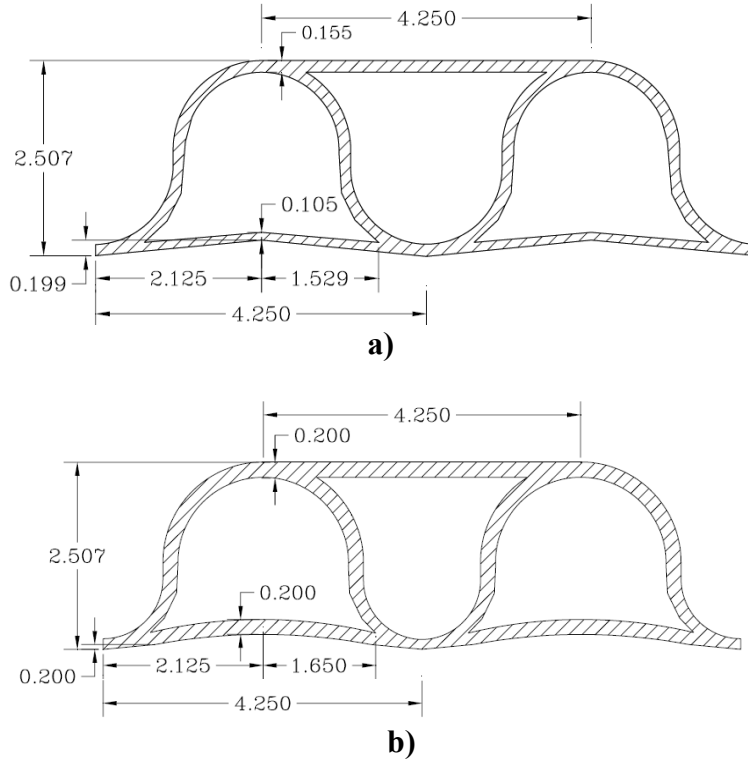


şekil 2.11 : Önerilen kabuklu korige profilleri.



Şekil 2.11 (devam): Önerilen kabuklu korige profilleri[15].

Yapılmış analiz kutu şekilli profillerin dairesellere göre daha yüksek rijitlik sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte dairesel korige profillerin burkulma dirençlerinin daha fazla olacağı ve atalet momentlerinde yapılacak iyileştirme ile optimum profilin elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu bağlamda Şekil 2.12a’ da görülen kabuklu ve yarım daire geometrisine dayanan profilin kalınlık ve iç genişliği artırılarak Şekil 2.12b’ deki daha yüksek mukavemet göstergeli profil oluşturulmuştur.



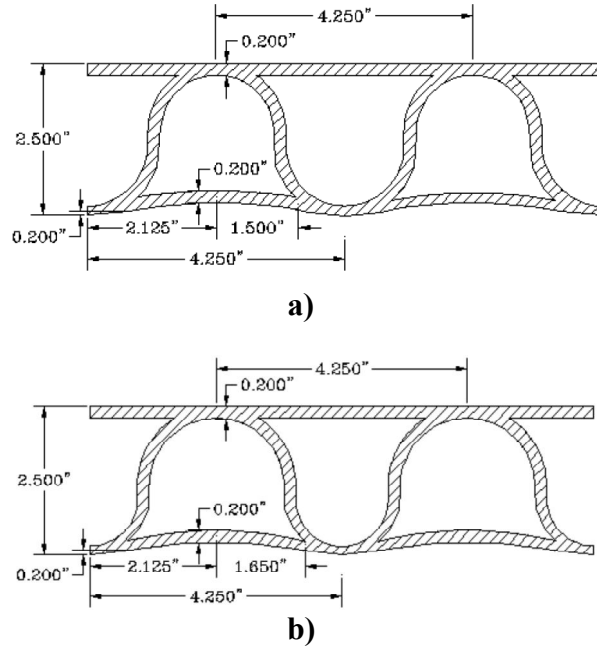
Şekil 2.12 : Yarım daire şekilli korige profilleri; a) modifiye edilen kabuklu ve yarım daire geometri korige profil, b) modifiye edilmiş korige profilin geometrisi.

Yapılan çalışma sonucu elde edilen optimal korige profili enkesitleri için bulunan maksimum asal gerilme değerleri çizelge 2.2’ de verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Optimal korige profili enkesitlerindeki maksimum asal gerilme değerleri [16].

Profil	Maks. Asal Çekme Gerilmesi	Maks Asal Basma Gerilmesi
Şek. 2.12a	4.111	3.695
Şek. 2.12b	3.540	4.628
Şek. 2.13a	4.011	3.839
Şek. 2.13b	3.513	3.975
Şek. 2.14a	5.793	10.513
Şek. 2.14b	3.274	2.877

Keatley [16], Ayche' nin çalışmasında kullandığı korige profilleri dikkate alarak 30 in çaplı gömülü boru ile ilgili lineer olmayan problemleri aynı yükleme koşulları ile [15] incelemiştir. Keatley, profiller üzerine kabuk eklemenin bölgesel burkulma ve akma mukavemetini arttırdığını ve boruların fonksiyonlarını sürdürebilme kriterlerinden yatay simetri ekseninde oluşan bölgesel burkulma ve akmanın önemli olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışmada, Şekil 2.13a' da gösterilen kalınlıkları arttırılmış, kavisli tepe ve kanatlı, kabuklu profilin akmaya karşı, Şekil 2.13b' de görülen ve ek olarak taban genişliği arttırılan kabuklu profilin ise bölgesel burkulma açısından daha yüksek direnç gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 2.13 : Optimal korige enkesitleri; a) kalınlıkları arttırılmış kavisli tepe ve kanatlı kabuklu profil, b) ek olarak taban genişliği arttırılmış kabuklu profil [16].

Yukarıda incelenmiş, korige profil geometrilerinin varyasyonunun borunun mukavemet özelliklerine etkisinin araştırıldığı çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda (Çizelge 2.3), karşılaştırmalarının kolaylığını sağlamak için, verilmiştir.

Çizelge 2.3 : İncelenmiş teknik literatürde farklı kriterlere göre önerilen optimal korige profilleri.

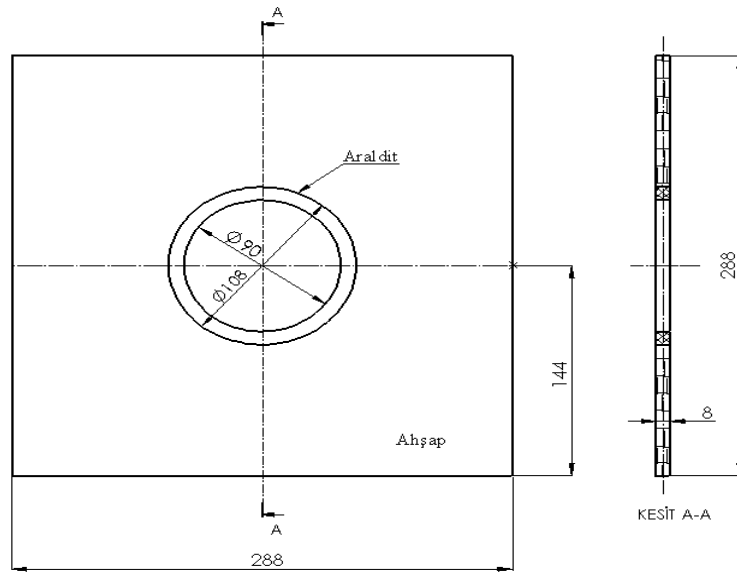
Profil	A (mm ²)	I _x *10 ⁶ (mm ²)	I _x /A (mm ⁴ /mm ²)	Asal şekil değiştirme x10 ⁻⁶ (birim kuvvet)	Asal gerilme (MPa)	Düşey sehim (tepede)(mm)	Von mises kriteri
Şek.2.7a[1 0]	1234.3 2	0.82	661.85	5.70	0.0014	-	-
Şek.2.7b 3	1212.1 3	0.81	666.83	5.67	0.0015	-	-
Şek.2.14b 0	2462.7 0	1.41	572.14	-	2.877	-	-
Şek.2.15a	3290.3	1.96	595.69	-		22.34	19.2
Şek.2.15b	3341.9	1.95	583.50	-		22.38	19.7

3. BORU-TOPRAK ETKİLEŞİMİNİN FOTOELASTİSİTE YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

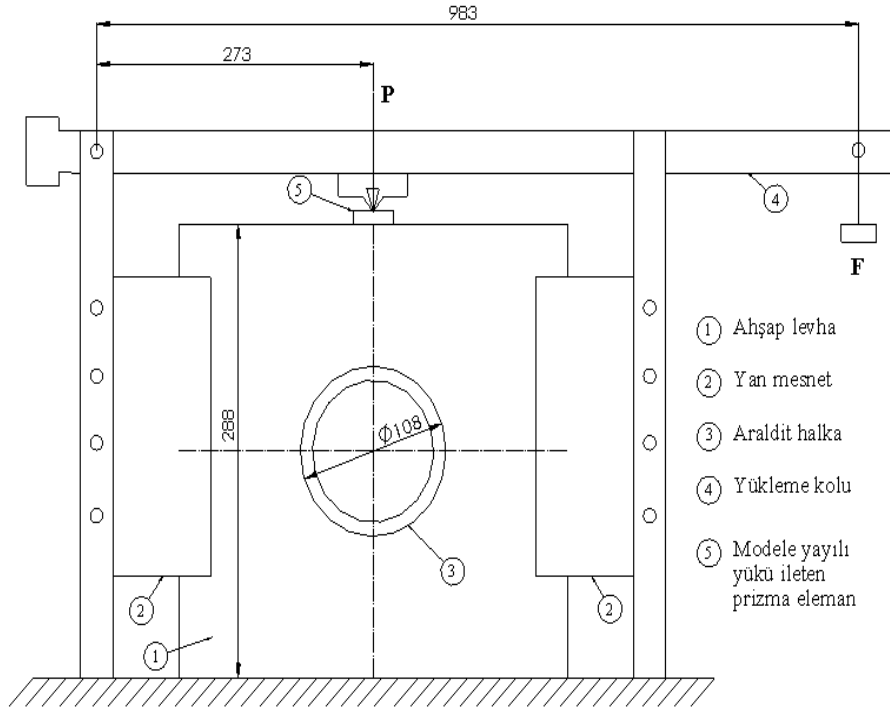
Bu kısımda, deneysel yöntemlerden fotoelastisite kullanılarak boru-toprak etkileşimi incelenecektir. Boru malzemesi olarak optik hassas bir malzeme kullanılacaktır. Toprağı modelleyecek malzeme olarak kayın ağacı kullanılmıştır. Boru olarak düz boru seçilmiştir ve boru modelinin iç ve dış çapı sırası ile 90 ve 108 mm dir. Toprağı modelleyen ahşapın ölçüleri ise 300x300 mm' dir.

İlk başta, fotoelastik malzemenin optik hassasiyet katsayısının belirlenmesi gerekir. Optik hassasiyet katsayısı 9.57 N/mm·fringe olarak hesaplanmıştır [22].

Boru-toprak etkileşiminin fotoelastik yöntemle incelenmesi için kullanılan modelin şeması Şekil 3.1'de ve polariskop içerisine kurulan yükleme düzeneğinin şeması ve kendisi Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Boyutlar mm olarak verilmiştir. Boru modeli levha yüzeyinden iç çap uzunluğu kadar derine yerleştirilmiştir. Yükleme için tekerlek temas yüzeyi modellenerek (600 mm iç çapa sahip boru için) levha üzerinde ortası boru merkezine gelecek şekilde 30 mm lik genişliğe (ATV standartlarına göre tekerlek temas uzunluğu 200 mm alındığında) yük uygulanmıştır [20].



Şekil 3.1 : Gömülü boru modelinin şeması.



a)



b)

Şekil 3.2 : Gömülü boru modelinin yüklenmesi; a) modelin yükleme şeması, b) polariskopta yüklenmiş modelin genel görüntüsü.

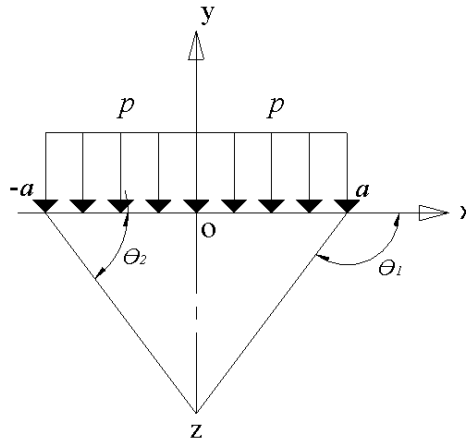
Deney öncesinde boru-toprak modelinde toprağı modelleyen ahşap levha boru merkezi boyunca düşey bölmelere ayrılarak numaralanmış ve levhadaki ölçüler

deneyden önce ve sonra belirlenerek levhada oluşan mutlak yer değıştirme ve birim Şekil değıştirme miktarları hesaplanmıştır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 : Gömülü boru modelinde mutlak yerdeğıştirme ve birim Şekil değıştirme miktarları.

Nokta	ilk mesafe (mm)	sonraki mesafe (mm)	mutlak yer değistirme, Δ(mm)	birim Şekil değiştirme, ε
1-2	7.00	6.12	0.88	-0.126
1-3	17.70	16.24	1.46	-0.082
1-4	27.90	26.54	1.36	-0.049
1-5	37.70	36.54	1.16	-0.031
1-6	47.18	45.86	1.32	-0.028
1-7	56.86	55.54	1.32	-0.023
1-8	66.96	65.70	1.26	-0.019
1-9	77.26	75.70	1.56	-0.020
1-10	88.34	86.72	1.62	-0.018

Levhanın dűşey eksenini boyunca borunun űst kısmında kalan bűlgesi için dűşey gerilme deęerleri yayılı yűk daęılımının olduęu varsayılarak hesaplanmıřtır (Őekil 3.3).



Őekil 3.3 : Levhada yayılı yűk dağılımı.

Yayılı yűk için dűşey eksenindeki gerilme daęılımlarının hesaplanmasında ařaęıdaki forműlden yararlanılmıřtır.

$$\sigma_y = -\frac{p}{\pi} (\theta_1 - \theta_2) - \frac{2pay(x^2 - y^2 - a^2)}{\pi[(x^2 + y^2 - a^2)^2 + 4a^2y^2]} \quad (3.3)$$

Burada $(\theta_1 - \theta_2) = 2 \tan^{-1} \frac{a}{y}$ olarak ifade edilebilir. P değeri Şekil 3.2a dan yararlanılarak F = 57 kg (558.6 N) için 2011 N olarak hesaplanır ve Şekil 3.2a daki

yükü aktaran 5 numaralı parçanın kesit alanı $30 \times 8 = 240 \text{ mm}^2$ olduğundan denklem (3.3) deki p değeri

$$\frac{P}{A} = \frac{2011}{240} = 8.4 \text{ MPa} \quad (3.4)$$

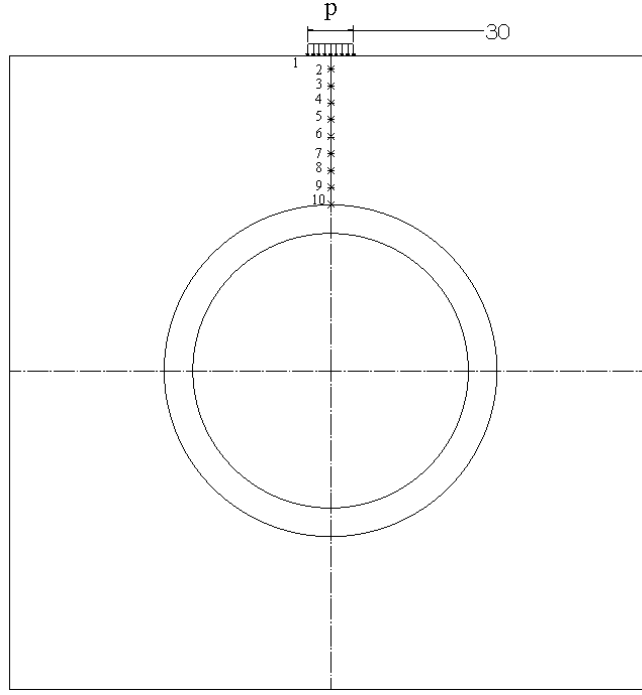
olarak hesaplanır. Yayılı yük altındaki modelin şeması Şekil 3.4’de görülmektedir. Daha önce hesaplanan noktalar arası birim şekil değiştirme değerleri ile birlikte elde edilen düşey gerilme değerleri kullanılarak aşağıdaki denklem (Hooke’s Law) yardımıyla [17] ahşap levhanın elastisite modülü hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.5)$$

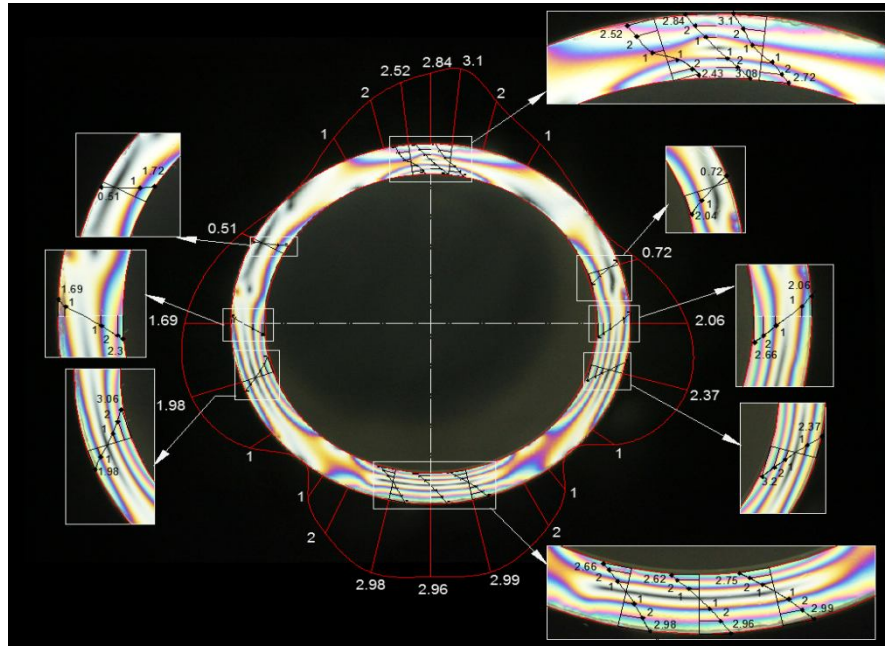
Ahşap levha için elde edilen düşey gerilme değerleri ile hesaplanan elastisite modülleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Gömülü boru modelinde yayılı yük altındaki düşey gerilme değerleri ve elastisite modülü.

Nokta	y (mm)	σ_y (MPa)	E (MPa)
1-2	6.12	-359.79	2861.93
1-3	16.24	-220.22	2669.85
1-4	26.54	-153.03	3139.44
1-5	36.54	-116.52	3786.88
1-6	45.86	-94.78	3387.75
1-7	55.54	-79.19	3411.36
1-8	65.7	-67.44	3584.12
1-9	75.7	-58.80	2912.32
1-10	86.72	-51.51	2808.62

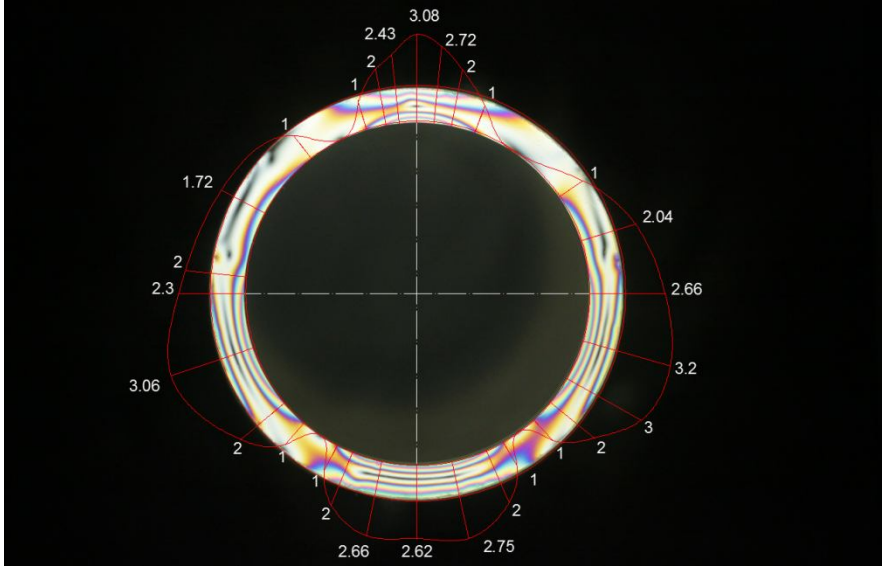


Şekil 3.4 : Yayılı yük altındaki ahşap modelin şeması.



Şekil 3.5 : Gömülü boru modelinde halkada oluşan fotoelastik dış şeritlerin dağılımı.

$P = 2011 \text{ N}$ (Şekil 3.2a) yük altındaki gömülü boru modelinde halkada oluşan fotoelastik dış ve iç şeritlerin dağılımı Şekil 3.5 ve 6'da verilmiştir.

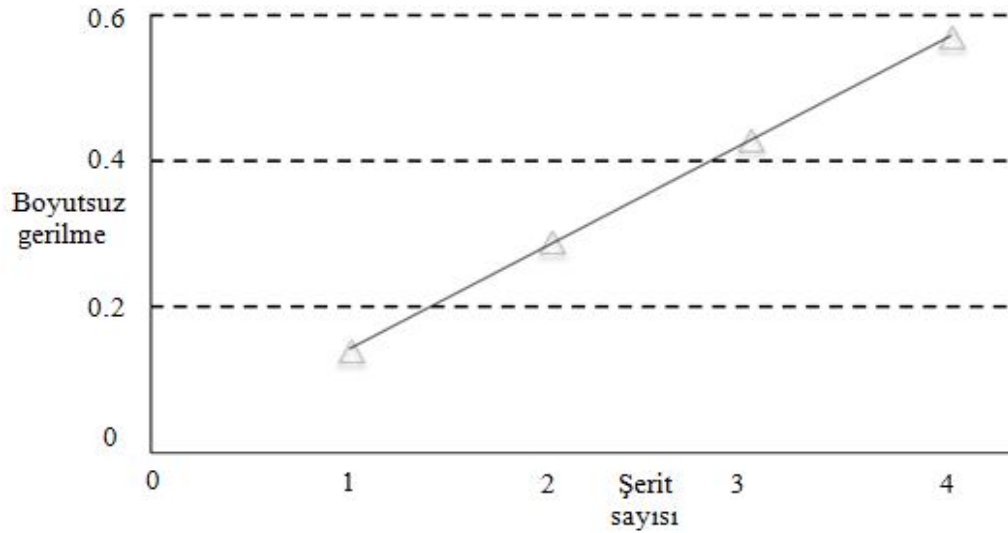


Şekil 3.6 : Gömülü boru modelinde halkada oluşan fotoelastik iç şeritlerin dağılımı.

Optik hassasiyet değeri ($\sigma_0^{1.0} = 9.57 \text{ N/mm} \cdot \text{fringe}$) [22] kullanılarak boru modeli üzerindeki asal gerilme farkları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

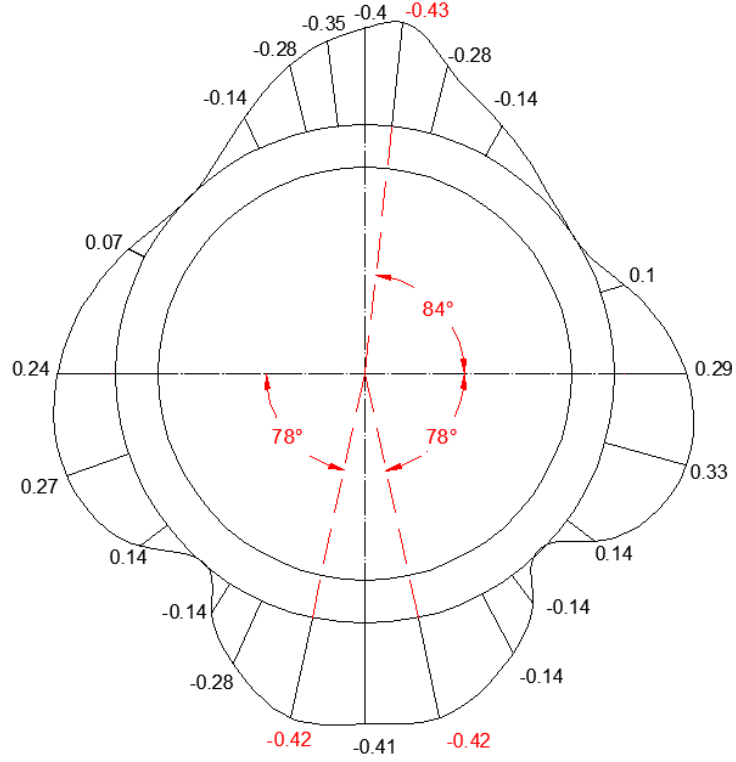
$$(\sigma_\theta - \sigma_r) = \sigma = \sigma_0^{1.0} \frac{m}{d} \quad (3.5)$$

d kalınlık değeri 8 mm alındığında, şerit sayılarına karşılık gelen gerilme değerleri Şekil 3.7'deki gibi grafik olarak gösterilmiştir.

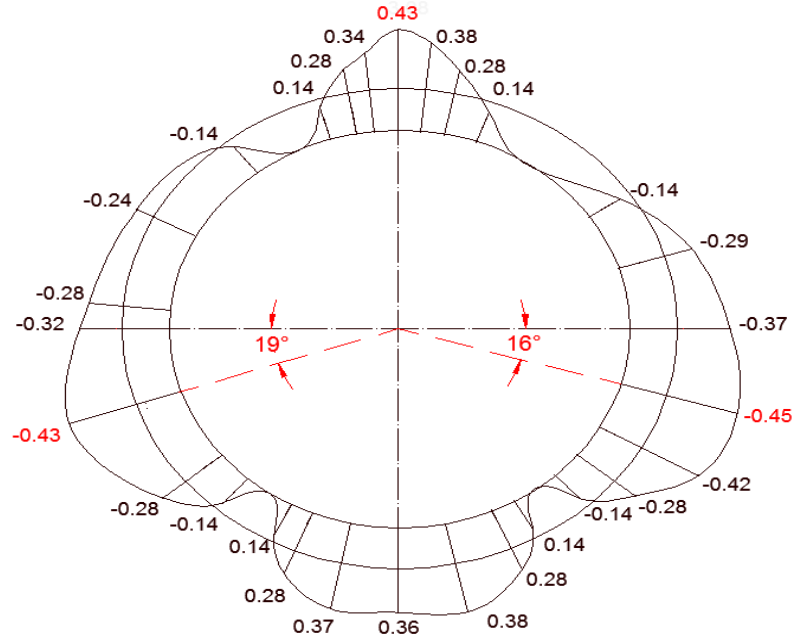


Şekil 3.7 : Boyutsuz gerilme - şerit sayısı grafiği.

Elde edilen bu gerilme değerleri birim yük cinsinden ifade etmek amacıyla Şekil 3.4 de görülen p değerine (8.4 MPa) bölüldüğünde boyutsuz gerilme değerleri hesaplanır.(Şekil 3.7). Boru modelinin dış ve iç yüzeylerinde asal gerilmeler farkı / birim yük dağılımları Şekil 3.8 ve 9'da görülmektedir.



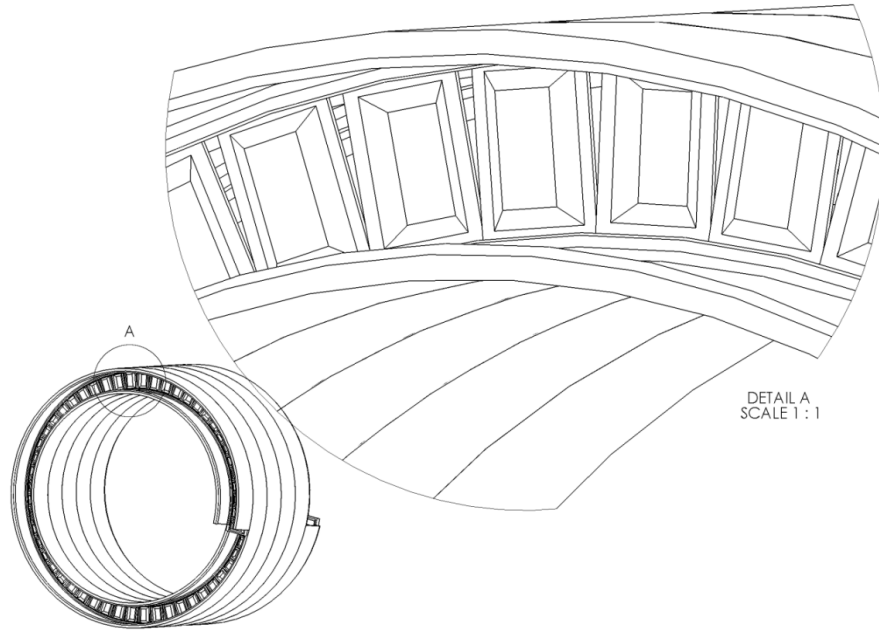
Şekil 3.8 : Gömülü boru modelinde halkanın dış hattında oluşan boyutsuz gerilme dağılımı.



Şekil 3.9 : Gömülü boru modelinde halkanın iç hattında oluşan boyutsuz gerilme dağılımı.

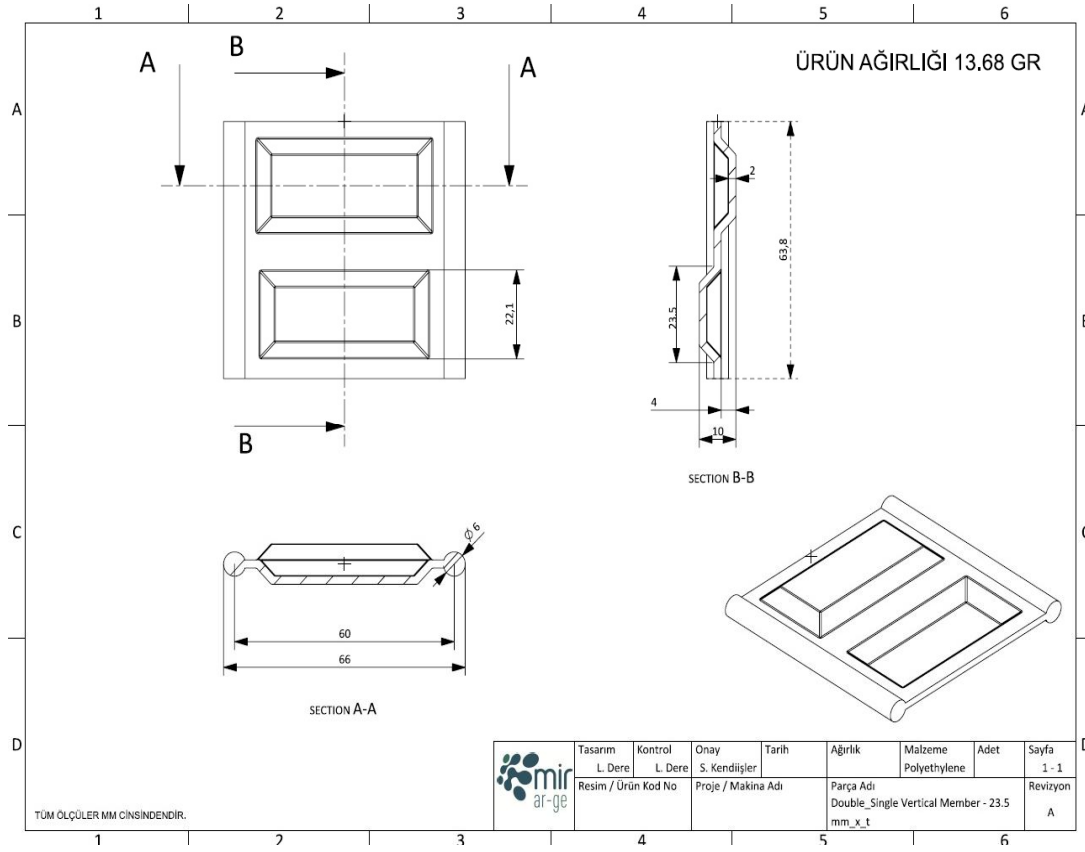
4. YENİ ÜRETİLEN KORİGE BORULARIN YEREL BURKULMA HESABI

Uzun şeritlerden sarma-kaynak yöntemiyle üretilen korige boruların (Şekil 4.1) iç ve dış kabuklarının tek yapı gibi çalışmasının farklı teknesel, sinusoidal, yayvarı vs., profilli aralık elemanlarıyla sağlanması öngörülmektedir. Silindirik kalıba sarılabilmesi için şeritleri oluşturan profiller dış kabağa yapışan taraflarından aks tarafa mesnet yuvarlığına kadar, radyal ara boşluklarıyla eşit kısımlara ayrılmışlardır. Yapının öngörülen önemli fonksiyonları sağlaması için aralık elemanları dış mekanik etkilerden burkulmamalıdır. Dolayısıyla, gömülü korige boruların mukavemet incelenmesi kabukların ve ara elemanlarının burkulma analizini içermelidir.

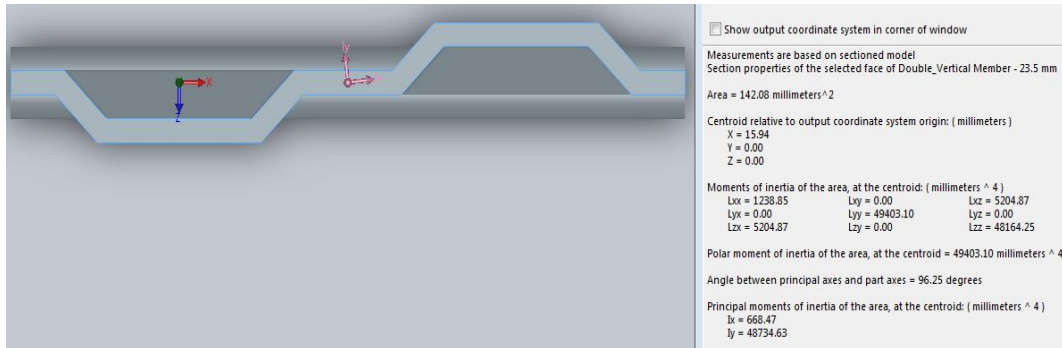


Şekil 4.1 : Korige boru ve yapımında kullanılan şeritin genel görünümü.

Tasarlanan korige borunun üretiminde kullanılması öngörülen farklı ara rijitlik elemanlarının taslak çizimleri Şekil 4.2-4' de verilmiştir.

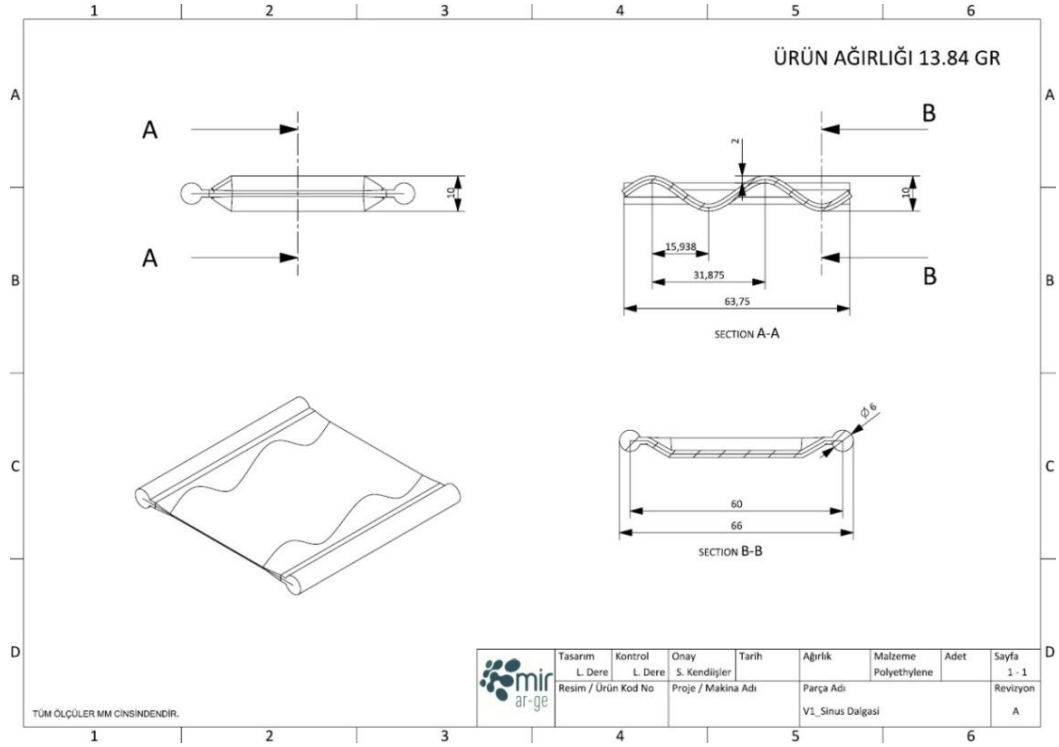


a)

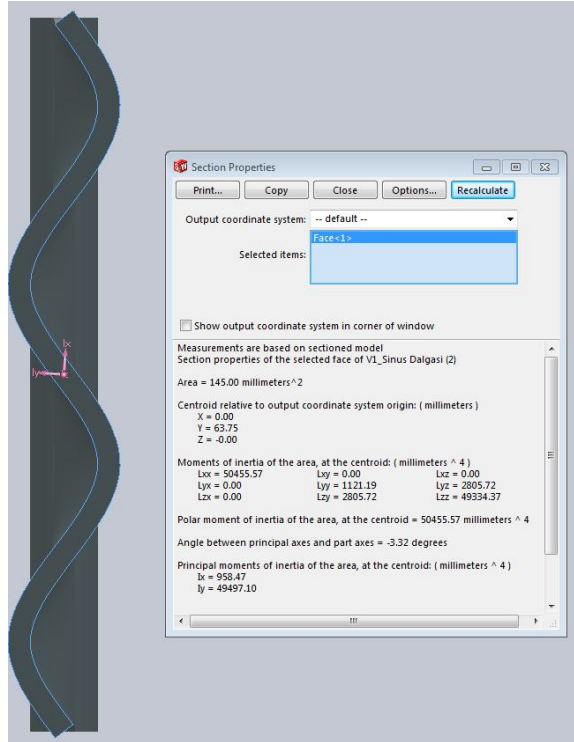


b)

Şekil 4.2 : a) Double Single ara rijitlik elemanı b) elemanın enkesitinin mukavemet karakteristikleri.

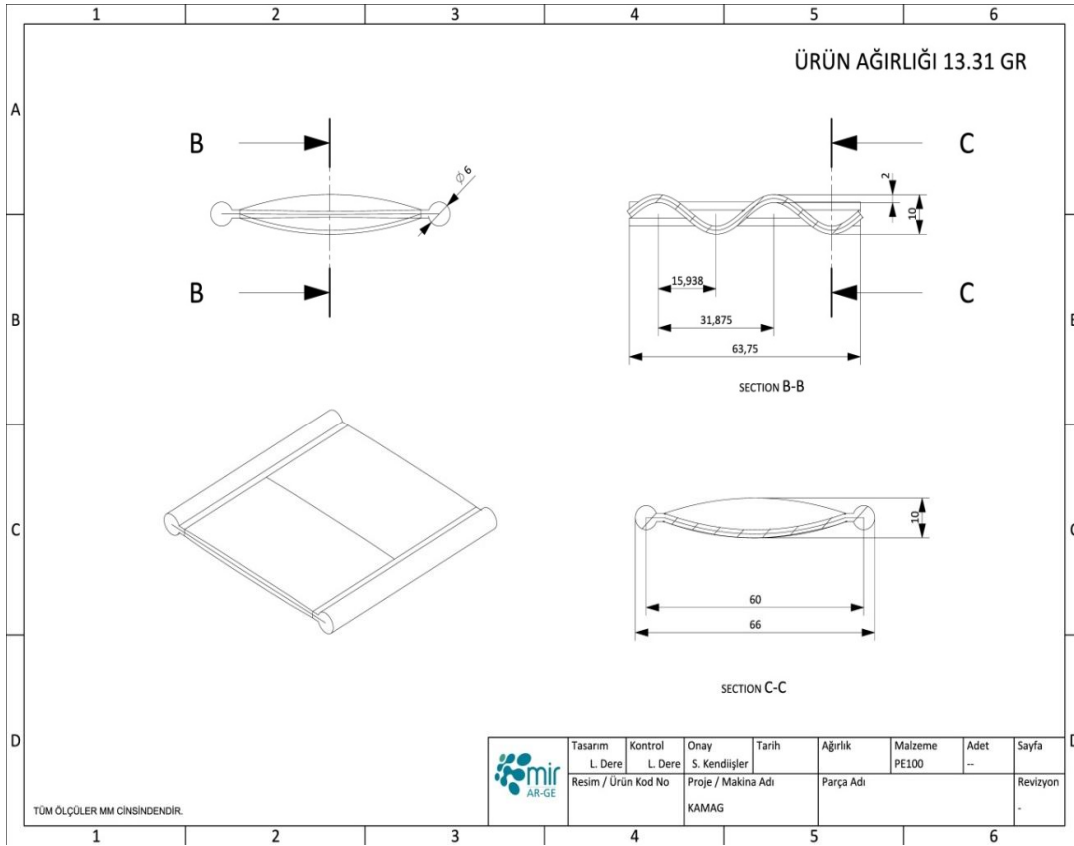


a)

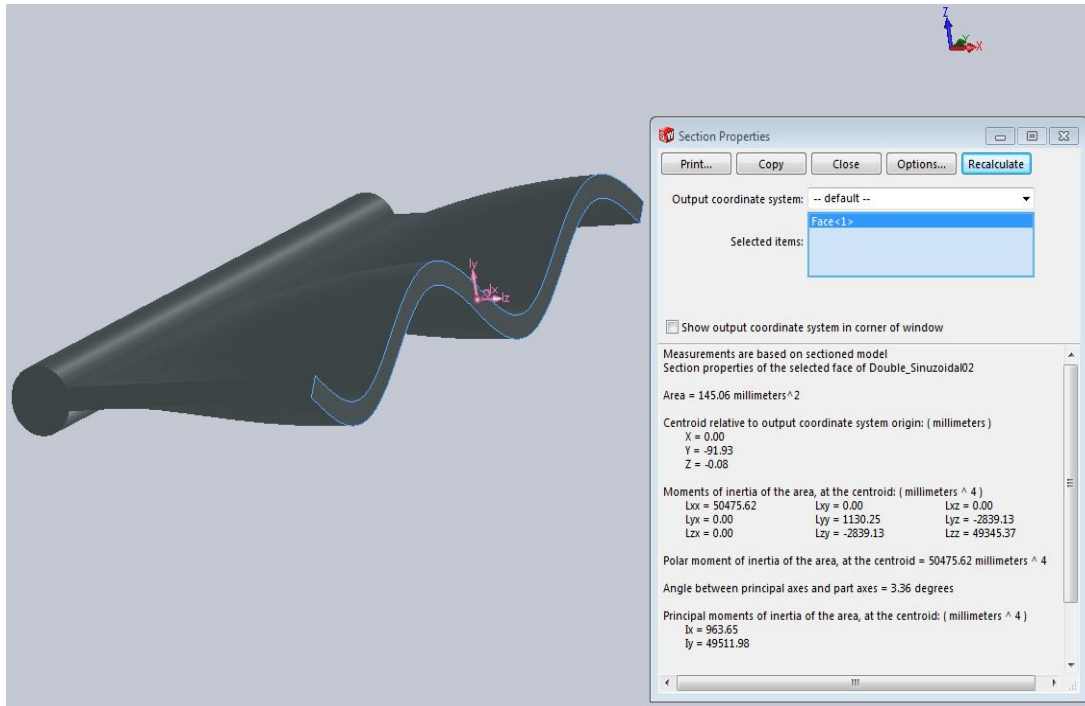


b)

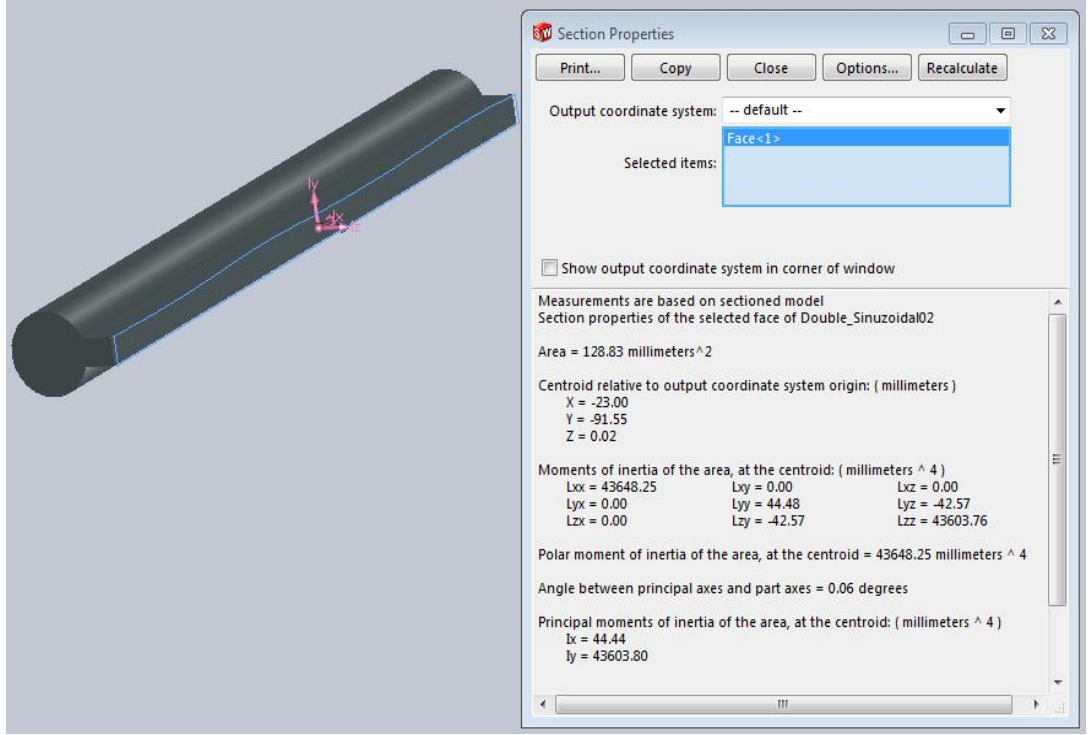
Şekil 4.3 : a) V1 sinus dalgası ara rijitlik elemanı b) elemanın enkesitinin mukavemet karakteristikleri.



a)



b)



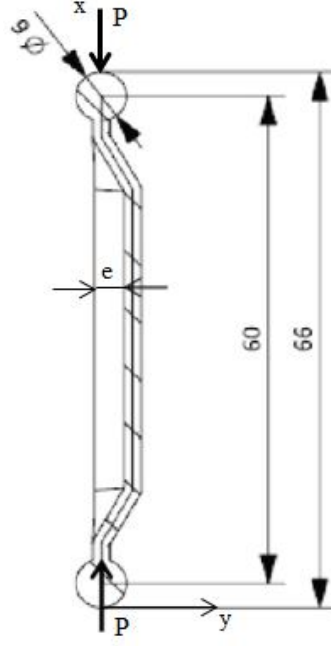
c)

Şekil 4.4 : a) Yayvari ara rijitlik elemanı, b) orta ve c) uç bölgesinin en kesitlerinin mukavemet karakteristikleri.

Çizimlerden görüldüğü gibi korige borunun imalatında öngörülen ara rijitlik elemanları enkesitlerin alanlarına göre, yaklaşık olarak, sabit ve değişken olarak iki tipe ayrılabilirler. Ara rijitlik elemanların burkulma hesabı onların enkesitlerinin alanlarının karakterine bağlı olarak farklılık gösterebilirler.

4.1 Sabit Enkesitli Ara Elemanların Burkulma Hesabı

Enkesitlerinin alanının değişmediği kabul edilen elemanların burkulma hesabı Şekil 4.5'de gösterilen şemaya dayanarak yapılabilir [19].



Şekil 4.5 : Enkesit alanı değişmeyen rijitlik ara elemanlarının burkulma hesabı şeması.

İncelenen eleman için eğilme diferansiyel denklemini aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$EIy'' = -P(y + e) \quad (4.1)$$

burada E elemanın malzemesinin elastisite modülü, I elemanın enkesitinin atalet momentidir. Sabit katsayılı ikinci mertebeden diferansiyel denklemin

$$EIy'' + Py = -Pe \quad (4.2)$$

çözümü $y = e(\tan \frac{nl}{2} \sin nx + \cos nx - 1) \quad (4.3)$

şeklindedir; burada parametre $n = \sqrt{\frac{P}{EI}}$ kabul edilmiştir. Elemanın ortasındaki sehimin maksimum değerine

$$y = e(\cos^{-1} \frac{nl}{2} - 1) \quad (4.4)$$

dayanarak incelenen ara eleman tipi ile ilgili kritik yükün P_{cr} hesaplanması için gereken bağıntı

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Enkesit alanı sabit olan double single vertical member ara elemanın burkulma hesabı verildi. Elemanın malzemesinin (HDPE) elastisite modülünün $E=800$ MPa ve

enkesitinin atalet momentinin $I=668.47 \text{ mm}^4$ (Şekil 4.2b) olduğu dikkate alınarak, kritik yükü için;

$$P_{cr} = \frac{\pi^2(800)(668.47)}{60^2} = 1466 \text{ N} \quad (4.6)$$

değeri bulunur.

Ara elemanın genişliğine (63.8 mm) (Şekil 4.2a) gelen yayılı yükün, q , ortalama şiddetinin değeri

$$q_{cr} = \frac{P_{cr}}{63.8} = \frac{1466}{63.8} = 22.98 \approx 23 \text{ N/mm} \quad (4.7)$$

olarak hesaplanabilir.

4.1.1 V1 sinus dalgası ara rijitlik elemanın burkulma hesabı

İlgili ara elemanı kritik yükün değeri enkesitinin atalet momentinin $I=958.47 \text{ mm}^4$ (Şekil 3.3b) olduğunu dikkate alınarak formül (4. 4)'e göre

$$P_{cr} = \frac{\pi^2(800)(958.47)}{60^2} = 2102.2 \text{ N} \quad (4.8)$$

$$P_{cr} = 2102 \text{ N} \quad (4.9)$$

olarak bulunur.

Ara elemanın genişliğine (63.75 mm) (Şekil 4. 3a) gelen yayılı yükün şiddetinin ortalama değeri

$$q_{cr} \cong \frac{P_{cr}}{63.75} = 33 \text{ N/mm} \quad (4.10)$$

bulunur.

4.1.2 Enkesit alanı değişken olan ara rijitlik elemanın burkulma hesabı

Bu tip ara elemanların enkesitlerinin alanı ortasından uçlarına doğru düzgün olarak azalmaktadır (Şekil 4.4); bu durumda, incelenen eleman için kritik yükün hesaplaması Şekil 4.6'da verilmiş şema üzere yapılabilir. Kritik yükün değeri aşağıdaki formüle göre belirlenebilir [18]:

$$P_{cr} = m \frac{EI}{l^2} \quad (4.11)$$

burada m parametresi ara elemanın enkesitinin alanının değişmesini karakterize etmektedir ve değerleri ilgili elemanın geometrisine bağlı olarak tabloleştirilmiştir [18]. Bu bağlamda, $\frac{a}{b} \approx 0.22$ ve $I_A=963.65 \text{ mm}^4$, $I_B=44.44 \text{ mm}^4$ (Şekil 4.4), yani $I_B: I_A \cong 0.05$ oranı için $m \approx 6.2$ ($n=4$ olduğunda) kabul edilebilir; burada I_A ve I_B ilgili olarak ara elemanın;

$A-A$ ve $B-B$ enkesitlerinin atalet momentleridir (Şekil 4.6). Dolayısıyla, ilgili kritik yük

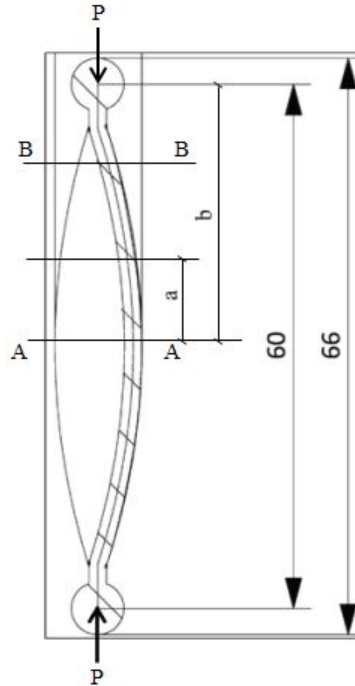
$$P_{cr} = 6.2 \frac{(800)(963.65)}{60^2} = 1328 \text{ N} \quad (4.12)$$

olur.

Ara elemanın genişliğine (63.75 mm) gelen yayılı yükün şiddeti

$$q_{cr} = \frac{1328}{63.75} = 20.83 \approx 21 \text{ N/mm} \quad (4.13)$$

olarak bulunur.



Şekil 4.6 : Enkesitinin alanı değişen ara rijitlik elemanın burkulma hesabı şeması.

4.1.3 Gömülü korige borunun yerel burkulmasının incelenmesi

Gömülü borunun üst yarısı toprak ve yüzey aktif yüklerinin etkisine maruzdur. Bu bakımdan korige borunun üst kısmının burkulma incelenmesi öncelik taşımaktadır.

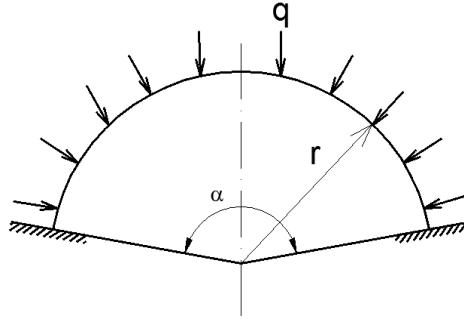
Borunun üst kısmının burkulma incelenmesinin yapılması için hesap şeması kenarları bastırılmış kemer şeklinde kabul edilebilir (Şekil 4.7). Bu durumda, borunun üst kısmı için, baskının düzgün dağıldığı varsayılarak, kritik yükün şiddeti aşağıdaki bağıntı kullanılarak değerlendirilebilir [21].

$$q_{cr} = [9\left(\frac{\pi}{\alpha}\right)^2 - 1] \frac{EI_0}{r^3} \quad (4.14)$$

Bu bağıntıdan, $\alpha=\pi$ olduğu durumda kritik yükün şiddetinin hesaplanması için ifade aşağıdaki şekilde bulunur.

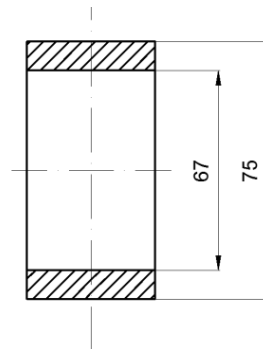
$$q_{cr} = 8 \frac{EI_0}{r^3}, \quad (4.15)$$

Burada I_0 korige borunun enkesitinin zayıf bölgesinde (Şekil 4.8) ilgili atalet momentidir.



Şekil 4.7 : Korige borunun yerel burkulmasının incelenmesi için hesap şeması.

Çapı $\phi 1200$ mm olan korige borunun birim uzunluğundaki kesitinin I_0 atalet momentini Şekil 3.8'deki şema dikkate alınarak hesaplanabilir.



Şekil 4.8 : Çapı $\phi 1200$ mm olan korige borunun enkesitinin zayıf bölgesinde ilgili atalet momentinin hesaplanması için şema.

$$I_0 = \frac{1(75^3 - 67^3)}{12} = 10092.67 \text{ mm}^4/\text{mm} \quad (4.16)$$

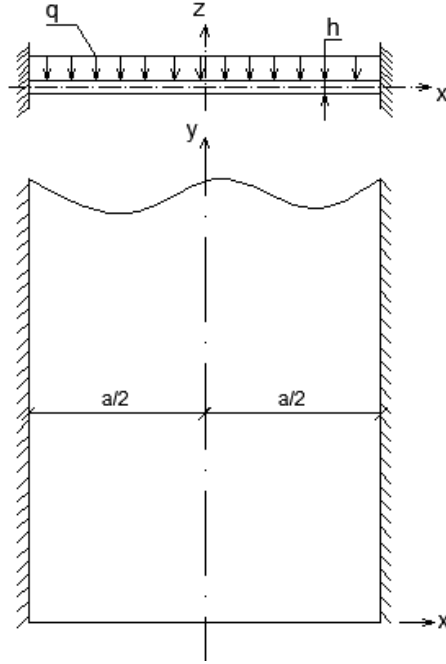
böylelikle çapı 1200 mm olan korige boru için kritik basınç yükünün şiddeti

$$q_{cr} = 8 \frac{(800)(10092.67)}{600^3} = 0.299 \text{ N/mm}^2 \quad (4.17)$$

olarak hesaplanır.

4.1.4 Gömülü borunun dış kabuğunun iki ara rijitlik elemanlarının arasındaki kısmının eğilmesinin incelenmesi

Dış kabuğun iki rijitlik elemanı arasındaki kısmının dış basınçtan eğilmesinin incelenmesi için hesap şeması Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere, yaklaşık olarak, iki kenarı bastırılmış yarı sonsuz dar dikdörtgen levha şeklinde kabul edilebilir.



Şekil 4.9 : Korige borunun dış kabuğunun iki ara rijitlik elemanı arasındaki kısmının eğilme hesabı için şema. ($\phi 1200$ mm çaplı korige boru için $a=100$ mm ve $h=4$ mm).

Kabul edilmiş hesap şemasına göre, levhanın genişliği, genel olarak, küçük olduğundan etkiyen basıncın şiddeti q sabit kabul edilebilir. Bu durumda levhanın eğilmesini belirleyen ilgili diferansiyel denklemin [19] çözümü aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$w = \frac{4qa^4}{\pi D} \int_0^\infty \left[\frac{1}{2} - \frac{(\sinh \frac{\beta}{2} + \frac{\beta}{2} \cosh \frac{\beta}{2}) \cosh \frac{\beta x}{a} - \frac{\beta x}{a} \sinh \frac{\beta}{2} \sinh \frac{\beta x}{a}}{\sinh \beta + \beta} \right] x \frac{\sin \frac{\beta y}{a}}{\beta^5} d\beta \quad (4.18)$$

burada β levhanın geometrisine bağlı olan sayısal katsayıdır, D levhanın rijitliği

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \text{ ve } h \text{ levhanın kalınlığıdır.}$$

Yarı sonsuz dikdörtgen şekilli levhada (4.18) bağıntısı dikkate alınarak serbest kenarından $y=0.3a$ uzaklığında eğilme momenti

$$M_{y_{max}} = 0.0174qa^2 \quad (4.19)$$

levhanın orta kısmında (sonsuz levha için) ise maksimum eğilme momenti

$$M_{y_{max}} = vqa^2/24 \quad (4.20)$$

ifadeleri kullanılarak değerlendirilebilir. Burada a levhanın genişliği ve v malzemenin Poisson oranıdır.

Boruya etkileyen basıncın korige borunun gömülme durumuna bağlı olarak belirlenmiş q değeri, (4.20) ve (4.21) ifadeleri dikkate alınarak bulunmuş eğilme momentlerine göre ilgili bölgelerdeki gerilmeler aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir, burada h levhanın kalınlığıdır.

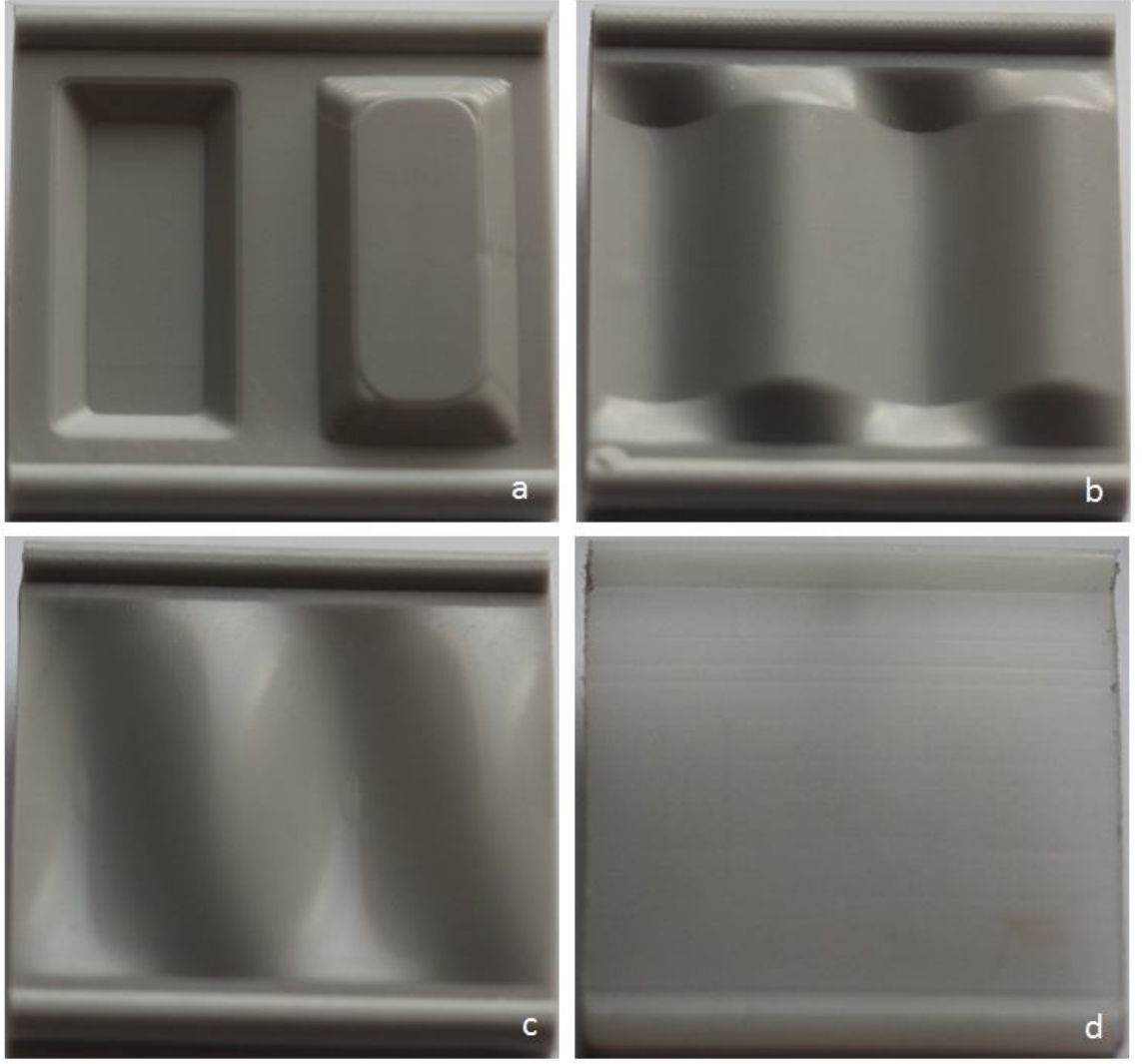
$$\sigma = \frac{6}{h^2} M_{max} \quad (4.21)$$

4.2 Ara Elemanlarının Stabilitate Testleri ve Sayısal Hesapla Karşılaştırılması

Analitik çözümleri sunulan yeni imal edilmiş korigelerin dikmeleri (Şekil 4-11) MTS cihazı kullanılarak basma testlerine de tabi tutulmuşlardır(Şekil 4-10). Bu profillerden Double Single, V1 Sinus Dalgası ve Yayvari olanlar enjeksiyon baskı, düz rijitlik ara elemanı ise ekstrüzyon tekniği ile üretilmiştir. Tasarlanan bu rijitlik elemanlarının hepsinin hammaddesi polietilen olup ticari isimleri farklıdır. Enjeksiyon baskı ile üretilen elemanlar gri renk ile renklendirilmiştir. Herbir model için onbeşer adet numune test edilmiştir. Herbir model için bulunan test sonuçları birbirine yakındır. Bu testlere ait sonuçlar ortalama olarak Şekil 4-12-15'de verilmektedir. Dikmelere ait testler ise aşağıda verilmektedir.

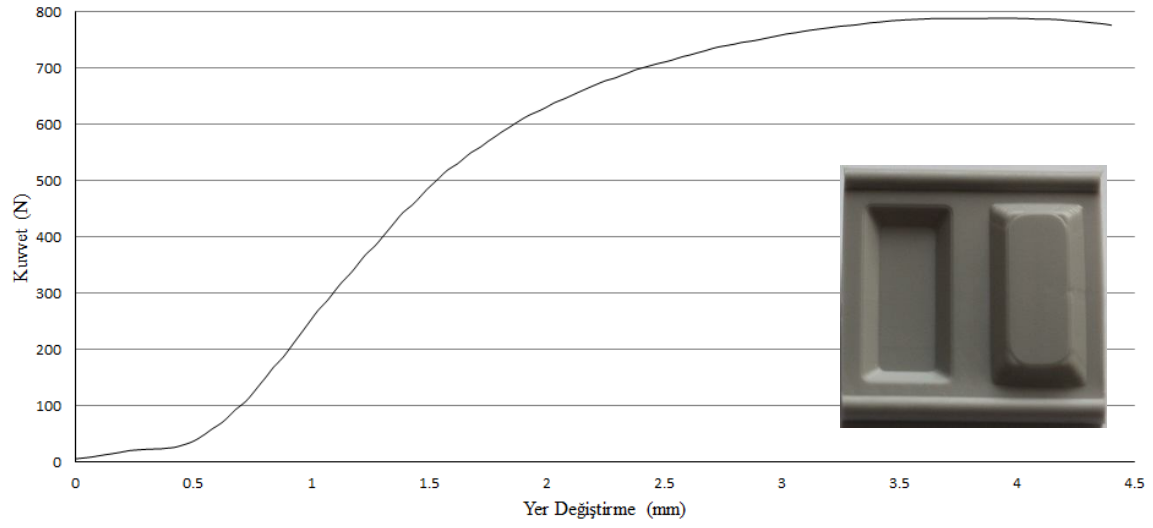


Şekil 4.10 : Basma deneylerinde kullanılan MTS Universal Test Cihazı.

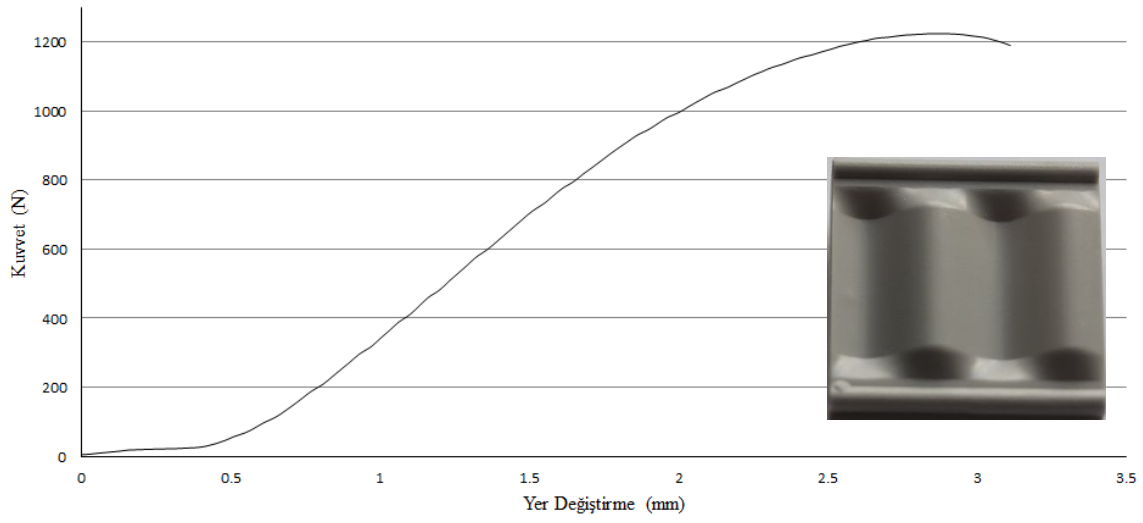


Şekil 4.11 : Yeni üretilen korigelere ait ara rijitlik elemanları a) Double Single, b) V1 sinus dalgası, c) Yayvari, d) Düz ara rijitlik elemanı.

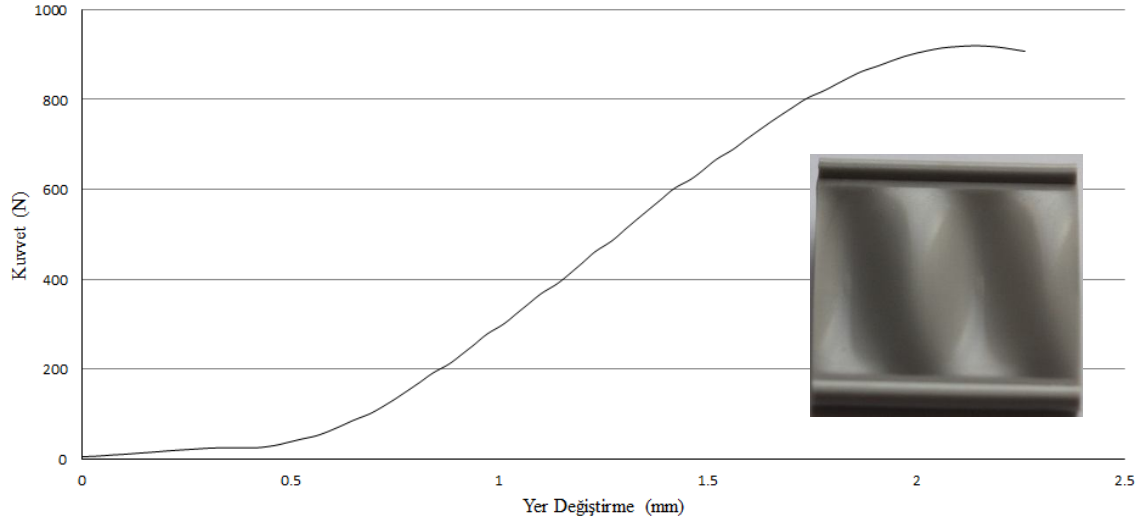
Test sonuçlarına ait ortalama kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri aşağıda verilmektedir.



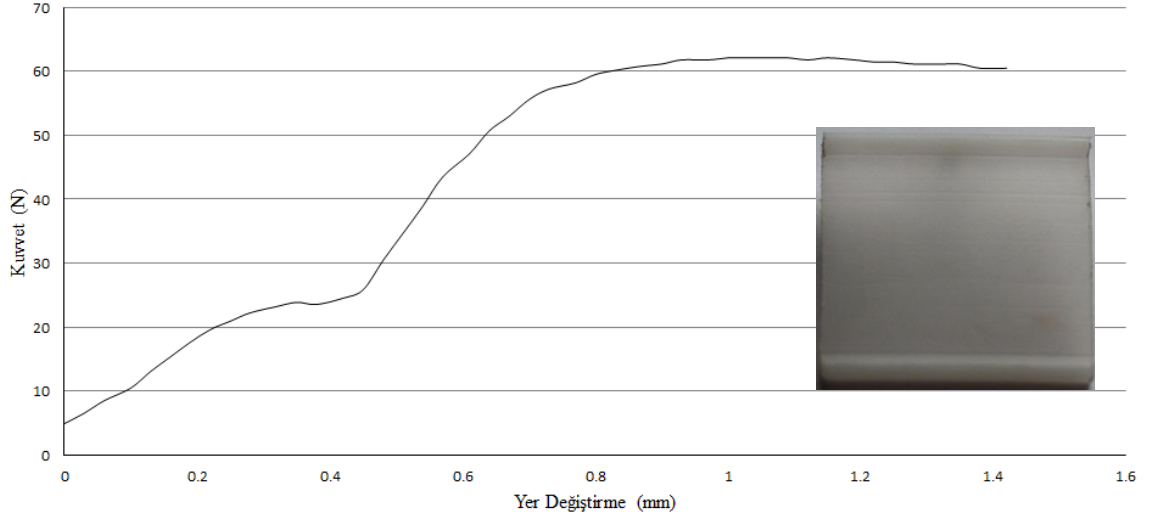
Şekil 4.12 : Double Single dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.



Şekil 4.13 : V1 Sinus Dalgalı dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.



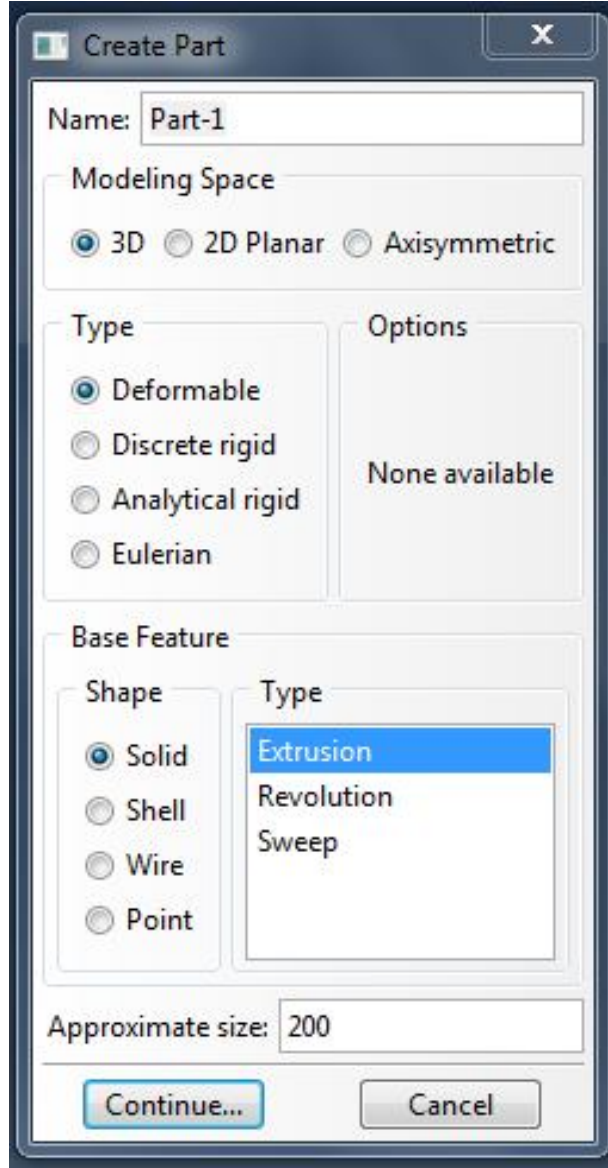
Şekil 4.14 : Yayvarı dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.



Şekil 4.15 : Düz dikme için ortalama kuvvet-yerdeğiştirme değişimi.

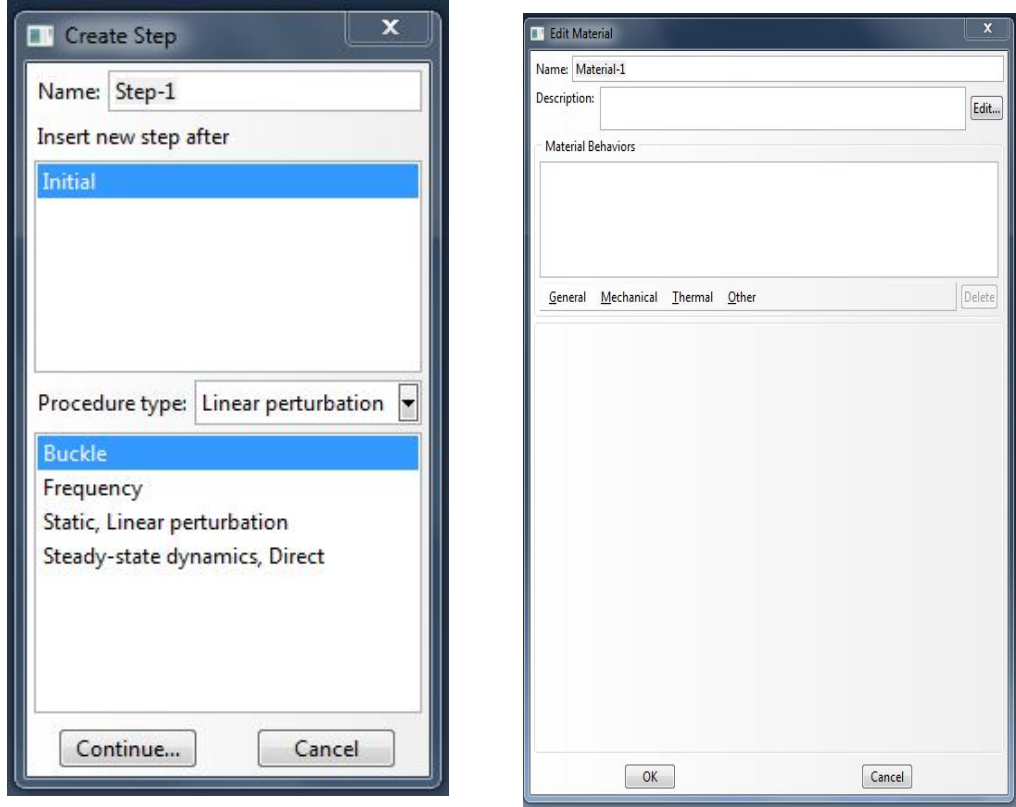
4.3 Teorik ve Deneysel İncelenen Profillerin Sayısal Analizi

Yukarıda analitik ve deneysel olarak incelenen profillerin sayısal çözümleri için ABAQUS kullanılmıştır. Öncelikle, ABAQUS ile analizi yapılacak modelin geometrisi çizilir. Geometrisi çizilen modele aşağıdaki atamalar sırası ile yapılmıştır.



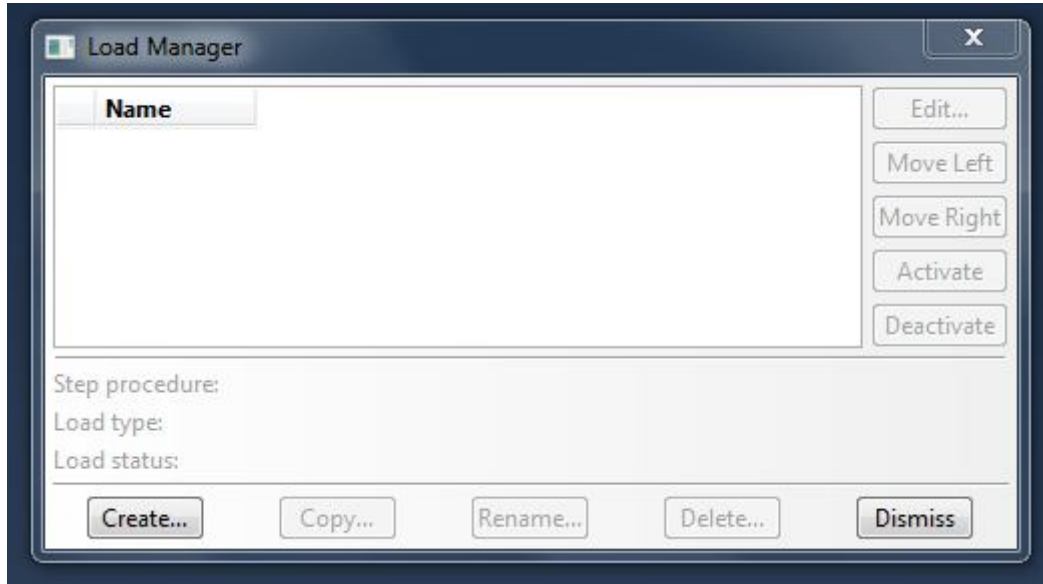
Şekil 4.16 : Analiz için özellikler belirleme.

Daha sonra malzeme özelliklerinin sayısal değerleri girilir ve kesit özellikleri atanır.

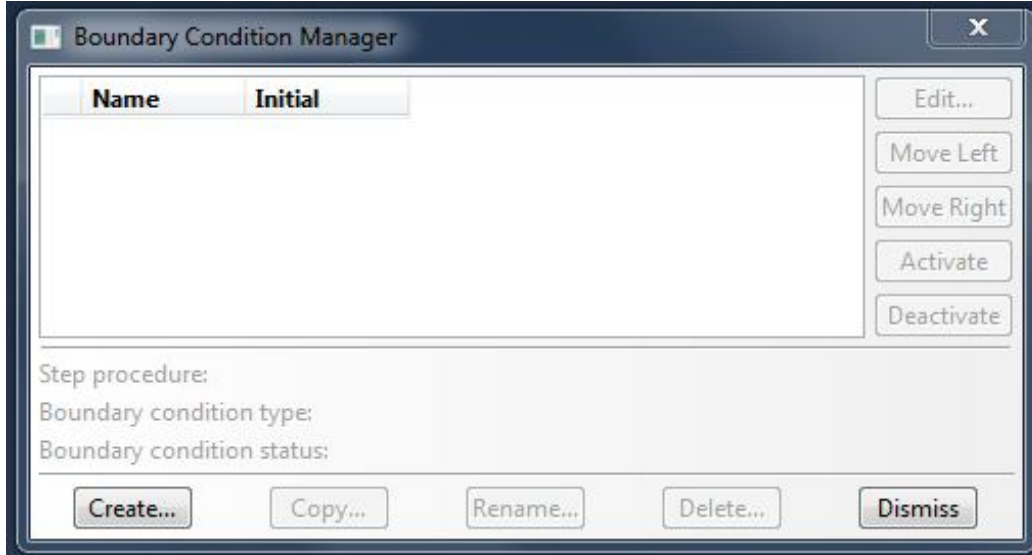


Şekil 4.17 : Malzeme özelliklerinin ve analiz tipinin belirlenmesi.

Yükleme durumu ve sınır şartları belirlenir.

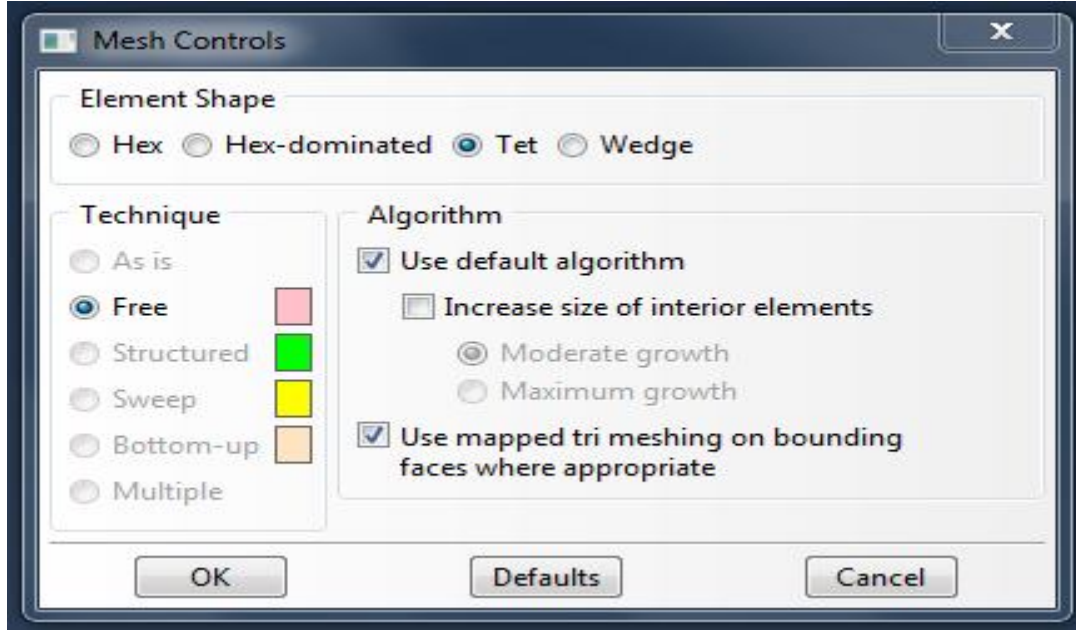


Şekil 4.18 : Yüklerin uygulanması.

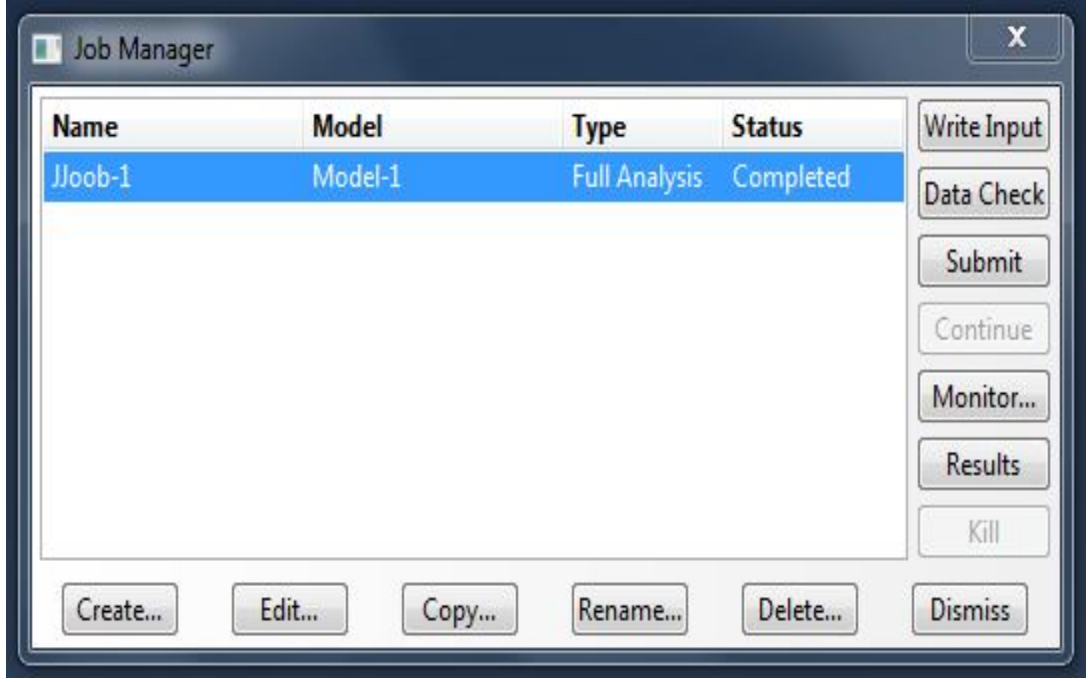


Şekil 4.19 : Sınır koşullarının belirlenmesi.

Mesh atanır ve program çalıştırılır.



Şekil 4.20 : Mesh atanması.



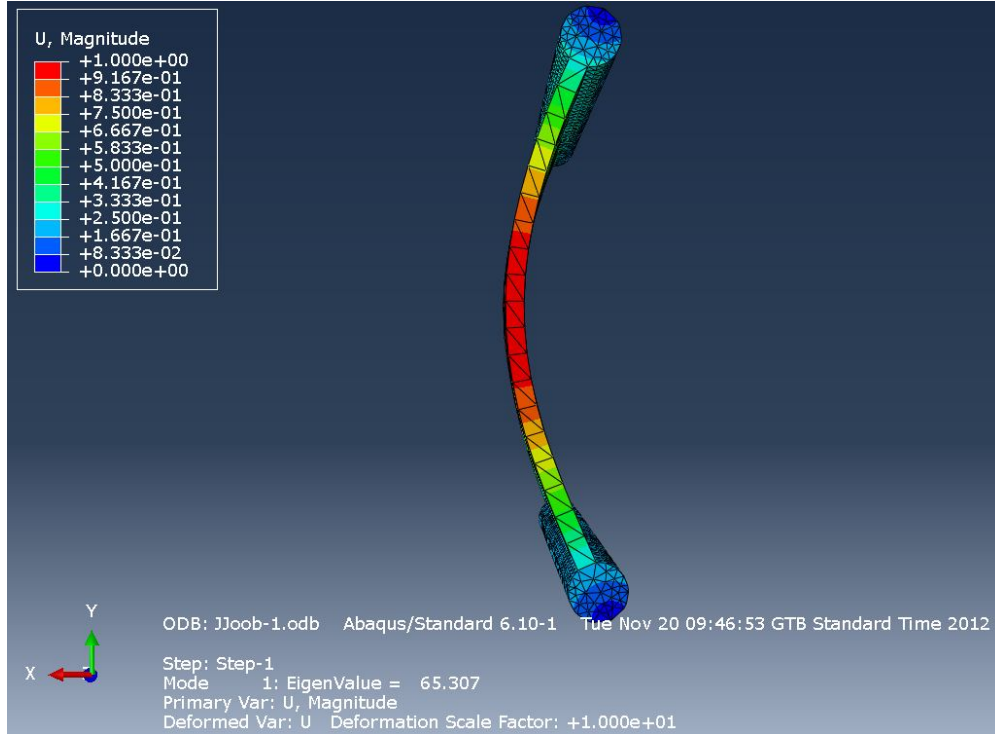
Şekil 4.21 : Programın çalıştırılması.

Kullandığımız malzemenin Poisson oranı 0.4 ve elastisite modülü 800 MPa'dır. Bütün modellerde mesh için dört yüzlü eleman tipi kullanılmıştır. Ancak geometrilerdeki farklılıklardan dolayı eleman ve nod sayıları farklıdır. Profiller için eleman ve nod sayıları aşağıda verilmiştir.

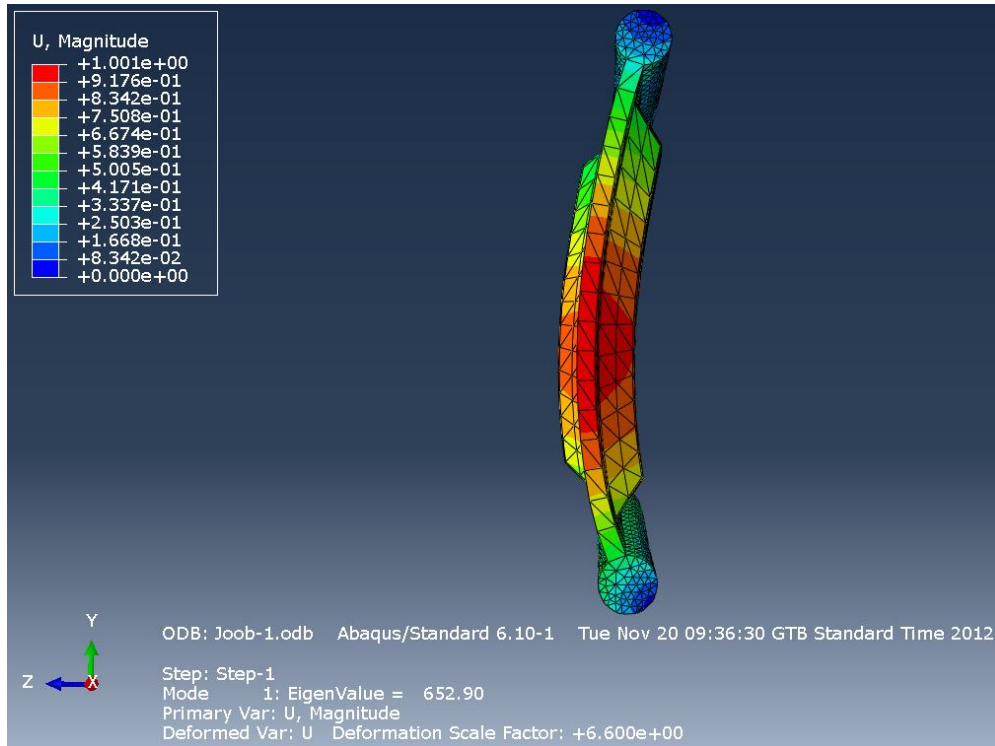
Çizelge 4.1 : Ara rijitlik elemanlarının eleman ve nod sayıları.

Profil Adı	Eleman Sayıları	Nod Sayıları
Double single	14819	4181
V1 sinüs dalgası	2275	629
Yayvari	2192	621

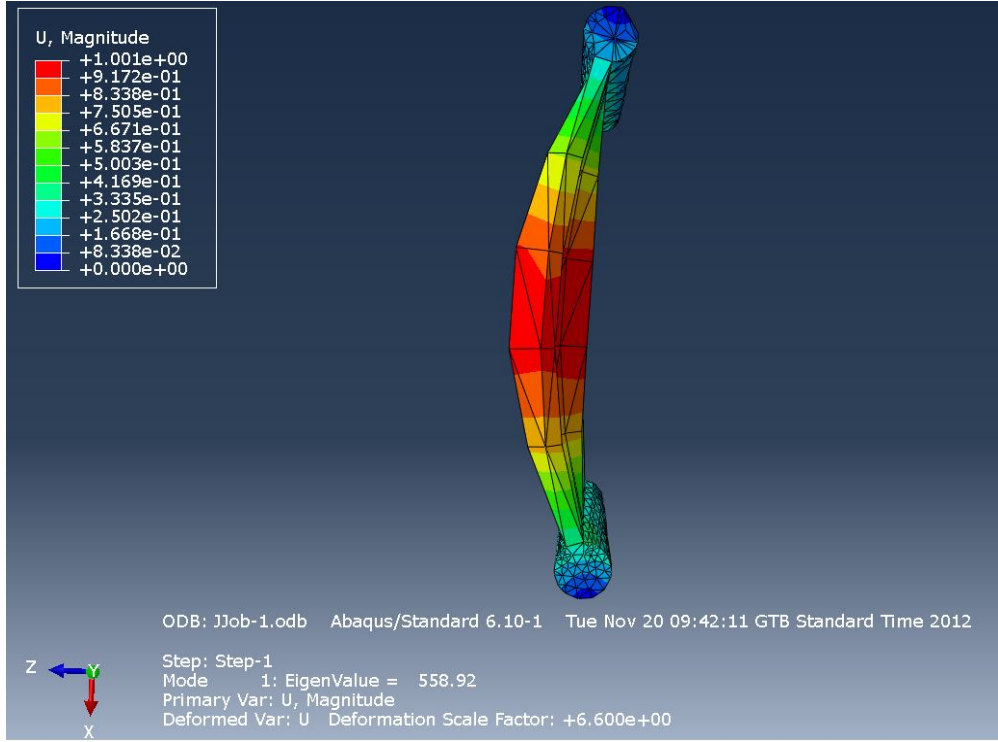
Sınır şartları ise alt taraftan her üç doğrultuda tutulmuştur, üst taraftan ise yükleme doğrultusuna dik yönlerdeki hareketler engellenmiştir. Yükleme ise üst taraftan yayılı yük olarak 1 birim olarak verilmiştir. Şekil 22-25'da sırasıyla farklı dikme modellerine ait ABAQUS sonuçları verilmektedir.



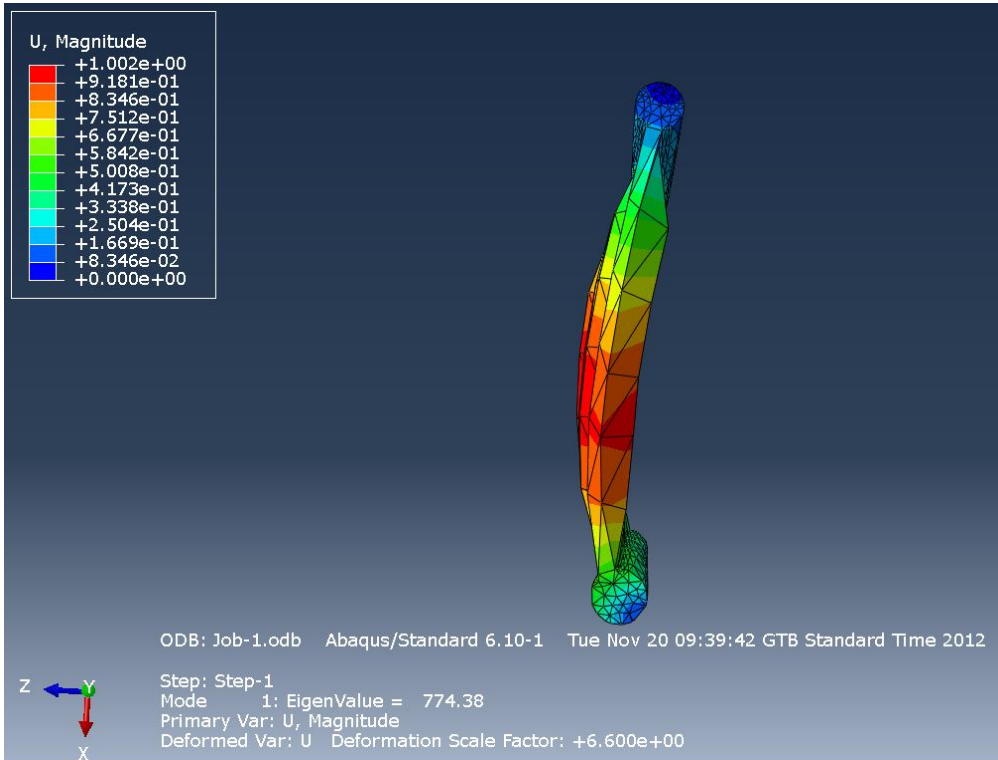
Şekil 4.22 : Düz dikme için ABAQUS sonucu.



Şekil 4.23 : Double Single dikme için ABAQUS sonucu.



Şekil 4.24 : Yayıvarı dikme için için ABAQUS sonucu.



Şekil 4.25 : V1 Sinüs Dalgası için için ABAQUS sonucu.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın ilk aşamasında, ilgili teknik literatür araştırması yapılmıştır. içme, sulama ve atık su nakil için kullanılan plastik (HDPE) borularının tasarım problemleri açıklanmıştır. Literatürde mevcut olan çalışmalarda, malzeme sarfının azaltılması için boruların dış yüzeylerine sarılan farklı enkesitli korige yapılarla güçlendirilmesiyle kesitinin atalet momentinin artırılması yönündeki araştırmalara öncelik verilmiştir. İlgili araştırmacılar da, sayısal incelemelere dayanarak mevcut örneklerinden rijitlik bakımından göstergeleri daha yüksek olan bazı sarma profiller önermiştir. İşlenmiş öneriler geniş bir aralıkta sanayi alanlarında kullanılan borularla ilgili mukavemet ve malzeme tasarrufu sorularını ortadan kaldırmamıştır, aksine bu soruları daha derinden ve detaylı olarak araştırılmasının gerekli olduğunu göstermiştir. Bu çalışmada boru-toprak etkileşimi fotoelastisite yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Deney sonucunda boruyu modelleyen halka üzerindeki asal gerilme farkları şeritler halinde elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler incelendiğinde halkanın dış kısmında maksimum gerilme bölgelerinin tepe noktasına (sol omuz bölgesinde yatay eksenle 84° yapacak şekilde) ve alt noktaya (sağ ve sol dolgu bölgesinde yatay eksenle 78° yapacak şekilde) yakın olduğu, bununla birlikte halkanın iç kısmında maksimum gerilme bölgelerinin yatay eksen hizasında (sol ve sağ dolgu bölgelerinde yatay eksenle 19° ve 16° yapacak şekilde) ve tepe noktasında olduğu görülmüştür. Aynı zamanda borunun yerdeğiştirilmesinde hassas olarak belirlenmiştir.

Bu bağlamda çalışmamızda farklı şekilli ve geometrili profillerin sayısal yöntemle eğlensizlik momentlerinin minimizasyonuna dayanarak, gereken genel mukavemet koşullarını sağlaması koşuluyla optimizasyon işlemleri yapılmıştır. İlgili işlemlerin sonucunda yeni daha efektif profiller verilmiştir. İlgili olarak verilmiş profillerin yerel burkulma analizi yapılmıştır ve ilgili mekanik testlerin sonuçları ile analitik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonuçların uyumunun yeterli olduğunu göstermiştir. Bu profillerden V1 sinüs dalgalı olan rijitlik elemanı daha fazla dayanım göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Sezer, S.; Ataoglu, S.; Gulluoglu, A.N.; Kadioglu, N.: “An Analytical Model for Compressive Creep Behaviour of HDPE Used in Plastic Pipe Manufacturing”, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47 (2008) 1302-1307.
- [2] Reddy, D.V.; Ahn, W.S.; Ataoglu, S.: “Investigation of Flexural Creep for High-Density Polyethylene Pipe”, *Journal of Advanced Materials*, 36 (2004) 18-24.
- [3] Reddy, D.V.; Gazagnaire, C; Ataoglu, S.: “Analysis of Long-Term of High-Density Polyethylene Pipe”, *Journal of Advanced Materials*, 39 (1), (2007), 63-79.
- [4] Peres, F.M.; Schon C.G.: “An Alternative Approach to the Evaluation of the Slow Crack Growth Resistance of Polyethylene Resins Used for Water Pipe Extrusion”, *Journal of Polymer Research*, 14 (2007) 181-189.
- [5] Moser, A.P.; Folkman, S.: “Buried Pipe Design”, *McGraw-Hill*, Third Edition, (2008).
- [6] Moore, I.D.; Hu, F.: “Response of Profiled High-Density Polyethylene Pipe in Hoop Compression”, *Transportation Research Record*, 1514 (1995) 29-36.
- [7] Selig, E.T.; DiFrancesco, L.C.; McGrath, T.J.: “Laboratory Test of Buried Pipe in Hoop Compression”, *Technical Publication 1222, Buried Plastic Pipe Technology*, ASTM, Philadelphia, Pa., (1994) 119-132.
- [8] Moore, I.D.: “Three-Dimensional Response of Deeply Buried Profiled Polyethylene Pipe”, *Transportation Research Record*, 1514 (1995) 49-58.
- [9] Hengprathanee, S.: “Evaluation of the Geometry Effect of the Profile of High Density Polyethylene Pipes”, *M.Sc. Thesis*, Department of Civil Engineering and the Russ College of Engineering and Technology, Ohio University, (2000).
- [10] Dhar, A.S.; Moore, I.D.: “Sensitivity of Thermoplastic Pipe Behaviour to Profile Geometry”, *Pipelines 2001: Advances in Pipelines Engineering & Construction*, (2001).
- [11] Moore, I.D.; Hu, F.: “Linear Viscoelastic Modelling of Profiled High Density Polyethylene Pipe”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23 (1996) 395-407.

- [12] **Dhar, A.S.; Moore, I.D.:** “Laboratory Investigation of Local Bending in Profiled Thermoplastic Pipes”, *Advances in Structural Engineering*, Vol.7 No.3 (2004) 201-215.
- [13] **McGrath, T.J.; Schafer, B.W.:** “Parallel Plate Testing and Simulation of Corrugated Plastic Pipe”, *Transportation Research Board Annual Meeting*, (2003).
- [14] **Burgon, R.P.:** “Parametric Study of Buried Corrugated Plastic Pipe Profiles”, *M.Sc. Thesis*, Mechanical and Aerospace Engineering, Utah State University, Logan, Utah, (2004).
- [15] **Ayche, N.:** “The Effect of High Density Polyethylene (HDPE) Pipe Profile Geometry on Its Structural Performance”, *M.Sc. Thesis*, The Faculty of The College of Engineering and Technology of Ohio University, The Department of Civil Engineering, (2005).
- [16] **Keatley, D.J.:** “Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Deeply Buried Corrugated Annular HDPE Pipe with Changes in Its Profile Wall”, *Ph.D. Thesis*, The Faculty of The College of Engineering and Technology of Ohio University, The Department of Civil Engineering, (2009).
- [17] **Timoshenko, S.; J.N. Goodier, J.N.:** “Theory of Elasticity”, *McGraw Hill*, New York, (1951).
- [18] **Timoshenko, S.; Gere, J.:** “Theory of Elastic Stability”, *McGraw Hill*, New York, (1963).
- [19] **Timoshenko, S.; Woinowsky-Krieger, S.:** “Theory of Plates and Shells”, *McGraw Hill*, 2nd Ed. (1959).
- [20] **Standard ATV-DVWK-A 127E:** “Static Calculation of Drains and Sewers”, *German ATV-DVWK Rules and Standards*, 3rd Ed. (2000).
- [21] **Frocht, M. M.:** “Photoelasticity”, *Wiley*, New York, (1947).
- [22] **M. M.Tuncay, A. Gunel, S. Ataoglu, A. N. Gulluoglu, Z. Abdulaliyev** Photoelastic Stress Analysis of Buried Pipes. *Proceedings of International Conference on Aerospace, Mechanical, Automotive and Materials Engineering*, 05-06 March, Dubai.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Adem GÜNEL

Doğum Yeri ve Tarihi: Erzurum 1988

Adres: Akarsu Sok. 3/3 Ferahevler Mah. Sarıyer/İstanbul

E-Posta: gunelad@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi - 2011

Yüksek Lisans (Varsa):

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Yayınlar:

M. M.Tuncay, A. Gunel, S. Ataoglu, A. N. Gulluoglu, Z. Abdulaliyev Photoelastic Stress Analysis of Buried Pipes, *International Conference on Aerospace, Mechanical, Automotive and Materials Engineering*, 05-06 March, Dubai.