



**T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**FARKLI PROFİLDE, KALINLIKTAKİ VE BOYDAKİ EKSENEL BASMA  
YÜKÜ TAŞIYAN BAĞLANTI ELEMANLARININ BURKULMA  
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BEKİR KESKİN**

**DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM**

**YALOVA  
EYLÜL 2022**





T.C.  
YALOVA ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

FARKLI PROFİLDE, KALINLIKTAKİ VE BOYDAKİ EKSENEL BASMA YÜKÜ  
TAŞIYAN BAĞLANTI ELEMANLARININ BURKULMA DAYANIMININ  
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BEKİR KESKİN  
205121018

DANIŞMAN: PROF. DR. İBRAHİM SEVİM

YALOVA  
EYLÜL 2022



## ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

İmza

Bekir KESKİN





## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Prof. Dr. İbrahim Sevim'e teşekkür ederim. Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için aileme teşekkür ederim.

Eylül 2022

Bekir KESKİN





## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                                   |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ .....                                                                                                       | iii  |
| SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                                             | ix   |
| SİMGELER .....                                                                                                    | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                                                                 | ix   |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                                                            | xi   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                                            | xiii |
| ÖZET.....                                                                                                         | xvii |
| ABSTRACT.....                                                                                                     | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                                    | 1    |
| 1.1. Tezin Amacı .....                                                                                            | 2    |
| 1.2. Dünyada ve Türkiye’de Profillerin Kullanım Alanları .....                                                    | 2    |
| 1.3. Burkulma Sorununa Çözüm Önerileri.....                                                                       | 3    |
| 1.4. Tez Konusunun Farklılığı.....                                                                                | 3    |
| 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                                                                                     | 5    |
| 2.1. Burkulma (Flambaj) Dayanımı .....                                                                            | 5    |
| 3. TEORİ.....                                                                                                     | 13   |
| 3.1. Euler Burkulma Formülleri .....                                                                              | 16   |
| 3.2. Yapı Çelikleri .....                                                                                         | 21   |
| 3.3. Dolu Silindirik Kesitli Profiller .....                                                                      | 23   |
| 3.4. Kare Profiller .....                                                                                         | 23   |
| 3.5. I Profiller .....                                                                                            | 23   |
| 4. TEZ ÇALIŞMASININ PLANLANMASI.....                                                                              | 25   |
| 4.1. Analitik Hesaplamalar .....                                                                                  | 25   |
| 4.2. Tarafımızdan Seçilen Değişik Kesitlerdeki ve Boyutlardaki Makine Bağlantı Elemanlarının Yapısal Analizi..... | 26   |
| 4.3. Analizlerde Tasarlanan Profillerin Mesh Kriteri Değerleri.....                                               | 29   |
| 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR.....                                                                           | 31   |
| 5.1. Dolu Silindirik Kesitli Profil- St 37 .....                                                                  | 31   |
| 5.2. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Yapı Çeliği .....                                                            | 34   |
| 5.3. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Alüminyum Alaşım .....                                                       | 36   |
| 5.4. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Karbon Fiber .....                                                           | 37   |
| 5.5. 40x40 Kare Profil- St 37 .....                                                                               | 39   |



|       |                                                |    |
|-------|------------------------------------------------|----|
| 5.6.  | 40x40 Kare Profil- Yapı Çeliği .....           | 42 |
| 5.7.  | 40x40 Kare Profil- Alüminyum Alaşım .....      | 43 |
| 5.8.  | 40x40 Kare Profil- Karbon Fiber .....          | 45 |
| 5.9.  | 25x25 Kare Profil- St 37 .....                 | 46 |
| 5.10. | 25x25 Kare Profil- Yapı Çeliği.....            | 49 |
| 5.11. | 25x25 Kare Profil- Alüminyum Alaşım .....      | 50 |
| 5.12. | 25x25 Kare Profil- Karbon Fiber .....          | 51 |
| 5.13. | 20x40 Dikdörtgen Profil- St 37 .....           | 53 |
| 5.14. | 20x40 Dikdörtgen Profil- Yapısal Çelik.....    | 56 |
| 5.15. | 20x40 Dikdörtgen Profil- Alüminyum Alaşım..... | 57 |
| 5.16. | 20x40 Dikdörtgen Profil- Karbon Fiber .....    | 58 |
| 6.    | SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....                      | 61 |
|       | KAYNAKLAR .....                                | 63 |
|       | ÖZGEÇMİŞ .....                                 | 67 |



## **SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ**

### **SİMGELER**

|          |                     |
|----------|---------------------|
| E        | : Elastisite Modülü |
| I        | : Atalet Momenti    |
| L        | : Profil Uzunluğu   |
| m        | : Metre             |
| mm       | : Milimetre         |
| MPa      | : Mega Paskal       |
| $P_{kr}$ | : Kritik Yük        |

### **KISALTMALAR**

|        |                                                      |
|--------|------------------------------------------------------|
| AISC   | : Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü                      |
| BÖÇ    | : Burkulması Önlenmiş Çaprazlar                      |
| CFRP   | : Karbon Elyaf Takviyeli Polimer                     |
| HSS    | : Yüksek Hız Çeliği                                  |
| LRFD   | : Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı                     |
| SEA    | : Sonlu Elemanlar Analizi                            |
| TS 648 | : Çelik Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları Standardı |



## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 4.1. Mesh kriteri değerleri.....                                                              | 29 |
| Tablo 5.1. St 37 malzemedan üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri..... | 32 |
| Tablo 5.2. Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri.....  | 34 |
| Tablo 5.3. Alüminyum alaşımdan üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri..... | 36 |
| Tablo 5.4. Karbon fiberden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri.....     | 37 |
| Tablo 5.5. St 37 40x40 kare profil kritik yük değerleri .....                                       | 40 |
| Tablo 5.6. Yapı çeliği 40x40 kare profil kritik yük değerleri .....                                 | 42 |
| Tablo 5.7. Alüminyum alaşım 40x40 kare profil kritik yük değerleri .....                            | 44 |
| Tablo 5.8. Karbon fiber 40x40 kare profil kritik yük değerleri .....                                | 45 |
| Tablo 5.9. St 37 25x25 kare profil kritik yük değerleri .....                                       | 48 |
| Tablo 5.10. Yapı çeliği 25x25 kare profil kritik yük değerleri .....                                | 49 |
| Tablo 5.11. Alüminyum alaşım 25x25 kare profil kritik yük değerleri .....                           | 50 |
| Tablo 5.12. Karbon fiber 25x25 kare profil kritik yük değerleri .....                               | 52 |
| Tablo 5.13. St 37 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri .....                                | 54 |
| Tablo 5.14. Yapı çeliği 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri.....                           | 56 |
| Tablo 5.15. Alüminyum alaşım 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri.....                      | 57 |
| Tablo 5.16. Karbon Fiber 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri.....                          | 58 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1.Yük uygulanmadan önce burkulma mekanizmasının genel gösterimi<br>[1] .....                            | 14 |
| Şekil 3.2. Yük uygulandıktan sonra burkulma mekanizmasının genel gösterimi<br>[1] .....                         | 15 |
| Şekil 3.3. Tekrarlı yük uygulandığında kesitteki moment ve yüklerin değişimi<br>[1] .....                       | 17 |
| Şekil 3.4. Mesnetleme durumuna göre etkin uzunluklar [1].....                                                   | 20 |
| Şekil 4.1. Yapısal analiz modülü penceresi .....                                                                | 26 |
| Şekil 4.2. Yeni tanımlanan malzemenin analiz için aktifleştirilmesi.....                                        | 27 |
| Şekil 4.3. Tasarım bilgileri giriş penceresi.....                                                               | 28 |
| Şekil 5.1. Dolu silindirik profil kesit resmi.....                                                              | 31 |
| Şekil 5.2. Dolu silindirik profil mesh modeli.....                                                              | 32 |
| Şekil 5.3. St 37 malzemeden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik<br>yük değerleri grafiği ..... | 33 |
| Şekil 5.4. 10 mm çaplı dolu silindirik kesitli 1 metre uzunluğunda profilin<br>örnek analiz resmi .....         | 34 |
| Şekil 5.5. Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük<br>değerleri grafiği .....     | 35 |
| Şekil 5.6. Alüminyum alaşımdan üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik<br>yük değerleri grafiği ..... | 37 |
| Şekil 5.7. Karbon fiberden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük<br>değerleri grafiği .....     | 38 |
| Şekil 5.8. 40x40 kare profil kesit resmi .....                                                                  | 39 |
| Şekil 5.9. 40x40 kare profil mesh modeli .....                                                                  | 40 |
| Şekil 5.10. St 37 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği.....                                           | 41 |
| Şekil 5.11. 40x40 kare profil analiz resmi .....                                                                | 42 |
| Şekil 5.12. Yapı çeliğinden üretilmiş 40x40 kare profilin kritik yük değerleri<br>grafiği .....                 | 43 |
| Şekil 5.13. Alüminyum alaşım 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği .....                               | 44 |
| Şekil 5.14. Karbon fiber 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği.....                                    | 46 |
| Şekil 5.15. 25x25 kare profil kesit resmi .....                                                                 | 47 |
| Şekil 5.16. 25x25 kare profil mesh modeli .....                                                                 | 47 |
| Şekil 5.17. St 37 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği.....                                           | 48 |
| Şekil 5.18. 25x25 kare profil analiz resmi .....                                                                | 49 |



|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 5.19. Yapı çeliğinden üretilmiş 25x25 kare profilin kritik yük değerleri grafiği ..... | 50 |
| Şekil 5.20. Alüminyum alaşım 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği .....            | 51 |
| Şekil 5.21. Karbon fiber 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği.....                 | 52 |
| Şekil 5.22. 20x40 dikdörtgen profil kesit resmi.....                                         | 53 |
| Şekil 5.23. 20x40 dikdörtgen profil mesh modeli.....                                         | 54 |
| Şekil 5.24. St 37 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği .....                 | 55 |
| Şekil 5.25. 20x40 dikdörtgen profil analiz resmi.....                                        | 56 |
| Şekil 5.26. Yapı çeliği 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği .....           | 57 |
| Şekil 5.27. Alüminyum alaşım 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği .....      | 58 |
| Şekil 5.28. Karbon fiber 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği .....          | 59 |



# FARKLI PROFİLDE, KALINLIKTAKİ VE BOYDAKİ EKSENEL BASMA YÜKÜ TAŞIYAN BAĞLANTI ELEMANLARININ BURKULMA DAYANIMININ İNCELENMESİ

## ÖZET

Makine ve inşaat sektörünün en önemli problemlerinden biri burkulmadır. Burkulmada değerlendirilmesi önemli noktalardan biri ise kritik burkulma yüküdür. Bu çalışmada farklı boyutlarda ve farklı malzeme özelliklerinde bağlantı elemanları için kritik burkulma yüklerinin hesaplaması yapılmıştır. Kesit özelliklerinin ve malzeme değişikliğinin burkulma yüküne etkisi ve analitik hesaplamalar ile analiz sonuçlarının tutarlılığının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Tek bir bağlantı elemanı için dolu silindirik profilde farklı çaplar için kritik burkulma yükü hesaplanmıştır. Kare ve dikdörtgen profiller için ise kesit sabit tutulup, uzunluk değiştirilerek kritik burkulma yükü hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar öncelikle analitik olarak yapılmıştır. Daha sonra ANSYS programında yapılan burkulma analizlerinden kritik burkulma yükü değerleri alınmıştır. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda; profil uzunluğunun, kesitin ve kalınlığının kritik burkulma yüküne direkt etki ettiği görülmüştür. Analitik sonuçlar ve analiz sonuçları çok az farklarla aynı değerleri vermiştir. Dolu silindirik profil için on farklı çap değerine göre, kare ve dikdörtgen profiller için ise altı farklı uzunluk değerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Her bir profil şekli için dört farklı malzeme türüne göre kritik burkulma yükleri hesaplanmıştır. Sonuçlar kısmında, kullanılan farklı malzeme türlerinin kıyaslaması yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Profil dayanımı, Burkulma, Eksenel yük, ANSYS



# **INVESTIGATION OF BUCKLING STRENGTH OF AXIAL COMPRESSION LOAD-BEARING FASTENERS OF DIFFERENT PROFILES, THICKNESS, AND LENGTH**

## **ABSTRACT**

One of the most important problems of the machinery and construction industry is buckling. One of the important points to be evaluated in buckling is the critical buckling load. In this study, critical buckling loads are calculated for fasteners of different sizes and different material properties. It is aimed to compare the effect of section properties and material change on the buckling load and the consistency of analytical calculations and analysis results.

Critical buckling load is calculated for different diameters in solid cylindrical profile for a single fastener. For square and rectangular profiles, the cross section is kept constant and the critical buckling load is calculated by changing the length. These calculations are made primarily analytically. Then, critical buckling load values are obtained from the buckling analyzes made in the ANSYS program. Analytical calculations and analysis results are compared. In the results of working; it has been observed that the profile length, cross section and thickness have a direct effect on the critical buckling load. Analytical results and analysis results give the same values with little differences. Calculations are made according to ten different diameter values for the solid cylindrical profile, and six different length values for the square and rectangular profiles. Critical buckling loads are calculated for each profile shape according to four different material types. In the results section, a comparison of the different types of materials used is made.

**Keywords:** Profile Strength, Buckling, Axial Load, ANSYS



## 1. GİRİŞ

Burkulma, bir yapı elemanının ani yükleme anında meydana gelen şekil değişimidir [1]. Bu şekil değişimi, profilin aksel olarak kaymasına ve boyutlarının değişmesine yol açar. İnşaat gibi yapı alanlarında bu durum genellikle istenmeyen bir durumdur. Fakat otomotiv endüstrisinde bazı kısımların burkulması avantaj sağlayabilir. Kaza anında aracın darbeyi alan bölümünde meydana gelen burkulma, darbeyi belirli bir oranda sönmüleyebilir ve kazanın şiddetini hafifletir. Burkulma sayesinde kaza daha hafif bir şekilde atlatılmış olur.

Burkulma yapıların kararsızlığı olarak da isimlendirilebilir. Yapı elemanları bu kararsızlığa kritik yük ile yüklendiklerinde ulaşırlar. Kritik yüklemede yapı elemanları boyutlarının orta kısmında, yanal bir eğilme oluştururlar, bu şekil değişimi burkulma olarak isimlendirilir. Yapı elemanlarının genel tasarımında malzemenin sertlik ve mukavemeti gibi özellikler dikkate alınır.

Mukavemet, yapı elemanının uygulanan kuvvete dayanma kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Sertlik ise kuvvet uygulanması durumunda, eleman üzerinde meydana gelen boyut değişikliklerine (plastik şekil değiştirmeye) karşı gösterilen dirençtir. Bazı durumlarda bu özelliklerin dikkate alınarak tasarım yapılması yeterli olabilir. Fakat malzemenin burkulma değeri bu değerlerin altında olabileceği için burkulma sınırının bilinmesi için gerekli olan kritik yük ( $P_{kr}$ ) değeri bilinmelidir.

Bu durumlardan da anlaşılacağı gibi, burkulma yapısal tasarım için çok önemlidir. Tasarımcılar için kesin burkulma değerlerinin bulunmasına ihtiyaç duyuluyorsa, analiz ve hesaplamalar yaparak  $P_{kr}$  değerlerinin bulunması gereklidir.

Profillerin burkulmasına sebep olabilecek kritik yük değerleri ANSYS gibi analiz programlarıyla elde edilebilir. Elemanlarda meydana gelen burkulma yaklaşık olarak simüle edilebilir. Bu çalışmada, çelik ve alüminyum alaşım profillerin burkulma dayanımı analitik olarak hesaplanmış ve ANSYS programında burkulma analizleri yapılmıştır. Farklı özelliklerde profiller tercih edilip, bu profillerin uzunluk, çap gibi boyutlarının değiştirilmesinin burkulma dayanımına etkisi bulunmaya çalışılmıştır.

Analitik hesaplamalardan ve analiz programından elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Profillerin taşıyabilecekleri kritik yük değerlerinde meydana gelen değişiklik, boy ve çap boyutlarının değişimine göre elde edilmiştir.

## **1.1. Tezin Amacı**

Çalışmamız, farklı malzemeden üretilmiş ve farklı kesitlere sahip olan profillerin dayanımının ve taşıyabileceği kritik yük değerinin analitik olarak hesaplanmasını ve bu sonuçları analiz programından elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak, profil dayanımının nasıl incelenebileceğini anlatmayı amaçlamaktadır. Makine, inşaat gibi birçok endüstride kullanılan çelik profillerin burkulma dayanımı önem arz etmektedir.

Bu çalışmayla burkulma dayanımının, boyut değişiminden nasıl etkilendiği anlaşılır bir şekilde ortaya koyulması amaçlanmıştır. ANSYS programında, burkulma analizinin ayrıntılı bir şekilde anlatılmasıyla, sektör çalışanları için burkulma analizi konusunda mühim bir kaynak oluşturulmuştur. Burkulma üzerine yapılmış olan çalışmalarda çeşitli analiz programları kullanılmıştır. ANSYS programı burkulma çalışması üzerine bir modüle sahiptir. Bu konuda çalışma ve inceleme yapabilme imkanı sunmaktadır. Bu sebeple ANSYS programı tercih edilmiştir.

## **1.2. Dünyada ve Türkiye’de Profillerin Kullanım Alanları**

Çelik, inşaat söz konusu olduğunda diğer malzemelerden farklı olarak şekil çeşitliliği ve dayanıklılık özellikleri ile bilinir. Çeliğin sağladığı dayanıklılık ve güç, ahşap veya betonun dayanıklılığından çok daha fazladır. Sağladığı birçok avantaj sebebiyle çelik inşaat sektöründe çok sık kullanılan bir malzemedir.

Çelik binalar, çelik çerçeveler kullanılarak kolaylıkla inşa edilir. İnşaat söz konusu olduğunda çeliğin, kullanımının çok daha kolay olması ve daha az zaman alması ve avantajlı olduğu kanıtlanan diğer birçok faktörle birlikte, çelik, günümüzde bina inşa etmenin en çok aranan yolu haline gelmiştir.

Çelikle, inşaat sektöründe başka hiçbir malzemeye benzemeyen yapılar oluşturulabilir. Yapı çeliği, sahip olduğu çeşitli avantajlar nedeniyle inşaat için çok tercih edilen bir seçenek haline gelmiştir.

Çelikten yapılan binalar çeşitli yapısal çerçeveler gerektirir. Ayrıca, çelik ile bir yapı inşa etmek çok daha az zaman gerektirir ve bu da onu yapıların inşasında en çok aranan yollardan biri haline getirmiştir.

### **1.3. Burkulma Sorununa Çözüm Önerileri**

Profillerde burkulma dayanımının artırılması için malzemelerin et kalınlığı ve çap gibi genel dayanımına etki eden boyut parametrelerinin artırılması gerekir. Uzunluğun artması burkulma için dezavantajdır. Elastisite modülü yüksek olan malzeme tercih edilmesinin, analitik hesaplamalarda burkulma dayanımını direkt olarak artırdığı görülmüştür.

### **1.4. Tez Konusunun Farklılığı**

Üzerinde çalışılmış olan konu, daha önce ayrıntılı bir şekilde analizi yapılmamış olan bir konudur. Konu ile ilgili yapılmış olan analizler bulunmakla birlikte bu analizler bu kadar ayrıntılı ve açık bir şekilde izah edilmemiştir. Tezimiz bu yönüyle diğer projelerden ayrılmaktadır. Ayrıca, dairesel dolu silindirik profil, kare ve dikdörtgen profillerde boyutların değişimiyle kritik yük değerinin değişiminin incelenmesi ve dolu silindirik kesitli profillerin çap ve uzunluk değerlerinin değişimiyle kritik yük değerinin değişiminin incelenmesi, kritik yük değerinin parametre değişiminden ne oranda etkilendiğini ortaya koymuştur.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Burkulma (Flambaj) Dayanımı

Burkulma dayanımı üzerine yapılan çalışmaların kökeni çok eskiye dayanmaktadır. 1965 yılında yapılan bir çalışmada, iletim kulelerinin tayfunlardan aldığı dış etkiyle burkulması üzerine çalışılmıştır. Çalışmada kulelerin çelik malzemesinin açılarının burkulma dayanımı incelenmiştir. Burkulma modları ve davranışları üzerine gözlemler yapılmıştır. Burkulmanın ana nedenlerinden birinin köşe burkulması olduğu sonucuna varılmıştır. Deneyler ve teori arasında bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Burkulmanın, eksantriklik ve açı boyutlarına bağlı olarak açıların kırılmasına sebep olduğu anlaşılmıştır [2].

Bu çalışmadan sonra ilerleyen yıllarda, eksenel yük dayanımı üzerine betonarme kolonlar üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada sayısal yöntemler kullanılmıştır. Eksenel kuvvet ve kolonun taşıyabileceği nihai yüke beton dayanımı ve çelik oranının etkisi araştırılmıştır. Ağır donatı olan kolonda daha kararlı bir yapı elde edilmiştir. Beton dayanımı arttırıldığında, narinlik oranının artmasıyla, nihai yük artışında azalma olduğu bulunmuştur. Ancak narin kolon için stabilite hatası ihtimalinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır [3].

Bu yıllarda kenarlarından yüklemeye maruz kalan mukavva panellerin burkulma sonrası mukavemeti sonlu elemanlar analiziyle araştırılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden elde edilen burkulma yükü, kapalı formda bir hesaplama elde edilmiş olan çözümle karşılaştırılmıştır. Levha olarak, simetrik bir levha tercih edilmiştir. Asimetrik levhada panelin eksantrik yüklenmesi, çökme yükünü önemli ölçüde azaltmıştır. Kritik burkulma yükünün, panelin narinlik oranıyla doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir [4]. Bir bölge için yapılmış olan farklı bir çalışmada ise, Yeni Zellanda ve Avustralya şartlarında kullanılmak üzere soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların, eğilme elemanlarının burkulması üzerine bir tasarım yöntemi sunulmuştur. Hesaplamalarda, Sharp basma yükü formülünün distorsiyonel burkulma gerilmesini tahmin etmede doğruluğunun daha az olduğu sonucuna varılmıştır [5]. İlerleyen yıllarda yapılan bir diğer çalışma ise denizcilik sahasında olmuştur. Gemilerin güverte ve dip kaplamalarında burkulma dayanımı analizi yapılmıştır. Sonuçlara ulaşmak için analitik formüller ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) kullanılmıştır. Sonuçlar karşılaştırılarak önerilen formülün doğruluğu gösterilmiştir [6].

Çalışmamız, karşılaştırma yöntemi açısından bu çalışmayla benzerlik göstermektedir. Çalışmamızda farklı olarak Euler burkulma formülleri kullanılmış ve ANSYS analizleri yapılmıştır. Üzerinde çalışılan ürünler de birbirinden farklılık göstermektedir. Deniz araçlarında burkulma dayanımı üzerine yapılan diğer çalışmada ise, su altı araç modelinde kompozit kabuk yapısı incelenmiştir. Parçada meydana gelen çökme üzerine yapısal analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda, çökmenin silindirik parçanın elastik burkulması sebebiyle olduğu anlaşılmıştır. Model açık denizde de test edilmiş, elde edilen analiz sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır [7].

Burkulma dayanımı üzerine farklı bir çalışmada ise cam malzemeler incelenmiştir. Çalışmada cam üzerinde burkulma testlerini simüle edebilen sayısal ve analitik modeller geliştirilmiştir. Çalışma, camda meydana gelen burkulma mukavemetinin her zaman cam yüzeyinin çekme mukavemeti ile sınırlı olduğunu göstermiştir. Narinlik oranına dayalı kolon tasarım konsepti, narinlik oranının çekme mukavemeti cinsinden tanımlanması gerektiğinden dolayı cam için uygun olmadığı anlaşılmıştır [8]. Kompozitler üzerinde burkulma dayanımına çalışılmış olan farklı bir makalede ise, kafes kompozitlerin lokal burkulma mukavemetini bulmak için analitik bir yöntem kullanılmıştır. Tek eksenli basma ve çekme deneyi ile çeşitli ızgaraların burkulma dayanımları elde edilmiştir. Düğüm noktalarının burkulma yükünün daha büyük olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [9].

Karbon-epoksi yapılar üzerinde sınırlandırılmamış basma yükü altında burkulma analizi başka bir makalede çalışılmış bir konudur. Bu çalışmada, diğer birçok çalışmadan farklı olarak liflerin mikro burkulması, kısıtlanmış yapıların burkulması gibi konular çalışılmıştır. Aynı çalışmada, katmanların sıkıştırma başarısızlığı gerilmeye dayalı bir kriter kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, farklı kırılma türlerinin simülasyonu için uygun kriterlerin kullanılması şartıyla, sonlu elemanlar yönteminin önemli bir tahmin aracı olduğunu göstermiştir. Deneylere harcanan bütçelerin azaltılmasına fayda sağlayabileceği söylenmiştir [10].

Bir başka çalışmada üç bağımsız değişkenin olduğu, kompozit malzemelerle burkulma dayanımı incelenmiştir. Üç bağımsız değişken olarak, karbon fiberin dizilimi, nano kil ve hibrit namine nano kompozitlerin burkulma kuvveti üzerine etkisi incelenmiştir. Deney tasarlanırken, Taguchi yöntemi tercih edilmiştir.

Çalışmada yazılımlardan elde edilen değerler kullanılıp burkulma testleri yapılmıştır. Maksimum burkulma yükü ikinci, minimum burkulma yükü on altıncı seviyede oluşmuştur. Nano kil ve fiber dizilimi, burkulma yükü üzerinde ters etki göstermiştir. Analitik sonuçlar ve deney sonuçları birbirine yakın bulunmuştur [11]. Kompozitler üzerine burkulma analizi çalışmaları son yıllarda artış göstermiştir. Bir makalede, değişen ince alüminyum katmanlı fiber takviyeli epoksiden oluşan hibrit kompozit ile ilgili profil yükleme değerlendirmesinde hata kriterleri uygulamasının karşılaştırmalı analizinin sonuçları sunulmuştur. Yapının burkulma yükünü ve yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için ayırık model oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan daha fazla yük uygulanması, burkulma ve burkulma sonrası durumda yapının potansiyel hatasının tahmin edilmesini sağlamıştır. Hasarın en çok hangi bölgede gerçekleştiğini ayırt edebilmek için, her katman için ayrı ayrı hata faktörleri belirlenmiştir. Farklı yük adımları için belirlenen çeşitli duvar konumlarında hata faktörlerinin artmasını değerlendirmek için analizler yapılmıştır [12]. Bir ucu sabit, bir ucu mesnetli alüminyum alaşımlı, I kesitli kolonların incelendiği bir çalışmada, kolonların burkulma davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. 11 kolona burkulma testi yapılmıştır. Testler, ABAQUS programında da yapılmıştır. Deneyler ve test sonuçları birbirini doğrular nitelikte bulunmuştur [13]. Yüksek binalarda ve köprü benzeri yapılarda, mukavemet değeri yüksek malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapılarda kompozit kolon kullanımı her geçen yıl artmaktadır. Çeliğin de kullanılarak yapıldığı kompozit kolonları inceleyen makale, lokal burkulma narinlik sınırlarının, deneysel bir çalışmasının ve sayısal incelenmesinin sonuçlarını sunmuştur. Kutu ve I kesitli kolonların lokal burkulma ve lokal sonrası burkulma tepkisi üzerine sayısal model geliştirilmiştir. Model ve test sonuçları birbirini doğrulamıştır [14].

Çeliklerde burkulma dayanımı üzerine yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Basınç kolonlarının burkulma davranışı, son yıllarda, çelik yapıların en çok araştırılan konularından biri olmuştur. Bu konu üzerine çalışılmış olan bir makalede, 460 MPa yüksek mukavemetli çelik elemanların genel burkulma davranışını incelemek için bir deneysel çalışma yapılmıştır. Kaynaklı kutu profiller ve I kesitli profillerden oluşan on iki kolon incelenmiştir. Çalışmada burkulma deformasyonu ve kapasitesi incelenmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlarla mevcut ve

eski çalışmalardaki sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonuçları doğrulamıştır. Doğrulanmış olan bu model, farklı kesit, boyut ve uzunluk ölçülerine sahip kolonlara uygulanmıştır. Çalışmada bulunan burkulma değerleri tasarım kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda çeşitli tasarım formülleri önerilmiştir [15].

Aynı yazarın, bir başka çalışmasında ise yüksek mukavemetli çelik, çalışma konusu olmuştur. Kolonlarda yüksek mukavemetli çeliğin yükleme kapasitelerinden büyük ölçüde faydalanırken, bu çeliğin elastik olmayan özelliklerinin değişim gösteren etkileri nedeniyle, yüksek mukavemetli çelikler, geleneksel yumuşak çeliklere göre farklı davranış sergilemiştir. Yüksek mukavemetli çeliklerin genel burkulma davranışının anlaşılmasını derinleştirmek için, bu çalışmada literatürde bulunan bir kolon test verisinin üzerinde çalışılmıştır. Çeşitli yüksek mukavemetli çelik kaliteleri, kaynaklı kesit geometrik parametreler, narinlik değerlerini de içine alan parametrik analizler yapılmıştır. Yüksek mukavemetli çeliğin derecesinin artmasıyla, kusurların etkilerinin azaldığı gözlenmiş, çalışmalar için Pery-Robertson formülüne dayalı yeni teorik kolon eğrileri geliştirilmiştir [16].

Başka bir çalışma, çelik plakaların kaynaklanmasıyla üretilen Yüksek Hız Çeliği (HSS) I-kesitli kirişlerin deneylerini raporlamış ve analitik hesaplamaları ortaya koymuştur. Deneyler için çeşitli I profiller üretilmiştir. Numuneler, test esnasında kırılma gözlenmeden yanal burulma veya lokal burkulma modları geliştirmek üzere tasarlanmıştır. Sıkıştırma flanşı aktıktan sonra, yanal burulma burkulmasının başladığı bulunmuştur. Profillerin burkulma analizi için ABAQUS programından yararlanılmıştır [17]. Diğer bir çalışmada nominal akma gerilmesi 560 MPa olan, 0,6 ve 0,8 mm kalınlığındaki yüksek mukavemetli çelik levhadan imal edilen flanşlarda basma testi yapılmıştır. Uzun kolonlarda lokal ve genel burkulma arasında gözle görülebilir bir etkileşim bulunmuştur. Kullanılan mukavemet formülleri ile elde edilen değerler, test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [18].

Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) konu olduğu bir çalışmada ise, kısıtlayıcının lokal burkulmasının BÖÇ mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla çeşitli boru tutucu konfigürasyonları kullanılarak BÖÇ'lerin yükleme testleri ve analizleri yapılmıştır. İç plakanın lokal burkulma dalga boyu, iç plakanın modülü ve maksimum akma kuvveti kullanılarak burkulma dayanımıyla

hesaplanan narinlik oranı ile açıklanmıştır. Tutucu duvar ve iç plakanın maksimum çekme gerilmesi dikkate alındığında, lokal burkulma hatası için bir kriter sağlanmıştır [19]. Yangınlardan etkilenen çelik malzemelerde burkulma dayanımı üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Yangına maruz kalan çeliklerin burkulma kapasitesi, çeliğin sıcaklığındaki artışla bağlantılı olarak mukavemetinde ve sertliğindeki azalmadan etkilenmiştir. Çalışmada, yüksek sıcaklıkta çelik plakaların mukavemetini hesaplamak için gerilime dayalı bir yaklaşım kullanılarak, basit sürekli denklemler ileri sürülmüştür. Bu denklemler kullanılarak yapılan hesaplamaların sonuçları, çeşitli sıcaklıklar, sınır koşulları ve yükleme senaryoları için hesaplanan sonuçlarla uyumlu çıkmıştır. [20]. Bir başka çalışmada ise geometrik kusurlardan etkilenen soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların burkulma mukavemetinin hesaplamalı modellenmesi incelenmiştir. Çalışmada öz değer, doğrusal olmayan mukavemet hesaplamaları için SEA kodları kullanılmıştır. Profiller üzerinde yapılan analizler, hesaplamalarla karşılaştırılmıştır [21].

Bu çalışmalarla birlikte 690 MPa yüksek mukavemetli çelikler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Özellikle inşaat mühendisliğinin ayrıntılı incelediği burkulma konusu üzerine çalışmalar yaparken, 690 MPa çelikten imal edilen kolonlar çalışmada konu olarak incelenmiştir. Kolonlara aksenal basma yükü uygulanmıştır. Burkulma modu ve burkulma kapasitesi bulunup, mevcut standartlarla kıyaslanmıştır. Bu tür sütunlar için daha yüksek ve daha uygun sütun eğrileri önerilmiştir [22].

Kompozit malzeme ve çelik kullanılan bir çalışmada ise, Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) levhalarla sarılmış çelik çaprazlar incelenmiştir. CFRP katmanlarının, çaprazın mukavemetini ve sertliğini önemli oranda artırabileceği bulunmuştur [23]. Yüksek mukavemetli çeliklerin incelendiği bir makalede, deneysel olarak ölçülen ve literatürde bildirilen gerilme-gerinim eğrilerini ve artık gerilmeleri birleştirerek I kesitli profillerin eğilme-burulma, burkulma mukavemetini araştırmak için ABAQUS yazılımını kullanmıştır. Yapı çeliği üzerinde benzer bir yöntem kullanılarak, elastik burkulmanın kesit seviyesindeki malzeme özellikleri ile etkileşimi araştırılmış ve mukavemet tasarım formülasyonu önerilmiştir [24].

Bir başka çalışmada ise Avrupa burkulma eğrilerinin yeniden oluşturulması amacıyla gelişmiş doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde düzlem kabuk elemanları kullanarak eğilme kolonu burkulmasının deterministik modellenmesi araştırılmıştır.

Bu konu üzerine yapılmış olan çalışmaların kısa bir tarihçesine makalede yer verilmiştir. Çalışmada Ayrton-Perry formülasyonu üzerine öneriler verilmiştir [25].

BÖÇ'lerin kullanıldığı diğer bir makalede ise, küresel burkulmaya karşı BÖÇ'lerin tasarımı üzerine çalışılmıştır. Çeşitli kısıtlar üzerinden gidilerek optimal tasarım yapılmıştır. Bu tasarımın, kısıtlayıcı elemanın ikinci alan momenti cinsinden açık bir denklem olarak ifade edilebileceği öne sürülmüştür. Bu denkleme bağlı olarak tamamen çelikten üretilen BÖÇ'lerin malzeme verimliliğini göstermek amacıyla bir tasarım örneği sunulmuştur [26].

Fonksiyonel dereceli plakaların burkulma davranışlarının incelendiği bir tez çalışmasında malzeme olarak alüminyum, seramik ve zirkonyum kullanılmıştır. Çalışma içerisinde kritik yük değerinin bulunması ve ANSYS programının kullanılmış olması bu tez çalışması ile benzerlik göstermektedir. Kullanılan yöntem, malzeme ve eleman türlerinin farklı olması çalışmaları birbirinden ayırmaktadır [27].

Diğer bir tez çalışmasında ise ince cidarlı silindirik kompozit kabukların aksel yükleme durumunda burkulma davranışı ele alınmıştır. Çalışmada analitik hesaplamalar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. İnce cidarlı silindirik kompozitlerin tasarımı için bir optimizasyon yöntemi elde edilmiştir. Çalışmalarda sonlu elemanlar programı olarak ABAQUS tercih edilmiştir [28].

3 boyutlu yazıcıda üretilen karbon fiber takviyeli kompozitlerin konu alındığı bir tezde ise, bu çalışmada olduğu gibi ANSYS ile modelleme yapılmıştır. Çalışmanın küçük bir bölümünde basma analizlerinin yapılması, bu çalışmanın aksel yük uygulanma durumu ile benzerlik göstermektedir. Fakat tez, burkulma ile ilgili bir çalışma değildir [29].

Lineer eyleyicilerde kullanılan silindirik boruların burkulma davranışının incelendiği bir tezde ise kritik burkulma yükü hesabı için Rayleigh Oranı metodu kullanılmıştır. Bulunan analitik sonuçlar deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda uygun malzeme türü ve boyutlar tespit edilmiştir [30].

Burkulmanın konu olduğu bir tezde ise üzerinde delik bulunan plaklar incelenmiştir. Çalışmada delikli plakların kritik burkulma yüklerinin, deliksiz plaklara göre çok düşük olduğu bulunmuştur. Hesaplamalar yapılırken Fortran 77 kodlama programı kullanılmıştır [31].

Eksenel basma yükü uygulanarak yapılmış olan bir tez çalışması ise hibrit kompozit kirişlerin burkulma davranışlarını optimize etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada konu olan kompozit kirişler, havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerdir. Çalışma sonucunda karbon/epoksi ve cam/epoksi yapılarda en iyi açılış yönlerinde maksimum burkulma kuvveti düşünülerek tasarım önerisi yapılmıştır [32].

Çok katlı yapılarda kritik burkulma yükleri ve basma kuvvetine karşı dayanım çok önemli olmuştur. Bu sistemlerin konu edildiği bir çalışmada kritik burkulma yükleri diferansiyel transform metodu ile belirlenmiştir. Çalışmanın burkulma yükleri hesaplama metodu analitik hesaplama olarak değerlendirilebileceği için bu noktada iki tezin çalışma yöntemleri benzerlikler göstermiştir. Fakat kullanılan yapı elemanları ve bu tezin analiz programı kullanıyor olması çalışmaların farklılıklarına verilebilecek en basit iki örnektir. Tezde farklı sistem örnekleri verilerek konu tamamen açıklanmaya çalışılmıştır [33]. Tez başlıkları olarak değerlendirme yapıldığında, çalışmamıza en çok benzerlik gösteren tez ise ANSYS kullanarak farklı çelik bağlantılarının doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizini kendine konu edinen çalışmadır. Tezde yapılan modellemeler ile literatürde bulunan çalışmalar karşılaştırılmıştır. Çerçeve sistemlerinde kritik burkulmanın nerelerde meydana geldiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Doğrusal olmayan analiz ve çerçeve sistemleri çalışmalarının farklı noktaları olmuştur [34].

Farklı bir çalışmada ise burkulma ölçümü için bir cihaz geliştirilmiştir. Bu alet ile en kritik bölgede gerinim seviyesi ölçülüp, kritik burkulma yüklerinin hesaplanabildiği söylenmiştir [35].

Başka bir çalışmada, eliptik delikli çelik kolonların taşıma kapasitesinin hesaplanmasında deneysel çalışmalar yapılarak kolonların deformasyon şekilleri ile yük-yer değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çalışmada Dynoform sonlu elemanlar paketi kullanılmıştır. Deneysel sonuçların ve analitik sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Eliptik deliğin konumu ve büyüklüğünün taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır [36].

2000 yılında yapılan bir çalışmada ise eğilmeye ve eksenel basınç kuvvetiyle burkulmaya çalışan kolonların burkulma analizi yapılmıştır. Amerikan Çelik Yapı Enstitüsü (AISC), Yük ve Direnç Faktörü Tasarımı (LRFD) ve Çelik Yapıların

Hesap ve Yapım Kuralları Standardında (TS 648) kullanılan formüllerin nasıl elde edildiği araştırılmıştır. Kolonlarda elastik ve plastik denge incelenmiştir [37].

Havacılık sektörü ile ilgili olan bir başka çalışmada ise dişli kutusu motor bağlantı parçasının burkulma davranışı incelenmiştir. Çalışmada ANSYS programı kullanılmıştır ve malzeme türünün ve ölçülerin sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir [38].

Kompozit plakaların sonlu elemanlar metodu ile kritik burkulma yükünün incelenmesi konu başlıklı diğer bir tezde çeşitli mekanların (stadyum, avm vb.) kapatılmasında kullanılan plakaların burkulması ANSYS ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda tabakalanma açısının kritik burkulma yükü üzerinde belirgin bir etkisi olduğu bulunmuştur [39].

Karbon nanotüplerin kullanıldığı bir çalışmada, farklı geometriye sahip karbon nanotüp takviyeli plakların burkulma analizi yapılmıştır. Analizlerde farklı plak teorileri kullanılmış ve farklı çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Mesnetlenme şekilleri, geometrik özellikler ve düğüm noktası sayısının burkulma üzerinde ki etkisi karşılaştırılmalı olarak verilmiştir [40].

Burkulma ile ilgili yapılan farklı bir çalışmada kritik burkulma yükü varyasyonel iterasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Çalışma sonucunda uygulanan yöntemin elastik stabilite problemlerinde analitik çözümün yapılamadığı durumlarda aktif kullanılabilir bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir [41].

Kayma yüklemesine maruz bırakılan dikdörtgen ince plakların ANSYS ile burkulma analizi diğer bir tez konusu olarak ele alınmıştır. Enine desteklenmiş ve desteklenmemiş plakların analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada LAMINA Fortran programı kullanılmıştır [42].

Literatür taraması sonucunda da görüldüğü gibi, tez çalışmamızla ilgili doğrudan bir çalışma bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında burkulma yükü hesabının yapılması, burkulma yükü değerinin ANSYS programı ile bulunuyor olması ve bu hesaplamalar yapılırken incelenen malzeme türleri, literatürde bulunan çalışmalardan farklıdır.

### 3. TEORİ

Yapılan çalışmada çeşitli malzemeler ve malzemelerin analizinde çeşitli metotlar kullanılmıştır. Bu metotlar ve malzemelerin bilgisine teori başlığıyla bu bölümde yer verilmiştir. Burkulma, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, malzemelerin eksenel basma yüküne maruz kalmasıyla ortaya çıkar. Bu malzemeler, sütun, kolon, profil gibi uzunluğu, kalınlığından çok fazla olan malzemelerdir. Narinlik faktörü de oldukça önemlidir. Bu tür malzemelerde, basma yükü uygulandığı esnada, kuvvet kritik yük seviyesine ulaştığında aniden yanal bir eğilme görülür. Bu yanal eğilmeye burkulma ismi verilir. Bu yanal eğilme artmaya devam ederse, malzeme plastik deformasyona uğrayabilir ve devamında kırılma gibi hasarlar oluşabilir. Bu malzemelere örnek olarak verilebilecek profiller üzerine, tez konusu olarak çalışılmıştır. Profiller ve bu tür malzemeler mükemmel elastikliğe sahip malzemelerden imal edilirler. Burkulmanın başladığı yük, kritik yük olarak isimlendirilir. Kritik yük, ilk olarak elastisite modülüne ve malzemelerin kesit özelliklerine bağlıdır. Akma gerilmesi ve kopma gerilmesi değerlerinden bağımsızdır. Son yıllarda profiller elastikliği yüksek ve dayanıklı malzemelerden yapılır. Kritik yük ayrıca malzemenin elastik olmayan gerilme-gerinim davranışlarına da bağımlı olabilir.

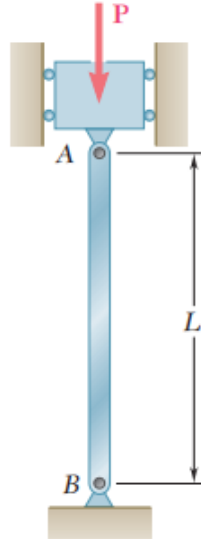
Gerçek yapı elemanlarının hemen hemen ideal şartlarda olduğu kabul edilir. Bazı durumlarda profillerde kusurlar olabileceği de düşünülmelidir. Elastik burkulma yükünde meydana gelebilecek kusurların etkilerini de hesaba katmak önemlidir. Burkulma durumu incelenirken karşımıza çıkan en yaygın kusur eksantrikliklerdir. Eğer uygulanan yük eksantrik ise, profile yük uygulanır uygulanmaz burkulma başlayabilir. Meydana gelen burkulma ile profildeki seğim miktarı uygulanan yük arttıkça artacaktır. Ancak uygulanan yük, kritik yük seviyesine ulaşmadan önce profilin eğilmesi çok büyük olabilir. Bu yüzden, eğilmenin fazla olduğu durumlar için yük-sehim ilişkisinin açıklanmasına ihtiyaç duyulabilir. Fakat pratikte, bir profil aşırı derecede narin olmadıkça bu tür üst düzey eğilme durumları meydana gelmeden önce akma veya kırılma gibi durumların meydana gelmesi beklenir.

Teorik olarak burkulma çalışmalarından, burkulma teorisi veya stabilite teorisi olarak bahsedilir. Burkulma konusu birkaç temel başlıkta incelenebilir. Euler formüllerinin ve mesnetlenme şeklinin formüle etkisinin konunun anlaşılması için izah edilmesi

gerekir. Başlangıçta düzgün bir profil mesnetlenip, bir basma yüküne maruz bırakıldığı zaman eğer uygulanan yük kritik yükü geçerse elastik burkulma ile profil üzerinde kırılma ve benzeri kalıcı şekil bozuklukları oluşabilir.  $P_{kr}$  için şu formül kullanılır,

$$P_{kr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.1)$$

Burada; E: elastisite modülünü, I: atalet momentini, L: kullanılan profilin uzunluğunu temsil eder. şekilde gösterildiği gibi aksel uygulanan bir P kuvveti, profile bir eğilme momenti oluşturur. şekil 3.1'de L uzunluğu olan bir bağlantı elemanına uygulanan P kuvvetine ve örnek bir mesnetleme durumuna yer verilmiştir.



şekil 3.1.Yük uygulanmadan önce burkulma mekanizmasının genel gösterimi [1]

Bir profil küçük bir P basma yüküne maruz bırakıldığı zaman normal şeklini korur. Eğer profil şekil 3.2'deki gibi küçük bir ek yanal yüke maruz bırakılırsa, yanal olarak eğilmeye başlar. Bu durumda yanal yük tekrar kaldırılırsa, şekilde meydana gelen eğim yok olur ve profil normal pozisyonuna geri döner. Bu durumdan hareketle, şeklin kritik yükten küçük yüklerin uygulandığı durumlarda kararlı denge durumunda olduğu söylenilebilir. Bu kritik yükten daha büyük değerlerde profilin yanal hareketi eğilme veya kırılma ile sonuçlanan bir şekil değişikliği meydana getirebilir.



Şekil 3.2. Yük uygulandıktan sonra burkulma mekanizmasının genel gösterimi [1]

(3.1) numaralı denklemde görüldüğü gibi  $P_{kr}$  yükü profilin atalet momentine, elastisite modülüne ve uzunluğuna bağlıdır. Yapı malzemeleri arasında elastisite modülü farklılık gösterebilir. Modern yapılarda kullanılan, yapı çeliğinden üretilmiş profillerde (E) değeri hemen hemen birbirine yakındır. Çalışmamızda, bu alanda seçilmiş farklı malzemelerin kritik yük değerlerinden hesaplanan sonuçların yakınlığı da ele alınacaktır. Bu tür profillerde ( $P_{kr}$ ), profilin uzunluğu ve atalet momenti tarafından esas olarak etkilenir. Burkulma kontrolü için (L) ve (I) değerlerinin etkisinden dolayı, bu değerlerin uygun seçilmesi önemlidir. (I) değerini maksimize etmek için, kapalı kesitlere sahip profiller çoğunlukla tercih edilir.

Kısaca, bir profil (P) basma yüküne maruz bırakılırsa ve bu yüke ekstra yanal yükler etki ederse ve bu (P) basma yükü ( $P_{kr}$ ) yüküne eşit veya bu yükten büyük olursa profile bir eğilme durumu gözlenir. Yüklerin birbirine eşit kalması durumunda profil üzerinde meydana gelen şekil değişiklikleri geçici olabilir, uygulanan basma yükü kritik yük değerini aşarsa profile kalıcı şekil bozuklukları gözlenebilir. Çoğunlukla, profiller bu gibi büyük yüklere dayanıklı olmadıkları için malzemeler kalıcı olarak hasar alır.

Burkulma bir yapısal kararsızlıktır. Burkulma yükü, sütunun taşıyabileceği maksimum yüküdür. Mesnetli düzgün ve homojen malzemelerden yapılan bir profilin, eksenel olarak yüklendiğini düşünelim. Profil herhangi bir eksenel yükleme altında düzgün kalır, eğilmez. Kritik yük formülünden yukarıda bahsedilmişti. Profilin kesit

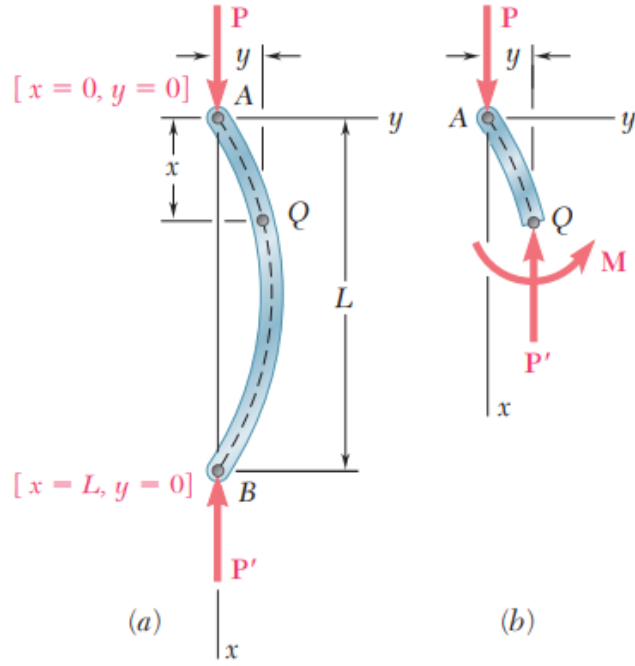
alanı ve kritik yükün etki ettiği ortalama normal gerilme formülünden çıkarılmış olan kritik gerilme ( $\sigma_{kr}$ ) formülü ise şu şekildedir.

$$\sigma_{kr} = \frac{P_{kr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (3.2)$$

Burada; A: çubuğun kesit alanı, L/r: narinlik oranı, E ise çubuğun elastisite modülüdür. L/r içerisinde bulunan r ise en küçük dönme yarıçapıdır. Profilin elastik kalabilmesi için,  $\sigma_{kr}$  profil malzemesinin akma gerilmesinden daha düşük olmalıdır. Başka bir yorumla, elastik burkulma yükü akma gerilmesinden önce dikkat edilmesi gereken önemli bir durumdur. Bu kısma kadar verilen denklemler Euler denklemleridir. Euler burkulma denklemlerinin çıkarılması ise bir sonraki konu başlığı olarak ele alınmıştır.

### **3.1. Euler Burkulma Formülleri**

Çalışmanın bu kısmında, mesnetlenmiş ve eksenel yüklemeye maruz bırakılan profillerin kritik yük değerinin Euler formüllerinin çıkarılması üzerinde durulmuştur. Kritik yük değerinin bulunması için birkaç farklı yöntem kullanılabilir. Örnekleme yolu ile bu metotların birkaçı kullanılarak Euler formülü türetilir. Tez çalışmasında kullanılmış olan formüllerin ne şekilde elde edildiği bu kısımda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 3.3. Tekrarlı yük uygulandığında kesitteki moment ve yüklerin değişimi [1]

Şekil 3.3’de ki gibi mesnetlenmiş olan bir profil üzerinden formüllerin çıkarılmasını inceleyelim. Şekli kesip serbest cisim diyagramı (b) şeklinde olduğu gibi çizilebilir. Moment saat yönünün tersinde alınmıştır. A noktasına göre moment alındığında:

$$\sum M_A = M(x) + P'y = 0 \quad (3.3)$$

veya  $P'$  yerine  $P$  yazılıp yeniden formül düzenlendiğinde (3.4) numaralı denklem elde edilir.

$$M(x) = -Py \quad (3.4)$$

Bu denklem nötr denge durumunu temsil eder. Başlangıç kiriş teorisinde  $M(x)$  momenti profilin merkezinin eğrilik yarıçapı ile bağlantılıdır.

$$M(x) = \frac{EI}{R(x)} \quad (3.5)$$

Burada  $EI$ : şekil düzleminde burkulma için eğilme sertliğidir. Eğer  $(dy/dx)$  eğimi küçükse  $R(x)$  için şu formül yazılabilir.

$$\frac{1}{R} = \pm \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \approx \pm \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.6)$$

Daha sonra denklem (3.4) ve (3.5) birlikte türetildiğinde şu denklem elde edilebilir.

$$M(x) = \pm EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad (3.7)$$

Verilen eksenler için artı işareti,  $M(x)$ 'in  $y$  ekseninin pozitif tarafında 0 merkezli bir eğriliği işlemek için seçilen duruma karşılık gelir. Benzer şekilde,  $y$  ekseninin negatif tarafında 0 merkezli bir eğrilik oluşturmak için pozitif bir moment seçildiğinde eksi işareti alınır. Örneğin, Şekil 3.3'te saat yönünün tersinde pozitif  $M(x)$  seçilir ve  $y$  ekseninin pozitif tarafında 0 merkezli bir eğrilik üretir. Bu sebeplerden (3.6) numaralı formülden pozitif değer ile devam edilebilir. Böylece, (3.3) ve (3.6) numaralı denklemler  $EI$  ile bölündükten sonra yeni bir formül elde edilebilir.

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2y = 0 \quad (3.8)$$

Aşağıdaki formül yazılır.

$$k^2 = \frac{P}{EI} \quad (3.9)$$

Sınır şartları (3.7) numaralı denklem ile ilişkilendirilir.

$$y = 0, \quad x = 0 \text{ ve } x = L \quad (3.10)$$

$P$ 'nin keyfi değerleri için, (3.7) ve (3.9) numaralı eşitlik sadece  $y=0$  çözümünü kabul eder. Bununla birlikte, şimdi gösterileceği gibi, belirli özdeğerler ( $k$ ) ile denklem (3.7)'nin (3.9) numaralı eşitlikler için çözümleri mevcuttur. Denklem (3.7)'nin genel çözümü aşağıdaki gibidir.

$$y = A \sin kx + B \cos kx \quad (3.11)$$

Burada  $A$  ve  $B$ , sınır koşullarından belirlenen sabitlerdir. Bu nedenle, (3.9) numaralı eşitlik ve (3.10) numaralı denklem birlikte düşünüldüğünde aşağıdaki şekle dönüşür.

$$A \sin kL = 0, \quad B = 0 \quad (3.12)$$

Katsayıların 0 olmadığı çözümler için ( $A \neq 0$ ), denklem (3.11),  $\sin kL=0$  olmasını gerektirir.

$$k_n = \sqrt{\frac{P_n}{EI}} = \frac{n\pi}{L}, \quad n = 1,2,3, \dots \quad (3.13)$$

(n) sembolünün her değeri için ve ( $k=k_n$ ) için değersiz olmayan bir çözüm vardır.

$$y_n = A_n \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (3.14)$$

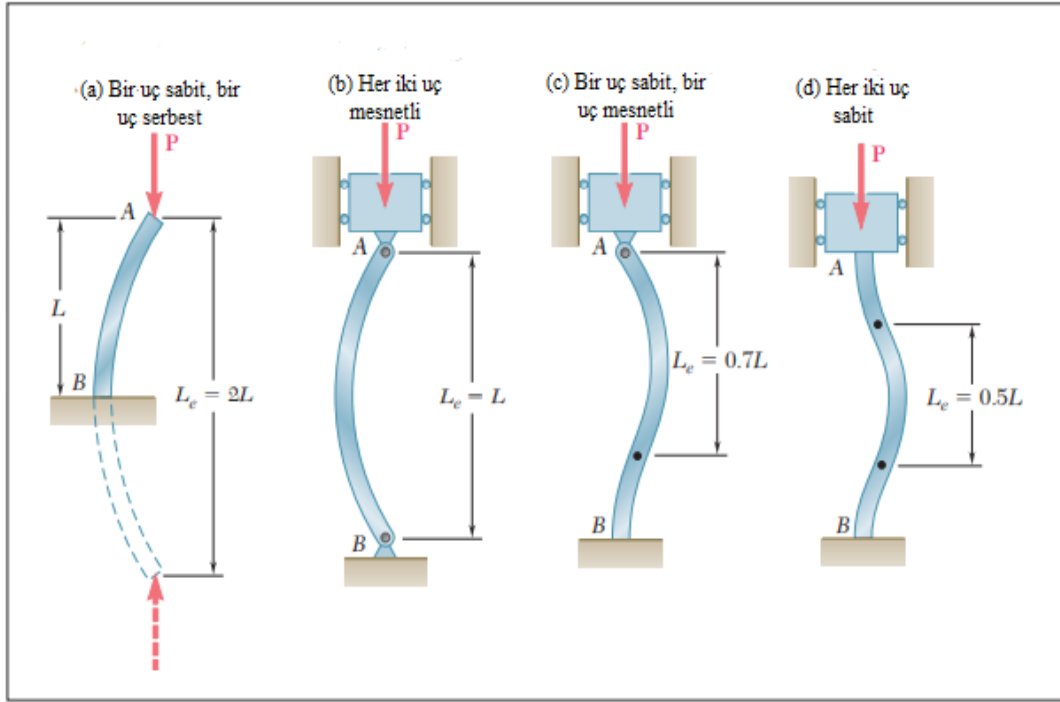
(3.12) numaralı denklemden Euler denklemi aşağıda verilen duruma gelir.

$$P_n = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2}, n = 1,2,3, \dots \quad (3.15)$$

Minimum  $P_n$  değeri  $n=1$  olduğu durumda meydana gelir. Bu 0'a eşitlenmiş bir çözüm için en küçük olası yüküdür, yani, profil için kritik yük değeridir. (3.12) numaralı denklemden  $n=1$  değeri ile aşağıdaki formüle ulaşılır.

$$P_1 = \frac{\pi^2 EI}{L^2} = P_{kr} \quad (3.16)$$

Daha önce belirtildiği gibi, (3.15) numaralı denklem, uçları sabitlenmiş bir kolonun burkulması için Euler formülüdür.



Şekil 3.4. Mesnetleme durumuna göre etkin uzunluklar [1]

Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, profillerin farklı mesnetlenme durumlarına göre etkin boy uzunlukları değişmektedir. Profillerin mesnetlenme durumu, formülde kullanılan uzunluk değerini etkiler. Şekilde bulunan a durumunda, etkin uzunluk  $L_e=2L$  olarak alınır. Uçlardan birinin sabit olması ve diğer ucun serbest olması durumları bu şekil 3.4 ile örneklenir. Bu durumda profilin uzunluk değerinin iki katı alınarak hesaplamaların yapılması gerekir. Çalışmada bu mesnetlenme durumu kullanılmıştır.

Şekil 3.4 b ise iki ucun da mesnetli olması durumudur. İki ucun mesnetli olduğu durumda etkin uzunluk değeri değişmemektedir.  $L_e=L$  alınarak formül çözümlenebilir. Şekil 3.4 c, bir ucun sabit, bir ucun mesnetli olması durumunu örneklemektedir. Bu mesnetlenme durumu için etkin uzunluk  $L_e = 0.7L$  olarak alındığında analitik hesaplamalardan doğru sonuçlar elde edilebilecektir.

Şekil 3.4 d ise son mesnetlenme durumudur. Bu durumda ise profilin her iki ucu da sabittir. Bu sebeple burkulma merkeze yakın bölgede meydana gelir. Bu durumda etkin uzunluk  $L_e=0.5L$  olarak alınır. Mesnetlenme durumlarına göre Euler formülünde değişiklik yapılması gerekir. Eğer bu değişiklikler göz ardı edilirse, elde edilen kritik yük değerlerinde bulunan sonuçlar deneysel ve simülasyon sonuçlarıyla

tutarlı olmayacaktır. Bu sonuçlar kullanılarak yapılan çalışmalarda beklenmeyen kazalar meydana gelebilir.

### 3.2. Yapı Çelikleri

Geniş yoruma açık olmasına rağmen, yapı çelikleri terimi, kimya, inşaat, makine ve çeşitli mühendislik dallarında büyük miktarlarda kullanılan ferrit perlit mikro yapıları ile ağırlıklı olarak C-Mn çeliklerini tanımlamak için yaygın şekilde kullanılmıştır. Bazı durumlarda çelikler birkaç (mm) kalınlığa kadar ve genel olarak yaklaşık 500 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar akma mukavemeti değerlerine sahip levhalar ve kesitler halinde üretilir. Bununla birlikte, yapı çelikleri aynı zamanda yaklaşık olarak 700 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar mukavemet sağlanması için su verilen ve temperlenen düşük alaşımlı tabakaları da içerir.

Bu malzeme türü, köprüler, çelik binalar, basınçlı kaplar ve araçlar dahil olmak üzere geniş bir alanda ve çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Yapı çeliklerindeki çoğu yapı biçiminin en önemli özelliklerinden biri, kaynak edilebilirlik seviyesi ve yüksek bütünlüklü kaynaklara duyulan gereksinimdir. Kaynak, 1940'lı yıllarda perçinlemenin yerini almaya başladı, bu sayede yapı çelikleri yüksek karbon içeriği ile karakterize edildi ve bu nedenle soğuk çatlamaya eğilimli olduğu anlaşıldı. İyileştirilmiş kaynaklanabilirliğe sahip daha düşük karbon kaliteleri gereksinimi, II. Dünya Savaşı boyunca, gemilerin açık denizlerde parçalanması sebebiyle, yapı çeliklerindeki bir başka önemli özellik gereksiniminin, yani sünekliğin aksine tokluğun tanınmasına da yol açtı [43].

1950'lerin başlarında, Hall ve Petch'in çalışması, ferrit tanelerinin artırılmasının çeliklerin hem akma mukavemetinde hem de tokluğunda bir artışa yol açmasıyla yapı çeliklerinin tasarımında önemli bir gelişme kaydedilmiş oldu [43].

Böylece, yaklaşık 300 N/mm<sup>2</sup>'ye kadar akma mukavemeti değerlerine sahip çelikler, alüminyum taneli rafine bileşimlerde, iyi darbe özellikleri ve iyi kaynak özellikleri ile üretilebilir. Ferrit tane inceltme, modern yapısal kalitelerin oluşumunda önemli bir metalurjik parametre olmaya devam etmektedir, fakat daha yüksek mukavemetli çeliklere olan talep, çökeltme güçlendirmesi olarak adlandırılan daha fazla bir güçlendirme mekanizması gerektirmiştir. Böylece, akma mukavemetini yaklaşık 500 N/mm<sup>2</sup> seviyesine çıkarmak için yapı çeliklerine küçük niyobyum, vanadyum ve

titanyum ilaveleri yapıldı. Bunlar sadece %0,15'e kadar olan seviyelerde ilave edildiklerinden, bu ilaveler mikro olarak bilinir hale geldi. Alaşım elementleri ve bileşimler, Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı (HSLA) çelikler olarak adlandırıldı.

Yapı çelikleri bahsedilenlerden de anlaşılabilceği gibi, önemli değişikliklere uğramıştır, her değişiklik mukavemet, tokluk veya kaynaklanabilirlik gibi özelliklerde önemli gelişme sağlar. İyileştirilmiş temizlik ve dahil etme şekli kontrolü gibi yönler de benimsenerek üretim ve hizmet performansında iyileştirmelere yol açtı. Bu faktörler, çok uygun maliyet karşılaştırmaları ile birleştiğinde, yapı çeliklerinin, geleneksel uygulamalarının çoğunda, betonarme dışındaki rekabetçi malzemeler tarafından neredeyse rakipsiz kaldığı anlamına gelir.

Yapı çelikleri, levhalar ve kesitler biçiminde, sıcak haddelenmiş durumda üretilir ve birçok bakımdan, altta yatan metalurji, esasen şerit kalitelerinde yer alan metalürjiye benzer. Ancak yapı çelikleri genellikle daha kalın ebatlarda ve daha yüksek dayanımlarda kullanılır ve süneklik/şekillendirilebilirlik yerine tokluk daha önemli bir gerekliliktir. Yapı çeliklerindeki karbon ve manganez gibi elementlerin daha yüksek seviyeleri, aynı zamanda, kaynaklı durumda mikro yapının kontrolü ve özelliklerin korunması konusunda daha ayrıntılı bir değerlendirme yapılmasını zorunlu kılmaktadır [43].

Yapı çeliklerinin mukavemetini ve tokluğunu etkileyen faktörler, özellikle de bu çeliklerin toplu üretiminden sorumlu olan ferrit-perlit mikroyapılarını içerenler üzerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ancak, ferrit tanelerinin rafine edilmesi hem akma mukavemetinde hem de tokluğun artmasına neden olduğu için en önemli konu ferrit tane boyutunun kontrolüdür. Bu etki, toklukta bir azalmanın eşlik ettiği katı çözelti güçlendirme ve çökelme güçlendirme gibi diğer güçlendirme mekanizmalarıyla keskin bir tezat oluşturur. Geleneksel sıcak haddelemede, yapı çelikleri yaklaşık 1250°C'lik bir sıcaklığa yeniden ısıtılacak ve haddeleme 1000°C civarındaki sıcaklıklarda tamamlanacaktır. Bu, ortam sıcaklığına soğutulduğunda kaba bir ferrit-perlit yapısına dönüşen tamamen yeniden kristalize, kaba östenitik bir yapı ile sonuçlanacaktır. Buna karşılık, bu, düşük seviyede tokluğa sahip malzeme verecektir ve mikro yapıyı iyileştirmek ve darbe mukavemetini iyileştirmek için ek normalleştirme işlemi gereklidir [43].

### **3.3. Dolu Silindirik Kesitli Profiller**

Bu profiller inşaat sektöründe yaygın bir kullanıma sahiptir. Çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Değişik çaplarda ve farklı uzunluklarda üretilmesi ve içeriğine göre işlenebilirlik kalitesinin değişiyor olmasıyla sıkça tercih edilen bir yapı elemanıdır.

### **3.4. Kare Profiller**

Kare profiller, silindirik profillere göre daha farklı alanlarda kullanılmaktadır. En sık kullanıldığı alan inşaat sektörüdür. Farklı et kalınlıkları ve farklı kesit alanları ile ihtiyaçları karşılayan kare profiller çelik konstrüksiyonun en temel elemanlarıdır. İnşaatların genel iskeletinde, çatı yapımında sıkça kullanılır. Mobilya sektöründe de kullanımı sıkça görülmektedir. Ağırlık dezavantajı bazı sektörlerde kullanımını zorlaştırır da dayanıklılığı ile birçok makine tasarımında akla ilk gelen ürün olmasını sağlamaktadır.

### **3.5. I Profiller**

Evrensel kirişler veya H-kirişler olarak da adlandırılan bu yapı çeliğinden oluşan kirişler, dikey destek sağlamak için güçlü bir merkeze sahiptir. Kendi başlarına kullanılabilirler, sürekli kirişler oluşturmak için birbirine kaynaklanabilirler ve beton içerisinde de kullanılabilirler. Hemen hemen her büyük yapı, I-kirişlerden destek gerektirir, bu da malzemeyi büyük ölçekli inşaat projelerinde en yaygın olanlardan biri haline getirir. Mekanik sistemlerin içerisinde de oldukça yaygın bir kullanıma sahiptir. En yaygın örneği biyel koludur. Genellikle dövme ile üretilen bu profil çeşitleri yüksek dayanım gerektiren mekanik sistemlerde kullanılır.



#### 4. TEZ ÇALIŞMASININ PLANLANMASI

Tez çalışması yapılırken kullanılan hesaplama ve analiz yöntemleri bu bölümde ele alınmıştır. Analitik hesaplamaların formüllerine teori bölümünde yer verilmiştir. Bu bölümde ise ANSYS analizlerinin nasıl yapıldığı, programdan alınan görseller yardımıyla bu bölümde anlatılmıştır. Bu bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda analitik hesaplamalar anlatılmıştır. İkinci kısımda ise ANSYS analizlerinin yapılma aşamalarına yer verilmiştir.

##### 4.1. Analitik Hesaplamalar

Analitik hesaplamalar yapılırken teori bölümünde anlatılmış olan Euler burkulma formülleri (3.15) kullanılır. Kullanılan profil şekline göre farklı sonuçların elde edildiği formülde atalet momentinin hesaplanması önemli bir noktadır. Literatürde bu profillerin atalet momenti değerleri ile karşılaşmak mümkündür. Farklı şekiller için farklı atalet momenti hesaplama formülleri üretilmiştir. Boşluklu yapılar için atalet momenti hesaplanırken, iki farklı alanın da atalet momenti değeri hesaplanır ve boşluk kısmın momenti et kalınlığıyla birlikte hesaplanan alanın atalet momentinden çıkarıldığında profilin atalet momenti bulunmuş olur. Dairesel yapılar için alan atalet momenti formülü aşağıda verilmiştir.

$$I = \frac{d^4 \pi}{64} \quad (4.1)$$

Burada; I: atalet momenti, d ise dairenin çapıdır. Farklı kesit alanına sahip profiller için ise atalet momenti aşağıdaki formülle hesaplanır.

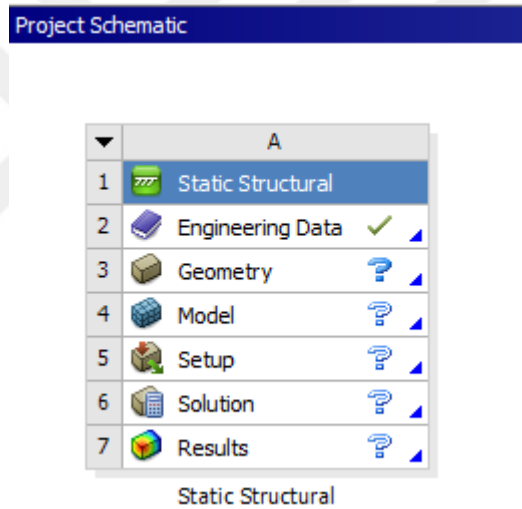
$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (4.2)$$

Burada; b değeri herhangi bir dikdörtgen veya karenin alt kenar uzunluğu, h ise diğer kenarının yani başka bir deyişle yüksekliğinin uzunluğudur. Kare ve dikdörtgen profiller için kullanılan atalet momenti formülüdür. Atalet momenti formülleri bilinen yapıların kritik burkulma yüklerini hesaplayabilmek için gerekli olan diğer değerler ise malzemenin elastisite modülü ve kullanılan profilin uzunluk değerleridir. (3.15) numaralı formülde değerler yerine koyulduğunda istenilen profilin kritik yük

değeri hesaplanabilir. Bu kısımda mesnetleme şeklinin de hesaba katılması ve uzunluğun, etkin uzunluk olarak formüle yazılması gerekir.

#### 4.2. Tarafımızdan Seçilen Değişik Kesitlerdeki ve Boyutlardaki Makine Bağlantı Elemanlarının Yapısal Analizi

Yapısal analizler için çeşitli programlar mevcuttur. Bu çalışmada ANSYS 2021 R2 programı kullanılmıştır. Bu program farklı disiplinlerde çalışma yapmak için birçok farklı modüle sahiptir. Bu tip makine elemanlarında analiz yapmak için ‘Static Structural’ modülünün kullanılması gerekmektedir. Bu arayüzde ve analiz boyunca kullanılan çeşitli arayüzlerde birim seçimi önemlidir. Bu analize ait pencere şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi her bir adım farklı işlemi temsil etmektedir.



Şekil 4.1. Yapısal analiz modülü penceresi

İşlem isimleri, adım isimlerinden kolaylıkla anlaşılabilir. 1 numaralı adımda, proje sayfasında hangi modülün kullanılıyor olduğu yazılıdır. Farklı bir modülde işlem yapılması gerektiğinde ve proje sayfasına farklı bir modül sürüklendiğinde, bu kısımda çalışma yapılan modülün ismi yazıyor olacaktır. 2 numaralı adımda ise çalışmada kullanılan malzeme bilgileri tanımlanır. Programın kendisinde tanımlı olan malzeme bilgileri bu kısımdan seçilebilir. Eğer herhangi bir seçim yapılmazsa program otomatik olarak yapı çeliğini malzeme olarak atayacaktır. Farklı malzemelerle çalışılmak isteniyorsa, programa yeni malzeme tanımlama işlemi yapılabilir.

Eğer farklı bir malzemeyle çalışılmak isteniyorsa ‘Engineering Data Sources’ kısmından malzeme tercihi yapılabilir.

Bu kısımdan tanımlı olan farklı malzemelerden biri seçilebilir. Mevcut malzemeler kopyalanarak üzerinde değişiklik yapılabilir. Programda bulunmayan malzemeler de programın bu bölümünde oluşturulabilir. Yeni malzeme tanımlanacaksa, tanımlanacak olan malzemenin bilgilerinin girilmesi gerekir.

Malzemenin tanımlanabilmesi için, malzeme kütüphanesinde yeni bir bölüm eklemek gerekir. Bu ekleme yapılırken kütüphaneye isim verilir ve sonra açılan yeni kütüphane içerisine kullanılacak olan malzeme bilgileri girilir.

Araç çubuğundan seçilen özellikler üzerinde değişiklikler yapılabilir. Hesaplamalar üzerinde gerekli kısıtlar araç çubuğundan seçilip, gerekli bilgilerin girilmesi ile analizler yapılır. Eğer yeni bir malzeme analizi için tanımlama gerekiyorsa şekil 4.2’deki ekran görüntüsünden faydalanılır.

|   | A                                | B   | C | D                                 |
|---|----------------------------------|-----|---|-----------------------------------|
| 1 | Contents of St 37                | Add |   | Source                            |
| 2 | Material                         |     |   |                                   |
| 3 | St 37                            | Add |   | C:\Users\CaEx\Documents\St 37.xml |
| * | Click here to add a new material |     |   |                                   |

Şekil 4.2. Yeni tanımlanan malzemenin analiz için aktifleştirilmesi

Bu şekilden, yeni tanımlanan malzemenin yapılacak olan analizde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Her farklı malzeme bölümü ayrı birer kütüphanedir. Burada oluşturulan yeni malzeme kendi başına bir malzeme kütüphanesini temsil etmektedir. Aynı malzeme kütüphanesinde birden fazla malzeme tanımlamak mümkündür. Bu adımdan sonra işlem basamağında bulunan tasarım adımına geçilir. Tasarım için iki farklı arayüzde çalışılabilir. Bu çalışmada, parametrik çalışma yapma ihtiyacı olduğu için ve kompleks bir şekil üzerinde çalışılmayacağı için ‘DesignModeler’ arayüzünün kullanılması daha uygun görülmüştür. Bütün açılan arayüzlerde ilk yapılan işlemin birim seçimi olması gerekir. Bu çalışmada boyut olarak mm seçilmiştir.

DesignModeler arayüzü açıldıktan sonra ilk işlem olarak birim seçilir. Birim seçimi yapıldıktan sonra ‘Create’ sekmesinden oluşturulmak istenen şeklin seçilmesi için

‘Primitives’ sekmesine gelinir. ‘Primitives’ sekmesi üzerinde beklendiğinde programın bünyesinde barındırdığı bazı şekiller karşımıza çıkar. Buradan, üzerinde çalışmak istenilen şekil seçilerek çalışma yapılabilir. Seçilen şekil ile ilgili farklı isterler karşımıza çıkar. Cismin boyu ve diğer ölçüleri girilerek tasarım yapılır, istenirse şekil üzerinde kesme, boşaltma gibi işlemler yapılabilir ve tasarım tamamlanır. Bununla ilgili resim şekil 4.3’de verilmiştir.

| Sketching Modeling                                 |                             |
|----------------------------------------------------|-----------------------------|
| Details View                                       |                             |
| [-] Details of Box1                                |                             |
| Box                                                | Box1                        |
| Base Plane                                         | XYPlane                     |
| Operation                                          | Add Material                |
| Box Type                                           | From One Point and Diagonal |
| Point 1 Definition                                 | Coordinates                 |
| <input type="checkbox"/> FD3, Point 1 X Coordinate | 0 mm                        |
| <input type="checkbox"/> FD4, Point 1 Y Coordinate | 0 mm                        |
| <input type="checkbox"/> FD5, Point 1 Z Coordinate | 0 mm                        |
| Diagonal Definition                                | Components                  |
| <input type="checkbox"/> FD6, Diagonal X Component | 30 mm                       |
| <input type="checkbox"/> FD7, Diagonal Y Component | 30 mm                       |
| <input type="checkbox"/> FD8, Diagonal Z Component | 30 mm                       |
| As Thin/Surface?                                   | No                          |

Şekil 4.3. Tasarım bilgileri giriş penceresi

Çalışmanın parametrik olması durumunda, parametrik çalışma yapılan ölçünün önünde bulunan kutucuk aktifleştirilir. Bu işlem ilk analiz sonucu alındıktan sonra yapılır.

Tasarım yapıldıktan sonra analiz için kuvvet ve mesnet bağlantı konumlarının girilmesi gerekir. Bu işlem şekil 4.1’de model bölümünden yapılır. Yapılan tasarım için profilin bir ucu sabitlenip, diğer uçtan kuvvet uygulanır. Uygulanan kuvvetin büyüklüğü 1 N girildiğinde kritik yük değeri bulunabilir. Örneğin, yük 2 N olarak uygulandığında kritik yük değeri  $\frac{1}{2}$  kadar azalır. Kritik yük değerine ek olarak, programdan istenen farklı analiz sonuçlarının elde edilebilmesi mümkündür. Çalışma bu kısma kadar yapısal analiz olarak gerçekleştirilmiştir. Yukarıda şekil 4.1’de gösterilen sayfaya geçilerek, “Static Structural” bölümüne “Eigenvalue Buckling” modülü eklenir ve sonuçlar sayfasına gidilir. Burada tanımlı modlar belirtilmektedir. Alınan sonuçların parametrik olması için tasarım sayfasında yapılmış olan işlem, burada da istenen sonuçlar için yapılır. Böylece bu kısımda, tek sayfada, tek değer

için yapılmış analiz üzerinden istenen değerlerin girdisi yapılarak birden çok sonuç alınabilir.

#### 4.3. Analizlerde Tasarlanan Profillerin Mesh Kriteri Değerleri

Yukarıda bahsedilen profil tasarımından sonra, profil üzerinde sonlu elemanlar metodu çözümü için mesh ataması yapılır. Program bu atamayı otomatik olarak yapabildiği gibi, tanımlanan kriterlere göre de bir mesh ataması yapabilir. Her bir profil çeşidi için mesh kriterleri farklı olarak programdan alınmış ve çalışmada tablo halinde verilmiştir. Mesh değerlerinin bu aralıklarda olması, analizin doğruluğunu ve kabul edilebilirliğini göstermektedir. Mesh kalitesinde, Skewness Kriterinin 0,95 altında olması, Ortogonal Kalite Kriterinin ise 0,14 üzerinde olması gerekmektedir [44]. Mesh şekli ve boyutlarına göre alınan sonuçların doğruluğu artmaktadır.

Tablo 4.1. Mesh kriteri değerleri

|                               | Maksimum<br>Ortogonal<br>Kalite<br>Kriteri | Minimum<br>Ortogonal<br>Kalite<br>Kriteri | Maksimum<br>Skewness<br>Kriteri | Minimum<br>Skewness<br>Kriteri | Maksimum<br>Eleman<br>Kalitesi | Minimum<br>Eleman<br>Kalitesi |
|-------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Dolu<br>Silindirik<br>Profil  | 0,99                                       | 0,87                                      | 0,41                            | 0,04                           | 0,96                           | 0,67                          |
| 40x40<br>Kare Profil          | 0,89                                       | 0,71                                      | 0,5                             | 0,29                           | 0,52                           | 0,5                           |
| 25x25<br>Kare Profil          | 0,94                                       | 0,71                                      | 0,5                             | 0,2                            | 0,38                           | 0,37                          |
| 20x40<br>Dikdörtgen<br>Profil | 0,89                                       | 0,7                                       | 0,5                             | 0,29                           | 0,36                           | 0,35                          |

Kriterlerin gerekli aralıklarda olması için özel mesh tanımlarının gerektiği durumlar olmaktadır. Bu sebeple analizler yapılırken, gerekli şartların sağlanabilmesi için birkaç kez mesh atama işleminin yapılması gerekir. Mesh atama işleminin otomatik olarak yapıldığı durumlarda, analizlerde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilir. Bazı profil çeşitlerinde analiz sonucunun alınamaması, bu sorunlardan en sık rastlananlarından biridir. Bu tür sorunlar ile karşılaşmamak ve daha net sonuçlar elde edebilmek için, mesh ataması yapıldıktan sonra, Ortogonal Kalite ve Skewness Kriteri değerlerinin istenilen aralıkta olmasına dikkat edilmelidir.

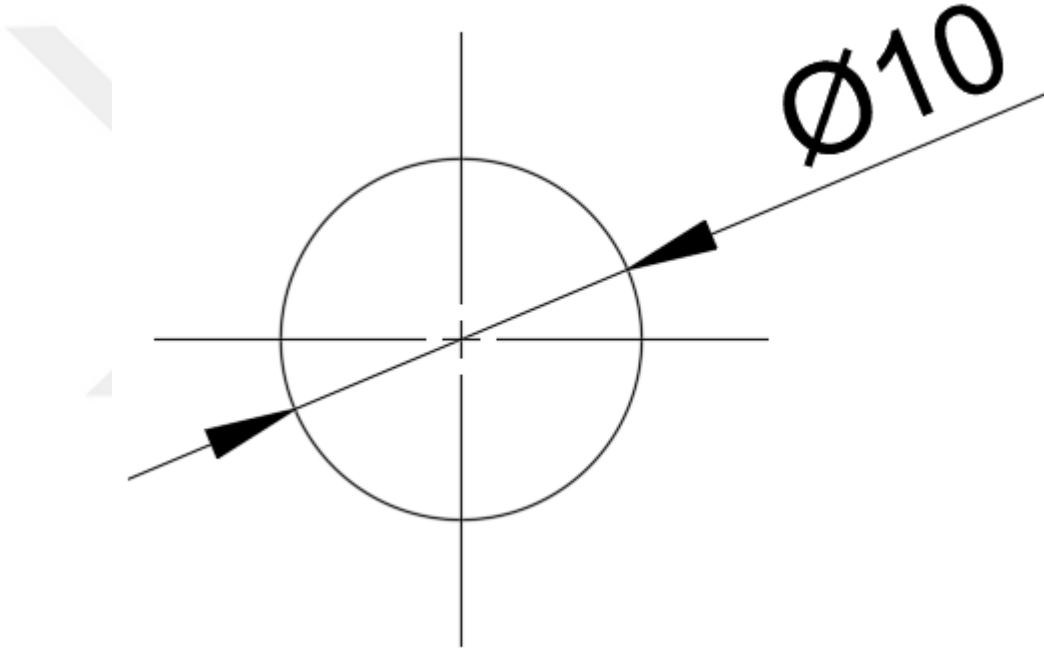


## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE BULGULAR

Çalışmada, ANSYS 2021 R2 programı kullanılmış ve çeşitli malzemeler seçilerek bağlantı elemanları üzerinde analitik hesaplamalar ve analizler yapılmıştır. İncelenen profillerin kesitleri ve ölçülerine aşağıda yer verilmiştir.

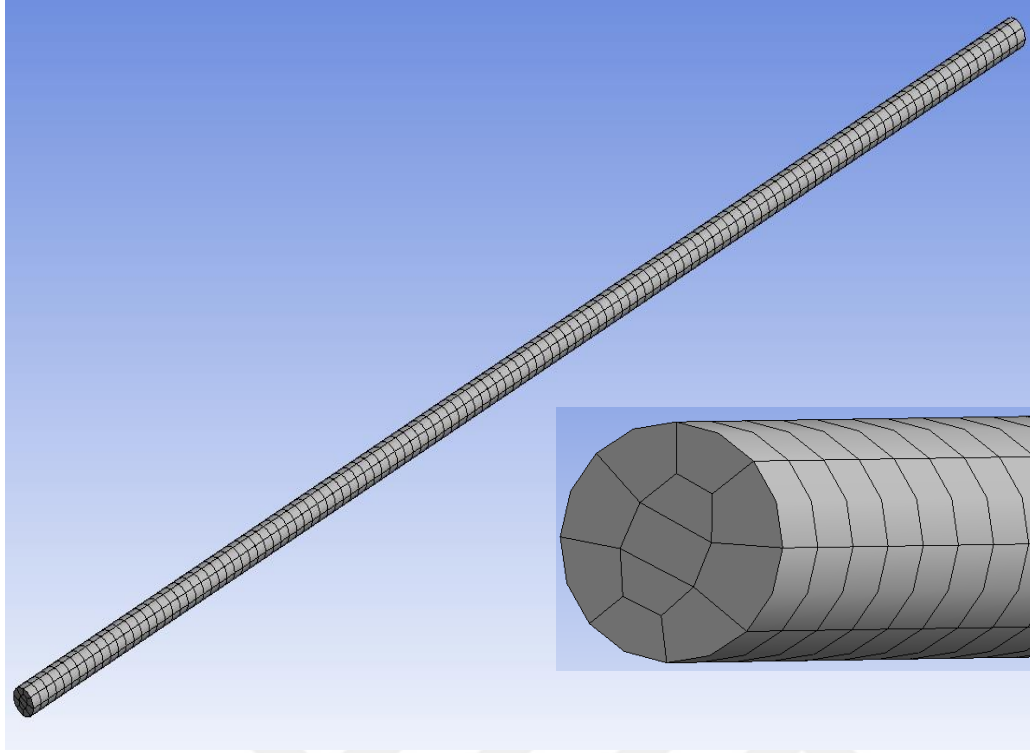
### 5.1. Dolu Silindirik Kesitli Profil- St 37

Hesaplamaları yapılmış olan profillerin kesitleri AutoCAD programında ölçüleri ile çizilmiştir. Farklı malzemeler için profillerin kesitlerine ayrı ayrı yer verilmemiştir. İlgili profilin ilk başlığı altında kesit resimleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Dolu silindirik profil kesit resmi

Analizlerde kullanılan ve analitik hesaplamaları yapılan dolu silindirik profilin kesiti şekil 5.1’de verilmiştir. Profilin çapları değişken olarak ele alınmış ve ilk çap olarak 10 mm’lik çap değerinin kesitine, çalışmamızda yer verilmiştir.



Şekil 5.2. Dolu silindirik profil mesh modeli

Analizler yapılırken, tasarlanan bağlantı elemanları üzerinde sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapıldığı için mesh ataması yapılır. Bu atama program tarafından otomatik olarak yapılabilir ve üzerinde değişiklik yapabilmek mümkündür. Dolu silindirik profil için programın otomatik atadığı mesh kalitesi gerekli kaliteyi sağladığı için otomatik atanan mesh üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır [44]. Kullanılan farklı profil şekilleri için, ilk malzemenin başlığı altında profillerin mesh görüntülerine yer verilmiştir.

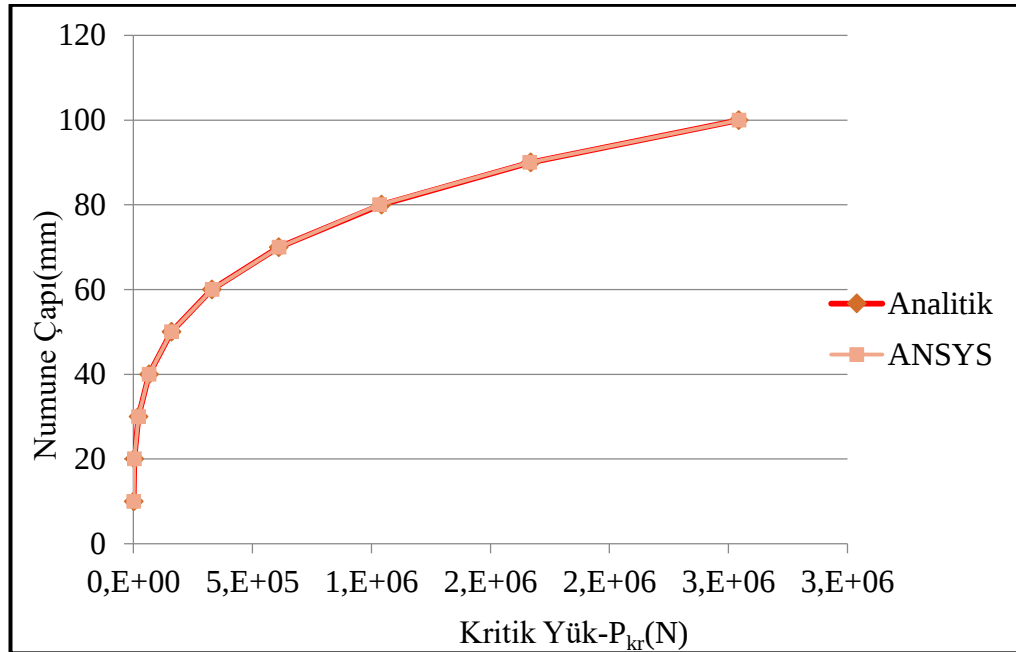
Tablo 5.1. St 37 malzemeden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri

| D<br>(Çap)<br>(mm) | I (Atalet<br>Momenti)<br>(mm <sup>4</sup> ) | E<br>(MPa) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|--------------------|---------------------------------------------|------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------|---------------|
| 10                 | 490,87                                      | 210000     | 1000      | 254,35                          | 254,02                       | 0,33  | 0,13          |
| 20                 | 7853,98                                     | 210000     | 1000      | 4069,57                         | 4065,92                      | 3,66  | 0,09          |
| 30                 | 39760,78                                    | 210000     | 1000      | 20602,22                        | 20590,64                     | 11,58 | 0,06          |
| 40                 | 125663,71                                   | 210000     | 1000      | 65113,18                        | 65094,52                     | 18,66 | 0,03          |
| 50                 | 306796,16                                   | 210000     | 1000      | 158967,73                       | 158957,20                    | 10,53 | 0,01          |

Tablo 5.1. (Devam) St 37 malzemeden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri

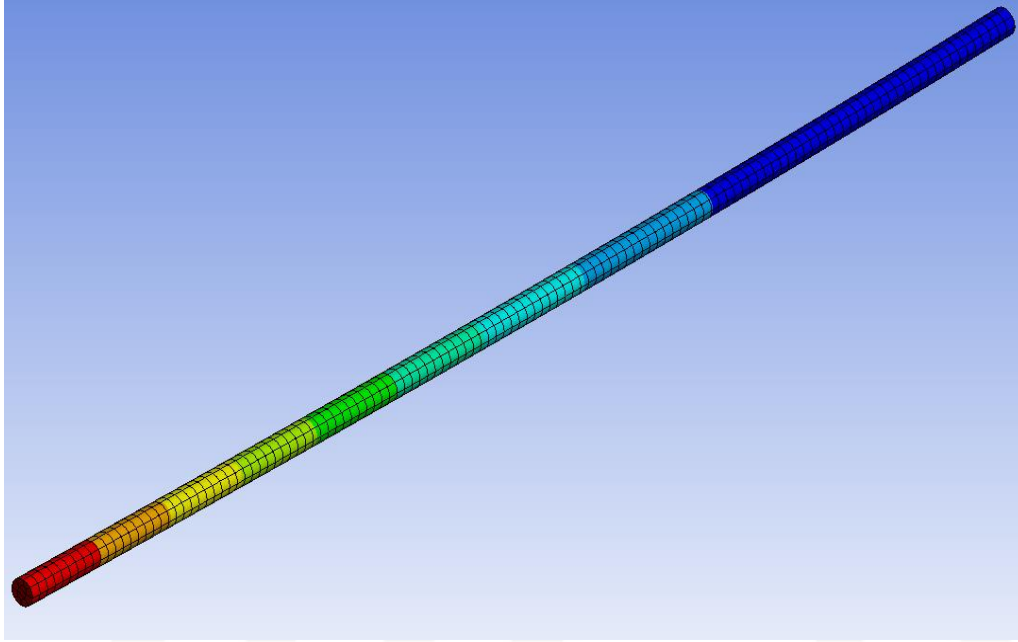
|     |            |        |      |            |            |         |      |
|-----|------------|--------|------|------------|------------|---------|------|
| 60  | 636172,51  | 210000 | 1000 | 329635,48  | 329666,44  | 30,96   | 0,01 |
| 70  | 1178588,12 | 210000 | 1000 | 610690,42  | 611380,47  | 690,05  | 0,11 |
| 80  | 2010619,30 | 210000 | 1000 | 1041810,90 | 1033706,26 | 8104,64 | 0,78 |
| 90  | 3220623,34 | 210000 | 1000 | 1668779,61 | 1664160,53 | 4619,08 | 0,28 |
| 100 | 4908738,52 | 210000 | 1000 | 2543483,63 | 2544046,11 | 562,47  | 0,02 |

St 37 malzeme kullanılarak üretilen dolu silindirik kesitli profil üzerinde analitik hesaplamalar ve ANSYS analizi yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda çıkan sonuçlar ve analiz sonuçları birbirini doğrulamıştır. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları birçok çalışmada karşılaştırmalı olarak kullanılmıştır. Çalışmalar arasında farklı malzeme, farklı analiz yöntemleri ve formüller kullanılmıştır [21]. Çalışmamızın bu adımında yapılan hesaplamalarda, profilin boyu bir metre olarak alınmış ve çapın kritik yük değerine etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Çıkan sonuçlardan kritik yük değerinin çapın artmasıyla doğru orantılı olarak arttığı anlaşılmaktadır. Çıkan sonuçların birbirine yakınlığı ise analitik hesaplamaların ve analizin doğruluğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 5.3. St 37 malzemeden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri grafiği

Hesaplamalardan ulaşılan sonuçlar karşılaştırılarak grafiğe dökülmüştür. Sonuçların birbirine yakınlığı grafik üzerinde de görülmektedir. İki farklı eğri ile verilen sonuçların birbirine yakınlığı iki çizginin neredeyse tek izgiymiş gibi görünmesine sebebiyet vermiştir. Grafik ap değerine göre kritik yük değerinin değişimini iki farklı metot için bize sunmaktadır.



şekil 5.4. 10 mm çaplı dolu silindirik kesitli 1 metre uzunluğunda profilin örnek analiz resmi

Yapılan analizlerin sonucunda ortaya çıkabilecek burkulma durumlarına ait simülasyon resmi, örnek olarak verilmiştir. Kuvvetin uygulandığı kısım, en büyük gerilmenin ve şekil değişikliğinin görüldüğü kısım olmuştur. Mesh bağlantı noktalarında gösterilen değerler, o noktalarda meydana gelen şekil değişikliği büyüklüğünü milimetrik olarak göstermektedir.

## 5.2. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Yapı eliği

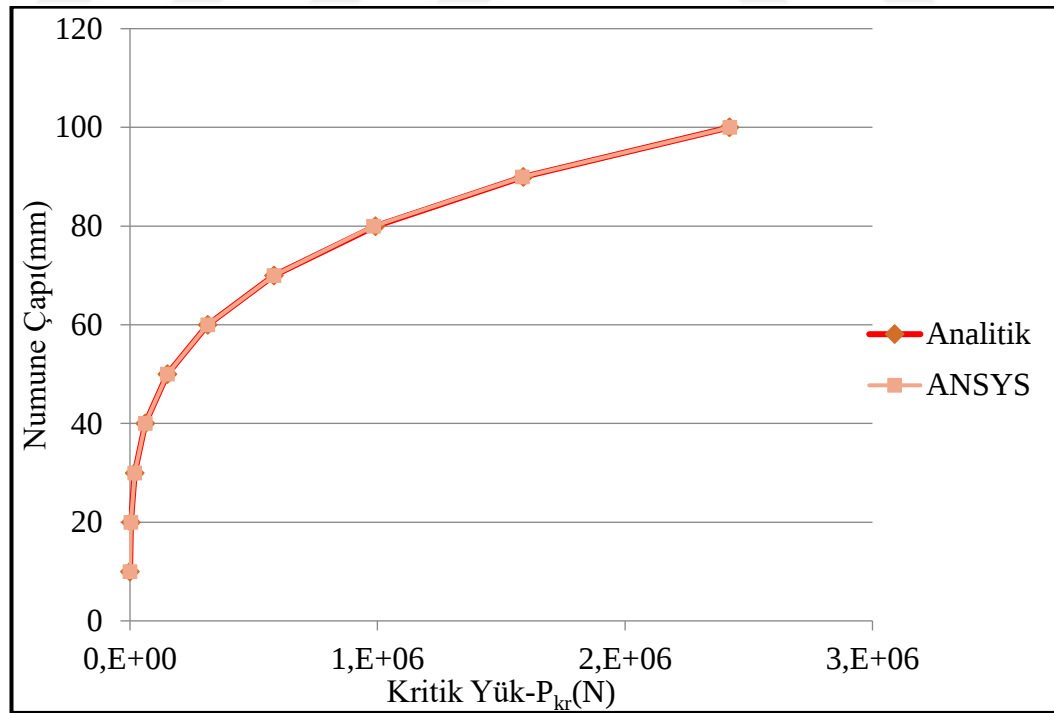
Tablo 5.2. Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri

| D<br>(ap)<br>(mm) | I (Atalet<br>Momenti)<br>(mm <sup>4</sup> ) | E<br>(MPa) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|--------------------|---------------------------------------------|------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 10                 | 490,87                                      | 200000     | 1000      | 242,24                          | 241,93                       | 0,31 | 0,13          |
| 20                 | 7853,98                                     | 200000     | 1000      | 3875,78                         | 3872,30                      | 3,49 | 0,09          |

Tablo 5.2. (Devam) Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profillerin kritik yük değerleri

|     |            |        |      |            |            |         |      |
|-----|------------|--------|------|------------|------------|---------|------|
| 30  | 39760,78   | 200000 | 1000 | 19621,16   | 19610,12   | 11,04   | 0,06 |
| 40  | 125663,71  | 200000 | 1000 | 62012,55   | 61994,78   | 17,77   | 0,03 |
| 50  | 306796,16  | 200000 | 1000 | 151397,84  | 151387,84  | 10,00   | 0,01 |
| 60  | 636172,51  | 200000 | 1000 | 313938,55  | 313968,05  | 29,50   | 0,01 |
| 70  | 1178588,12 | 200000 | 1000 | 581609,92  | 582267,15  | 657,23  | 0,11 |
| 80  | 2010619,30 | 200000 | 1000 | 992200,85  | 984482,24  | 7718,61 | 0,78 |
| 90  | 3220623,34 | 200000 | 1000 | 1589313,92 | 1584914,79 | 4399,12 | 0,28 |
| 100 | 4908738,52 | 200000 | 1000 | 2422365,37 | 2422901,03 | 535,66  | 0,02 |

Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan sonra analiz programında, profil tasarlanıp kritik yük değerleri hesaplanmıştır. Çıkan sonuçlar arasında büyük oranda tutarlılık gözlenmiştir. Profilin boyunun bir metre olarak alındığı hesaplamalarda ve analiz sonuçlarında, kritik yük değerinin, çap değeri arttıkça arttığı bulunmuştur.



Şekil 5.5. Yapı çeliğinden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri grafiği

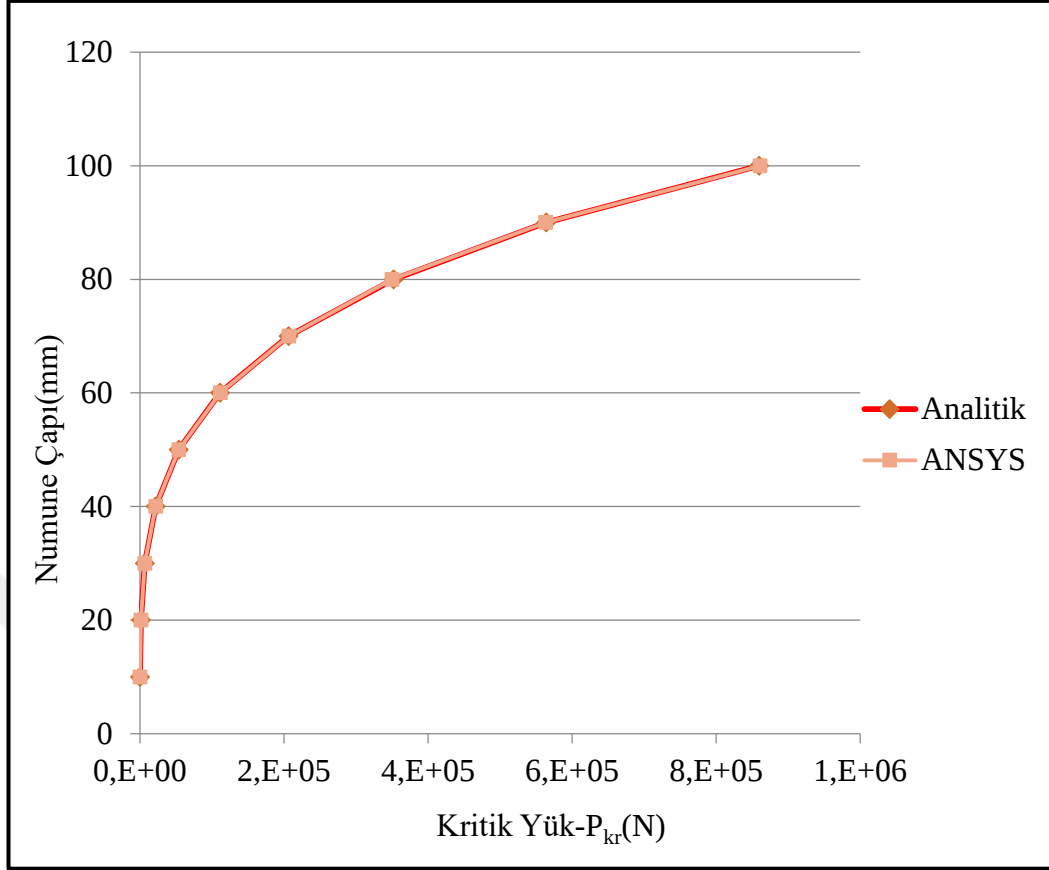
Analitik sonuçlardan elde edilen kritik yük değerleri ile ANSYS programından elde edilen kritik yük değerleri grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Çap değeri belirli değişken olarak,  $P_{kr}$  değeri ise belirsiz değişken olarak grafiğe aktarılmıştır. İki farklı metot ile bulunan sonuçlar birbirine çok yakın çıktığı için grafikte sonuçları gösteren eğriler üst üste gelmiştir. Çıkan sonuçların yakınlığı grafikten de anlaşılmıştır.

### 5.3. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Alüminyum Alaşım

Tablo 5.3. Alüminyum alaşımdan üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri

| D<br>(Çap)<br>(mm) | I (Atalet<br>Momenti)<br>(mm <sup>4</sup> ) | E<br>(MPa) | L<br>(mm) | Analitik<br>$P_{kr}$ (N) | ANSYS<br>$P_{kr}$ (N) | Fark    | Hata<br>Oranı |
|--------------------|---------------------------------------------|------------|-----------|--------------------------|-----------------------|---------|---------------|
| 10                 | 490,87                                      | 71000      | 1000      | 85,99                    | 85,89                 | 0,10    | 0,12          |
| 20                 | 7853,98                                     | 71000      | 1000      | 1375,90                  | 1374,99               | 0,91    | 0,07          |
| 30                 | 39760,78                                    | 71000      | 1000      | 6965,51                  | 6963,95               | 1,56    | 0,02          |
| 40                 | 125663,71                                   | 71000      | 1000      | 22014,46                 | 22017,86              | 3,41    | 0,02          |
| 50                 | 306796,16                                   | 71000      | 1000      | 53746,23                 | 53771,86              | 25,63   | 0,05          |
| 60                 | 636172,51                                   | 71000      | 1000      | 111448,19                | 111530,20             | 82,01   | 0,07          |
| 70                 | 1178588,12                                  | 71000      | 1000      | 206471,52                | 206847,58             | 376,06  | 0,18          |
| 80                 | 2010619,30                                  | 71000      | 1000      | 352231,30                | 349848,64             | 2382,66 | 0,68          |
| 90                 | 3220623,34                                  | 71000      | 1000      | 564206,44                | 563298,52             | 907,92  | 0,16          |
| 100                | 4908738,52                                  | 71000      | 1000      | 859939,70                | 861023,14             | 1083,44 | 0,13          |

Alüminyum alaşımdan üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda uzunluk değeri bir metrede sabit tutulmuş ve çap ölçüleri artırılmıştır. Çap değerinin artırılması ile kritik yük değerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı malzeme özellikleri ve ölçülere sahip profiller analiz programında tasarlanıp kritik yük değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler ve analiz programından alınan değerlerin arasında çok az fark olduğu görülmüştür.



Şekil 5.6. Alüminyum alaşımdan üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri grafiği

Analitik hesaplamaların sonuçları ve analiz programından alınan sonuçlar grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafik üzerinde değerler ile oluşturulan çizgi, her iki yöntemin sonuçlarının çok yakın olması sebebiyle hemen hemen tek çizgi halinde görünmektedir.

#### 5.4. Dolu Silindirik Kesitli Profil- Karbon Fiber

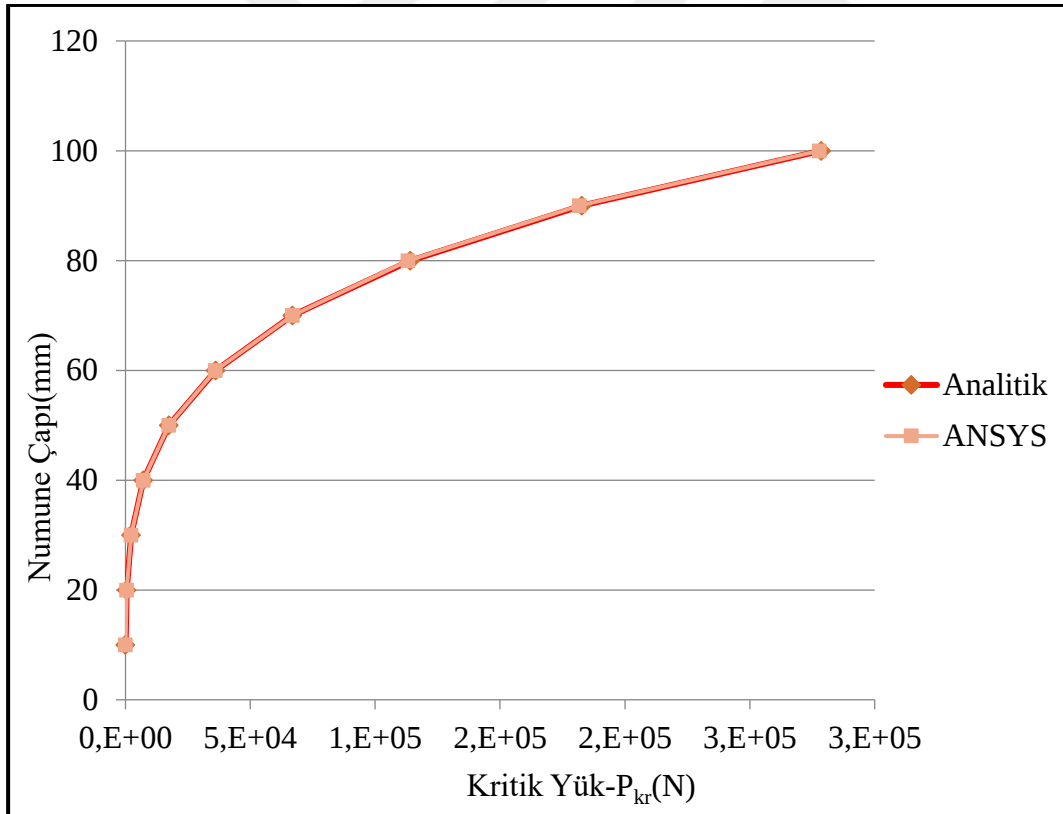
Tablo 5.4. Karbon fiberden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri

| D<br>(Çap)<br>(mm) | I (Atalet<br>Momenti)<br>(mm <sup>4</sup> ) | E<br>(MPa) | L<br>(mm) | Analitik<br>$P_{kr}$ (N) | ANSYS<br>$P_{kr}$ (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|--------------------|---------------------------------------------|------------|-----------|--------------------------|-----------------------|-------|---------------|
| 10                 | 490,87                                      | 23000      | 1000      | 27,86                    | 27,81                 | 0,04  | 0,16          |
| 20                 | 7853,98                                     | 23000      | 1000      | 445,72                   | 445,07                | 0,65  | 0,14          |
| 30                 | 39760,78                                    | 23000      | 1000      | 2256,43                  | 2253,34               | 3,10  | 0,14          |
| 40                 | 125663,71                                   | 23000      | 1000      | 7131,44                  | 7121,72               | 9,73  | 0,14          |
| 50                 | 306796,16                                   | 23000      | 1000      | 17410,75                 | 17386,02              | 24,73 | 0,14          |

Tablo 5.4. (Devam) Karbon fiberden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri

|     |            |       |      |           |           |         |      |
|-----|------------|-------|------|-----------|-----------|---------|------|
| 60  | 636172,51  | 23000 | 1000 | 36102,93  | 36047,14  | 55,79   | 0,15 |
| 70  | 1178588,12 | 23000 | 1000 | 66885,14  | 66833,29  | 51,85   | 0,08 |
| 80  | 2010619,30 | 23000 | 1000 | 114103,10 | 113202,49 | 900,61  | 0,79 |
| 90  | 3220623,34 | 23000 | 1000 | 182771,10 | 181701,77 | 1069,33 | 0,59 |
| 100 | 4908738,52 | 23000 | 1000 | 278572,02 | 277827,97 | 744,05  | 0,27 |

Karbon fiber malzeme kullanılarak üretildiği varsayılan dolu silindirik kesitli profil üzerinde burkulma analizi ve analitik hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan analizlerde ve hesaplamalarda çap değeri değişken olarak hesaba katılmış, profilin uzunluğu sabit tutulmuştur. Yapılan hesaplamaların ve analizlerin sonuçları birbirine çok yakın bulunmuştur.

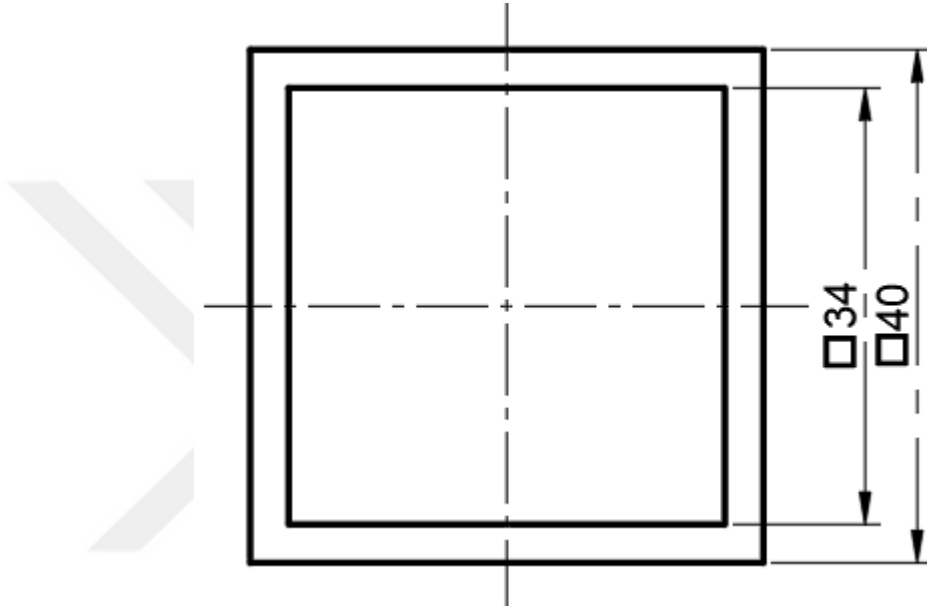


Şekil 5.7. Karbon fiberden üretilmiş dolu silindirik kesitli profilin kritik yük değerleri grafiği

Analitik hesaplamaların sonuçları ve analiz sonuçları aynı grafik üzerinde farklı çizgilerle karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. İki farklı yöntemin sonuç çizgilerinin birbirine yakınlığı, bulunan sonuçların benzerliğini göstermektedir.

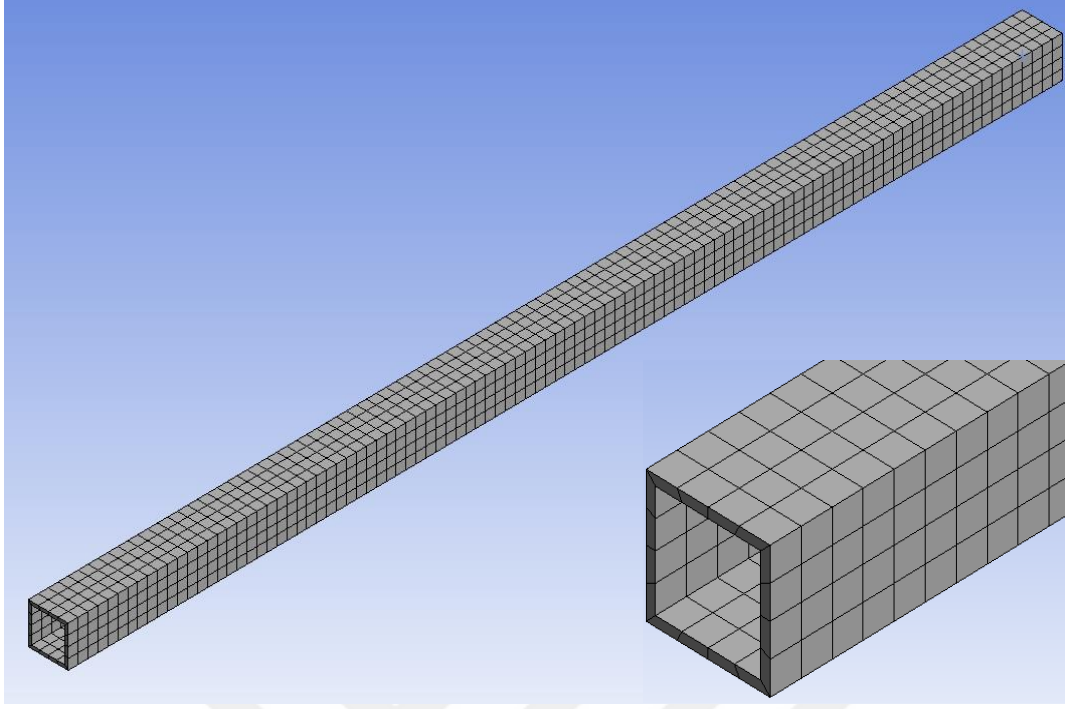
#### 5.5. 40x40 Kare Profil- St 37

İnşaat sektöründe ve sanayide sık kullanılan 40x40 kare profil kesit resmine aşağıdaki şekilde yer verilmiştir.



Şekil 5.8. 40x40 kare profil kesit resmi

Şekilde verilen 40x40 kesit profil, ölçülerden anlaşılabildiği gibi 3 milimetrelik bir et kalınlığına sahiptir. Hesaplamalarda ve analizlerde profilin uzunluğu değişken olarak ele alınmıştır.



Şekil 5.9. 40x40 kare profil mesh modeli

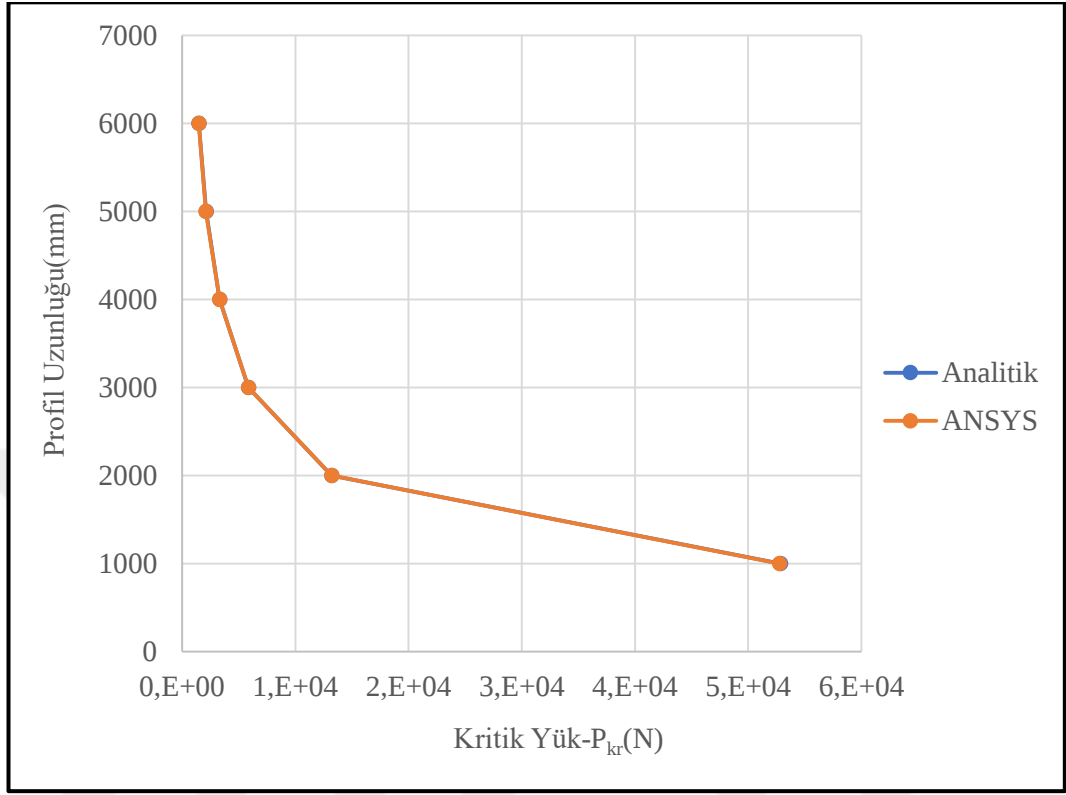
Oluşturulan mesh modelinde eleman boyutu 10 milimetre olarak seçilip, tasarlanmıştır. Bu mesh ölçüleri gerekli kriterleri sağlamıştır.

Tablo 5.5. St 37 40x40 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------|---------------|
| 210000     | 101972                  | 1000      | 52837,22                        | 52759,35                     | 77,87 | 0,15          |
| 210000     | 101972                  | 2000      | 13209,31                        | 13209,46                     | 0,16  | 0,00          |
| 210000     | 101972                  | 3000      | 5870,80                         | 5871,78                      | 0,97  | 0,02          |
| 210000     | 101972                  | 4000      | 3302,33                         | 3302,75                      | 0,42  | 0,01          |
| 210000     | 101972                  | 5000      | 2113,49                         | 2111,71                      | 1,78  | 0,08          |
| 210000     | 101972                  | 6000      | 1467,70                         | 1467,94                      | 0,24  | 0,02          |

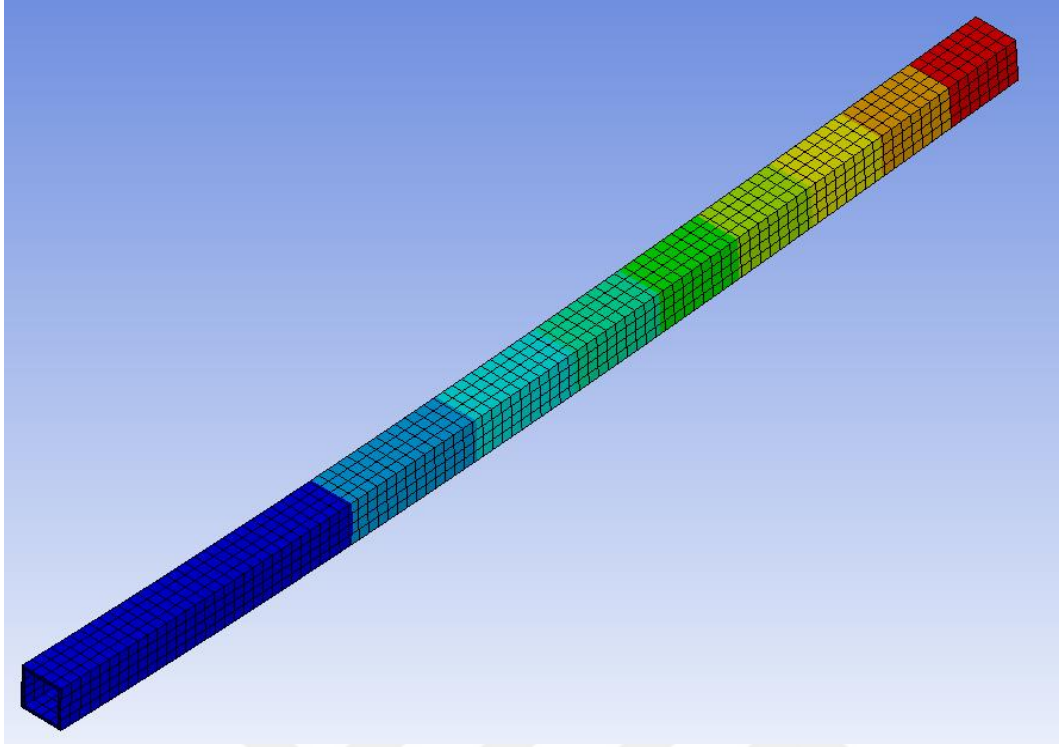
40x40 kesitlere sahip kare profil üzerinde analitik hesaplamalar ve analizler yapılmıştır. Profilin et kalınlığı 3 mm olarak alınmıştır. St 37 malzemenin kullanıldığı profilin analitik hesaplamaları yapılırken, profilin boyu değişken olarak hesaba katılmıştır. 1 m ile 6 m arasında değişen uzunluk değerlerine göre farklı kritik yük değerleri elde edilmiştir. Aynı uzunluklara sahip profiller analiz programında

simüle edilmiştir. Analiz programı yardımıyla bulunan kritik yük değerleri, analitik hesaplamalar ile birbirine yakın değerler olarak bulunmuştur.



Şekil 5.10. St 37 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği

Hesaplamalardan bulunan sonuçlar ve analiz programından bulunan sonuçlar grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Profil uzunluğu ve kritik yük değerlerine grafikte yer verilmiştir. Bulunan sonuçların yakınlığı grafik üzerinde net olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.11. 40x40 kare profil analiz resmi

40x40 kare profilin analizinden alınmış analiz resmi şekilde verilmiştir. Profil üzerinde analitik çalışma yapılmıştır. Farklı malzeme türleri ve farklı uzunluklar için tek bir tasarım üzerinden parametrik çalışarak sonuç alınmıştır.

#### 5.6. 40x40 Kare Profil- Yapı Çeliği

Tablo 5.6. Yapı çeliği 40x40 kare profil kritik yük değerleri

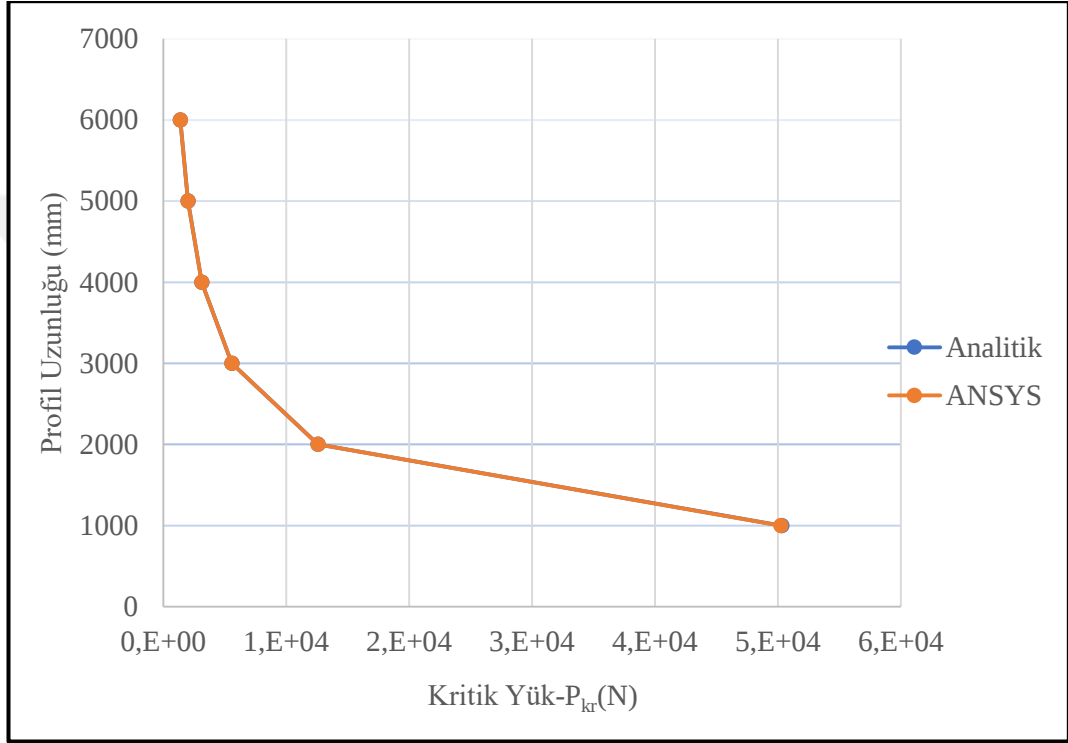
| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------|---------------|
| 200000     | 101972                  | 1000      | 50321,16                        | 50246,97                     | 74,19 | 0,15          |
| 200000     | 101972                  | 2000      | 12580,29                        | 12580,46                     | 0,16  | 0,00          |
| 200000     | 101972                  | 3000      | 5591,24                         | 5591,93                      | 0,69  | 0,01          |
| 200000     | 101972                  | 4000      | 3145,07                         | 3145,50                      | 0,43  | 0,01          |
| 200000     | 101972                  | 5000      | 2012,85                         | 2012,99                      | 0,14  | 0,01          |
| 200000     | 101972                  | 6000      | 1397,81                         | 1398,02                      | 0,21  | 0,02          |

40x40 profilin burkulma hesapları analitik olarak yapılmıştır. Profilin et kalınlığı 3 mm'dir. Malzeme olarak yapı çeliği kullanılmıştır. Uzunluk 1 m ile 6 m arasında

değişken olarak seçilmiştir. Bu uzunluk değişimine göre, kritik burkulma yükünün nasıl değişeceği bulunmak istenmiştir.

Aynı zamanda değişimin iki farklı metot ile yapılmış olması sonuçların doğruluğunun yorumlanmasına katkı sağlamıştır.

İki farklı metot ile bulunan sonuçlar birbirine yakın bulunmuştur. Bu sonuçlar hesaplamaların ve analizlerin doğruluğunu göstermiştir.



Şekil 5.12. Yapı çeliğinden üretilmiş 40x40 kare profilin kritik yük değerleri grafiği

Yapılan analizlerin ve hesaplamaların sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla, bulunan sonuçlar grafik üzerinde kıyaslanmıştır. Alınan sonuçların yakınlığı grafik üzerinde görülmektedir.

### 5.7. 40x40 Kare Profil- Alüminyum Alaşım

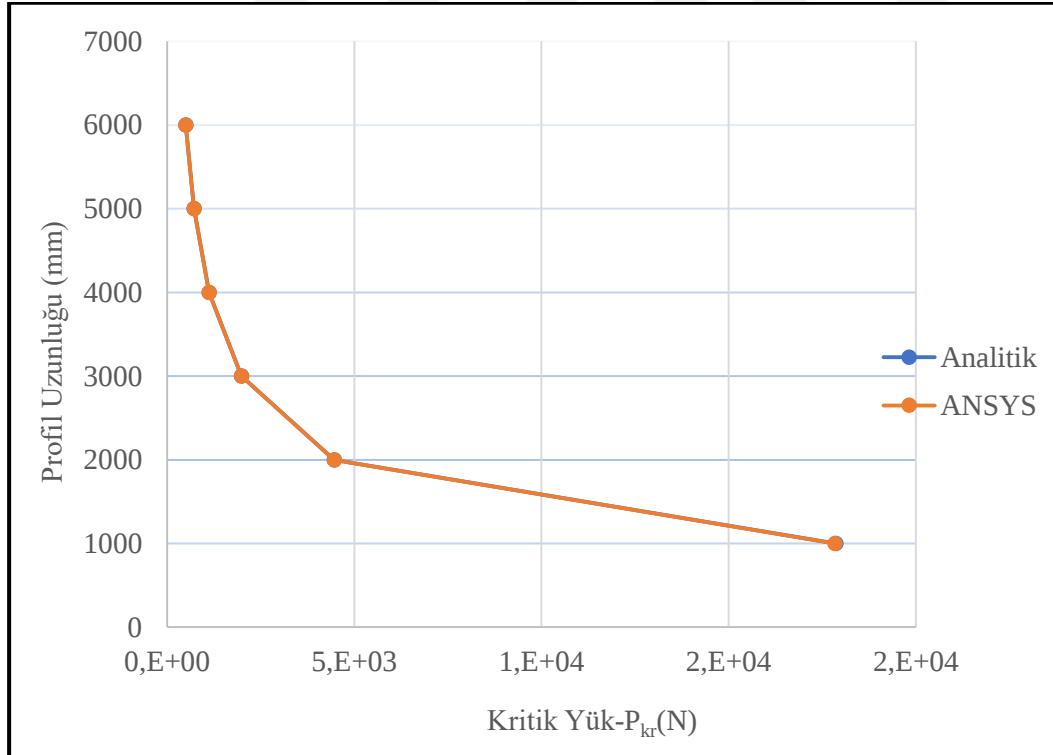
Kare profil 40x40 kesit alanına ve 3 mm et kalınlığına sahip profil üzerinde analitik hesaplamalar ve analizler yapılmıştır.

Hesaplamalarda, uzunluk değişken olarak alınmıştır. Malzeme olarak alüminyum alaşım kullanılmıştır.

Tablo 5.7. Alüminyum alaşım 40x40 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------|---------------|
| 71000      | 101972                  | 1000      | 17864,01                        | 17842,10                     | 21,91 | 0,12          |
| 71000      | 101972                  | 2000      | 4466,00                         | 4466,65                      | 0,64  | 0,01          |
| 71000      | 101972                  | 3000      | 1984,89                         | 1985,34                      | 0,45  | 0,02          |
| 71000      | 101972                  | 4000      | 1116,50                         | 1116,76                      | 0,26  | 0,02          |
| 71000      | 101972                  | 5000      | 714,56                          | 714,73                       | 0,17  | 0,02          |
| 71000      | 101972                  | 6000      | 496,22                          | 496,32                       | 0,10  | 0,02          |

Kare profil üzerinde yapılan analitik hesaplamaların ve analiz sonuçlarının değerleri yukarıda tablo içerisinde verilmiştir. Uzunluğun artmasıyla kritik yük değerinin hem analitik hesaplamalarda hem de analiz sonuçlarında azaldığı görülmüştür. Analiz sonuçları ve analitik hesaplamaların sonuçlarının yakınlığı, yapılan hesaplamaların ve analiz sonuçlarının doğruluğunu ispatlar niteliktedir.



Şekil 5.13. Alüminyum alaşım 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği

Elde edilen sonuçlara karşılaştırmalı olarak grafik üzerinde yer verilmiştir. Hesaplamaların ve analizlerin değerlerinin yakınlığı grafik üzerinde çok açık şekilde görülmektedir.

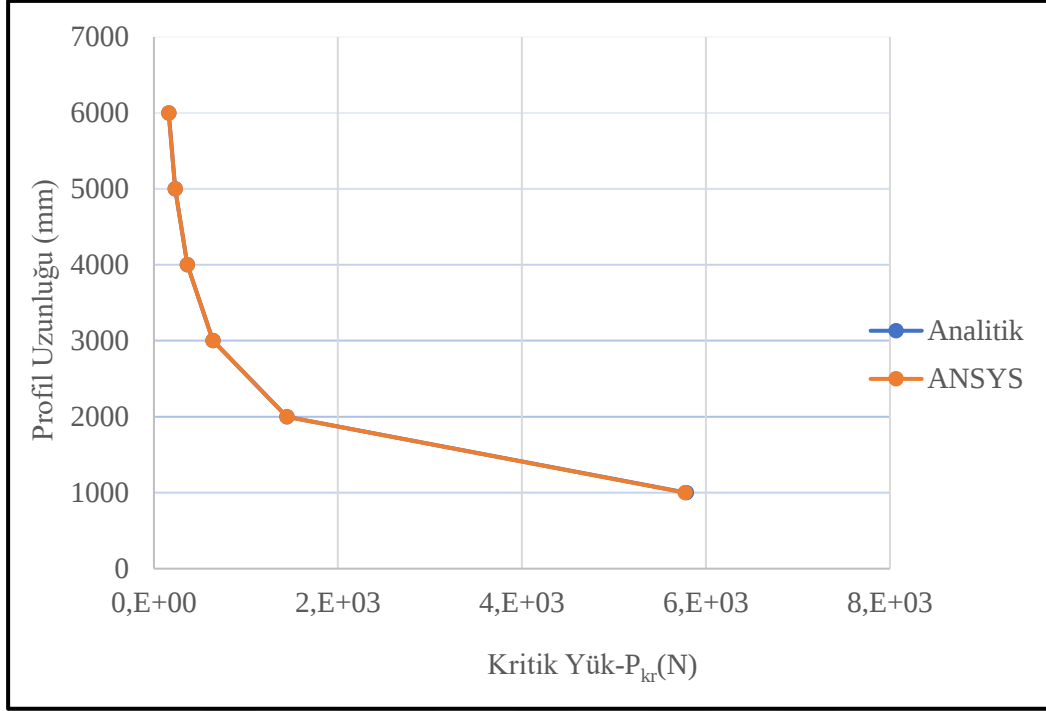
#### 5.8. 40x40 Kare Profil- Karbon Fiber

Tablo 5.8. Karbon fiber 40x40 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark  | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|-------|---------------|
| 23000      | 101972                  | 1000      | 5786,93                         | 5772,15                      | 14,78 | 0,26          |
| 23000      | 101972                  | 2000      | 1446,73                         | 1446,01                      | 0,72  | 0,05          |
| 23000      | 101972                  | 3000      | 642,99                          | 642,90                       | 0,09  | 0,01          |
| 23000      | 101972                  | 4000      | 361,68                          | 361,72                       | 0,04  | 0,01          |
| 23000      | 101972                  | 5000      | 231,48                          | 231,47                       | 0,01  | 0,00          |
| 23000      | 101972                  | 6000      | 160,75                          | 160,75                       | 0,00  | 0,00          |

Karbon fiber malzemeden üretilmiş 40x40 kare profilin kritik yük değerleri analitik olarak ve analiz programı üzerinden elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde, uzunluğu 1 metre ile 6 metre arasında değişen bağlantı elemanları kullanılmıştır. İki farklı yöntemden elde edilen sonuçlar birbiriyle çok yakın bulunmuştur.

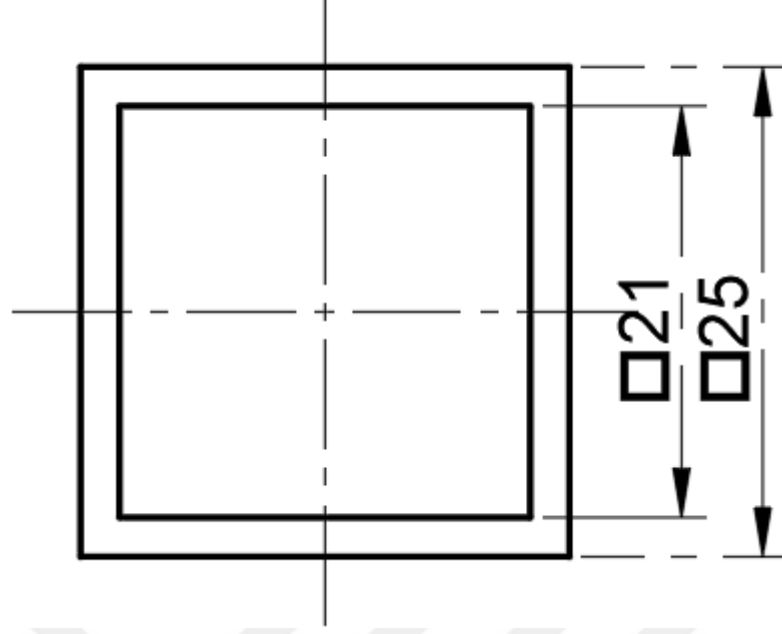


Şekil 5.14. Karbon fiber 40x40 kare profil kritik yük değerleri grafiği

Hesaplamalar ve analizlerden ulaşılan sonuçlar grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafik üzerinde analitik hesaplamaların ve analiz sonuçlarının yakınlığı görülmektedir.

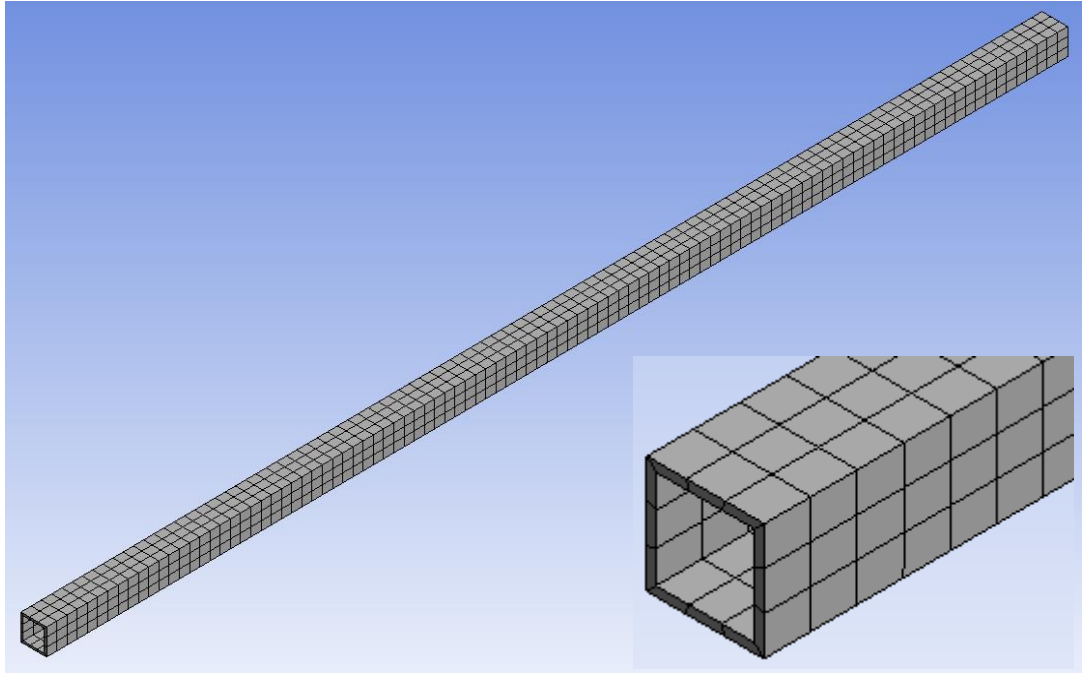
### 5.9. 25x25 Kare Profil- St 37

Çalışmamızın bir diğer profili olan 25x25 kare profilin kesitine aşağıdaki şekilde yer verilmiştir.



Şekil 5.15. 25x25 kare profil kesit resmi

Kullanılan 25x25 kare profilin kesit ölçülerine yukarıda yer verilmiştir. Profil 2 milimetrelilik et kalınlığına sahiptir. Hesaplamalarda ve analizlerde profilin uzunlukları değişken olarak ele alınmıştır.



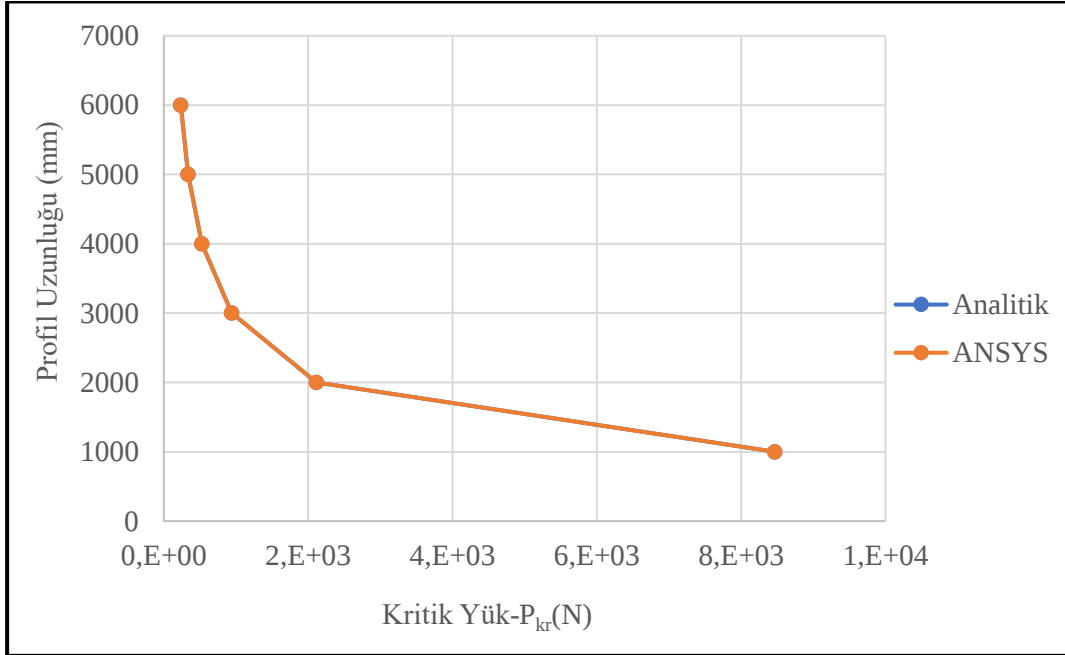
Şekil 5.16. 25x25 kare profil mesh modeli

25x25 kare profil için tasarlanmış olan mesh modeli yukarıdadır. Mesh modeli için seçilmiş olan eleman boyutu 10 milimetredir. Bu mesh ölçüleri, gerekli kriterleri sağlamaktadır.

Tablo 5.9. St 37 25x25 kare profil kritik yük değerleri

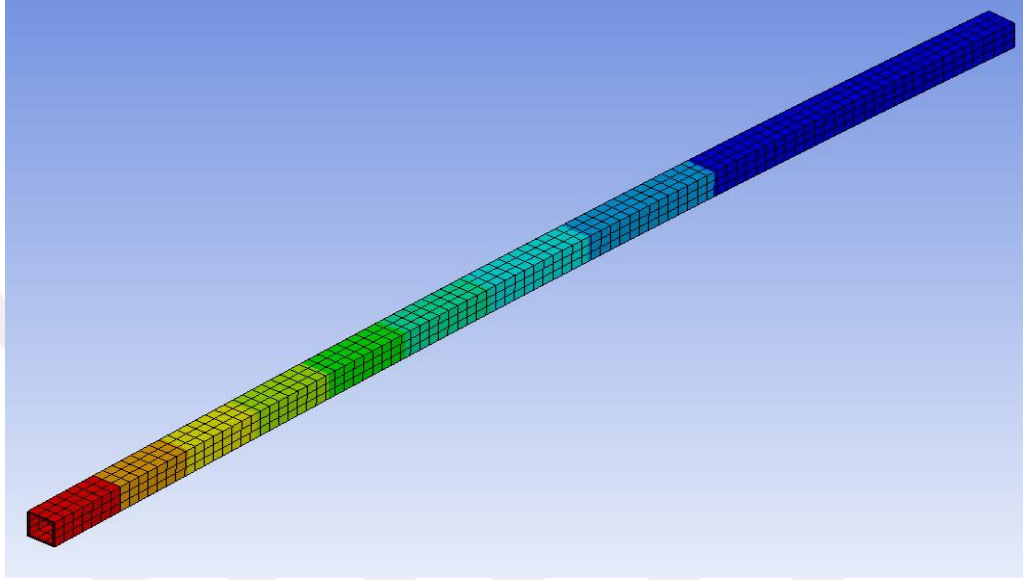
| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 210000     | 16345,33                | 1000      | 8469,40                         | 8468,55                      | 0,86 | 0,01          |
| 210000     | 16345,33                | 2000      | 2117,35                         | 2117,80                      | 0,45 | 0,02          |
| 210000     | 16345,33                | 3000      | 941,04                          | 941,22                       | 0,18 | 0,02          |
| 210000     | 16345,33                | 4000      | 529,34                          | 529,42                       | 0,08 | 0,02          |
| 210000     | 16345,33                | 5000      | 338,78                          | 338,83                       | 0,06 | 0,02          |
| 210000     | 16345,33                | 6000      | 235,26                          | 235,25                       | 0,01 | 0,01          |

St 37 malzeme kullanılarak üretilen 25x25 kesitlere sahip 2 mm et kalınlığında profillerin kritik yük değerleri analitik olarak hesaplanmıştır. Profil analiz programında tasarlanıp analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları ve analitik hesaplamalar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbirine yakın bulunmuştur.



Şekil 5.17. St 37 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği

Elde edilen sonuçlardan bir grafik oluşturulmuştur. Oluşturulan grafiğin dikey ekseninde profil uzunlukları değerlerine, yatay ekseninde kritik yük değerlerine yer verilmiştir. İki farklı metot ile elde edilen sonuçlara aynı grafikte yer verilerek sonuçlar grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. Elde edilen değerlerin birbirine yakınlığı grafik üzerinde de görülmektedir.



Şekil 5.18. 25x25 kare profil analiz resmi

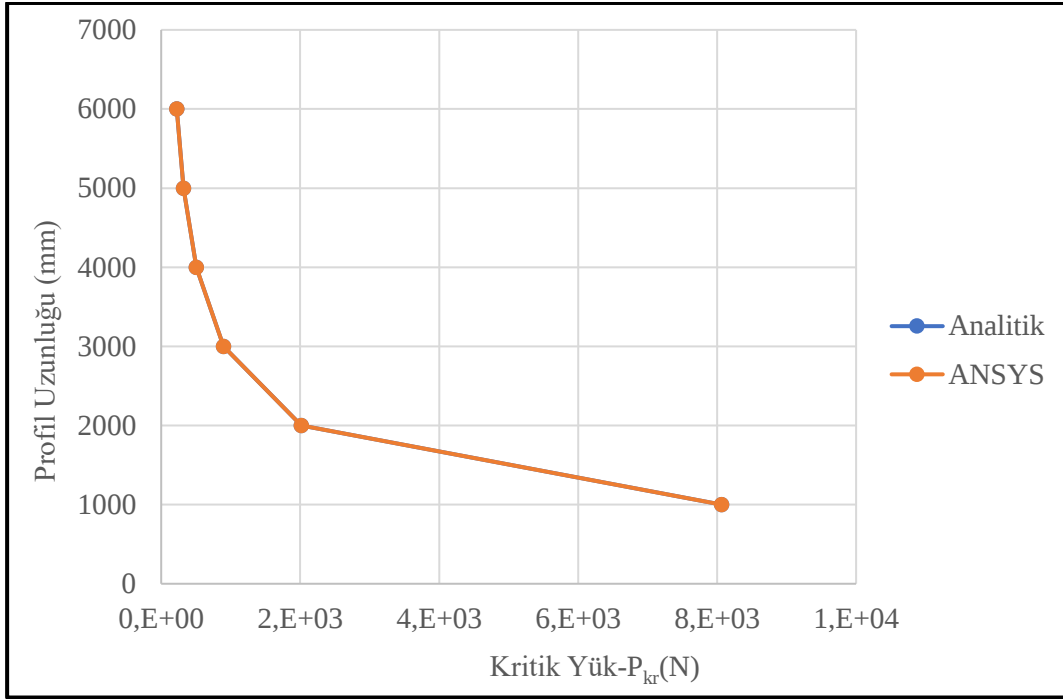
25x25 kare profilin analiz resmi şekilde verilmiştir. Profil üzerinde analitik olarak çalışılmıştır. Farklı uzunlukların kritik yük değerleri ve farklı malzemelerin kritik yük değerleri aynı analizde çalışılmıştır.

#### 5.10. 25x25 Kare Profil- Yapı Çeliği

Tablo 5.10. Yapı çeliği 25x25 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 200000     | 16345,33                | 1000      | 8066,10                         | 8065,28                      | 0,82 | 0,01          |
| 200000     | 16345,33                | 2000      | 2016,52                         | 2016,96                      | 0,43 | 0,02          |
| 200000     | 16345,33                | 3000      | 896,23                          | 896,40                       | 0,16 | 0,02          |
| 200000     | 16345,33                | 4000      | 504,13                          | 504,19                       | 0,06 | 0,01          |
| 200000     | 16345,33                | 5000      | 322,64                          | 322,67                       | 0,02 | 0,01          |
| 200000     | 16345,33                | 6000      | 224,06                          | 223,72                       | 0,34 | 0,15          |

Yapı çeliğinden üretilmiş 25x25 kare profilin kritik yük değerleri analitik olarak ve analiz programında hesaplanmıştır. Hesaplamalar yapılırken, profilin uzunluğu 1 m ile 6 m arasında değişken olarak ele alınmıştır. Analizler ise gerekli profiller tasarlanarak yapılmıştır. İki metot ile elde edilen sonuçlar birbirini doğrular nitelikte bulunmuştur.



Şekil 5.19. Yapı çeliğinden üretilmiş 25x25 kare profilin kritik yük değerleri grafiği

Sonuçların karşılaştırılmasının daha anlaşılır yapılabilmesi için karşılaştırma grafiği oluşturulmuştur. Yatay ekseninde kritik yük değerinin, dikey ekseninde profil uzunluğunun yer aldığı grafikte iki farklı eğrinin birbiriyle hemen hemen aynı olması dikkat çekmektedir. Sonuçların yakınlığı grafik üzerinden de daha net bir şekilde anlaşılmaktadır.

#### 5.11. 25x25 Kare Profil- Alüminyum Alaşım

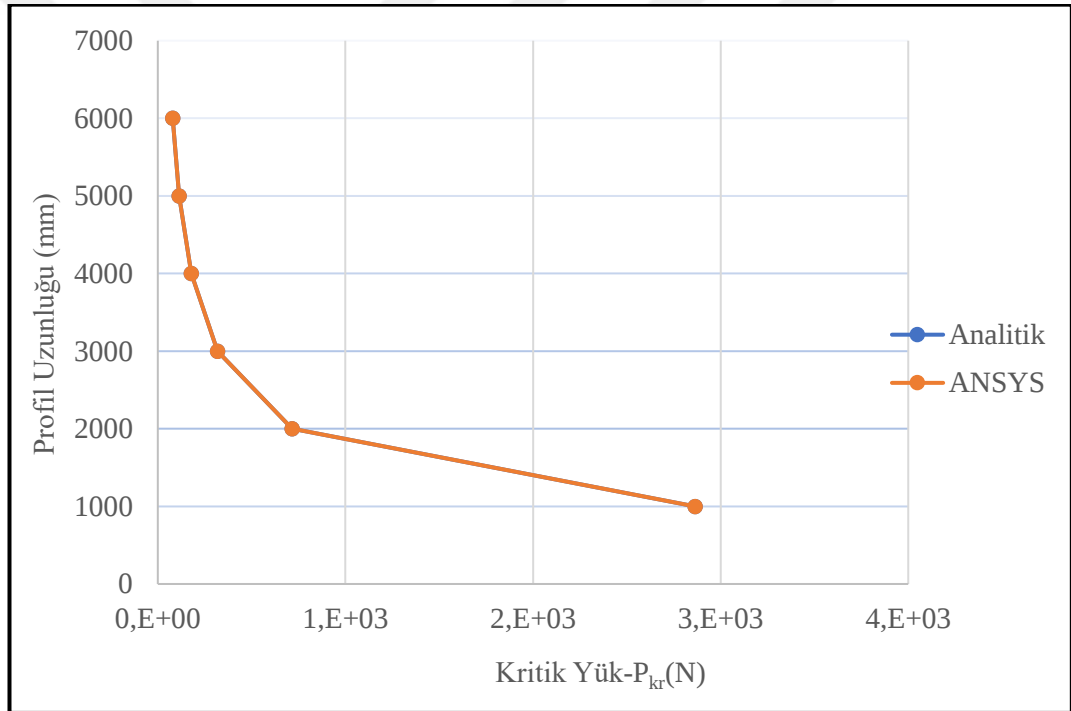
Tablo 5.11. Alüminyum alaşım 25x25 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 71000      | 16345,33                | 1000      | 2863,47                         | 2863,71                      | 0,24 | 0,01          |
| 71000      | 16345,33                | 2000      | 715,87                          | 716,09                       | 0,22 | 0,03          |
| 71000      | 16345,33                | 3000      | 318,16                          | 318,24                       | 0,07 | 0,02          |

Tablo 5.11. (Devam) Alüminyum alaşım 25x25 kare profil kritik yük değerleri

|       |          |      |        |        |      |      |
|-------|----------|------|--------|--------|------|------|
| 71000 | 16345,33 | 4000 | 178,97 | 179,01 | 0,05 | 0,03 |
| 71000 | 16345,33 | 5000 | 114,54 | 114,57 | 0,03 | 0,03 |
| 71000 | 16345,33 | 6000 | 79,54  | 79,50  | 0,04 | 0,05 |

Kare profilin kritik yük değerleri analitik olarak ve analiz programı yardımı ile hesaplanmıştır. Hesaplamalarda 25x25 kare kesitli profil kullanılmıştır. Profilin et kalınlığı 2 mm olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalarda profilin boy uzunluğu arttıkça kritik yük değerinin azaldığı görülmektedir. Analiz sonuçları ve analitik hesaplama sonuçları çok yakın bulunmuştur.



Şekil 5.20. Alüminyum alaşım 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği

Hesaplamalardan elde edilen kritik yük değerleri ve analiz sonuçlarından elde edilen kritik yük değerlerinin karşılaştırmalı grafiği oluşturulmuştur. Sonuçlar genel olarak birbirine yakın bulunmuştur.

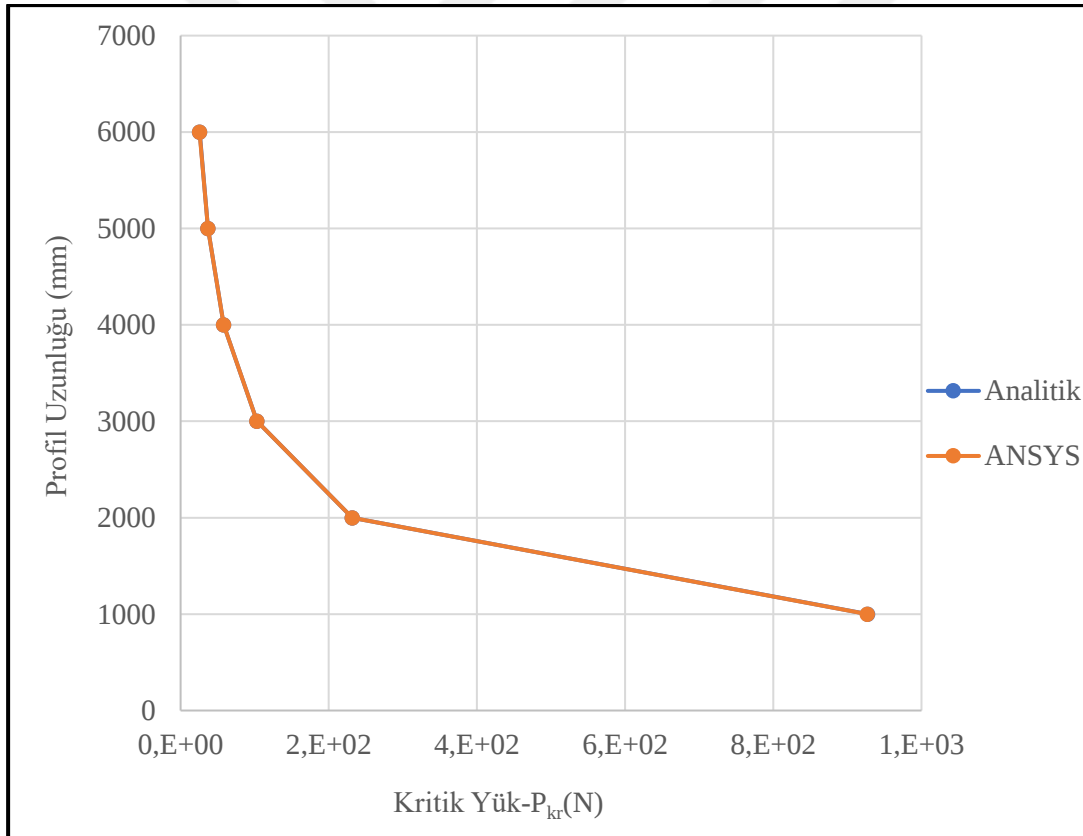
## 5.12. 25x25 Kare Profil- Karbon Fiber

25x25 Kare profil için analitik hesaplamalar ve ANSYS analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler tabloda kullanılan değerlerle birlikte verilmiştir.

Tablo 5.12. Karbon fiber 25x25 kare profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 23000      | 16345,33                | 1000      | 927,60                          | 926,86                       | 0,75 | 0,08          |
| 23000      | 16345,33                | 2000      | 231,90                          | 231,87                       | 0,03 | 0,01          |
| 23000      | 16345,33                | 3000      | 103,07                          | 103,07                       | 0,00 | 0,00          |
| 23000      | 16345,33                | 4000      | 57,98                           | 57,97                        | 0,01 | 0,01          |
| 23000      | 16345,33                | 5000      | 37,10                           | 37,03                        | 0,07 | 0,19          |
| 23000      | 16345,33                | 6000      | 25,77                           | 25,52                        | 0,25 | 0,97          |

Profil malzemesi olarak Karbon Fiber seçilmiştir. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları birbiri ile çok yakın bulunmuştur.

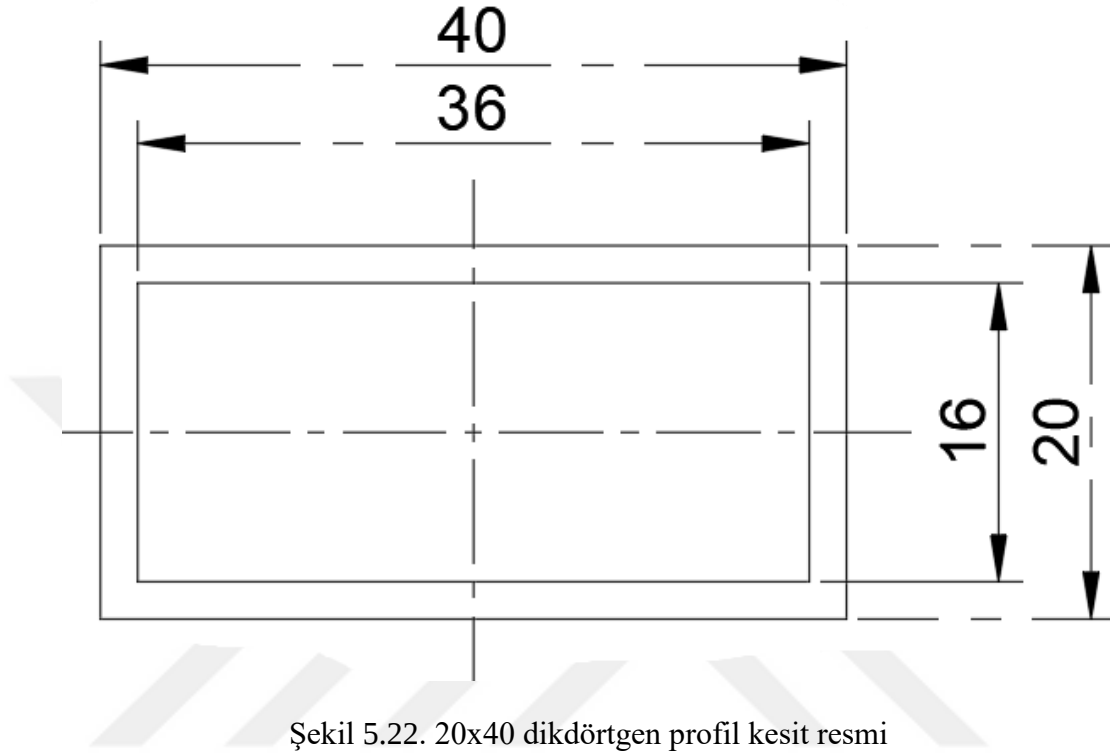


Şekil 5.21. Karbon fiber 25x25 kare profil kritik yük değerleri grafiği

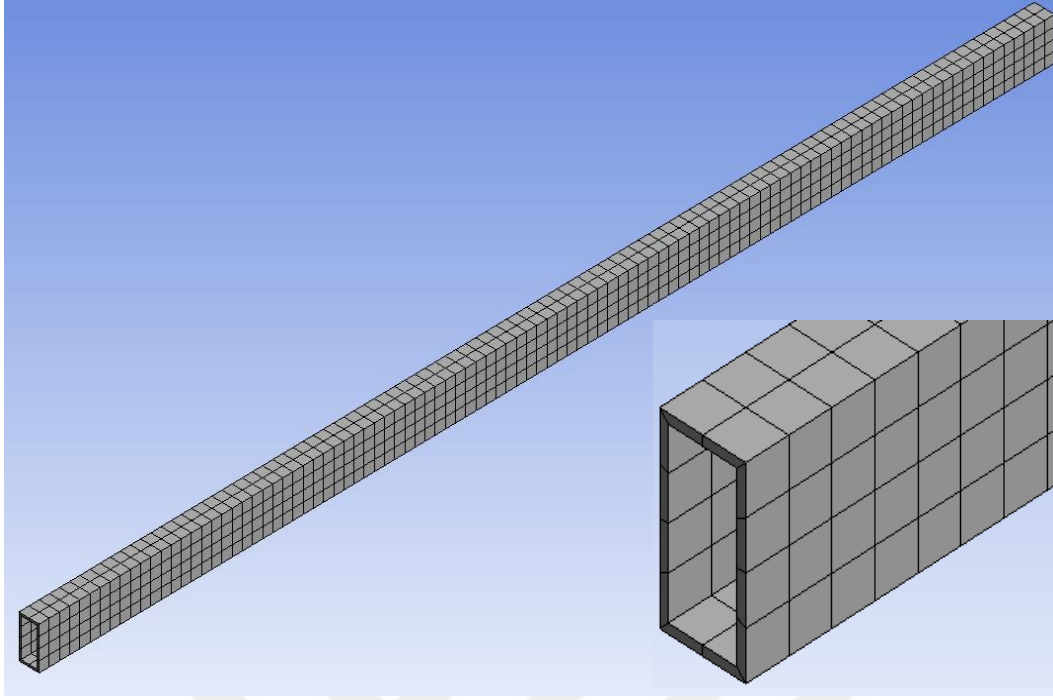
Yapılan analizler ve hesaplamalardan alınan sonuçlar karşılaştırma için grafiğe dökülmüştür. Grafikten de anlaşılabilirdiği gibi sonuçlar her iki yöntem için çok yakın bulunmuştur.

### 5.13. 20x40 Dikdörtgen Profil- St 37

Çalışmamızda kullanılan 20x40 dikdörtgen profilin kesit resmine aşağıdaki şekilde yer verilmiştir.



Kullanılan dikdörtgen profilin kesit ölçülerine yukarıdaki şekilde yer verilmiştir. Profilin et kalınlığı 2 milimetredir. Çalışmada, farklı uzunluklarda dikdörtgen profiller kullanılmıştır.



Şekil 5.23. 20x40 dikdörtgen profil mesh modeli

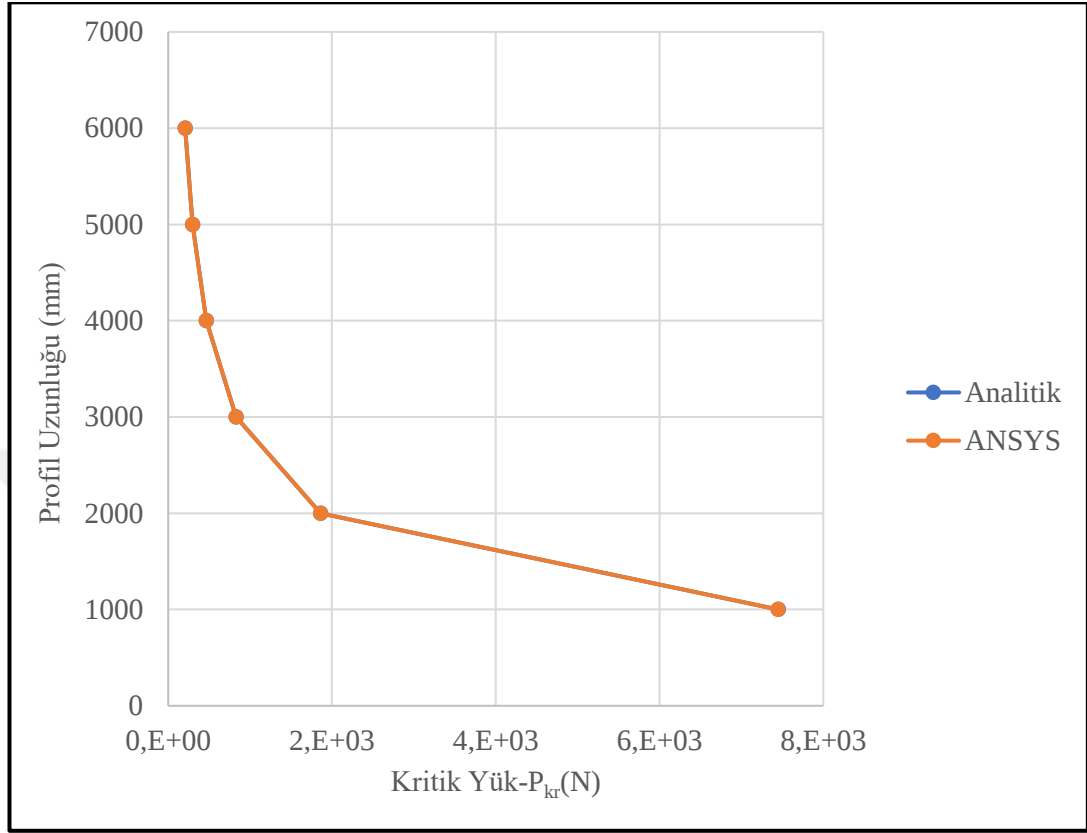
20x40 dikdörtgen profil için oluşturulmuş olan mesh modeli yukarıdadır. Mesh modeli için seçilen eleman boyutu 10 milimetredir. Oluşturulmuş olan mesh modeli gerekli kriterleri sağlamıştır.

Tablo 5.13. St 37 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 210000     | 14378,67                | 1000      | 7450,37                         | 7448,23                      | 2,14 | 0,03          |
| 210000     | 14378,67                | 2000      | 1862,59                         | 1863,12                      | 0,53 | 0,03          |
| 210000     | 14378,67                | 3000      | 827,82                          | 828,06                       | 0,24 | 0,03          |
| 210000     | 14378,67                | 4000      | 465,65                          | 465,74                       | 0,10 | 0,02          |
| 210000     | 14378,67                | 5000      | 298,01                          | 298,08                       | 0,06 | 0,02          |
| 210000     | 14378,67                | 6000      | 206,95                          | 206,97                       | 0,02 | 0,01          |

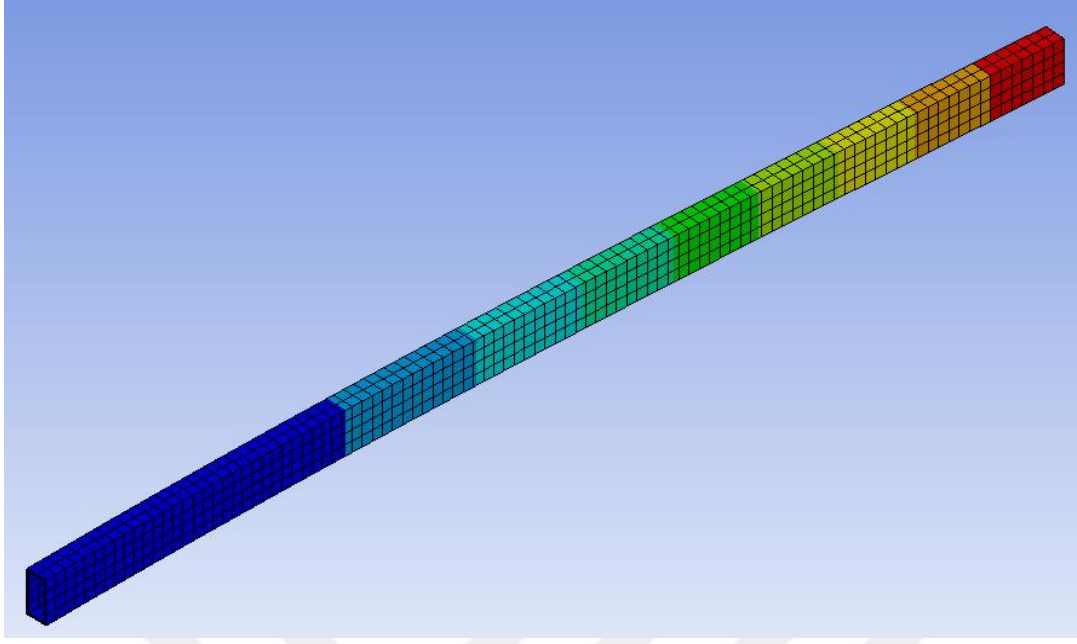
St 37 çelik malzeme kullanılarak tasarlanmış olan bağlantı elemanının eksenel yük altında burkulma öncesi oluşacak olan kritik yük değerleri hesaplanmıştır. Analitik olarak ve ANSYS analizleriyle bulunmuş olan kritik yük değerleri genel olarak birbirine yakın bulunmuştur. Profil uzunluğu arttıkça aradaki farkın artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bağlantı elemanının uzunluğu 1 metre ile 6 metre arasında

seçilmiştir. Elemanın kesitleri 20 mm ve 40 mm olarak belirlenmiştir ve 2 mm et kalınlığı verilmiştir.



Şekil 5.24. St 37 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği

Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları karşılaştırma amacıyla aynı grafik üzerinde verilmiştir. Grafikten, sonuçların yakınlığı görülebilmektedir.



Şekil 5.25. 20x40 dikdörtgen profil analiz resmi

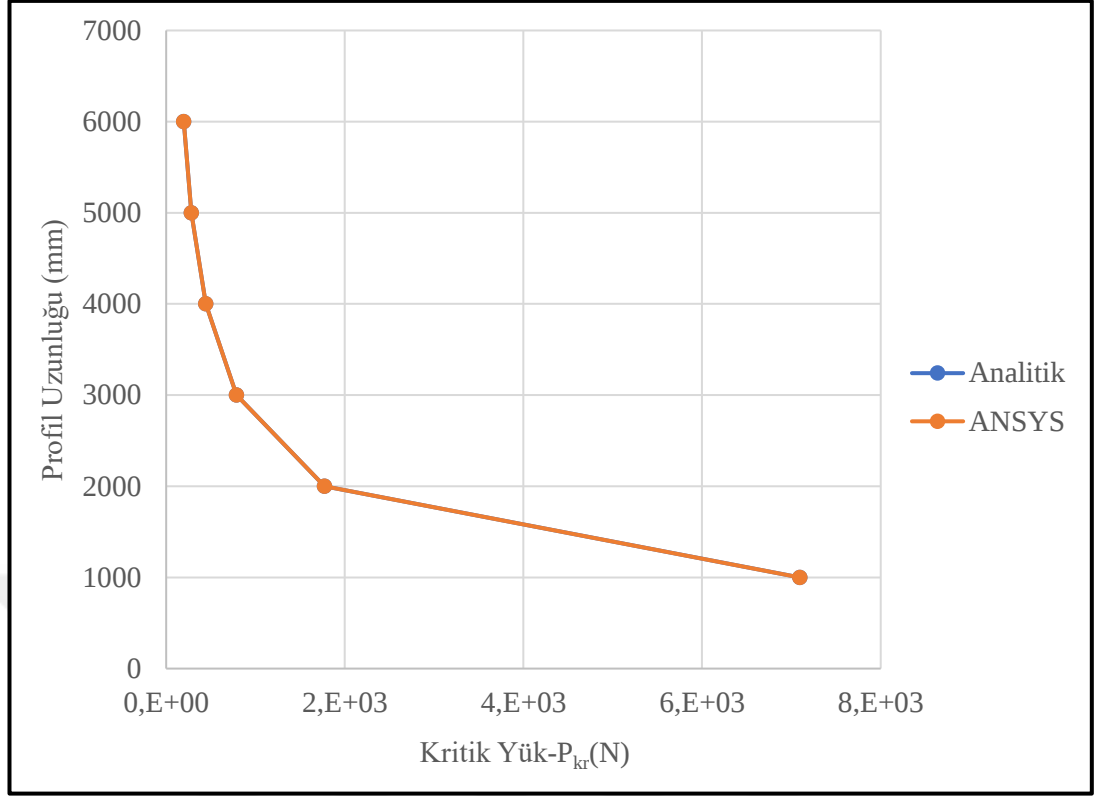
20x40 dikdörtgen profil analiz resmi şekilde verilmiştir. Farklı uzunluk ve farklı malzemeler aynı çalışma içerisinde parametrik olarak çalışılmıştır. Sonuçlara, ilgili malzeme başlığı altında yer verilmiştir.

#### 5.14. 20x40 Dikdörtgen Profil- Yapısal Çelik

Tablo 5.14. Yapı çeliği 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>P <sub>kr</sub> (N) | ANSYS<br>P <sub>kr</sub> (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------|------|---------------|
| 200000     | 14378,67                | 1000      | 7095,59                         | 7093,55                      | 2,04 | 0,03          |
| 200000     | 14378,67                | 2000      | 1773,90                         | 1774,39                      | 0,50 | 0,03          |
| 200000     | 14378,67                | 3000      | 788,40                          | 788,62                       | 0,22 | 0,03          |
| 200000     | 14378,67                | 4000      | 443,47                          | 443,59                       | 0,11 | 0,03          |
| 200000     | 14378,67                | 5000      | 283,82                          | 283,92                       | 0,10 | 0,04          |
| 200000     | 14378,67                | 6000      | 197,10                          | 197,12                       | 0,03 | 0,01          |

Yapı çeliği kullanılarak üretilmiş olan profiller üzerinde kritik burkulma yükünün bulunabilmesi için analitik hesaplamalar ve ANSYS analizleri yapılmıştır. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları birbiri ile çok yakın bulunmuştur. Profil uzunlukları 1 ile 6 metre arasında seçilmiştir.



Şekil 5.26. Yapı çeliği 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği

Hesaplamalar ve analizlerden elde edilen kritik yük değerleri bir grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. İki farklı yöntemin değerleri çok yakın bulunmuştur.

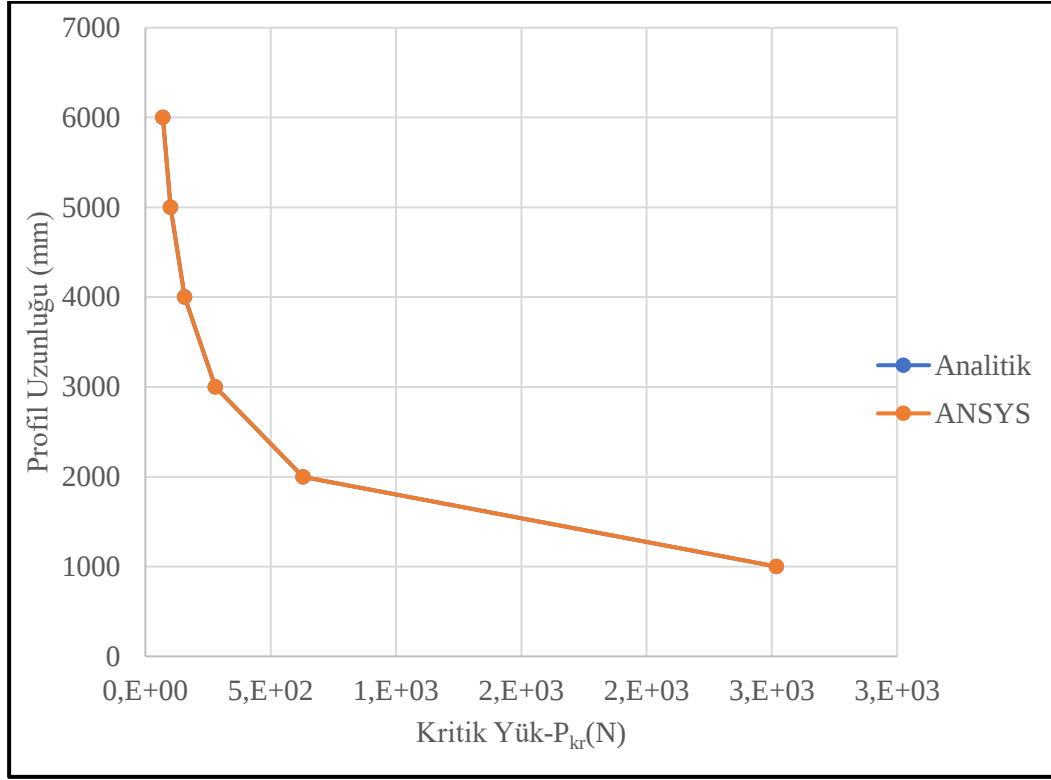
#### 5.15. 20x40 Dikdörtgen Profil- Alüminyum Alaşım

Tablo 5.15. Alüminyum alaşım 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri

| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>$P_{kr}$ (N) | ANSYS<br>$P_{kr}$ (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|------|---------------|
| 71000      | 14378,67                | 1000      | 2518,93                  | 2518,89               | 0,04 | 0,00          |
| 71000      | 14378,67                | 2000      | 629,73                   | 629,99                | 0,26 | 0,04          |
| 71000      | 14378,67                | 3000      | 279,88                   | 279,99                | 0,11 | 0,04          |
| 71000      | 14378,67                | 4000      | 157,43                   | 157,48                | 0,05 | 0,03          |
| 71000      | 14378,67                | 5000      | 100,76                   | 100,79                | 0,03 | 0,03          |
| 71000      | 14378,67                | 6000      | 69,97                    | 69,97                 | 0,00 | 0,01          |

Alüminyum alaşım kullanılarak tasarlanan bağlantı elemanı için analitik olarak ve ANSYS analiz programı kullanılarak kritik yük değerleri hesaplanmıştır. Profilin

uzunluğu 1 metre ile 6 metre arasında değişken olarak seçilmiştir. 20 mm ve 40 mm kesite sahip profilin 2 mm et kalınlığı bulunmaktadır. Profil uzunluğu arttıkça, kritik yük değerinin azaldığı sonuçlarda görülmektedir. Kullanılan iki yöntemin sonuçları birbiri ile genel olarak yakın bulunmuştur.



Şekil 5.27. Alüminyum alaşım 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği

Analitik olarak hesaplanan sonuçlar ile analiz sonuçları aynı grafik üzerinde verilmiştir. Grafik üzerinde iki farklı yöntem için iki farklı çizgi kullanılmıştır. Grafik yardımıyla iki farklı yöntemden alınan sonuçların birbirine yakınlığı açıkça görülmektedir.

#### 5.16. 20x40 Dikdörtgen Profil- Karbon Fiber

Tablo 5.16. Karbon Fiber 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri

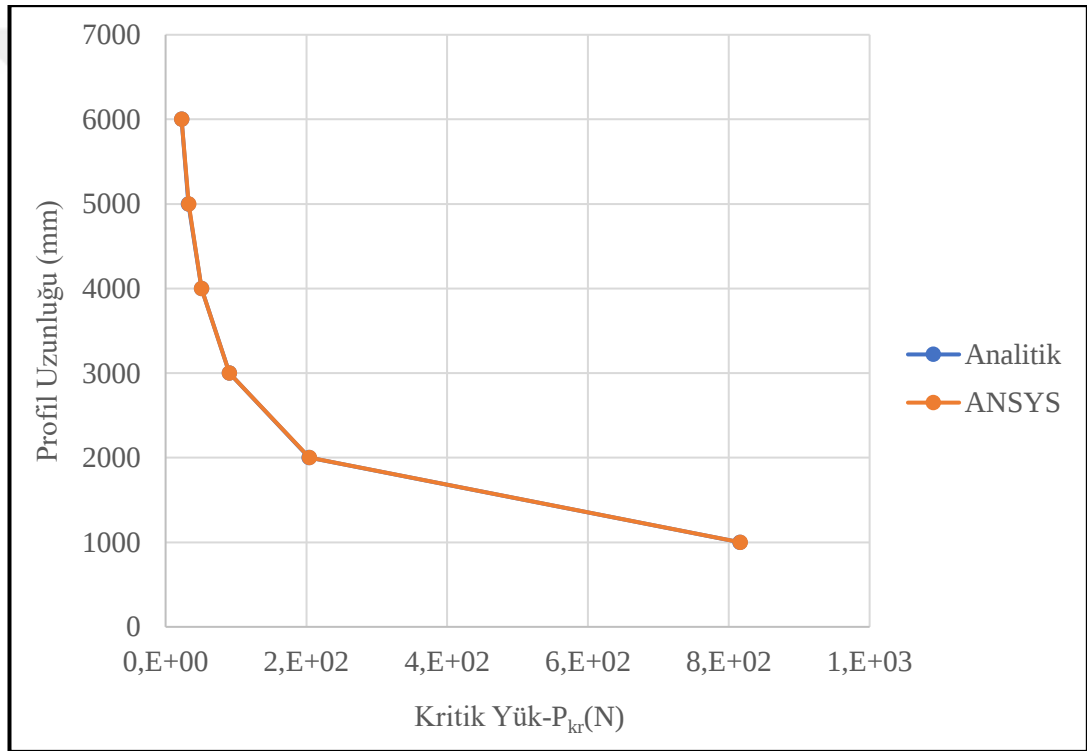
| E<br>(MPa) | I<br>(mm <sup>4</sup> ) | L<br>(mm) | Analitik<br>$P_{kr}$ (N) | ANSYS<br>$P_{kr}$ (N) | Fark | Hata<br>Oranı |
|------------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------------------|------|---------------|
| 23000      | 14378,67                | 1000      | 815,99                   | 816,27                | 0,28 | 0,03          |
| 23000      | 14378,67                | 2000      | 204,00                   | 204,11                | 0,11 | 0,05          |
| 23000      | 14378,67                | 3000      | 90,67                    | 90,72                 | 0,05 | 0,06          |

Tablo 5.16. (Devam) Karbon Fiber 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri

|       |          |      |       |       |      |      |
|-------|----------|------|-------|-------|------|------|
| 23000 | 14378,67 | 4000 | 51,00 | 51,03 | 0,03 | 0,06 |
| 23000 | 14378,67 | 5000 | 32,64 | 32,70 | 0,06 | 0,20 |
| 23000 | 14378,67 | 6000 | 22,67 | 22,72 | 0,05 | 0,23 |

Karbon fiber malzeme kullanılarak 1 m ile 6 m arasında farklı uzunluklarda profiller tasarlanmıştır. Tasarlanan profiller için analitik burkulma hesapları yapılmıştır.

Aynı zamanda ANSYS programı yardımıyla da analizler yapılmıştır. Yapılan analizlerin ve hesaplamaların sonuçları birbiri ile çok yakın bulunmuştur.



Şekil 5.28. Karbon fiber 20x40 dikdörtgen profil kritik yük değerleri grafiği

Analitik hesaplamaların sonuçları ve analiz sonuçları aynı grafik üzerinde iki farklı çizgi ile gösterilmiştir. Çizgilerin yakınlığı sonuçların birbirine yakınlığını göstermektedir.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Dolu silindirik profilde çap artışı ile kritik burkulma yükünün arttığı gözlenmiştir.

Çalışmada incelenen farklı malzeme türleri için çapın artışı, kritik yük üzerinde aynı etkiyi oluşturmuştur.

İncelenen malzemeler (Yapı Çeliği, St-37 Çelik, Alüminyum Alaşım, Karbon Fiber) farklı elastisite modülü değerlerine sahiptir. Elastisite modülü arttıkça, kritik burkulma yükü değerinin de arttığı gözlenmiştir. Bu durumda en düşük kritik burkulma yükü değeri karbon fiber malzemeden üretilmiş olan dolu silindirik profilde, en yüksek kritik burkulma yükü ise St-37 malzemeden üretilen profilde ortaya çıkmıştır. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları kıyaslandığında ise, iki sonuç arasındaki fark ile hata oranı hesaplandığında en yüksek hata oranının 0,78 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonuç dört malzeme türünün farklı çap değerleri arasında ortaya çıkmış olan en büyük sonuçtur. Buradan da sonuçların yakınlığı anlaşılabilmektedir. Çalışma her bir malzeme için 10 farklı çap değeri için yapılmıştır, toplamda 40 farklı profilin kritik yük değeri iki farklı yöntemle hesaplanmıştır.

İncelenen diğer bir malzeme olan 40x40 kare profilde kritik burkulma yükü farklı boy uzunlukları için hem analitik olarak hem de analiz programında hesaplanmıştır. Uzunluğun artması ile kritik burkulma yükünün azaldığı görülmüştür.

Farklı malzemelerin farklı elastisite modülü değerleri ile kritik burkulma yükü değerlerinde farklı sonuçlar bulunmuştur. Elastisite modülünün artması ile kritik burkulma yükü her malzeme türü için artış göstermiştir. Dört malzeme türü içerisinde en yüksek kritik burkulma yükü St-37 malzemenin kullanıldığı profilde görülmüştür. En düşük kritik burkulma yükü ise karbon fiber malzemenin kullanıldığı profilde bulunmuştur. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Sonuçlar arasındaki fark ile hesaplanan hata oranlarının en büyük değeri 0,26 olarak bulunmuştur. Bu değerlendirme, 4 farklı malzeme için 6 farklı uzunluk ile toplam 24 farklı profil üzerinde yapılmıştır.

Üçüncü profil şekli olarak 25x25 kesitlere sahip kare profil incelenmiştir. Profilin 1 metre ile 6 metre arasında farklı uzunluk değerleri için kritik yük değerleri hesaplanmıştır. 4 farklı malzeme türü kullanılmıştır. 4 farklı malzeme türü için

yapılan hesaplama ve analizlerde en yüksek kritik burkulma yükünü St-37 malzeme kullanılan profil vermiştir. Karbon fiber malzeme ise en düşük kritik burkulma yükünün ortaya çıktığı malzeme türü olmuştur. Analitik hesaplamalar ve analiz sonuçları birbirine yakın bulunmuştur. İki yöntem arasındaki kritik burkulma yükü farkları kullanılarak oluşturulan hata oranlarının en yüksek değeri 0,97, en yüksek ikinci değer ise 0,19 olarak bulunmuştur. Bu değerler ile iki yöntem birbirini doğrulamıştır.

Dördüncü ve son profil şekli olarak incelenen bağlantı elemanı, 20x40 dikdörtgen profil olmuştur. Bu profilde de diğer dörtgen profillerde olduğu gibi 4 farklı malzeme ve 6 farklı uzunluk değeri ile çalışılmıştır. Çalışılan malzeme türleri içinde yapılan analitik hesaplamalar ve yapılan analizlerin sonuçlarında, St-37 malzemenin en yüksek kritik burkulma yükü değerini verdiği görülmüştür. En düşük kritik burkulma yükü ise Karbon Fiber malzemenin kullanıldığı profilde ortaya çıkmıştır. Uzunluk artışı dört malzeme türü için kritik yükün düşmesine sebep olmuştur. Yapılan analitik hesaplamalardan alınan kritik yük değerleri ve analiz sonuçlarından alınan kritik yük değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur. İki yöntemden alınan kritik yük değerlerinin farklarının alınması ile oluşturulan hata oranında, en yüksek hata oranı 0,23 olarak bulunmuştur. Bu kesitlere sahip profil için 4 farklı malzeme ve her bir malzeme için 6 farklı uzunluk üzerinde çalışılmıştır. Toplamda bir profil türü için 24 farklı profil çeşidi incelenmiştir.

Sonuç olarak, elde edilen kritik yük değerlerinde iki farklı yöntemin birbirini desteklediği görülmüştür.

Dolu silindirik profilde çap artışı kritik yük değerini de artırmıştır. Bütün profil çeşitlerinde uzunluğun artışıyla kritik yük değerinin azaldığı görülmüştür. Malzemeler arasında kritik yük dayanımı elastisite modülüne bağlıdır. Kritik yük değeri, elastisite modülü değeri büyük olan malzemede diğer malzemelere kıyasla büyük bulunmuştur.

Burkulma dayanımının yüksek olmasının gerektiği ve istendiği yerlerde, profil uzunluğu kısa tutulmalıdır. İhtiyaçlara göre elastisite modülü yüksek olan malzemenin tercih edilmesi daha dayanıklı bir yapının oluşmasını sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] F. P. Beer, J. E. Russel, J. T. Dowolf, and D. F. Mazurek, *Cisimlerin Mukavemeti*, 6th ed. İstanbul: Literatür Yayıncılık, 2014.
- [2] M. Wakabayashi and T. Nonaka, “On the Buckling Strength of Angles in Transmission Towers,” *Bull. Disaster Prev. Res. Inst.*, vol. 15, no. 91, pp. 1–18, 1965.
- [3] J. K. Kim and J. K. Yang, “Buckling behaviour of slender high-strength concrete columns,” *Eng. Struct.*, vol. 17, no. 1, pp. 39–51, 1995, doi: 10.1016/0141-0296(95)91039-4.
- [4] T. M. Nordstrand, “Parametric study of the post-buckling strength of structural core sandwich panels,” *Compos. Struct.*, vol. 30, no. 4, pp. 441–451, 1995, doi: 10.1016/0263-8223(94)00066-2.
- [5] G. J. Hancock, “Design for distortional buckling of flexural members,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 27, no. 1, pp. 3–12, 1997, doi: 10.1016/0263-8231(96)00020-1.
- [6] M. Fujikubo and T. Yao, “Elastic local buckling strength of stiffened plate considering plate/stiffener interaction and welding residual stress,” *Mar. Struct.*, vol. 12, no. 9–10, pp. 543–564, 1999, doi: 10.1016/S0951-8339(99)00032-5.
- [7] V. Carvelli, N. Panzeri, and C. Poggi, “Buckling strength of GFRP underwater vehicles,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 32, no. 2, pp. 89–101, 2001, doi: 10.1016/S1359-8368(00)00063-9.
- [8] A. Luible and M. Crisinel, “Buckling strength of glass elements in compression,” *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 120–125, 2004, doi: 10.2749/101686604777964107.
- [9] H. Fan, F. Jin, and D. Fang, “Uniaxial local buckling strength of periodic lattice composites,” *Mater. Des.*, vol. 30, no. 10, pp. 4136–4145, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2009.04.034.
- [10] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, D. A. Ramantani, J. J. L. Morais, and J. J. M. S. Domingues, “Buckling strength of adhesively-bonded single and double-strap repairs on carbon-epoxy structures,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 2, pp. 371–379, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.11.010.
- [11] R. Azadi and Y. Rostamiyan, “Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 88, pp. 212–224, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.018.
- [12] D. Banat and R. J. Mania, “Comparison of failure criteria application for FML column buckling strength analysis,” *Compos. Struct.*, vol. 140, pp. 806–815,

2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.01.024.

- [13] Y. Q. Wang, H. X. Yuan, T. Chang, X. X. Du, and M. Yu, "Compressive buckling strength of extruded aluminium alloy I-section columns with fixed-pinned end conditions," *Thin-Walled Struct.*, vol. 119, no. June, pp. 396–403, 2017, doi: 10.1016/j.tws.2017.06.034.
- [14] Z. Huang, D. Li, B. Uy, H. T. Thai, and C. Hou, "Local and post-local buckling of fabricated high-strength steel and composite columns," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 154, pp. 235–249, 2019, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.12.004.
- [15] H. Ban, G. Shi, Y. Shi, and Y. Wang, "Overall buckling behavior of 460 MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 74, pp. 140–150, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.02.013.
- [16] H. Ban and G. Shi, "Overall buckling behaviour and design of high-strength steel welded section columns," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 143, pp. 180–195, 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.12.026.
- [17] T. Le, M. A. Bradford, X. Liu, and H. R. Valipour, "Buckling of welded high-strength steel I-beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 168, p. 105938, 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105938.
- [18] Y. B. Kwon, B. S. Kim, and G. J. Hancock, "Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 2, pp. 278–289, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.07.005.
- [19] T. Takeuchi, J. F. Hajjar, R. Matsui, K. Nishimoto, and I. D. Aiken, "Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 2, pp. 139–149, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.09.002.
- [20] S. E. Quiel and M. E. M. Garlock, "Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire," *Thin-Walled Struct.*, vol. 48, no. 9, pp. 684–695, 2010, doi: 10.1016/j.tws.2010.04.001.
- [21] Z. Sádovský, J. Kriváček, V. Ivančo, and A. Ďuricová, "Computational modelling of geometric imperfections and buckling strength of cold-formed steel," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 78, pp. 1–7, 2012, doi: 10.1016/j.jcsr.2012.06.005.
- [22] H. Ban, G. Shi, Y. Shi, and M. A. Bradford, "Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 88, pp. 256–266, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.05.015.
- [23] X. Y. Gao, T. Balendra, and C. G. Koh, "Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP," *Eng. Struct.*, vol. 46, pp. 547–556, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.08.010.

- [24] M. A. Bradford and X. Liu, "Flexural-torsional buckling of high-strength steel beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 124, pp. 122–131, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.05.009.
- [25] J. Jönsson and T. C. Stan, "European column buckling curves and finite element modelling including high strength steels," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 136–151, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.08.013.
- [26] W. H. Pan, J. Z. Tong, Y. L. Guo, and C. M. Wang, "Optimal design of steel buckling-restrained braces considering stiffness and strength requirements," *Eng. Struct.*, vol. 211, no. February, p. 110437, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110437.
- [27] N. Can, "Fonksiyonel dereceli plakaların burkulma davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi," Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2021.
- [28] R. K. Osgouei, "İnce cidarlı silindirik kompozit kabukların eksenel yükleme durumunda burkulma davranışlarının analitik ve sonlu eleman yöntemleri ile incelenmesi," İstanbul Teknik Üniversitesi, 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/269107473\\_What\\_is\\_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil\\_wars\\_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625](https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civil_wars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625)
- [29] Z. Y. Patan, "Karbon fiber takviyeli ABS kompozitlerin FDM 3B yazıcı ile üretimi ve ANSYS ile modellenmesi," Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, 2019.
- [30] F. Demir, "Lineer eyleyicilerde kullanılan silindirik boruların burkulma davranışlarının incelenmesi," Bursa Uludağ Üniversitesi, 2021.
- [31] H. Üçüncü, "Plaklarda delik bulunması halinde burkulma yükünün incelenmesi," Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, 2005.
- [32] H. Altıntaş, "Eksenel basma altındaki hibrit kompozit kirişin burkulma davranışının optimizasyonu," İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 2021.
- [33] S. Aydın, "Çok katlı yapıların sistem kritik burkulma yüklerinin diferansiyel transform metodu ile belirlenmesi," Kırklareli Üniversitesi, 2016.
- [34] E. Kurt, "Ansys Workbench kullanılarak farklı çelik bağlantıların doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi," Konya Teknik Üniversitesi, 2022.
- [35] E. C. Usalan, "Kablo eksenel yük ölçme cihazı ve burkulma sensörü geliştirilmesi," Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2015. [Online]. Available: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12619218/index.pdf>
- [36] T. Bölükbaşı, "Eliptik delikli ince cidarlı kolonların burkulma davranışının nümerik ve deneysel olarak incelenmesi," Sakarya Üniversitesi, 2022.
- [37] Z. D. Yaman, "Çelik kiriş kolonların burkulma analizi," Fırat Üniversitesi,

2000.

- [38] G. Bursoy, “Orta ölçekli bir kargo uçağının turboprop motoruna ait motor-dişli kutusu bağlantı elemanının ANSYS ile burkulma analizleri,” Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2010.
- [39] M. F. Başoğlu, “Çeşitli sınır koşullarına sahip tabakalı kompozit plakaların sonlu elemanlar metodu kullanılarak kritik burkulma yükü açısından incelenmesi,” Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2015. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/269107473\\_What\\_is\\_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars\\_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625](https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625)
- [40] B. Doğan, “Farklı geometriye sahip karbon nanotüp takviyeli plakların burkulma analizi,” Akdeniz Üniversitesi, 2021.
- [41] B. C. Kılıç, “Eğilme rijitliği değişken elastik çubukların kritik burkulma yüklerinin varyasyonel iterasyon yöntemi ile belirlenmesi,” Niğde Üniversitesi, 2009. [Online]. Available: ???
- [42] Ö. Sanal, “Kayma yüklemesi altındaki enine desteklenmiş izotropik ve ortotropik dikdörtgen ince plakların ANSYS sonlu elemanlar programı ile burkulma analizi,” Gazi Üniversitesi, 2006.
- [43] D. T. Llewellyn and R. C. Hudd, *Steels: Metallurgy & Applications*. 1998.
- [44] İ. Ovalı and C. Esen, *ANSYS Workbench*, 4th ed. İstanbul: İnkılap Kitabevi, 2020.

## **ÖZGEÇMİŞ**

İlk öğrenimini Bursa Keles Dedeler Köyü ve Bursa Keles I. Murat İlk Öğretim okullarında, orta öğrenimini Bursa Osmangazi Ahmet Hamdi Gökbayrak Anadolu Öğretmen Lisesinde tamamladı. 2014 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2019 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesinde Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2020 yılında Yalova Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yalova Üniversitesinde Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programının açılması ile eğitimini Yalova Üniversitesinde sürdürmektedir.

## **TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER**

B. Keskin, İ. Sevim, “Farklı Profilde, Kalınlıkta ve Boydaki Eksenel Basma Yüğü Taşıyan Bağlantı Elemanlarının Burkulma Dayanımının İncelenmesi”, 2nd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS’22), Mart 2022, Balıkesir, Türkiye.