



**MERKEZİ RADYAL YÜK ALTINDA ELASTİK
KENAR KISITLAMALI EĞRİSEL
KABUKLARIN DÜZLEM İÇİ BURKULMASI**

Yüksek Lisans Tezi

Fatih Hüseyin ALKAN

Eskişehir 2025

**MERKEZİ RADYAL YÜK ALTINDA ELASTİK KENAR KISITLAMALI
EĞRİSEL KABUKLARIN DÜZLEM İÇİ BURKULMASI**

Fatih Hüseyin ALKAN

Yüksek Lisans Tezi

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haluk YILMAZ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Fatih Hüseyin ALKAN'ın MERKEZİ RADYAL YÜK ALTINDA ELASTİK KENAR KISITLAMALI EĞRİSEL KABUKLARIN DÜZLEM İÇİ BURKULMASI başlıklı çalışması 17/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Haluk YILMAZ

Üye : Doç. Dr. Fatih Hayati ÇAKIR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih BOZKURT

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

17/01/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Fatih Hüseyin ALKAN, MERKEZİ RADYAL YÜK ALTINDA ELASTİK KENAR KISITLAMALI EğRİSEL KABUKLARIN DÜZLEM İÇİ BURKULMASI başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Haluk YILMAZ

ÖZET

MERKEZİ RADYAL YÜK ALTINDA ELASTİK KENAR KISITLAMALI EĞRİSEL KABUKLARIN DÜZLEM İÇİ BURKULMASI

Fatih Hüseyin ALKAN

Raylı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2025

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Haluk YILMAZ

Bu çalışmada, merkezi bir radyal yük etkisi altında elastik kenar kısıtlamalı eğrisel kabukların elastik burkulma davranışının sayısal olarak araştırması yapılmıştır. Elastik kenar sınırlamalarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini karakterize etmek için çeşitli tasarım parametreleri ifade edilmiştir. Bu parametreler kabuk düzlemin et kalınlığı, kabuk düzlemin uzunluğu, eğrisel kabuğun yarıçapı, eğrisel kabuğun yay açısı ve kenar kısıtlamasını sağlayan yayların sertlik derecesi olarak tanımlanabilir. Burada bu parametrelere bağlı olarak elastik kenar sınırlamalı eğrisel kabukların sabit kenar kısıtlamalı eğrisel kabuklara oranla yük taşıma kapasitesindeki değişimi de incelenmiştir. Bu parametrelerden eğrisel kabuğun derinliği ve yarıçapı sabit tutularak et kalınlığı, merkez yay açısı ve elastik yay katsayıları değiştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları birbiriyle ve sabit kenar koşullarına göre kıyaslanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Burkulma, Eğrisel kabuk yapılar, Sonlu elemanlar metodu, Elastik sınır şartları

ABSTRACT

IN-PLANE BUCKLING OF ELASTIC EDGE-CONSTRAINED CURVILINEAR SHELLS UNDER CENTRAL RADIAL LOAD

Fatih Hüseyin ALKAN

Department of Rail Systems Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2025

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Haluk YILMAZ

In this study, the elastic buckling behavior of elastic edge-constrained curved shells under the effect of a central radial load was investigated numerically. Various design parameters were expressed to characterize the effect of elastic edge restraints on the load carrying capacity. These parameters can be defined as the shell plane thickness, shell plane length, radius of the curved shell, spring angle of the curved shell and the stiffness degree of the springs providing the edge restraint. Here, the change in the load carrying capacity of elastic edge-constrained curved shells compared to fixed edge-constrained curved shells depending on these parameters was also investigated. Among these parameters, the depth and radius of the curved shell were kept constant and the wall thickness, center spring angle and elastic spring coefficients were changed. The obtained analysis results were compared with each other and according to fixed edge conditions.

Keywords: Buckling, Curvilinear shell structures, Finite element method, Elastic Boundary Conditions .

TEŐEKKÖR

Bu alışmanın her aşamasında değerli yardım ve ilgisini esirgemeyen, y nlendirici ve bilgilendirici desteklerinden dolayı danışman hocam Sayın Dr. Haluk YILMAZ’a teőekk rlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda yanımda olan eşim Sevgi ALKAN ve aileme teőekkürü borç bilirim.

Fatih Hüseyin ALKAN



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Fatih Hüseyin ALKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMA ALANI HAKKINDA GENEL TERMİNOLOJİ	2
2.1. Genel Terimler	2
2.2. Analiz Türleri	5
2.3. Stabilitate Kaybı	6
3. LİTERATÜR TARAMASI	9
4. MALZEME VE METOT	12
4.1. Malzeme	12
4.2. Geometrik Tanımlamalar	12
4.3. Sınır Koşulları	14
4.4. Çözücü Ayarları	16
4.5. Eleman ve Ağ Yapısı Oluşturulması	17
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	20
5.1. Elastik Sınır Şartlarının ve Narinlik Oranlarının Etkileri	20

5.2. Narinlik Oranı (R/t) ve Yay Açısının (Θ) Limit Yüke Etkisi.....	35
5.3. Kritik yükün limit yüke oranının yay sertliğine göre değişimi.....	35
6. SONUÇ	38
KAYNAKÇA.....	40
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 4.1. Eleman Boyutu / Limit Yük Tablosu.....	18
--	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yük-yer değiştirme tepkisi	2
Şekil 2.2. Yük-yer değiştirme eğrisi	4
Şekil 2.3. Gerilim-şekil değiştirme eğrisi	4
Şekil 2.4. Uygulamada stabilite kaybından kaynaklanan burkulma örneği	6
Şekil 2.5. Kar ve buzun ağırlığından kaynaklanan Metrodome çatısının çökmesi	7
Şekil 2.6. Kabuk yapısının kararlılık kaybına ilişkin denge eğrileri	8
Şekil 4.1. Eğrisel Kabuk Geometrisi	13
Şekil 4.2. Geometri CAD Modeli	13
Şekil 4.3. Yer Değiştirme Sınır Koşulları.....	16
Şekil 4.4. Ağ Yapısı.....	19
Şekil 5.1. Burkulma Anında Toplam Deformasyon	21
Şekil 5.2. Burkulma Gözlemlenmeyen Bir Duruma Ait Toplam Deformasyon	22
Şekil 5.3. $R/t = 50$ Denge Eğrileri	24
Şekil 5.4. $R/t = 75$ Denge Eğrileri	26
Şekil 5.5. $R/t = 100$ Denge Eğrileri	28
Şekil 5.6. $R/t = 150$ Denge Eğrileri	30
Şekil 5.7. $R/t = 250$ Denge Eğrileri	32
Şekil 5.8. Farklı Yay Açıları İçin Burkulma Anındaki Deformasyon Görselleri.....	34
Şekil 5.9. $R/t=50$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği.....	35
Şekil 5.10. $R/t=75$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği.....	36
Şekil 5.11. $R/t=100$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği.....	36
Şekil 5.12. $R/t=150$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği.....	36
Şekil 5.13. $R/t=250$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği.....	37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E	: Elastisite Modülü (GPa)
L	: Kabuk yapının boyu
t	: Kabuk yapının et kalınlığı
θ	: Kabuk yapının merkez açısı
R	: Kabuk yapının yarıçapı
F	: Kuvvet (N)
R/t	: Narinlik oranı
x	: Yayın uzama veya sıkışma miktarı (mm)
k	: Yayların sertlik katsayısı

1. GİRİŞ

Kalınlıkları, geometrinin büyüklüğüne oranla çok ince olan kabuk yapılar genellikle mekanik, inşaat ve havacılık gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır. Ayrıca, karayolu ve demiryolu taşımacılığında su, akaryakıt, kimyasal sıvılar, basınçlı gazlar ve diğer tehlikeli maddelerin taşınmasında kabuk yapıların kullanımı özel bir yere sahiptir. Bu tür yapılar hem basma hem de eğilme türlerindeki yüklere sıklıkla maruz kalmaktadır. Burkulma ise bu yapılarda birçok yükleme koşulu için birincil aksama ya da iş görmezlik nedenidir. Bir kabuk yapının burkulma olgusuna neden olan çeşitli faktörler arasında bulunan sınır koşullarının durumu, yükleme tipi ve kusurlar (geometrik ve malzeme) ile birlikte burkulma davranışının ortaya çıkmasında rol oynayan en önemli parametrelerdir. Özellikle eğrisel kabuklar, dairesel kemerler, plaka, silindirik kabuk parçası vb. şeklindeki yapıların stabilitesi, sınır koşullarına oldukça duyarlıdır. Kabuk yapıların uygulamasında, kabuk uçlarının/kenarlarının tamamen sınırlandırılması, kısmi elastik kısıtlamalara kıyasla teorik olarak en yüksek limit yükleri sağlar. Bununla birlikte, kabuk yapıların elastik temelleri, otoyollar için rijit betonarme kaplama alt yapısı, elastomerik mesnetler üzerine oturan köprü alt yapısı, binalar için açık temeller, yanal ve düşey yüklü kazıklar, zemin profilindeki tüneller vb. cıvatalı, kaynaklı veya yapıştırıcı bağlantıların çoğu teoride rijit tipte bağlama yöntemine girse de pratikte belirli bir elastik rijitlik ile elastik bir tutucu gibi davranırlar. Bu bağlamda, sunulacak çalışmanın sonuçları, yukarıda bahsedildiği gibi bir eğrisel kabuk profiline sahip kabuk yapısı için yardımcı olacaktır. Yapılan çalışma farklı merkez açısına sahip özel bir kemer profili türü olduğundan, köprü, çatı tasarımı, yapı mühendisliği ve mimari ile ilgili uygulamalarda kemer yapıları diğer örnekler olarak gösterilebilir.

Bu çalışmada, merkezi bir radyal yüke maruz kalan açık kesit eğrisel kabuk segmenti için kabuğun düzlem içi burkulma yükünün, elastik kenar kısıtlamaları ve lineer olmayan geometriyi hesaba katarak incelenmesi yapılmıştır. Yapılan çalışmada öncelikli olarak farklı R/t ve yay açısına sahip kabuk segmentlerinin gerçekçi yük taşıma kapasitelerini tahmin etmek için, tam olarak sabitlenmiş (ankastre) kenar koşullarında burkulma yükü araştırılmıştır. Daha sonra, tamamen sabitlenmiş durumdan serbest kenar (kayar mesnet) koşullarına kadar değişen elastik kenar sınırlamalarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki değişimi incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI HAKKINDA GENEL TERMİNOLOJİ

2.1. Genel Terimler

Bu bölümde, yapılan çalışmada yer alan bazı genel terimler açıklanmıştır.

- **İdeal kabuk**

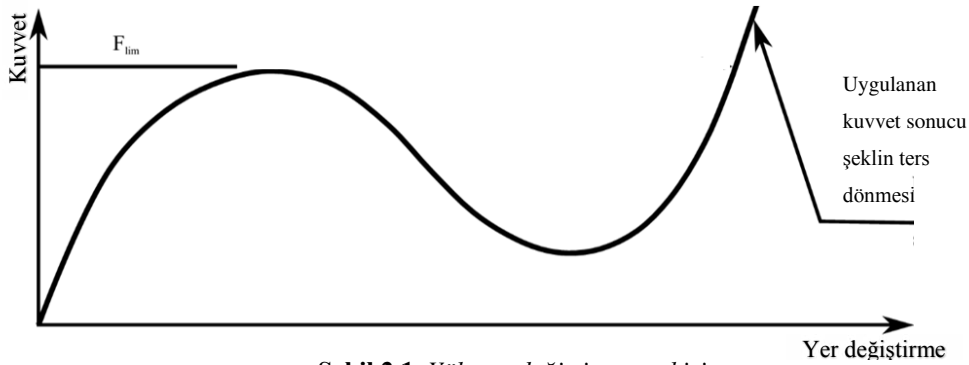
İdeal kabuk, lineer davranış gösteren bir geometriye, düzgün dağılmış malzeme davranışına ve kalıntı gerilmenin olmadığı bir yapı olarak tanımlanır. Kısaca ideal kabuk, başlangıçta kusuru olmayan bir yapı anlamına gelir. Burada kabuk yapılar, yüzey olarak modellenmektedir. Bu yüzeye modele bir kalınlık verildiğinde katı model olarak da modellenmektedirler.

- **Kusur**

Analiz ortamında tasarlanan yapı, malzeme ve geometri yönünden kusursuz olabilir, ancak gerçek yapıda bazı kusurlar olabilir. Örnek olarak kabuk kalınlığının dalgalanması, homojen olmayan sınır koşulları, kalıntı gerilme, yükleme dengesizlikleri, malzemenin düzgün dağılmamış mekanik özellikleri verilebilir.

- **Limit yükü**

Limit yükü, yapının limit durumunu tanımlayan yüküdür ve sayısal model üzerinde yapılan geometrik olarak lineer olmayan analizler sonucunda elde edilir. Limit yük değeri yapının geometrik özelliklerine ve sınır koşullarına bağlıdır.



- **Kritik yük**

Kritik yük, yapının sınır durumunu tanımlayan yüküdür. Yapının kritik yükü sayısal model üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilir. Bu noktadan sonra kabuk yapı burkulmaya başladığı için yer değiştirme, burkulma öncesindeki durumdan tamamen farklı bir şekilde büyümeye başlar. Şekil 2.1’de görülen Yük-yer değiştirme eğrisindeki kritik nokta yani tepe noktasındaki yük değeri kritik yük değerini verir.

- **Radyal Yük**

Radyal yük, silindirik yapıdaki kabuk yapıya merkez ekseninden geçecek şekilde radyal yönde uygulanan kuvvettir. Yapının burkulmasına ve başlangıçtaki konumundan sapmasına neden olur. Bu da yapıda stabilite kaybına sebep olur.

- **Standart yapı**

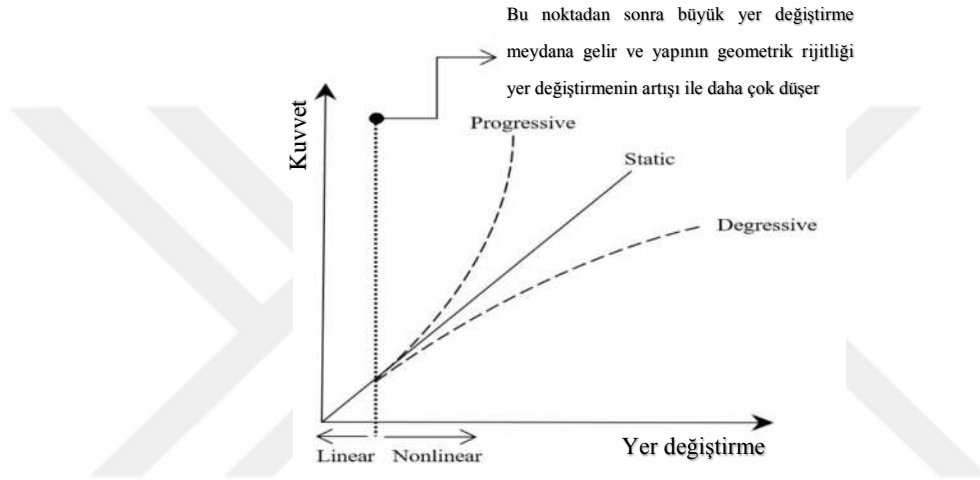
Standart bir yapı, analitik ilişkilerle tanımlanabilen basit bir yapısal eleman olarak düşünülebilir. Yaygın olarak kullanılan standart yapılara silindirik kabuk gibi geometrik olarak basit bir tasarım örnek olarak verilebilir. Bu yapıların analitik çözümü lineer burkulma analizi teorisine dayanmaktadır. Ayrıca lineer burkulma yalnızca standart yapı elemanlarında araştırılır. Lineer burkulmada, yük-yer değiştirme eğrisi lineer olarak devam eder ve yapı elastik bölgede kalır. Bu nedenle, kritik yükün teorik değeri ile yapının gerçek mukavemeti arasındaki fark ihmal edilebilir seviyededir.

- **Standart dışı yapı**

Ek eğilme etkisi gösteren ve lineer analiz yöntemi ile analiz edilemeyen yapılar standart dışı yapılar olarak tanımlanabilir. Bu tür yapılarda yük taşıma kapasitesini hesaplayabilmek için lineer olmayan analiz yöntemleri kullanılabilir. Yapının yük taşıma değerleri, burkulmanın hesaba katılmasından dolayı lineer analiz yönteminden elde edilen sonuçlara göre daha düşük çıkmaktadır. Standart olmayan yapılar tasarlanırken sayısal analizler veya deneyler gereklidir. Değiştirilen şekil, orijinalinden daha düşük bir sertliğe ve yük taşıma kapasitesine sahiptir. Yapı, yükleme yerel bir maksimuma ulaşana kadar kararlı kalır ve bu yerel maksimum, limit yük olarak adlandırılır. Bu durumda, yük-yer değiştirme eğrisinin eğimi sıfıra eşittir (şekil 2.1) Bu anda, yapı maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşır. Daha sonra, daha düşük yükler yer değiştirme artışına neden olur ve yapı dengesiz hale gelir Bu dengesizliğin bir sonucu olarak, yapı orijinal şeklinin tersine dönüşür. Kemerler, küresel başlıklar, düşük taban açısına sahip koniler vb. gibi yapılar bu tür bir davranış gösterir. Standart dışı yapısal elemanlar her zaman lineer olmayan çökme veya lineer olmayan burkulma olaylarına karşılık gelir.

- **Geometrik lineer olmama durumu**

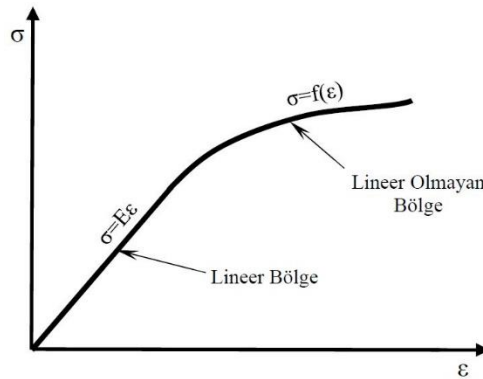
Bir yapı herhangi bir yükleme altında deformasyona uğradığında, bazı faktörler nedeniyle rijitliği değişebilir. Yapının sertliğindeki bu sapma yalnızca geometrideki değişikliklerden kaynaklanıyorsa, lineer olmayan davranış, geometrik lineer olmama durumu olarak tanımlanır. Yapının sertliği, çalışma koşulları altında lineer olmayan bir şekilde davrandığında lineer olmayan analiz gerekli hale gelir. Başka bir deyişle, geometrik lineer olmama durumu, yer değiştirme miktarı arttığında yük yer değiştirme karakteristiğini önemli ölçüde etkiler (bkz. Şekil 2.2)



Şekil 2.2. Yük-yer değiştirme eğrisi

- **Malzeme lineer olmama durumu**

Yapının sertliğindeki değişim sadece malzeme özelliklerinden kaynaklanıyorsa, bu davranışa malzemenin lineer olmaması denir. Lineer bir malzeme modeli, gerilim-şekil değiştirme eğrisinin eğimini sabit olarak varsayar. Bu, yük arttırıldığında gerilim ve deformasyonun lineer olarak arttığı ve yük kaldırıldığında yapının eğrinin eğimine göre orijinal şekline döndüğü anlamına gelir.



Şekil 2.3. Gerilim-şekil değiştirme eğrisi

Young Modülü, lineer bir malzeme modelinde orantılılık sabitidir. Gerilim-şekil değiştirme eğrisinin lineer kısmının eğimini temsil eder (Şekil 2.3). Lineer bölge yapının akma noktasının altında kaldığı için son derece lineer olmayan malzemeler için, bu modül yalnızca çok düşük gerinimlerde uygulanabilir. Bu çalışmada analiz türü olarak lineer malzeme modeli kullanılmıştır.

2.2. Analiz Türleri

Kararlılık kaybının sınır durumu, sonlu elemanlar metodundaki analiz türleri kullanılarak belirlenebilir. Bu türler yapının geometrisine, malzemesine ve yükleme durumuna bağlıdır. Bu analizler aşağıdaki gibi sınıflandırılırlar;

- Lineer Burkulma Analizi (LBA), ince duvarlı kabuk yapısının lineer bölgede kalan değerlerini belirler. Yapının kritik yük değerine kadar olan stabilite kayıplarını hesaplar. Standart olmayan yapısal elemanda oluşan ek eğilme etkisi bu analizde dikkate alınmaz. Bu nedenle, LBA sayısal analizi standart olmayan yapıların kararlılık kaybını değerlendirmek için kullanılamaz.
- Geometrik Olarak Lineer Olmayan Analiz (GNA) ideal yapıya uygulanır. Lineer elastik malzeme davranışı kullanılır. Ancak geometrik lineer olmama durumu (büyük yer değiştirme) dikkate alınır.
- Materyal Olarak Lineer Olmayan Analiz (MNA) ideal yapıya uygulanır. Lineer olmayan elastik-plastik malzeme modeli aktif bir role sahiptir (malzemenin lineer olmaması) (Şekil 2.3). Öte yandan, analiz yapılırken büyük yer değiştirme ihmal edilir. Sonuçlar plastik limit durum yükünü verir.
- Geometrik ve Materyal Olarak Lineer Olmayan Analiz (GMNA), ideal yapı için geometrik lineer olmaması ve lineer olmayan elastik-plastik malzeme davranışını hesaplar. Analiz sonuçları geometrik ve materyal olarak lineer olmayan kabuk yapısının limit yükünü gösterir.
- Kusurlar Dahil Geometrik Olarak Lineer Olmayan Analiz (GNIA), başlangıç kusurlarını (ideal yapı değil) içeren bir analizdir. Büyük yer değiştirme dikkate alınır ve lineer elastik malzeme davranışı kullanılır.
- Kusurlar Dahil Geometrik ve Materyal Olarak Lineer Olmayan Analiz (GMNIA), başlangıçtaki kusurları içeren bir analizdir. Büyük yer değiştirme ve malzemenin lineer olmaması dikkate alınır. Analizin sonucu, elastik-plastik durumda stabilite kaybı durumunda gerçek yapının limit yüküdür.

Bu çalışmada analiz türü olarak Geometrik Olarak Lineer Olmayan Analiz (GNA) seçilmiştir. Çünkü bir kabuk yapı, geometrisinden dolayı akma gerilmesinin çok altındaki bir yükleme durumunda bile burkulmaya uğrayabilmektedir. Bu sebeple malzeme olarak lineer malzeme modeli alınmıştır. Bu çalışmada kabuk yapıların geometrik dayanımları incelendiği için yapılan analizler ve seçilen parametreler bu analiz türüne göre belirlenmiştir.

2.3. Stabilité Kaybı

Burkulma durumu temelde yapının geometrik açıdan dayanımını kaybetmesi olarak tanımlanabilir. Burkulma durumundaki stabilite kaybı ise yapının taşıma kapasitesinde ani bir düşüş olarak tanımlanır. Taşıma kapasitesindeki bu azalma, yapıda büyük bir yer değiştirmeye yol açar. Stabilité kaybı anında gerçekleşir ve bu süreçten sonra yapıdaki bozulma genellikle çıplak gözle açıkça görülebilir (Şekil 2.4). Stabilité kaybı durumunda, yapı yeni bir denge durumuna geçer. Yapı, stabilitesini kaybetmeden önceki gibi yeni bir denge durumunda davranır. Deforme olmuş yapının yük taşıma kapasitesi tekrar yükselebilir. Daha fazla stabilite kaybına kadar daha yüksek yüke karşı direnç gösterebilir. Ancak, kabuk yapıları ilk stabilite kaybında bile tamamen çökebilir (örneğin kemer şeklinde bir yapı) Maksimum tasarım yükü, kabuk yapısının stabilite kaybına karşılık gelen bir seviyeye asla ulaşmamalıdır. Stabilité kaybı, yapının beklenmedik şekilde aşırı yüklenmesi (yetersiz boyutlandırma veya işletim sırasında hatalar, vb.) nedeniyle meydana gelebilir. Bazı durumlarda, başka bir stabilite kaybına ulaşılan kadar bu kabuk yapısını yeni bir denge durumunda kullanmaya devam etmek mümkündür. Ancak, yapının yük taşıma kapasitesi tekrar hesaplanmalıdır.



Şekil 2.4. Uygulamada stabilite kaybından kaynaklanan burkulma örneği

Kabuk yapılar için stabilite kaybı 3 farklı yöntem ile araştırılır,

- Lineer olmayan çökme
- Lineer olmayan burkulma (çatallanma)
- Lineer burkulma

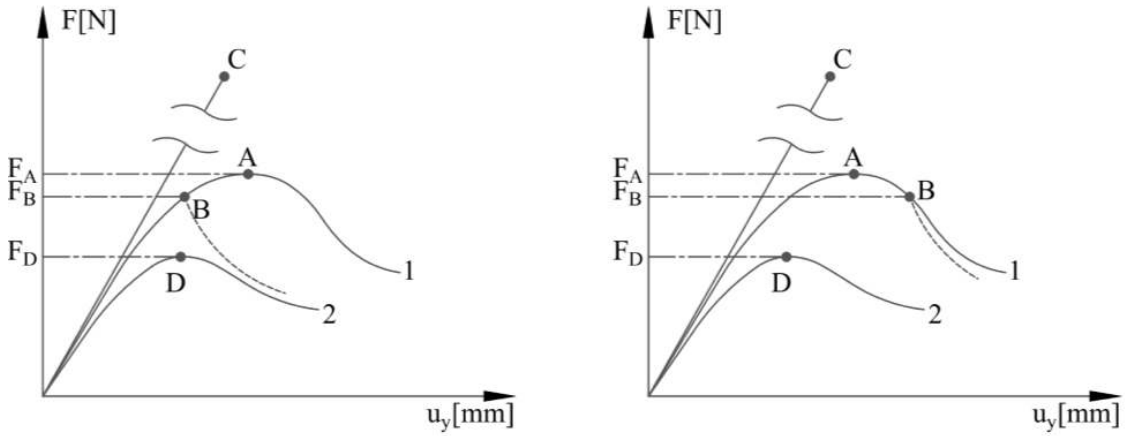
Lineer olmayan çöküşte, deforme olmuş kabuk yapısı eksenel olarak simetrik bir şekle sahiptir. Yapıya iç basınç, dış basınç, radyal veya eksenel kuvvet gibi yükler uygulanırken bu yük kademeli olarak artırıldığında kabuk yapısı zıt konumuna deforme olur. Bu süreçte, kabuk yapısının sertliği uygulanan yüke ters davranır. Eğrinin eğimi sıfır değerine ulaştıktan sonra yük devam ederse (Şekil 2.6 Nokta A), yapı önemli bir deformasyona sahip olabilir. Bu durum, flambaj (snap-through) burkulması terimiyle açıklanır ve fazlasıyla lineer olmayan özellikleri nedeniyle genellikle sığ yapılarda ve küresel başlıklarda görülür. Yüklemenin başlangıcında, yükleme artışına kıyasla oldukça küçük bir şekilde deforme olurlar. Ancak, yük sınır değerine yaklaştığında, yapının deformasyon hızı, yapı nötr denge durumuna yaklaşırken artar. Son olarak, ani bir şekilde çöker ve orijinal şeklin ters bir formu olarak görülürler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Kar ve buzun ağırlığından kaynaklanan Metrodome çatısının çökmesi

Lineer olmayan burkulma, kabuk yapısının eksenel olarak asimetrik şekilli deformasyonunun tipik bir ifadesidir. Lineer olmayan burkulma daha erken veya daha sonra Lineer olmayan çöküşe ulaşabilir (Şekil 2.6 Nokta B). Bu tür bir hasarda, deformasyon kritik yüke veya çatallaşma noktasına ulaştıktan sonra daha düşük değerler almaya başlar. Yük-yer değiştirme eğrisinde bu noktaya kadar, burkulma öncesi yoldan oldukça farklı olan yeni bir yol belirir. Yapı yeni bir denge şekli alır. Kabuktaki yeni deforme olmuş şekil, dalgalara sahiptir. Dalgaların sayısı ve karakteristiği kabuk yapısının yükleme türüne bağlıdır.

Lineer burkulma çatallaşma noktasında meydana gelir (Şekil 2.6 Nokta C). Lineer burkulmanın değerlendirilmesi için kritik yükün lineer analizle belirlenmesi gerekir. Analitik çözümler lineer kabuk teorisine dayanmaktadır. Bu yaklaşım yalnızca standart yapılar için geçerlidir. Öte yandan, standart dışı yapının stabilite kaybına karşı dayanıklılığını değerlendirmek için lineer olmayan çöküşün veya lineer olmayan burkulmanın analiz edilmesi gerekir.



Şekil 2.6. Kabuk yapısının kararlılık kaybına ilişkin denge eğrileri

Şekil 2.6’da kabuk bir yapının stabilite kaybı için denge eğrisi örneği verilmektedir. Konik kabuğun merkezindeki düğümün yer değiştirmesine bağlı olarak, denge eğrisi aksenal yükün ilerlemesini temsil eder. Yapının lineer olmayan çöküşü A noktasında görünür ve lineer olmayan burkulma B noktasında meydana gelir. Çalışma koşulu altında bir kabuk yapısının taşıma kapasitesi ilk kusurdan etkilenebilir. (A yerine D noktası) Lineer burkulma analizi, C noktasında ideal lineer elastik kabuk yapısının kritik yükünü verir. Bu nokta, ideal kabuk yapının sınır yükünden nispeten daha yüksektir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Çeşitli sınır koşullar (örneğin, basit mesnetli, tam kenetlenmiş ve belirli bir yönde dönel olarak kısıtlanmış) mevcut literatürde yaygın olarak deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Örneğin, düzlem içi sınır koşullarının plakaların elastik burkulma davranış üzerindeki etkisi Prajapat vd. tarafından dikkate alınmış [1], Beerhorst ve Babu [2] ise iki zıt kenarın düzlem iç yüklenmesini çalışmıştır. Çalışmada, Mindlin plakalarının lineer burkulması için belirli varsayımlara dayalı olarak kapalı formda yaklaşık bir çözüm önerilmiştir [2]. Bası yüklemeleri altında çalışan ve farklı sınır koşullarına sahip silindiri kabukların yerel burkulması ise Evkin vd. [3] tarafından teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Çoklu yükleme (eksene sıkıştırma ile birlikte dış basınç) etkisi altında daha karmaşık sınır koşullarına sahip bir sistem için Wang vd. deneyse bir çalışma sunmuştur [4].

Mevcut birçok çalışma, öncelikli olarak, plakaların ve kabuk parçalarının burkulma tepkisini incelemek için teori türetimlere odaklanmaktadır. Huang ve Qiao [5], elastik kenar sınırlamaları olan kavisli kirişlerin kritik burkulma yükü içi yarı analitik bir çözüm sunmaktadır. Atay ve Coşkun [6], elastik sınır koşulları ile burkulma yüklerinin analitik çözümünü varyasyon yineleme yöntemini kullanarak Euler kolonlarına kadar genişletmiştir. [7] ve [8] referans numaralı çalışmalar da yine sınır koşulları ile bağlantılı diğer önemli analitik çıktılar olarak gösterilebilir. Pang vd. [7] Jacobi polinomların kullanarak rastgele seçilmiş sınır koşullarına sahip kompozit lamine silindirik kabukları incelemiştir. Duc ve Thang [8] kayma deformasyon teorisine dayalı olarak düzgün bir radyal yük altında elastik kısıtlamalarla çevrelenmiş ince dairesel silindirik kabukları araştırmışlardır. Kritik yük/gerilme denklemlerinin tespiti için yapılan kapalı formdaki teorik çözümle çoğunlukla bir elastik burkulma senaryosu ve ideal sınır koşullarını (sabit ya da ankastre gibi) dikkate alarak yapılabilmektedir. Fakat kabuk yapıların yük taşıma kapasitesi için analitik ifadeler geliştirirken, bu idealleştirme konsepti (örneğin, küçük deformasyonlar, elastik malzeme modeli vb.), gerçek durum esas alındığında yüksek bir sapmaya yol açabilir. Buna karşın, Yang vd. ise özel bir kabuk geometrisi için kenarlarında dönme serbestliği olmayan söz konusu yapının geometrik olarak lineer olmayan (küçük deformasyon kabulü olmayan) burkulma analizini gerçekleştirmiştir [9]. Devam çalışmalarında ise bu prosedürü tüm kenarları dönmeye karşı elastik olarak kısıtlanmış takviye elemanlı dikdörtgen plakalara kadar genişletir [10] Kabuk yapıların elastik olarak kısıtlanmış burkulma problemi ile ilgili yayınlanmış ek çalışmalar [11, 12,

13 ve 14] olmasına rağmen, radyal yükleme altında açık kesitli eğrisel kabuk segmentleri için burkulma yükü üzerindeki elastik kenar kısıtlama etkisinin teorik bir çıktısı henüz tam anlamıyla açıklanamamıştır. Açık kesitli eğrisel kabukların bir yapısal uygulaması olarak yükleri radyal yönde taşıyan yarı silindir geometrisi verilebilir. Bu tip kabuk yapılarda genellikle düzlem içi ve düzlem dışı burkulma modelleri gözlenir. Her iki durumda da elastik malzeme özellikleri dikkate alınarak burkulma yükleri için kapalı formlu çözümler referans numarası [15] olan çalışmada sunulmuştur. Pi vd. [16] çeşitli açık kesitli ince duvarlı bölümlerin stabilitesini incelemiş ve Zingoni vd. [17, 18] ise düzgün radyal yükleme altında parabolik ve dairesel açık kabuk segmentlerini çalışmıştır. Zhang vd. [19] üniform dış basınç altında toroidal kabuk parçalarını araştırmışlardır. Düzgün radyal yüklere maruz kalan açık kesit kabuk segmentlerinin elastik burkulması kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve belirli varsayımlara dayalı olarak burkulma yükleri için kapalı form çözümler elde edilmiştir.

Kabuk yapıların burkulma yükleri, malzeme plastisitesi, lineer olmayan geometri ve düzgün olmayan sınır koşulları gibi çeşitli faktörlerden büyük ölçüde etkilenir. Bu nedenle, pratikte açık kesit kabuk segmentlerinin gerçek burkulma yüklerinin tahmininde bu faktörlerin dikkate alınması gerekliliğine dikkat edilmelidir. Kabuk yapı malzemesinin mekanik özelliklerinin, tasarım burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı üzerindeki etkisi, Lykhachova ve Evkin [20] tarafından eksenel yükleme altındaki silindirler için analiz edilmiştir. Pi ve Bradford [21], Tang vd. [22] merkezi bir yüke maruz kalan ince duvarlı segmentlerin lineer olmayan elasto-plastik burkulma analizini sunmuşlardır. Zhang vd. [23] ve Chengyi vd. [24] ise aynı yükleme senaryosunu dairesel kemer yapılarının düzlem içi elastik burkulmasını araştırmak için uygulamıştır. Yine benzer yükleme durumlarında teorik burkulma yükü değerlendirmesi [25-28] referans numaralı çalışmalar tarafından verilmiştir. Ayrıca, kabuk burkulma problemleri için sayısal modellemeye ve yaklaşık güncel analitik yöntemlere odaklanan çeşitli yaklaşımlar [29-33]'te rapor edilmiştir. Bu çalışmalar da yaratıcı analitik yöntemler ve optimizasyon rutinleri aracılığıyla alandaki ilerlemenin kapsamlı bir görünümünü sunarlar.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların çoğunda, kabuk segmentlerin elastik burkulma yüklerini yöneten ana denklemleri elde etmek için temel kabuk teorilerini kullandığı görülebilir. Rastgele bir kabuk yapısı için gerçekçi bir burkulma yükü tahmini gerçekleştirmek için lineer olmayan geometri ve değişken sınır koşulları faktörlerini aynı

anda değerlendirilmesi gerekir. Bilindiği kadarıyla, mevcut literatürde yukarıda belirtilen faktörlerin her birinin etkisini içeren ve açık kesit kabuk segmentleri için kapsamlı burkulma yükünü inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.



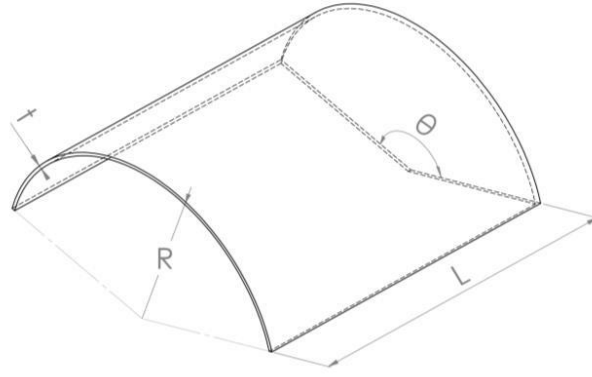
4. MALZEME VE METOT

4.1. Malzeme

Hazırlanan sayısal modellerde lineer elastik malzeme davranışı kullanılırken geometrik olarak lineer olmayan analiz yani yüksek deformasyon (geometrik rijitlik değişimi) dikkate alınmaktadır. Literatürde bu analiz tipi GNA (Geometrically Nonlinear Analysis - geometrik olarak lineer olmayan analiz) olarak geçmektedir. Analizler sonucunda elastik burkulma koşulları değerlendirilmiştir. Çalışmanın hedefleri arasında eğrisel kabuk yapıların geometrik parametrelere (R, t, L, k, θ) bağlı olarak yük taşıma kapasitesinin incelenmesi sebebiyle, sayısal analizlerde elastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu nedenle, malzeme modelini oluşturmak için Young modülünün kullanılması yeterli olacaktır. Burada malzeme olarak yapı çeliği seçilmiş olup Young Modülü (Elastisite Modülü) 200 GPa ve Poisson Oranı 0,3 olarak tanımlanmıştır.

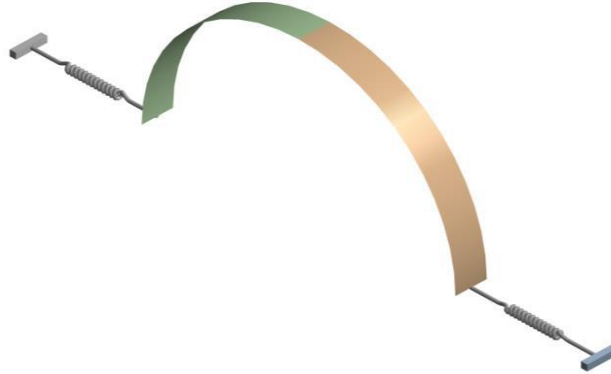
4.2. Geometrik Tanımlamalar

Çalışmada incelenen eğrisel kabuk yapının geometrisi Şekil 4.1’de şematik olarak verilmiştir. Bu eğrisel kabuğun tanımında eğrisel kabuğun yarıçapı R , eğrisel kabuğun derinliği L , kabuğun et kalınlığı t ve merkez yay açısı θ şeklinde dört bağımsız geometrik parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden L (uzunluk) 50 mm ve R (yarıçap) 250 mm olarak sabit tutulmuştur. Değişken parametrelerden narinlik oranı R/t değeri et kalınlığına bağlı olarak 50, 75, 100, 150 ve 250 değerleri seçilmiştir. Eğrisel kabuğun yay açısı (θ) ise 30° , 37.5° , 45° , 52.5° , 60° , 90° ve 180° değerlerinde seçilmiştir. Birbirinden bağımsız olarak verilen bu parametrelere ek olarak farklı kenar rijitliklerine sahip analiz ortamları hazırlanarak kenar hareketleri tamamen kısıtlı ve tamamen serbest aralığında kalan farklı sınır şartları oluşturulacaktır. Burada parametrik çalışma yapabilmesi açısından yay katsayısı k ise 25, 50, 100 ve 200 N/mm değerlerinde seçilmiştir.



Şekil 4.1. Eğrisel Kabuk Geometrisi

Sayısal analiz için ANSYS paket programı kullanılmış ve analiz için hazırlanmış olan CAD modeli Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Şekilde $\theta=180^\circ$ (yarım silindir) model hazırlanmış olup örnek olarak verilmiştir.



Şekil 4.2. Geometri CAD Modeli

Kabuk yapıların burkulma davranışını anlamak için narinlik oranının etkilerini incelemek önemlidir. Genel olarak, R/t oranı (yarıçap/kalınlık oranı) arttıkça, yapı daha narin hale gelir ve burkulma riski artar. Bu, kabuk yapıların tasarımında ve analizinde dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Yüksek narinlik oranına sahip kabuk yapılar, daha düşük limit yüklere sahip olabilir ve bu nedenle burkulma analizleri ve sınır koşulları belirlenirken dikkatli olunmalıdır. Bu amaçla boyutsuz narinlik oranı (R/t) yukarıda ifade edildiği üzere R sabit tutulup kalınlık (t) değiştirilerek oluşturulmuştur ve bu çalışma kapsamında ilgili aralık 50 ile 250 arasında seçilmiştir.

Burada şekil 4.2’deki uygulamaya örnek olarak çatı, tünel veya köprü destek sistemleri gibi örnekler verilebilir.

4.3. Sınır Koşulları

Sınır koşulları, bir yapısal analizde veya fiziksel problemde sistemin belirli sınırlarında uygulanan kısıtlamalar ve yükleme koşullarıdır. Sınır koşulları, bir yapının davranışını ve performansını belirlemede kritik bir rol oynar. Mühendislik ve fizik problemlerinde sınır koşulları, genellikle yapının belirli noktalarında veya yüzeylerinde tanımlanır ve çeşitli türlerde olabilir. Çalışmada kullanılan sınır koşulları aşağıda verilmiştir;

- **Elastik Sınır Koşulları**

Elastik sınır koşulları, yapının belirli noktalarında veya yüzeylerinde elastik kısıtlamalar uygular. Bu, sınırların belirli bir kuvvet altında esnek bir şekilde hareket edebileceği anlamına gelir. Elastik kısıtlamalar, yaylar veya elastomerik yataklar gibi esnek bağlantılarla temsil edilebilir.

- **Elastik Yataklı Destek (Elastik Temel)**

Yay sertliği (Stiffness), bir yayın birim uzunlukta ne kadar kuvvet uygulandığını ifade eder. SI birim sisteminde yay sertliği genellikle Newton/metre (N/m) veya Newton/milimetre (N/mm) olarak ifade edilir. Yay sertliği, Hooke Kanunu ile tanımlanır ve $F=kx$ ile ifade edilir. Burada F, yaya uygulanan kuvvet, k, yay sertliği, x, yayın uzama veya sıkışma miktarıdır.

Sönümleme (Damping), bir sistemdeki titreşim enerjisinin zamanla azalmasını ifade eder. Sönümleme, hareket eden bir kütlenin hızına bağlı olarak kuvvet uygular ve bu kuvvet hareketin ters yönünde olur. Sönüm kuvveti şu şekilde ifade edilir: Sönümleme, sistemin enerjisini yayarak veya iç sürtünme ile titreşimin azalmasını sağlar. Bu, mühendislikte genellikle titreşim kontrolü ve sistem stabilitesi için önemlidir. SI birim sisteminde sönümleme katsayısı Newton-saniye/metre (Ns/m) veya Newton-saniye/milimetre (Ns/mm) olarak ifade edilir. Sönümleme kuvveti $F_d=cx$ ile ifade edilir. Burada F_d , sönümleme kuvveti, c, sönümleme katsayısı, x , hızdır.

Yapının belirli noktalarının, bir yay veya esnek bir zemin gibi davranan bir temel üzerinde bulunduğu kabul edilmiştir. Bu tür destekler, yer değiştirme veya dönme durumunda belirli bir elastik kuvvet uygulamaktadır. Modelde elastik yataklı destek olarak 2 adet yay kullanılmıştır. Kullanılan yaylarda sertlik değeri k; 25, 50, 100 ve 200 N/mm olarak tanımlanmış ve yayların sönümleme özelliğinin olmadığı kabul edilmiştir.

- **Displacement (Yer değiştirme)**

Yer değiştirme (displacement) sınır koşulları, bir yapının belirli noktalarında veya yzeylerinde yer değiştirmeleri (deplasmanları) belirli bir değere sabitleyen veya kısıtlayan sınır koşullarıdır. Bu koşullar, yapının belirli noktalarının nasıl hareket edeceğini veya etmeyeceğini tanımlar. Modele iki adet yer değiştirme sınır koşulu tanımlanmıştır. Bunlardan birincisi eğrisel kabuk yapının her iki kenarının da sadece yatay dızlemde hareket edebilme kısıtı, diğeri ise uygulanan ykkn sadece dikey ekseninde hareket edecek olmasıdır. Bu yer değiştirme tanımlamaları şekil 4.3'te verilmektedir.

- **Fixed support (Sabit Destek)**

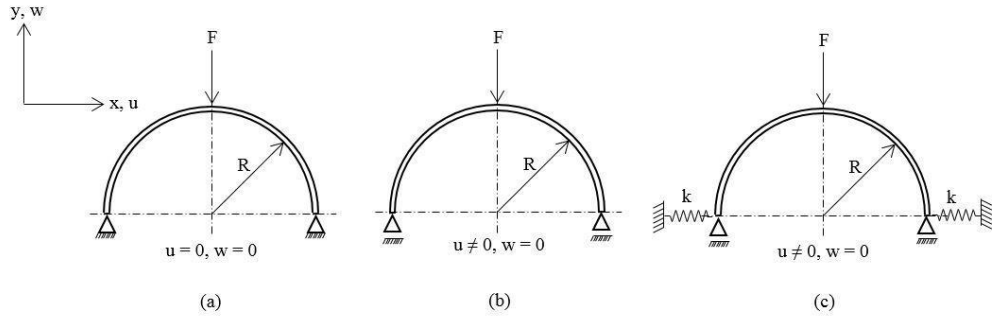
"Fixed support" (sabit destek), bir yapı elemanının belirli bir noktasında veya yzeyinde tm hareket ozgurluklerinin kısıtlandığı bir destek turudur. Sabit destek, elemanın o noktada veya yzeyde hiçbir yer değiştirme veya donme hareketi yapmasına izin vermez. Bu tur destek, yapıların analiz ve tasarımıında yaygın olarak kullanılır ve genellikle temel, kolon, kiriş ve benzeri yapı elemanlarının bağlanmasıında kullanılır. Bu sınır koşulu ęalıřmada eğrisel kabuk yapının kenarlarına bağlanan yayların diğer ucunu sabitlemek için kullanılmıştır. Sabit desteğin şematik goşterimi şekil 4.3.(a)'da ornek olarak verilmiştir.

- **Serbest Kenar**

Serbest kenar uygulamasında yapının uğları dikey ynde hareket edemez ancak uğların yatay yndeki hareketinde herhangi bir kısıtlama yoktur. Yani bu tur yapılarda şekildeki gibi uestten kuvvet uygulandığında yapının uę noktalarında yer değiştirme veya donme hareketi meydana gelebilir. Bu yapının şematik goşterimi şekil 4.3.(b)'de ornek olarak verilmiştir.

- **Elastik Kısıtlamalı Kenar**

Elastik kısıtlamalı kenar uygulamasında da yapının uğları dikey ynde hareket edemez ancak uğların yatay yndeki hareketini kısıtlamak için k sertlik katsayısına sahip yaylar kullanılmıştır. Bu uygulamada kenarlar tamamen sabit ya da tamamen serbest değildir. Burada kullanılan yayların sertlik değeri yukseldikęe kenar hareketi daha ęok kısıtlanmış olur. Bu yapının şematik goşterimi ise şekil 4.3.(c)'de ornek olarak verilmiştir.



Şekil 4.3. Yer Değiştirme Sınır Koşulları

4.4. Çözücü Ayarları

Sonlu elemanlar analizinde analiz edilen yapının geometrik olarak lineer olmayan davranışlarını modelleyebilmek için “Large Deflection” seçeneği kullanılır. Analiz edilen yapı da bu kümeye girdiği için yapılan analizde “Large Deflection” seçeneği kullanıldı. Bu seçenek yapı üzerindeki yer değiştirmeleri ve yapının üzerindeki yüklerin etkisi ile oluşan büyük deformasyonları dikkate alarak analizde daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini ve geometrik rijitliği dahil edebilmeyi sağlar.

İnce cidarlı kabuk yapılar veya uzun ince elemanlar merkezi radyal yük altında önemli ölçüde eğilebilir ve büyük deformasyonlar gösterebilir. Bu durumda yapının ilk geometrisi ile birlikte deformasyon sonrası geometrisi de analizde dikkate alınmalıdır. Lineer analiz yöntemleri küçük yer değiştirmeler varsayımı altında çalıştığı için bu tür büyük deformasyonları doğru şekilde modelleyemez ve sonuçlar hatalı olabilir. “Large Deflection” seçeneği ise bu tarz büyük yer değişmelerinin hesaplamalarını da dikkate alarak analiz sonuçlarının doğruluğunu artırır.

Analizde geometrik rijitlik dâhil edebilmek için bu seçenek aktif hale getirilmiştir. Aktif hale getirilmemesi durumunda geometri stabilitesini koruyormuş gibi davranır ve ekstra oluşacak eğilme gerilmelerini dikkate almamış olur ve bu durumda burkulma davranışı gözlemlenemez. Büyük yer değiştirmeler, özellikle burkulma incelenen analizlerde kritik öneme sahiptir. Yapının Burkulma sonrasındaki stabilitesini ve davranışlarını doğru bir şekilde değerlendirebilmek için geometrik lineer olmayan olguların hesaba katılması gerekmektedir. “Large Deflection” seçeneği bu tür analizlerde yapıdaki yük ve yer değiştirmelerin etkileşimlerini daha doğru bir şekilde modelleyerek burkulma sonrası taşıma kapasitesi ve stabilite kaybı durumlarını daha güvenli şekilde belirler.

4.5. Eleman ve Ağ Yapısı Oluşturulması

Kabuk yapıların burkulma analizinde ağ yapısı seçimi, analiz sonuçlarının doğruluğu ve hesaplama süresi açısından kritik öneme sahiptir. Ağ yapısı, yapıyı sonlu elemanlar yöntemiyle küçük parçalara (elemanlar) böler ve bu elemanların davranışını hesaplar. Uygun ağ yapısı seçimi, hem hesaplamaların doğruluğunu artırır hem de analiz süresini optimize eder. Ağ seçimi ve oluşturulmasında dikkat edilmesi gereken ana kriterler ve adımlar aşağıda detaylandırılmıştır.

Eleman Tipi: Kabuk yapılar için genellikle kabuk (shell) elemanları kullanılır. Kabuk elemanları, ince ve eğrisel yüzeylerin analizinde uygun olup, yüklerin yüzey boyunca dağılımını etkin bir şekilde modelleyebilir.

Eleman Boyutu: Elemanların boyutu, analiz sonuçlarının hassasiyetini doğrudan etkiler. Küçük elemanlar daha hassas sonuçlar verirken, büyük elemanlar hesaplama süresini kısaltır. Optimal eleman boyutu, doğruluk ve hesaplama süresi arasında bir denge sağlar.

Eleman Şekli: Üçgen ve dörtgen elemanlar kabuk yapılar için yaygın olarak kullanılır. Dörtgen elemanlar genellikle daha iyi performans gösterir, sadece karmaşık geometrilere üçgen elemanlar tercih edilmelidir.

Ağ Yoğunluğu: Burkulma analizlerinde, yüklerin ve desteklerin yoğun olduğu bölgelerde daha ince mesh kullanılması önerilir. Bu, burkulma modlarının daha doğru tespit edilmesini sağlar.

Ağ Kalitesi: Mesh elemanlarının şekil ve boyutlarının uyumlu olması, analiz sonuçlarının doğruluğu için önemlidir. Düzgün şekilli (çok bozulmamış) elemanlar tercih edilmelidir.

Hedef Çözünürlük: Özellikle kritik bölgelerde (köşeler, yük uygulama noktaları, destekler) yüksek çözünürlüklü eleman kullanılması, bu bölgelerdeki gerilme yoğunlaşmalarının doğru bir şekilde modellenmesini sağlar.

Ağ yapısından bağımsızlık çalışması, eleman boyutlarının, analiz sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek için yapılır. Bu çalışma, daha küçük eleman boyutlarının sonuçlara önemli bir katkı sağlamadığını gösterdiğinde, optimal ağ elemanı boyutu belirlenmiş olur. Bu çalışma aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilir:

Başlangıç Analizi: Orta büyüklükte bir eleman boyutuyla analiz yapılır ve sonuçları kaydedilir.

Eleman Yoğunluğunu Artırma: Eleman boyutu kademeli olarak küçültülür ve her adımda analiz yaparak sonuçları kaydedilir.

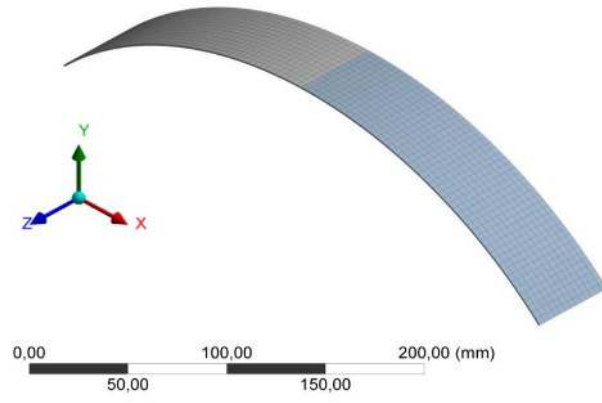
Sonuçları Karşılaştırma: Farklı eleman boyutlarıyla elde edilen sonuçları karşılaştırın. Eleman boyutu küçüldükçe sonuçların ne kadar değiştiği gözlemlenir.

Optimal Ağ Elemanı Boyutunu Belirleme: Eleman boyutunun daha da küçültülmesinin sonuçları önemli ölçüde değiştirmediği nokta belirlenir. Bu noktada, ağ yeterince hassas ve hesaplama süresi açısından optimize edilmiş olacaktır.

Eleman seçimi ve oluşturulması, kabuk yapıların burkulma analizi gibi hassas mühendislik problemlerinde kritik öneme sahiptir. Optimal eleman boyutunu belirlemek için temel mühendislik prensipleri kullanılır ve gerektiğinde ağ yapısından bağımsızlık çalışması yapılarak en uygun eleman boyutu belirlenir. Ağ yapısı oluşturma sürecinde dikkatli olmak, analiz sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini arttıracaktır. Merkez yay açısı 180° referans alınarak yapılmış olan bu çalışmada ideal eleman boyutunu tespit edebilmek için eleman boyutuna göre oluşacak toplam eleman sayısı, limit yük değerleri ve bu limit yükler arasındaki yüzdeler belirlenmiş ve bu değerlere göre Tablo 4.1'deki sonuçlar elde edilmiştir. Tablodaki değerlere göre 4 mm değerinden daha küçük boyutlarda Limit Yük ve Yüzdeler Fark değerleri değişmediği için ideal eleman boyutu 4 mm olarak alınmıştır. Ayrıca eleman tipi olarak dörtgen kabuk elemanlar kullanılmıştır. Kullanılan ağ yapısıyla ilgili örnek görselimiz Şekil 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.1. Eleman Boyutu / Limit Yük Tablosu

Eleman Boyutu (mm)	Eleman Sayısı	Limit Yük	Yüzdeler Fark (%)
20	138	152,36	-
15	216	151,66	0,45944
10	390	150,66	0,65937
7	896	150,06	0,39825
5	1560	149,92	0,09330
4	2548	149,78	0,09338



Şekil 4.4. *Ağ Yapısı*

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Eğrisel kabuk segmenti, standart olmayan (Non-standard) bir yapı örneği olduğundan (yükleme altında membran gerilmelere nazaran eğilme gerilmelerinin daha baskın olduğu) her konfigürasyon için kararlı bölgede lineer olmayan bir denge yolu elde edilmiştir. Geometri, yüklem ve sınır koşulları ile ilgili olarak standart olmayan yapıların doğası gereği yüklem başladığı ilk andan itibaren yapı üzerinde ekstra eğilme etkileri meydana gelir. Dolayısıyla, lineer olmayan denge yolları hem kararlı hem de kararlı olmayan bölgelerde ortaya çıkar (stabilite kaybı öncesi ve sonrası), çünkü bu tarz yapılarda yüklemenin başlangıcından itibaren meydana gelen bir eğilme etkisinin sonucu olarak yapının geometrik rijitliği düşmektedir. Bu nedenle, kararlı bölgedeki rijitlik standart olmayan yapıların burkulma tepkisinde baskın bir etkiye sahiptir. Bu durum söz konusu problemin analitik çözümünün yapılamamasına ve matematiksel modellenmesini karmaşık hale gelmesinin başlıca sebebidir. Bu durum standart olmayan yapılar için klasik bir flambaj davranışı olarak değerlendirilebilir. Bu burkulma davranışında, eğrisel kabuk kendi zıt konumuna doğru deforme olur ve limit yük noktasının ötesinde yüklem devam edilirse, x eksenine göre simetrik bir şekle sahip olacak şekilde stabilitesini kaybeder. Bu tür bir deformasyon, membran gerilimi tamamen baskın olmayan (non-standard structure) ince duvarlı yapılar için tipiktir ve yapının şeklinden dolayı bu burkulma davranışında eğilme gerilmesi baskındır [36]. Bu tür kabuk yapılarının eğilme gerilmeleri için analitik ifadeler referans numarası [37] de bulunmaktadır. Ayrıca genel olarak, radyal yüklem altında çalışan eğrisel kabukların burkulma davranışı, yine Flügge [38] tarafından tanımlanan eğilme stresi dağılımlarından kaynaklanan eğilme deformasyonlarına oldukça benzerdir. Elastik kenar sınırlamaları ise bu bahsedilen burkulma ve eğilme deformasyonlarını birbirinden ayırt etmede zorluğa neden olan ve ekstra eğilme stresini ortaya çıkaran ek bir faktördür. Bu eğilme tepkisi, [39] numaralı referansta serbest, sabitlenmiş ve ankastre durumlar için analitik ifadelerle gösterilmiştir.

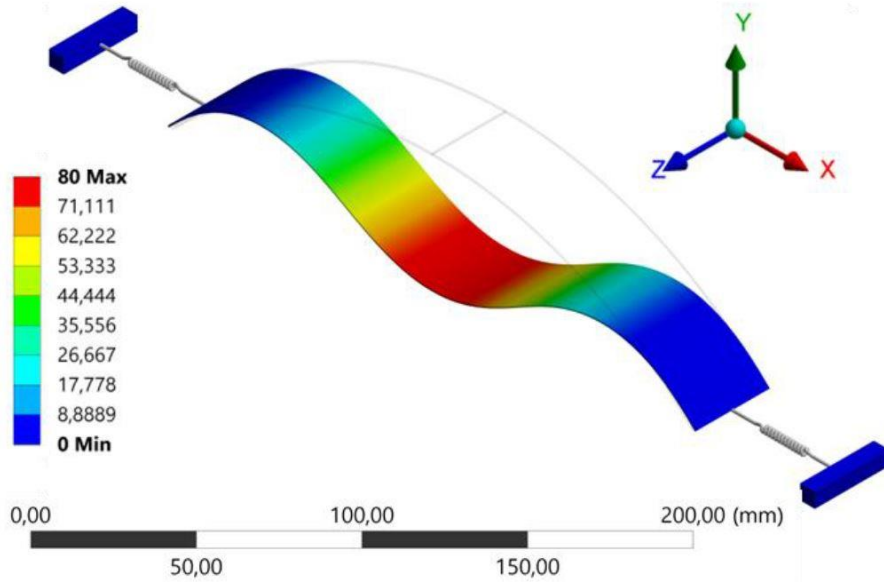
5.1. Elastik Sınır Şartlarının ve Narinlik Oranlarının Etkileri

Kabuk yapının kenarının sabit veya elastik kısıtlamalı olması kabuk yapının burkulma yük kapasitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Eğer kenar kısıtlaması elastik ise kabuk yapının burkulma yük kapasitesi üzerinde kenar kısıtlamasında kullanılan yayların sertlik değeri önem arz etmektedir. Yay sertliği arttıkça, yapının taşıdığı yük miktarı da artmaktadır. En düşük yay sertliği ($k=25$ N/mm) olan eğri, en düşük yük kapasitesine sahiptir. Bu durumda, yapı daha düşük yükte burkulma eğilimi

göstermektedir. Yay sertliği arttıkça ($k=50$, $k=100$ ve $k=200$ N/mm), eğriler yukarı doğru ötelenmekte ve daha yüksek yük kapasiteleri göstermektedir. Bu durum 180° merkez yay açısında daha net gözükmemektedir.

Radyal basıya maruz kalan eğrisel kabuk yapının kenarları dışa doğru ötelenme eğilimindedir ve bu ötelenme yapının geometrik rijitliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumun önüne geçilmesi durumunda yapının yük taşıma kabiliyeti maksimize edilir. Beklenildiği üzere en yüksek yük kapasitesi, sabit kenar kısıtlaması ile elde edilirken, en düşük yay sertliği ($k=25$ N/mm) yapının en düşük yük kapasitesine sahip olmasına neden olmaktadır.

Yapının deformasyonu incelendiğinde radyal bası altında kenarlarda oluşan teğetsel kuvvet neticesinde bir yandan elips şekline doğru giderken bir yandan da eğrisel kabuk birinci mod şeklini (görsel olarak m harfine benzer bir deformasyon) almaktadır. Limit noktasına ulaştığında yapı bu şekildedir. Yük uygulanmaya devam edilirse stabilitesini kaybedip (denge eğrisi eğimi negatif olur) başlangıç haline göre ters pozisyona doğru ötelenir. Bu noktada artık elastik sınır şartlarının etkisi ortadan kalkmış çünkü kenarlar nötral pozisyona doğru geri gelmektedir. Örnek olarak Şekil 5.1’de 90° ’de $R/t=250$ değerindeki eğrinin stabilitesini kaybettiği andaki bir örnek gösterilmiştir.

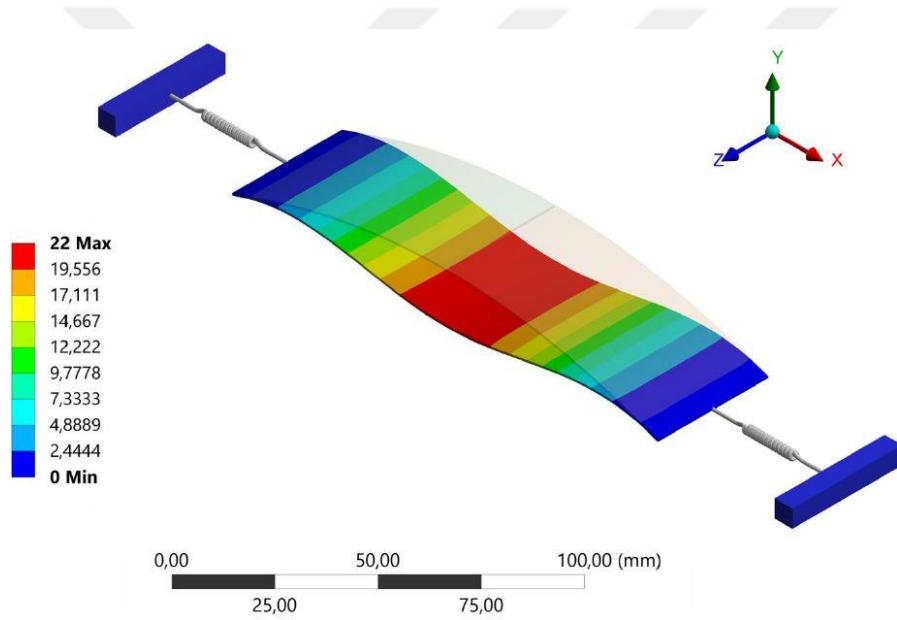


Şekil 5.1. Burkulma Anında Toplam Deformasyon

Elastik sınır koşullarının, yapının narinlik oranına kıyasla görece olarak yeterli sertliğe (rijitlik) sahip olmadığı durumlarda serbest sınır koşulu (free support) durumu

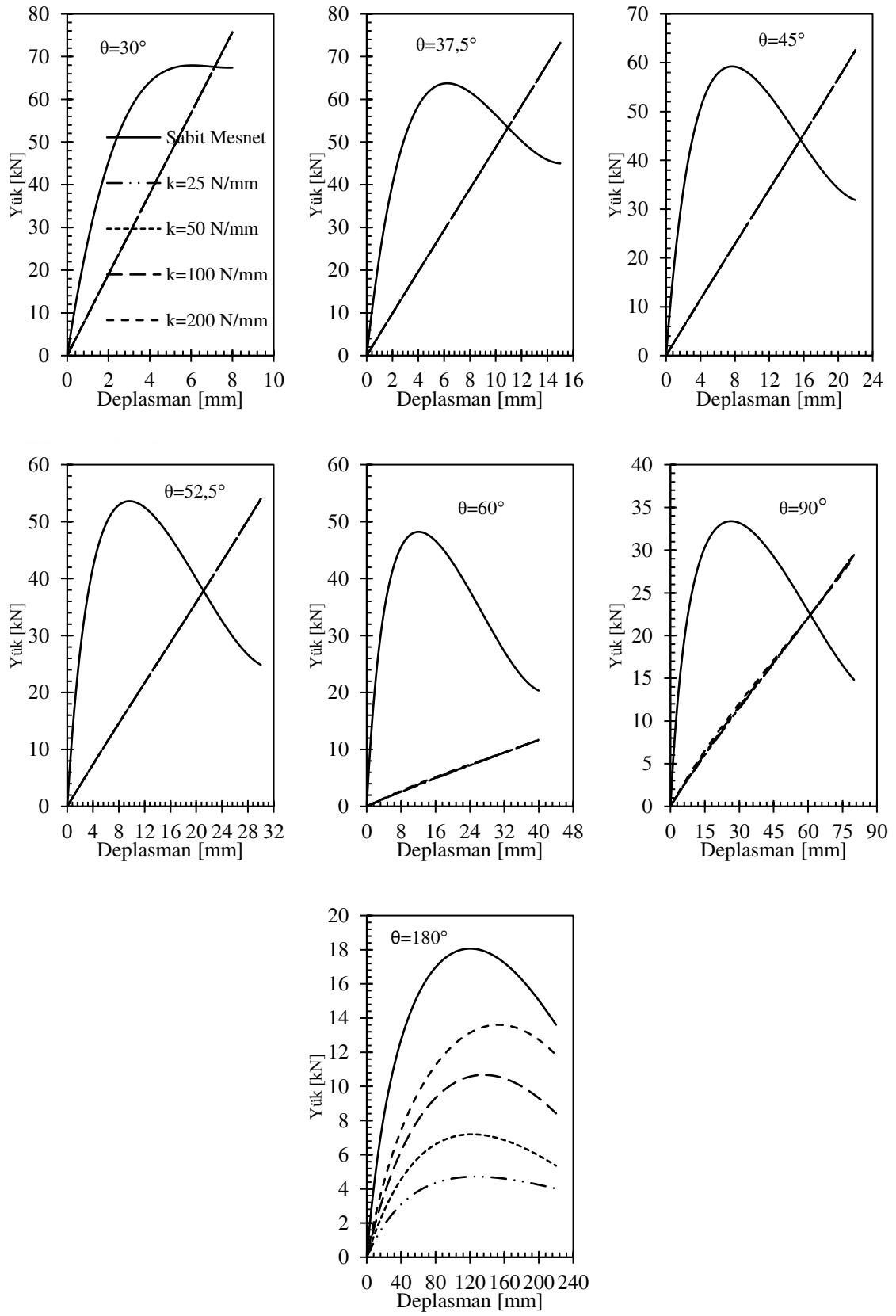
ortaya çıkmış ve burkulma davranışı gözlemlenmemiştir. Yapı doğrudan ters pozisyona doğru deforme olmuştur. Şekil 5.2’de bu duruma örnek bir görsel sunulmuştur.

Bu durum özellikle düşük R/t ve düşük k değerine sahip konfigürasyonlarda gözlemlenmiştir. Bunun sebebi R/t değerinin düşük olduğu yapıların yük taşıma kabiliyetlerinin yüksek olması dolayısıyla yükleme sırasında oluşan teğetsel kuvvetlerin yayların rijitliğine kıyasla oldukça yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yayların reaksiyon kuvvetleri eğrisel kabuk yapının kenarlarında oluşan teğetsel kuvvetlere kıyasla ihmal edilebilecek kadar azdır. Bu sebeple serbest sınır koşullarına benzer bir davranış gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle şekil 5.3’te merkez açısı olarak seçtiğimiz $\theta=30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 52.5^\circ$ ve 60° ’lik açılarda belirgin olarak ortaya gözükmektedir.



Şekil 5.2. *Burkulma Gözlemlenmeyen Bir Duruma Ait Toplam Deformasyon*

Yukarıda tarif edildiği üzere yükleme başlangıç anından itibaren eğilme gerilmeleri altında çalışan standart olmayan bu yapılarda beklenildiği üzere flambaj hareketi görülmüştür. Elastik sınır şartlarında kullanılan yayların sertlik değerinin etkili aralığı R/t ve θ 'ya bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Daha önce burkulma gözlemlenmeyen yapılarda ifade edildiği üzere yayların reaksiyon kuvvetlerinin ihmal edilebilir seviyede olması ya da teğetsel kuvvetlerin yayları sıkıştıramayacak seviyede kalması alt ve üst sınırı belirlemektedir. Düşük açılarda yapının geometrisinden kaynaklı teğetsel bileşenin büyümesi ve düşük R/t oranlarında yüksek limit yüklerin elde edilmesi bu limitlerde etkili bir rol oynamaktadır. Bu sebeple özellikle yüksek yay açılarında (örneğin 180° de) ve yüksek R/t değerlerinde seçilen yay katsayıları limit yükü çok fazla değiştirmemiştir. Bu konfigürasyonlarda oluşan teğetsel kuvvetler yayları sıkıştıramayacak kadar küçük kalmıştır. Dolayısıyla sabit sınır şartıyla hemen hemen aynı limit yük değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan parametrik çalışmada R/t oranı, merkez yay açısı ve yay sertlik katsayılarının limit yük üzerindeki etkileri incelenmiş ve yapılan tüm analizler için yük-deplasman denge eğrileri Şekil 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ve 5.7'de verilmiştir.

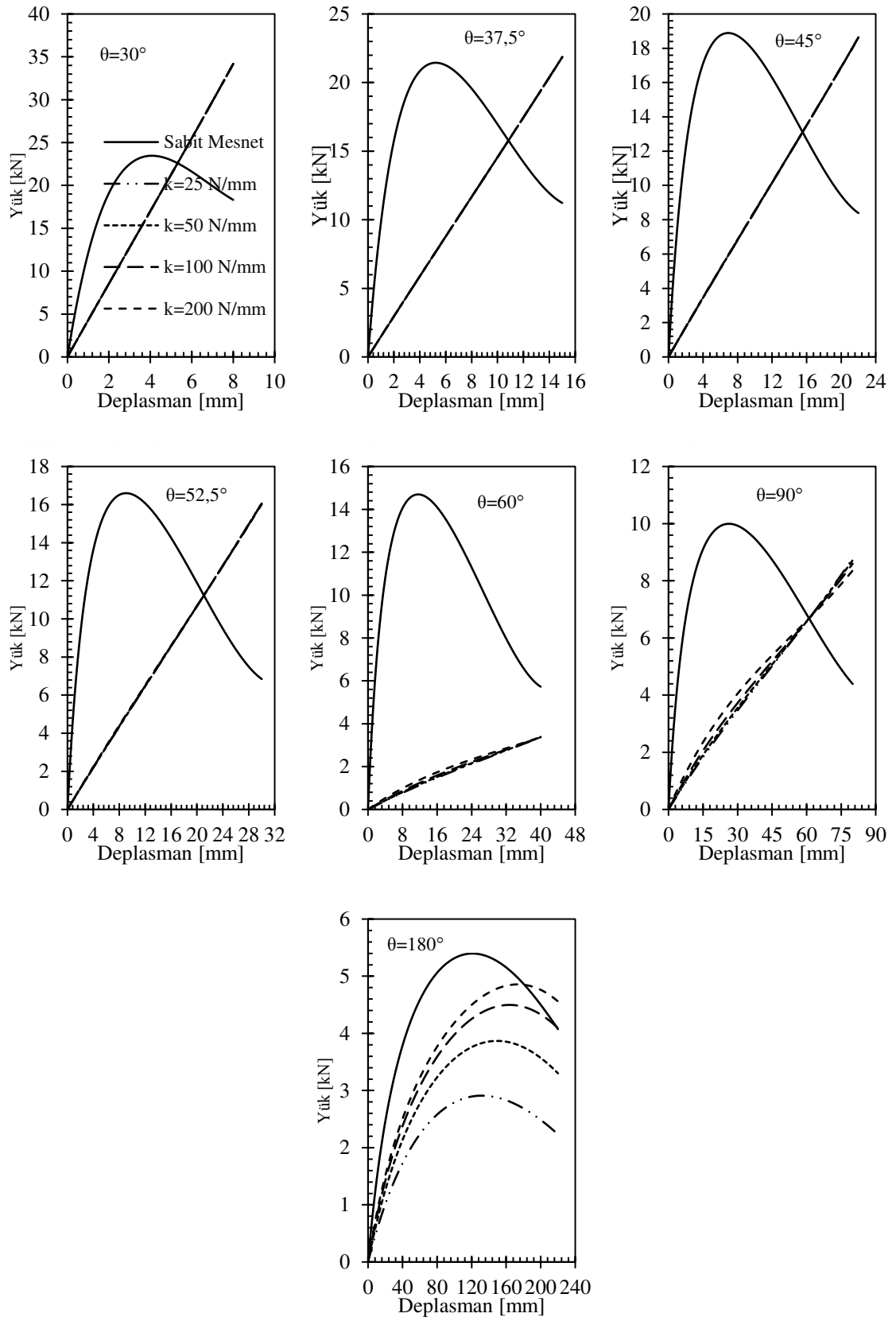


Şekil 5.3. $R/t = 50$ Denge Eğrileri

Grafikler incelendiğinde görüleceği üzere 30° , 37.5° , 45° , 52.5° , 60° ve 90° açılarında yay kuvvetleri, oluşan teğetsel kuvvete oranla çok düşük kaldığından dolayı burada seçilen yay katsayıları yetersiz kalmış ve geometrinin uçlarında sabit mesnete oranla elastik bir hareket oluşmuştur. Bunun sebebi bu geometrilerde burkulma davranışının gözlemlenmemesi ve yay sertliğinin efektif alt limitin altında kalmış olmasıdır. Şekil 5.3'te görüleceği üzere küçük açılarda yay katsayıları için çıkarılan eğriler grafiklerde çok yakın çıkmıştır. Ayrıca bu grafiklerde sabit mesnet eğrisinde burkulma gözlemlenirken elastik kenar eğrilerinde burkulma olmadığından dolayı eğrilerin eğiminde değişiklik görülmemiştir. Ancak 180° açıda açı büyüdüğü için teğetsel kuvvet küçülmüş ve bunun sonucunda her bir yay katsayısının etkisi grafikte görünür hâle gelmiştir.

Bu grafiklerde her R/t oranı için $\theta=30$ derecede farklı k katsayılarının çizgisel olarak karşılıkları verilmiş olup diğer açı değerlerindeki grafiklerde de aynı çizgi tipleri kullanılmıştır.

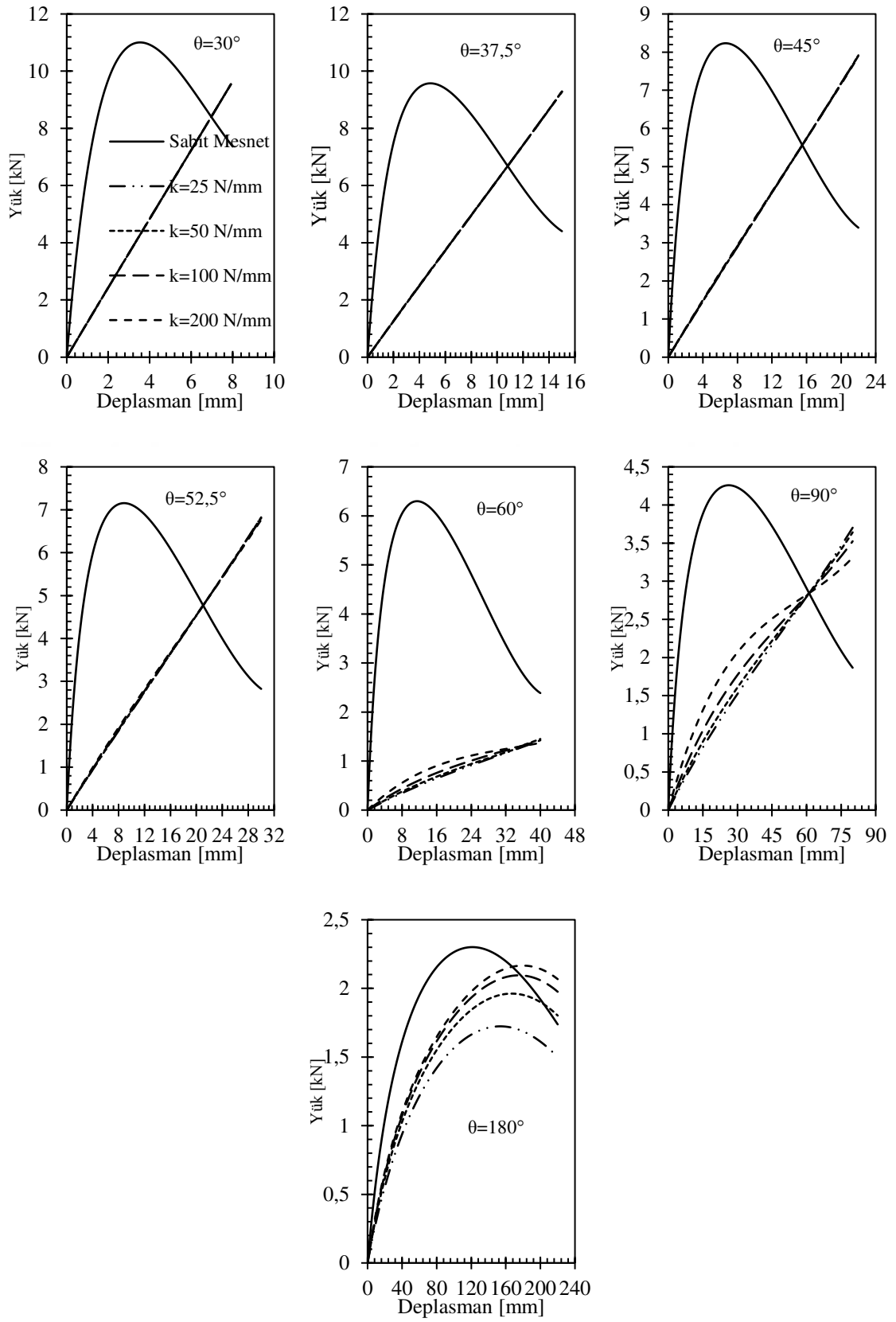
Burada küçük açılarda daha yüksek yay sertlik katsayıları seçilerek çalışma genişletilebilir.



Şekil 5.4. $R/t = 75$ Denge Eğrileri

Şekil 5.4'teki grafikler incelendiğinde narinlik oranı (R/t) 50'den 75'e çıktığından dolayı geometrinin taşıyabileceği limit yükün düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi et kalınlığının düşmüş olmasıdır. Ayrıca 90° açıdan itibaren farklı yay sertliklerinin etkisi grafikte görülmeye başlanmıştır. Yay sertlik katsayısı küçüldükçe geometrinin taşıyabileceği limit yük değerinde de azalma olmuştur.

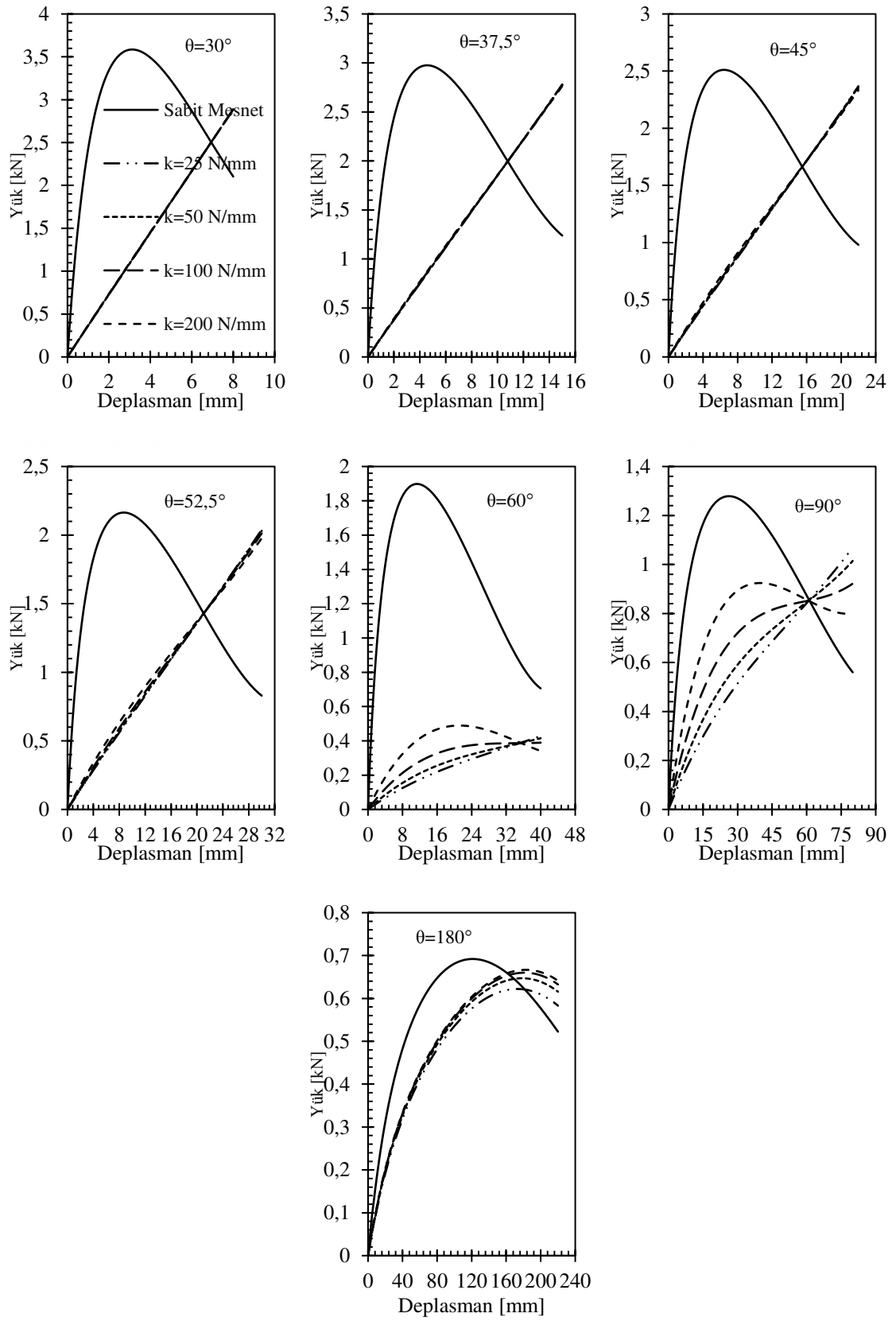




Şekil 5.5. $R/t = 100$ Denge Eğrileri

Şekil 5.5’te narinlik oranı $R/t=100$ için değerler alınmıştır. Burada geometrinin taşıyabileceği limit yüklerin her bir açı değeri için Şekil 5.3 ve 5.4’teki değerlere oranla düşmeye devam ettiği gözlemlenmiş ve buradan narinlik oranı arttıkça sistemin taşıyabileceği yükün düşeceği kanaatine varılmıştır. Ayrıca şekilde $R/t=100$ oranı için 60° açıdan itibaren farklı yay sertliklerinin etkisinin olduğu görülmektedir.

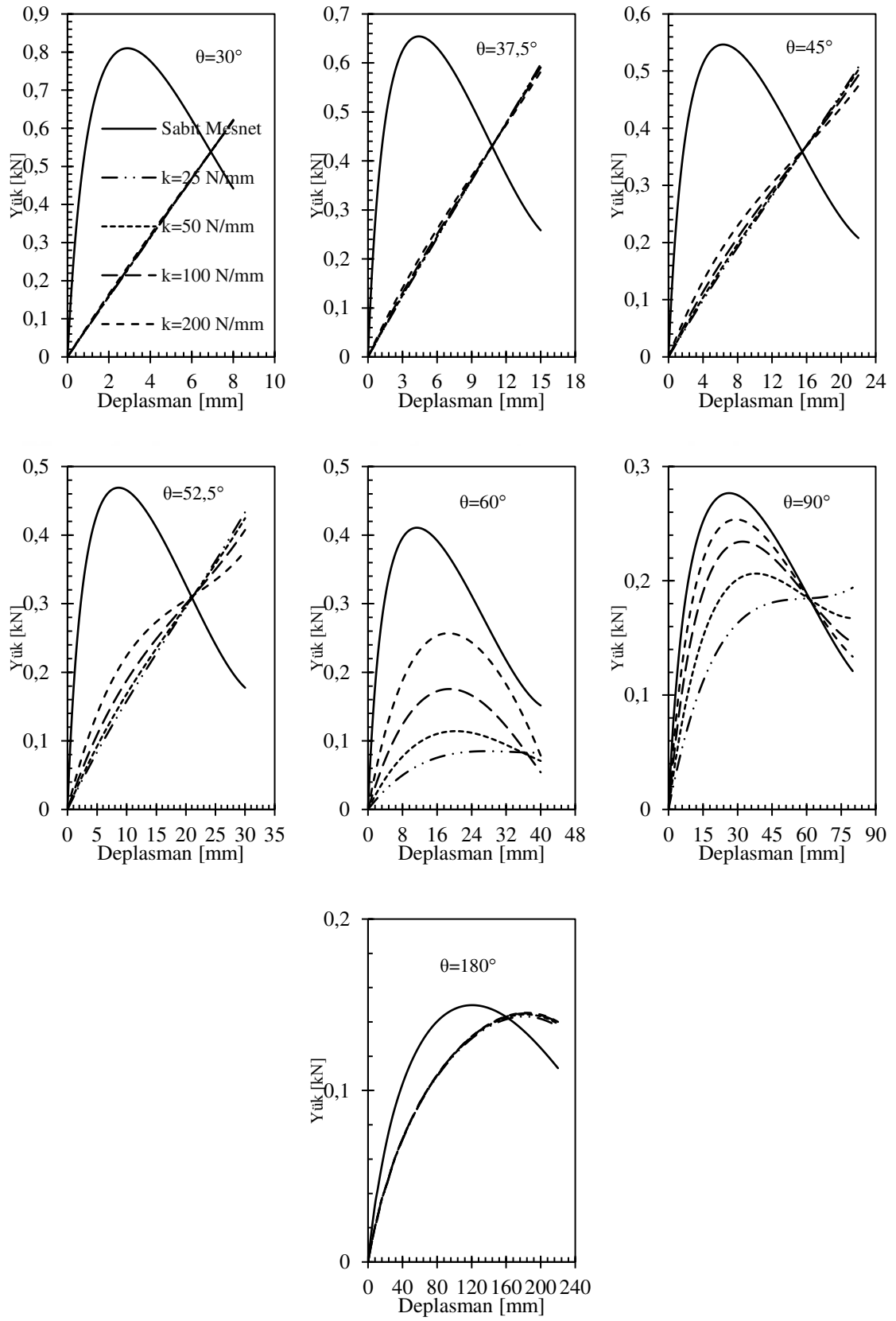




Şekil 5.6. $R/t = 150$ Denge Eğrileri

Şekil 5.6’da narinlik oranı $R/t=150$ için değerler alınmıştır. Buradaki grafiklerde de narinlik oranı arttıkça geometrinin taşıyabileceği limit yükün düştüğü gözlemlenmektedir. Ayrıca $R/t=150$ oranı için $52,5^\circ$ açıdan itibaren farklı yay sertliklerinin etkisinin olduğu görülmektedir. Buradan da narinlik oranı arttıkça daha küçük açılardan itibaren burkulma etkisinin görülmeye başladığı sonucuna ulaşılmaktadır.



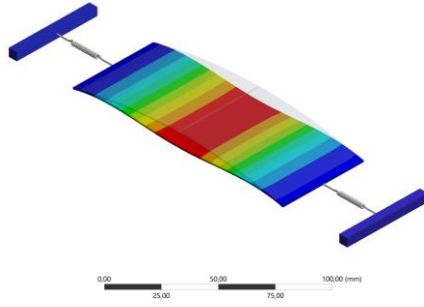


Şekil 5.7. $R/t = 250$ Denge Eğrileri

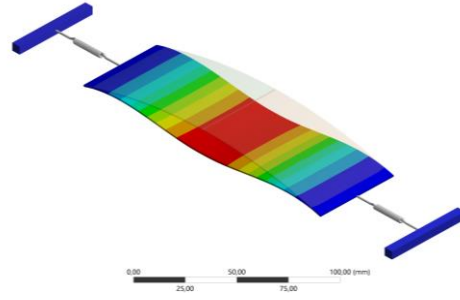
Şekil 5.7’de ise narinlik oranı $R/t=250$ için değerler alınmıştır. Bu şekilde 45° açıdan itibaren farklı yay sertliklerinin etkisinin olduğu görülmektedir. Buradan narinlik oranı arttıkça geometrinin taşıyabileceği limit yükün düştüğü ve daha küçük açılarda burkulmanın başladığı sonuçlarına ulaşılabilmektedir.

Farklı Yay Açılarına Göre Burkulma Mod Şekillerinin Gösterimi

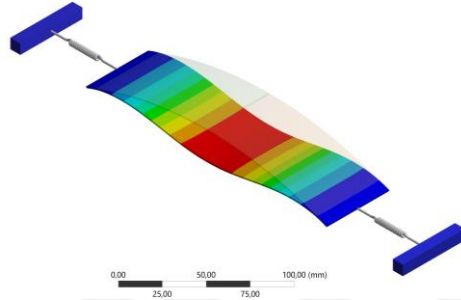
Burkulma mod şekilleri ve davranışları tüm konfigürasyonlarda benzer karakter göstermektedir. Elastik sınır şartlarının sabit sınır koşulundan farkı sadece kenarların biraz daha fazla açılarak yapının ters pozisyona doğru ötelenmesidir. Farklı yay açlarına sahip numunelerin stabilitelerini kaybettikleri andaki toplam deformasyonları Şekil 5.8’de görülmektedir. Radyal bası altında bu şekiller stabilitesini kaybetmiş ve maksimum deplasman orta noktada gözlemlenmiştir. Burada $R/t=150$, $L=50$ mm ve $k=100$ N/mm olarak alınmış ve bu değerler sabit tutulmuştur.



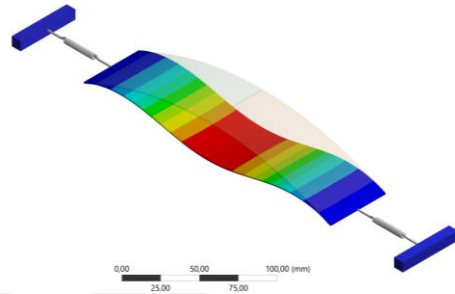
$\theta=30^\circ$



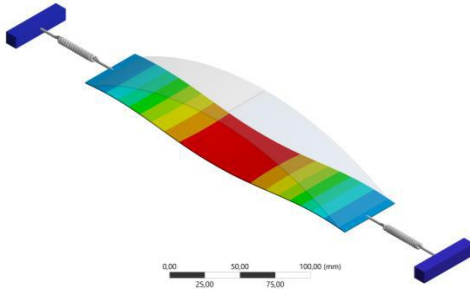
$\theta=37,5^\circ$



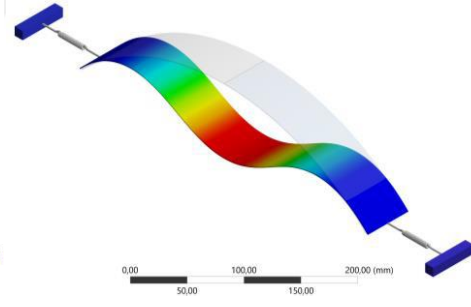
$\theta=45^\circ$



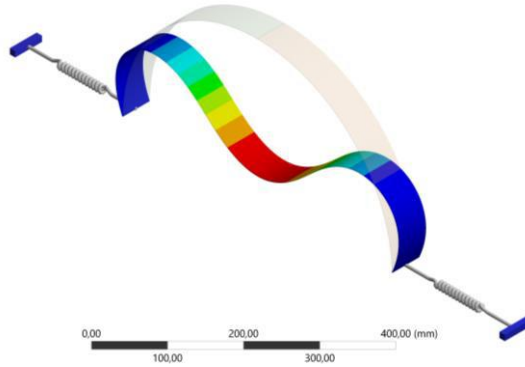
$\theta=52,5$



$\theta=60^\circ$



$\theta=90^\circ$



$\theta=180^\circ$

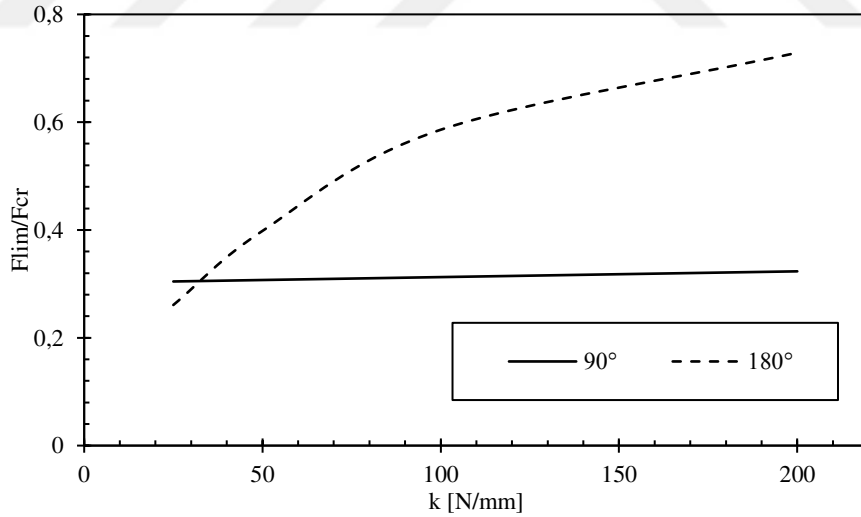
Şekil 5.8. Farklı Yay Açıları İçin Burkulma Anındaki Deformasyon Görselleri

5.2. Narinlik Oranı (R/t) ve Yay Açısının (Θ) Limit Yüke Etkisi

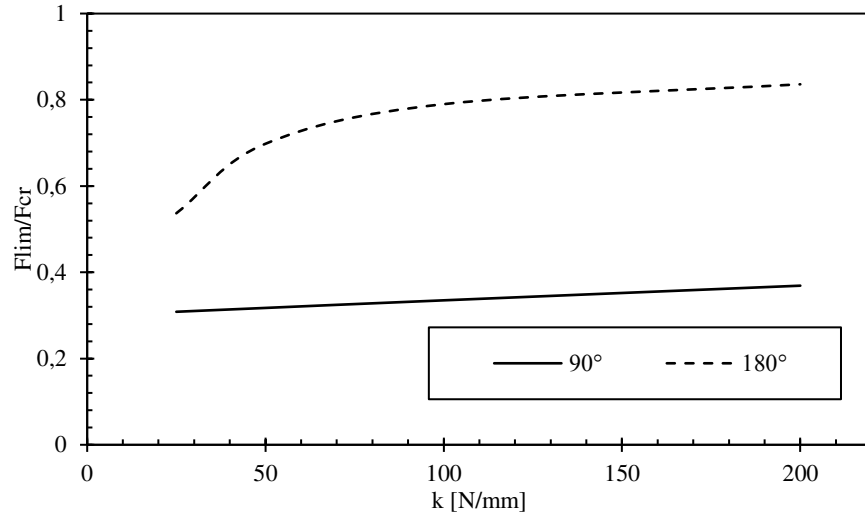
Narinlik oranı ile yük taşıma kabiliyetinin birbiri ile ters orantılı olduğu ve bu orantının yaklaşık olarak et kalınlığının karesi ile değiştiği görülmüştür. Bunun yanı sıra yay açısı ile yük taşıma kabiliyeti yine ters orantılı olarak azalmaktadır. Bu durum plastisitenin dikkate alınmadığı analizlerimizde sadece geometrik rijitliğin bir sonucu olarak açıklanabilir. Diğer bir deyişle yay açısı ve narinlik oranı geometrik rijitlik ile ters orantılı olarak çalışmaktadır. Bunların artması rijitliği düşürmektedir.

5.3. Kritik yükün limit yüke oranının yay sertliğine göre değişimi

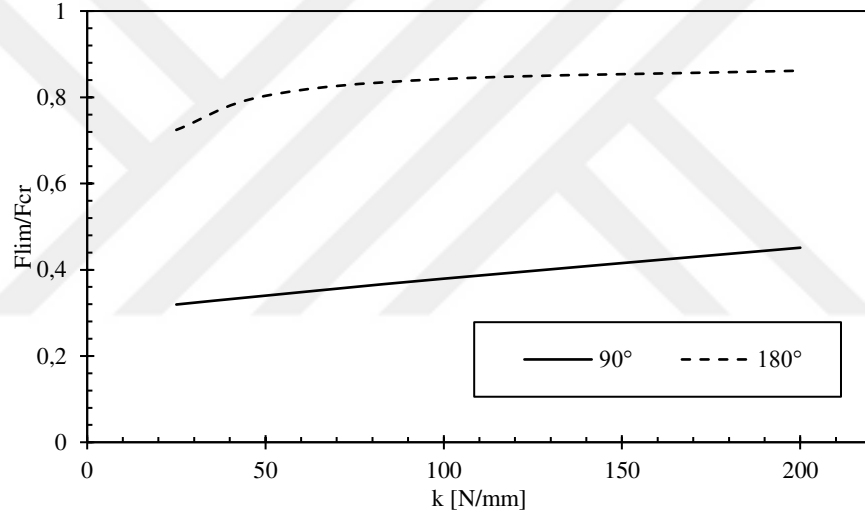
Elastik sınırların rijitliğinin yapının yük taşıma kabiliyetine olan etkisini daha net gözlemleyebilmek için sabit sınır koşulları altında elde edilen limit yük bir referans olarak kullanılmış ve kritik yük olarak tanımlanmıştır. Bu çerçevede elastik sınır şartına sahip bir yapının limit yükünün kritik yüke oranı 1 değerine ulaştığı anda artık yay efektif aralığı üst limitine ulaşıldığı ve teğetsel kuvvetlerin yayı sıkıştıramadığı anlaşılabacaktır. Bunun yanı sıra seçtiğimiz en düşük yay sertlik katsayısının alt sınıra ne kadar yakın olduğu da gözlemlenebilecektir. Farklı R/t ve θ değerleri için bu değerler Şekil 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13'te verilmiştir.



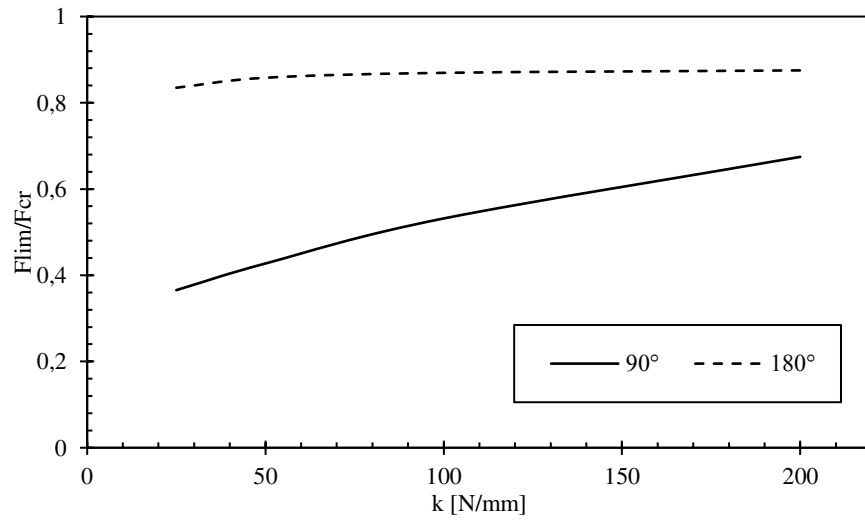
Şekil 5.9. R/t=50 oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği



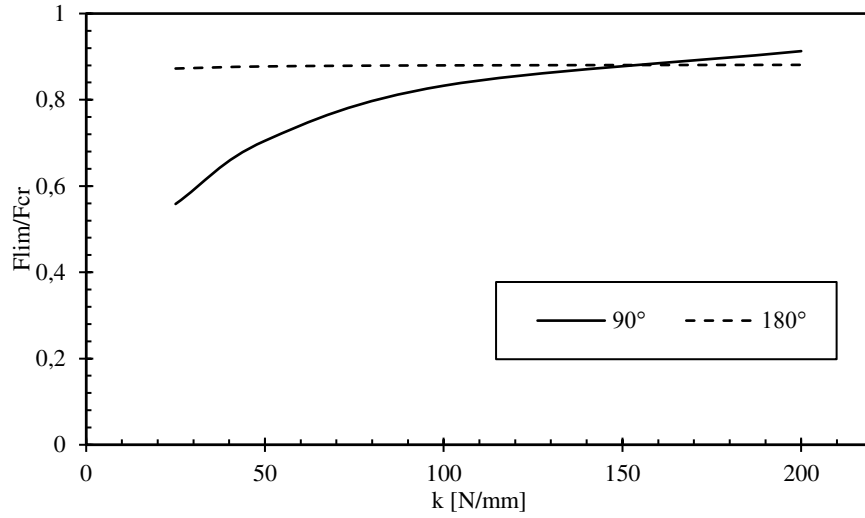
Şekil 5.10. $R/t=75$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği



Şekil 5.11. $R/t=100$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği



Şekil 5.12. $R/t=150$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği



Şekil 5.13. $R/t=250$ oranı için Limit Yük / Kritik Yük Grafiği

Bu çalışmada narinlik oranlarına göre geometrinin elastik sınır şartında taşıyabileceği limit yükün, sabit mesnetteki taşıyabildiği kritik yüke oranları alınmıştır. 30° , 37.5° , 45° , 52.5° ve 60° açılarında burkulmanın olmaması sebebiyle bu açılar için çalışma yapılmamıştır.

Yüksek açı değerlerinde ise teğetsel kuvvetler daha düşük olduğu için 90° ve 180° açılarında alınan sonuçlar çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Burada teğetsel kuvvetler, yay kuvvetlerine oranla daha düşük olduğu için yay sertlik katsayılarının etkisi daha belirgin olarak görülmektedir. 180° açıda geometri daha stabil olduğu için eğrileri üst limite daha yakın çıkmıştır. Bu narinlik oranlarında daha detaylı inceleme için düşük yay sertlik katsayıları ile çalışma genişletilebilir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, merkezi bir radyal yük ve elastik sınır koşulları altında eğrisel kabuk yapıların burkulma davranışına farklı yay açılarının etkisi incelenmiştir. Yarıçap kalınlık oranı (R/t), elastik sınır koşulu (k) ve yay açısının (θ) eğrisel kabuk yapıların yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri ve burkulma davranışları çalışılmıştır. Sonuç olarak, mevcut çalışmadan çıkarılabilecek sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Eğrisel kabuk yapıların radyal yükleme altında yük taşıma kabiliyetlerinin sınır koşullarına oldukça duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kenarların yatay ekseninde öteleme hareketinin artması ile limit yük değerinin düştüğü, ancak yayların rijitliği arttıkça limit yük değerinin de arttığı tespit edilmiştir.
- Eğrisel kabuk yapıların limit yük değerleri narinlik oranının karesi ile ters orantılı olarak azalırken yay açısı ile de ters orantılı olarak azalmaktadır. Buna karşın yay açısı ile limit yük değerleri arasında tanımlanabilir bir fonksiyon elde edilememiştir.
- Elastik sınır şartlarını simüle etmekte kullanılan yayların yay katsayısının etkili aralığı geometrik parametreler ile bağlantılıdır. Silindirik kabuk yapılarda narinlik oranı olarak R/t oranı kullanılmakta ve yay şeklindeki yapılarda relatif olarak bu aralık R/t ve θ ile ters orantılı olarak genişlemektedir.
- Limit yükün kritik yüke oranı ile yay katsayısı grafikleri vasıtasıyla elde edilen eğriler rasyonel bir fonksiyonla tanımlanabilir olup 1 asimptot değerine ulaşması durumunda elastik sınır şartına sahip yapının artık yay efektif aralığı üst limitine ulaştığı ve teğetsel kuvvetlerin yayı sıkıştıramadığı anlaşılmaktadır.
- Yay sertliklerinin efektif aralığı alt limitinin altında kalan durumlarda yük/deplasman eğrileri lineer davranış göstermiş olduğundan bu denge eğrilerinde burkulma gözlemlenmemiştir. Ancak sabit mesnet ve etkili rijitliğe sahip elastik sınır şartlarında yapı ayakları kenarlara serbestçe açılmadığında burkulmanın başladığı gözlemlenmektedir. Dolayısıyla bu geometriler serbest mesnet ve düşük rijitlikteki elastik sınır şartlarına kıyasla aynı dikey deplasmanda (bkz. yük-deplasman eğrileri) daha fazla yük taşıma kabiliyetine sahipken, limit noktası sonrasında kararsız duruma geçmektedir.
- Yüksek narinlik oranına sahip konfigürasyonların daha detaylı değerlendirilebilmesi için parametrik çalışmalar genişletilebilir.

- Yapılan çalışma, eksenel yükleme altında çalışan kabuk yapıların kullanıldığı inşaat, havacılık ve demiryolu taşımacılığı gibi alanlarda, mesnet noktalarının olası hareketinin yapının yük taşıma kabiliyetine olan etkisini araştırmaktadır. İlerleyen aşamada, araştırmanın, doğrusal olmayan malzeme modeli ve ilave yay katsayıları ile genişletilmesi planlanmaktadır.



KAYNAKÇA

- [1] K. Prajapat, S. Ray-Chaudhuri, and A. Kumar, "Effect of in-plane boundary conditions on elastic buckling behavior of solid and perforated plates," *Thin-Walled Struct.*, vol. 90, pp. 171–181, 2015.
- [2] M. Beerhorst and S. Thirusala Suresh Babu, "Closed-form approximate solution for linear buckling of Mindlin plates with SRSR-boundary conditions," *Compos. Struct.*, vol. 240, p. 112037, 2020.
- [3] A. Evkin, V. Krasovsky, O. Lykhachova, and V. Marchenko, "Local buckling of axially compressed cylindrical shells with different boundary conditions," *Thin-Walled Struct.*, vol. 141, pp. 374–388, 2019.
- [4] B. Wang et al., "Post-buckling behavior of stiffened cylindrical shell and experimental validation under non-uniform external pressure and axial compression," *Thin-Walled Struct.*, vol. 161, p. 107481, 2021.
- [5] S. Huang and P. Qiao, "Nonlinear stability analysis of thin-walled I-section laminated composite curved beams with elastic end restraints," *Eng. Struct.*, vol. 226, p. 111336, 2021.
- [6] M. T. Atay and S. B. Coşkun, "Elastic stability of Euler columns with a continuous elastic restraint using variational iteration method," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 58, pp. 2528–2534, 2009.
- [7] F. Pang, H. Li, H. Chen, and Y. Shan, "Free vibration analysis of combined composite laminated cylindrical and spherical shells with arbitrary boundary conditions," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, pp. 1–18, 2019.
- [8] N. Dinh Duc and P. T. Thang, "Nonlinear response of imperfect eccentrically stiffened ceramic-metal-ceramic sigmoid functionally graded material (S-FGM) thin circular cylindrical shells surrounded on elastic foundations under uniform radial load," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 22, no. 12, pp. 1031–1039, 2015.
- [9] Z. Yang et al., "Geometrically nonlinear buckling of graphene platelets reinforced dielectric composite (GPLRDC) arches with rotational end restraints," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 107, p. 106326, 2020. 16
- [10] B. Yang, Y. Li, and K. Fu, "In-plane impact-induced elastic buckling behaviour of rectangular transversally isotropic stiffened plates with all edges elastically restrained against rotation," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 174, p. 105478, 2020.
- [11] D. Li, S. Smith, and X. Ma, "End condition effect on initial buckling performance of thin plates resting on tensionless elastic or rigid foundations," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 105, pp. 83–89, 2016.
- [12] D. X. Hung, T. M. Tu, N. Van Long, and P. H. Anh, "Nonlinear buckling and postbuckling of FG porous variable thickness toroidal shell segments surrounded

- by elastic foundation subjected to compressive loads,” *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 107, p. 106253, 2020.
- [13] M. Rezaiee-Pajand, M. Mokhtari, and S. M. Hozhabrossadati, “Application of Hencky bar-chain model to buckling analysis of elastically restrained Timoshenko axially functionally graded carbon nanotube reinforced composite beams,” *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 47, no. 5, pp. 599–620, 2019.
 - [14] E. Bagherizadeh, Y. Kiani, and M. R. Eslami, “Mechanical buckling of functionally graded material cylindrical shells surrounded by Pasternak elastic foundation,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 11, pp. 3063–3071, 2011.
 - [15] H. Shafiee, M. H. Naei, and M. R. Eslami, “In-plane and out-of-plane buckling of arches made of FGM,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 48, no. 8, pp. 907–915, 2006.
 - [16] Y. L. Pi, M. A. Bradford, and F. Tin-Loi, “Flexural-torsional buckling of shallow arches with open thin-walled section under uniform radial loads,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 45, no. 3, pp. 352–362, 2007.
 - [17] A. Zingoni, K. Mudenda, V. French, and B. Mokhothu, “Buckling strength of thin-shell concrete arch dams,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 64, pp. 94–102, 2013.
 - [18] A. Zingoni and N. Enoma, “On the strength and stability of elliptic toroidal domes,” *Eng. Struct.*, vol. 207, p. 110241, 2020.
 - [19] J. Zhang, X. Wang, W. Tang, F. Wang, and B. Yin, “Experimental and numerical buckling analysis of toroidal shell segments under uniform external pressure,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 150, p. 106689, 2020.
 - [20] O. Lykhachova and A. Evkin, “Effect of plasticity in the concept of local buckling of axially compressed cylindrical shells,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 155, p. 106965, 2020.
 - [21] Y. L. Pi and M. A. Bradford, “Elasto-plastic buckling and postbuckling of arches subjected to a central load,” *Comput. Struct.*, vol. 81, pp. 1811–1825, 2003.
 - [22] Z. Tang, W. Zhang, J. Yu, and S. Pospíšil, “Prediction of the elastoplastic in-plane buckling of parabolic steel arch bridges,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 168, 2020.
 - [23] Z. Zhang, A. Liu, J. Yang, Y. lin Pi, Y. Huang, and J. Fu, “A theoretical and experimental study on in-plane buckling of orthotropic composite arches under an arbitrary radial point load,” *Compos. Struct.*, vol. 237, p. 111933, 2020.
 - [24] C. Chengyi, T. Genshu, and Z. Lei, “In-plane nonlinear buckling analysis of circular arches considering shear deformation,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 164, p. 105762, 2020.
 - [25] A. H. Sofiyev, “Influences of elastic foundations and boundary conditions on the buckling of laminated shell structures subjected to combined loads,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 8, pp. 2126–2134, 2011.

- [26] Z. Zhang, A. Liu, J. Yang, and Y. Huang, "Nonlinear in-plane elastic buckling of a laminated circular shallow arch subjected to a central concentrated load," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 161–162, 2019. 17
- [27] A. H. A. Hassan and N. Kurgan, "Buckling of thin skew isotropic plate resting on Pasternak elastic foundation using extended Kantorovich method," *Heliyon*, vol. 6, no. 6, p. e04236, 2020.
- [28] H. Lu, A. Liu, M. A. Bradford, and Y. L. Pi, "Experimental investigation of out-of-plane buckling of circular arches under a central radial point load," *Thin-Walled Struct.*, vol. 148, p. 106198, 2020.
- [29] W. Hu, Y. Mengzhu, and W. Yufan, "Closed-loop optimization and investigation of bistable interlocked structure," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 144, pp. 10–23, 2018.
- [30] Z. Hu, X. Zheng, D. An, C. Zhou, Y. Yang, and R. Li, "New analytic buckling solutions of side-cracked rectangular thin plates by the symplectic superposition method," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 191, p. 106051, 2021.
- [31] B. Wang, P. Li, and R. Li, "Symplectic superposition method for new analytic buckling solutions of rectangular thin plates," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 119, pp. 432–441, 2016.
- [32] C. Zhou, D. An, J. Zhou, Z. Wang, and R. Li, "On new buckling solutions of moderately thick rectangular plates by the symplectic superposition method within the Hamiltonian-system framework," *Appl. Math. Model.*, vol. 94, pp. 226–241, 2021.
- [33] S. Dastjerdi, B. Akgöz, and Ö. Civalek, "On the effect of viscoelasticity on behavior of gyroscopes," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 149, 2020.
- [34] EN ISO 6892-1 Metallic materials-tensile testing-part 1: Method of test at room temperature, Standard, International Organization for Standardization (2009).
- [35] D. Roylance, *Stress-Strain Curves*, Massachusetts Institute of Technology Study, Cambridge, 2015.
- [36] H. Yilmaz, *Loss of Stability of Thin-Walled Conical Shells with Circumferential Ring Loaded by Axial Force*, PhD. Thesis, University of Pardubice, 2019.
- [37] C. R. Calladine, "Theory of Shell Structures," Cambridge University Press, 1983.
- [38] W. FLUGGE, "Stresses in Shells," 1st edition, Springer-Verlag OHG, 1960.
- [39] A. Zingoni, "Shell Structures in Civil and Mechanical Engineering," 2nd edition, ICE Publishing, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO : 0009-0006-3292-3346

Ad Soyad : Fatih Hüseyin ALKAN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2009-2015, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- 2019, Makine Mühendisliği, TÜRASAŞ, Lokomotif Fabrikası
- 2017-2018, Makine Mühendisliği, Alindair Soğutma Sistemleri