

T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**DİSK YAYLARIN DEPREM İZOLATÖRÜ OLARAK KULLANIMININ  
NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ**

**Arif Veli KAYABAŞI**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZİRAN 2025**

**ANTALYA**

**T.C.**  
**AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİSK YAYLARIN DEPREM İZOLATÖRÜ OLARAK KULLANIMININ**  
**NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ**

**Arif Veli KAYABAŞI**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez 10/07/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Volkan KOVAN  
Doç. Dr. Ersin DEMİR  
Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

## ÖZET

### DİSK YAYLARIN DEPREM İZOLATÖRÜ OLARAK KULLANIMININ NÜMERİK ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

Arif Veli KAYABAŞI

Yüksek Lisans, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Volkan KOVAN

Haziran 2025; 118 sayfa

Çalışmada, farklı serilerde (A, B, C ve özel üretim) yer alan disk yayların mekanik performansı detaylı şekilde incelenmiştir; her bir yay geometrisi için hem lineer hem de nonlinear sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, DIN EN 16983 standardı ve üretici firma katalog verileri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar üç temel parametre üzerinden yapılmıştır: %75 oransal deformasyonda elde edilen kuvvet değeri ( $F_{0,75}$ ), Von Mises gerilme dağılımları ve normal gerilme değerleri.

Analizler sonucunda, lineer analizlerin küçük deformasyonlu ve elastik sınırlarda çalışan yaylar için yeterli öngörü sunduğu; ancak yüksek deformasyon altında çalışan yaylar için nonlinear analizlerin kaçınılmaz olduğu belirlenmiştir. Nonlinear analizlerde elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerleri, plastikleşmenin etkisiyle katalog ve standart değerlerin altında kalmıştır. Von Mises gerilme dağılımlarında ise çoğu yay için akma sınırına yaklaşan veya ulaşan bölgeler gözlemlenmiştir; özellikle kenar bölgelerinde gerilim yığılmaları tespit edilmiştir. Normal gerilmeler ise geometrik simetri ile uyumlu bir şekilde merkezden dışa doğru azalma eğilimi göstermiştir.

Tezin en önemli katkılarından biri, disk yayların sismik izolasyon sistemlerinde kullanılabilirliğine dair mühendislik temelli bir değerlendirme sunmasıdır. Disk yayların enerji sönmleme kapasitesi, yeniden merkezleme özelliği, modüler kullanıma uygunluğu ve kompakt yapısı, deprem izolasyon sistemlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca bu çalışma, disk yayların sismik etkiler altındaki davranışlarının ileri düzey analizler ve deneysel doğrulamalarla daha da geliştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, disk yayların yapısal sismik izolasyon sistemlerinde rijitlik kontrolü ve enerji sönmleme açısından yüksek potansiyele sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Disk Yay,  $F_{0,75}$  Kuvveti, Normal Gerilme, Sismik İzolasyon, Sonlu Elemanlar Analizi, von Mises Gerilmesi, Yapısal Mühendislik.

**JÜRİ:** Prof. Dr. Volkan KOVAN

Doç. Dr. Ersin DEMİR

Doç. Dr. Tuğçe TEZEL

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF BELLEVILLE SPRING SYSTEMS USING NUMERICAL AND FINITE ELEMENT METHODS (FEM)**

**Arif Veli KAYABAŞI**

**Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Volkan KOVAN**

**June 2025; 118 pages**

In this study, the mechanical performance of disc springs from different series (A, B, C, and custom-made) was comprehensively investigated. For each disc geometry, both linear and nonlinear finite element analyses were performed, and the results were compared with the DIN EN 16983 standard and manufacturer catalog data. The evaluation was conducted based on three main performance criteria: the force value at 75% deflection ( $F_{0,75}$ ), Von Mises stress distribution, and normal stress values. The findings indicate that linear analysis provides sufficiently accurate predictions for springs operating under small deformations within the elastic range; however, nonlinear modeling becomes indispensable for springs subjected to large deformations. In nonlinear simulations,  $F_{0,75}$  values were generally lower than those found in catalogs and standards, due to the inclusion of plasticity effects. Von Mises stress distributions revealed that many springs approached or reached the material yield limit, especially with stress concentrations observed near the outer edges. Normal stresses exhibited a radial decay pattern consistent with the springs' symmetrical geometry.

One of the key contributions of this research is the engineering-level evaluation of the potential use of disc springs in seismic isolation systems. Disc springs offer significant advantages for such applications, including energy dissipation through material and contact behavior, re-centering capability due to symmetric geometry, modularity through serial or parallel configurations, and compactness compared to other damping systems. Furthermore, this study highlights several areas for future development, including hysteretic performance under cyclic loading, experimental validation of numerical models, and exploration of hybrid systems incorporating disc springs with other passive or semi-active devices.

In conclusion, this thesis demonstrates that disc springs possess high potential for use in structural seismic isolation systems, particularly in terms of stiffness control and energy dissipation capacity.

**KEYWORDS:** Disc Spring,  $F_{0,75}$  Force, Finite Element Analysis, Normal Stress, Seismic Isolation, Structural Engineering, Von Mises Stress

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Volkan KOVAN

Assoc. Prof. Dr. Ersin DEMİR

Assoc. Prof. Dr. Tuğçe TEZEL

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam, lisansüstü öğrenim sürecimin en önemli ve yoğun dönemlerinden biri olan araştırma ve analiz süreçlerinin bir ürünüdür. Çalışmalarım süresince hem akademik hem de manevi olarak yanımda olan birçok değerli kişinin katkısı olmuştur.

Öncelikle, bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılarda bulunan ve bu çalışmanın her aşamasında kıymetli desteklerini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Volkan KOVAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, karşılaştığım zorluklara karşı bana her zaman moral veren, sabırla yanımda olan aileme, hayat yolculuğunda en büyük manevi destekçim olan müstakbel eşime ve çalışma ortamındaki anlayışları ve yardımları ile katkı sağlayan tüm iş arkadaşlarıma da en derin şükranlarımı iletmek isterim.

Bu tez çalışmasının, yapı mühendisliği ve özellikle sismik izolasyon sistemleri üzerine yapılacak ileri araştırmalara katkı sunmasını temenni ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                                                               | i    |
| ABSTRACT.....                                                                           | ii   |
| ÖNSÖZ .....                                                                             | iii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                       | iv   |
| AKADEMİK BEYAN .....                                                                    | ix   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                                            | x    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                    | xiii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                 | xvi  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                          | 1    |
| 1.1. Sismik İzolasyon .....                                                             | 2    |
| 1.2. Sismik İzolasyon Kullanımı.....                                                    | 2    |
| 1.3. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılmasının Başlıca Nedenleri .....             | 4    |
| 1.4. Geleneksel Sismik İzolatörlerin Sınırlamaları .....                                | 5    |
| 1.5. Belleville (Disk) Yaylarının Mühendislik Uygulamalarındaki Kullanım Faydaları..... | 6    |
| 1.6. Belleville (Disk) Yaylarının Tasarımında Dikkat Edilmesi Gerekenler .....          | 6    |
| 1.7. Disk Yaylarının Yapısal Sismik İzolatör Olarak Uygulanması .....                   | 7    |
| 1.8. Disk Yaylardaki Yenilikçi Uygulamalar.....                                         | 7    |
| 1.9. Tezin Yapısı ve İçerik Başlıklarının Kuramsal Gerekçesi .....                      | 7    |
| 2. KAYNAK TARAMASI.....                                                                 | 10   |
| 2.1. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması.....                              | 10   |
| 2.2. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Deprem Yüklerine Karşı Davranışları .....           | 11   |
| 2.2.1. Yapının Deprem İvmesinden Bağımsızlaştırılması .....                             | 11   |
| 2.2.2. Enerji Sönümleme ve Düşük Titreşim İletimi .....                                 | 11   |
| 2.2.3. Deprem Kaymaları ve Yapısal Yer Değiştirmelerin Azaltılması .....                | 11   |
| 2.2.4. Düşük Frekanslı Titreşimleri Engelleme .....                                     | 12   |
| 2.3. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Mekanik Özellikleri ve Tasarımı.....                | 12   |
| 2.4. Yaylar .....                                                                       | 12   |
| 2.4.1. Yayların Karakteristikleri .....                                                 | 15   |
| 2.5. Yay Sistemleri .....                                                               | 17   |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1. Paralel Bağlı Yaylar.....                                                                   | 18 |
| 2.5.2. Seri Bağlı Yaylar .....                                                                     | 18 |
| 2.5.3. Karma Bağlı Yaylar .....                                                                    | 19 |
| 2.6. Yaylanma İşi.....                                                                             | 19 |
| 2.7. İç Sönümleme Etkisi .....                                                                     | 20 |
| 2.8. Şekilden Faydalanma Katsayısı.....                                                            | 21 |
| 2.9. Hacimden Faydalanma Katsayısı .....                                                           | 21 |
| 2.10. Ağırlıktan Faydalanma Katsayısı .....                                                        | 22 |
| 2.11. Yaylarda Titreşim.....                                                                       | 22 |
| 2.12. Yay Malzemeleri .....                                                                        | 24 |
| 2.13. Yay Türleri .....                                                                            | 25 |
| 2.13.1. Helisel Yaylar .....                                                                       | 25 |
| 2.13.2. Çubuk Yaylar.....                                                                          | 26 |
| 2.13.3. Yaprak Yaylar.....                                                                         | 26 |
| 2.13.4. Bilezik Yaylar .....                                                                       | 27 |
| 2.13.5. Spiral Yaylar.....                                                                         | 27 |
| 2.13.6. Kangal Yaylar.....                                                                         | 27 |
| 2.13.7. Kauçuk Yaylar .....                                                                        | 28 |
| 2.13.8. Disk Yaylar .....                                                                          | 28 |
| 2.14. Disk Yayların Tasarımları ve Analizi .....                                                   | 29 |
| 2.14.1. Disk Yaylara Giriş .....                                                                   | 29 |
| 2.14.2. Disk Yayların Temel Kavramları .....                                                       | 30 |
| 2.14.3. DIN EN 16983 Standartlarına Göre Kuvvet Uygulamalı, Temas Yüzeyi Olmayan Disk Yaylar ..... | 31 |
| 2.14.4. Yük Gerilmeleri .....                                                                      | 32 |
| 2.14.5. Disk Yayların Standart Gösterimi .....                                                     | 33 |
| 2.14.6. Toleranslar .....                                                                          | 33 |
| 2.14.7. Disk Yayların Kombinasyonları .....                                                        | 35 |
| 2.14.8. Kademeli Karakteristik Yük Eğrileri.....                                                   | 37 |
| 2.14.9. Yay istifi tasarımı için yönergeler; .....                                                 | 38 |
| 2.14.10. Yay İstifi Kılavuzları .....                                                              | 38 |
| 2.14.11. Disk Yayların Hesabı.....                                                                 | 39 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.15. Gerilmeler.....                                                                      | 40 |
| 2.15.1. Statik Y¼klerde Gerilme .....                                                      | 40 |
| 2.15.2. Dinamik Y¼klerde Gerilme .....                                                     | 41 |
| 2.15.3. İzin Verilen Y¼k Gerilmelerinin Hesaplanması .....                                 | 41 |
| 2.15.4. Minimum Ön Y¼kleme.....                                                            | 42 |
| 2.16. Rahatlama ve Akma .....                                                              | 44 |
| 2.17. Yaylanma İŖi.....                                                                    | 45 |
| 2.18. Disk Yayların Tekrarlanan Y¼kleme Altında Enerji Dağıtım Performansı .....           | 45 |
| 2.18.1. S¼rt¼nme Kaybı .....                                                               | 46 |
| 2.18.2. Y¼k-Ŗekil DeęiŖtirme Özellikleri .....                                             | 50 |
| 2.18.3. Malzeme ve Doğrusal Olmayan Geometrilere .....                                     | 50 |
| 2.18.4. Yorgunluk ve Arızalar .....                                                        | 50 |
| 2.19. S¼n¼mler Uygulamaları .....                                                          | 50 |
| 2.20. Disk Yayların Sismik İzolasyon Sistemlerindeki Kullanım Alanları .....               | 51 |
| 2.20.1. Konteyner Vinçlerinde Sismik İzolasyon Kullanımı.....                              | 51 |
| 2.20.2. Dikey Sismik İzolasyon Sisteminde Kullanımı.....                                   | 52 |
| 2.20.3. N¼kleer Santral Ekipmanları İçin GeliŖtirilen Sismik İzolasyon Sistemi .....       | 52 |
| 2.21. Disk Yaylarının Sismik M¼hendislikte Kullanımı Üzerindeki Literat¼r BoŖlukları ..... | 52 |
| 2.21.1. Fiziksel KoŖullar Altındaki Etkileri.....                                          | 52 |
| 2.21.2. Korozyon ve evresel Etkiler.....                                                  | 52 |
| 2.21.3. KarŖılaŖtırmalı Performans Analizi .....                                           | 53 |
| 2.21.4. Dinamik ve Doğrusal Olmayan DavranıŖı.....                                         | 53 |
| 2.21.5. Pratik Uygulama ve Tasarım Rehber Eksiklikleri .....                               | 53 |
| 2.21.6. Dikey ve Y¼ksek Frekanslı TitreŖimler .....                                        | 53 |
| 2.22. Disk Yay Malzemeleri.....                                                            | 53 |
| 2.22.1. Standart Disk Yay Malzemeleri.....                                                 | 54 |
| 2.22.2. Korozyona Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri .....                                     | 54 |
| 2.22.3. D¼Ŗ¼k Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri.....                                | 54 |
| 2.22.4. Y¼ksek Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri .....                              | 54 |
| 2.22.5. AŖırı Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri .....                               | 55 |
| 2.22.6. Anti-Manyetik ve Korozyona Dayanıklı Malzemeler .....                              | 55 |



|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.23. Disk Yay Standardı (DIN EN 16983) .....                                              | 58  |
| 3. YÖNTEM.....                                                                             | 59  |
| 3.1. Malzeme .....                                                                         | 59  |
| 3.2. Modelleme.....                                                                        | 60  |
| 3.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM).....                                                     | 62  |
| 3.3.1. Ağ Yapısı Oluşturma (Mesh).....                                                     | 63  |
| 3.3.2. Sınır Koşulları.....                                                                | 64  |
| 3.3.3. Analiz.....                                                                         | 65  |
| 3.3.4. Çözümlemeler.....                                                                   | 66  |
| 4. BULGULAR.....                                                                           | 74  |
| 4.1. Gerilme ( $\sigma_{II}$ ) Değerlerinin Karşılaştırılması.....                         | 74  |
| 4.2. $F_{0,75}$ Kuvveti Karşılaştırması .....                                              | 81  |
| 4.3. Kuvvet–Yer Değiştirme ( $F-\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı.....              | 87  |
| 4.4. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinin Değerlendirilmesi .....                        | 93  |
| 4.4.1. Yay Sabiti (k) Üzerinden Rijitlik Değerlendirmesi .....                             | 93  |
| 4.4.2. Maksimum Elastik Enerji ( $W_{max}$ ) Değerlendirmesi .....                         | 95  |
| 4.4.3. Sönümlenen Enerji ( $W_d$ ) – Enerji Yayılım Potansiyeli Değerlendirmesi ...        | 96  |
| 4.4.4. Sönüm Oranı ( $\xi$ ) – Enerji Kaybı Oranı Değerlendirmesi .....                    | 98  |
| 4.4.5. Genel Değerlendirme ve Mühendislik Açısından Çıkarımlar .....                       | 99  |
| 5. TARTIŞMA .....                                                                          | 100 |
| 5.1. Maksimum $\sigma_{II}$ Verilerinin Değerlendirilmesi .....                            | 100 |
| 5.1.1. Lineer ve Nonlinear Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması.....                      | 100 |
| 5.1.2. Literatür ile Kıyaslama ve Katkıları .....                                          | 101 |
| 5.2. $F_{0,75}$ Kuvvet Verilerinin Değerlendirilmesi .....                                 | 101 |
| 5.2.1. Lineer ve Nonlinear Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                     | 101 |
| 5.2.2. Literatür ile Kıyaslama ve Katkıları .....                                          | 102 |
| 5.3. Kuvvet–Yer Değiştirme ( $F-\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı Değerlendirilmesi | 103 |
| 5.3.1. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinin Değerlendirilmesi .....                      | 103 |
| 5.3.2. Literatür ile Kıyaslaması ve Katkıları.....                                         | 105 |
| 6. SONUÇLAR .....                                                                          | 106 |
| 6.1. $\sigma_{II}$ Gerilmesi Açısından Değerlendirme .....                                 | 106 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2. $F_{0,75}$ Kuvveti Açısından Değerlendirme .....                                                  | 107 |
| 6.3. Kuvvet–Yer Değiştirme ( $F-\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı Açısından Değerlendirme ..... | 109 |
| 6.4. Kuvvet–Yer Değiştirme Eğrisinin Sonuçları .....                                                   | 110 |
| 6.5. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinde Sonuçlar ve Gözlemler .....                                | 110 |
| 6.6. Sismik İzolasyon Sistemlerine Katkı .....                                                         | 111 |
| 6.7. Genişletilebilir Yönler .....                                                                     | 112 |
| 6.8. Sonuç Değerlendirme .....                                                                         | 114 |
| 7. KAYNAKLAR .....                                                                                     | 115 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                                                               |     |

## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Disk Yayların Deprem İzolatörü Olarak Kullanımının Nümerik Analiz Yöntemleriyle İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

13/06/2025

Arif Veli KAYABAŞI

İmzası

*(Faint, stylized signature watermark)*

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|             |                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mu_{Ke}$  | : Kenar sürtünme katsayısı                                                         |
| $\mu_{Ko}$  | : Kovan/kılavuz sürtünme katsayısı                                                 |
| $a$         | : İki sarım mesafesi (kangal yaylar) (mm)                                          |
| $A$         | : Sarım mesafesi (spiral yaylar) (mm)                                              |
| $b$         | : yay genişliği (spiral yaylar) (mm)                                               |
| $d$         | : Tel çapı (kangal yaylar) (mm)                                                    |
| $D_e$       | : Dış çap (mm)                                                                     |
| $D_i$       | : İç çap (mm)                                                                      |
| $d_k$       | : Kılavuz çapı (kangal yaylar) (mm)                                                |
| $D_o$       | : İnversiyon çemberinin çapı (mm)                                                  |
| $D_{or}$    | : Ortalama çap (kangal yaylar) (mm)                                                |
| $E$         | : Elastikiyet modülü (N/mm <sup>2</sup> )                                          |
| $F$         | : Yayı etkileyen kuvvet (N)                                                        |
| $F_1$       | : $s_1$ defleksiyonlarına karşılık gelen yay kuvvetleri (N)                        |
| $F_2$       | : $s_1$ defleksiyonlarına karşılık gelen yay kuvvetleri (N)                        |
| $F_3$       | : $s_1$ defleksiyonlarına karşılık gelen yay kuvvetleri (N)                        |
| $F_c$       | : Disk yayın düz konuma getirilmesi için gereken kuvvet (N)                        |
| $F_{S Ya}$  | : Yaylanma esnasındaki sürtünme kuvveti (N)                                        |
| $F_{top}$   | : Disk yay paketindeki toplam kuvvet (N)                                           |
| $F_{topSü}$ | : Toplam sürtünme kuvveti (N)                                                      |
| $F_{tot}$   | : Sürtünmeli bir bireysel yay veya paralel/seri yay dizisi için yay kuvveti (N)    |
| $F_{Yü}$    | : Yükleme kuvveti (N)                                                              |
| $G$         | : Kayma modülü                                                                     |
| $H$         | : Eksene göre kuvvet yolu (kangal yaylar) (mm)                                     |
| $h_0$       | : Serbest koni yüksekliği (mm)                                                     |
| $h_{12}$    | : Disk yay iç çap toleransı (mm)                                                   |
| $H_{12}$    | : Disk yay dış çap toleransı (mm)                                                  |
| $\dot{I}$   | : Bireysel yay sayısı veya paralel yay dizilerinin bir seri yay dizisindeki sayısı |
| $i$         | : paket miktarı                                                                    |
| $ig$        | : toplam sarım sayısı (spiral yaylar)                                              |
| $k$         | : Yay faktörü (çap oranlarıyla değişkenlik gösterir)                               |
| $k_1$       | : Yay rijitliğiyle ilgili ana katsayı                                              |
| $k_2$       | : Rijitliğin şekle göre düzeltme katsayı                                           |
| $k_3$       | : Elastik şekil değişimiyle ilgili katsayı                                         |

|               |                                                                                       |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $k_4$         | : Gerilme hesaplarında, maksimum gerilme tahmininde kullanılan katsayı                |
| $l_0$         | : Disk yay serbest yükseklik (mm)                                                     |
| $L_{1,2,3}$   | : Yay dizisinin atanan uzunlukları, yüklerle ( $F_1, F_2, F_3$ ) ilişkili olarak (mm) |
| $L_{BL}$      | : Yayın blokaj boyu, sarımların birbirine yapışık hali (mm)                           |
| $L_c$         | : Düz durumda paralel veya seri yay dizisinin hesaplanan uzunluğu (mm)                |
| $L_H$         | : Çengel ucun son sarımla olan mesafesi (mm)                                          |
| $L_K$         | : Yayın yüksüz monte edilmiş boyu (mm)                                                |
| $L_{KO}$      | : Yayın başlangıçtaki boyu (kangal yaylar) (mm)                                       |
| $L_o$         | : Yüklenmemiş paralel veya seri yay dizisinin uzunluğu (mm)                           |
| $m$           | : kütle (kg)                                                                          |
| $M$           | : Moment (Nm)                                                                         |
| $N$           | : Başarıya ulaşmadan önceki yük döngü sayısı                                          |
| $n$           | : Bir paketteki disk yay miktarı                                                      |
| $P_{\bar{u}}$ | : Hasarsız kalma olasılığı                                                            |
| $R$           | : Yay rijitliği veya yay sabiti (N/mm)                                                |
| $r_d$         | : eksene göre en küçük dış yarıçap (spiral yaylar) (mm)                               |
| $R_{eş}$      | : Eşdeğer yay sabiti                                                                  |
| $r_i$         | : eksene göre en küçük iç yarıçap (spiral yaylar) (mm)                                |
| $s$           | : Yaylanma yolu (mm)                                                                  |
| $S_c$         | : Yayın düz konuma kadar olan deformasyonu (mm)                                       |
| $s_{top}$     | : Toplam yay deplasmanı (mm)                                                          |
| $s_{tot}$     | : Paralel veya seri yay dizisi için toplam defleksiyon (mm)                           |
| $T$           | : Periyot                                                                             |
| $T$           | : Toplam boşluk (mm)                                                                  |
| $t$           | : Yay kalınlığı (mm)                                                                  |
| $t'$          | : Temas yüzeyleri olan bireysel disk yayının azaltılmış kalınlığı (mm)                |
| $\nu$         | : Poisson oranı                                                                       |
| $W$           | : İş (joule)                                                                          |
| $w$           | : titreşim frekansları                                                                |
| $W_0$         | : Sistemin doğal frekansının                                                          |
| $W_A$         | : Dışarıdan uygulanan periyodik bir kuvvetin frekansı                                 |
| $\gamma$      | : Özgül ağırlık                                                                       |
| $\delta$      | : Yayın eksenel yönde deformasyonu                                                    |
| $\Delta F$    | : Gevşeme nedeniyle kuvvetteki azalma (N)                                             |
| $\Delta l$    | : Sürünme nedeniyle uzunluk kaybı                                                     |
| $\eta$        | : Şekilden faydalanma katsayısı                                                       |
| $\mu_M$       | : Coulomb'un sürtünme katsayısı                                                       |

|                |                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\sigma$       | : Çekme/basma gerilmesi                                                                   |
| $\sigma_I$     | : İç kenarda (üst yüzeyde) basma gerilmesi                                                |
| $\sigma_{II}$  | : İç kenarda (alt yüzeyde) çekme gerilmesi                                                |
| $\sigma_{III}$ | : Dış kenarda (alt yüzeyde) çekme gerilmesi                                               |
| $\sigma_h$     | : Dinamik yüklü disk yayları için çalışma hareketi gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )         |
| $\sigma_H$     | : Yorgunluk diyagramlarına göre izin verilen gerilme genliği (N/mm <sup>2</sup> )         |
| $\sigma_{Ic}$  | : Düz pozisyonundaki kesit noktası I için hesaplanan gerilme (N/mm <sup>2</sup> )         |
| $\sigma_{max}$ | : Maksimum yük gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )                                             |
| $\sigma_o$     | : Dinamik yüklü disk yayları için maksimum izin verilen gerilme (N/mm <sup>2</sup> )      |
| $\sigma_O$     | : Yorgunluk diyagramlarına göre maksimum izin verilen üst gerilme (N/mm <sup>2</sup> )    |
| $\sigma_{OM}$  | : Maksimum yüzey gerilmesi                                                                |
| $\sigma_{Sch}$ | : Pulsasyon gerilmesi (N/mm <sup>2</sup> )                                                |
| $\sigma_t$     | : Döngüsel gerilme (N/mm <sup>2</sup> )                                                   |
| $\sigma_u$     | : Dinamik yüklü disk yayları için hesaplanan minimum gerekli gerilme (N/mm <sup>2</sup> ) |
| $\sigma_U$     | : Yorgunluk diyagramlarına göre minimum izin verilen alt gerilme (N/mm <sup>2</sup> )     |
| $\tau$         | : Kayma gerilmesi                                                                         |
| $\varphi_o$    | : Koni açısı                                                                              |
| $\eta$         | : Verim                                                                                   |

### **Kısaltmalar**

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| AFAD | : Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı |
| HRC  | : Rockwell C Sertliği                    |
| MEB  | : Millî Eğitim Bakanlığı                 |
| MTA  | : Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü  |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. 1. Türkiye Diri Fay Haritası (Anonim 2).....                                                                              | 1  |
| Şekil 1. 2. AFAD Deprem Haritası (Özmen, Nurlu, Güler 1997) .....                                                                  | 2  |
| Şekil 1. 3. Tepki spektrumunun temel kavramı. ....                                                                                 | 3  |
| Şekil 1. 4. Sismik izolasyona sahip yapıdaki katlar arası deplasman grafiği .....                                                  | 4  |
| Şekil 2.1. Sismik izolasyonunun farklı zemin koşullarındaki etkisi.....                                                            | 10 |
| Şekil 2. 2. İzolasyonlu bir sistemin spektral ivme-periyot grafiği.....                                                            | 12 |
| Şekil 2. 3. Yayların çeşitleri ve sınıflandırılması.....                                                                           | 14 |
| Şekil 2. 4. Eğilme yayı.....                                                                                                       | 14 |
| Şekil 2. 5. Burulma yayı .....                                                                                                     | 14 |
| Şekil 2. 6. Çekme-basma yayı.....                                                                                                  | 14 |
| Şekil 2. 7. Yay çeşitleri.....                                                                                                     | 15 |
| Şekil 2. 8. Lineer karakteristikli yay diyagramı.....                                                                              | 16 |
| Şekil 2. 9. Çeşitli sertlikteki yaylar ve karakteristikleri.....                                                                   | 17 |
| Şekil 2. 10. Paralel bağlı yayların eşdeğer R sabiti grafiği ve şeması .....                                                       | 18 |
| Şekil 2. 11. Seri bağlı yayların eşdeğer R sabiti grafiği ve şeması.....                                                           | 19 |
| Şekil 2. 12. Karma bağlı yay sistemi R sabiti grafiği ve şeması.....                                                               | 19 |
| Şekil 2. 13. Farklı karakteristiklerdeki yayların yaptığı iş; (a) lineer, (b) non-lineer .....                                     | 20 |
| Şekil 2. 14. İç sönümleme etkisindeki yayların yaptığı iş; (a) nonlinear, (b) lineer.....                                          | 20 |
| Şekil 2. 15. Basit harmonik hareket .....                                                                                          | 22 |
| Şekil 2. 16. Çeşitli frekans durumları .....                                                                                       | 23 |
| Şekil 2. 17. Dış kuvvetin frekansı ile doğal frekans örtüştüğü rezonans durumu .....                                               | 23 |
| Şekil 2. 18. Basmaya zorlanan yay ve yükleme diyagramı .....                                                                       | 25 |
| Şekil 2. 19. Çekmeye zorlanan yay ve yükleme diyagramı .....                                                                       | 25 |
| Şekil 2. 20. Burulma maruz kalan çubuk ya ve karakteristiği .....                                                                  | 26 |
| Şekil 2. 21. Yaprak yaylar ve karakteristiği. (a) çeyrek eliptik, (b) yarım eliptik, (c) tam eliptik .....                         | 26 |
| Şekil 2. 22. Bilezik yay ve karakteristiği .....                                                                                   | 27 |
| Şekil 2. 23. Spiral yay ve ölçülendirilmesi .....                                                                                  | 27 |
| Şekil 2. 24. Kangal yay ve ölçülendirilmesi .....                                                                                  | 28 |
| Şekil 2. 25. Diskli ve borulu kauçuk yay ve kesitleri .....                                                                        | 28 |
| Şekil 2. 26. Disk yay yapısı ve farklı kombinasyonlarındaki karakteristikleri.....                                                 | 29 |
| Şekil 2. 27. Disk yay ölçülendirmesi ve semboller.....                                                                             | 30 |
| Şekil 2. 28. Göreli hesaplanmış karakteristik yük eğrileri.....                                                                    | 31 |
| Şekil 2. 29. DIN EN 16983'e göre A, B ve C serisi disk yaylar için hesaplanmış karakteristik yük eğrileri .....                    | 31 |
| Şekil 2. 30. Toplam gerilmeleri elde etmek için yük gerilmeleri ile artık gerilmelerin üst üste bindirilmesi (çakıştırılması)..... | 32 |

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2. 31. DIN17222 standartlarında B50GR2 disk yayının tanımlanması .....                                                                                                               | 33 |
| Şekil 2. 32. Disk yayların istifleme yöntemleri .....                                                                                                                                      | 35 |
| Şekil 2. 33. Tekli ve paralel yay karakteristiği (sürtünmeli ve sürtünmesiz) .....                                                                                                         | 36 |
| Şekil 2. 34. Tekli-çoklu; seri-paralel yay karakteristiği (sürtünmeli ve sürtünmesiz).....                                                                                                 | 36 |
| Şekil 2. 35. Disk yay kombinasyonları ait ölçülendirme ve karakteristiği .....                                                                                                             | 36 |
| Şekil 2. 36. Aşırı yüklemeyi önlemek için strok sınırlayıcılarla donatılmış, ilerleyici karakteristik yük eğrilerine sahip yay istifleri a) Zil tipi (Bell) b) Durdurucu tipi (Stop) ..... | 37 |
| Şekil 2. 37. Farklı yay istif kılavuzu tipleri .....                                                                                                                                       | 38 |
| Şekil 2. 38. Yay istif kılavuzları (a) içten yönlendirme (b) dıştan yönlendirme, yaylar ile kılavuz elemanı arasındaki boşluk: T.....                                                      | 39 |
| Şekil 2. 39. Disk yay faktörü ( $k_1$ , $k_2$ , $k_3$ ).....                                                                                                                               | 40 |
| Şekil 2. 40. Disk yay geometrisi gerilim noktaları .....                                                                                                                                   | 40 |
| Şekil 2. 41. Gerilme ve yer değiştirmenin zamana bağlı fonksiyonu .....                                                                                                                    | 42 |
| Şekil 2. 42. $N = 10^5$ yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı .....                                                                                                                  | 43 |
| Şekil 2. 43. $N = 5 \cdot 10^5$ yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı .....                                                                                                          | 43 |
| Şekil 2. 44. $N = 2 \cdot 10^6$ yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı .....                                                                                                          | 44 |
| Şekil 2. 45. DIN 17 222'ye göre Ck çeliklerinden (karbon çelikleri) yapılmış disk yaylar için izin verilen gevşeme.....                                                                    | 44 |
| Şekil 2. 46. DIN 17221 ve DIN 17222'ye göre Cr-V alaşımlı çeliklerden yapılmış disk yaylar için izin verilen gevşeme.....                                                                  | 45 |
| Şekil 2. 47. Yaya etki eden kuvvetler .....                                                                                                                                                | 46 |
| Şekil 2. 48. n:2 yay paketindeki sürtünme yüzeyi .....                                                                                                                                     | 46 |
| Şekil 2. 49. Paralel bir disk yay istifinde oluşan sürtünme kuvvetleri.....                                                                                                                | 47 |
| Şekil 2. 50. Tek bir disk yay ve ile 2, 3, 4 disk yay paketlerinden oluşan paralel bir istif için ölçülen ve hesaplanan karakteristik yük eğrilerinin karşılaştırması .....                | 48 |
| Şekil 2. 51. Seri istifli disk yaylarının deformasyonu.....                                                                                                                                | 49 |
| Şekil 2. 52. Seri şekilde düzenlenmiş 10 yaydan oluşan bir yay istif için ölçülen ve hesaplanan karakteristik yük eğrilerinin karşılaştırılması.....                                       | 49 |
| Şekil 2. 53. X 22 Cr MoV 12 1 çeliğinin sıcaklığa bağlı akma gerilmesi ve elastikiyet modülü 'E' değişimi.....                                                                             | 55 |
| Şekil 2. 54. Elastiklik modülü – sıcaklık grafiği.....                                                                                                                                     | 58 |
| Şekil 3. 1. Örnek yay görüntüsü ve ölçülendirilmesi.....                                                                                                                                   | 62 |
| Şekil 3. 2. Disk yaya ait 1/8 kesitte modeli .....                                                                                                                                         | 62 |
| Şekil 3. 3. Modelin mesh görüntüsü .....                                                                                                                                                   | 63 |
| Şekil 3. 4. Sabitlenen dış yüzey .....                                                                                                                                                     | 64 |
| Şekil 3. 5. Lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$ mm) .....                                                                                               | 67 |
| Şekil 3. 6. Non-lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$ mm) .....                                                                                           | 67 |



|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3. 7.</b> Lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$ mm) .....                                                                                                  | 68 |
| <b>Şekil 3. 8.</b> Non-lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$ mm) .....                                                                                              | 69 |
| <b>Şekil 3. 9.</b> Lineer normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$ mm) ....                                                                                                      | 70 |
| <b>Şekil 3. 10.</b> Non-lineer normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$ mm) .....                                                                                                | 70 |
| <b>Şekil 3. 11.</b> Lineer normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$ mm) ..                                                                                                       | 71 |
| <b>Şekil 3. 12.</b> Non-lineer normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$ mm) .....                                                                                                | 71 |
| <b>Şekil 3. 13.</b> 1/8 kesitindeki disk yayın yükleme bölgesi ve lineer $F_{0,75}$ kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri ( $D_e=225$ mm) .....                                              | 73 |
| <b>Şekil 3. 14.</b> Nonlinear $F_{0,75}$ kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri ( $D_e=225$ mm) .....                                                                                         | 73 |
| <b>Şekil 4. 1.</b> A serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                  | 75 |
| <b>Şekil 4. 2.</b> B serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                  | 77 |
| <b>Şekil 4. 3.</b> C serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                                  | 79 |
| <b>Şekil 4. 4.</b> Üretici firmanın standart dışı yaylarına ait katalog verileri, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması .....                                                  | 80 |
| <b>Şekil 4. 5.</b> A serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                        | 82 |
| <b>Şekil 4. 6.</b> B serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                        | 84 |
| <b>Şekil 4. 7.</b> C serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin karşılaştırılması .....                                                                        | 85 |
| <b>Şekil 4. 8.</b> Üretici firmaya ait standart dışı yayların lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin üretici firma katalog verileri ile karşılaştırılması ..... | 86 |
| <b>Şekil 4. 9.</b> A Serisi 3. Grup $D_e=200$ mm disk yaya $F-\delta$ histerezis eğrisi .....                                                                                                        | 87 |
| <b>Şekil 4. 10.</b> B Serisi 3. Grup $D_e=200$ mm disk yaya $F-\delta$ histerezis eğrisi .....                                                                                                       | 89 |
| <b>Şekil 4. 11.</b> C Serisi 3. Grup $D_e=225$ mm disk yaya $F-\delta$ histerezis eğrisi .....                                                                                                       | 92 |
| <b>Şekil 4. 12.</b> Tasarım noktalarına ait “k” sabitinin karşılaştırması .....                                                                                                                      | 94 |
| <b>Şekil 4. 13.</b> Tasarım noktalarına ait $W_{max}$ değerleri karşılaştırması .....                                                                                                                | 96 |
| <b>Şekil 4. 14.</b> Tasarım noktalarına ait $W_d$ değerleri karşılaştırması .....                                                                                                                    | 97 |
| <b>Şekil 4. 15.</b> Tasarım noktalarına ait $\xi$ değerleri karşılaştırması .....                                                                                                                    | 98 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2. 1. Yay türü ve kullanım yerleri .....                                                                                                                                | 13 |
| Çizelge 2. 2. Yay türleri, malzeme cinsler ve mukavemet değerleri .....                                                                                                         | 24 |
| Çizelge 2. 3. Disk yay grupları .....                                                                                                                                           | 30 |
| Çizelge 2. 4. Malzeme kalınlığı, serbest yükseklik, yay kuvveti ve yay sertliği için izin verilen toleranslar .....                                                             | 34 |
| Çizelge 2. 5. Yay çapları ve eş merkezlilik için izin verilen toleranslar .....                                                                                                 | 35 |
| Çizelge 2. 6. Disk yay ile kılavuz elemanı arasındaki toplam boşluk .....                                                                                                       | 39 |
| Çizelge 2. 7. Düz (yassı) durumda izin verilen maksimum gerilmeler .....                                                                                                        | 41 |
| Çizelge 2. 8. Çeşitli yağlarda sürtünme katsayısı değerleri .....                                                                                                               | 47 |
| Çizelge 2. 9. Disk yayların malzemeleri ve bazı mekanik özellikleri .....                                                                                                       | 56 |
| Çizelge 2. 10. Malzemelerin sıcaklık değerlerine göre elastiklik modülleri .....                                                                                                | 57 |
| Çizelge 3. 1. 51CrV4 yay çeliği malzeme özellikleri (20°C ortam sıcaklığındaki mekanik özellikler) .....                                                                        | 60 |
| Çizelge 3. 2. DIN EN 16983 standardına göre A, B, C Serisi Grup yaylar ve standart dışı (Mubea) yaylar .....                                                                    | 61 |
| Çizelge 3. 3. ANSYS Student 2025'te A, B, C Serisi yaylar ile standart dışı yayların tasarım noktalarına ait parametreler .....                                                 | 66 |
| Çizelge 4. 1. A Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum $\sigma_{II}$ değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri ile karşılaştırılması ..... | 74 |
| Çizelge 4. 2. B Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum $\sigma_{II}$ değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri ile karşılaştırılması ..... | 76 |
| Çizelge 4. 3. C Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum $\sigma_{II}$ değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri karşılaştırılması .....     | 78 |
| Çizelge 4. 4. Standart dışı yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum $\sigma_{II}$ değerlerinin katalog değerleri ile karşılaştırılması .....          | 80 |
| Çizelge 4. 5. A serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması .....                | 82 |
| Çizelge 4. 6. B serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması .....                | 83 |
| Çizelge 4. 7. C serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen $F_{0,75}$ kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması .....                | 85 |
| Çizelge 4. 8. Standart dışı yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum $\sigma_{II}$ değerlerinin katalog değerleri ile karşılaştırılması .....          | 86 |
| Çizelge 4. 9. A Serisi 3. Grup $D_e=200$ mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi .....                                                              | 88 |
| Çizelge 4. 10. B Serisi 3. Grup $D_e=200$ mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi .....                                                             | 90 |
| Çizelge 4. 11. C Serisi 3. Grup $D_e=225$ mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi .....                                                             | 91 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 4. 12.</b> Yaylara ait tasarım noktaları.....                | 93 |
| <b>Çizelge 4. 13.</b> Tasarım noktalarına ait “k” değerleri .....       | 94 |
| <b>Çizelge 4. 14.</b> Tasarım noktalarına ait $W_{\max}$ değerleri..... | 95 |
| <b>Çizelge 4. 15.</b> Tasarım noktalarına ait $W_d$ değerleri.....      | 97 |
| <b>Çizelge 4. 16.</b> Tasarım noktalarına ait $\xi$ değerleri .....     | 98 |

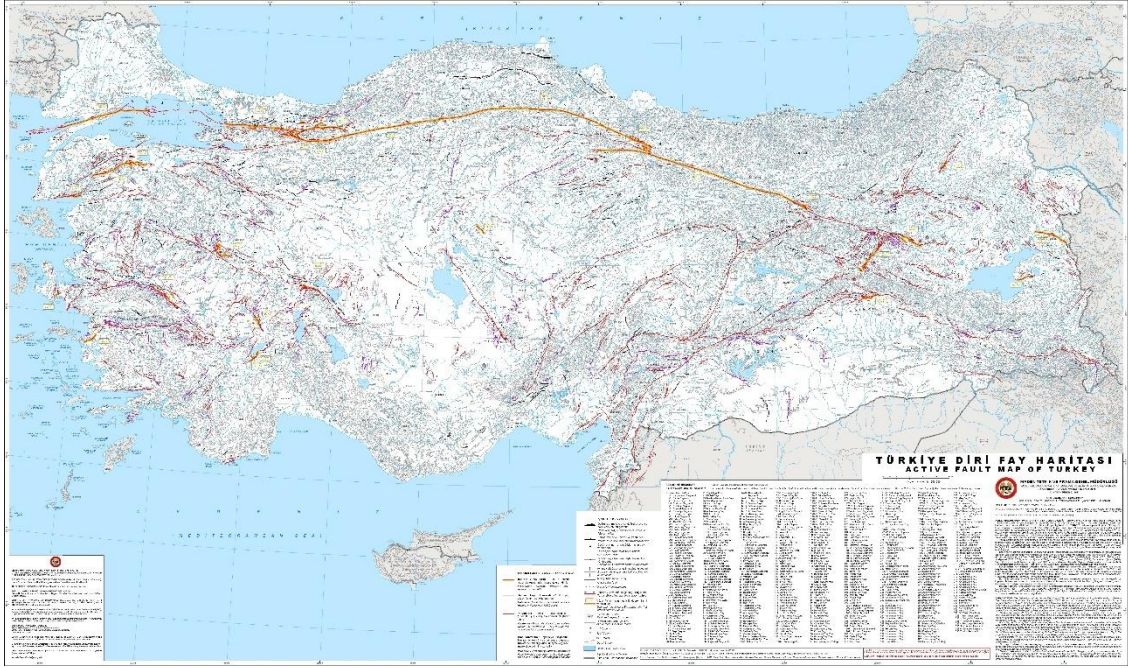


## 1. GİRİŞ

Türkiye tarih boyunca büyük depremlere şahit olmuştur. Dünyada depremlerin yaşandığı bölgelerin başında gelmektedir. Depremin yıkıcı etkisini de ciddi oranda hissetmiştir. Ülkemiz haritasında Kuzey Anadolu, Doğu Anadolu ve Batı Anadolu fay hatları bulunmaktadır. Türkiye ve çevresi 123 yılda 6 ve üzeri büyüklüğündeki 231 depremle sarsılmıştır (Anonim 1).

Türkiye Diri Fay Haritasındaki diri fayları 5,5 ve üzeri depremler üretebilecek kapasitededirler. Türkiye Diri Fay Haritası çalışması 2004 yılında başlamıştır ve halen güncellenmesi devam etmektedir. Bu veri tabanının oluşturulması günümüz bilgi birikimi ile ayrıntılı deprem tehlike analizleri yapılabilmesine katkı sağlayacaktır.

Ulusal Deprem Stratejisi ve Eylem Planı (UDSEP-2023) kapsamında AFAD ve MTA kurumlarının çalışmaları ile deprem tehlike analizleri yapılmış ve bunların ışığında Türkiye Diri Fay Haritası oluşturulmuştur (Şekil 1.1).

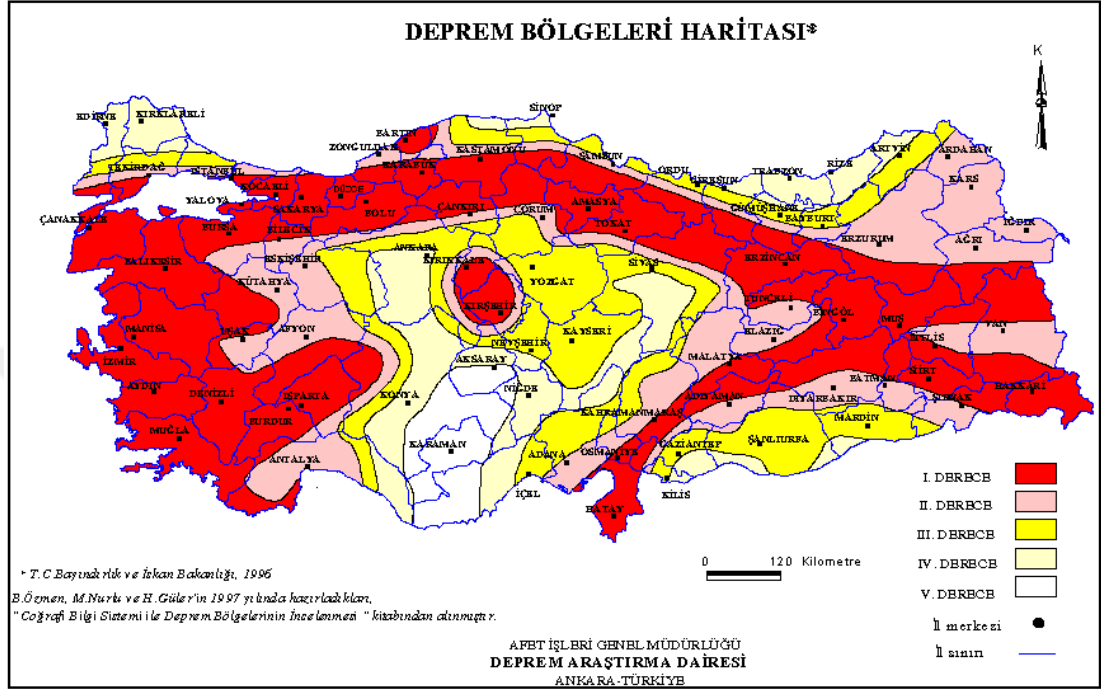


**Şekil 1. 1.** Türkiye Diri Fay Haritası (Anonim 2)

Ülkemiz deprem kuşağında olduğu için oldukça yıkıcı etkileri bulunmakta ve bu yıkıcı etkilerin anlaşılabilirliği için I, II, III, IV ve V. Derece olmak üzere 5 adet sınıflandırılma yapılmıştır. AFAD'ın Deprem Bölgeleri Haritası ile daha anlaşılır halde görülmektedir (Şekil 1.2).

Doğal afetler, özellikle depremler, hatalı ve geleneksel yapılaşmalarla birleştiğinde ciddi can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle yapıların depreme karşı korunması uzun süredir araştırma konusudur. Son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte deprem izolatörleri önemli bir çözüm olarak öne çıkmıştır. Türkiye'de bu sistemlere olan ilgi, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş ve Hatay merkezli yıkıcı depremler sonrasında artmıştır.

Türkiye'nin yüksek deprem riski taşıyan coğrafi yapısı ve mevcut deprem tehlikesi haritaları özetlenerek, yapıların depremden korunmasının önemi vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, deprem izolatörlerinin ülkemizdeki güncel önemi ve kullanımı anlatılarak, tezde ele alınacak disk yayların deprem izolatörlerindeki rolünün değerlendirilecektir.



Şekil 1. 2. AFAD Deprem Haritası (Özmen, Nurlu, Güler 1997)

### 1.1. Sismik İzolasyon

Sismik izolasyon sistemleri, yeni gelişen bir teknolojidir ve ilk kez 19. yüzyılda Tokyo Üniversitesi'nden Prof. Dr. John Milne tarafından çelik bilyelerle uygulanmıştır. Zamanla farklı tasarımlar denenmiş, 1969'da ilk kez kauçuk izolatörler kullanılmış, 1970'lerde ise Dr. Robinson tarafından kurşunlu kauçuk izolatörler geliştirilmiştir. Bu sistemler halen dünya genelinde kullanılmaktadır. Son 25-30 yılda gelişmiş mühendislik teknikleriyle üretilen ve patentlenen deprem izolatörlerinin kullanımı, özellikle Japonya, ABD ve Yeni Zelanda gibi deprem kuşağındaki ülkelerde yaygındır. Türkiye de önemli bir bilgi birikimine sahip olmasına rağmen, bu sistemlerin kullanımı hala sınırlıdır (MEB 2011).

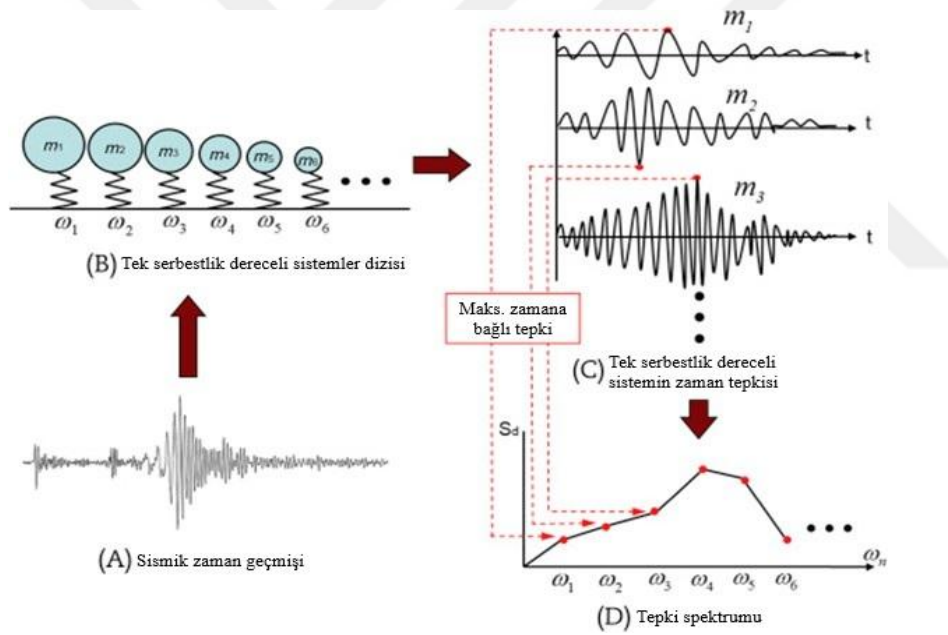
### 1.2. Sismik İzolasyon Kullanımı

Deprem enerjisinin yapılar üzerindeki yıkıcı etkisini azaltmak amacıyla iki temel sismik izolasyon yöntemi kullanılmaktadır: temel izolasyon ve dış izolasyon. Temel izolasyon, yapının zeminle doğrudan bağlantısını keserek yataklar, damperler ve mesnetler gibi elemanlar aracılığıyla deprem kuvvetlerinin yapıya iletilmesini engeller ve günümüzde en yaygın uygulanan yöntemdir. Diğer yandan, dış izolasyon yöntemi,

üst yapıdaki belirli bölgelere yerleştirilerek enerjiyi sönmüleme ve yapının atalet momentini azaltma işlevi görür.

Bu yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek ve optimize etmek için sismik yalıtımlı yapıların tepki spektrum eğrileri büyük önem taşır. Tepki spektrumları, yapının farklı titreşim modlarında ve sönmü oranlarında deprem etkisi altındaki maksimum yer değiştirme, hız ve ivme gibi tepkilerini ortaya koyarak sismik performansın analiz edilmesini sağlar. Bu bağlamda, yapay sismik zaman geçmişleri ve yay-kütle sistemleri kullanılarak farklı titreşim frekansları ve karşılık gelen maksimum tepkiler belirlenir; elde edilen veriler tepki spektrum grafiği şeklinde görselleştirilir.

Tepki spektrum eğrisini oluşturmak için yapay sismik zaman geçmişi kullanılır (Şekil 1.3A). Şekil 1.3B’de gösterilen serbestlik derecelerine sahip kütle ( $m$ ) ve yaylardan oluşan sistemlerde yayların rijitliği ile oynanarak farklı titreşim frekansları ( $\omega$ ) elde edilmektedir (Şekil 1.3C). Bu sistemleri farklı ivmelere maruz bıraktığımızda farklı tepkiler verecektir. Her titreşim frekansına sahip sistemin en yüksek tepkisi kaydedilir. Bu en yüksek değerler frekans modu ile grafikte birleştirilerek tepki spektrum grafiği oluşturulur (Şekil 1.3D).



**Şekil 1. 3.** Tepki spektrumunun temel kavramı.

Sismik izolasyon sistemlerinde kullanılan malzemelerin sünekliği, yüksek yer değiştirmelere yol açabilmekle birlikte, enerji sönmüleyici elemanlar (damperler) sayesinde bu etkiler kontrol altına alınabilir. Kauçuk, yumuşak çelik, kurşun, plastik, elastomer gibi malzemeler ve hidrolik amortisörler, histeretik davranış sergileyerek deprem enerjisinin yapıda hasar oluşturmaktan tüketilmesini sağlar. Ayrıca, kauçuk, çelik ve kurşun gibi malzemelerden üretilen mesnetler, sismik izolasyon sistemlerinin performansını destekleyici rol üstlenir (Shin, Song 2016).

Sismik izolasyonun temel prensipleri ve farklı uygulama yöntemleri açıklanmaktadır. Ayrıca, yapıların deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını



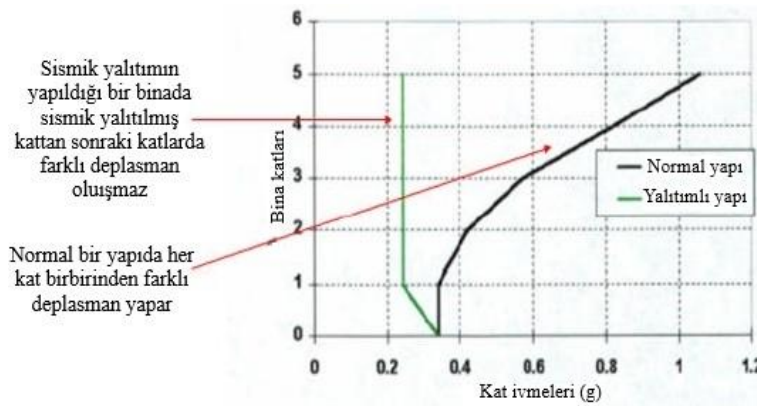
anlamak için kullanılan tepki spektrumları oldukça önemlidir. Böylece, deprem izolatörlerinde enerji sönümlenme ve yük taşıma mekanizmalarının tasarımı için gerekli temel teorik çerçeve sunulmakta; tezde incelenecek disk yayların bu mekanizmalardaki potansiyeli bu bağlamda değerlendirilecektir.

### 1.3. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılmasının Başlıca Nedenleri

Deprem etkilerini azaltmak için geliştirilen sismik izolasyon sistemleri, yapıların güvenliğini artırmak ve performansını iyileştirmek amacıyla kritik öneme sahiptir. Bu sistemler, yapıya aktarılan yatay ivmeleri azaltarak hem yapısal elemanların hem de iç donanımların deprem sırasında maruz kaldığı zararları sınırlar. Özellikle kritik tesislerde (hastaneler, acil durum merkezleri, veri merkezleri gibi) yapısal bütünlüğün korunması ve operasyonel sürekliliğin sağlanması açısından vazgeçilmezdir. Bu bölümde sismik izolasyonun neden tercih edildiği, avantajları ve sınırlamaları detaylandırılarak, izolasyon sistemlerinin deprem güvenliğindeki rolü açıklanmaktadır. Tezde incelenen disk yaylar da bu bağlamda, sismik izolasyon sistemlerinde enerji sönümleyici ve yük taşıyıcı elemanlar olarak kullanılabilecek potansiyel çözümlerden biridir. Böylece, disk yayların deprem izolatörlerindeki performansını anlamak ve geliştirmek, yapıların daha etkin korunmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, sismik izolasyon sistemleri, özellikle büyük ölçekli ticari yapı projelerinde ilave yapısal takviye ihtiyacını azaltarak önemli maliyet avantajları sunar. Ayrıca bu sistemler, yalnızca yeni yapılar için değil, mevcut binaların güçlendirilmesinde de etkili bir çözüm olarak kullanılabilir. Bu bağlamda, tarihi ya da mimari açıdan korunması gereken yapılarda geleneksel müdahalelere alternatif olarak önemli bir uygulama alanı bulmaktadır.

Performans yönünden değerlendirildiğinde, sismik izolasyon sistemleri yapıların farklı büyüklüklerdeki depremlere karşı daha uyumlu ve kontrollü bir şekilde davranmasını sağlar. Enerji sönümlenme özellikleri sayesinde, yapının genel sismik performansı artırılarak hasar riski önemli ölçüde azaltılır. Bunun yanı sıra, son yıllarda geliştirilen akıllı ve uyarlanabilir izolasyon teknolojileri, sistemlerin etkinliğini daha da artırmış; yapı güvenliğinde yeni standartlar oluşmasına katkı sağlamıştır. Bu gelişmelerle birlikte uluslararası normlara uyumlu çözümler, farklı bölgelerdeki yapılar arasında güvenilir ve tutarlı performans sağlamaktadır.



Şekil 1. 4. Sismik izolasyona sahip yapıdaki katlar arası deplasman grafiği

Sismik izolasyon sistemlerinin bir diğer önemli avantajı ise katlar arası yer değiştirme farklarını önemli ölçüde azaltmasıdır. Bu özellik, yapıların deprem sırasında daha stabil ve kontrollü bir şekilde davranmasını sağlar (Şekil 1.4). Ancak tüm bu avantajlarına rağmen, sismik izolasyon her yapı için uygun değildir. Özellikle yumuşak zeminli bölgelerde, yapı periyodunun artması taşıyıcı sistem üzerinde ilave yüklemelere neden olabilir (Şekil 1.7). Ayrıca, bitişik yerleşimli binalarda farklı frekans tepkileri nedeniyle yapılar arasında istenmeyen etkileşimler meydana gelebilir. Bu durum, sistemin tasarımında ve uygulanabilirliğinde dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur (Dönmez, 2011).

#### 1.4. Geleneksel Sismik İzolatörlerin Sınırlamaları

Geleneksel sismik izolatörler, yapıların deprem etkilerine karşı korunmasında yaygın ve etkili çözümler sunmakla birlikte, bazı performans sınırlamaları bulunmaktadır. Bu sınırlamalar, mevcut sistemlerin iyileştirilmesi ve alternatif izolasyon elemanlarının geliştirilmesi gerekliliğini doğurmaktadır.

Bu tez çalışmasında, disk yaylar gibi elastik elemanların geleneksel izolatörlere karşı potansiyel avantajları nümerik analizlerle incelenerek, sismik izolasyon sistemlerinin performansının artırılması hedeflenmektedir. Aşağıda bu sınırlamalar başlıca başlıklar altında sunulmuştur:

##### a) Çevresel ve Malzeme Kaynaklı Sorunlar

LRB'lerde (Kurşun çekirdekli sismik izolatörler) kullanılan kurşun, çevre açısından önemli riskler barındırmaktadır. Ayrıca, kurşun malzemenin sıcaklığa duyarlılığı nedeniyle deprem sırasında meydana gelen sıcaklık artışları, akma dayanımında ve sönümlene kapasitesinde azalmaya yol açarak beklenenden daha büyük yer değiştirmelere neden olabilmektedir (Tsai, Su, Huang 2016).

##### b) Yüksek Gerinim ve Sıcaklık Altındaki Performans Sorunları

LRB'ler, tekrarlayan şekil değiştirmeler sırasında oluşan sıcaklık artışlarına karşı oldukça hassastır. Bu durum, histeretik enerji sönümlemesi, karakteristik dayanım ve rijitlik değerlerinde belirgin azalmalarla sonuçlanmakta, böylece yapıların sismik güvenliğini tehdit etmektedir. Ayrıca, düşük sıcaklıklarda LRB'lerin rijitliğinde ve genel performansında ciddi düşüşler gözlemlenmektedir (Shi, Wang, Qin, Han, Xiong 2020).

##### c) Yer Değiştirme ve Burkulma Sınırlamaları

Şiddetli depremler, izolasyon sisteminde büyük yer değiştirme taleplerine yol açabilir. Bu yer değiştirmeler, genellikle yapı etrafındaki açıklıklarla sınırlanmıştır ve sınırların aşılması durumunda yapının çevre elemanlarına çarpması gibi hasar riskleri ortaya çıkabilir. Öte yandan, kauçuk mesnetler düşey burkulmaya eğilimlidir ve taşıyabilecekleri maksimum düşey yük sınırlıdır. Bu da sistemin kararlılığı ve etkinliği açısından önemli bir kısıt oluşturur (Das, Gur, Mishraa, Chakraborty 2014).

##### d) Davranışın Modellemesi ve Deneysel Zorluklar



Mevcut LRB modelleri, yüksek gerinim altında ortaya çıkan karmaşık pekleşme davranışlarını yeterince temsil edememektedir. Bu durum, kesme deformasyonunun olduğundan fazla tahmin edilmesine ve özellikle yakın fay depremleri altında izolasyonun etkinliğinin düşük olmasına yol açabilir. Ayrıca, tam ölçekli test ekipmanlarının sınırlılığı nedeniyle genellikle küçültülmüş boyutlu numunelerle test yapılmaktadır. Bu da izolatörlerin gerçekçi dinamik koşullardaki davranışlarının doğru şekilde yansıtılmasını engelleyebilir (Wang, Karavasilis, Chen, Dai 2024).

#### e) Yaşlanma ve Bozulma Etkileri

Sismik izolatörlerin (LRB, yüksek sönümlü kauçuk mesnetler ve doğal kauçuk mesnetler) uzun vadeli performansına ilişkin yaşlanma ve bozulma etkileri konusunda araştırma ihtiyacı mevcuttur. Ancak bu alanda yürütülen çalışmaların daha etkin ve kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Morita, Takayama 2013).

### 1.5. Belleville (Disk) Yaylarının Mühendislik Uygulamalarındaki Kullanım Faydaları

Belleville yayları, yüksek yük kapasiteleri ve küçük defleksiyonları sayesinde, yüksek kuvvetlerin sınırlı montaj alanında etkili biçimde taşınmasını sağlar. Bu kompakt yapısı ve alan tasarrufu, deprem izolatörlerinde sınırlı yerlerde kullanılacak elastik elemanlar için büyük avantajdır. Ayrıca, Belleville yaylarının yük-defleksiyon karakteristikleri, delik açma veya yayların seri/paralel istiflenmesi gibi yöntemlerle kolayca değiştirilebilir; bu da sismik izolasyon sistemlerinin farklı performans ihtiyaçlarına uyarlanabilmesine imkân tanır (Patel, Tilley, Darling 2007).

Tez kapsamında, Belleville yayların bu mekanik özelliklerinin deprem izolatörlerindeki enerji sönümleme ve yük taşıma performansına katkısı nümerik analizlerle araştırılacaktır. Böylece, Türkiye'nin deprem riskine karşı geliştirilmekte olan sismik izolasyon sistemlerinde, disk yayların etkin bir eleman olarak kullanım potansiyeli ortaya konacaktır.

### 1.6. Belleville (Disk) Yaylarının Tasarımında Dikkat Edilmesi Gerekenler

Sonlu Belleville yaylarının etkin ve güvenilir kullanımı, doğru tasarım parametrelerinin seçilmesine bağlıdır. Sonlu elemanlar analizi gibi ileri nümerik yöntemler, yayların geometrik karmaşıklıkları ve doğrusal olmayan davranışlarını dikkate alarak tasarımın doğrulanmasında kritik rol oynar. Optimizasyon çalışmaları ise, özellikle konik (tapered) geometrilerde, maksimum enerji emilimi ve ideal sertlik özelliklerinin elde edilmesine imkân tanır. Ayrıca elastomerik dolgular ve kalınlık profili ayarları gibi tasarım iyileştirmeleri, yayların kırılma riskini azaltırken sismik izolasyon sistemlerindeki performanslarını artırır (Manduka, Gubeljak, Predan, Pinterić 2014).

Tez çalışmasında, disk yayların deprem izolatörleri için tasarımına yönelik bu gelişmiş analiz ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak, yayların enerji sönümleme ve yük taşıma kapasitelerinin en üst düzeye çıkarılması hedeflenmektedir. Böylece, deprem etkilerine karşı daha dayanıklı ve verimli sismik izolasyon elemanları geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

### 1.7. Disk Yaylarının Yapısal Sismik İzolatör Olarak Uygulaması

Disk yayların yapısal sismik izolatörler olarak kullanımı konusunda literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte, mevcut araştırmalar bu elemanların deprem dayanıklılığı ve performansı açısından önemli potansiyel taşıdığını göstermektedir. Örneğin, Xie ve arkadaşlarının (2025) yaptığı çalışma, disk yayların asimetrik sürtünme bağlantılarında kullanılarak sismik dayanıklılığı artırdığını ve plastik deformasyonu minimize ettiğini ortaya koymuştur.

Bu tez çalışmasında, disk yayların deprem izolatörlerindeki bu tür mekanik avantajlarının nümerik analizlerle daha kapsamlı şekilde incelenmesi hedeflenmektedir. Böylece, disk yayların Türkiye gibi deprem riski yüksek bölgelerde yapısal izolatörlerde kullanılabilirliğine yönelik yeni bilgiler sunulacaktır.

### 1.8. Disk Yaylardaki Yenilikçi Uygulamalar

Süper elastik şekil hafızalı alaşım (SE-SHA) disk yaylar, sismik direnç uygulamalarında yüksek kendiliğinden merkezleme ve enerji dağıtma kapasiteleri ile dikkat çekmektedir. Ancak, bu yayların performansları sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Fang ve arkadaşlarının (2016) yaptığı araştırma, SE-SHA disk yayların yük direnci ve deformasyon konusundaki esnekliğini ortaya koyarken, farklı istif kombinasyonlarıyla özelleştirilebilir yapılarının, çeşitli sismik izolasyon ihtiyaçlarına uyum sağlama potansiyelini göstermektedir.

Bu kapsamda, bu tür gelişmiş disk yayların mekanik davranışları ve deprem izolatörlerindeki performansları nümerik analizlerle detaylı olarak incelenerek, Türkiye'deki deprem yönetmeliklerine ve saha koşullarına uygun tasarım stratejileri geliştirilmesi hedeflenmektedir (Fang, Zhou, Osofero, Shu, Corradi 2016).

### 1.9. Tezin Yapısı ve İçerik Başlıklarının Kuramsal Gerekçesi

Tez çalışmasında, disk yayların (Belleville yayları) sismik izolasyon sistemlerinde kullanılabilirliğini nümerik analiz yöntemleriyle değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın ana eksen, geleneksel sismik izolasyon yaklaşımlarının sınırlarını aşabilecek, enerji sönmüleme ve esnekliğe dayalı alternatif çözümlerin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda tez, yapısal bir bütünlük içinde çok katmanlı bir inceleme sunmakta ve bu yapıyı yansıtan başlıklarla ilerlemektedir.

Birinci bölüm olan Giriş kısmı, çalışmanın motivasyonunu oluşturacak şekilde yapılandırılmıştır. Burada öncelikle sismik izolasyonun temel kavramları, kullanım alanları ve gereklilikleri (1.1–1.3) tanıtılmış, ardından mevcut sistemlerin sınırlılıkları (1.4) ortaya konarak araştırma ihtiyacı gerekçelendirilmiştir. Bunu takiben, Belleville (disk) yaylarının mühendislikteki avantajları, tasarımsal özellikleri ve yenilikçi uygulamaları (1.5–1.8) aktarılmış, bu yayların alternatif izolasyon elemanı olarak neden dikkate alındığı açıklanmıştır.

İkinci bölüm, derinlemesine bir literatür taraması içermektedir. İlk olarak mevcut sismik izolasyon sistemlerinin sınıflandırılması, dinamik davranışları ve mekanik tasarım ilkeleri (2.1–2.3) ele alınmıştır. Ardından, yay sistemleri, malzemeleri,

farklı türleri ve mekanik tepkileri (2.4–2.13) detaylandırılmıştır. Bu bölümün odak noktası olan disk yaylar, 2.13.8. başlığından itibaren teorik, geometrik, malzeme ve kombinasyonel açıdan sistematik olarak ele alınmakta (2.14–2.23), ayrıca standartlara uygun tasarım ilkeleri, gerilme analizleri, enerji dağılımı, sönümlene kabiliyeti, yorgunluk davranışları, uygulama alanları ve literatürdeki boşluklar kapsamlı biçimde değerlendirilmektedir. Bu detaylar, çalışmanın bilimsel gerekçesini oluşturarak analiz aşamasının zeminini hazırlar.

Üçüncü bölümde sunulan yöntem kısmı, bu teorik altyapıyı sayısal modellere dönüştüren uygulama adımlarını içermektedir. Kullanılan malzeme özellikleri, geometrik modelleme süreci, sonlu elemanlar metodu, sınır koşulları, ağ yapısı ve çözüm yöntemleri (3.1–3.4) ayrıntılı biçimde açıklanmıştır. Bu yapı sayesinde, disk yayların sismik performansının değerlendirilmesinde kullanılan nümerik yaklaşım şeffaf biçimde ortaya konur.

Dördüncü bölüm, bu yöntemle elde edilen bulguları içermektedir. Disk yayların çeşitli dış yüklemeler altındaki gerilme değerleri, kuvvet–yer değiştirme davranışları, histerezis eğrileri ve enerji parametreleri (4.1–4.4) incelenerek sistemin rijitliği, elastik enerji kapasitesi, sönüm kabiliyeti ve enerji yayılım performansı mühendislik açıdan değerlendirilmiştir.

Beşinci bölüm, bulguların yorumlandığı tartışma kısmıdır. Bu bölümde lineer ve nonlineer analizler karşılaştırılmış, literatürle örtüşen veya ayrışan yönler belirlenmiş ve disk yayların sismik izolasyon sistemlerine katkı potansiyeli derinlemesine analiz edilmiştir.

Altıncı ve son bölüm olan Sonuçlar, tüm çalışma boyunca elde edilen veriler doğrultusunda yapılan değerlendirmeleri kapsamaktadır. Disk yayların farklı kriterler açısından sismik performansı, mühendislik uygulamaları için potansiyel katkıları ve ileride yapılabilecek araştırmalara yönelik öneriler (6.1–6.8) bu bölümde sunulmuştur.

Yapısal bütünlük sayesinde tez, yalnızca teknik bir çözüm önermemekte; aynı zamanda mühendislik literatüründe eksikliği hissedilen bir boşluğu teorik, deneysel ve nümerik verilerle temellendirmektedir. Her başlık, bu bütünsel amaçla uyumlu olacak şekilde seçilmiş ve yapılandırılmıştır. Okuyucu, bu sayede hem konunun evrimsel gelişimini hem de uygulama odaklı çözümlemesini adım adım takip edebilecektir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

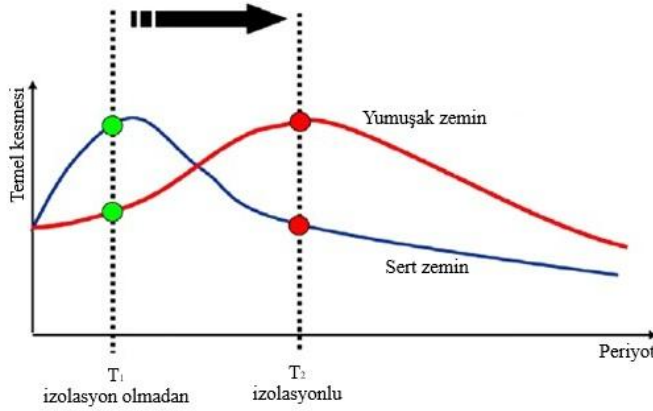
Tezin amacı, farklı serilerdeki disk yayların mekanik performansını sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek standart ve katalog verileriyle karşılaştırmak olup, bu doğrultuda ilgili literatür kapsamlı şekilde incelenmiştir.

### 2.1. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması

Yapılar taşıyıcı olan ve taşıyıcı olmayan elemanlardan oluşur. Yapıları ayakta tutan ise taşıyıcı görevi olan kolon, kiriş, perde duvar gibi elemanlarla birlikte zemin mekaniğidir. Bu yapıların, kullanım ömrü boyunca kendi yükünü taşıması ve belirli şiddetteki depremlere karşı ayakta durabilmesi beklenir. Doğru tasarlanmış ve titizlikle imalatı yapılmış bir yapıdan beklenen minimum performans aşağıdaki gibidir;

- Hafif şiddetli depremlerde yapı içindeki eşyaların, insanların, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların hiçbir hasar görmemesi,
- Orta şiddetli depremlerde taşıyıcı elemanlarda küçük hasar başlangıçlarının olması,
- Yüksek şiddetli depremlerde taşıyıcı elemanlarda can kaybının yaşanmayacağı kabul edilebilir sınırlar içerisinde hasar olması beklenir.

Yapılarda sismik izolasyon kullanırken birçok parametreye dikkat etmek gerekir. Hatta bazen izolasyon sistemleri kullanmamak en doğru çözümdür (Şekil 2.1).



**Şekil 2. 1.** Sismik izolasyonunun farklı zemin koşullarındaki etkisi

Ciddi hasarlara sebep olabilecek depremlerde yapıların elastik davranış göstermesi çok önemlidir. Deprem izolatörleri yanıl esneklik ve iyi bir sönümleme direnci sağlamaktadır. İzolasyon sistemleri malzeme ve mekanizmalarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir (Dönmez 2019):

- a) Elastomerik Mesnetli Sistemler
  - Düşük sönümlü kauçuk tip mesnetler (LDRB)
  - Yüksek sönümlü kauçuk tip mesnetler (HDRB)
  - Kurşun çekirdekli kauçuk tip mesnetler (LRB)
- b) Kayma Esaslı Sistemler
  - Sürtünmeli sarkaç sistemi (FPS)

- Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi (R-FBI)
  - Fransa Elektrik Kurumu sistemleri (EDF)
  - EERC birleşik sistemleri
  - TASS sistemi
- c) Yaylı Sistemler
- Çelik yaylı sistemler
  - Elastomerik yaylı sistemler
  - Kompozit yaylı sistemler
  - Hibrid yaylı sistemler
  - Çift katmanlı sistemler
  - Vibrasyonlu yaylı sistemler
  - Ayarlı kütle sönümleyici (TMD) sistemleri
  - Çerçevesiz yaylı sistemler

## 2.2. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Deprem Yüklerine Karşı Davranışları

Sismik izolasyon sistemleri, yapı ile zemin arasındaki etkileşimi düzenleyerek yer hareketinin yapıya aktarımını azaltır ve böylece yapıların deprem etkilerine karşı dinamik tepkilerini iyileştirir. Bu sistemlerin deprem yüklerine karşı davranışları farklı başlıklar altında incelenebilir.

### 2.2.1. Yapının Deprem İvmesinden Bağımsızlaştırılması

Sismik izolasyon sistemlerinin temel amacı, yer hareketinin üst yapıya iletilmesini engellemektir. Elastomerik veya metalik izolatörler, zemindeki hareketi sönümleyerek yapının daha az ivmeye maruz kalmasını sağlar. Bu durum, özellikle yüksek binalar ve kritik altyapılar için büyük avantaj sunar.

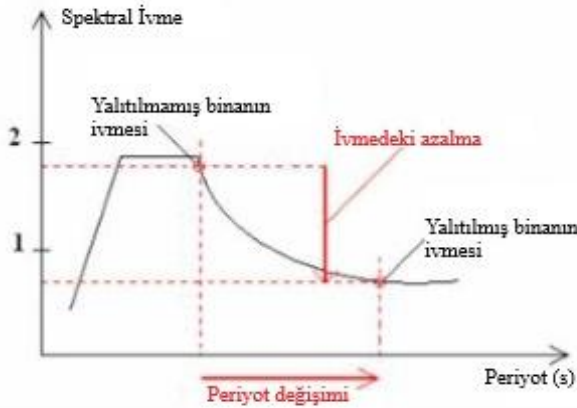
### 2.2.2. Enerji Sönümleme ve Düşük Titreşim İletimi

Sismik izolasyon sistemleri, deprem sırasında yapıya etki eden sismik enerjiyi etkin bir şekilde sönümleyerek titreşimlerin şiddetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Elastomerik, viskoelastik ve metalik sönümleyiciler, yapıdaki titreşimleri emerek deprem enerjisinin büyük bir kısmını dağıtır ve bu enerjinin yapıya iletilmesini sınırlar. Bu mekanizma, yapının hareket hızını düşürür, rijitliğini azaltır ve titreşimlerin yapısal elemanlara yayılmasını engeller. Sonuç olarak, yapının yatay yer değiştirmesi sınırlanır ve yapısal hasar riski minimize edilerek yapının dayanıklılığı artırılır.

### 2.2.3. Deprem Kaymaları ve Yapısal Yer Değiştirmelerin Azaltılması

İzolasyon sistemleri, yapının temelinden kaynaklanan kayma hareketlerini engelleyerek, yapısal elemanların yer değiştirmelerini kontrol altına alır. Bu özellik, özellikle yüksek binalar ve uzun köprüler gibi büyük yapıların sismik dayanımında kritik bir rol oynamaktadır. İzolasyon sayesinde, yapının alt yapısı zeminle uyumlu bir şekilde hareket edebilmekte, ancak üst yapı bu hareketten asgari seviyede etkilenmektedir. Bu durum, yapının zemin hareketlerine karşı daha esnek ve dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, izolasyon sistemi yapının doğal periyodunu uzatarak, düşük

ivme seviyelerine ulaşılmasına olanak tanır. İzolasyonlu sistemin spektral ivme (depremdeki maksimum ivme) periyot grafiği Şekil 2.2’de gösterilmiştir (Türk 2019).



**Şekil 2. 2.** İzolasyonlu bir sistemin spektral ivme-periyot grafiği

#### 2.2.4. Düşük Frekanslı Titreşimleri Engelleme

Sismik izolasyon sistemleri, yapıların doğal frekanslarını sismik kuvvetlerle uyumsuz hale getirerek rezonans olasılığını minimize eder. Bu, özellikle düşük frekanslı sismik dalgaların etkisini sınırlayarak yapının rezonansa girmesini engeller. Rezonans, yapının doğal frekansının deprem dalgalarının frekansı ile örtüşmesi durumunda yapısal hasarın önemli ölçüde artmasına yol açabilir. İzolasyon elemanları, yapıların doğal frekanslarını değiştirerek bu uyumsuzluğu sağlayarak rezonansın oluşumunu engeller ve böylece yapıların güvenliğini artırır (Türk 2019).

### 2.3. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Mekanik Özellikleri ve Tasarımı

Sismik izolasyon sistemleri birçok malzeme çeşitlerinden, tek veya çoklu kombinasyonları kullanarak uygulamaları mevcuttur. Bu tez kapsamında yaylı izolasyon sistemleri ele alınacaktır. Yaylarla ilgili bilgiler ışığında disk (Belleville) yayların sismik etkilerdeki davranışı incelenecektir. Büyük yükler altına kısa strok mesafesi ile yüksek enerji sönümleme özelliğine sahip olan disk yaylar çeşitli malzemelerden üretilebilmektedir. Plastik, çelik ve kompozit malzemeler ve bunların farklı ölçülerde ve eklemeli tasarımı ile disk yayların kullanımı bulunmaktadır. Bu yay ismini Jullien F. Belleville adında Fransız bir mühendis tarafından almış olup 1867 yılında patenti alınmıştır.

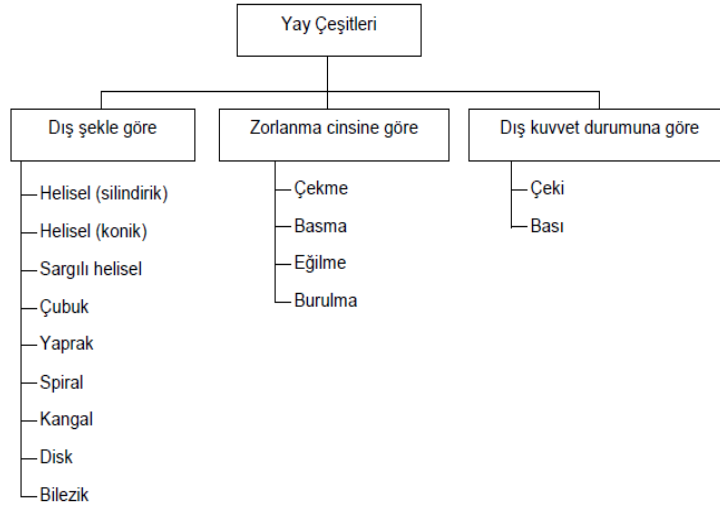
#### 2.4. Yaylar

Yaylar, mekanik bir sistemde gerilim veya kuvvetin korunmasını, şokları emmeyi ve titreşimleri azaltmayı mümkün kılar (Çizelge 2.1). Bükülme elemanlarının yorulma hatası genellikle mekanik bileşenin hasarına ve yüksek maliyetlere neden olur. Modern endüstriyel ekipman ve taşımacılıktaki yüksek yüklü yay elemanları, yüksek ortalama gerilim ve yüksek genlik gerilimi ile çok sayıda döngüyü sağlamalıdır. Bu yaylar kaliteli malzemelerden imal edilir. Mekanik ve ısıl işlem prosesleri kullanılarak üretilir (Koç 2017).

**Çizelge 2. 1.** Yay türü ve kullanım yerleri

| S. | Yay Türü/Kullanım Amacı                            | Kullanım Yeri Örnekleri                                                                                                                                                                                                                                         |
|----|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Enerji depolayıcı yaylar                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Tahrik amaçlı kullanım</li> <li>Mekanik oyuncak tahriki</li> <li>Mekanik saat mekanizmaları</li> <li>Kumanda çubuklarının hareketi</li> </ul>                                                                            |
| 2  | Darbe yutucu ve titreşim söndürücü yaylar          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aks ve tampon yayları (raylı taşıtlar ve karayolu taşıtlarında)</li> <li>Elastik kavramalarda denge yayları</li> <li>Hareketli kütlelerin darbesiz durdurulması</li> <li>Makinaların zemine oturtulması</li> </ul>       |
| 3  | Titreşim yayları                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Titreşimli elekler, titreşimli masalar</li> <li>Karıştırıcılar ve çekiciler</li> <li>Makinaların yataklanması ve desteklenmesi</li> </ul>                                                                                |
| 4  | Kuvvet sınırlayıcı yaylar                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Presler</li> <li>Ön gerilme ile yerleştirilerek boşluk gidermek</li> </ul>                                                                                                                                               |
| 5  | Kuvvet bağı oluşturan veya kuvvet dağıtan yaylar   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gergi yayları</li> <li>Geri tepme yayı (supab, kilit vb.) Yüklerin dengeli dağıtılması (yaylı yatak ve taşıtlarda)</li> <li>Yüklerin dengeli dağıtılması (yaylı yataklarda, taşıtlarda)</li> </ul>                       |
| 6  | Kuvvet uygulayan veya hareketi kontrol eden yaylar | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kavrama veya fren kuvveti oluşturan yaylar</li> <li>Kam mekanizmalarında</li> <li>Motor supaplarının açılıp kapanmasında</li> <li>Çekilen veya itilen elemanların ilk konumlarına dönmelerini sağlayan yaylar</li> </ul> |
| 7  | Kuvvet ve basınç ölçen yaylar                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Yaylı dinamometreler</li> <li>Yaylı terazi/kantar mekanizmaları</li> </ul>                                                                                                                                               |

Yayların türleri, özelliklerine ve uygulama şartlarına göre seçilir. Taşıyacağı yük, deformasyon ve deplasman miktarı, uygulanacağı yerin hacmi, ortam sıcaklığı gibi etkenler yay seçiminde önemlidir. Yay çeşitleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir.

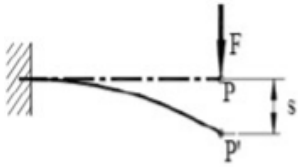


**Şekil 2. 3.** Yayların çeşitleri ve sınıflandırılması

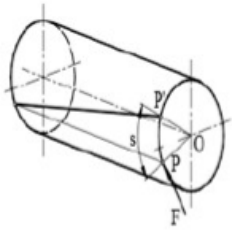
Yaylar zorlanma şekillerine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir (Koç 2017):

- Eğilme yayları: Disk yay, spiral yay, yaprak yay, kangal yay.
- Burulma yayları: Helisel yaylar, çubuk yaylar.
- Çekme-basma yayları: bilezik yaylar, çubuk yaylar, disk yaylar.

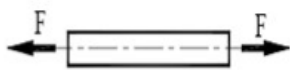
Yayların zorlanma şekilleri aşağıda belirtilmiştir (Şekil 2.4, 2.5, 2.6).



**Şekil 2. 4.** Eğilme yayı



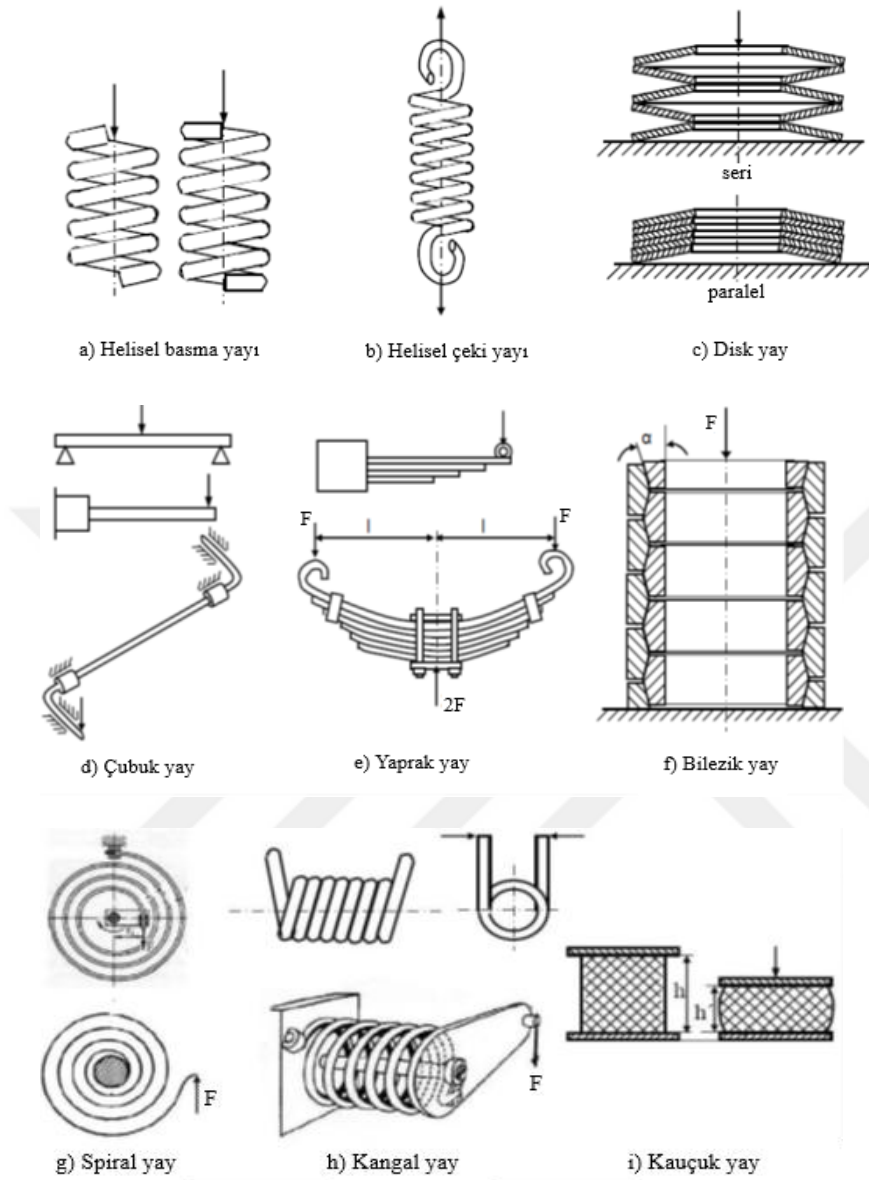
**Şekil 2. 5.** Burulma yayı



**Şekil 2. 6.** Çekme-basma yayı



Yay çeşitlerinin şekilleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 7. Yay çeşitleri

#### 2.4.1. Yayların Karakteristikleri

Yaya etkiyen kuvvet/moment ve şekil değiştirme ilişkisi yay karakteristiğini ifade eder. “F” kuvveti ile yüklenen yaylar “s” mesafede yol alır. Grafik olarak gösterilen yay karakteristiği yayın davranışı konusunda bilgi verir.

Bir malzemenin elastiklik yeteneği, Hook Kanunu ile tanımlanır. Bu kanun, malzeme veya yay üzerinde uygulanan kuvvetin, malzemenin uzama veya sıkışma miktarıyla doğru orantılı olduğunu belirtir. Ancak bu ilişki, malzemenin elastik sınırları içinde geçerlidir. Hooke Kanunu matematiksel olarak (2.1) bağıntısındaki şekilde ifade edilir (Kutay 2010):

$$F = -R \cdot s \quad (2.1)$$

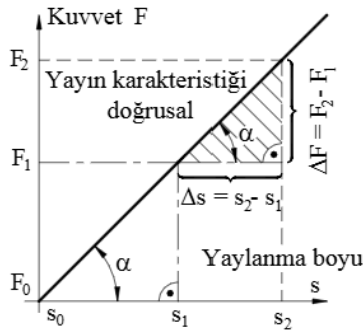
R: Yay rijitliği veya yay sabiti (N/mm)

F: Yay kuvveti (N)

s: Yaylanma yolu (mm)

Her yayın karakteristiğine özgü “R” harfi ile gösterilen yay katsayısı vardır. R sabiti karakteristik eğrisinin eğimi ile gösterilir (Şekil 2.8);

Yay sabiti R, yay veya elastik malzemenin sertliğini belirtir. Yüksek R değeri, yay ya da malzemenin daha sert olduğunu, düşük R değeri ise daha yumuşak olduğunu gösterir. R katsayısı yayı bir birim uzatmak için gerekli kuvveti ifade eder ve (2.2) bağıntısıyla hesaplanır.



Şekil 2. 8. Lineer karakteristikli yay diyagramı

$$\tan \alpha = \frac{F_1}{s_1} = \frac{F_2}{s_2} = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1}$$

$$R = \tan \alpha = \frac{dF}{ds} \quad (2.2)$$

S, yay veya malzeme üzerinde uygulanan kuvvet sonucu meydana gelen uzama veya sıkışma miktarını ifade eder. Kuvvet etkisinde yay uzarsa, s pozitif değerde; diğer bir şekilde kuvvet etkisinde yay sıkışır, s negatif değerde olur (Kutay 2010).

### Hooke Kanunu'nun Özellikleri:

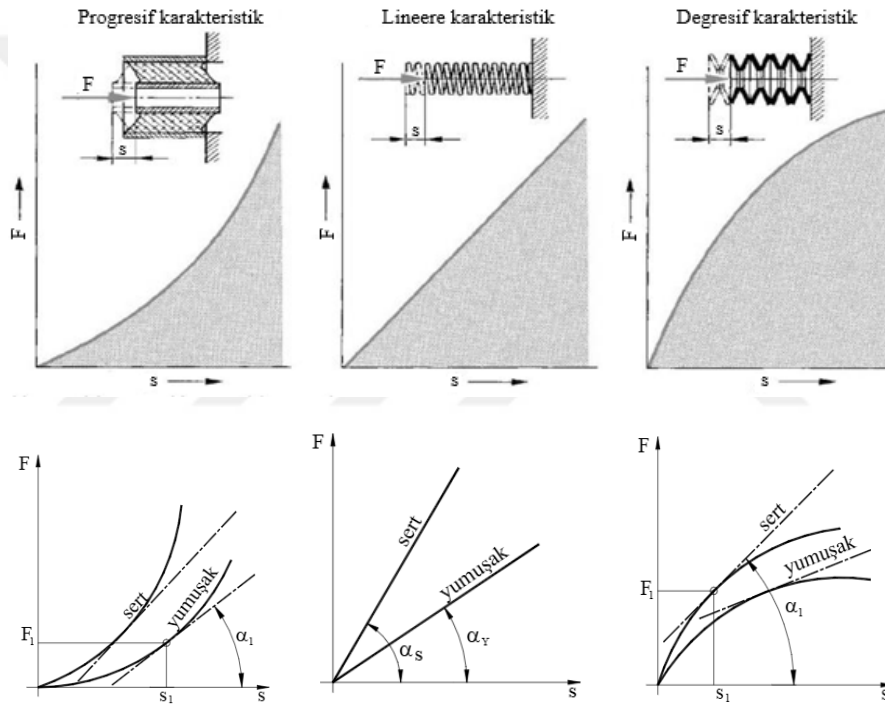
1. **Elastik Bölge:** Hooke Kanunu, malzemenin elastik bölgesinde geçerlidir. Bu, malzemenin deformasyonunun geri dönüşlü olduğu (yani, kuvvet kaldırıldığında malzemenin eski haline dönebildiği) anlamına gelir. Eğer kuvvet çok büyükse ve malzeme plastik deformasyona uğrarsa, Hooke Kanunu geçerliliğini kaybeder.
2. **Doğru Orantı:** Hooke Kanunu, kuvvet ile deformasyon arasında doğrusal bir ilişki olduğunu söyler. Kuvvet ne kadar artarsa, yay o kadar çok uzar ya da sıkışır.

3. **Farklı Malzemelerde Farklı Yay Sabitleri:** Her yay ve her elastik malzeme farklı bir yay sabitine sahiptir. Bu yay sabiti, malzemenin sertliği ile ilişkilidir.

Yaylar sadece lineer karakteristikte çalışıyorsa Hook Kanunu geçerlidir. Hook Kanunu yay ve esnek malzemeler için temel ilke niteliğindedir ancak tüm yaylanma özelliğindeki malzemeler Hook kanunu çerçevesinde çalışmaz (Kutay 2010).

Yay çeşitleri ve tasarımlarına göre lineer, progresif ve degresif karakteristikte davranışlar gösterir (Şekil 2.9).

Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi lineer karakteristiğe sahip yaylarda yay katsayısı (R) sabit, progresif karakteristiğe sahip yaylarda kuvvet büyüdükçe R büyümekte, degresif karakteristikli yaylarda ise kuvvetin büyüme ile R katsayısı azalmaktadır (Kutay 2010).



Şekil 2. 9. Çeşitli sertlikteki yaylar ve karakteristikleri

## 2.5. Yay Sistemleri

Yapı tasarımlarında kullanılan yay sistemleri, uygulama şartlarına göre özelleştirilir. Sınırlı hacim, spesifik yaylanma karakteristiği gereksinimi veya daha yüksek kapasite ihtiyacı gibi faktörler tasarımı etkiler. Bu gereksinimlere bağlı olarak, yaylar çeşitli kombinasyonlarda, genellikle seri veya paralel bağlanma şeklinde kullanılır.

### 2.5.1. Paralel Bağlı Yaylar

Yaya etkiyen  $F$  kuvveti yaylara eşit şekilde dağıtılır. Yaylanma rijitliği büyüktür. Yaylar eşit şekil değiştirirken kuvvet ise yay miktarına oranla paylaşılır. Bu bağlantı sisteminde momentler eşit olmak zorundadır. Paralel bağlı yay sisteminin eşdeğer  $R$  sabiti (2.3) bağıntısıyla ifade edilir ve grafiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir;

$$F_{top} = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

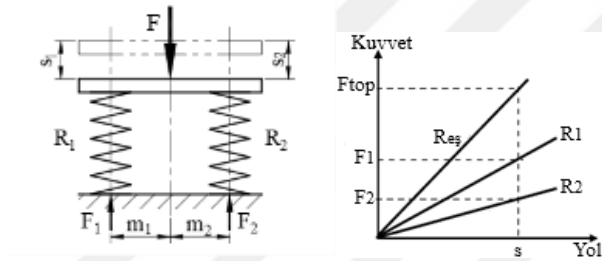
$$R_{eş} \cdot s = R_1 \cdot s_1 + R_2 \cdot s_2 + \dots + R_n \cdot s_n$$

$$s_1 = s_2 = \dots = s_n$$

$$R_{eş} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.3)$$

$F_{top}$ : Toplam kuvvet

$R_{eş}$ : Eşdeğer yay sabiti



Şekil 2. 10. Paralel bağlı yayların eşdeğer  $R$  sabiti grafiği ve şeması

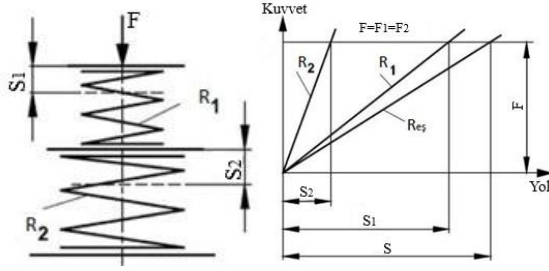
### 2.5.2. Seri Bağlı Yaylar

Seri bağlama yönteminde tüm yayların şekil değiştirmelerinin toplamı eşdeğer şekil değiştirmeye eşit olur. Ancak tüm yaylara aynı kuvvet etki etmektedir. Kuvvetin etki doğrultusu yay ekseninde olmalıdır. Yaylanma rijitliği daha düşüktür. Seri bağlı yay sisteminin  $R$  sabiti (2.4) bağıntısında ve grafiği de Şekil 2.11'de gösterilmiştir (Kutay 2010);

$$s_{top} = s_1 + s_2 + \dots + s_n$$

$$\frac{F}{R_{eş}} = \frac{F}{R_1} + \frac{F}{R_2} + \dots + \frac{F}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2.4)$$

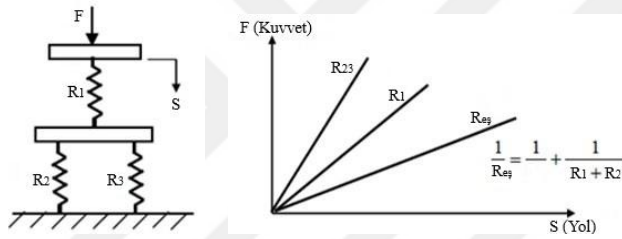


Şekil 2. 11. Seri bağlı yayların eşdeğer R sabiti grafiği ve şeması

### 2.5.3. Karma Bağlı Yaylar

Karma bağlı sistem hem seri hem paralel bağlanan yay kombinasyonu karma sistem olarak adlandırılır. Kuvvet, yay ekseninde olmalıdır. Karma sistemin formülasyonu (2.5) bağıntısında ve grafiği Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Kutay 2010);

$$\frac{1}{R_{eş}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2+R_3} \quad (2.5)$$



Şekil 2. 12. Karma bağlı yay sistemi R sabiti grafiği ve şeması

### 2.6. Yaylanma İşi

Yaylar, üzerine kuvvet uygulandığında enerji depolayarak bu enerjiyi serbest bırakan ve iş yapan mekanizmalardır. Yaylar, elastik deformasyonlar sırasında potansiyel enerji depolar ve yay eski haline döndüğünde bu enerji serbest bırakılır. Yaylar, gerilme (çekme) veya sıkışma (basma) kuvveti uygulandığında potansiyel enerji depolar ve bu enerji, yay eski haline dönerken dışarıya iletilir. Yayın yaptığı iş (2.6) ve (2.7) bağıntısında gösterilmektedir (Kutay 2010);

$$\text{İş} = \text{Kuvvet} \cdot \text{Yol}$$

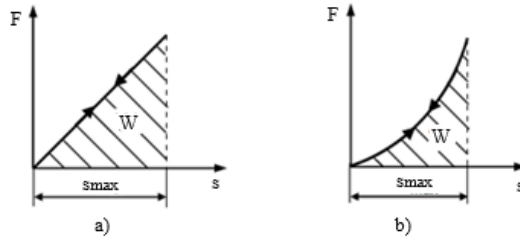
$$W = \int F \cdot ds \quad (2.6)$$

Eğilmeye maruz kalan yaylar için iş (W: İş (joule))

$$W = \frac{1}{2} \cdot F \cdot s \quad (2.7)$$

Yayın yükleme karakteristiğinin altında kalan alan yayda depolanan enerjiyi yani işi ifade eder. Yayın boşaltma karakteristiğinin altında kalan alan ise yaydan geri

alınan işi ifade eder. Ancak sürtünme kayıpları dikkate alındığında yükleme ve boşaltma karakteristikleri farklı davranış göstererek aynı yolu izlemez (Şekil 2.13).

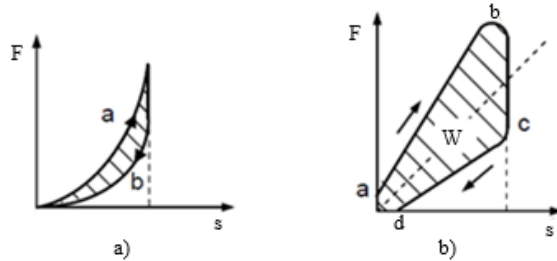


**Şekil 2. 13.** Farklı karakteristiklerdeki yayların yaptığı iş; (a) lineer, (b) non-lineer

## 2.7. İç Sönümleme Etkisi

Teorik olarak, yayların yükleme ve boşaltma eğrileri aynı çizgi üzerinde olsa da uygulamada farklı çalışırlar. Ortam koşulları, yay malzemesinin iç yapısı ve yaylar arasındaki sürtünme gibi etkenler, yükleme ve boşaltma eğrilerinin farklı olmasına neden olur (Şekil 2.14). Bu duruma iç sönümleme etkisi denir. Gerçek ortam koşulları nedeniyle yaylar hiçbir zaman başlangıç konumuna tamamen dönemez; bu olguya histerezis etkisi denir. Yükleme ve boşaltma eğrisi arasındaki alan, kaybolan enerjiye, yani ısı enerjisine işaret eder. Şekil 2.14 grafiğinde ifade edilen;

- a-b arası: Sürtünme kuvvetini yenerek yapılan yükleme
- b-c arası: Sürtünme kuvvetini yenme
- c-d arası: Boşaltma



**Şekil 2. 14.** İç sönümleme etkisindeki yayların yaptığı iş; (a) nonlinear, (b) lineer

Çelik yaylarda iç sönümleme faktörü ( $\Psi$ ) %0,06-0,3 arasında olup genellikle ihmal edilebilirken, kauçuk yaylarda bu değer %6-30 arasındadır. Çoklu elemanlardan oluşan yaylarda, özellikle disk yaylar ve bilezik yaylar gibi, dış sürtünme önemli bir rol oynar ve sönümleme faktörü ( $\Psi$ ) %40-50 arasında değişir. Bu, yaya verilen enerjinin %40-50'sinin ısı enerjisi olarak sönümlendiği anlamına gelir. Kalan enerji ise doğrudan iletilir. Bu nedenle, yüksek sönümleme faktörüne sahip yaylar tercih edilir. En yüksek sönümleme faktörüne sahip yaylar ise bilezik, yaprak, disk, helisel ve kauçuk yaylardır. Yaya depolanan  $W_1$  enerjisinin yaydan alınan  $W_2$  enerjisine oranı, yayların verimliliğini ifade eder ve (2.8) bağıntısıyla elde edilir (Koç 2017).

$$\eta = \frac{W_1}{W_2} \quad (2.8)$$

## 2.8. Şekilden Faydalanma Katsayısı

Yayların depolayabildiği enerjinin, aynı koşullardaki homojen çubuk yaya oranıdır. Yayların deformasyon kapasitesini karşılaştırmak için kullanılır. Şekilden faydalanma katsayısı (Koç 2017);

$$\eta = \frac{W}{W_{teo}}$$

Buradan yola çıkarak çubuk yayın çekme zorlanmasında teorik iş;  $W_{teo} = \frac{\sigma^2}{2E} V$ ,

Kayma zorlanmasında teorik iş;  $W_{teo} = \frac{\tau^2}{2G} V$  formülünden hesaplanır.

Herhangi bir yayın depoladığı enerji ise (2.9) bağıntısı ile ifade edilir.

$$W = \eta W_{teo} = \eta \frac{\sigma^2}{2E} V \quad (2.9)$$

E: Elastisite modülü

$\sigma$ : Çekme/basma gerilmesi

$\tau$ : Kayma gerilmesi

G: Kayma modülü

$\gamma$ : Özgül ağırlık

$\eta$ : Şekilden faydalanma katsayısı

Şekilden faydalanma katsayısı, yayların yük taşıma ve enerji depolama verimliliğini belirleyen kritik bir parametredir. Geometri, malzeme özellikleri ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Referans çubuk yayda  $\eta=1$  iken, çoğu yayda bu değer daha düşüktür; ancak disk veya bilezik yay kombinasyonlarında 1'den büyük olabilir. Katsayı, yay tasarımında gerilme dağılımının homojenliğini ve optimum performansı yansıtmak için kullanılır (Koç 2017).

## 2.9. Hacimden Faydalanma Katsayısı

Bir yay elemanının birim hacim başına depolayabildiği enerjiyi ifade eden parametredir. Malzemenin enerji depolamadaki etkinliğini ve yay tasarımındaki malzeme kullanım verimliliğini gösterir. Tasarımda optimize edilmesi, dayanıklılık ve enerji verimliliğini artırır. (2.10) bağıntısı ile formüle edilir;

$$\eta v = \eta \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2.10)$$

Mühendislik tasarımında, bu katsayının optimize edilmesi hem yapısal dayanıklılığı artırmakta hem de enerji verimliliğini iyileştirmekte kritik rol oynar (Koç 2017).

## 2.10. Ağırlıktan Faydalanma Katsayısı

Bir yayın birim ağırlığında depo edebileceği enerjiyi ifade eder. Bu katsayı, yayların ağırlığının, taşıyabileceği yük miktarına veya yayda depolayabileceği enerjiye ne kadar etki ettiğini belirler. (2.11) bağıntısı ile formüle edilir;

$$\eta G = \eta \frac{\tau^2}{2G\gamma} \quad (2.11)$$

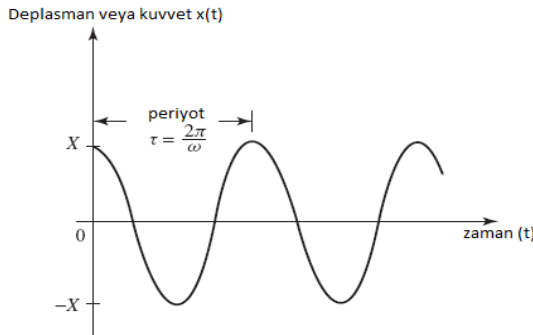
Yay sisteminde kullanılan malzemenin ağırlığının, yük taşıma kapasitesine olan etkinliğini gösteren parametredir. Malzeme optimizasyonu ve yapısal verimlilik için önemlidir. Hafif ve dayanıklı malzeme kullanımıyla artırılabilir, ancak fazla ağırlık performansı olumsuz etkileyebilir (Koç 2017).

## 2.11. Yaylarda Titreşim

Cismin denge konumunun etrafında yaptığı düzenli veya düzensiz hareketlere titreşim denir. Bu hareket, genellikle bir dış kuvvetin etkisiyle başlar ve "salınım" ya da "vibrasyon" şeklinde tanımlanır. Titreşimin ifade edilebilmesi için bazı özelliklere sahip olması gerekir. Bunlar;

- Frekans: Titreşimin bir saniyede kaç kez tekrarladığına frekans denir. Birimi Hertz (Hz)'dir.
- Amplitüd: Titreşimin büyüklüğünü veya hareketin maksimum noktalarını ifade eder. Yani, cismin denge konumundan ne kadar uzaklaştığını gösterir.
- Dönem: Bir tam titreşim hareketinin tamamlanma süresidir. Yani, cismin bir salınım yapması için geçen süredir.
- Dalga Boyu: Titreşimlerin yayılma mesafesidir, özellikle ses dalgaları gibi dalga şeklinde hareket eden titreşimlerde kullanılır.

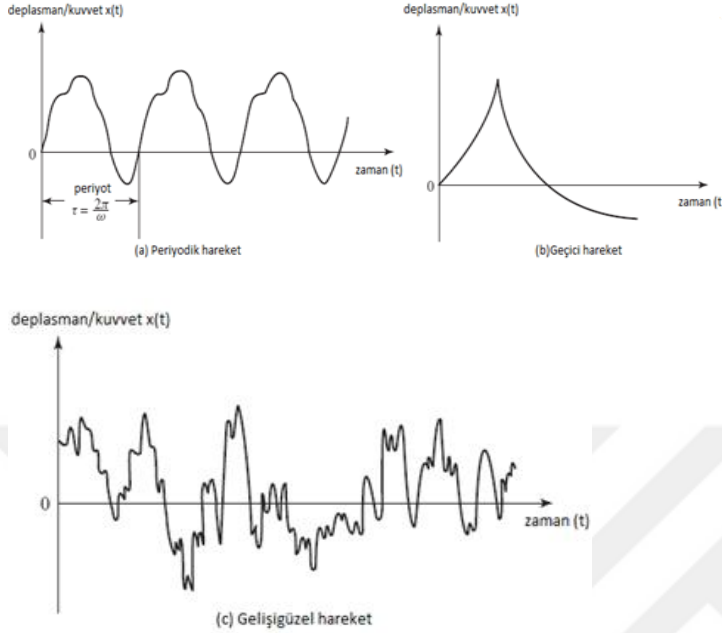
Titreşimler, mekanik, akustik veya elektromanyetik gibi farklı türlerde olabilir. Aşırı titreşim, makinelerde aşınmaya, gürültüye veya yapısal hasara yol açabilir. Titreşim hareketi şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2. 15. Basit harmonik hareket

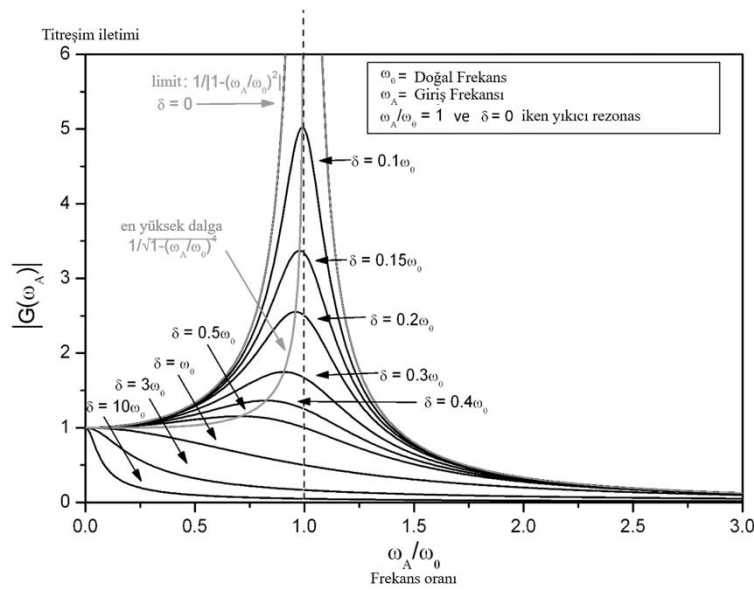


Titreşimler her zaman Şekil 2.15'te görüldüğü gibi basit harmonik hareket şeklinde olmazlar. Bazen değişken davranış gösterirler. (a) Periyodik hareket, (b) geçici hareket ve (c) gelişigüzel olarak davranışlar gösterebilir (Şekil 2.16).



Şekil 2. 16. Çeşitli frekans durumları

Titreşimin en ciddi tehlikesi ise rezonans durumudur. Titreşim rezonansı, bir sistemin doğal frekansının ( $W_0$ ), dışarıdan uygulanan periyodik bir kuvvetin frekansı ( $W_A$ ) ile örtüştüğü durumda meydana gelir. Bu durumda, sistemdeki titreşimler çok büyük bir genliğe ulaşır. Bir sistemin doğal frekansında (veya kendi titreşim frekansında) dış bir kuvvet tarafından zorlanan titreşimlerin aşırı şekilde büyümesine sebep olur (Şekil 2.17).



$W_0$ : Sistemin doğal frekansının

$W_A$ : Dışarıdan uygulanan periyodik bir kuvvetin frekansı

Şekil 2. 17. Dış kuvvetin frekansı ile doğal frekans örtüştüğü rezonans durumu

Her sistemin bir doğal frekansı vardır. Bu frekans, sistemin yapısal özelliklerine, elastikiyetine ve kütlesine bağlıdır. Eğer dış bir kuvvet bu doğal frekansa yakın bir frekansta sürekli olarak uygulanırsa, sistemin salınımları zamanla çok büyük boyutlara ulaşabilir (Thomson, Dahleh 1998; Meirovitch 1986; Weaver, Timoshenko, Young 1991).

## 2.12. Yay Malzemeleri

Yay malzemeleri metal alaşımları, kompozitler ve elastomerleri içerir. Metal yaylar genellikle ısıtıl işlem ve yüzey sertleştirme ile güçlendirilir. Malzeme seçiminde elastisite modülü (E) eğilme, kayma modülü (G) ise burulma yükleri için kritik parametrelerdir. Yay malzemeleri ve mukavemet değerleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2. 2.** Yay türleri, malzeme cinsler ve mukavemet değerleri

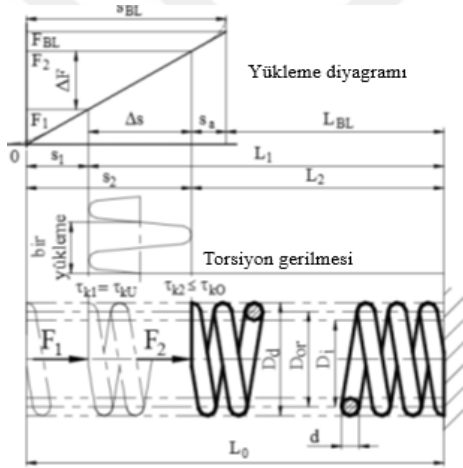
| Yay cinsi                  | Malzeme ve malzemenin muamelesi            | E- Modülü<br>G- Modülü | Statik mukavemet değerleri                                                                                           | Dinamik mukavemet değerleri                  |
|----------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| • Yaprak yaylar            | Yay çeliği, DIN 17221                      | E-Modülü<br>200'000    | $R_m$ $R_{p0,2}$<br>1320...1570 1130<br>1320...1570 1130<br>1370...1670 1180<br>1900...2400 1800<br>1700...2300 1600 | $\sigma_{or} \pm \sigma_G$                   |
|                            | Islah edilmiş 51 Si 7                      |                        |                                                                                                                      |                                              |
|                            | 60CrSi 7                                   |                        |                                                                                                                      |                                              |
|                            | 50CrV 4                                    |                        |                                                                                                                      |                                              |
|                            | Çelik bandlar DIN 17 222 soğuk haddeli H+A |                        |                                                                                                                      |                                              |
|                            | 71 Si7                                     | E-Modülü<br>210'000    | $\sigma_{eEM} \approx 0,7 \cdot R_m$                                                                                 | $\sigma_{eD} = 500 \pm 120...300$            |
|                            | 50CrV 4                                    |                        |                                                                                                                      | $\sigma_{eD} = 500 \pm 300$                  |
|                            | Hadde kabuklu                              |                        |                                                                                                                      | $\sigma_{eD} = 500 \pm 400$                  |
|                            | Hadde kabuğu alınmış                       |                        |                                                                                                                      | $\sigma_{eEM} = \sigma_{or} + 0,75 \sigma_G$ |
|                            | taşlanmış                                  |                        |                                                                                                                      |                                              |
| • Kargal yaylar            | Çelik yay teli                             | E- Modülü              | DIN 2076 göre d ye bağlı                                                                                             | $\sigma_{eEM}$ , DIN 2088 den                |
|                            | DIN 17223                                  | 210'000                | $\sigma_{EM}$ Tabelalardan                                                                                           | d = 4 mm kadar tabelalara bakın              |
|                            | Tel çeşitleri A, B, C, II                  | E- Modülü              |                                                                                                                      |                                              |
|                            | DIN 17 224 paslanmaz                       | 194'000                |                                                                                                                      |                                              |
|                            | XI2CrNi177 K+A                             |                        |                                                                                                                      |                                              |
| • Spiral yaylar            | Çelik bandlar DIN 17 222                   | E- Modülü              | Band kalınlığı $\leq 1$ mm                                                                                           | İmalatçı verilerine göre                     |
|                            | C67, Ck67, 67SiG4, 50CrV 4                 | 210'000                | $\sigma_{EM} \approx 1100 \text{ N/mm}^2$                                                                            |                                              |
|                            |                                            |                        | 1... 3 mm $\approx 950$                                                                                              |                                              |
|                            |                                            |                        | > 3 mm $\approx 800$                                                                                                 |                                              |
| • Disk yaylar              | DIN 17 221, 17 222 50CrV4, Ck67            | E- Modülü              | $s \approx 0,75 h$                                                                                                   | Tabelalardan                                 |
|                            |                                            | 206'000                | $\sigma_{iEM} = 2000 \dots 2400$                                                                                     |                                              |
| • Çubuk torsiyon yaylar    | Sıcak haddeli çelikler                     | G- Modülü<br>78 500    | Yuvarlak çubuklar                                                                                                    | $\tau_{or} \pm \tau_G$                       |
|                            | DIN 17 221 ıslah edilmiş                   |                        | $\tau_{iEM} = 700$                                                                                                   | $\tau_{or} \approx 600$                      |
|                            | 55Cr3, 50CrV4, 51CrMoV4                    |                        |                                                                                                                      | Tabelalardan                                 |
|                            | Üst yüzey taşlanmış ve kumlanmış           |                        | $\tau_{iEM} = 1020$                                                                                                  |                                              |
| • Helisel yay              | Yuvarlak yay teli                          | G- Modülü<br>83 000    | D ye bağlı olarak                                                                                                    | Tabelalardan                                 |
|                            | DIN 2076                                   |                        | $\tau_{iEM}$ Tabelalardan                                                                                            |                                              |
| - basma kuvvetini alan yay | Yuvarlak çelik yay teli                    | 80 000                 |                                                                                                                      |                                              |
|                            | DIN 17 223 .....                           |                        |                                                                                                                      |                                              |
| - çekme kuvvetini alan yay | DIN 17221 .....                            | 73 000                 | $\tau_{iEM}$ Tabelalardan                                                                                            |                                              |
|                            | DIN 17 224 .....                           | E- Modülü              | $\tau_{iUEM}$ Tabelalardan                                                                                           |                                              |
|                            | Sevk hali K .....                          | 180'000                |                                                                                                                      | ---                                          |
| - Pirinç yaylar            | CuZn37                                     | E- Modülü              | $R_m \approx 300 \dots 600$                                                                                          | dalgalı değişken                             |
|                            | DIN 17670                                  | 110'000                | $\sigma_{eEM} \approx 250$                                                                                           | $\sigma_{eEM} \approx 150$ 80                |
| - Bronz yaylar             | CuSn6Zn                                    | G- Modülü              | $\tau_{iEM} \approx 150$                                                                                             | $\tau_{iEM} \approx 80$ 40                   |
|                            | DIN 17662                                  | 40'000                 |                                                                                                                      |                                              |
| - Korosyona dayanıklı yay  | CuNi18Zn20, DIN 17682                      | E- Modülü              | $R_m \approx 620$                                                                                                    | dalgalı değişken                             |
|                            |                                            | 135'000                | $\sigma_{eEM} \approx 350$                                                                                           | $\sigma_{eEM} \approx 250$ 100               |
|                            |                                            | G- Modülü              | $\tau_{iEM} \approx 250$                                                                                             | $\tau_{iEM} \approx 150$ 80                  |
|                            |                                            | 45'000                 |                                                                                                                      |                                              |
| - Kauçuk (Lastik) yaylar   | Yumuşak lastik                             | E- Modülü              | $\sigma_{eEM} \approx 1 \dots 2$                                                                                     | $\sigma_{eEM} \approx 0,5 \dots 1$           |
|                            | Shore-sertliği 40...70                     | 2... 8                 | $\sigma_{bEM} \approx 3 \dots 5$                                                                                     | $\sigma_{bEM} \approx 1 \dots 1,5$           |
|                            |                                            | G- Modülü              | $\tau_{EM} \approx 1 \dots 2$                                                                                        | $\tau_{EM} \approx 0,3 \dots 0,8$            |
|                            |                                            | 0,4...1,4              |                                                                                                                      |                                              |

Yay malzemeleri olarak genellikle alaşımlı çelikler kullanılır. En çok krom, silisyum, vanadyum, mangan alaşımları, sertleştirilmiş çelikler ve paslanmaz çelikler kullanılır.

## 2.13. Yay Türleri

### 2.13.1. Helisel Yaylar

Helisel yaylar, üretim yöntemine bağlı olarak sıcak veya soğuk şekillendirme teknikleriyle imal edilebilmektedir. Bu yaylar, basma ya da çekme yükleri altında burulma etkisiyle çalışır. İmalat sürecinde, dairesel ya da çubuk kesitli teller, silindirik bir formda sarılarak yay geometrisi elde edilir. Basma yaylarında, sargılar arasında belirli aralıklar bırakılarak istenen deformasyon (deplasman) kapasitesi sağlanır (Şekil 2.18). Buna karşılık, sargılar arasında boşluk bırakılmayan helisel yaylar çekmeye zorlanmak üzere tasarlanır (Şekil 2.19). Helisel yayların karakteristik yük-deplasman eğrisi genellikle doğrusaldır. Yapısal olarak hafif olmalarının yanı sıra kompakt boyutları sayesinde sınırlı hacimlerde etkili bir şekilde kullanılabilirler (Kutay 2010).



$L_{BL}$ : Yayın blokaj boyu, sargıların birbirine yapışık hali

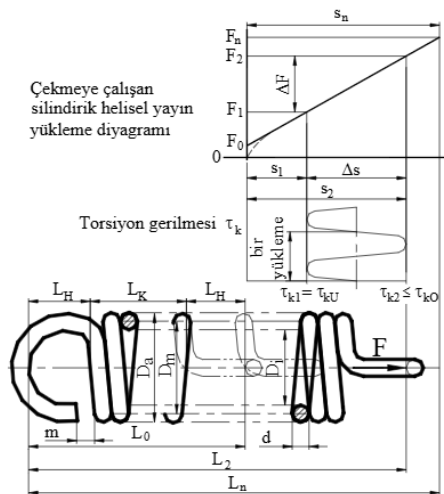
$L_1$ : Yayın  $F_1$  kuvveti altındaki boyu

$L_0$ : Yayın yüksüz boyu

$L_H$ : Çengel ucun son sargıyla olan mesafesi

$L_K$ : Yayın yüksüz monte edilmiş boyu

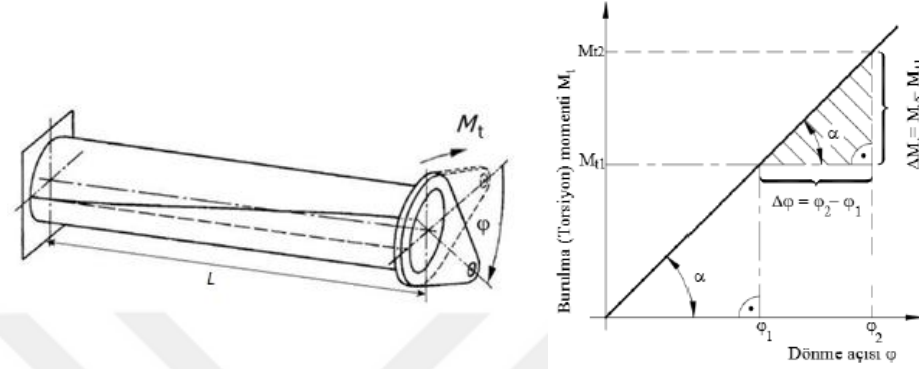
Şekil 2. 18. Basmaya zorlanan yay ve yükleme diyagramı



Şekil 2. 19. Çekmeye zorlanan yay ve yükleme diyagramı

### 2.13.2. Çubuk Yaylar

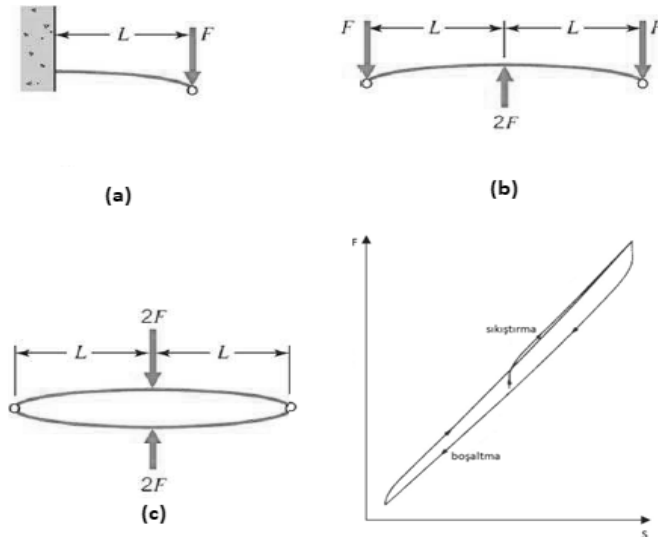
Çubuk yaylar, burulma etkisi altında çalışan dairesel veya dikdörtgen kesitli elemanlardır. Torsiyon ölçümü, elastik kavrama ve taşıt süspansiyon sistemlerinde kullanılır. Uçları, çentik etkisini azaltmak için yuvarlatılır. Yapısı ve karakteristiği Şekil 2.20’de gösterilmiştir (Kutay 2010).



Şekil 2. 20. Burulma maruz kalan çubuk yay ve karakteristiği

### 2.13.3. Yaprak Yaylar

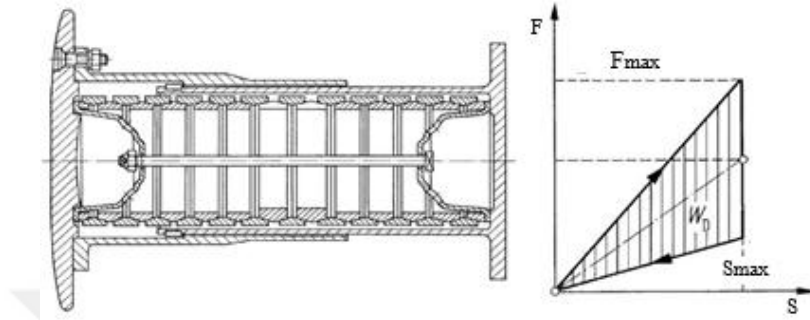
Eğilmeye maruz kalan yaylar, genellikle çok katlı olarak üretilir ve ankastre kiriş ya da basit mesnetli kiriş olarak montajlanabilir. Bu yaylar çeyrek eliptik, yarım eliptik ve tam eliptik şekillerde imal edilip, yük altında düzleşir (Şekil 2.21). Yaylar, şekillerine göre üçgen, dikdörtgen ve trapez olarak sınıflandırılır. Yük dağılımı ve sönümleme verimliliği açısından en etkili ve yaygın kullanılan yay tipi, dikdörtgen kesitli yaprak yaylardır (Omar, Shabana, Mikkola, Loh, Basch 2004).



Şekil 2. 21. Yaprak yaylar ve karakteristiği. (a) çeyrek eliptik, (b) yarım eliptik, (c) tam eliptik

#### 2.13.4. Bilezik Yaylar

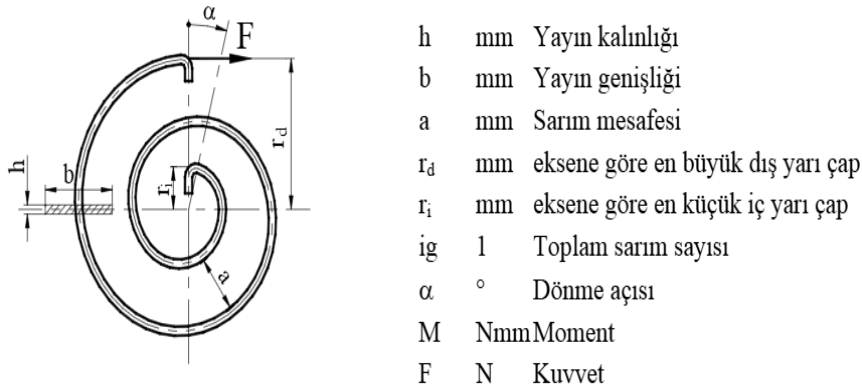
Halkasal, dairesel şekle sahip olan bu yay türü, genellikle mekanik sistemlerde çeşitli amaçlarla kullanılır. Sıkıştırıldığında ve yük altına girdiğinde halkalar genişleyerek yaylanır. Bu tasarım, sınırlı alanda yüksek kuvvet gereksinimlerini karşılamak için özellikle uygundur. Şekil 2.22’de yapısı ve karakteristiği gösterilmektedir (Kutay 2010).



Şekil 2. 22. Bilezik yay ve karakteristiği

#### 2.13.5. Spiral Yaylar

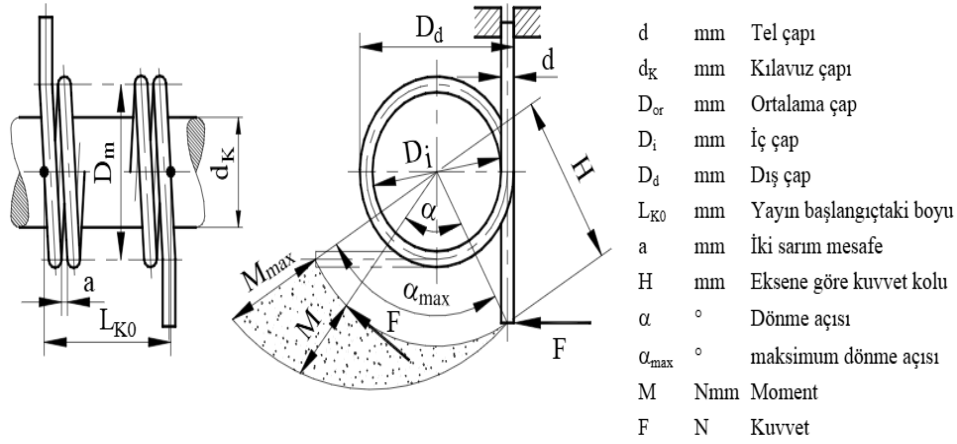
Eğilmeye zorlanan bu yay türü, dikdörtgen kesitli çelik bantların Arşimet spirali şeklinde sarılmasıyla oluşturulur. Dairesel olarak iç merkeze doğru sarıldığından, sarımlar eşit olmayabilir. Yay yüzeyleri birbirine temas etmediği için sürtünme etkisi oluşmaz. Bu yay türü, en yaygın olarak mekanik saat zembereklerinde kullanılır. Şekil 2.23’te yapısı gösterilmektedir (Kutay 2010).



Şekil 2. 23. Spiral yay ve ölçülendirilmesi

#### 2.13.6. Kangal Yaylar

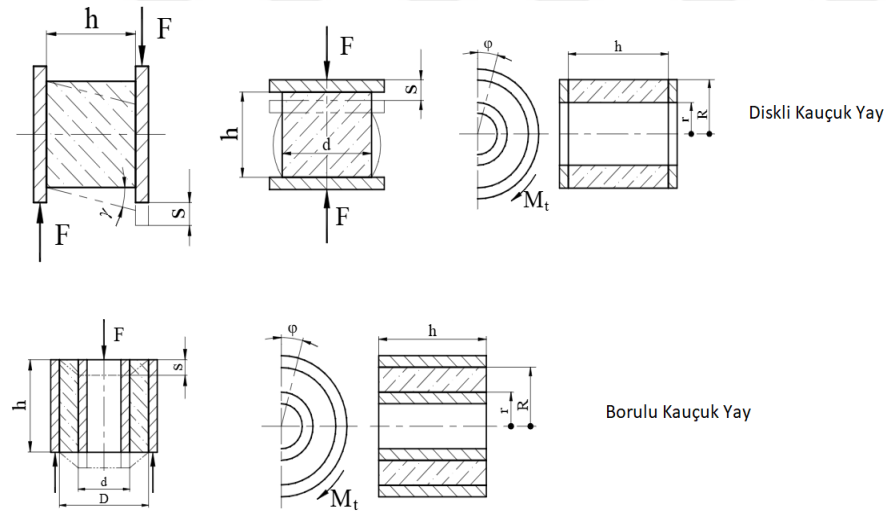
Eğilmeye zorlanan bu yay türü, yapısal olarak helisel yaylara benzer ve lineer yay karakteristiğine sahiptir. Kuvvet-deplasman diyagramı yerine dönme açısı-moment diyagramı kullanılır. Yay, bir ucu düz, diğer ucu ise sabitlenmiş spiral şekilde üretilir (Şekil 2.24). Kuvvet etkisi altında burulmaya zorlanan yayda, yay ekseninden sapmaması sağlanır (Kutay 2010).



Şekil 2. 24. Kangal yay ve ölçülendirilmesi

### 2.13.7. Kauçuk Yaylar

Kauçuk yaylar, kauçuk malzemenin esnekliğinden faydalanılarak tasarlanır. Çelik levhalar arasına çeşitli kalınlıklarda doğal veya yapay kauçuk malzeme sıkıştırılarak yaylanma sağlanır. Temas veya boşluk durumu olmadığı için kuvvet doğrudan kauçuğa iletilir. Yüksek titreşim ve darbe sönümleme kapasitesine sahip olduğundan, bu yaylar deprem izolatörlerinde sıkça kullanılır. Şekil 2.25'te bazı kullanım şekilleri gösterilmiştir.

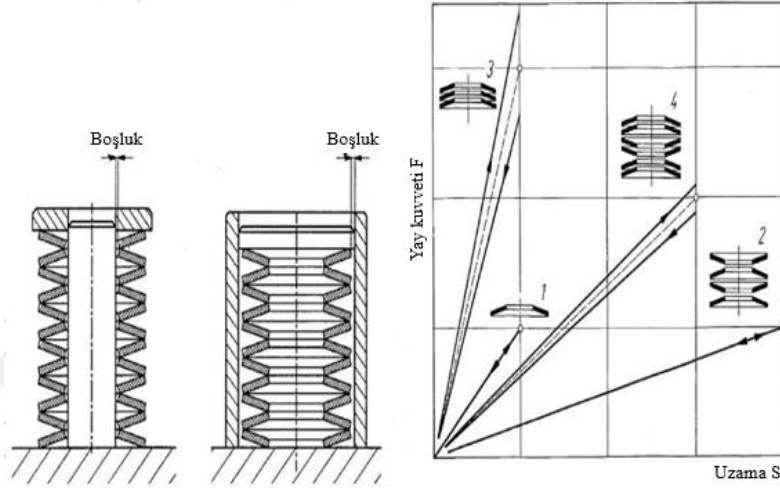


Şekil 2. 25. Diskli ve borulu kauçuk yay ve kesitleri

### 2.13.8. Disk Yaylar

Disk yaylar sismik izolasyon sistemlerinde farklı malzemeler ve kombinasyonlarla uygulanabilir. Bu tezde, disk yaylı izolasyon sistemleri ele alınacak olup, özellikle disk (Belleville) yayların sismik etkilerdeki davranışı incelenecektir. Disk yaylar, büyük yükler altında kısa strok mesafesiyle yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olup, plastik, çelik ve kompozit malzemelerden üretilebilmektedir. Bu yaylar, Jullien F. Belleville adlı Fransız mühendis tarafından 1867 yılında

patentlenmiştir. Disk yaylar endüstride sıklıkla kullanılmakta olup çok fazla çeşidi bulunmaktadır. Büyük yüklere karşı az deformasyona uğraması kısa süreli periyot talep edilen tasarımlarda oldukça avantajlıdır. Non-lineer karakteristiğe sahiptirler. Genellikle tasarım ihtiyacına göre kombinasyonlar halinde kullanılır. Şekil 2.26'da yapısı ve karakteristiği gösterilmektedir (Budynas ve Nisbett, 2006).



**Şekil 2. 26.** Disk yay yapısı ve farklı kombinasyonlarındaki karakteristikleri

Bu tez çalışmasının amacı disk yayların deprem izolatörü olarak kullanılabilirliğini analiz etmek ve deprem esnasındaki performanslarını değerlendirmektir. Bu sebeple disk yayların sağladığı avantajlar ve dezavantajlar incelenecektir. Yük altında disk yayların analizi yapılacağı için bu kısım detaylıca incelenecektir.

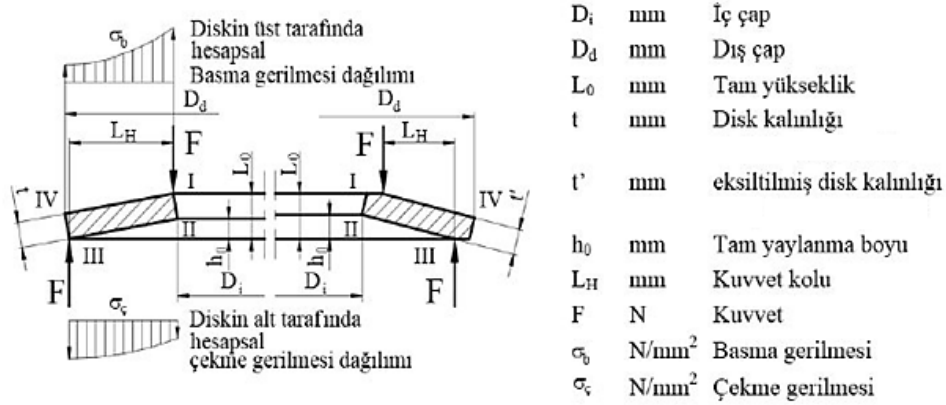
## 2.14. Disk Yayların Tasarımları ve Analizi

### 2.14.1. Disk Yaylara Giriş

Disk yaylar (Belleville yayı), büyük yükleri minimum eğilme ile karşılamak ve kapladığı alana göre büyük miktarda enerji depolama kabiliyetine sahiptir. Malzeme türleri, üretim yöntemleri ve ısıl işlemler ile yüksek kalitede üretilebilmektedirler. Disk yaylar için yük-eğilme formülü ilk olarak Almen ve Laszlo tarafından geliştirilmiştir (Almen, Laszlo 1936). Disk yaylar, eğilmeye çalışan ve eksenel yöndeki yükleri taşıyan elemanlardır. Tasarımlarda tek başına kullanılmazlar. Yükleme ve boşaltma sonrası tasarımını koruyabilmesi için içten veya dıştan kılavuzlanır. Genellikle kılavuzun temas yüzeyleri sürtünmeye bağlı aşınmaya maruz kalmaktadır. Bu yüzden kılavuz temas yüzeyleri sertleştirilir (Timoshenko, Woinowsky-Krieger 1959).

Çeşitli malzemelerden üretilebilmekle beraber en çok DIN 17221, 17222 ve DIN EN 16983 standartlarındaki krom, silisyum, vanadyum, molibden, mangan gibi alaşımlı çeliklerden üretilmektedir. Ölçülendirmeler ve semboller Şekil 2.27'de görülmektedir. Disk yaylar, yaylanma boyu/disk kalınlığı ( $h_0/t$ ) ve dış çap/disk kalınlığı ( $D_d/t$ ) oranlarına göre tasarlanmaktadır.

### 2.14.2. Disk Yayların Temel Kavramları



Şekil 2. 27. Disk yay ölçülendirmesi ve semboller

Disk yaylar et kalınlıkları ve üretim yöntemlerine göre üç gruba ayrılır. Çizelge 2.3'te gruplandırmalar gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3. Disk yay grupları

| Grup   | Disk Kalınlığı (mm)  | Üretim Yöntemi                                                                                                                                                    |
|--------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Grup 1 | $t \leq 1,25$        | Soğuk şekil verilmiş, işlenmemiş ve yüzey kalitesi $R_a < 12,5 \mu m$                                                                                             |
| Grup 2 | $1,25 \leq t \leq 6$ | Soğuk şekil verilmiş, $D_i$ ve $D_d$ yüzeyleri $R_a < 6,3 \mu m$ hassasiyetinde tornalanmış, $R_a < 3,2 \mu m$ hassas kesilmiş. $D_i$ ve kenarları yuvarlatılmış. |
| Grup 3 | $6 \leq t \leq 14$   | Soğuk veya sıcak şekil verilebilir. Tüm yüzey $R_a < 12,5 \mu m$ tornalanmış. $D_d > 150$ mm olduğu durumlarda I ve III köşe temas yüzeyleri düz imal edilir.     |

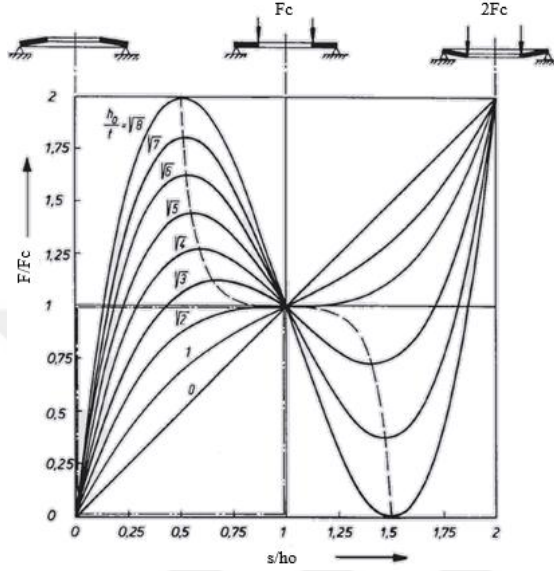
Tasarım olarak ideal yay ölçüleri  $D_d/D_i = 1,7-2,5$  ve  $D_d/t = 18-40$  aralığındadır. Ayrıca standartlara göre disk yaylar A, B ve C serileri olmak üzere üçe ayrılmıştır;

- A serisi:  $D_d/t \approx 18$  ve  $h_0/t \approx 0,40$  (En sert)
- B serisi:  $D_d/t \approx 28$  ve  $h_0/t \approx 0,75$  (Orta sertlikte)
- C serisi:  $D_d/t \approx 40$  ve  $h_0/t \approx 1,30$  (En yumuşak)



### 2.14.3. DIN EN 16983 Standartlarına Göre Kuvvet Uygulamalı, Temas Yüzeyi Olmayan Disk Yaylar

Bir disk yayının karakteristik yük eğrisi,  $h_0/t$  oranı ile tanımlanır. Yay deformasyonunun sınırsız olduğu ve izin verilen yük sınırlarına uyulduğu varsayıldığında, Şekil 2.28’de gösterilen karakteristik yük eğrileri elde edilir.

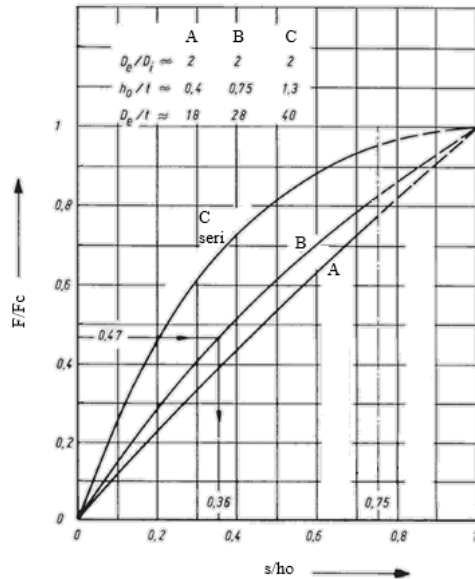


Sapma (Defleksiyon): Yayın düz konuma kadar olan ( $s = S_c = h_0$ ) deformasyonunu ifade eder.

Yay kuvveti: Düz konumdaki yay kuvvetini ifade eder [ $F_c = F(h_0)$ ].

Şekil 2. 28. Göreli hesaplanmış karakteristik yük eğrileri.

Şekil 2.29’da gösterilen karakteristik eğriler ise, DIN EN 16983 standardına göre tanımlanmış A, B ve C serisi yaylara özgüdür. Ayrıca tavsiye edilen şekil değiştirme (sehim) sınırı da gösterilmiştir. Grafiğin üst bölümünde, standart yay serileri için ortalama yay parametreleri yer almaktadır (Anonim 3).



Şekil 2. 29. DIN EN 16983’e göre A, B ve C serisi disk yaylar için hesaplanmış karakteristik yük eğrileri

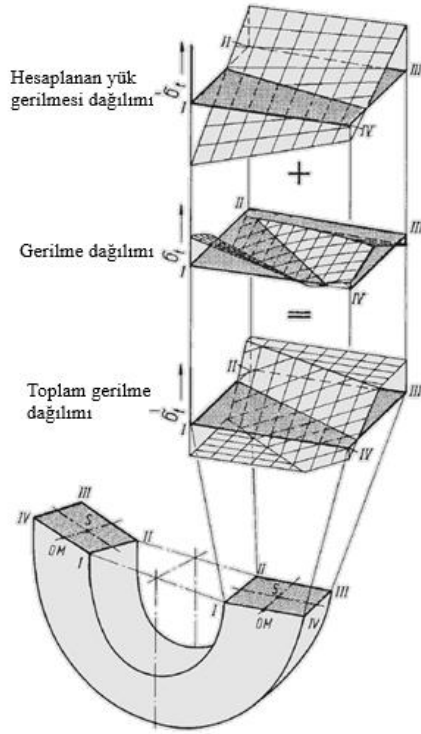
#### 2.14.4. Yük Gerilmeleri

Disk yaylarının yorulma ömrü, esas olarak eksenel yönde oluşan gerilmelere bağlıdır; radyal gerilmeler ise çoğunlukla ihmal edilebilir düzeydedir. Genellikle, yayın üst yüzeyinde basma, alt yüzeyinde ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilme dağılımı, Şekil 2.30'da gösterildiği gibi, farklı bölgelerde yoğunlaşır:

- Kesit Noktası I (iç kenar üst yüzey): Maksimum basma gerilmesinin olduğu yerdir. Bu bölgedeki gerilme, yayın yer değiştirme (set) kaybını belirleyen kritik bir faktördür.
- Kesit Noktaları II ve III (iç ve dış kenar alt yüzeyler): Maksimum çekme gerilmesinin görüldüğü bölgelerdir. Bu çekme gerilmeleri, özellikle yorulma açısından kritik öneme sahiptir.

Yayın üretim sürecinde uygulanan bilyalı dövme (shot-peening) ve ön şekillendirme (presetting) işlemleri, yayın yüzeyinde artık gerilmeler oluşturur. Bu artık gerilmeler, yükleme sırasında oluşan gerilmelerle birleşerek gerçek gerilme durumunu belirler. Özellikle alt yüzeyde çekme gerilmesinin baskın olduğu bölgelerde, artık basma gerilmeleri oluşturularak yorulma ömrü iyileştirilir.

Disk yayının yorulma davranışı aynı zamanda  $h_0/t$  oranına da bağlıdır. Bu oran, maksimum çekme gerilmesinin hangi noktada (II veya III) yoğunlaşacağını belirler. Elastik sınırın aşılması durumunda, yayın serbest yüksekliğinde kalıcı bir azalma meydana gelir. Bu durum, büyük yer değiştirmelere maruz kalan disk yaylarında plastik deformasyon sonucu oluşur ve yay ömrünün önemli bir göstergesidir.

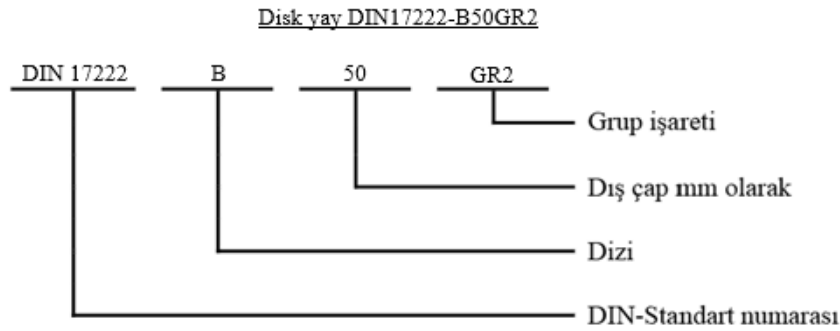


**Şekil 2. 30.** Toplam gerilmeleri elde etmek için yük gerilmeleri ile artık gerilmelerin üst üste bindirilmesi (çakıştırılması)

Çekme gerilmeleri, malzemede çatlak oluşumu açısından en kritik durumlardan biridir. Ancak, bu bölgedeki önceden oluşturulmuş basma gerilmeleri, çekme etkisini dengeleyerek çatlak oluşumunu engelleyebilir. Bu durum, yayın yorulma ömrünü artırır. Özellikle disk yayların dinamik dayanımı, alt yüzeydeki çekme gerilmelerine doğrudan bağlıdır (Anonim 3).

#### 2.14.5. Disk Yayların Standart Gösterimi

DIN standartlarına göre disk yayların gösterimi Şekil 2.31’de örneklenmiştir.



Şekil 2. 31. DIN17222 standartlarında B50GR2 disk yayının tanımlanması

#### 2.14.6. Toleranslar

Yay geometrisi, yük ve sertlik ile ilgili toleranslar Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te belirtilmiştir. DIN EN 16983 standardına göre üretilen yaylarda, dış çap ( $D_d$ ) ve iç çap ( $D_i$ ) için toleranslar sırasıyla  $h_{12}$  veya  $H_{12}$  tolerans sınıflarına karşılık gelir.

$s_{0,75}$ : Disk yaylarda  $s_{0,75}$  deformasyonu, yayın teorik maksimum strokunun (yani düzleşmeye kadar olan toplam eksenel hareketin) %75'ine karşılık gelen deformasyonu ifade eder. Bu değer, pratik ve güvenli kullanım sınırlarını temsil etmek için yaygın olarak kullanılır. Bir konik disk yayda maksimum eksenel deformasyon genellikle yayın yüksekliği olan  $h_0$  ile tanımlanır. Bu değer, yay tamamen düzleştiğinde (yani konikliğini kaybettiğinde) elde edilir. Ancak yay bu düzleşme noktasına kadar zorlandığında:

- Gerilme çok artar,
- Malzeme plastik deformasyona uğrayabilir,
- Yayın ömrü ciddi şekilde kısılabılır,
- Kalıcı şekil değişiklikleri oluşabilir.

Bu nedenle, tasarım ve analizlerde güvenli bir sınır olarak genellikle deformasyonun %75'i dikkate alınır ( $s=0,75 \cdot h_0$ ).

- Yayın eksenel yönde  $h_0$ 'ın %75'i kadar bastırıldığı deformasyon seviyesidir.
- Bu noktada elde edilen kuvvet ve gerilme değerleri, çoğu standartta karşılaştırma ve tasarım için temel alınır (örneğin DIN EN 16983).
- Bu seviye, yay henüz tam düz hale gelmeden önceki güvenli bir çalışma sınırıdır.

**Çizelge 2. 4.** Malzeme kalınlığı, serbest yükseklik, yay kuvveti ve yay sertliği için izin verilen toleranslar

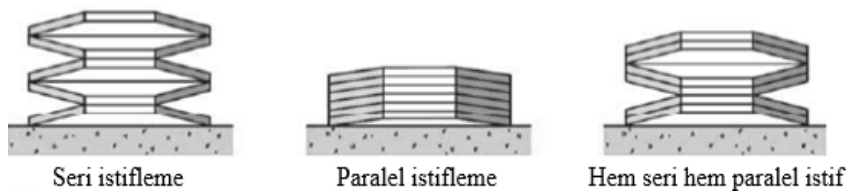
|                                              | Malzeme kalınlığı (t)<br><br>(mm) | (t) için izin verilen tolerans<br><br>(mm) | (l <sub>0</sub> ) için izin verilen tolerans<br><br>(mm) | s <sub>0,75</sub> (s=0,75·h <sub>0</sub> ) 'te l <sub>0</sub> – s konumunda F için izin verilen tolerans (%) | Sertlik (HRC) |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Grup 1<br><br>Temas yüzeyleri olmayan yaylar | 0,2 – 0,6                         | +0,02<br><br>-0,06                         | +0,10<br><br>-0,05                                       | +25<br><br>-7,5                                                                                              | 42-52         |
|                                              | 0,6 – 1,25                        | +0,03<br><br>-0,09                         |                                                          |                                                                                                              |               |
| Grup 2<br><br>Temas yüzeyleri olmayan yaylar | 1,25 – 2,0                        | +0,04<br><br>-0,12                         | +0,15<br><br>-0,08                                       | +15<br><br>-7,5                                                                                              |               |
|                                              | 2,0 – 3,0                         |                                            | +0,20<br><br>-0,10                                       |                                                                                                              |               |
|                                              | 3,0 – 3,8                         | +0,05<br><br>-0,15                         | +0,30<br><br>-0,15                                       | +10<br><br>-5                                                                                                |               |
|                                              | 3,8 – 6,0                         |                                            |                                                          |                                                                                                              |               |
| Grup 3<br><br>Temas yüz. olan yaylar         | 6,0 – 15                          | ± 0,10                                     | ± 0,30                                                   | ± 5                                                                                                          |               |
|                                              | 15 – 25                           | ± 0,12                                     | ± 0,50                                                   |                                                                                                              |               |
|                                              | 25 – 40                           | ± 0,15                                     | ± 1,00                                                   |                                                                                                              |               |

**Çizelge 2. 5.** Yay çapları ve eş merkezlilik için izin verilen toleranslar

| <b>D<sub>e</sub>: Dış çap , D<sub>i</sub>: Dış çap</b> |                                              |                                              |                                                                 |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                                        | <b>İzin verilen tolerans</b>                 |                                              |                                                                 |
| <b>D<sub>d</sub> veya D<sub>i</sub><br/>(mm)</b>       | <b>D<sub>d</sub> h<sub>12</sub><br/>(mm)</b> | <b>D<sub>i</sub> H<sub>12</sub><br/>(mm)</b> | <b>D<sub>d</sub> için eş<br/>merkezlilik toleransı<br/>(mm)</b> |
| 3 – 6                                                  | 0 – 0,12                                     | 0 + 0,12                                     | 0,15                                                            |
| 6 – 10                                                 | 0 – 0,15                                     | 0 + 0,15                                     | 0,18                                                            |
| 10 – 18                                                | 0 – 0,18                                     | 0 + 0,18                                     | 0,22                                                            |
| 18 – 30                                                | 0 – 0,21                                     | 0 + 0,21                                     | 0,26                                                            |
| 30 – 50                                                | 0 – 0,25                                     | 0 + 0,25                                     | 0,32                                                            |
| 50 – 80                                                | 0 – 0,30                                     | 0 + 0,30                                     | 0,60                                                            |
| 80 – 120                                               | 0 – 0,35                                     | 0 + 0,35                                     | 0,70                                                            |
| 120 – 180                                              | 0 – 0,40                                     | 0 + 0,40                                     | 0,80                                                            |
| 180 – 250                                              | 0 – 0,46                                     | 0 + 0,46                                     | 0,92                                                            |
| 250 – 315                                              | 0 – 0,52                                     | 0 + 0,52                                     | 1,04                                                            |
| 315 – 400                                              | 0 – 0,57                                     | 0 + 0,57                                     | 1,14                                                            |
| 400 – 500                                              | 0 – 0,63                                     | 0 + 0,63                                     | 1,26                                                            |
| 500 – 600                                              | 0 – 0,68                                     | 0 + 0,68                                     | 1,36                                                            |

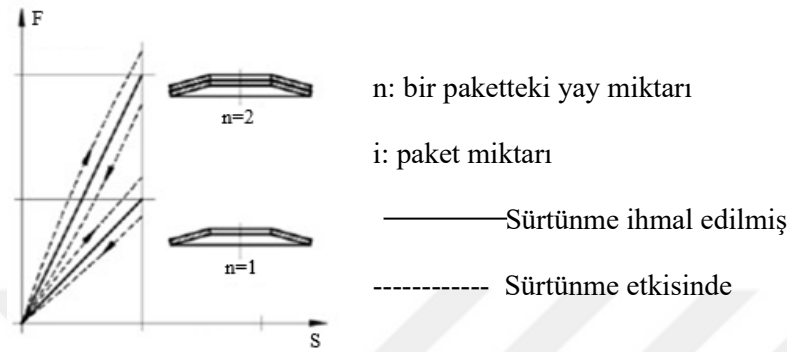
#### 2.14.7. Disk Yayların Kombinasyonları

Disk yaylar genellikle tek başlarına kullanılmazlar. İstenilen karakteristik eğrileri için çeşitli kombinasyonlar üretilebilir. Bu da disk yaylarda geniş kullanım yelpazesi sunar. Temel anlamda paralel, seri ve hem seri hem paralel istifleme şekilleri bulunmaktadır (Şekil 2.32).

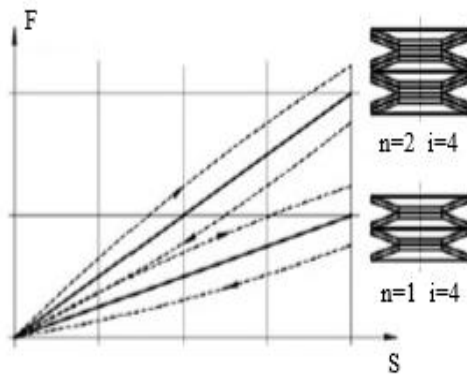
**Şekil 2. 32.** Disk yayların istifleme yöntemleri

Paralel istifleme yönteminde büyük yükler altında kısa yaylanma boylarına sahiptir. Sürtünme kuvveti etkisinde yayların karakteristiği non-lineer görünümündedir (Şekil 2.33).

Seri istifleme yöntemlerinde ise küçük yüklerde uzun yaylanma boylarına sahiptir. Yayların çoklu kombinasyonları ve sürtünme etkileri Şekil 2.34'te gösterilmektedir (Kutay 2010).

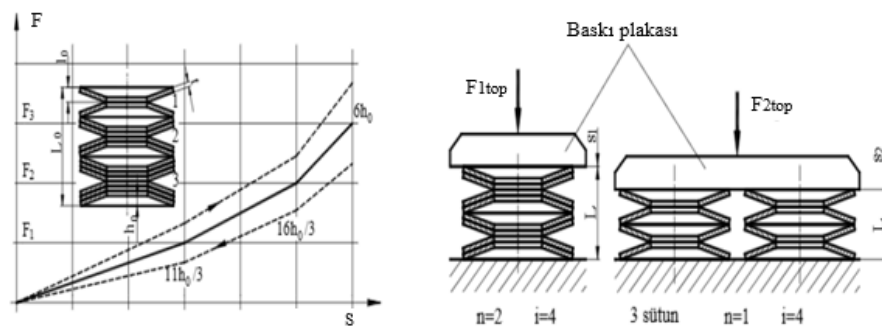


Şekil 2.33. Tekli ve paralel yay karakteristiği (sürtünmeli ve sürtünmesiz)



Şekil 2.34. Tekli-çoklu; seri-paralel yay karakteristiği (sürtünmeli ve sürtünmesiz)

Paralel ve seri istiflenmiş yay kombinasyonlarına ait karakteristik eğrileri ve şemalar Şekil 2.35'te örneklendirilmiştir.



Şekil 2.35. Disk yay kombinasyonları ait ölçülendirme ve karakteristiği

Paralel ve seri istiflenmiş disk yayların paket boyları yüksüz ve yüklü olarak sırasıyla (2.12), (2.13), (2.14) ve (2.15) bağıntılarında gösterilmektedir.

Paralel istiflenmiş “n” miktardaki yay paketlerinde aşağıdaki formüller kullanılır:

$$\text{Paketin toplam kuvveti} : F_{\text{top}} = n.F$$

$$\text{Paketin toplam deplasmanı} : s_{\text{top}} = i.s$$

$$\text{Yüksüz paket boyu} : L_0 = l_0 + (n-1).t \quad (2.12)$$

$$\text{Yüklü paket boyu} : L = L_0 + s_{\text{top}} \quad (2.13)$$

Seri istiflenmiş “n” miktardaki yay paketlerinde aşağıdaki formüller kullanılır:

$$\text{Paketin toplam kuvveti} : F_{\text{top}} = n.F$$

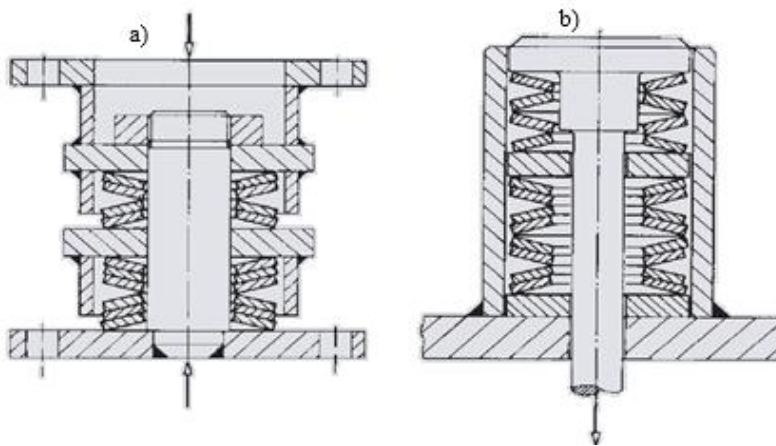
$$\text{Paketin toplam deplasmanı} : s_{\text{top}} = i.s$$

$$\text{Yüksüz paket boyu} : L_0 = i.[l_0 + (n-1).t] \quad (2.14)$$

$$\text{Yüklü paket boyu} : L = L_0 + s_{\text{top}} = i.(h_0 + n.t - s) \quad (2.15)$$

#### 2.14.8. Kademeli Karakteristik Yük Eğrileri

Farklı sayılarda disk yaylarının bir araya getirilerek oluşturduğu paralel istiflerin kullanımıyla, birleşik seri istifler (yüksek sürtünmeli) veya kalınlık ve toplam yükseklik açısından farklılık gösteren bireysel disk yaylardan oluşan seri istifler (düşük sürtünmeli) sayesinde kademeli karakteristik yük eğrileri elde edilebilir (Şekil 2.35). Bu ilerleyici davranış, daha zayıf olan istifin – ya da daha zayıf olan yayın – düz konuma ulaşması veya sınırlayıcı yer değiştirme elemanına (Şekil 2.36) erişmesi sonrasında artık sıkışmaya katkıda bulunmaması sayesinde sağlanır (Anonim 3).



**Şekil 2. 36.** Aşırı yüklemeyi önlemek için strok sınırlayıcılarla donatılmış, ilerleyici karakteristik yük eğrilerine sahip yay istifleri a) Zil tipi (Bell) b) Durdurucu tipi (Stop)

#### 2.14.9. Yay istifli tasarımı için yönergeler;

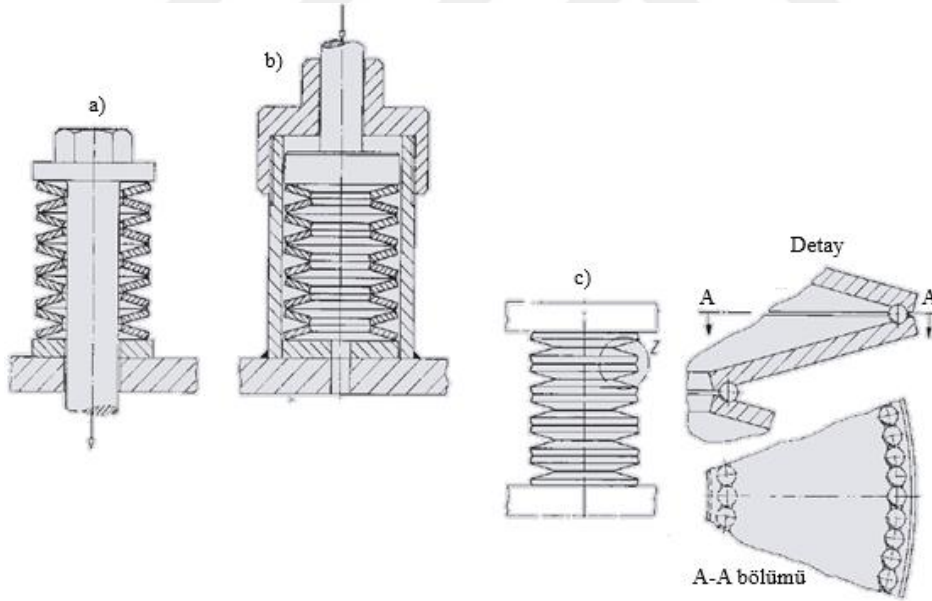
Disk yay istiflerinin tasarımında aşağıdaki yönergeler dikkate alınmalıdır:

- Tek yayların yer değiştirmesi yeterli değilse, yaylar seri olarak istiflenir.
- Sınırlı montaj alanında yüksek yüklerin elde edilmesi gerekiyorsa, yaylar paralel olarak istiflenir.
- Büyük çaplı yaylar, düşük toplam yükseklik elde edilmesini sağlar.
- Genellikle paralel olarak en fazla 2 ila 4 yay istiflenmelidir; çünkü disk sayısı arttıkça sürtünme nedeniyle hesaplanan ve ölçülen karakteristik yük eğrileri arasındaki farklar artar (sürtünme etkisi hesaplama programında dikkate alınmaz) (Anonim 3).

#### 2.14.10. Yay İstifi Kılavuzları

Hem seri hem de paralel yay istifleri yönlendirilmelidir. Bu, aşağıdaki gibi bir kılavuz eleman aracılığıyla sağlanır:

- Bir kılavuz mil (içten yönlendirme, Şekil 2.37a),
- Bir kılavuz kovan (dıştan yönlendirme, Şekil 2.37b),
- Kendi kendine merkezleyen elemanlar (bilyalar, Şekil 2.37c) veya sertleştirilmiş tel parçaları ile.

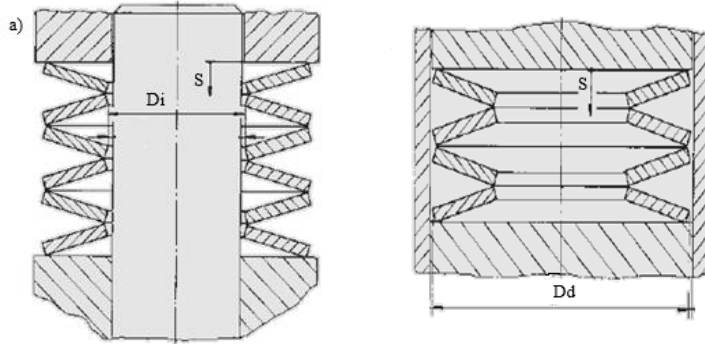


**Şekil 2. 37.** Farklı yay istifli kılavuzu tipleri

Yay sistemlerinde kullanılan içten ve dıştan yönlendirme elemanları, tüm yüzeyleri boyunca parlatılmalı ve en az 55 HRC sertliğe ulaşacak şekilde ısıtılmalı ve ısıtılmalı. Ancak, yüklerin tamamen statik veya nadiren değişken olduğu durumlarda sertleştirilmemiş kılavuzlar da tercih edilebilir. Yük uygulaması iç çap üzerinden yapıldığında temas basınçları artar. Yönlendirme elemanları ile yay istifli arasında bırakılan boşluk (T), hem yağlayıcı hareketine izin verir hem de uygun hizalamayı



sağlar (Şekil 2.38). Bu boşluğun değeri, yönlendirme türüne ve diskin iç (Di) veya dış çapına (De) bağlı olarak Çizelge 2.6’da verilmektedir (Anonim 3).



**Şekil 2. 38.** Yay istifi kılavuzları (a) içten yönlendirme (b) dıştan yönlendirme, yaylar ile kılavuz elemanı arasındaki boşluk: T

**Çizelge 2. 6.** Disk yay ile kılavuz elemanı arasındaki toplam boşluk

| <b>D<sub>d</sub> veya D<sub>i</sub> (mm)</b> | <b>Toplam boşluk (T)</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------|
| 0-16                                         | 0,2                      |
| 16-20                                        | 0,3                      |
| 20-26                                        | 0,4                      |
| 26-31,5                                      | 0,5                      |
| 31,5-50                                      | 0,6                      |
| 50-80                                        | 0,8                      |
| 80-140                                       | 1,0                      |
| 140-250                                      | 1,6                      |
| > 250                                        | 2,0                      |

#### 2.14.11. Disk Yayların Hesabı

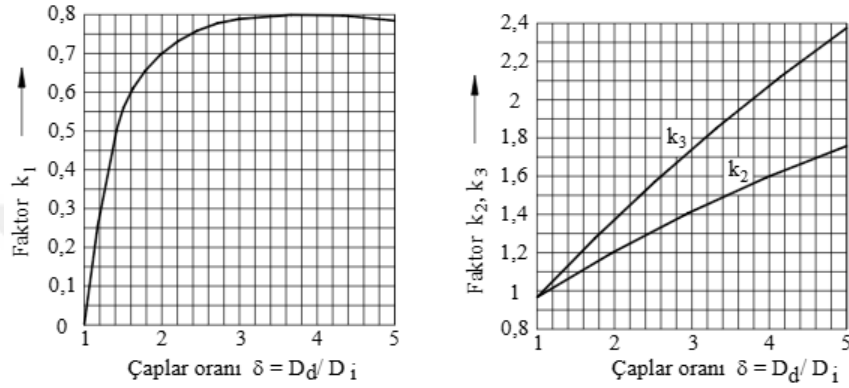
Almen ve Laszlo disk yayların mühendislik alanında kullanımına öncülük etmişler ve disk yaya etki eden kuvveti (2.16) bağıntısıyla hesaplamışlardır:

$$F = \frac{4.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t^4}{k_1.D_d^2} \cdot k_4^2 \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[ k_4^2 \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{t} \right) \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{2.t} \right) + 1 \right] \quad (2.16)$$

$\nu$ : Poisson oranı

k: Yay faktörü (çap oranlarıyla değişkenlik gösterir)

Disk yayının k faktörü (yay sabiti), yayının geometrik özelliklerine ve malzeme özelliklerine bağlı olarak hesaplanır. Disk yaylarının genellikle yük altında deforme olma özellikleri, yay sabitlerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. 1. ve 2. grup yaylar için  $k_4 = 1$  olarak kabul edilir. Disk yayın dış ve iç çap oranları ile değişen yay faktörleri Şekil 2.39’de gösterilmektedir (Kutay 2010). Burada  $k_1$ : yay rijitliğiyle ilgili katsayıdır.  $k_2$ , rijitliğin şekle göre düzeltme katsayısı,  $k_3$ : elastik şekil değişimiyle ilgili ve  $k_4$  gerilme hesaplarında, maksimum gerilme tahmininde kullanılan katsayıdır.

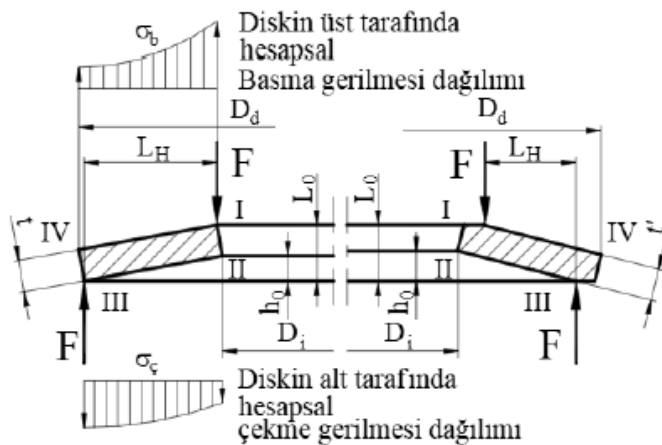


Şekil 2. 39. Disk yay faktörü ( $k_1, k_2, k_3$ )

## 2.15. Gerilmeler

### 2.15.1. Statik Yüklerde Gerilme

Statik yüklerde disk yayın oluşan en büyük gerilme I noktasında yani basma gerilmesi şeklinde oluşur. Şekil 2.40’ta disk yay geometrisindeki yük noktaları gösterilmiş olup I noktasına ait gerilme formüle edilmiştir (Kutay 2010).



Şekil 2. 40. Disk yay geometrisi gerilim noktaları

Statik yüklerde I noktasındaki gerilme (2.17) bağıntısı ile hesaplanır;

$$\sigma_I = \frac{4.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{s}{k_1.D_d^2} \cdot [-k_2 \cdot (h_0 - 0,5 \cdot s) - k_3 \cdot t] \quad (2.17)$$

### 2.15.2. Dinamik Yüklerde Gerilme

Dinamik yüklerde disk yaya etkiyen en büyük kuvvetler II ve III noktalarında yani çekme gerilmesi halinde oluşur. Denklemlerde  $\sigma_I$  noktaları basma gerilmesine maruz kaldığı için  $+k_3$ ,  $\sigma_{II}$  noktaları çekme gerilmelerine maruz kaldığı için  $(-)$   $k_3$  kullanılır (Kutay 2010).

Dinamik yüklerde I ve II noktalarındaki gerilmeler (2.18) bağıntısı ile hesaplanır;

$$\sigma_{I,II} = -\frac{4.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{s}{k_1.D_d^2} \cdot [k_2 \cdot (h_0 - 0,5 \cdot s) \pm k_3 \cdot t] \quad (2.18)$$

Denklemlerde  $\sigma_{III}$  noktaları çekme gerilmesine maruz kaldığı için  $-k_3$ ,  $\sigma_{IV}$  noktaları basma gerilmelerine maruz kaldığı için  $+k_3$  kullanılır. Dinamikler yüklerde III ve IV noktasındaki gerilmeler (2.19) bağıntısı ile hesaplanır ( $\delta = D_d/D_i$ );

$$\sigma_{III,IV} = -\frac{4.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{s}{k_1 \cdot \delta \cdot D_d^2} \cdot [(k_2 - 2 \cdot k_3)(h_0 - 0,5 \cdot s) \pm k_3 \cdot t] \quad (2.19)$$

$\delta$  : Yayın eksenel yönde deformasyonu

### 2.15.3. İzin Verilen Yük Gerilmelerinin Hesaplanması

İzin verilen gerilmeler, yay üzerine etkiyen yükleme türüne bağlıdır. Üç tür yükleme dikkate alınır:

- Statik veya nadiren değişen yükler (yayın ömrü boyunca  $10^4$  yük çevriminden az)
- Değişken yükler (yayın ömrü boyunca  $10^4 < N < 2 \cdot 10^6$  yük çevrimi)
- Değişken yükler (yayın ömrü boyunca  $N > 2 \cdot 10^6$  yük çevrimi)

a) Statik veya nadiren değişen yükler için:

Disk yaylarda en yüksek gerilme, üst iç kenardaki (kesit noktası I) noktada oluşur ve bu değer kalıcı deformasyonu belirler. DIN 17221 ve 17222 standartlarına uygun kaliteli çeliklerde bu gerilme belirtilen sınırları aşmamalıdır. Ck 67, 50CrV4 ve 51CrV4 gibi yüksek elastikiyetli ve iyi enerji sönmeme özelliklerine sahip çelikler disk yaylarda yaygın olarak kullanılır.

**Çizelge 2. 7.** Düz (yassı) durumda izin verilen maksimum gerilmeler

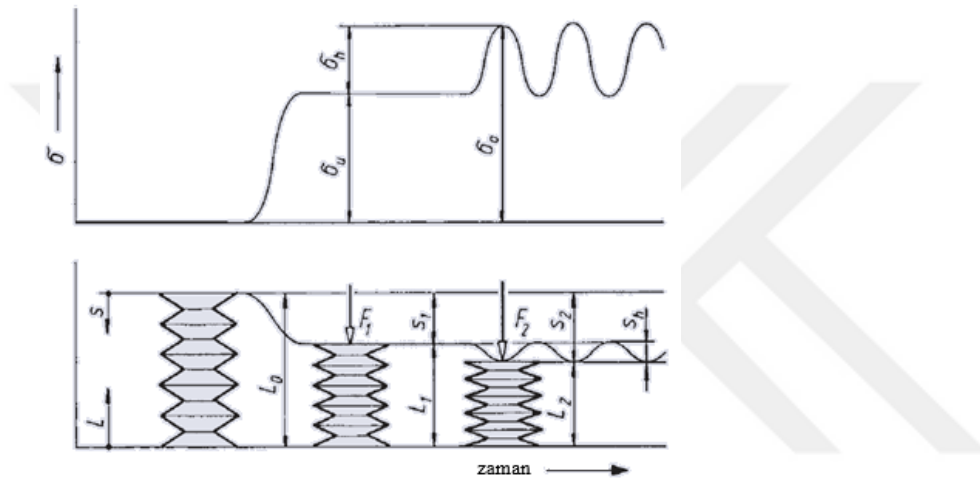
| $D_e/D_i$ | $\sigma_{lc}$ |
|-----------|---------------|
| 1,5       | -2600         |
| 2,0       | -3400         |
| 2,5       | -3600         |

$\sigma_{lc}$ : İzin verilen maksimum gerilme

Daha yüksek basma gerilmeleri durumunda yayda önemli ölçüde kalıcı deformasyon meydana gelebilir. Özel ölçülerdeki yaylarda da maksimum izin verilen basma gerilmeleri aşıldığında benzer şekilde yüksek oranda kalıcı deformasyon oluşabilir (Anonim 3).

b) ve c) Dinamik yüklemeler için:

Disk yayının alt yüzeyinde oluşan maksimum çekme gerilmeleri kritik önemdedir. Yorulma kaynaklı kırılmalar her zaman yayın alt yüzeyinde başlar. Kırılma, çevrimsel gerilme düzeyinin daha yüksek olduğu kesit II veya III'te başlar. Dinamik yükleme sırasında hareketin zamanla değişiminin gösterimi Şekil 2.41'ta gösterilmektedir (Anonim 3).



**Şekil 2. 41.** Gerilme ve yer değiştirmenin zamana bağlı fonksiyonu

Üstte: Gerilme-zamana bağlı fonksiyon

Altta: Yer değiştirme (deplasman)-zamana bağlı fonksiyon

$\sigma_o$ : Toplam gerilme

$\sigma_u$ : Çevresel gerilme

$\sigma_h$ : Radyal gerilme

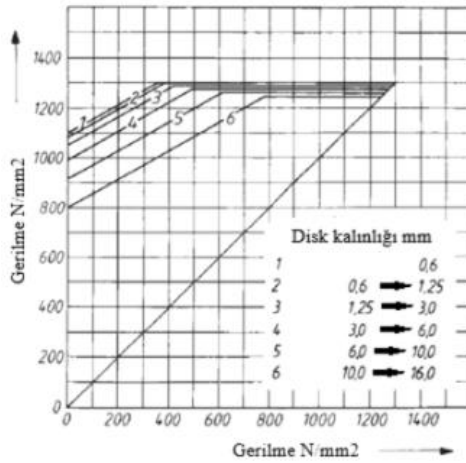
#### 2.15.4. Minimum Ön Yükleme

Dinamik yüklemelere maruz kalan disk yaylarda, kırılma riskini azaltmak amacıyla, diskin üst iç kenarında (kesit noktası I) yeterli ön yükleme uygulanarak montaj yapılması gerekmektedir. Ön ayar sürecinden kaynaklanan artık çekme gerilmeleri, bu bölgede radyal yüzey çatlaklarının oluşmasına neden olabilir.

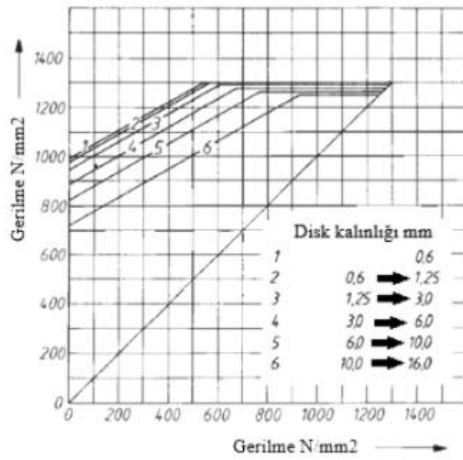
Yorulma dayanımı değerleri;

Sunulan yorulma dayanımı grafiklerinin temeli, uzun yıllara yayılan kapsamlı deneysel çalışmalara dayanmaktadır (Şekil 2.42, 2.43, 2.44). Bu grafikler, yorulma kaynaklı kırılmalar açısından kritik olan disk yayın alt yüzeyinde izin verilen hesaplanmış gerilme değerlerini göstermektedir. Farklı disk yay boyutları, kalınlıkları ve yük çevrim sayıları dikkate alınarak hazırlanmış olan bu grafikler, yorulma davranışının öngörülmesinde mühendislik tasarımlarına temel teşkil etmektedir. İlgili grafikler, 50 Cr V 4 ile Ck 67 malzemesinden yapılmış yaylar için geçerlidir.

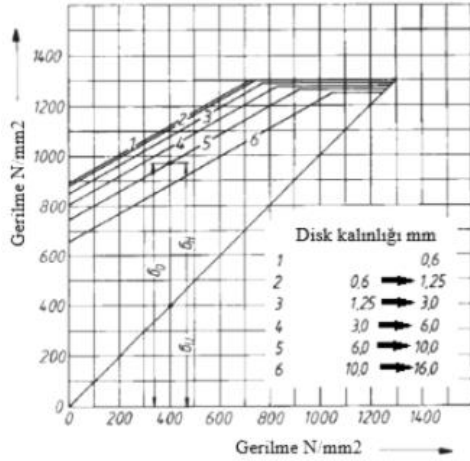
- Yay grupları, seri bağlanmış en fazla 10 adet disk yay ile sınırlandırılmalıdır.
- Yay veya yay grubu, sabit frekansta ve izin verilen termal sınırın altında, sabit ötelenmeli sinüzoidal bir ötelenme-zamana bağlı fonksiyonla yüklenmelidir.
- Yay grupları, kılavuz elemanlar (mil veya burç) üzerine monte edilmelidir. Yük, sertleştirilmiş ve parlatılmış plakalar aracılığıyla yay grubunun uçlarına uygulanmalıdır.
- Uygun yağlama sağlanmalıdır.
- Oda sıcaklığında ve normal atmosfer koşullarında çalıştırılmalıdır. (Örneğin: aşırı nem, korozyon kimyasallar vb. bulunmamalıdır).



Şekil 2. 42.  $N = 10^5$  yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı



Şekil 2. 43.  $N = 5.10^5$  yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı



**Şekil 2. 44.**  $N = 2.10^6$  yük çevrimi için yorulma dayanımı diyagramı

Bu test koşullarından sapmalar, elde edilebilecek yük çevrimi sayısını azaltabilir. Bu durum, özellikle yanlış yağlama, korozyon veya yüzey kusurları gibi durumların varlığında, işletme sırasında meydana gelebilecek ani yükler için geçerlidir.

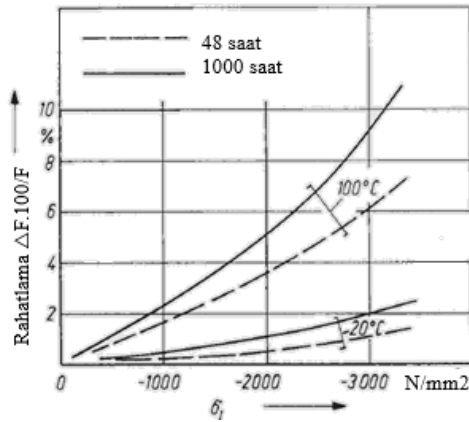
Bir yay grubundaki disk yay sayısı arttıkça, elde edilebilecek yük çevrimi sayısı, tek bir disk yaya kıyasla azalır. Bunun bir nedeni, yay grubundaki bireysel yayların farklı ötelenmesidir (Anonim 3).

## 2.16. Rahatlama ve Akma

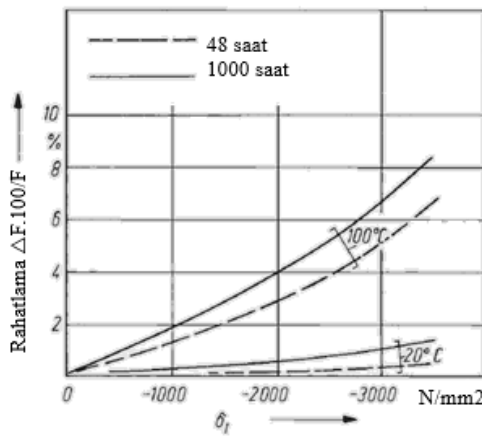
Zamanla tüm yaylar elastikiyet kaybı yaşar. Yay üzerine uygulanan yük türüne bağlı olarak bu elastikiyet kaybı rahatlama veya akma şeklinde sonuçlanabilir.

**Rahatlama:** Bir yay sabit bir uzunluğa sıkıştırıldığında, zamanla görülen kuvvetin ( $\Delta F$ ) azalmasıdır.

**Akma:** Bir yay sabit bir yüke maruz kaldığında, zamanla görülen yay yüksekliğinin ( $\Delta L$ ) azalmasıdır.



**Şekil 2. 45.** DIN 17 222'ye göre Ck çeliklerinden (karbon çelikleri) yapılmış disk yaylar için izin verilen gevşeme



**Şekil 2. 46.** DIN 17221 ve DIN 17222'ye göre Cr-V alaşımlı çeliklerden yapılmış disk yaylar için izin verilen gevşeme

Önceden sıcak şekillendirilmiş disk yaylar, yüzeyde önceden soğuk şekillendirilmiş yaylarla benzer düzeyde kalıntı gerilmeleri gösterse de, plastiklik bölgesi daha derinlere nüfuz eder ve bu durum kalıntı gerilmesi dağılımının daha düşük bir eğimle gerçekleşmesine neden olur. Bu özellik, sıcak şekillendirilmiş yaylarda şekil kaybının daha az olmasını sağlar. Öte yandan, soğuk şekillendirilmiş yaylar için izin verilen gevşeme sınırları Şekil 2.45 ve 2.46'da sunulmaktadır (Anonim 3).

## 2.17. Yaylanma İşi

Yaylanma işi, bir yayı sıkıştırmak veya uzatmak amacıyla uygulanan kuvvet sonucu harcanan enerjiyi ifade eder. Mekanik iş olarak tanımlanan bu enerji, dışarıdan uygulanan kuvvet ile yayı deforme etme sürecinde yaya aktarılacak potansiyel enerji biçiminde depolanır. Hooke Yasası'na göre yay, uygulanan kuvvetle orantılı olarak esner; başlangıçta düşük kuvvetlerle deformasyon başlarken, uzama miktarı arttıkça gerekli kuvvet de artar. Bu nedenle yaylanma işinin hesabında, değişken kuvvetin ortalama değeri esas alınır. Aşağıdaki (2.20) bağıntısıyla hesaplanır;

$$W = \int_0^s F \cdot ds$$

$$W = \frac{2.E}{1-\nu^2} \cdot \frac{t^5}{k_1 \cdot D_d^2} \cdot k_4^2 \cdot \left(\frac{s}{t}\right)^2 \cdot \left[ k_4^2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2 \cdot t}\right)^2 + 1 \right] \quad (2.20)$$

Bu formül, yayın doğrusal elastik bölgesinde (Hooke Yasası geçerli olduğu sürece) geçerlidir (Kutay 2010).

## 2.18. Disk Yayların Tekrarlanan Yükleme Altında Enerji Dağıtım Performansı

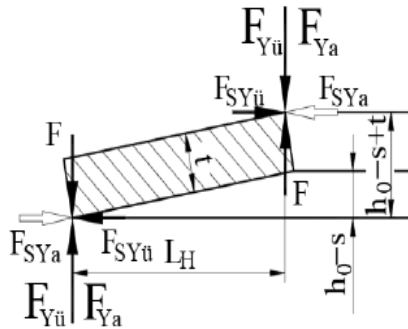
Disk yaylar kompaktlıkları ve küçük şekil değiştirmeye yüksek yük taşıma kapasiteleri nedeniyle çeşitli mekanik sistemlerde yaygın olarak kullanılır. Tekrarlanan yükleme altında enerji dağıtımını açısından performansları birkaç önemli unsur üzerinden anlaşılabilir. Bunlar:

- Sürtünme kaybı

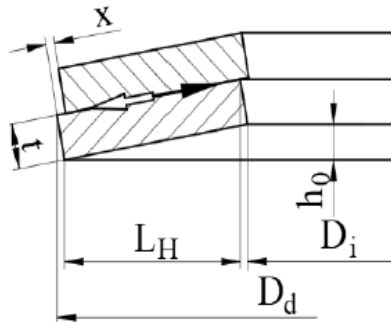
- Yük-Şekil değiştirme özellikleri
- Malzeme ve doğrusal olmayan geometrileri
- Yorgunluk ve arızalar
- Sönümleme Uygulamaları

### 2.18.1. Sürtünme Kaybı

Yay sistemlerinde meydana gelen sürtünme, enerji kayıplarının başlıca nedenlerinden biridir. Bu etki, farklı mekanizmalar aracılığıyla ortaya çıkabilir. Yay malzemesi içerisindeki atomlar arası bağların esnemesi sırasında oluşan içsel direnç, enerjinin ısıya dönüşmesine yol açarak iç sürtünme kaynağı oluşturur ve bu durum genellikle histerezis eğrisiyle temsil edilir; uzama ve gevşeme sırasında elde edilen grafikler farklılık gösterir. Ayrıca, çoklu yay kombinasyonlarında yaylar arasındaki temas yüzeylerinde meydana gelen sürtünme, dışsal enerji kayıplarına neden olur. Yayların viskoz bir ortamda (örneğin yağ içerisinde) çalışması durumunda ise, akışkan direnci ilave bir sürtünme etkisi oluşturarak yayların geri tepme hızını düşürür ve titreşim sönümleme kapasitesini artırırken enerji verimliliğini azaltır. Bu bağlamda, sistemdeki enerji kayıplarının değerlendirilmesinde sürtünme katsayısı belirleyici bir parametre olup, genellikle deneysel olarak elde edilen değerlerle tanımlanır. Sürtünme etkisine sebep olan kuvvetler ve yay paketindeki sürtünme yüzeyi sırasıyla Şekil 2.47 ve Şekil 2.48’de gösterilmektedir (Kutay 2010; Maharjan, Shah, Abugharara, Butt 2020).



Şekil 2. 47. Yaya etki eden kuvvetler



Şekil 2. 48. n:2 yay paketindeki sürtünme yüzeyi

Paket yaylardaki sürtünme kuvveti (2.21) bağıntısıyla hesaplanabilir;

Yükleme esnasındaki sürtünme kuvveti:  $F_{SYü} = \mu \cdot F_{Yü}$



Yaylanma esnasındaki sürtünme kuvveti:  $F_{S\ Ya} = \mu \cdot F_{Ya}$

$$F_{top\ Sü} = F \cdot n / [1 \pm \mu_{Ko} \cdot (n - 1) \pm \mu_{Ke}] \quad (2.21)$$

$\mu_{Ko}$ : Yayın ilk yükleme sırasında, küçük deplasmanlar altında gösterdiği rijitlik katsayısı

$\mu_{Ke}$ : Yayın maksimum sıkışma durumuna yaklaştığında gösterdiği rijitlik katsayısı

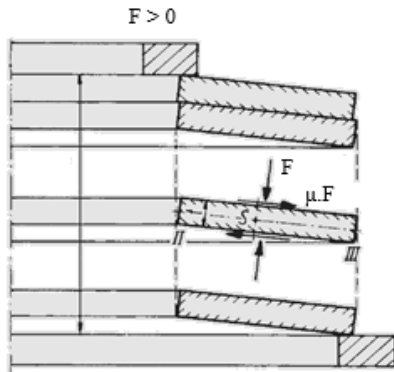
Sürtünme katsayıları farklı yağ cinslerine göre Çizelge 2.8’de gösterilmektedir.

**Çizelge 2. 8.** Çeşitli yağlarda sürtünme katsayısı değerleri

|          | Sıvı Yağ ( $10^{-3}$ ) |            | Gres Yağı ( $10^{-3}$ ) |            | Molykote Gres Yağı ( $10^{-3}$ ) |            |
|----------|------------------------|------------|-------------------------|------------|----------------------------------|------------|
|          | $\mu_{Ko}$             | $\mu_{Ke}$ | $\mu_{Ko}$              | $\mu_{Ke}$ | $\mu_{Ko}$                       | $\mu_{Ke}$ |
| A dizisi | 15-32                  | 27-40      | 12-27                   | 24-37      | 5-22                             | 27-33      |
| B dizisi | 10-22                  | 17-26      | 8-19                    | 16-24      | 3-15                             | 17-21      |
| C dizisi | 8-17                   | 12-18      | 1-15                    | 11-17      | 3-12                             | 12-15      |

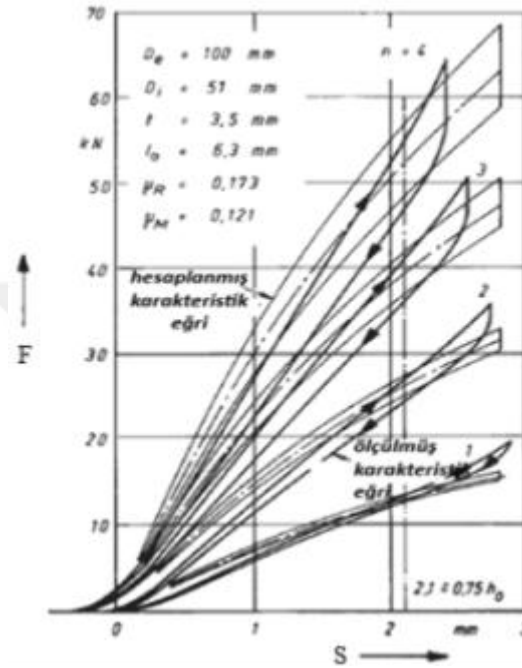
#### 2.18.1.1. Paralel Şekilde Düzenlenmiş Disk Yay İstiflerinde Sürtünme

Disk oluşturduğu n adet paralel bir yay istif sıkıştırıldığında, temas halindeki disk yayların yüzeylerinde zıt yönlerde etki eden radyal sürtünme kuvvetleri [ $\mu M \cdot F(n, \mu M)$ ] oluşur (Şekil 2.49). Bu sürtünme kuvvetleri, yükün yay istifine uygulandığı kenarlarda oluşan sürtünmelere ek olarak meydana gelir. Bu durum, uygulanan yük momentine karşı gelen ve gerekli sıkıştırma kuvvetini artıran n adet sürtünme momentinin ortaya çıkmasına neden olur. Boşalma (geri salma) sırasında ise sürtünme kuvvetleri gerekli tutma kuvvetini azaltır (Anonim 3).



**Şekil 2. 49.** Paralel bir disk yay istifinde oluşan sürtünme kuvvetleri

Gerçek yük sapması, yay deformasyonundan bağımsızdır. Daha kalın disk yayların (Seri A) kullanılması, daha büyük bir sönümleme etkisi sağlar. Tecrübeler, paralel şekilde yerleştirilen yay sayısı arttıkça karakteristik yük eğrisinden sapmanın da arttığını göstermektedir (Şekil 2.50). Bu durum, özellikle konik yüzey alanındaki yuvarlaklıktan sapmalar ve toplam yükseklik  $l_0$  değerindeki farklılıklar olmak üzere, bireysel disk yayların ideal şekillerinden olan geometrik sapmaların birikmesiyle oluşur (Anonim 3).



**Şekil 2. 50.** Tek bir disk yay ve ile 2, 3, 4 disk yay paketlerinden oluşan paralel bir istif için ölçülen ve hesaplanan karakteristik yük eğrilerinin karşılaştırması

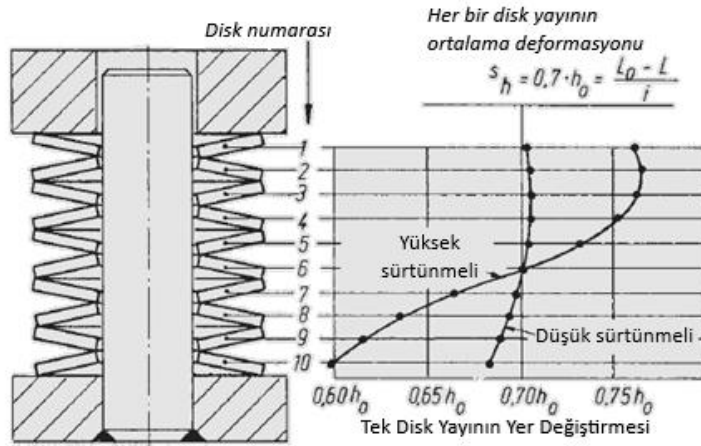
Bir istif içerisindeki yaylar hareket ettirildiğinde veya döndürüldüğünde, hafif farklı karakteristik yük eğrileri ortaya çıkabilir. Ancak genel olarak, zamanla kararlı bir yükleme ve boşaltma karakteristik eğrisi oluşur.

Güvenlik açısından, paralel şekilde düzenlenmiş tek bir yay istifi bile dahili veya harici bir kılavuzla donatılmalıdır. Düşük sürtünmeli tasarıma sahip disk yaylar kullanıldığında ise oluşan sürtünme kuvvetleri genellikle ihmal edilebilir düzeydedir (Anonim 3).

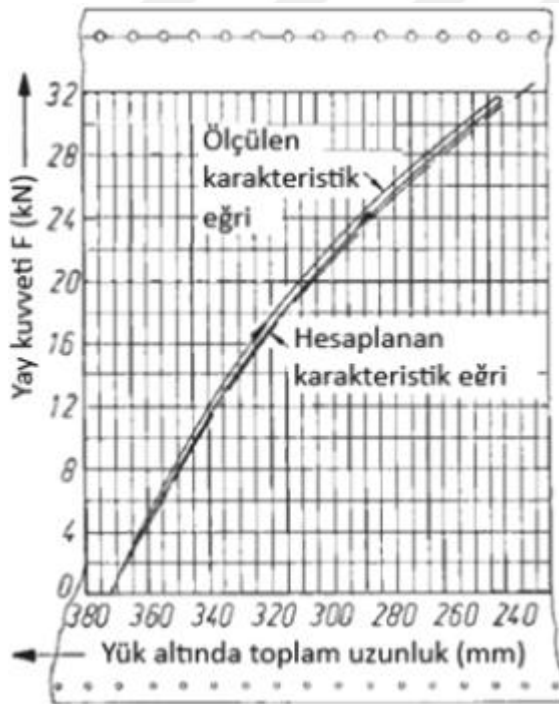
#### 2.18.1.2. Seri Bağlı Disk Yay İstiflerinde Sürtünme

Seri yay istiflerinde, düşük sürtünmeli tasarıma sahip disk yayların kullanıldığı varsayılır. Örneğin, yaylar kılavuz mil ile disk yay istifi arasındaki sürtünmeyi en aza indiren özel bir iç kenar konturuna sahip olacak şekilde tasarlanır. Bu tasarım, seri şekilde düzenlenmiş bireysel yaylardan oluşan istifte disk yayların eşit şekilde deformasyona uğramasını sağlar. Böylece, istifin hareketli ucundaki yayların aşırı zorlanmasından kaynaklanan erken yay kırılması riski azaltılmış olur (Anonim 3).

Düşük sürtünmeli ve yüksek sürtünmeli yay istiflerinde bireysel disk yaylarının deformasyonundaki farklar Şekil 2.51’de gösterilmektedir. Düşük sürtünmeli tasarıma sahip seri disk yay istiflerinde, yükleme ve boşaltma sırasında ölçülen karakteristik yük eğrileri birbirinden ve hesaplanan karakteristik yük eğrisinden hafifçe farklıdır (Şekil 2.52).



Şekil 2. 51. Seri istifli disk yaylarının deformasyonu



Şekil 2. 52. Seri şekilde düzenlenmiş 10 yaydan oluşan bir yay istifi için ölçülen ve hesaplanan karakteristik yük eğrilerinin karşılaştırılması

Eğer paralel disk yay istifleri ile tekli disk yaylar birlikte kullanılırsa ideal koşullar artık geçerli olmaz. Tekli disk yaylarının ideal geometrisindeki sapmalar, paralel

istiflerde bir yaydan diğerine yük iletiminde dengesizliklere yol açar. Bu durum, yayların yanlamasına kaymasına ve ardından büyük bir kuvvetle kılavuz elemanına baskı yapmasına neden olur. Özellikle bu tür yanlamasına kaymış yaylar istifin hareketli ucunda bulunuyorsa, yan kuvvetler büyük yay deformasyonları nedeniyle yüksek sürtünme oluşturur. Bu nedenle, paralel disk yay istiflerinin seri bir istifte kullanılması durumunda, tekli yayların düzensiz deformasyonu ve yüksek frekansta çalışma sırasında daha yüksek işletme sıcaklıklarına sebep olabilir. Sonuç olarak, bu durum yay istifinin yorulma ömründe azalmaya yol açar. Bu durum ise mühendislik uygulamalarında istenmeyen bir durumdur. (Anonim 3).

### 2.18.2. Yük-Şekil Değiştirme Özellikleri

Disk yaylarının yük-şekil değiştirme davranışı, birden fazla yay istiflenerek önemli ölçüde değiştirilebilir. Bu istifleme, tek bir yaydan birden fazla yaylı bir yapılandırmaya geçişi değiştirerek enerji dağıtımı özelliklerini etkiler. Teorik, sonlu elemanlar ve deneysel analizler, bu değişikliklerin tahmininde iyi bir uyum göstermektedir (Kumar, Baligidad, Maharudresh, Chetan, Dayanand 2022).

### 2.18.3. Malzeme ve Doğrusal Olmayan Geometrilere

Disk yayları, karakteristik sığ konik geometrilere nedeniyle belirgin olmayan geometrilere sergilemektedir. Bu durum, yayların aksel yüklemeye altında belirli bir kritik noktada ani şekil değişimine uğrayarak snap-through (ani devrilme) davranışı göstermelerine neden olur. Söz konusu doğrusal olmayan mekanik tepki, yay sistemlerinin enerji dağılımı ve şekil değiştirme davranışlarının doğru biçimde modellenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, disk yayları içeren sistemlerin yapısal analizlerinde geometrik olmayan geometrilere mutlaka dikkate alınmalıdır. Aksi hâlde sistemin yük altındaki kararlılık durumu, deformasyon tepkisi ve enerji birikim/dönüşüm süreçleri hatalı şekilde tahmin edilebilir (Patangtalo, Hyer, Aimmanee 2015).

### 2.18.4. Yorgunluk ve Arızalar

Disk yaylar, tekrarlı (döngüsel) yüklemeler altında çalıştıklarında malzeme yapılarındaki gerilme birikimi nedeniyle yorgunluk hasarına karşı hassas hale gelirler. Bu durum, uzun süreli kullanımda yapısal arızalara yol açabilir. Yayların yorgunluk ömrü; kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, yay kalınlığı, damperler ve sistemde elastomerik dolgu malzemelerinin bulunup bulunmamasına bağlı olarak önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Elastomerik dolgular ve damperler, yükleme sırasında deformasyonun bir kısmını üstlenerek çelik yay üzerindeki gerilmeyi azaltmakta ve bu sayede hem gerilme dağılımını iyileştirmekte hem de yorgunluk ömrünü uzatmaktadır. Bu tür hibrit sistemler, enerji sönümleme kapasitesi artırılmış ve yorulma dayanımı geliştirilmiş yay çözümleri sunma potansiyeline sahiptir (Gubeljak, Pinterić, Manduka 2014).

### 2.19. Sönümleme Uygulamaları

Disk yaylar, yalnızca yük taşıyıcı elemanlar olarak değil, aynı zamanda süspansiyon sistemlerinde enerji sönümleyici bileşenler olarak da işlev görebilmektedir.

Bu yayların karakteristik doğrusal olmayan yük-defleksiyon davranışı, özellikle yüksek deformasyon seviyelerinde öngörülemeyen basınç ve akış tepkilerine neden olabilir. Bu durum, sistemin dinamik tepkisinin tahmin edilmesini güçleştirse de yayların potansiyel enerjiyi kontrollü bir şekilde dağıtabilme yetisi sayesinde etkili sönümleme sağlanabilir. Dolayısıyla, disk yayları titreşim kontrolü ve darbe enerjisi yönetimi gibi uygulamalarda pasif sönümleyici olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir (Patel, Tilley, Darling 2009).

## 2.20. Disk Yayların Sismik İzolasyon Sistemlerindeki Kullanım Alanları

Disk yayların doğrusal olmayan mekanik özellikleri, çeşitli araştırmacılar tarafından sonlu elemanlar yöntemi (FEA) kullanılarak detaylı biçimde incelenmiştir. Ozaki ve arkadaşları (2012), yük-şekil değiştirme eğrilerini basitleştirilmiş bir enerji denklemiyle modellemiş ve kenarlardaki sürtünme etkilerini dikkate alarak elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle karşılaştırarak yöntemlerinin geçerliliğini ortaya koymuşlardır. Zheng ve ekibi (2014), disk yayların karmaşık geometrisi nedeniyle klasik Almen-Laszlo algoritmasının yetersiz kaldığı durumlara dikkat çekmiş ve enerji temelli analitik bir model önererek yüksek konik yüksekliklerde daha güvenilir sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca, Zheng ve arkadaşları, disk yay rijitliğinin deformasyonla azaldığını ve belirli bir yük aralığında kararsız bir davranış sergileyerek negatif rijitlik bölgesi oluşturduğunu göstermiştir.

Pedersen ve Pedersen (2011), sabit ve değişken kalınlıklı disk yaylar üzerinde gerçekleştirdikleri analizlerde, değişken kalınlıklı tasarımların daha düzenli bir gerilme dağılımı sunduğunu fakat yalnızca seri istiflemeye uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, analitik hesaplamalarda kullanılan sabit Poisson oranının sonuçlar üzerinde hataya neden olabileceğini ve bu parametrenin etkisinin yay geometrisiyle doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuşlardır.

Ozaki ve ekibi, eksenel yük altındaki disk yayların histerezis davranışını ve sürtünmeye bağlı enerji sönümlemesini inceleyerek bu yayların dinamik titreşim analizinde de kullanılabileceğini doğrulamıştır. Son olarak, tasarım sürecini kolaylaştırmak amacıyla Paredes ve Daidie (2010), disk yayların geometrik ve mekanik sınırlamalara göre otomatik seçim ve boyutlandırılmasını sağlayan bir bilgisayar algoritması geliştirmiştir.

### 2.20.1. Konteyner Vinçlerinde Sismik İzolasyon Kullanımı

Yapılan bir araştırmada, 1995 Han-Shin (Kobe) Depremi sırasında konteyner vinçlerinde gözlemlenen hasar türleri analiz edilmiş ve raylara dik yönde etki eden yatay sismik kuvvetlerin yapısal hasarın başlıca nedeni olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla, içerisinde disk yaylarının da yer aldığı yeni bir sismik izolasyon sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin performansı hem sayısal analizler hem de ölçeklendirilmiş sismik testlerle değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu cihazın vinç sistemlerinin sismik ivmelenme ve yer değiştirme tepkilerini anlamlı düzeyde azalttığını ortaya koymuş ve bu doğrultuda tasarlanan sismik izolasyon yaklaşımının etkinliğini doğrulamıştır (Lu, Zhang, Wu, Qiu, 2011).

### 2.20.2. Dikey Sismik İzolasyon Sisteminde Kullanımı

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel analizler yapılmıştır. Disk yayları kullanılarak dikey yönlü sismik etkilerin azaltılmasına yönelik yenilikçi bir sismik izolasyon sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, dinamik yüklemeler altında laboratuvar koşullarında test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, disk yay cihazının yapıdaki katlar arası maksimum ivmelenme ve yer değiştirme tepkilerini etkili bir şekilde azalttığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, disk yaylarının yalnızca yatay değil, aynı zamanda dikey sismik izolasyon uygulamalarında da potansiyel olarak başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir (Zhang, Su, Liang, Su, Qu, 2005).

### 2.20.3. Nükleer Santral Ekipmanları İçin Geliştirilen Sismik İzolasyon Sistemi

Bir çalışmada, nükleer santral ekipmanları için geliştirilen üç boyutlu (3B) dikey sismik izolasyon cihazında, dikey sertliğin sağlanmasında disk yaylar ve helisel yaylar birlikte kullanılmıştır. Deneysel testlerle her iki yay tipinin performans özellikleri değerlendirilmiş, özellikle disk yaylarının dinamik yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Sonuçlar, disk yaylarının sismik yalıtım kapasitesini artırma potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymakta ve bu yayların kritik altyapı uygulamalarına entegre edilmesini önermektedir (Koo, Jung, Hwang, Shin, Lee 2021).

Sonuç olarak, disk yaylarının sismik izolasyon sistemlerinde kullanımı, konteyner vinçleri, binalar için dikey izolasyon ve nükleer santral ekipmanları gibi çeşitli uygulamalarda araştırılmıştır. Bu çalışmalar, disk yaylarının sismik yanıtları etkili bir şekilde azaltılabileceğini ve bu nedenle sismik izolasyon tasarımlarında değerli bir bileşen oluşturduğunu göstermektedir. Bulgular hem sayısal simülasyonlar hem de deneysel testlerle desteklenmekte olup pratik etkinliklerini ve güvenilirliklerini doğrulamaktadır.

## 2.21. Disk Yaylarının Sismik Mühendislikte Kullanımı Üzerindeki Literatür Boşlukları

### 2.21.1. Fiziksel Koşullar Altındaki Etkileri

Disk yayları, özellikle sismik enerji sönmeme ve yapıların deprem sonrası orijinal konumlarına geri dönmesini sağlama (yeniden merkezlenme) açısından potansiyel sunmaktadır. Ancak, bu elemanların farklı ön yükleme seviyeleri, istifleme düzenleri veya geometrik kombinasyonlar altındaki mekanik ve dinamik davranışları henüz yeterince araştırılmamıştır. Dolayısıyla, bu eksiklik hem teorik analizlerin hem de mühendislik uygulamalarının doğruluğunu sınırlamakta, disk yaylarının sismik izolasyon sistemlerindeki kullanımını optimize etme sürecini engellemektedir (Jalilzadeh, Khaneghah, Safari, Broujerdian, Ghamari, 2024).

### 2.21.2. Korozyon ve Çevresel Etkiler

Disk yaylarının korozyon koşullarındaki davranışlarını anlamak konusunda önemli bir boşluk bulunmaktadır. Farklı malzeme ve kaplamalardan yapılan disk yaylarının çeşitli korozyon ortamlarındaki performanslarını inceleyen sadece birkaç

çalışma vardır. Güvenilir korozyon dayanıklı çözümler geliştirebilmek için daha sistematik araştırmalar yapılması gerekmektedir (Li, Berger, Kaiser 2007).

### 2.21.3. Karşılaştırmalı Performans Analizi

Metal yaylarının, kauçuk izolatörler ve şekil hafızalı alaşımlar (SMA) gibi diğer sismik izolasyon sistemlerine karşı performansını değerlendiren karşılaştırmalı çalışmalara daha fazla ihtiyaç vardır. Bu tür karşılaştırmalar, belirli uygulamalar için en etkili çözümleri belirlemeye yardımcı olabileceği birçok çalışmada görülmektedir (Yamashita, Masuda, Sone, Iba 2007).

### 2.21.4. Dinamik ve Doğrusal Olmayan Davranışı

Yayların doğrusal olmayan davranışı, özellikle dinamik yükleme koşullarında tam olarak anlaşılmamaktadır. Yayların histerezis ve kuvvet sınırlayıcı özellikler gibi karmaşık davranışlar sergileyebileceği gösterilmiş olsa da bu davranışları doğru bir şekilde modellemek ve tahmin etmek için daha ayrıntılı araştırmalar gerekmektedir (Mastricola, Dreyer, Singh 2017).

### 2.21.5. Pratik Uygulama ve Tasarım Rehber Eksiklikleri

Metal yayların sismik izolasyon sistemlerine entegrasyonu için halen standartlaştırılmış bir tasarım yöntemi veya mühendislik rehberi bulunmamaktadır. Bu eksiklik, tasarımcıların bu tür enerji sönmüleyici elemanları etkin ve güvenli şekilde kullanmasını oldukça güçleştirmektedir. Literatürde, disk yaylar veya diğer metal elastomerik bileşenler kullanılarak enerji yayılımını kontrol etmeyi amaçlayan çeşitli araştırmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalar genellikle sınırlı deneysel verilerle geliştirilmiştir ve genelleştirme konusunda birçok belirsizlikler taşıdığı görülmektedir. (Liang, Bai, Zhu, Ma 2025).

### 2.21.6. Dikey ve Yüksek Frekanslı Titreşimler

Çoğu çalışma yatay sismik izolasyon üzerine yoğunlaşırken, metal yaylar üzerindeki dikey ve yüksek frekanslı titreşimlerin etkilerine dair sınırlı araştırma vardır. Bu, kapsamlı sismik koruma sağlamak için daha fazla araştırılması gereken önemli bir alandır (Putra, Norfarizan, Samekto, Salim 2013).

## 2.22. Disk Yay Malzemeleri

Yay sistemlerinde kullanılan malzemeler, elastik deformasyon altında yüksek performans gösterebilmeli ve dolayısıyla yüksek elastikiyet, gerilme mukavemeti ve elastik limit özelliklerine sahip olmalıdır. Aynı zamanda yüksek plastisite, yorulma direnci ve yüzey kalitesi gibi özellikler de kritik öneme sahiptir. Young Modülü (E), malzemenin yük ve deformasyon arasındaki doğrusal ilişkiyi belirler. Bu gereklilikleri karşılayan çelik malzemeler, yay üretiminde yaygın olarak tercih edilmektedir. Özellikle deprem izolatörlerinde kullanılan disk yaylar, DIN EN 16983 standardına göre üretilmekte ve yüksek mekanik dayanım ile uzun ömür hedeflenmektedir. Kullanılan yay çelikleri genellikle DIN 17221 veya DIN EN 10132-4 standartlarına uygun 50CrV4 ve 51CrMoV4 gibi alaşımlı çeliklerdir. Çalışma sıcaklık aralığına, taşıma kapasitesine

ve çevresel koşullara bağlı olarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Korozyon ve manyetik etkiler açısından ise paslanmaz çelikler ile CuBe2 ve NiBe2 gibi özel alaşımlar tercih edilmektedir. Üretim sürecinde uygulanan hassas kesim, taşlama, ısıtılma işlem ve yüzey koruma teknikleri, yayların dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırmaktadır. Disk yaylar, deprem enerjisinin sönümlenmesi amacıyla farklı düzenlemelerle monte edilmekte ve kalite kontrol süreçlerinden geçmektedir (Karasu 2014; Kutay 2010).

### **2.22.1. Standart Disk Yay Malzemeleri**

Disk yaylarda, aşırı sıcaklık ve korozyon riski olmayan durumlarda en ekonomik malzemeler Ck67, 50CrV4 ve 51CrMoV4 olarak tercih edilir. Ck67 en ucuz seçenektir ve düşük talepli uygulamalarda, özellikle 1,25 mm'ye kadar olan kalınlıklarda kullanılır; özel durumlarda 4 mm'ye kadar çıkabilir. 50CrV4, -15°C ile +150°C arasındaki standart şartlarda yaygın olarak kullanılır; sınırlı ömür toleransı ile -25°C ve +200°C'ye kadar da uygulanabilir. 51CrMoV4, molibden katkısı sayesinde 40 mm kalınlığa kadar daha kolay sertleştirilebilir, daha az kırılabilir olduğu için -20°C'ye kadar olan soğuk ortamlarda 50CrV4'e göre avantaj sağlar.

### **2.22.2. Korozyona Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri**

Korozyona dayanıklı malzemeler arasında X 12 CrNi 17 7, X 7 CrNiAl 17 7 ve X 5 CrNiMo 18 10 yer alır. Bu malzemeler, yüksek korozyon direnci sağlayan Cr ve Ni elementlerine sahiptir. Yapıları ostenitik olduğu için martensit veya baynit tavlama yapılamaz. Yüksek mukavemet değerlerini soğuk haddeleme veya sıkıştırma ile elde ederler. Yayların gerekli mukavemetini özel haddeleme yöntemleriyle kazanırlar, bu da malzeme kalınlığının dar bir aralıkta tutulmasını gerektirir. Çok düşük sıcaklıklarda da yay işlevlerini yerine getirebilirler, ancak 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda soğuk haddeleme ile kazandıkları mukavemet değerini kaybederler.

### **2.22.3. Düşük Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri**

45 CrMoV 6 7 ve 30 CrNiMo 8 malzemeleri düşük ısıda kullanılabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, martensit veya baynit tavlama ile mukavemet kazanır ve standart malzemelerle benzer özellikler gösterir. -20°C'nin altındaki sıcaklıklarda çentik hassasiyetleri standart malzemelere göre daha düşük olur. 45 CrMoV 6 7 malzemesi -60°C'ye kadar, 30 CrNiMo 8 malzemesi ise -80°C'ye kadar mukavemet ve ömür kaybı olmadan kullanılabilir. Ayrıca, bünyelerindeki Mo ve Ni sayesinde yüksek sıcaklıklarda da dayanıklıdırlar (Kutay 2010).

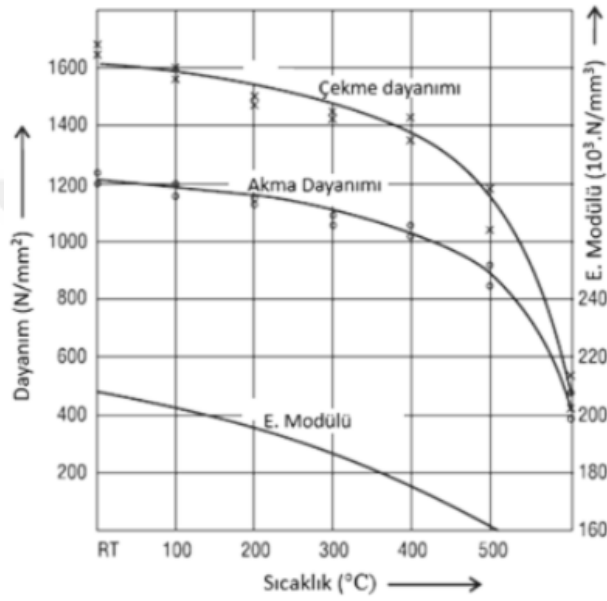
### **2.22.4. Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri**

Yüksek ısıya dayanıklı malzemeler arasında X 35 CrMo 17, X 30 WCrV 5 3 ve X 22 CrMoV 12 1 bulunur. Bu malzemeler, martensit tavlanabilir malzemeler olup, alaşımlarının sağladığı özellikler sayesinde standart malzemelerden daha yüksek ısıya dayanıklıdırlar. X 22 CrMoV 12 1 alaışımının sıcaklığa bağlı akma gerilmesi ve elastiklik modülü değişimi Şekil 2.53'te gösterilmektedir.



### 2.22.5. Aşırı Sıcaklığa Dayanıklı Disk Yay Malzemeleri

Aşırı ısıya dayanıklı malzemeler arasında Duratherm 600, Inconel X 750, Inconel 718 ve Nimonic 90 yer alır. Bu malzemeler piyasa isimleriyle bilinir, ancak Duratherm ve Inconel için DIN numarası yoktur. Bu malzemeler sertleştirilebilir, gevrek değildir ve sürekli yüksek mukavemet sağlar. Ancak, yay seçiminde çekme ve akma mukavemeti belirli bir toleransla daha küçük seçildiğinde, oturma sonucu kuvvet kaybı yaşanabilir. Bu kayıp, ısı, zaman ve gerilimle ilişkilidir ve yay yüksekliğinden düşüşe yol açar.



**Şekil 2. 53.** X 22 Cr MoV 12 1 çeliğinin sıcaklığa bağlı akma gerilmesi ve elastikiyet modülü 'E' değişimi.

### 2.22.6. Anti-Manyetik ve Korozyona Dayanıklı Malzemeler

CuBe2 ve NiBe2, hem anti-manyetik hem de korozyona dayanıklı malzemelerdir. Mukavemetleri, sertleştirme işlemiyle elde edilir. CuBe2, iyi bir elektrik iletkenidir ve aşırı soğuk koşullarda kullanılan nadir malzemelerden biridir. Düşük E-modülü, küçük kuvvetlerle kullanımını sağlar. NiBe2, aynı özelliklere sahip olmasının yanı sıra, aşırı sıcaklıklarda da kullanılabilen nadir bir malzemedir (Kutay 2010).

Disk yay malzemelerinin mekanik ve kullanım şartlarına bağlı özellikleri Çizelge 2.9 ve Çizelge 2.10'da gösterilmektedir.

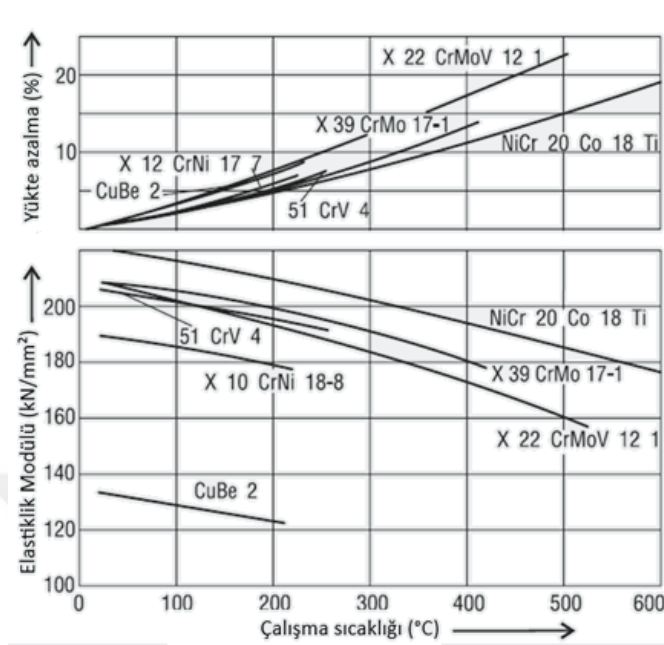
**Çizelge 2. 9.** Disk yayların malzemeleri ve bazı mekanik özellikleri

| Uygulama Profili                           | Malzeme Tasarımı | DIN Numarası | Elastisite Modülü (E, 20 °C, kN/mm <sup>2</sup> ) | Max. Malzeme Kalınlığı (mm) |
|--------------------------------------------|------------------|--------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| Standart malzemeler                        | Ck 67            | 1.1231       | 206                                               | 1,25                        |
|                                            | 50/51 CrV 4      | 1.81159      | 206                                               | 25                          |
| Yüksek kalınlığa sahip malzeme             | 51 CrMoV 4       | 1.7701       | 206                                               | 40                          |
| Korozyona dayanıklı malzemeler             | X 12 CrNi 17 7   | 1.4310       | 190                                               | 2                           |
|                                            | X 7 CrNiAl 17 7  | 1.4568       | 200                                               | 2,5                         |
|                                            | X 5 CrNiMo 18 10 | 1.4401       | 190                                               | 1,6                         |
| Sıcağa dayanıklı malzemeler                | X 35 CrMo 17     | 1.4122       | 209                                               | 8                           |
|                                            | X 30 WCrV 5 3    | 1.2567       | 206                                               | 20                          |
|                                            | X 22 CrMo V 12 1 | 1.4923       | 209                                               | 8                           |
|                                            | 45 CrMoV 6 7     | 1.7737       | 206                                               | 20                          |
|                                            | 30 CrNiMo 8      | 1.6580       | 206                                               | 20                          |
| Yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemeler      | Inconel 718      | 2.4668       | 200                                               | 8                           |
|                                            | Inconel X 750    | 2.4669       | 214                                               | 8                           |
|                                            | Duratherm 600    | 2.4781       | 220                                               | 6                           |
|                                            | Nimonic 90       | 2.4969       | 206                                               | 8                           |
| Anti-manyetik ve korozyona dayanıklı malz. | CuBe 2           | 2.1247       | 135                                               | 3                           |
|                                            | NiBe 2           | 2.4132       | 200                                               | 3                           |

**Çizelge 2. 10.** Malzemelerin sıcaklık değerlerine göre elastiklik modülleri

| Malzeme Adı      | DIN Numarası | Elastiklik Modülü (kN/mm <sup>2</sup> ) |        |        |        |        |        |        |
|------------------|--------------|-----------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  |              | 20 °C                                   | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 600 °C |
| Ck 67            | 1.1231       | 206                                     | 202    |        |        |        |        |        |
| 50 CrV 4         | 1.8159       | 206                                     | 202    | 196    |        |        |        |        |
| 51 CrMo 4        | 1.7701       | 206                                     | 202    | 196    |        |        |        |        |
| X 12 CrNi 17 7   | 1.4310       | 190                                     | 185    | 178    |        |        |        |        |
| X 7 CrNiAl 17 7  | 1.4568       | 200                                     | 195    | 190    |        |        |        |        |
| X 5 CrNiMo 18 10 | 1.4401       | 190                                     | 185    | 178    |        |        |        |        |
| X 35 CrMo 17     | 1.4122       | 209                                     | 205    | 199    | 192    |        |        |        |
| X 30 WCrV 5 3    | 1.2567       | 206                                     | 202    | 196    | 189    | 178    |        |        |
| X 22 CrMoV 12 1  | 1.4923       | 209                                     | 205    | 200    | 193    |        |        |        |
| 45 CrMoV 6 7     | 1.7737       | 206                                     | 202    | 196    | 189    |        |        |        |
| 30 CrNiMo 8      | 1.6580       | 206                                     | 202    | 196    | 189    |        |        |        |
| Inconel 718      | 2.4668       | 200                                     | 196    | 190    | 186    | 179    | 172    |        |
| Inconel X 750    | 2.4669       | 214                                     | 207    | 198    | 190    | 179    | 170    |        |
| Nimonic 90       | 2.4969       | 206                                     | 201    | 195    | 189    | 181    | 175    | 167    |
| Duratherm 600    | 2.4781       | 220                                     | 219    | 212    | 204    | 197    |        |        |
| CuBe 2           | 2.1247       | 135                                     | 131    | 126    |        |        |        |        |
| NiBe 2           | 2.4132       | 200                                     | 195    | 189    | 182    | 176    |        |        |

Aynı zamanda elastiklik modülünün sıcaklığa göre davranışı Şekil 2.54'te grafik halinde gösterilmektedir (Anonim 4).



Şekil 2. 54. Elastiklik modülü – sıcaklık grafiği

### 2.23. Disk Yay Standardı (DIN EN 16983)

DIN EN 16983; disk (Belleville) yayların boyutları, toleransları, malzeme kalitesi ve performans kriterlerini belirleyen Avrupa standardıdır. Standardın amacı, farklı üreticilerden temin edilen disk yayların uyumlu ve güvenilir olmasını sağlamaktır. Standard, yayların geometrik ölçümlerini, malzeme özelliklerini, üretim toleranslarını ve kalite kontrol yöntemlerini kapsar. Ayrıca yayların maksimum gerilme sınırları ve yorulma dayanımı gibi kritik performans parametrelerini belirler. Bu standart, mühendislik tasarımında güvenilirlik ve üretimde standartlaşma sağlar; endüstri ve akademide disk yayların mekanik analizleri ve testleri için temel referans olarak kullanılır. A, B ve C ön ekleri, ilgili serileri belirtir. DIN EN 16983 standartlarında dış çapları 8 ila 250 mm arasında değişen bu yaylar üretici firmalar tarafından 8 ila 600 mm'ye kadar standart olarak üretilebilmektedir. Ayrıca özel üretim ölçülerinde de üretimi yapılabilmektedir.

### 3. YÖNTEM

Yaylar, makine tasarımı yaygın olarak kullanılır ve yassı yaylar grubunda yer alan konik disk yaylar (Belleville yayları), kompakt yapıları ve değiştirilebilir  $h/t$  oranları sayesinde farklı yük-deplasman karakteristikleri sunar. DIN EN 16983 standardına göre belirli boyut ve malzeme aralıklarında üretilirler ve plastik şekil değişimine izin verecek şekilde yüklenebilirler. Ancak literatürde yapılan hesaplamalarda bu plastik artık gerilmeler genellikle göz ardı edilmektedir.

Bu tez kapsamında yürütülen çalışmada, konik disk yayların mekanik davranışları hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile modellenmiş; lineer ve non-lineer analizlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Özellikle non-lineer FEM analizleri, sadece elastik sınırlar içinde kalmayıp plastik deformasyonları da yansıttığı için, gerçek davranışa daha yakın ve tasarım açısından daha güvenilir sonuçlar vermiştir.

Konik disk yaylar, DIN EN 10132-4 ve DIN EN 10089 standartlarına uygun çelik malzemelerden (örneğin 51CrV4, 52CrMoV4) üretilir ve elastik sınırların ötesinde yüklenir. Bu yüklemeye bağlı olarak oluşan artık gerilmeler, yayların sonraki kullanımlarında daha yüksek gerilme seviyelerine dayanabilmesini sağlar. Ayrıca, tek bir konik disk yayın tam düz forma yaklaşmadan önce, temas noktalarının dış kenarlardan iç kısımlara kayması nedeniyle yüklem eğrisi kademeli olarak artış gösterir ve kaldıraç kolunun uzunluğu azalır. Bu durumdan dolayı, izin verilen deformasyonun  $0,75.h_0$  değerini aşmaması önem taşımaktadır. Bu değer %75 oranında yükseklik değişimini ifade eder.

Literatürdeki klasik analitik modeller, yay kesitinin sabit kaldığı ve yalnızca dönme hareketi yaptığı varsayımına dayanır. Ancak bu varsayımlar, çoklu yay dizilimleri, temas etkileri ve plastikleşme durumları gibi karmaşık mühendislik uygulamalarında yeterli doğruluk sağlamamaktadır. Bu nedenle, bu tezde konik disk yayların davranışı, analitik hesaplamalarla birlikte lineer ve non-lineer FEM analizleriyle desteklenerek, hem mühendislik uygulamalarında hem de deprem gibi dinamik yüklemelere maruz kalan sistemlerde kullanım potansiyeli açısından kapsamlı bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur (Tezel, Kovan 2022).

#### 3.1. Malzeme

Sonlu elemanlar metodu, konik disk yaylarla ilgili tüm parametrelerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Öte yandan, mevcut çalışmaların yalnızca belirli boyutlarda sonuçlar sunması nedeniyle, genel geçer bir tasarım rehberi oluşturmak açısından yetersiz kaldığı görülmektedir.

Standartlar kapsamında önerilen çap serilerine yönelik yapılacak kapsamlı çalışmalar, konik disk yay tasarımlarına yönelik pratik rehberlik sağlayacaktır. Bu bağlamda, söz konusu çalışmanın amacı, yaygın tasarımlarda kullanılan konik disk yaylarda oluşan gerilmeleri analitik ve nümerik yöntemler yardımıyla inceleyip karşılaştırmak. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir. Kullanılan bu malzeme Ansys yazılımına tanımlanmıştır.

**Çizelge 3. 1.** 51CrV4 yay çeliği malzeme özellikleri (20°C ortam sıcaklığındaki mekanik özellikler)

| Karbon Çeliği Malzeme Özellikleri     | Değerler                |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )         | 7850                    |
| Çekme Akma Dayanımı (Pa)              | 2,5.10 <sup>8</sup>     |
| Basınç Akma Dayanımı (Pa)             | 2,5.10 <sup>8</sup>     |
| Nihai Çekme Dayanımı (Pa)             | 4,6.10 <sup>8</sup>     |
| Poisson oranı                         | 0,3                     |
| Young Modülü (Elastisite Modülü) (Pa) | 2,06.10 <sup>11</sup>   |
| Hacimsel Modül (Pa)                   | 1,7167.10 <sup>11</sup> |
| Kayma Modülü (Pa)                     | 7,9231.10 <sup>10</sup> |

Makine imalat süreçlerinde, tasarımcıların yalnızca teknik gereksinimleri karşılamaları değil, aynı zamanda ekonomik açıdan da verimli çözümler geliştirmeleri zorunludur. Bu kapsamda, ürünlerin tasarım ve üretim aşamalarında standartların kullanımı kritik bir öneme sahiptir. Standartlar, tekrarlayan mühendislik problemlerine ilişkin deneyimlerin sistematik olarak derlenmesiyle oluşturulan, kalite ve uyumluluk açısından güvenilir referanslardır. Özellikle konik disk yayların tasarımında, geometrik boyutlar ve toleranslar gibi parametrelerin belirlenmesi sürecinde, DIN EN 16983 standardı temel bir kaynak olarak öne çıkar. Bu standart, yayların üretiminde teknik doğruluk ve işlevsellik açısından gerekli sınırları belirlerken, aynı zamanda imalat maliyetlerinin optimize edilmesine katkı sağlar. Tasarımcılar, DIN EN 16983'te tanımlanan uygun geometrik boyut ve toleransları tercih ederek hem mekanik performans açısından yeterli hem de ekonomik açıdan sürdürülebilir ürünler geliştirme imkânı bulurlar. Böylece hem üretim süreçlerinde standardizasyon sağlanmakta hem de tasarımın hem teknik hem de maliyet kriterlerine uygunluğu garanti altına alınmaktadır.

Yalnızca burulma etkisi altındaki yayların aksine, konik disk yayların enine kesitlerinde tarafsız bir eksen değil yalnızca tek bir tarafsız nokta bulunur. Almen-Laszlo'nun yaklaşımına göre, bu nokta etrafında dönen bir deformasyon davranışı söz konusudur. Konik disk yaylarda çevresel yönde elde edilen gerilme değerleri, yalnızca teorik bir referans niteliğindedir. Çünkü bu değerler, imalattan kaynaklanan toleranslar ile artık gerilmeler dikkate alınmadan hesaplandığı için gerçek gerilmeleri tam olarak yansıtmaz ve nominal düzeyde kalır.

### 3.2. Modelleme

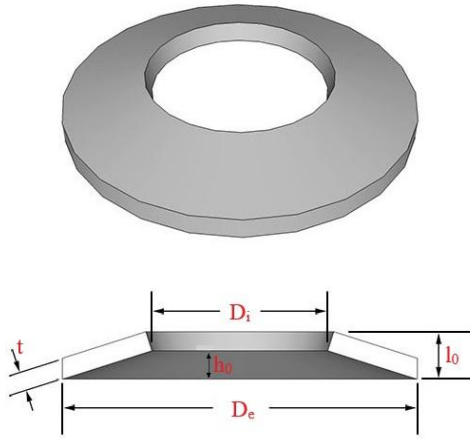
Çalışmada sonlu elemanlar analizleri, ANSYS Student 2025 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, DIN EN 16983 standardında

tanımlanan A, B ve C Serilerindeki tüm yaylar ile üretici firmaya (Mubea) ait standart dışı 12 adet yayı kapsamaktadır. Çizelge 3.2’de bazı yayların örnekleri gösterilmektedir. Analiz sürecinde model geometrileri oluşturulmuş fiziksel sınır koşulları tanımlanmış, ağ (mesh) yapısı kurulmuş, ardından problemler çözülerek nümerik sonuçlar değerlendirilmiştir. A, B ve C serileri farklı sertlik davranışı göstermektedirler. Yayların hem lineer hem de non-lineer davranışları incelenmektedir. Hesaplamaların daha verimli yürütülebilmesi amacıyla konik disk yaylar, simetri eksenini boyuncaya sekizde bir oranında modellenmiştir. Elde edilen sonuçların standart verilerle karşılaştırılabilmesi için, gerilme ve kuvvet değerleri  $s_{0,75}$  deformasyonu esas alınarak hesaplanmıştır.

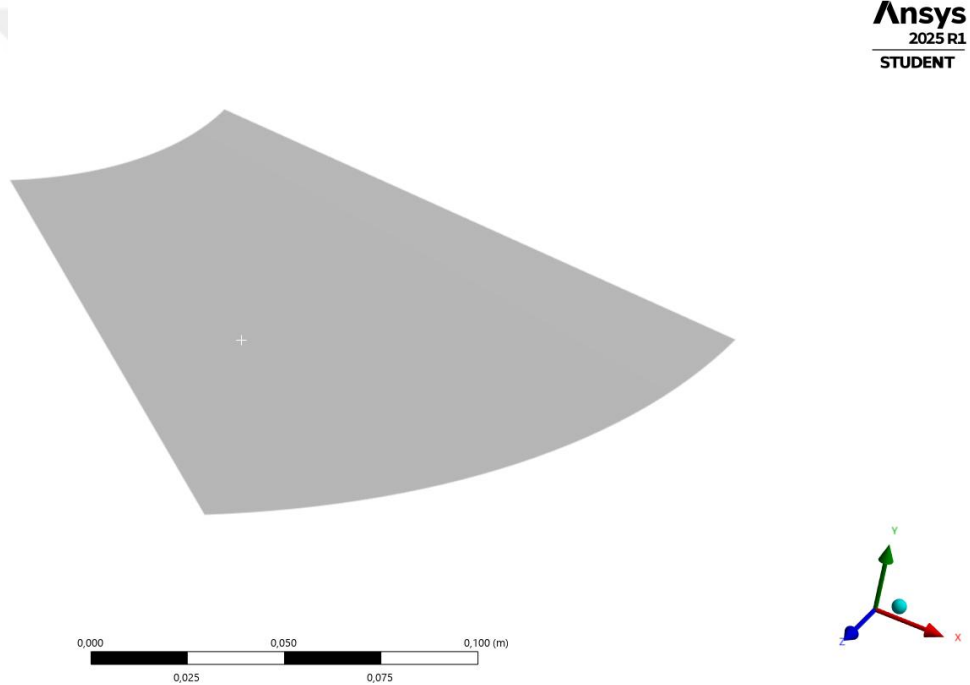
**Çizelge 3. 2.** DIN EN 16983 standardına göre A, B, C Serisi Grup yaylar ve standart dışı (Mubea) yaylar

| $D_e$ | $R_e$ | $D_i$ | $R_i$ | $t$ | $h_0$ | $l_0$ | $s_{0,75}$ | $F_{0,75}$ | $\sigma_{II}$     | Seri/Grup     |
|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|------------|------------|-------------------|---------------|
| mm    | mm    | mm    | mm    | mm  | mm    | mm    | mm         | N          | N/mm <sup>2</sup> |               |
| 200   | 100   | 102   | 51    | 12  | 4,2   | 16,2  | 3,15       | 183020     | 1227              | A Serisi      |
| 225   | 113   | 112   | 56    | 12  | 5     | 17    | 3,75       | 171016     | 1137              |               |
| 250   | 125   | 127   | 64    | 14  | 5,6   | 19,6  | 4,2        | 248828     | 1221              |               |
| 200   | 100   | 102   | 51    | 8   | 5,6   | 13,6  | 4,2        | 76378      | 1254              | B serisi      |
| 225   | 113   | 112   | 56    | 8   | 6,5   | 14,5  | 4,875      | 70749      | 1176              |               |
| 250   | 125   | 127   | 64    | 10  | 7     | 17    | 5,25       | 119050     | 1244              |               |
| 200   | 100   | 102   | 51    | 5,5 | 7     | 12,5  | 5,25       | 36111      | 1247              | C serisi      |
| 225   | 113   | 112   | 56    | 6,5 | 7,1   | 13,6  | 5,325      | 44580      | 1137              |               |
| 250   | 125   | 127   | 64    | 7   | 7,8   | 14,8  | 5,85       | 50466      | 1116              |               |
| 480   | 240   | 252   | 126   | 21  | 15,9  | 36,6  | 11,925     | 674300     | 1550              | Standart Dışı |
| 500   | 250   | 242   | 121   | 32  | 9     | 41    | 6,75       | 1147000    | 1000              |               |
| 600   | 300   | 282   | 141   | 24  | 22    | 46    | 16,5       | 905000     | 1530              |               |

Şekil 3.1’de örnek bir yaya ait üstten görüntü ve kesitte ölçülendirmeler gösterilmektedir. Analizi kolaylaştırmak amacıyla katı cisim modellemesi Ansys yazılımına 1/8 oranında aktarılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3. 1. Örnek yay görüntüsü ve ölçülendirilmesi



Şekil 3. 2. Disk yaya ait 1/8 kesitte modeli

### 3.3. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), fiziksel sistemlerin matematiksel modellenmesinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir nümerik tekniktir. Yapısal dayanım değerlendirmeleri, ısı iletimi, akışkanlar dinamiği ve elektromanyetik alan analizleri gibi pek çok mühendislik probleminin çözümünde etkili biçimde uygulanmaktadır. Bu tür problemler genellikle kısmi diferansiyel denklemler (KDD) ile tanımlanır. Ancak, bu denklemlerin analitik çözümlerinin elde edilebilmesi, genellikle belirli sınır koşullarının sağlanmasını gerektirir; bu koşulların tam olarak belirlenmesi ise çoğu zaman mümkün değildir. FEM yaklaşımı, bu zorlukları aşmak için fiziksel problemi sayısal olarak tanımlayan cebirsel denklem sistemleri kurar. Bu sistem, tüm yapının daha küçük ve yönetilebilir bileşenlere – sonlu elemanlara – bölünmesiyle oluşturulur.



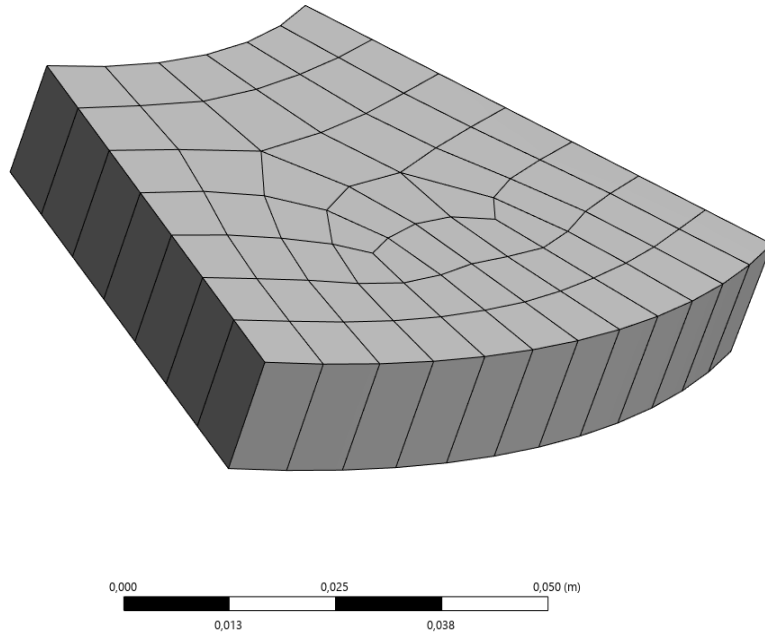
Oluşan cebirsel denklemler sayısal hesaplamaları kolaylaştırırken, çözülmesi gereken denklem sayısını da önemli ölçüde artırır. Bu bağlamda, yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlar ve ileri düzey mühendislik yazılımları, bu karmaşık sistemlerin çözümünü mümkün kılmaktadır. Her bir alt elemanın çözümü, genel yapının davranışını temsil edecek şekilde bütünleştirilir (Logan 2021).

Bu tez kapsamında, belirli mühendislik gereksinimlerine uygun tasarımlar geliştirmek amacıyla sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler, yay elemanının maruz kalabileceği gerilme durumlarını ve taşıyabileceği maksimum kuvvet sınırlarını ayrıntılı biçimde ortaya koymuştur.

### 3.3.1. Ağ Yapısı Oluşturma (Mesh)

Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) kapsamında modelin küçük parçalara ayrılması, yani ağ (mesh) oluşturulması hem çözümün doğruluğu hem de hesaplama süresi açısından belirleyici bir rol oynamaktadır. ANSYS yazılımı bu süreci otomatik olarak gerçekleştirebildiği gibi, kullanıcıya özel tanımlamalar yapma imkânı da sunmaktadır. Ağ yapısının düzenli ve tutarlı biçimde oluşturulması, analiz sonuçlarının güvenilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Özellikle disk yaylar gibi basit ve eksenel simetriye sahip geometriler, homojen ve kaliteli mesh elde edilmesine olanak tanımakta; bu durum ise ağ kaynaklı hata oranlarının en aza indirilmesini sağlamaktadır. Analizi yapılan modelin mesh yapısı ve eleman boyutları, farklı büyüklüklerde disk yaylar kullanıldığı için program kontrollü olarak ayarlanmıştır (Şekil 3.3).

**Ansys**  
2025 R1  
STUDENT



**Şekil 3. 3.** Modelin mesh görüntüsü

### 3.3.2. Sınır Koşulları

Sonlu elemanlar analizinde (FEA), analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen temel unsurlardan biri sınır koşullarıdır. Sınır koşulları, modelin dış dünya ile etkileşimini tanımlar ve yapının çalışma ortamını simüle eder. Bu nedenle, sınır koşullarının mümkün olduğunca gerçek sistemin fiziksel davranışını yansıtacak şekilde tanımlanması gerekir. Sınır koşulları; yapının hangi bölgelerden kısıtlandığını (sabitlenme, kayma, serbestlik), hangi serbestlik derecelerinin engellendiğini ve yüklemelerin nereden, hangi büyüklükte ve hangi yönlerde uygulandığını belirler.

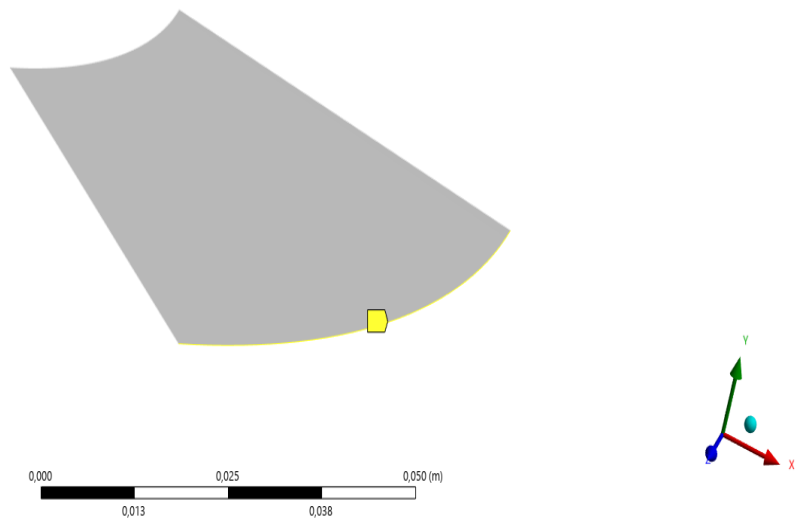
Sınır koşullarının yanlış veya eksik tanımlanması, analizde hatalı sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle destek tipleri, yükleme türleri ve uygulanma bölgeleri dikkatle belirlenmelidir. Analizin güvenilirliği, bu koşulların doğru modellenmesine doğrudan bağlıdır.

Sonlu elemanlar analizinde oluşturulan disk yay modelinde sarı renkle işaretlenmiş dış silindirik yüzey (Şekil 3.4) tamamen sabitlenerek hem radyal hem de eksenel yönde yer değiştirmesi engellenmiştir. Buna karşılık, iç silindirik yüzeyden Y eksenine doğrultusunda kuvvet uygulanmış, bu yüzeyin sadece uygulanan yük yönünde serbestçe deformasyonuna izin verilmiştir. Bu sayede, iç yüzeyin eksenel (Z doğrultusundaki) hareketi serbest bırakılarak disk yayın gerçek çalışma koşullarına uygun bir yükleme senaryosu oluşturulmuştur.

Analizde, ortam sıcaklığı sabit 22 °C olacak şekilde tanımlanmış ve termal etkilerin yükleme süresince değişmediği kabul edilmiştir. Tanımlanan bu sınır ve çevre koşulları altında, uygulanan kuvvetin disk yay üzerinde oluşturduğu mekanik tepkiler değerlendirilmiş ve elde edilen gerilme–deformasyon davranışı analiz edilmiştir.

A: Belleville Washer (Linear Material)  
Displacement  
Time: 2, s  
14.07.2025 18:04:25  
Displacement  
Components: Free/0, Free m

**Ansys**  
2025 R1  
STUDENT



Şekil 3. 4. Sabitlenen dış yüzey

### 3.3.3. Analiz

Sonlu Elemanlar Metodunda analiz, fiziksel bir sistemin matematiksel modeli üzerinde yapılan sayısal çözümdür. Yani, gerçek dünyadaki bir yapının veya mekanizmanın davranışını belirli sınır koşulları ve yüklemeler altında bilgisayar ortamında simüle etmek amacıyla yapılan hesaplama sürecidir. Bu çalışmada lineer(statik), nonlinear(statik) ve parametrik analizler yapılmıştır.

#### 3.3.3.1. Lineer Statik Analiz

Lineer statik analiz, yapısal analiz türlerinden biri olup, malzeme ve geometrinin doğrusal kabul edildiği ve zamana bağlı olmayan (statik) dış yükler altında yapının davranışını inceleyen bir yöntemdir. Bu analizde malzeme davranışı Hooke Yasası'na uygun olarak ele alınır (elastik sınırlarda); yani gerilme ile deformasyon arasında doğrusal bir ilişki vardır. Geometrik şekil değişiklikleri küçük kabul edilerek, yapı orijinal konfigürasyonuna yakın bir durumda değerlendirilir. Uygulanan yükler zamana bağlı olarak değişmez veya çok yavaş uygulanır, bu nedenle dinamik etkiler (ivme ve atalet kuvvetleri) ihmal edilir. ANSYS yazılımında lineer statik analiz, küçük deformasyonlar ve doğrusal malzeme davranışı varsayılan yapılar için sabit yükler altında yapısal tepkileri belirlemek amacıyla temel analiz yöntemi olarak kullanılır.

#### 3.3.3.2. Nonlinear Statik Analiz

Nonlinear statik analiz, malzeme, geometri veya sınır koşullarının doğrusal olmayan özellikler gösterdiği ve zamana bağlı olmayan yükler altında yapının davranışını inceleyen analiz türüdür. Bu analizde malzeme davranışı elastik sınırlar dışına çıkarak plastik deformasyon, süneklik ve çatlama gibi durumlar dikkate alınır. Ayrıca, büyük deformasyonlar ve şekil değişiklikleri hesaba katılır; yapının orijinal konfigürasyonundan sapmalar göz önünde bulundurulur. Temas problemleri, sürtünme ve bağlantı elemanlarının serbestliği gibi karmaşık kısıtlamalar da modellenilebilir. Yükler genellikle zamana bağlı olarak değişmez veya çok yavaş uygulanır; bu nedenle dinamik etkiler ihmal edilir. Nonlinear statik analiz, yapının doğrusal olmayan fiziksel davranışlarını dikkate alarak, sabit yükler altındaki gerçekçi tepkilerini sayısal olarak belirleyen ileri düzey bir yöntemdir.

#### 3.3.3.3. Parametrik Analiz

Parametrik analiz, bir modeldeki bir veya birden fazla parametrenin (örneğin, boyutlar, malzeme özellikleri, yük büyüklüğü vb.) farklı değerleri için analizlerin otomatik olarak tekrarlandığı bir yöntemdir. Bu yaklaşım sayesinde, bir tasarımın veya sistemin çeşitli koşullar altındaki performansı sistematik ve verimli bir şekilde değerlendirilebilir. Parametrelerin farklı kombinasyonları için çözümler gerçekleştirilerek, her bir değişkenin sonuçlara olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenir ve böylece en uygun tasarım veya çalışma koşulu belirlenebilir. Parametrik analiz, özellikle tasarım optimizasyon süreçlerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, malzeme özellikleri sabit tutularak; iç yarıçap, dış yarıçap, et kalınlığı ve yaylanma boyu gibi geometrik değişkenler parametre olarak belirlenmiştir.

Oluşturulan A, B ve C Serisi ile standart dışı yayların farklı tasarım noktalarına ait geometrik parametreler Çizelge 3.3'ta sunulmaktadır.

Çizelge 3.3'te belirtilen DP noktaları örnek tasarım noktalarını ifade etmektedir. P değerleri ise girilen parametreleri ifade eder.

**Çizelge 3. 3.** ANSYS Student 2025'te A, B, C Serisi yaylar ile standart dışı yayların tasarım noktalarına ait parametreler

| Adı   | P1<br>R <sub>i</sub> | P3<br>h <sub>0</sub> | P4<br>R <sub>e</sub> | P5<br>NL-R <sub>i</sub> | P6<br>NL-R <sub>e</sub> | P7<br>NL-h <sub>0</sub> | P8<br>t | P9<br>NL-t | P16<br>Mesh<br>büyüklüğü |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------|------------|--------------------------|
| Units | mm                   | mm                   | mm                   | mm                      | mm                      | mm                      | mm      | mm         | mm                       |
| DP 1  | 51                   | 4,2                  | 100                  | 51                      | 100                     | 4,2                     | 12      | 12         | -0,1875                  |
| DP 2  | 56                   | 5                    | 112,5                | 56                      | 112,5                   | 5                       | 12      | 12         | -0,225                   |
| DP 3  | 63,5                 | 5,6                  | 125                  | 63,5                    | 125                     | 5,6                     | 14      | 14         | -0,225                   |
| DP 4  | 51                   | 5,6                  | 100                  | 51                      | 100                     | 5,6                     | 8       | 8          | -0,2625                  |
| DP 5  | 56                   | 6,5                  | 112,5                | 56                      | 112,5                   | 6,5                     | 8       | 8          | -0,3                     |
| DP 6  | 63,5                 | 7                    | 125                  | 63,5                    | 125                     | 7                       | 10      | 10         | -0,3375                  |
| DP 7  | 51                   | 7                    | 100                  | 51                      | 100                     | 7                       | 5,5     | 5,5        | -0,375                   |
| DP 8  | 56                   | 7,1                  | 112,5                | 56                      | 112,5                   | 7,1                     | 6,5     | 6,5        | -0,4125                  |
| DP 9  | 63,5                 | 7,8                  | 125                  | 63,5                    | 125                     | 7,8                     | 7       | 7          | -0,4875                  |
| DP 10 | 126                  | 15,9                 | 240                  | 126                     | 240                     | 15,9                    | 21      | 21         | -0,525                   |
| DP 11 | 121                  | 9                    | 250                  | 121                     | 250                     | 9                       | 32      | 32         | -0,6                     |
| DP 12 | 141                  | 22                   | 300                  | 141                     | 300                     | 22                      | 24      | 24         | -0,675                   |

### 3.3.4. Çözümlmeler

Çalışmada, Eşdeğer (Von Mises) gerilme ve normal gerilme dağılımları incelenerek, elde edilen lineer ve non-lineer  $\sigma_{II}$  gerilme değerleri ile lineer ve non-lineer  $F_{0,75}$  yükleme düzeylerine karşılık gelen yapısal tepkiler karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir.

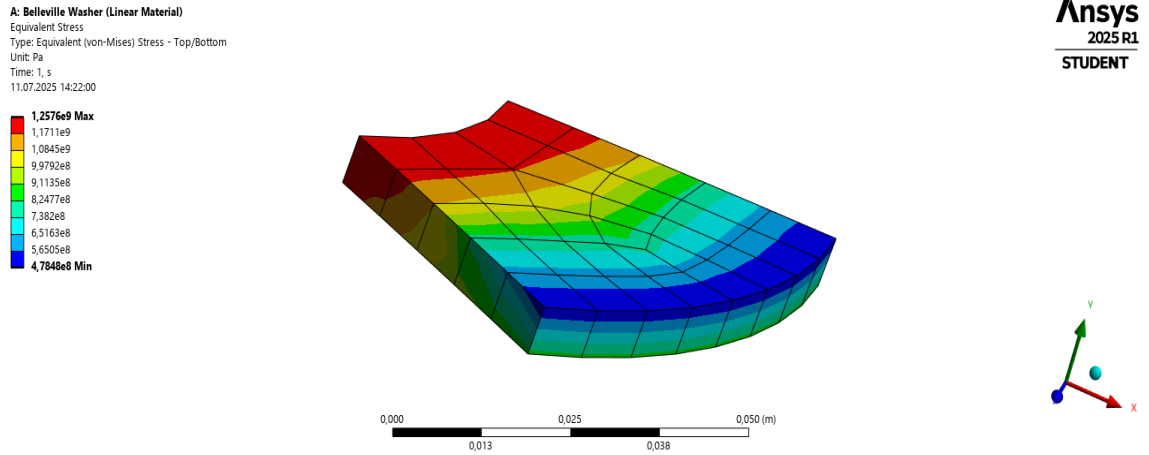
### 3.3.4.1. Eşdeğer (Von Mises) Gerilmesi

Çok eksenli gerilmeler tek bir skalar değer olan eşdeğer gerilme ile temsil edilir. ANSYS'te bu genellikle Von Mises gerilmesi olarak hesaplanır ve malzemenin akma dayanımı ile karşılaştırılır. Eğer eşdeğer gerilme akma dayanımından düşükse tasarım güvenlidir; eşit veya yüksekse plastik deformasyon başlar ve tasarım gözden geçirilmelidir. Von Mises gerilmesi, sünek malzemelerde plastik şekil değişimini öngörmek için kullanılır ve gerilme bileşenlerinden hesaplanır.

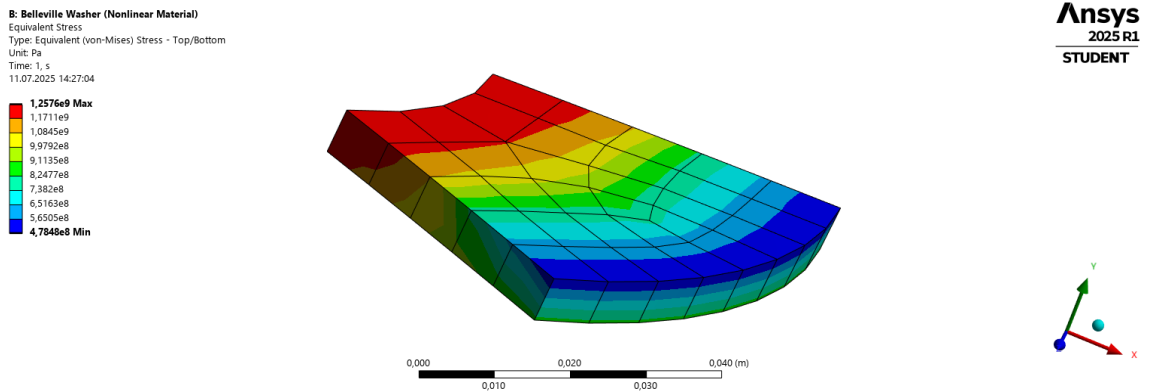
Malzemenin akma dayanımıyla karşılaştırılır.

- Eğer:  $\sigma_{eq} < \sigma_{akma} \rightarrow$  Güvenli
- Eğer:  $\sigma_{eq} \geq \sigma_{akma} \rightarrow$  Plastiklik başlar, tasarım yeniden değerlendirilmelidir.

C serisi  $D_e=225$  mm dış çapa sahip yaya ait lineer (Şekil 3.5) ve non-lineer (Şekil 3.6) von-mises gerilme görüntüleri ve zamana bağlı gerilim değişimleri aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3. 5. Lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$  mm)



Şekil 3. 6. Non-lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$  mm)

Şekil 3.5 ve 3.6’da görülen çalışmada, dış çapı  $D_e=225$  mm, iç çapı  $D_i=112$  mm, kalınlığı  $t=6,5$  mm olan ve nominal strok oranı  $s_{0,75}=5,325$  mm’ye göre tasarlanmış C serisi 3. grup disk yay için Ansys yazılımında hem lineer hem de nonlinear statik yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Malzeme modeli olarak lineer analizde yalnızca elastik davranış esas alınırken, nonlinear analizde plastikleşme dikkate alınmıştır.

Lineer elastik analizde elde edilen maksimum von Mises gerilmesi; 1257,6 MPa; maksimum gerilme yayın iç yüzeyinde (yük aktarımının yoğunlaştığı bölgede), 478,4 MPa; minimum gerilme ise yayın dış üst yüzeyinde oluşmuştur. Bu durum, konik disk yayların karakteristik gerilme dağılımına uygun bir sonuçtur. İç kenar bölgesi, yük aktarımı ve geometrik eğrilik nedeniyle en yüksek gerilme yığılmasının gerçekleştiği (kırmızı renkli bölge) kritik bölge olarak öne çıkmaktadır. Dış kenarda ise yay malzemesinin yük transferi azaldığı için gerilmeler doğal olarak daha düşük (mavi renkli bölge) seyretmektedir.

Nonlinear elastik analizde elde edilen maksimum von Mises gerilmesi; öaksumum gerilme yine 1257,6 MPa, minimum gerilme ise 478,4 MPa olarak bulunmuştur.

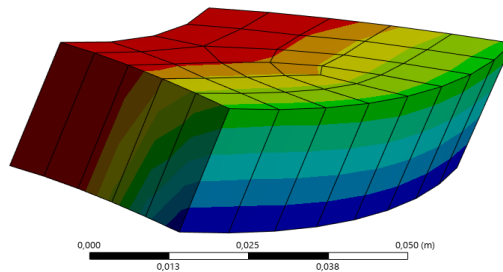
Lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının Von Mises gerilmesi açısından birebir aynı değerler üretmesi, yay malzemesinin  $s_{0,75}$  deplasmanında henüz belirgin bir plastik şekil değiştirmeye ulaşmadığını göstermektedir. Bu durumda, malzeme davranışı esasen elastik sınırlar içinde kalmakta ve geometrik non-lineerliklerin gerilme dağılımı üzerinde sınırlı bir etki yarattığı anlaşılmaktadır.

Elde edilen maksimum von Mises gerilmesinin, kullanılan yay malzemesinin akma gerilmesi ile karşılaştırılması kritik önem taşımaktadır. 51CrV4 gibi yüksek mukavemetli yay çeliği için tipik akma dayanımı  $\sim 1200-1500$  MPa aralığındadır. Bu durumda 1257,6 MPa değerinin bu sınırda olduğu söylenebilir. Minimum gerilmenin 478,4 MPa seviyelerinde kalması, yayı çevreleyen malzeme kısımlarında enerjinin gerilim yığılması olmadan yayılabildiğini gösterir.

$D_e=600$  mm dış çapa sahip standart dışı disk yaya ait lineer (Şekil 3.7) ve non-lineer (Şekil 3.8) von Mises gerilme görüntüleri ve zamana bağlı gerilim değişimleri aşağıda gösterilmektedir.

A: Belleville Washer (Linear Material)  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: Pa  
Time: 1, s  
11.07.2025 15:02:50

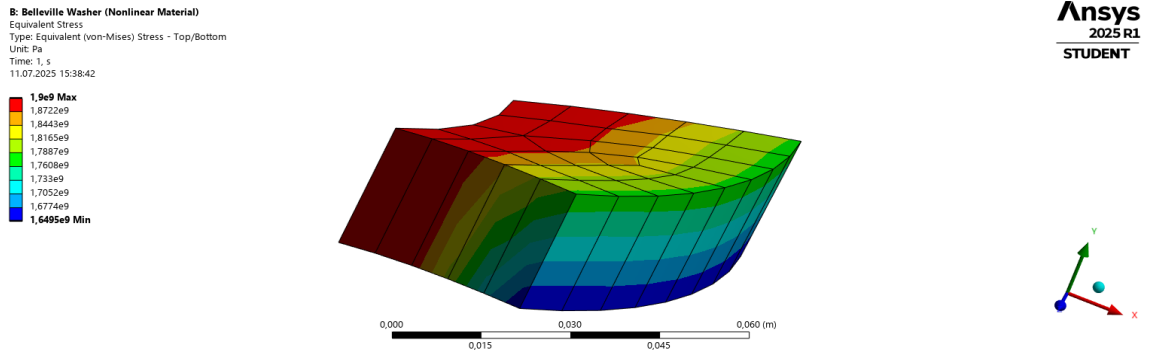
1,9e9 Max  
1,8722e9  
1,8443e9  
1,8165e9  
1,7887e9  
1,7608e9  
1,733e9  
1,7052e9  
1,6774e9  
1,6495e9 Min



Ansys  
2025 R1  
STUDENT



Şekil 3. 7. Lineer von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$  mm)



**Şekil 3. 8.** Non-linear von Mises gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$  mm)

Şekil 3.7 ve 3.8’de görülen disk yay, standart katalog değerlerinin dışında üretici firmalarda özel olarak üretilmiş bir yaydır. Dış çap  $D_e = 600$  mm, iç çap  $D_i = 282$  mm, et kalınlığı  $t = 24$  mm, nominal strok  $s_{0,75} = 16,5$  mm ölçülere sahiptir. Bu ölçüler diskin kalın disk yay sınıfına girdiğini ve klasik ince yay kabullerinin (örneğin DIN EN 16983) burada geçerli olamayacağını göstermektedir.

Lineer analizde von-mises gerilme dağılımı maksimum gerilme 1900 MPa (yayın iç kısımlarında), minimum gerilme: 1649,5 MPa (yayın dış alt yüzeyinde) elde edilmiştir. Bu dağılım, konik disk yayların karakteristik gerilme profili ile uyumludur. Yük aktarımı, geometrik koniklik ve temas koşulları nedeniyle gerilme yığılmaları genellikle iç kenarda yoğunlaşmakta, dış kenarda ise daha düşük seviyelerde seyretmektedir. Yayın geniş et kalınlığı ve büyük çapı, gerilmenin iç bölgelere odaklanmasına katkı sağlamıştır.

Nonlinear elastik analizde elde edilen maksimum von Mises gerilmesi 1980 MPa (yayın iç kısımlarında), minimum gerilme 1933 MPa (yayın dış yüzeyinde) elde edilmiştir.

Lineer analiz sonuçları, sistemin küçük deplasman varsayımı altında nasıl davrandığını göstermiş ve konik geometriye bağlı olarak iç kenarda gerilme yığılması, dış kenarda ise gerilme seviyesinin görece daha düşük kaldığını ortaya koymuştur. Elde edilen maksimum von Mises gerilmesi (1900 MPa) yay malzemesinin elastik sınırına yakın değerlerde seyrettiği için bu yaklaşım, ilk tasarım değerlendirmeleri için yeterlidir.

Nonlinear analiz sonuçları ise geometrik ve malzeme nonlinearliklerinin devreye girmesiyle özellikle yüksek strok seviyelerinde ( $s_{0,75} = 16,5$  mm) lineer modele kıyasla gerilmenin %4-5 civarında arttığını göstermiştir. Maksimum von Mises gerilmesinin 1980 MPa’ya ulaşması, kalın disk yaylarda lineer modellerin yetersiz kalabileceğini; yüksek deplasmanlar, temas alanlarının değişimi ve yer değiştirme kısıtlarının yük aktarım yolunu yeniden şekillendirdiğini kanıtlamaktadır.

Lineer ve nonlinear analizler birlikte değerlendirildiğinde; konik disk yaylarda temas ve şekil değişimi kaynaklı rijitlik değişimi, yükleme ve boşaltma sırasında ortaya çıkan histeresis davranışı gibi etkiler ancak nonlinear analizlerle doğru şekilde öngörülebilir.

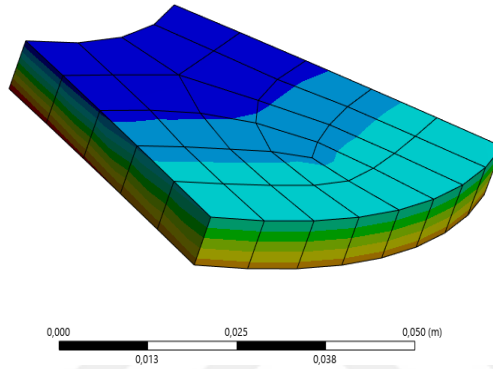
### 3.3.4.2. Normal Gerilme

Normal gerilme, bir yüzeye dik yönde etki eden çekme veya basma gerilmesidir. ANSYS'te X, Y ve Z eksenleri doğrultusundaki normal gerilmeler olarak incelenir ve malzemenin dayanım analizinde temel bir parametredir. Bu çalışmada Y eksenine etki eden yükün meydana getirdiği normal gerilme incelenecektir.

C serisi  $D_e=225$  mm dış çapa sahip yaya ait lineer (Şekil 3.9) ve non-lineer (Şekil 3.10) normal gerilme görüntüleri ve zamana bağlı gerilim değişimleri aşağıda gösterilmektedir.

A: Belleville Washer (Linear Material)  
Normal Stress  
Type: Normal Stress(Y Axis) - Top/Bottom  
Unit: Pa  
Cylindrical Coordinate System  
Time: 1, s  
11.07.2025 14:23:04

1,2285e9 Max  
9,4539e8  
6,6228e8  
3,7918e8  
9,6067e7  
-1,8704e8  
-4,7015e8  
-7,5326e8  
-1,0364e9  
-1,3195e9 Min

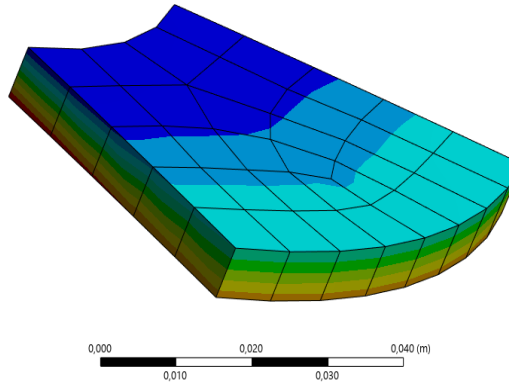


Ansyes  
2025 R1  
STUDENT

Şekil 3. 9. Linear normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$  mm)

B: Belleville Washer (Nonlinear Material)  
Normal Stress  
Type: Normal Stress(Y Axis) - Top/Bottom  
Unit: Pa  
Cylindrical Coordinate System  
Time: 1, s  
11.07.2025 14:27:45

1,2285e9 Max  
9,4539e8  
6,6228e8  
3,7918e8  
9,6067e7  
-1,8704e8  
-4,7015e8  
-7,5326e8  
-1,0364e9  
-1,3195e9 Min



Ansyes  
2025 R1  
STUDENT

Şekil 3. 10. Non-lineer normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=225$  mm)

Şekil 3.8 ve 3.9'da görülen disk yay  $D_e=225$  mm dış çaplı,  $D_i=112$  mm iç çaplı,  $t=6,5$  mm et kalınlıklı ve  $s_{0.75}=5,325$  mm strok değerine sahip, C serisi 3. grup disk yay ölçülerine Ansys yazılımında analiz edilmiştir.

Lineer analizde normal gerilme dağılımı; yayın alt yüzeyinde oluşan maksimum çekme gerilmesi 1228,5 MPa, yayın iç üst yüzeyinde oluşan maksimum basma gerilmesi -1319,5 MPa elde edilmiştir.

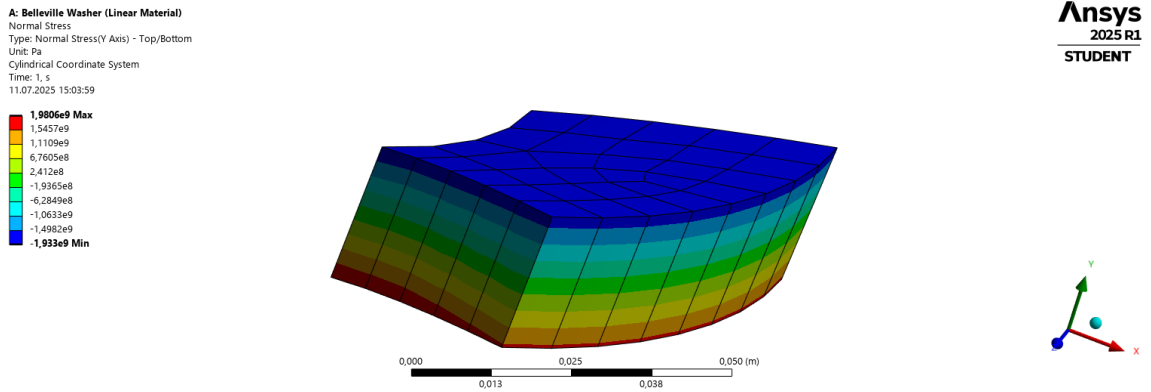


Bu değerler, konik disk yayın eksenel yük taşıma mekanizmasına uygun bir gerilme profilini işaret eder. Konik disk yaylar yük taşıma sırasında bükülme + eksenel basınç bileşenleriyle çalışır. Bu nedenle yayın alt yüzeyi genelde çekme (pozitif), üst yüzeyi ise basma (negatif) gerilmesine maruz kalır. Katalog maksimum gerilme değeri: 1140 MPa (DIN EN 16983 B serisi referansı).

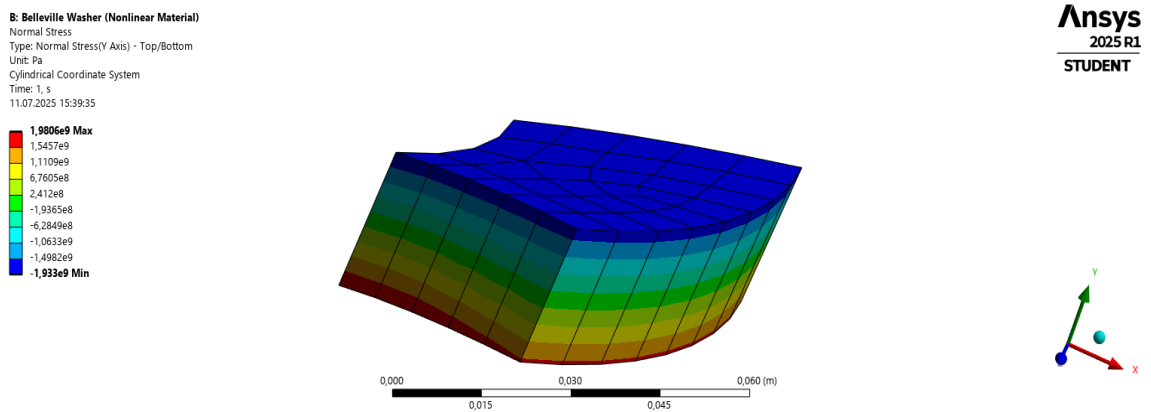
Nonlinear analizde normal gerilme dağılımı maksimum 1228,5 MPa , minimum gerilme: -1319,5MPa olarak tespit edilmiştir.

Değerlerin linear analizle birebir örtüşmesi, %75 deformasyon seviyesinde malzemenin normal gerilme bileşeni açısından henüz belirgin bir plastikleşme göstermediğini, elastik sınırlar içinde kaldığını düşündürmektedir. Ancak Von Mises gerilmesi ile değerlendirildiğinde, bazı lokal bölgelerde akma sınırına yaklaşıldığı görülmüştür.

$D_e=600$  mm dış çapa sahip standart dışı disk yaya ait linear (Şekil 3.11) ve non-linear (Şekil 3.12) normal gerilme görüntüleri ve zamana bağlı gerilim değişimleri aşağıda gösterilmektedir.



**Şekil 3. 11.** Linear normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$  mm)



**Şekil 3. 12.** Non-linear normal gerilme dağılımı ve zamana bağlı değişimi ( $D_e=600$  mm)

Şekil 3.11 ve 3.12’de görülen disk yay, standart DIN EN 16983 geometrisinden farklı olan özel üretim yaydır. Dış çap  $D_e=600$  mm, iç çap  $D_i=282$  mm, et kalınlığı  $t=24$

mm, nominal strok  $s_{0,75}=16,5$  mm ölçülerine sahiptir. Bu oranlar, diskin "kalın yay" kategorisinde olduğunu ve klasik analitik çözümlerin (örn. Almen–Laszlo denklemleri) yetersiz kalacağını ortaya koyar.

Model için yapılan lineer analizde çekme yönlü maksimum normal gerilme 1980,6 MPa (diskin alt yüzeyinde); basma yönlü maksimum normal gerilme -1933 MPa (diskin iç üst yüzeyinde) elde edilmiştir.

Bu sonuçlar, konik disk yayın temel yük taşıma mekanizmasına uygun bir gerilme profilini ortaya koymaktadır. Disk yay, yükleme sırasında konik şekli nedeniyle hem eğilme hem de eksenel basma/çekme bileşenleri taşır. Bu nedenle, alt yüzeyde çekme gerilmesi oluşurken, üst yüzeyde basma gerilmesi baskın hale gelir.

Model için yapılan nonlineer analizde ise maksimum gerilme (çekme): 1980 MPa (diskin dış alt yüzeyinde), maksimum gerilme (basma): -1933 MPa (diskin iç üst yüzeyinde) bulunmuştur.

Değerlerin lineer analizle birebir örtüşmesi, yüksek deformasyon seviyesine rağmen normal gerilme bileşeninde belirgin bir plastik akmanın henüz oluşmadığını göstermektedir. Ancak von Mises gerilmesi de incelenerek bileşik gerilme durumu dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde, sadece normal gerilmeye bakmak, lokal akma ya da yorulma riski hafife alınabilir.

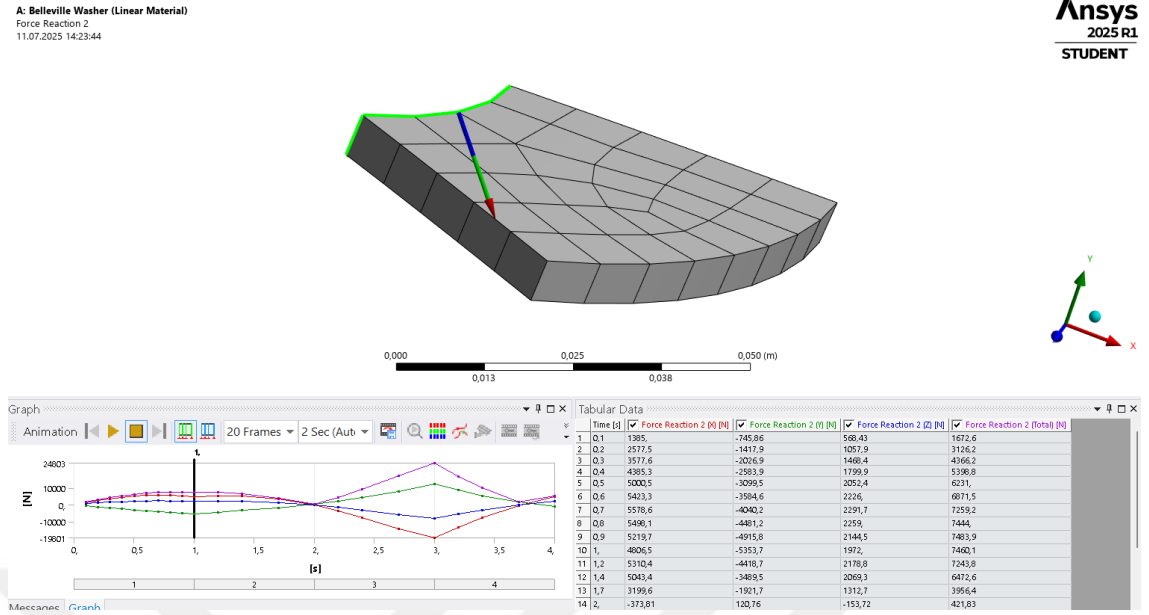
### 3.3.4.3. Yükleme Sınırları

Yükleme sınırları  $F_{0,75}$  ifadesi ile ele alınmaktadır. Yapıya uygulanan kuvvetin, yüksekliğin %75'i oranında olduğunu belirtmektedir. Buradaki referans kuvvet, genellikle sistemin maksimum taşıma kapasitesi, akma sınırına karşılık gelen kuvvet ya da literatürde tanımlı karakteristik bir kuvvet olarak alınır. Dolayısıyla  $F_{0,75}$ , referans kuvvetin 0,75 katı büyüklüğünde bir yükleme durumunu temsil etmektedir. Bu tür oransal kuvvet tanımlamaları, parametrik çalışmalar, lineer olmayan davranış analizleri ve güvenlik katsayısı değerlendirmeleri kapsamında yaygın olarak kullanılmaktadır.

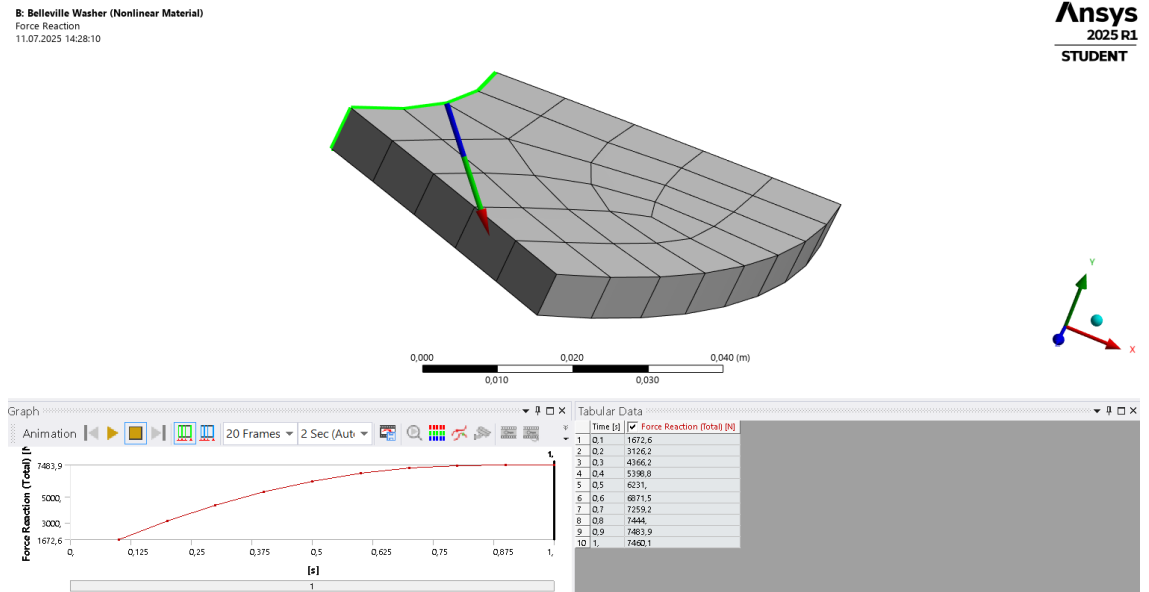
Bu çalışmada, analitik yöntemler ile lineer ve non-lineer nümerik hesaplamalar sonucunda elde edilen  $F_{0,75}$  yük düzeyleri dikkate alınarak, sistemin güvenli yükleme sınırları karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

C serisi  $D_e=225$  mm dış çapa sahip yaya ait yükleme bölgesi ve 1/8 kesitindeki disk yayın lineer analizde  $F_{0,75}$  kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri Şekil 3.13'te gösterilmektedir.

Ayrıca bu çaptaki yay ait nonlineer analizde  $F_{0,75}$  kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri Şekil 3.14'te görülmektedir.



**Şekil 3. 13.** 1/8 kesitindeki disk yayın yükleme bölgesi ve lineer  $F_{0,75}$  kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri ( $D_e=225$  mm)



**Şekil 3. 14.** Nonlinear  $F_{0,75}$  kuvvet reaksiyonunun zamana bağlı değişimleri ( $D_e=225$  mm)

Analizler sonucunda lineer analizde 7483,9 N ve Nonlinear analizde 7483,9 N bulunmuştur. Lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının tamamen aynı çıkması, yay deformasyon seviyesinde ( $s_{0,75}$ ) sistemin hâlâ tam elastik davranış gösterdiğine veya plastikleşmenin tetiklenmediğine işaret eder.

#### 4. BULGULAR

Çalışmada DIN EN 16983 standardına ait A, B ve C serisi disk yaylar ile Mubea firmasına ait özel üretim disk yaylar olmak üzere toplam 99 adet yay, Ansys yazılımında hem lineer hem de nonlinear sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Her bir yay için DIN standardına göre tanımlı  $F_{0,75}$  kuvveti, von Mises gerilme ve normal gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Analizler, her yay için  $s_{0,75}$  strok değeri esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Gerilme ( $\sigma_{II}$ ) Değerlerinin Karşılaştırılması

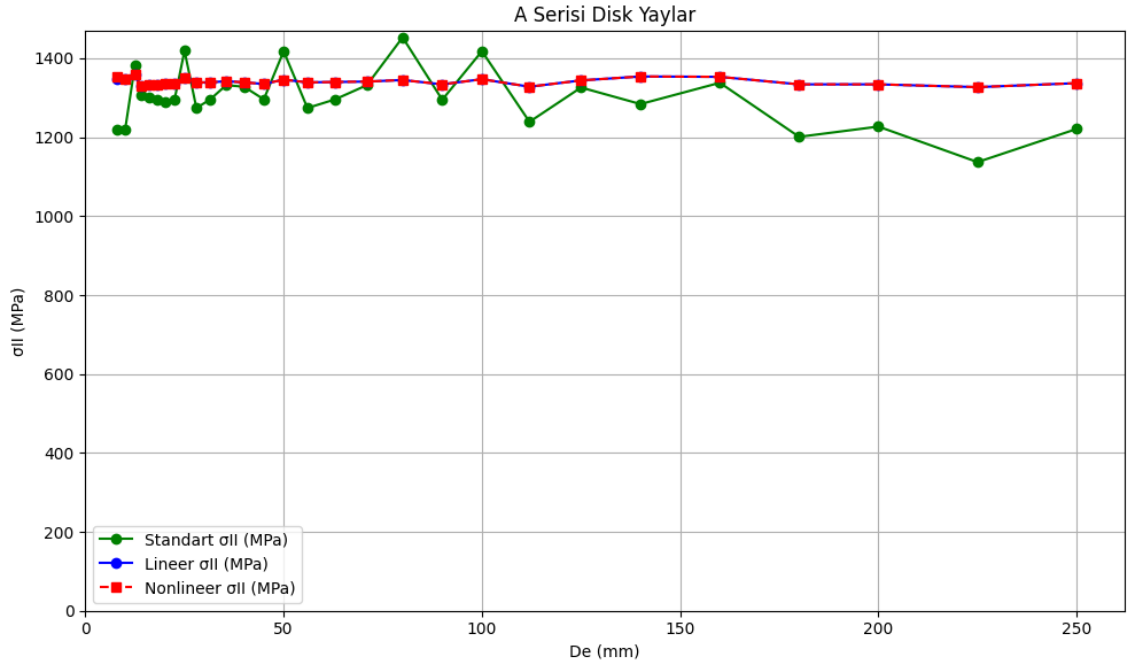
Yaylar için elde edilen  $\sigma_{II}$  gerilme değerleri Çizelge 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te özetlenmiştir. Ayrıca tüm yaylar için Şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te grafiksel hale getirilmiştir. Bu değerler; lineer analiz, nonlinear analiz ve katalog verileri olarak sınıflandırılmıştır.

**Çizelge 4. 1.** A Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum  $\sigma_{II}$  değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri ile karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonl. $\sigma_{II}$ (MPa) | Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonlin. $\sigma_{II}$ (MPa) |
|------|---------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|------|---------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1    | 8       | 1218                       | 1347                     | 1352                      | 2    | 56      | 1274                       | 1339                     | 1339                        |
| 1    | 10      | 1218                       | 1348                     | 1348                      | 2    | 63      | 1296                       | 1340                     | 1340                        |
| 1    | 12,5    | 1382                       | 1358                     | 1358                      | 2    | 71      | 1332                       | 1341                     | 1341                        |
| 1    | 14      | 1308                       | 1330                     | 1330                      | 2    | 80      | 1453                       | 1345                     | 1345                        |
| 1    | 16      | 1301                       | 1332                     | 1332                      | 2    | 90      | 1295                       | 1334                     | 1334                        |
| 1    | 18      | 1295                       | 1334                     | 1334                      | 2    | 100     | 1418                       | 1347                     | 1347                        |
| 1    | 20      | 1290                       | 1336                     | 1336                      | 2    | 112     | 1239                       | 1328                     | 1328                        |
| 2    | 22,5    | 1296                       | 1335                     | 1335                      | 3    | 125     | 1326                       | 1344                     | 1344                        |
| 2    | 25      | 1419                       | 1349                     | 1349                      | 3    | 140     | 1284                       | 1354                     | 1354                        |
| 2    | 28      | 1274                       | 1339                     | 1339                      | 3    | 160     | 1338                       | 1353                     | 1353                        |
| 2    | 31,5    | 1296                       | 1339                     | 1339                      | 3    | 180     | 1201                       | 1334                     | 1334                        |
| 2    | 35,5    | 1332                       | 1342                     | 1342                      | 3    | 200     | 1227                       | 1334                     | 1334                        |
| 2    | 40      | 1328                       | 1339                     | 1339                      | 3    | 225     | 1137                       | 1327                     | 1327                        |
| 2    | 45      | 1296                       | 1335                     | 1335                      | 3    | 250     | 1221                       | 1337                     | 1337                        |
| 2    | 50      | 1418                       | 1346                     | 1346                      |      |         |                            |                          |                             |

Şekil 4.1'deki A serisi yaylara ait grafik incelendiğinde, A Serisi disk yaylara ait çeşitli dış çap (De) değerleri için yapılan lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizleri

sonucunda elde edilen maksimum ikinci asal gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri, DIN EN 16983 standardında yer alan katalog verileriyle karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu karşılaştırma sonucunda, lineer ve nonlinear analizlerin büyük ölçüde benzer sonuçlar verdiği, hatta bazı çaplarda neredeyse aynı değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu durum, modellemede kullanılan temas tanımları, malzeme özellikleri ve yükleme koşullarının doğruluğunu ve analizlerdeki genel kararlılığı desteklemektedir. Özellikle nonlinear hesaplamalarla elde edilen sonuçların, lineer yaklaşımlarla elde edilenlerle örtüşmesi, plastikleşmenin sınırlı kaldığını ve yayların çoğunlukla elastik sınırlar içinde davrandığını göstermektedir.



**Şekil 4. 1.** A serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Standart katalog değerleriyle yapılan karşılaştırmalarda ise dikkat çekici farklılıklar tespit edilmiştir. Analizlerden elde edilen  $\sigma_{II}$  değerleri, birçok çapta standart değerlerin üzerinde çıkmıştır. Bu farklar çoğunlukla %5 ila %10 aralığında seyretmektedir. Özellikle küçük çaplı yaylarda (örneğin 8 mm ve 10 mm), analiz değerleri ile standart değerler arasındaki fark daha belirgin hale gelirken, büyük çaplı yaylarda bu fark daha sınırlı kalmaktadır. Bununla birlikte, bazı yay çaplarında (örneğin 12,5 mm, 25 mm, 50 mm, 80 mm ve 100 mm) ise standart değerler, analizlerden elde edilen sonuçların üzerinde yer almakta, bu da standardın bazı durumlarda muhafazakâr tasarım yaklaşımıyla daha yüksek sınır değerler içerdiğini düşündürmektedir. Farklı çaplarda gözlemlenen bu sapmalar, katalog değerlerinin güvenlik payları içerecek şekilde yuvarlanmış olabileceğini ya da üretim ve malzeme varyasyonlarının etkisini yansıtır olabileceğini göstermektedir.

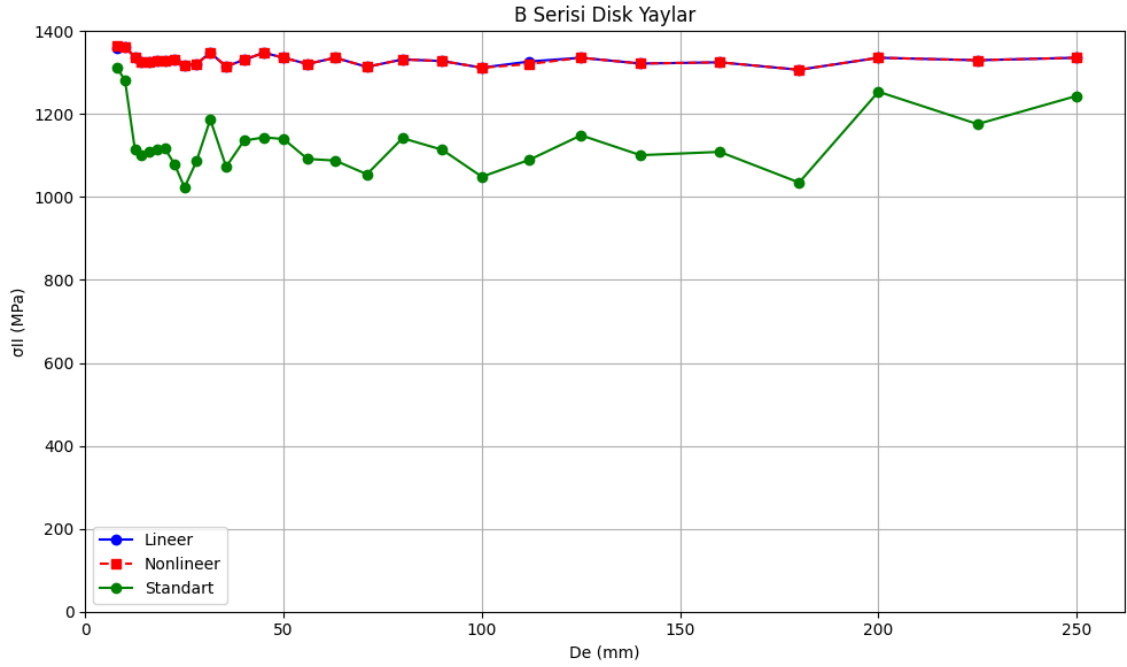
Genel olarak incelendiğinde, elde edilen analiz sonuçları ile standart değerler arasında gözlemlenen tutarlılık, sonlu elemanlar yönteminin disk yaylardaki ikinci asal gerilme tahminleri açısından güvenilir ve geçerli bir yöntem olduğunu ortaya

koymaktadır. Ancak analiz sonuçlarının genellikle standart değerlerin üzerinde seyretmesi, tasarım aşamasında yalnızca katalog değerlerine dayalı bir değerlendirme yapılmasının yeterli olmayabileceğini göstermektedir. Özellikle sismik enerji sönmüleme gibi yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda, sayısal analizlerle desteklenmiş mühendislik kararlarının daha sağlıklı sonuçlar vereceği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, standart değerlerin referans olarak kullanılması faydalı olmakla birlikte, özel uygulamalar için detaylı mekanik analizlerin yapılması gerektiği açıktır.

**Çizelge 4. 2.** B Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum  $\sigma_{II}$  değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri ile karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonl. $\sigma_{II}$ (MPa) | Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonlin. $\sigma_{II}$ (MPa) |
|------|---------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|------|---------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1    | 8       | 1312                       | 1360                     | 1366                      | 2    | 56      | 1092                       | 1321                     | 1321                        |
| 1    | 10      | 1281                       | 1362                     | 1362                      | 2    | 63      | 1088                       | 1336                     | 1336                        |
| 1    | 12,5    | 1114                       | 1337                     | 1337                      | 2    | 71      | 1055                       | 1314                     | 1314                        |
| 1    | 14      | 1101                       | 1326                     | 1326                      | 2    | 80      | 1142                       | 1332                     | 1332                        |
| 1    | 16      | 1109                       | 1325                     | 1325                      | 2    | 90      | 1114                       | 1328                     | 1328                        |
| 1    | 18      | 1114                       | 1328                     | 1328                      | 2    | 100     | 1049                       | 1312                     | 1312                        |
| 1    | 20      | 1118                       | 1330                     | 1330                      | 2    | 112     | 1090                       | 1327                     | 1321                        |
| 1    | 22,5    | 1079                       | 1331                     | 1331                      | 2    | 125     | 1149                       | 1336                     | 1336                        |
| 1    | 25      | 1023                       | 1318                     | 1318                      | 2    | 140     | 1101                       | 1322                     | 1322                        |
| 1    | 28      | 1086                       | 1321                     | 1321                      | 2    | 160     | 1109                       | 1325                     | 1325                        |
| 2    | 31,5    | 1187                       | 1348                     | 1348                      | 2    | 180     | 1035                       | 1307                     | 1307                        |
| 2    | 35,5    | 1073                       | 1315                     | 1315                      | 3    | 200     | 1254                       | 1336                     | 1336                        |
| 2    | 40      | 1136                       | 1331                     | 1331                      | 3    | 225     | 1176                       | 1330                     | 1330                        |
| 2    | 45      | 1144                       | 1348                     | 1348                      | 3    | 250     | 1244                       | 1336                     | 1336                        |
| 2    | 50      | 1140                       | 1336                     | 1336                      |      |         |                            |                          |                             |

Şekil 4.2'deki B serisi yaylara ait grafik incelendiğinde; B Serisi disk yaylara yönelik olarak gerçekleştirilen lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen maksimum ikinci asal gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri, DIN EN 16983 standardında yer alan karşılık gelen değerlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, analizlerden elde edilen  $\sigma_{II}$  değerlerinin çoğu durumda standart katalog değerlerinin üzerinde seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu farklar, özellikle küçük ve orta çaplı yaylarda (örneğin De = 8 mm ile 45 mm arası) daha belirgin hale gelirken, daha büyük çaplı yaylarda fark sabitlenme eğilimi göstermektedir.



**Şekil 4. 2.** B serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Lineer ve nonlinear analizlerin sonuçları birbirine oldukça yakın olup, çoğu durumda aynı değeri vermekte veya fark yalnızca birkaç MPa düzeyinde kalmaktadır. Bu benzerlik, yayların yükleme altında çoğunlukla elastik sınırlar içerisinde kaldığını, plastikleşmenin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu ve kullanılan malzeme modeli ile temas koşullarının kararlı bir analiz ortamı sunduğunu göstermektedir. Özellikle 8 mm ile 250 mm dış çap aralığında yapılan analizlerde bu eğilim açıkça gözlemlenmiştir.

Standart değerlerle kıyaslandığında, bazı yaylarda (örneğin  $De = 12,5$  mm,  $22,5$  mm,  $25$  mm gibi)  $\sigma_{II}$  farkı %15'in üzerine çıkmakta, bu da katalog verilerinin belirli güvenlik katsayılarıyla muhafazakâr biçimde belirlendiğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, az sayıda yayda (örneğin  $De = 200$  mm ve  $250$  mm) standart değerler analiz sonuçlarına göre daha yüksek çıkmakta, bu durum da üretim varyasyonları, malzeme kalitesi farklılıkları ya da yayların test koşullarındaki belirsizliklerden kaynaklanıyor olabilir. Her iki durumda da yalnızca katalog verilerine dayanarak yapılan gerilme değerlendirmelerinin, güvenli ancak eksik olabileceği anlaşılmaktadır.

Genel eğilim değerlendirildiğinde, sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen  $\sigma_{II}$  değerlerinin, B Serisi yaylar için güvenilir ve öngörülebilir sonuçlar verdiği söylenebilir. Bununla birlikte, standart değerlerle arasındaki sapmalar göz önüne alındığında, özellikle sismik izolasyon veya enerji sönmüleme gibi hassas uygulamalarda, hesaplamaların detaylı sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır. Böylece hem yapı güvenliği hem de yayların optimum performans düzeyi sağlanmış olur.

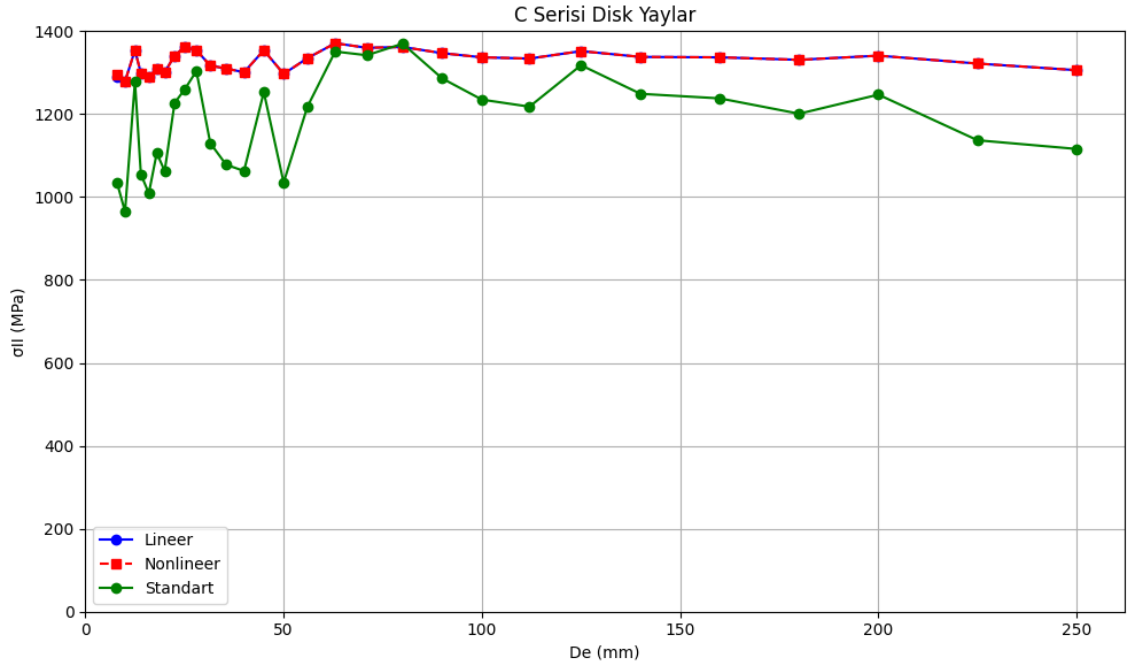
**Çizelge 4. 3.** C Serisi yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum  $\sigma_{II}$  değerlerinin DIN EN 16983 standart değerleri karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonl. $\sigma_{II}$ (MPa) | Grup | De (mm) | Stand. $\sigma_{II}$ (MPa) | Lin. $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonlin. $\sigma_{II}$ (MPa) |
|------|---------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|------|---------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1    | 8       | 1034                       | 1290                     | 1295                      | 2    | 56      | 1218                       | 1335                     | 1335                        |
| 1    | 10      | 965                        | 1279                     | 1279                      | 2    | 63      | 1351                       | 1371                     | 1371                        |
| 1    | 12,5    | 1278                       | 1354                     | 1354                      | 2    | 71      | 1342                       | 1360                     | 1360                        |
| 1    | 14      | 1055                       | 1299                     | 1299                      | 2    | 80      | 1370                       | 1362                     | 1362                        |
| 1    | 16      | 1009                       | 1290                     | 1290                      | 2    | 90      | 1286                       | 1347                     | 1347                        |
| 1    | 18      | 1106                       | 1309                     | 1309                      | 2    | 100     | 1235                       | 1337                     | 1337                        |
| 1    | 20      | 1063                       | 1301                     | 1301                      | 2    | 112     | 1218                       | 1334                     | 1334                        |
| 1    | 22,5    | 1227                       | 1341                     | 1341                      | 2    | 125     | 1318                       | 1352                     | 1352                        |
| 1    | 25      | 1259                       | 1362                     | 1362                      | 2    | 140     | 1249                       | 1338                     | 1338                        |
| 1    | 28      | 1304                       | 1354                     | 1354                      | 2    | 160     | 1238                       | 1337                     | 1337                        |
| 1    | 31,5    | 1130                       | 1317                     | 1317                      | 2    | 180     | 1201                       | 1331                     | 1331                        |
| 1    | 35,5    | 1078                       | 1310                     | 1310                      | 2    | 200     | 1247                       | 1341                     | 1341                        |
| 1    | 40      | 1063                       | 1301                     | 1301                      | 3    | 225     | 1137                       | 1322                     | 1322                        |
| 2    | 45      | 1253                       | 1354                     | 1354                      | 3    | 250     | 1116                       | 1306                     | 1306                        |
| 2    | 50      | 1035                       | 1297                     | 1297                      |      |         |                            |                          |                             |

Şekil 4.3'teki C serisi yaylara ait grafik incelendiğinde; C Serisi disk yaylar üzerinde gerçekleştirilen lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizleri sonucunda elde edilen maksimum ikinci asal gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri, DIN EN 16983 standardında belirtilen karşılık gelen değerlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının birbirine son derece yakın olduğu, çoğu durumda aynı veya yalnızca birkaç MPa düzeyinde farkla sonuçlandığı görülmüştür. Bu durum, sonlu eleman modelinin tutarlılığını, temas koşullarının doğru tanımlandığını ve yayların yükleme altındaki davranışının büyük ölçüde elastik sınırlar içinde kaldığını göstermektedir.

Standart katalog değerleriyle yapılan karşılaştırmalar ise dikkat çekici sapmalar içermektedir. Analizden elde edilen  $\sigma_{II}$  değerleri, genel olarak DIN EN 16983 standart değerlerinden belirgin şekilde yüksektir. Özellikle küçük çaplı yaylarda (örneğin De = 8 mm, 10 mm, 14 mm gibi), analiz sonuçlarının standart değerlere göre %20'nin üzerinde farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, standart değerlerin muhafazakâr bir yaklaşım içerdiğini ya da kullanılan üretim yöntemleri ve malzeme özelliklerinden kaynaklı olarak farklı yükleme sınırlarının benimsendiğini düşündürmektedir.





**Şekil 4. 3.** C serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Bununla birlikte, bazı yay çaplarında (örneğin  $De = 12,5$  mm, 25 mm, 63 mm, 80 mm) standart katalog değerlerinin, lineer ve nonlinear analiz sonuçlarına çok yakın ya da eşit olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür durumlar, yayların geometrik oranları ve malzeme kalitesi açısından katalogdaki ideal varsayımlarla uyumlu olduğunu gösterebilir. Ancak çoğu çapta, standart değerlerin altında kalan analiz sonuçları, tek başına katalog verilerine dayalı bir tasarımın yeterli olmayabileceğini ortaya koymaktadır.

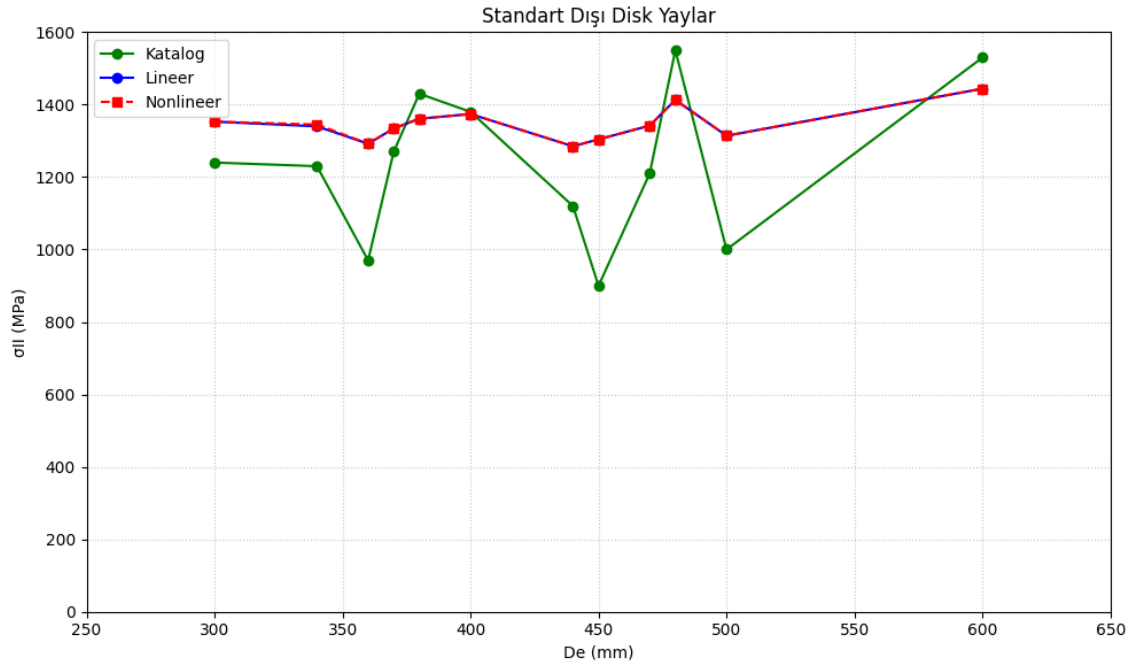
Sonuç olarak, C Serisi yaylar için yapılan sonlu elemanlar analizleri, özellikle elastik bölgede oldukça güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar vermektedir. Lineer ve nonlinear modelleme yöntemlerinin yakın sonuçlar üretmesi, yapısal modelleme açısından önemli bir doğrulama sağlamaktadır. Ancak standart değerlerle arasındaki sistematik farklar, gerilme değerlendirmelerinde yalnızca DIN EN 16983 verilerine bağlı kalmanın yanıltıcı olabileceğini, bu tür sistemlerin mühendislik tasarımında mutlaka sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle sismik enerji sönmülme gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda, bu tür detaylı analizlerin yapılması yapısal güvenlik ve sistem verimliliği açısından kritik önem taşımaktadır.

Şekil 4.4'teki standart dışı yaylara ait grafik incelendiğinde; Standart dışı olarak sınıflandırılan ve genellikle büyük çaplı disk yaylardan oluşan bu gruba ait lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen maksimum ikinci asal gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri, üretici kataloglarında belirtilen karşılık gelen değerlerle karşılaştırılmıştır. Yapılan değerlendirmede, her iki analiz yaklaşımının da birbiriyle büyük ölçüde uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Nonlinear analizlerin lineer sonuçlarla hemen hemen aynı seviyelerde çıktığı, yalnızca birkaç MPa düzeyinde sapma gösterdiği anlaşılmıştır. Bu

durum, büyük çaplı disk yayların geometrik stabilitesinin yüksek olduğunu ve analiz modelinin doğruluğunu koruduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4. 4.** Standart dışı yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum  $\sigma_{II}$  değerlerinin katalog değerleri ile karşılaştırılması

| De (mm) | Katalog $\sigma_{II}$ (MPa) | Lineer $\sigma_{II}$ (MPa) | Nonlinear $\sigma_{II}$ (MPa) |
|---------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 300     | 1240                        | 1353                       | 1353                          |
| 340     | 1230                        | 1340                       | 1345                          |
| 360     | 970                         | 1292                       | 1292                          |
| 370     | 1270                        | 1334                       | 1334                          |
| 380     | 1430                        | 1361                       | 1361                          |
| 400     | 1380                        | 1374                       | 1374                          |
| 440     | 1120                        | 1285                       | 1285                          |
| 450     | 900                         | 1304                       | 1304                          |
| 470     | 1210                        | 1342                       | 1342                          |
| 480     | 1550                        | 1413                       | 1413                          |
| 500     | 1000                        | 1314                       | 1314                          |
| 600     | 1530                        | 1444                       | 1444                          |



**Şekil 4. 4.** Üretici firmanın standart dışı yaylarına ait katalog verileri, lineer ve non-lineer gerilme değerlerinin karşılaştırılması

Katalog değerleri ile karşılaştırıldığında, analiz sonuçlarının çoğu durumda daha yüksek gerilme değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Bu fark, bazı yay çaplarında (örneğin  $D_e = 450$  mm, 500 mm, 360 mm) oldukça belirgin hale gelmekte, analiz değerlerinin katalog verilerinin %30 üzerinde seyrettiği durumlar oluşmaktadır. Bu farklılıklar, üretici kataloglarında yer alan  $\sigma_{II}$  değerlerinin önemli bir güvenlik katsayısı içerdiğini veya test ortamlarındaki sınırlamalar nedeniyle nominal değerlere göre belirlenmiş olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle  $D_e = 480$  mm ve 600 mm gibi çaplarda katalogda bildirilen oldukça yüksek gerilme değerlerine karşın, analiz sonuçlarının bu değerlerin altında kaldığı da dikkat çekicidir. Bu durum, standart dışı yayların katalog verilerinin her zaman aşırı muhafazakâr olmadığını, bazen test koşullarının etkisiyle gerçek davranışa daha yakın olabileceğini de göstermektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, standart dışı büyük çaplı disk yaylar için yapılan sonlu elemanlar analizleri hem lineer hem de nonlinear yaklaşımlarla gerilme düzeylerinin güvenilir biçimde tahmin edilebildiğini ortaya koymuştur. Ancak katalog verileriyle ortaya çıkan farklılıklar, bu tür yayların tasarım ve uygulama süreçlerinde özel dikkat gerektirdiğini, doğrulama amaçlı olarak mutlaka sayısal analizlerle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle bu tür yaylar, yüksek yük taşıma kapasitesine ve enerji sönmüleme potansiyeline sahip oldukları için, sismik izolasyon ve ağır sanayi uygulamalarında kullanıldığında, gerçek davranışlarının standart dışı özellikleri nedeniyle klasik katalog verileriyle tam olarak temsil edilemeyeceği unutulmamalıdır.

#### 4.2. $F_{0,75}$ Kuvveti Karşılaştırması

Yaylar için elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerleri Çizelge 4.5, 4.6, 4.7, 4.8’de özetlenmiştir. Ayrıca tüm yaylar için grafiksel olarak Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8’de gösterilmiştir. Bu değerler, lineer analiz, nonlinear analiz ve katalog verileri olarak sınıflandırılmıştır.

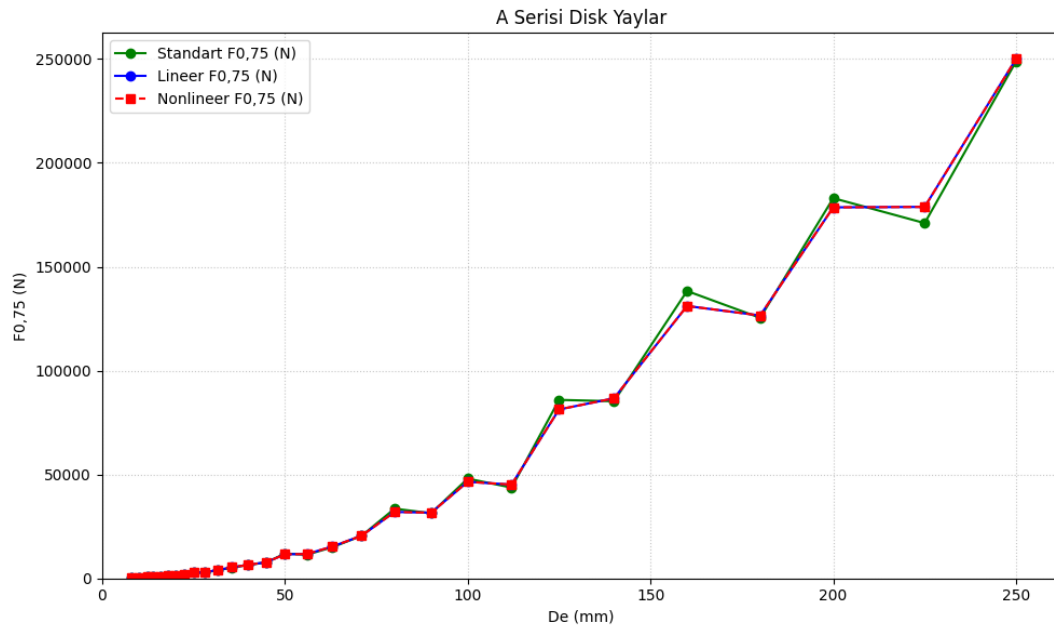
Şekil 4.5’teki A serisi disk yayların  $F_{0,75}$  kuvvet verileri incelendiğinde, standart katalog değerleri ile hem lineer hem de nonlinear analiz sonuçları arasında genel olarak yakın bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Değerler, yay çapının ( $D_e$ ) artmasıyla birlikte düzenli bir artış eğilimi göstermektedir.

Lineer ve nonlinear analizlerdeki  $F_{0,75}$  değerleri hemen hemen örtüşmekte olup, bu durum malzemenin ve geometrinin elastik-plastik davranışının modellenmesinde kullanılan yöntemlerin tutarlılığını desteklemektedir. Özellikle küçük çaplarda ( $D_e < 20$  mm) standart katalog değerlerine kıyasla lineer ve nonlinear kuvvetlerin hafifçe daha yüksek çıkması, modelleme yaklaşımındaki konservatifliğe işaret edebilir. Bu da pratik uygulamalarda güvenliğe yönelik bir marj oluşturabilir.

Örneğin, 8 mm serbest çapındaki yay için katalogdaki kuvvet 108 N iken hem lineer hem de nonlinear analizlerde bu değer 135 N olarak hesaplanmıştır. Bu, katalog değerine göre yaklaşık %25 oranında daha yüksek bir kuvvet anlamına gelir. Aynı şekilde, 16 mm çapta katalog değeri 530 N iken, analizlerde 551 N bulunmuştur; bu fark yaklaşık %4 seviyesindedir.

**Çizelge 4. 5.** A serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | 8xNonli. $F_{0,75}$ (N) | Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | 8xNonli. $F_{0,75}$ (N) |
|------|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1    | 8       | 210                   | 233                   | 233                     | 2    | 56      | 11388                 | 11710                 | 11710                   |
| 1    | 10      | 325                   | 364                   | 364                     | 2    | 63      | 15025                 | 15342                 | 15342                   |
| 1    | 12,5    | 660                   | 661                   | 661                     | 2    | 71      | 20535                 | 20554                 | 20554                   |
| 1    | 14      | 797                   | 818                   | 818                     | 2    | 80      | 33559                 | 31988                 | 31988                   |
| 1    | 16      | 1013                  | 1016                  | 1016                    | 2    | 90      | 31354                 | 31636                 | 31636                   |
| 1    | 18      | 1254                  | 1265                  | 1265                    | 2    | 100     | 48022                 | 46483                 | 46483                   |
| 1    | 20      | 1521                  | 1542                  | 1542                    | 2    | 112     | 43707                 | 45154                 | 45156                   |
| 2    | 22,5    | 1929                  | 1963                  | 1963                    | 3    | 125     | 85926                 | 81330                 | 81330                   |
| 2    | 25      | 2926                  | 2864                  | 2864                    | 3    | 140     | 85251                 | 86678                 | 86678                   |
| 2    | 28      | 2841                  | 2925                  | 2925                    | 3    | 160     | 138331                | 131121                | 131121                  |
| 2    | 31,5    | 3871                  | 4023                  | 4023                    | 3    | 180     | 125417                | 126541                | 126541                  |
| 2    | 35,5    | 5187                  | 5333                  | 5333                    | 3    | 200     | 183020                | 178604                | 178604                  |
| 2    | 40      | 6500                  | 6500                  | 6500                    | 3    | 225     | 171016                | 178817                | 178819                  |
| 2    | 45      | 7716                  | 7852                  | 7852                    | 3    | 250     | 248828                | 250050                | 250050                  |
| 2    | 50      | 11976                 | 11601                 | 11601                   |      |         |                       |                       |                         |



**Şekil 4. 5.** A serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

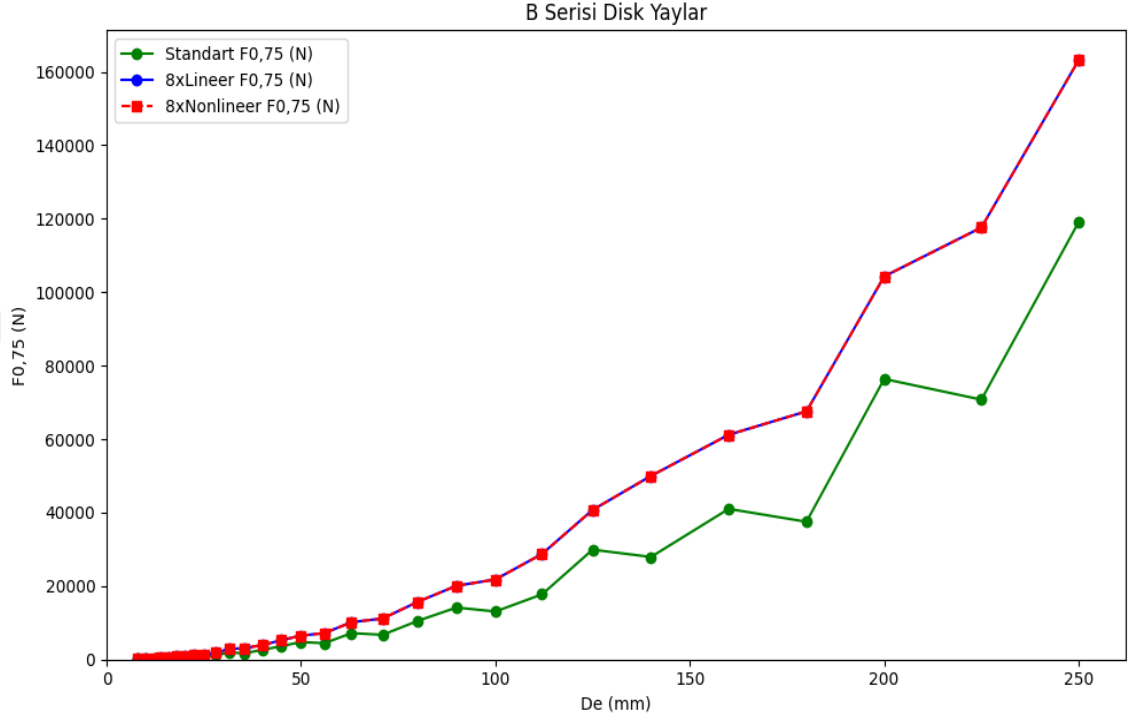
Benzer şekilde, 14 mm çapında katalog değeri 390 N iken analiz sonuçları 406 N civarındadır (%4 artış). 20 mm çapında katalog kuvveti 1050 N iken, analizlerde 1067 N hesaplanmıştır (%1,6 artış). 35 mm çapında katalog kuvveti 2503 N, analizler ise 2554 N'dir (%2 civarı fark). Bu küçük farklılıklar, katalog verilerinin genellikle konservatif tahminler içerdiğini ve sayısal analizlerin malzemenin ve geometrinin elastik-plastik davranışını daha hassas şekilde yansıttığını göstermektedir. Ayrıca, analiz sonuçları arasında lineer ve nonlinear modellerin hemen hemen aynı kuvvetleri vermesi, kullanılan malzeme modeli ve sınır koşullarının güvenilirliğini ve doğruluğunu doğrulamaktadır.

**Çizelge 4. 6.** B serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | Nonl. 8xNonli n. $F_{0,75}$ (N) | Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | 8xNonl. $F_{0,75}$ (N) |
|------|---------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|------|---------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| 1    | 8       | 118                   | 191                   | 191                             | 2    | 56      | 4438                  | 7182                  | 7182                   |
| 1    | 10      | 209                   | 309                   | 309                             | 2    | 63      | 7189                  | 10171                 | 10171                  |
| 1    | 12,5    | 294                   | 409                   | 409                             | 2    | 71      | 6725                  | 11164                 | 11164                  |
| 1    | 14      | 279                   | 500                   | 500                             | 2    | 80      | 10518                 | 15695                 | 15695                  |
| 1    | 16      | 410                   | 612                   | 612                             | 2    | 90      | 14161                 | 20091                 | 20091                  |
| 1    | 18      | 566                   | 804                   | 804                             | 2    | 100     | 13070                 | 21791                 | 21791                  |
| 1    | 20      | 748                   | 1023                  | 1023                            | 2    | 112     | 17752                 | 28756                 | 28725                  |
| 1    | 22,5    | 707                   | 1176                  | 1176                            | 2    | 125     | 29908                 | 40730                 | 40730                  |
| 1    | 25      | 862                   | 1428                  | 1428                            | 2    | 140     | 27920                 | 49979                 | 49979                  |
| 1    | 28      | 1107                  | 1797                  | 1797                            | 2    | 160     | 41008                 | 61191                 | 61191                  |
| 2    | 31,5    | 1913                  | 2868                  | 2868                            | 2    | 180     | 37502                 | 67555                 | 67555                  |
| 2    | 35,5    | 1699                  | 3110                  | 3110                            | 3    | 200     | 76378                 | 104292                | 104292                 |
| 2    | 40      | 2622                  | 3928                  | 3928                            | 3    | 225     | 70749                 | 117615                | 117615                 |
| 2    | 45      | 3646                  | 5275                  | 5275                            | 3    | 250     | 119050                | 163125                | 163125                 |
| 2    | 50      | 4762                  | 6523                  | 6523                            |      |         |                       |                       |                        |

Şekil 4.6'daki B serisi yayların  $F_{0,75}$  kuvvet grafiği incelendiğinde; B serisi disk yaylarda katalog verileri ile analiz sonuçları arasındaki farklar, A serisine göre daha belirgin şekilde artmaktadır. Örneğin, 50 mm çapında katalog kuvveti 4,762 N iken, lineer ve nonlinear analizler 6,523 N olarak hesaplanmıştır; bu yaklaşık % 37'lik bir artış anlamına gelir. Daha büyük çaplarda da benzer artışlar gözlenmiştir; 160 mm çapında katalog kuvveti 41,008 N iken analizlerde 61,191 N bulunmuş, yani yaklaşık %49 daha yüksek kuvvet hesaplanmıştır. Bu durum, B serisi disk yayların katalogda

belirtilen değerlerin üzerinde performans gösterebileceğine işaret etmektedir. Bu farkın nedeni olarak katalog verilerinin üretim toleransları ve güvenlik faktörleri nedeniyle muhafazakâr biçimde belirlenmiş olması ve sonlu eleman analizlerinin gerçek malzeme davranışını daha detaylı modellemesi gösterilebilir. Ayrıca lineer ve nonlinear analizlerin birbirine çok yakın sonuçlar vermesi, modelleme yaklaşımının malzeme özelliklerini ve sınır koşullarını doğru temsil ettiğini kanıtlar niteliktedir.



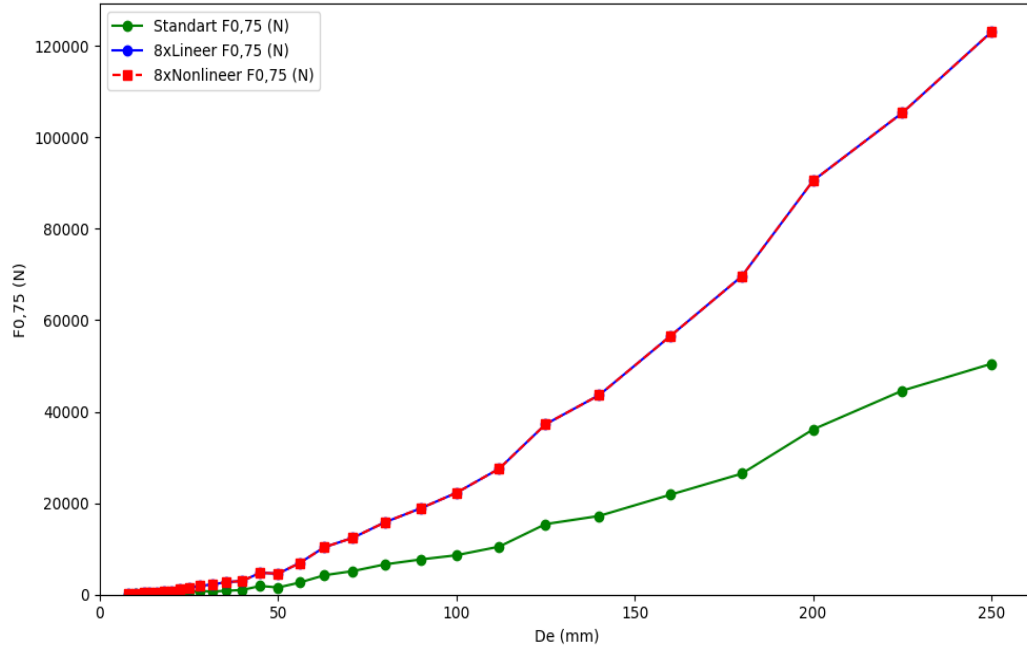
**Şekil 4. 6.** B serisi yaylara ait standart, lineer ve non-linear  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.7'deki C serisi yayların  $F_{0,75}$  kuvvet grafiği incelendiğinde; C serisi yaylarda katalog ile analiz değerleri arasındaki farklar çok daha büyüktür. Örnek olarak, 10 mm çapında katalog kuvveti 58 N iken analiz değeri 185 N olarak hesaplanmış, bu yaklaşık %219'lük ciddi bir artış demektir. 28 mm çapında katalog kuvveti 801 N, analizlerde ise 1,892 N bulunmuştur (%136 artış). 40 mm çapındaki bir yay için katalog kuvveti 1,017 N iken, analizlerde 2,989 N olarak hesaplanmıştır. Bu, katalog değerinin yaklaşık üç katı kuvvet anlamına gelir. Daha yüksek çaplarda da benzer büyük farklar görülmektedir; 50 mm çapında katalog kuvveti 1,550 N iken analizler 4,584 N'a ulaşmıştır (%196 artış). 80 mm çapında katalog kuvveti 6,613 N, analiz sonucu 15,829 N'dur (%139 artış). Daha büyük çaplarda da benzer yüksek farklar vardır; örneğin 140 mm çapında katalog kuvveti 17,195 N, analizde 43,600 N olarak bulunmuştur (%153 artış). 125 mm çapında katalog kuvveti 15,416 N iken, analizlerde 37,247 N bulunmuş, yaklaşık %141'lik bir artış söz konusudur. 250 mm çapında katalog kuvveti 50,466 N iken analiz 123,010 N'a ulaşmış (%144 artış) ve bu serinin katalogdaki değerlerin çok üzerinde kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. 250 mm çapında ise katalogdaki 50,466 N'lik kuvvet analizlerde 123,010 N'a ulaşmıştır; bu da yaklaşık %144 artışa karşılık gelir.

**Çizelge 4. 7.** C serisi yaylar ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin DIN EN 16983 değerleri ile karşılaştırılması

| Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | Nonl. 8xNonlin. $F_{0,75}$ (N) | Grup | De (mm) | Stand. $F_{0,75}$ (N) | 8xLin. $F_{0,75}$ (N) | 8xNonlin. $F_{0,75}$ (N) |
|------|---------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|------|---------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| 1    | 8       | 39                    | 127                   | 127                            | 2    | 56      | 2622                  | 6879                  | 6879                     |
| 1    | 10      | 58                    | 185                   | 185                            | 2    | 63      | 4238                  | 10376                 | 10376                    |
| 1    | 12,5    | 151                   | 378                   | 378                            | 2    | 71      | 5144                  | 12427                 | 12427                    |
| 1    | 14      | 123                   | 359                   | 359                            | 2    | 80      | 6613                  | 15829                 | 15821                    |
| 1    | 16      | 154                   | 451                   | 451                            | 2    | 90      | 7684                  | 18868                 | 18868                    |
| 1    | 18      | 214                   | 626                   | 626                            | 2    | 100     | 8609                  | 22249                 | 22249                    |
| 1    | 20      | 254                   | 747                   | 747                            | 2    | 112     | 10489                 | 27532                 | 27529                    |
| 1    | 22,5    | 426                   | 1153                  | 1153                           | 2    | 125     | 15416                 | 37247                 | 37247                    |
| 1    | 25      | 600                   | 1524                  | 1524                           | 2    | 140     | 17195                 | 43600                 | 43600                    |
| 1    | 28      | 801                   | 1892                  | 1892                           | 2    | 160     | 21843                 | 56539                 | 56539                    |
| 1    | 31,5    | 687                   | 2212                  | 2212                           | 2    | 180     | 26442                 | 69580                 | 69580                    |
| 1    | 35,5    | 832                   | 2723                  | 2723                           | 2    | 200     | 36111                 | 90488                 | 90488                    |
| 1    | 40      | 1017                  | 2989                  | 2989                           | 3    | 225     | 44580                 | 105321                | 105321                   |
| 2    | 45      | 1891                  | 4779                  | 4779                           | 3    | 250     | 50466                 | 123010                | 123010                   |
| 2    | 50      | 1550                  | 4584                  | 4584                           |      |         |                       |                       |                          |

C Serisi Disk Yaylar

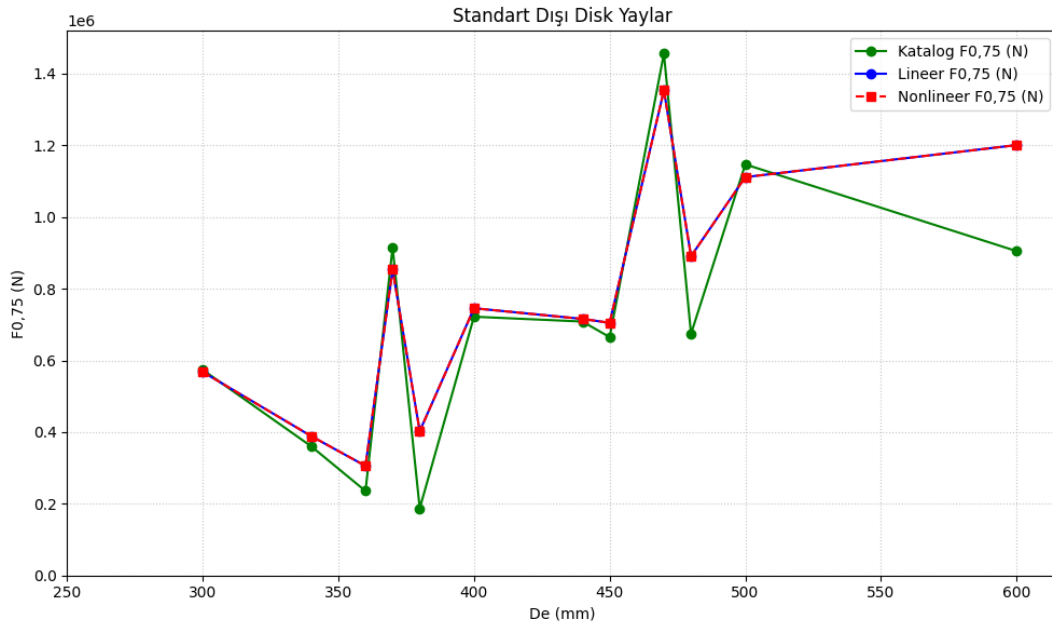


**Şekil 4. 7.** C serisi yaylara ait standart, lineer ve non-lineer  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin karşılaştırılması

C serisinin katalogda belirtilen kuvvetlerin çok üzerinde bir kapasiteye sahip olduğunu ve katalog verilerinin tasarımda önemli bir güvenlik marjı bıraktığını ortaya koymaktadır. Ayrıca küçük çaplarda katalog ile analiz arasındaki farkların nispeten daha büyük olması, küçük geometrilerin malzeme ve modelleme hassasiyetine daha duyarlı olmasından kaynaklanabilir.

**Çizelge 4. 8.** Standart dışı yaylara ait lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen maksimum  $\sigma_{II}$  değerlerinin katalog değerleri ile karşılaştırılması

| De (mm) | Katalog $F_{0,75}$ (N) | 8xLineer $F_{0,75}$ (N) | Nonlinear 8xNonlin. $F_{0,75}$ (N) |
|---------|------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| 300     | 573800                 | 568009                  | 568009                             |
| 340     | 360400                 | 388816                  | 388999                             |
| 360     | 235700                 | 305655                  | 305655                             |
| 370     | 915500                 | 853653                  | 853653                             |
| 380     | 187300                 | 402641                  | 402641                             |
| 400     | 722000                 | 745652                  | 745652                             |
| 440     | 708500                 | 715843                  | 715843                             |
| 450     | 665000                 | 704980                  | 704980                             |
| 470     | 1456000                | 1353537                 | 1353533                            |
| 480     | 674300                 | 890708                  | 890708                             |
| 500     | 1147000                | 1111529                 | 1111529                            |
| 600     | 905000                 | 1200845                 | 1200845                            |



**Şekil 4. 8.** Üretici firmaya ait standart dışı yayların lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen  $F_{0,75}$  kuvvet değerlerinin üretici firma katalog verileri ile karşılaştırılması

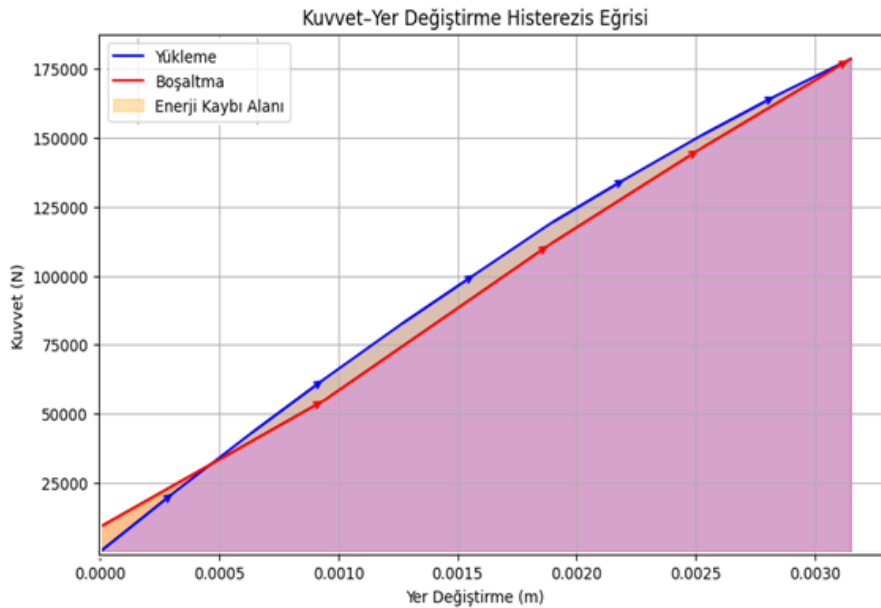


Şekil 4.8'deki standart dışı yayların  $F_{0,75}$  kuvvet grafiği incelendiğinde; Standart dışı disk yaylarda katalog ve analiz değerleri genel olarak birbirine yakın olmakla beraber, bazı çaplarda katalog değerlerinin analiz değerlerinden yüksek olduğu gözlenmiştir. Örneğin, 370 mm çapında katalog kuvveti 915,500 N iken analiz değeri 853,653 N'dir; bu yaklaşık %7 oranında katalog lehine fark anlamına gelir. Bu durum, standart dışı yayların üretim süreçlerinde veya tasarım parametrelerinde katalogdan farklılıklar olabileceğini düşündürmektedir. Öte yandan 300 mm çapında katalog kuvveti 573,800 N ve analiz değeri 568,009 N olarak oldukça yakın bulunmuştur. Lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olması, kullanılan sonlu elemanlar modelinin standart dışı yayların davranışını yüksek doğrulukla temsil ettiğini göstermektedir.

#### 4.3. Kuvvet–Yer Değiştirme ( $F-\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı

Yayların deneysel yükleme-boşaltma verileri (Çizelge 4.9, 4.10, 4.11) kullanılarak elde edilen  $F-\delta$  histerezis eğrileri (Şekil 4.9, 4.10, 4.11), disk yayların enerjiyi nasıl sönümlendiğini açıkça göstermektedir. Aşağıda elde edilen grafikler incelendiğinde:

- **Yükleme eğrisi**, yayın artan yer değiştirme ile lineer olmayan bir kuvvet artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.
- **Boşaltma eğrisi**, yükleme eğrisinden farklı bir yol izleyerek bir histerezis döngüsü oluşturmaktadır. Bu durum, disk yayların iç sürtünme ve şekil değiştirme davranışından kaynaklanır. Histerezis alanı, sönümlenen enerjinin bir göstergesidir. Bu özellik, özellikle titreşim sönümleyici ve darbe emici uygulamalarda disk yayları tercih edilir kılar.



Şekil 4. 9. A Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya  $F-\delta$  histerezis eğrisi

**Çizelge 4. 9.** A Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi

| Uygulanan Kuvvet (N) | Deplasman (m) |
|----------------------|---------------|
| 0                    | 0,00E+00      |
| 21760,8              | 3,15E-04      |
| 42691,2              | 6,30E-04      |
| 62832                | 9,45E-04      |
| 82224                | 1,26E-03      |
| 100920               | 1,58E-03      |
| 118952               | 1,89E-03      |
| 135384               | 2,21E-03      |
| 150704               | 2,52E-03      |
| 165424               | 2,84E-03      |
| 178600               | 3,15E-03      |
| 146040               | 2,52E-03      |
| 111504               | 1,89E-03      |
| 55106,4              | 9,45E-04      |
| 8997,6               | 0,00E+00      |

A Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya ait kuvvet–yer değiştirme verileri kullanılarak yapılan analiz sonucunda, sistemin yükleme ve boşaltma süreçlerine ait histerisiz döngüsü çıkarılmıştır.

$$k=F_{\max}/\delta_{\max}$$

Hesaplanan yay sabiti (k) yaklaşık 56.698,41 N/mm olarak elde edilmiştir. Bu değer, sistemin yüksek rijitlikte bir yapıya sahip olduğunu ve birim deplasman başına önemli miktarda kuvvet oluşturabildiğini göstermektedir. Yüksek rijitlik değeri, yapı elemanının deformasyon karşısında ciddi bir direnç sergilediğini ve dolayısıyla elastik geri dönme davranışının baskın olduğunu ifade etmektedir. Hesaplanan yay sabiti değeri, birim yer değiştirme başına büyük bir geri tepme kuvveti oluşturulabildiğini göstermekte; bu durum, disk yayların deprem izolatörlerinde taban kesme kuvvetlerini kontrol altına alma işlevine doğrudan katkı sağlamaktadır.

$$W_{\max} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta_{\max}^2$$

Yükleme eğrisi altında kalan alan, sisteme uygulanan dış yükleme sonucunda depolanan toplam mekanik enerji miktarını temsil etmektedir. Yapılan hesaplama göre bu değer yaklaşık 305,37 N.m olarak bulunmuştur. Yükleme ve boşaltma eğrileri arasında kalan kapalı alan ise histerezis kaybını göstermekte olup yaklaşık 12,97 N.m

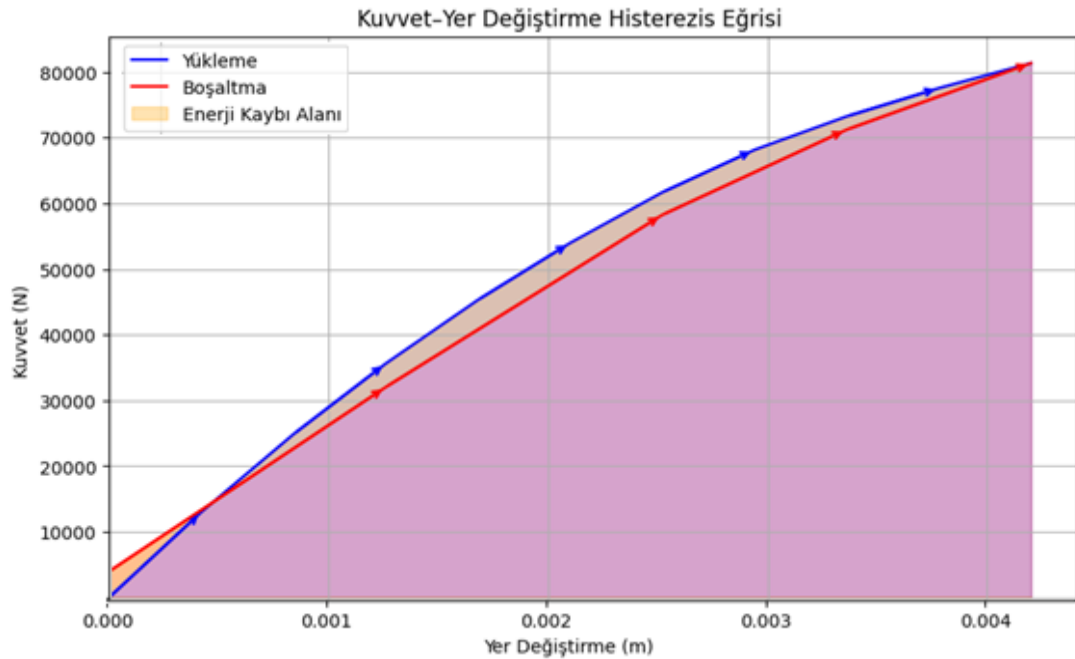
olarak tespit edilmiştir. Bu değer, malzeme veya sistemin çevrimsel yükleme altında plastik deformasyon, iç sürtünme veya mikro yapısal hasar gibi geri dönüşsüz enerji kayıplarını gösterir niteliktedir. Bu özellik, deprem sırasında ani yük transferlerinin absorbe edilmesi ve geri verilmesi yoluyla yapısal elemanlarda hasar birikiminin azaltılması için son derece değerlidir.

$$\xi = \frac{W_a}{4\pi W_{max}}$$

Sistemin iç sönümleme performansını temsil eden sönüm oranı ( $\xi$ ) yaklaşık %0,31 olarak belirlenmiştir. Bu oran, toplam giren enerjinin yaklaşık % 4-5'lik bir kısmının sönümlendiğini ve bu nedenle sistemin belirgin bir sönümleme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu özellik, sistemin dinamik yüklemeler veya titreşim etkileri altında enerji yayılımını kontrol edebilme yeteneği açısından önem arz etmektedir.

Gerçekleştirilen analiz sonucunda; sistem küçük deplasmanlar altında yüksek kuvvet geliştirebilen, depolanan enerjinin belirli bir kısmını iç sönümleme yoluyla kaybeden, yüksek rijitliğe sahip elastik bir yapı elemanı olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak bu analiz; disk yay bileşenlerinin yüksek rijitlik, yeniden merkeze dönme kabiliyeti, sönümleme potansiyeli ve enerji yayılımı gibi mekanik avantajlarıyla, deprem izolatörlerinde etkili bir titreşim yalıtımı ve darbe emici eleman olarak kullanılabileceğini güçlü biçimde desteklemektedir.



Şekil 4. 10. B Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya F- $\delta$  histerezis eğrisi

**Çizelge 4. 10.** B Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi

| Uygulanan Kuvvet (N) | Deplasman (m) |
|----------------------|---------------|
| 0                    | 0,00E+00      |
| 13004                | 4,20E-04      |
| 24859,2              | 8,40E-04      |
| 35605,6              | 1,26E-03      |
| 45288                | 1,68E-03      |
| 53956,8              | 2,10E-03      |
| 61668                | 2,52E-03      |
| 68135,2              | 2,94E-03      |
| 73228,8              | 3,36E-03      |
| 77532                | 3,78E-03      |
| 81336                | 4,20E-03      |
| 71212                | 3,36E-03      |
| 58235,2              | 2,52E-03      |
| 32022,4              | 1,26E-03      |
| 3965,2               | 0,00E+00      |

Şekil 4.10'daki grafik incelendiğinde; B Serisi 3. Grup  $D_e=200$  mm disk yaya ait kuvvet–yer değiştirme verileri kullanılarak yapılan analiz sonucunda, sistemin yükleme ve boşaltma süreçlerine ait histerisiz döngüsü çıkarılmıştır.

Sistemin elastik rijitliğini ifade eden yay sabiti (k) ise yaklaşık 19.365,71 N/mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemin uygulanan kuvvet karşısında önemli ölçüde rijitlik sergilediğini, küçük deplasmanlarda dahi yüksek kuvvet geliştirebildiğini göstermektedir. Nispeten yüksek rijitlik değeri, yapının elastik geri dönme kabiliyetinin kuvvetli olduğunu ve deplasman seviyesinin sınırlı tutulduğunu işaret etmektedir.

Yükleme eğrisi altında kalan alan, sisteme uygulanan dış kuvvet etkisiyle depolanan toplam mekanik enerjiyi temsil etmektedir. Bu değer, yapılan hesaplamalar sonucunda yaklaşık 207,46 N.m olarak bulunmuştur. Yükleme ve boşaltma eğrileri arasında oluşan histerezis döngüsü ise, sistemin plastik deformasyon, iç sürtünme veya mikro yapısal düzensizlikler gibi geri dönüşsüz mekanizmalardan kaynaklanan enerji kaybını göstermektedir. Bu kayıp enerji miktarı yaklaşık 8,84 N.m olarak belirlenmiştir.

Sistemin iç sönümlenme kapasitesine ilişkin bir ölçüt olan sönüm oranı ( $\xi$ ) yaklaşık % 0,31 seviyesindedir. Bu oran, toplam giren enerjinin %3-4'lük bir kısmının çevrimsel yükleme sırasında sönümlendiğini ve bu bağlamda yapının titreşim ve

dinamik yüklemelere karşı belirli bir iç enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

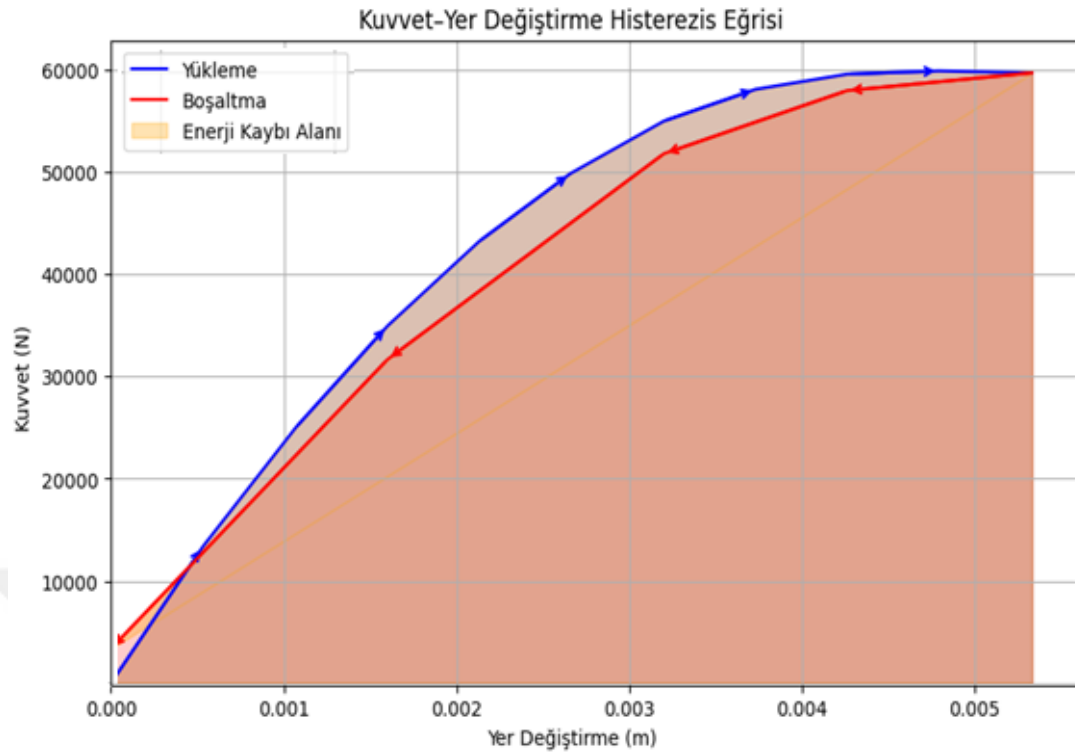
Gerçekleştirilen analiz doğrultusunda; sistem, düşük deplasman değerleri altında yüksek rijitlik sergileyerek önemli miktarda mekanik enerji depolayabilmekte ve depolanan enerjinin yaklaşık % 3-4'ünü iç sönümleme mekanizmaları vasıtasıyla kaybetmektedir. Bu özellikler, sistemin titreşim kontrolü ve enerji yayılımı yönetimi gibi mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini ön plana çıkarmaktadır.

**Çizelge 4. 11.** C Serisi 3. Grup  $D_e=225$  mm disk yaya uygulanan ve serbest bırakılan yük deplasman çizelgesi

| Uygulanan Kuvvet (N) | Deplasman (m) |
|----------------------|---------------|
| 0                    | 0             |
| 13380,8              | 5,33E-04      |
| 25009,6              | 1,07E-03      |
| 34929,6              | 1,60E-03      |
| 43190,4              | 2,13E-03      |
| 49848                | 2,66E-03      |
| 54972                | 3,20E-03      |
| 58073,6              | 3,73E-03      |
| 59552                | 4,26E-03      |
| 59871,2              | 4,79E-03      |
| 59680,8              | 5,33E-03      |
| 57950,4              | 4,26E-03      |
| 51780,8              | 3,20E-03      |
| 31651,2              | 1,60E-03      |
| 3374,64              | 0,00E+00      |

Şekil 4.11'deki grafik incelendiğinde; C Serisi 3. Grup  $D_e=225$  mm disk yaya ait kuvvet–yer değiştirme verileri kullanılarak yapılan analiz sonucunda, sistemin yükleme ve boşaltma süreçlerine ait histerisiz döngüsü çıkarılmıştır.

Yapının elastik davranışını ifade eden yay sabiti (k) yaklaşık 11.232,87 N/mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer, sistemin uygulanan kuvvet karşısında orta-yüksek bir rijitlik sergilediğini ve birim deplasman başına anlamlı düzeyde kuvvet geliştirebildiğini göstermektedir. Nispeten dengeli rijitlik değeri, sistemin hem elastik geri dönüş kabiliyetini koruyabildiğini hem de belirli bir miktarda iç enerji sönümlemesine izin verdiğini ortaya koymaktadır.



**Şekil 4. 11.** C Serisi 3. Grup  $D_e=225$  mm disk yaya F- $\delta$  histerezis eğrisi

Yükleme eğrisi altında kalan alan, sisteme dış yükleme sonucu aktarılan ve geri dönüşlü olarak depolanan toplam mekanik enerji miktarını göstermektedir. Hesaplamalar sonucunda bu değer yaklaşık 228,47 N.m olarak bulunmuştur. Yükleme ve boşaltma eğrileri arasında kalan kapalı alan ise sistemin plastik deformasyon, sürtünme veya mikro düzeyde yapısal hasar gibi geri dönüşsüz enerji kayıplarını temsil etmektedir. Bu histerezis kaybı yaklaşık 10,09 N.m olarak belirlenmiştir.

Sistemin enerji yayılım kapasitesine ilişkin önemli bir parametre olan sönüm oranı ( $\xi$ ) yaklaşık % 0,30 düzeyindedir. Bu oran, toplam giren enerjinin yaklaşık % 4-5'lik bir kısmının çevrimsel yükleme sırasında iç sönümleme yoluyla kaybedildiğini göstermektedir. Bu durum, sistemin belirli bir enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu ve dinamik yükler veya titreşimler karşısında kısmi bir enerji sönümleme etkisi oluşturabildiğini göstermektedir.

Yapılan bu analiz doğrultusunda; sistem, çevrimsel yükleme altında yaklaşık 228,47 N.m mekanik enerjiyi elastik olarak depolayabilmektedir. Depolanan enerjinin yaklaşık % 4-5'lik kısmı sistemin çevrimsel yüklemeler altında sınırlı fakat anlamlı bir enerji yayılım kapasitesine sahip olduğunu göstermekte, bu yönüyle yapının dinamik etkiler altındaki performansı açısından olumlu bir gösterge sunmaktadır. Hesaplanan yay sabiti değeri, sistemin elastik rijitliğinin orta-yüksek seviyede olduğunu göstermektedir. Bu durum, yapının uygulanan kuvvet karşısında sınırlı deformasyon sergileyerek elastik geri dönüş kabiliyetini koruyabildiğini ortaya koymaktadır. Histerezis döngüsü altında kalan yaklaşık 10,09 N.m'lik sönümlenen enerji, sistemde plastik deformasyon, yüzey sürtünmesi veya mikro düzeyde hasar kaynaklı enerji kayıplarının varlığına işaret etmektedir. Bu mekanik özellikler, sistemin deprem enerjisi

yayılımı, titreşim kontrolü veya tekrarlı yüklemelerde elastik davranışın korunması gibi mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliğini desteklemektedir.

#### 4.4. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Disk yayların farklı eksenlerdeki (X, Y, Z) performansları; yay sabiti ( $k$ ), maksimum elastik enerji ( $W_{\max}$ ), sönümlenen enerji ( $W_d$ ) ve sönüm oranı ( $\xi$ ) parametreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, tüm yay serilerinden ve standart dışı yaylardan seçilen 12 tasarım noktasına (Çizelge 4.12) ve eksen yönlerine göre ayrı ayrı analiz edilmiştir.

**Çizelge 4. 12.** Yaylara ait tasarım noktaları

| Tasarım Noktası | Seri          | Grup | De (mm) |
|-----------------|---------------|------|---------|
| DP 1            | A             | 3    | 200     |
| DP 2            | A             | 3    | 225     |
| DP 3            | A             | 3    | 250     |
| DP 4            | B             | 3    | 200     |
| DP 5            | B             | 3    | 225     |
| DP 6            | B             | 3    | 250     |
| DP 7            | C             | 2    | 200     |
| DP 8            | C             | 3    | 225     |
| DP 9            | C             | 3    | 250     |
| DP 10           | Standart Dışı |      | 480     |
| DP 11           | Standart Dışı |      | 500     |
| DP 12           | Standart Dışı |      | 600     |

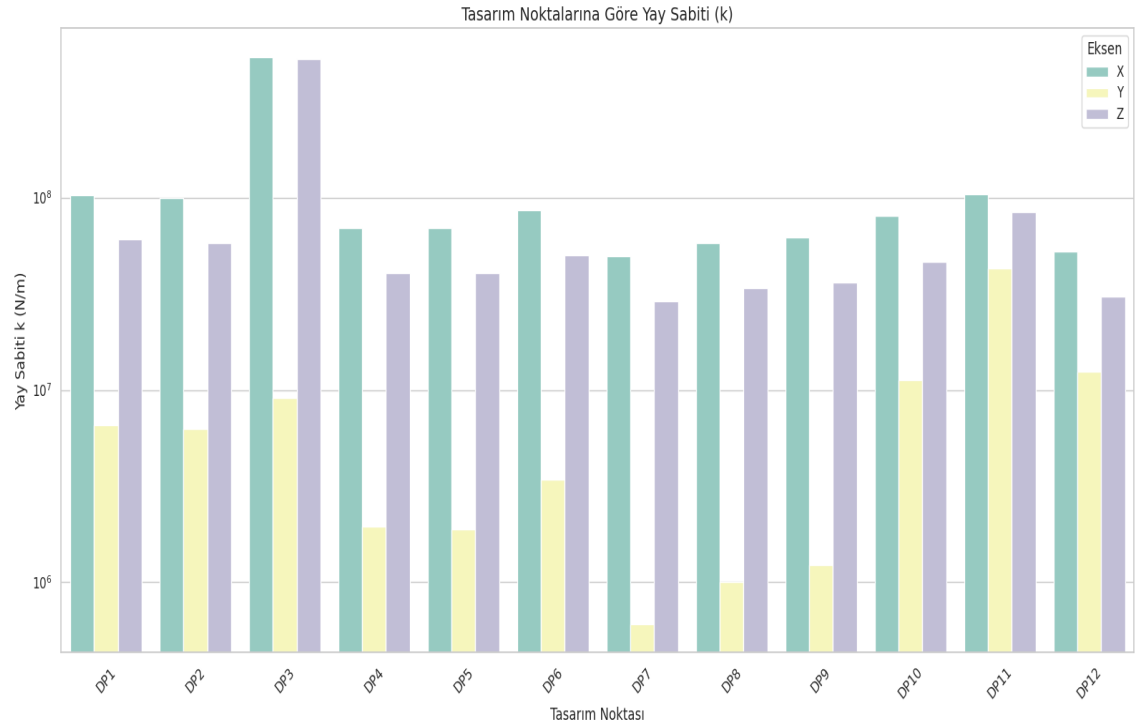
##### 4.4.1. Yay Sabiti ( $k$ ) Üzerinden Rijitlik Değerlendirmesi

Yay sabiti ( $k$ ), sistemin rijitliği hakkında doğrudan bilgi veren temel parametrelerden biridir. Çizelge 4.12 ve Şekil 4.12’de gösterilen 12 tasarım noktasına ait  $k$  değerleri incelendiğinde; X ekseninde  $k$  değerleri genel olarak diğer eksenlere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Örneğin, DP3 noktasında X eksen için elde edilen  $k$  değeri 540,1 MN/m iken, aynı noktada Y ekseninde yalnızca 9,1 MN/m ölçülmüştür. Benzer şekilde Z ekseninde de nispeten yüksek rijitlik değerleri gözlenmiştir (örneğin, DP3-Z: 527,6 MN/m).

Bu durum, disk yay sisteminin X ve Z eksenlerinde daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu, buna karşın Y ekseninde ise çok daha düşük rijitlik sergilediğini göstermektedir. Y eksenindeki düşük rijitlik, sistemin bu yönde daha fazla deformasyon kabiliyetine sahip olduğunu ve dolayısıyla enerji sönümleme potansiyelinin bu yönde daha yüksek olabileceğini düşündürmektedir.

**Çizelge 4. 13.** Tasarım noktalarına ait “k” değerleri

| Tas. N. | Eks. | k (N/m)   | Tas. N. | Eks. | k (N/m)  | Tas. N. | Eks. | k (N/m)   |
|---------|------|-----------|---------|------|----------|---------|------|-----------|
| DP1     | X    | 103419300 | DP5     | X    | 69744217 | DP9     | X    | 61964005  |
|         | Y    | 6593000   |         | Y    | 1883056  |         | Y    | 1225504   |
|         | Z    | 60585900  |         | Z    | 40745497 |         | Z    | 36190180  |
| DP2     | X    | 99842126  | DP6     | X    | 85614167 | DP10    | X    | 80199361  |
|         | Y    | 6299200   |         | Y    | 3428000  |         | Y    | 11210062  |
|         | Z    | 58224922  |         | Z    | 50115733 |         | Z    | 46468043  |
| DP3     | X    | 540106145 | DP7     | X    | 49735037 | DP11    | X    | 104002122 |
|         | Y    | 9126904   |         | Y    | 606476   |         | Y    | 42742222  |
|         | Z    | 527552910 |         | Z    | 29047479 |         | Z    | 84084619  |
| DP4     | X    | 69741304  | DP8     | X    | 58160095 | DP12    | X    | 52582073  |
|         | Y    | 1947761   |         | Y    | 1005389  |         | Y    | 12478787  |
|         | Z    | 40736987  |         | Z    | 33799389 |         | Z    | 30720413  |

**Şekil 4. 12.** Tasarım noktalarına ait “k” sabitinin karşılaştırması



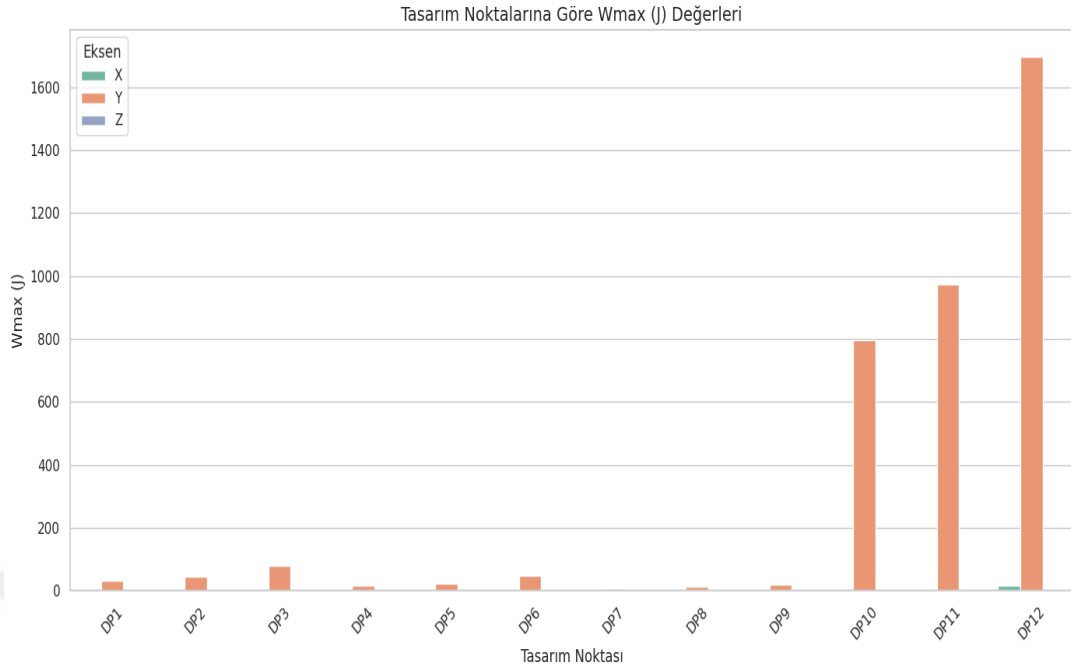
#### 4.4.2. Maksimum Elastik Enerji ( $W_{\max}$ ) Değerlendirmesi

Maksimum elastik enerji ( $W_{\max}$ ), bir yay sisteminin elastik bölge içerisinde deformasyona uğrarken depolayabildiği enerji miktarını temsil eder. Bu değer doğrudan yay sabiti ve maksimum yer değiştirme ile ilişkilidir. Çizelge 4.14 ve Şekil 4.13'te gösterilen 12 tasarım noktasına ait  $W_{\max}$  değerleri incelendiğinde; Teorik (X eksen) değerler, yayların ideal davranışlarını yansıtırken; deneysel (Y eksen) değerler, uygulama koşullarındaki gerçek enerji depolama kapasitelerini ortaya koymaktadır. Örneğin, DP3 için teorik değer 2,31 J iken, deneysel ölçüm 80,5 J'ye kadar yükselmektedir. Bu durum, yayların grup hâlinde kullanımının ve gerçek çalışma koşullarının teorik hesaplamaların ötesinde enerji depolama potansiyeli oluşturduğunu göstermektedir. Ancak Z ekseninde ölçülen değerler, sistemde geri dönüşsüz enerji kayıplarını ve plastik deformasyon etkilerini yansıtmaktadır. DP12'de Z eksenindeki 4,43 J'lik değer, bu yay grubunun enerji sönümleme kapasitesinin yüksek olduğunu işaret ederken, DP7 ve DP8 gibi daha düşük değerler (0,06–0,07 J) daha az enerji kaybına işaret etmektedir. Bu farklılıklar, yayların malzeme özellikleri, geometrik yapısı ve montaj koşullarına bağlı olarak sönümleme davranışlarının çeşitlendiğini göstermektedir.

**Çizelge 4. 14.** Tasarım noktalarına ait  $W_{\max}$  değerleri

| Tas. N. | Eks. | $W_{\max}$ (J) | Tas. N. | Eks. | $W_{\max}$ (J) | Tas. N. | Eks. | $W_{\max}$ (J) |
|---------|------|----------------|---------|------|----------------|---------|------|----------------|
| DP1     | X    | 0,39           | DP5     | X    | 0,31           | DP9     | X    | 0,28           |
|         | Y    | 32,71          |         | Y    | 22,37          |         | Y    | 20,97          |
|         | Z    | 0,11           |         | Z    | 0,09           |         | Z    | 0,08           |
| DP2     | X    | 0,4            | DP6     | X    | 0,37           | DP10    | X    | 2,09           |
|         | Y    | 44,29          |         | Y    | 47,24          |         | Y    | 797,06         |
|         | Z    | 0,11           |         | Z    | 0,11           |         | Z    | 0,6            |
| DP3     | X    | 2,31           | DP7     | X    | 0,23           | DP11    | X    | 0,48           |
|         | Y    | 80,5           |         | Y    | 8,36           |         | Y    | 973,72         |
|         | Z    | 1,14           |         | Z    | 0,06           |         | Z    | 0,19           |
| DP4     | X    | 0,31           | DP8     | X    | 0,26           | DP12    | X    | 15,15          |
|         | Y    | 17,17          |         | Y    | 14,25          |         | Y    | 1698,67        |
|         | Z    | 0,09           |         | Z    | 0,07           |         | Z    | 4,43           |

Sonuç olarak, deneysel veriler teorik tahminlerden genellikle daha yüksek maksimum elastik enerji değerleri vermekte ve yayların enerji depolama kapasitesinin eksene bağlı olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, disk yayların sismik izolasyon ve enerji yutma uygulamalarında kullanılmadan önce çok eksenli deneysel analizlerle performanslarının doğrulanması önemlidir.



**Şekil 4. 13.** Tasarım noktalarına ait  $W_{\max}$  değerleri karşılaştırması

#### 4.4.3. Sönümlenen Enerji ( $W_d$ ) – Enerji Yayılım Potansiyeli Değerlendirmesi

Sönümlenen enerji ( $W_d$ ), yükleme ve boşaltma sırasında meydana gelen histerezis eğrisinin alanı olarak tanımlanır ve sistemin mekanik enerji kaybını ifade eder. Bu değer doğrudan malzeme içi sürtünme, temas sürtünmesi ve plastisite gibi geri döndürülemez süreçlere bağlıdır. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.14’te gösterilen 12 tasarım noktasına ait  $W_d$  değerleri incelendiğinde; hesaplamalar, Y eksenine yerleştirilen yay gruplarında  $W_d$  değerlerinin belirgin şekilde yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin DP11-Y için  $W_d = 714,814$  J olarak hesaplanmıştır. Bu, söz konusu konfigürasyonun enerjiyi sönümleyerek sistemin titreşim ve darbe etkilerine karşı korunmasına önemli katkı sağladığını göstermektedir.

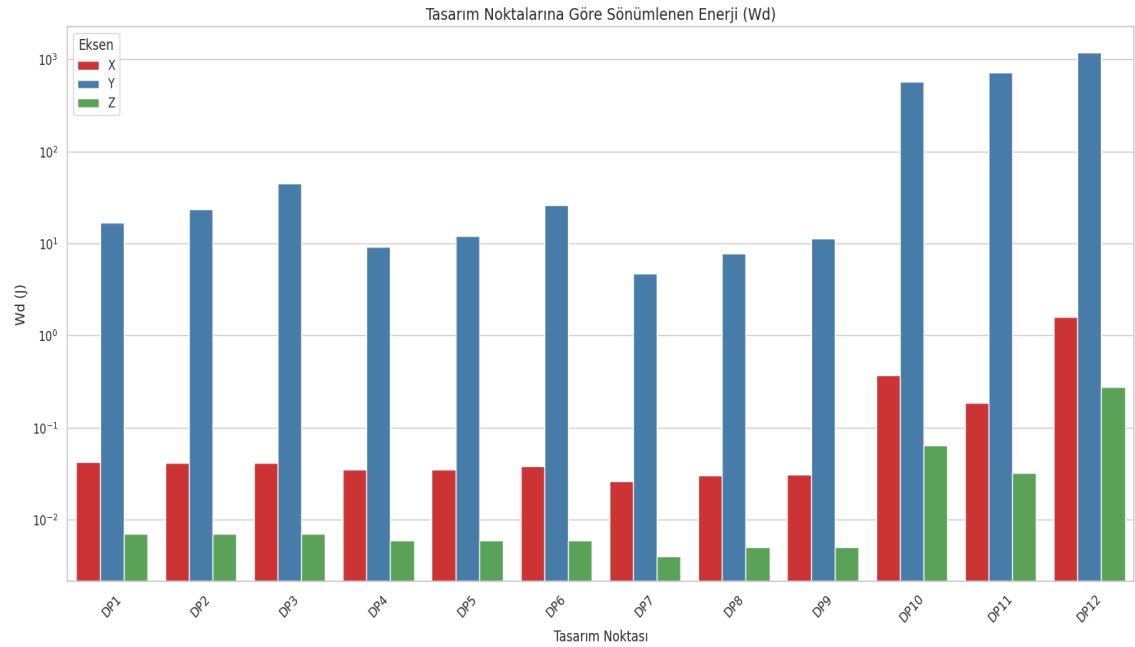
X ve Z ekseninde sönümlenen enerji değerleri genel olarak düşüktür. DP7-X ve DP11-Z gibi konfigürasyonlarda  $W_d$  0,026 – 0,032 J seviyelerindedir. Yüksek rijitlik ve elastik deformasyonun sınırlı olması nedeniyle bu eksenlerde enerjinin büyük bölümü geri kazanılırken, sönümleme oranı görece daha düşüktür.

Sönümlenen enerji ( $W_d$ ), yükleme ve boşaltma sırasında oluşan histerezis eğrisinin alanı olarak tanımlanmakta ve sistemdeki geri döndürülemez mekanik enerji kayıplarını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular, Y ekseninde yerleştirilen yay gruplarının, diğer eksenlere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek  $W_d$  değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Örneğin, DP11-Y konfigürasyonunda  $W_d = 714,814$  J olarak hesaplanmıştır. Bu durum, Y yöneliminin sönümleme kapasitesine olumlu katkı sağladığını ortaya koymaktadır. Buna karşılık, X ve Z eksenindeki konfigürasyonlarda  $W_d$  değerleri oldukça düşüktür (ör. DP7-X ve DP11-Z için  $\approx 0,03$  J) ve enerjinin büyük bölümü elastik olarak geri kazanılmaktadır. Bu sonuçlar, disk yayların yönelimine bağlı olarak sönümleme performanslarının önemli ölçüde

değiştiğini ve optimum enerji sönümlemesi için uygun yerleşim seçiminin kritik olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 4. 15.** Tasarım noktalarına ait  $W_d$  değerleri

| Tas. N. | Eksen | $W_d$ (J) | Tas. N. | Eksen | $W_d$ (J) | Tas. N. | Eksen | $W_d$ (J) |
|---------|-------|-----------|---------|-------|-----------|---------|-------|-----------|
| DP1     | X     | 0,042     | DP5     | X     | 0,035     | DP9     | X     | 0,031     |
|         | Y     | 16,91     |         | Y     | 12,02     |         | Y     | 11,415    |
|         | Z     | 0,007     |         | Z     | 0,006     |         | Z     | 0,005     |
| DP2     | X     | 0,041     | DP6     | X     | 0,038     | DP10    | X     | 0,37      |
|         | Y     | 23,49     |         | Y     | 25,956    |         | Y     | 575,583   |
|         | Z     | 0,007     |         | Z     | 0,006     |         | Z     | 0,064     |
| DP3     | X     | 0,041     | DP7     | X     | 0,026     | DP11    | X     | 0,184     |
|         | Y     | 44,51     |         | Y     | 4,693     |         | Y     | 714,814   |
|         | Z     | 0,007     |         | Z     | 0,004     |         | Z     | 0,032     |
| DP4     | X     | 0,035     | DP8     | X     | 0,03      | DP12    | X     | 1,585     |
|         | Y     | 9,126     |         | Y     | 7,774     |         | Y     | 1200,303  |
|         | Z     | 0,006     |         | Z     | 0,005     |         | Z     | 0,276     |



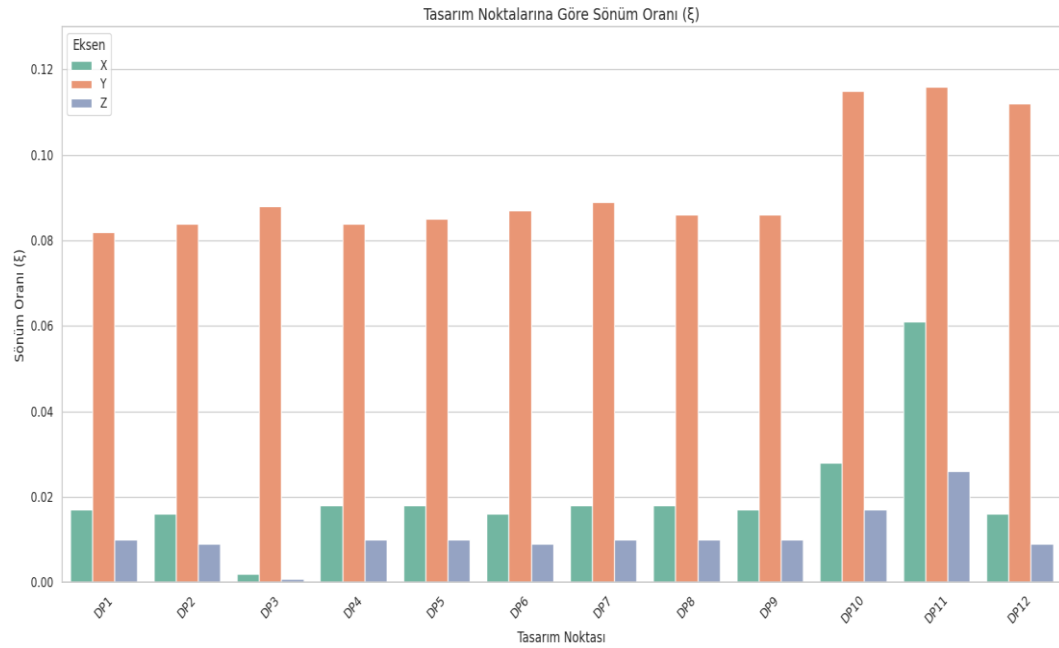
**Şekil 4. 14.** Tasarım noktalarına ait  $W_d$  değerleri karşılaştırması

#### 4.4.4. Sönüm Oranı ( $\xi$ ) – Enerji Kaybı Oranı Değerlendirmesi

Sönüm oranı  $\xi$ , sistemin bir çevrimde kaybettiği enerjinin toplam elastik enerjiye oranı olarak tanımlanır. Boyutsuz bir parametre olması sayesinde farklı konfigürasyonların doğrudan karşılaştırılmasına imkân tanır.

**Çizelge 4. 16.** Tasarım noktalarına ait  $\xi$  değerleri

| Tas. N. | Eks. | $\xi$  | Tas. N. | Eks. | $\xi$ | Tas. N. | Eks. | $\xi$ |
|---------|------|--------|---------|------|-------|---------|------|-------|
| DP1     | X    | 0,017  | DP5     | X    | 0,018 | DP9     | X    | 0,017 |
|         | Y    | 0,082  |         | Y    | 0,085 |         | Y    | 0,086 |
|         | Z    | 0,01   |         | Z    | 0,01  |         | Z    | 0,01  |
| DP2     | X    | 0,016  | DP6     | X    | 0,016 | DP10    | X    | 0,028 |
|         | Y    | 0,084  |         | Y    | 0,087 |         | Y    | 0,115 |
|         | Z    | 0,009  |         | Z    | 0,009 |         | Z    | 0,017 |
| DP3     | X    | 0,002  | DP7     | X    | 0,018 | DP11    | X    | 0,061 |
|         | Y    | 0,088  |         | Y    | 0,089 |         | Y    | 0,116 |
|         | Z    | 0,0009 |         | Z    | 0,01  |         | Z    | 0,026 |
| DP4     | X    | 0,018  | DP8     | X    | 0,018 | DP12    | X    | 0,016 |
|         | Y    | 0,084  |         | Y    | 0,086 |         | Y    | 0,112 |
|         | Z    | 0,01   |         | Z    | 0,01  |         | Z    | 0,009 |



**Şekil 4. 15.** Tasarım noktalarına ait  $\xi$  değerleri karşılaştırması

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.15'te gösterilen 12 tasarım noktasına ait  $\xi$  değerleri incelendiğinde; Y eksenine ait konfigürasyonlarda sönüm oranları oldukça yüksek bulunmuştur. Örneğin DP11-Y konfigürasyonu için  $\xi = 0,116$  değeri hesaplanmıştır. Bu, sistemin toplam enerjisinin yaklaşık %11,6'sının her yükleme-boşaltma çevriminde kaybedildiğini göstermektedir. Benzer şekilde DP7-Y ve DP9-Y gibi konfigürasyonlar da yüksek  $\xi$  değerleri sergilemiştir (yaklaşık 0,09).

X ve Z eksenlerinde ise  $\xi$  değerleri oldukça düşüktür. Örneğin, DP3-Z konfigürasyonunda  $\xi = 0,0009$  gibi çok düşük bir oran ölçülmüştür. Bu eksenlerde sistem, enerjiyi elastik olarak geri kazanmakta ve histerezis kayıpları sınırlı kalmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda, Y yönünde yer alan konfigürasyonların enerji sönümleme açısından son derece etkin olduğu, buna karşın X ve Z yönlerinin daha çok yük taşıma ve elastik geri kazanım performansı ile öne çıktığı söylenebilir.

#### 4.4.5. Genel Değerlendirme ve Mühendislik Açısından Çıkarımlar

Toplam 12 farklı konfigürasyon üzerinden yapılan bu çalışmada, eksenel yerleşimin sistemin rijitliği, enerji depolama ve sönümleme davranışı üzerinde doğrudan etkili olduğu açıkça ortaya konmuştur:

- **X eksenindeki yaylar**, yüksek rijitlik ( $k > 500$  MN/m) ve yüksek enerji depolama kapasitesi ( $W_{\max} > 50$  J) ile taşıyıcı sistemler için uygundur. Ancak sönüm oranı düşüktür ( $\xi < 0,01$ ).
- **Y eksenindeki yaylar**, düşük rijitlik ve düşük elastik enerjiye rağmen yüksek enerji sönümleme performansı ( $\xi \approx 0,08-0,12$ ) sunar. Bu nedenle titreşim, darbe ve sismik etkilerin sönümlenmesinde etkin bir rol üstlenebilir.
- **Z eksen**, genellikle X eksenine yakın rijitlik değerlerine sahiptir; sönümleme kabiliyeti ise orta düzeydedir ( $\xi \approx 0,01-0,03$ ).

Elde bulgular doğrultusunda, sistem tasarımı sırasında hedeflenen performans kriterlerine göre eksenel yerleşim tercihleri yapılmalı, örneğin rijitlik gerektiren uygulamalarda X/Z yönlü dizilimler; sönümleme gerektiren sistemlerde ise Y yönlü dizilimler önceliklendirilmelidir.

## 5. TARTIŞMA

Çalışma kapsamında, DIN EN 16983 standardına ait A, B ve C serisi disk yaylar ile Mubea firmasına ait standart dışı üretim disk yaylar olmak üzere 99 farklı yay, lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizleri detaylı biçimde gerçekleştirilmiş ve bu sonuçlar ilgili katalog verileriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen  $\sigma_{II}$  gerilme değerleri ve  $F_{0,75}$  kuvvetleri, literatürde disk yay davranışlarının sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesine ilişkin önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında bazı önemli benzerlikler ve farklılıklar ortaya koymaktadır.

### 5.1. Maksimum $\sigma_{II}$ Verilerinin Değerlendirilmesi

#### 5.1.1. Lineer ve Nonlinear Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

A, B, C ve standart dışı disk yay serilerinin ikinci ana gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri, standart veya katalog referansları ile lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analiz (FEA) sonuçları kapsamında kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Analizler, yayların farklı çaplarındaki performansını ve malzeme davranışını daha iyi anlamaya yönelik olarak gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak, lineer ve nonlinear analiz sonuçları tüm serilerde birbirine oldukça yakın bulunmuş, malzemenin elastik sınırlar içinde davranış sergilediği ve nonlinear etkilerin sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, mühendislik tasarımlarında hesaplama yükü daha düşük olan lineer analizlerin çoğu durumda güvenle kullanılabileceğini göstermektedir.

Standart ve katalog verileriyle karşılaştırıldığında ise, A, B ve C serilerinde analiz sonuçları genellikle standart değerlerin üzerinde seyretmiştir. Örneğin, A serisinde çap 8 mm olan bir yay için standart  $\sigma_{II}$  değeri yaklaşık 1218 MPa iken, lineer ve nonlinear analizler 1347 MPa dolaylarında gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, B ve C serilerinde de analiz sonuçları standart referanslardan daha yüksek çıkmış, bu da analizlerin gerçek geometrik ve yükleme koşullarını daha detaylı yansıttığını göstermiştir. Bu farklılıklar, standart verilerin daha muhafazakâr ve ortalama malzeme davranışını temsil etmesinden kaynaklanmaktadır.

Standart dışı yaylarda ise katalog ve analiz değerleri birbirine daha yakın bulunmuş; bazı çaplarda katalog değerleri analizlerin üzerinde veya altında olabilir. Örneğin, 480 mm çaplı yayda katalog  $\sigma_{II}$  değeri 1550 MPa iken, analiz sonuçları 1413 MPa civarında yer almaktadır. Bu durum katalog verilerinin güvenilirliğini desteklerken, tasarım süreçlerinde analizlerin tamamlayıcı rolünün önemini vurgulamaktadır.

Seriler arasında eksen bazında da tutarlılık sağlanmıştır. Küçük çaplı yaylarda lineer ve nonlinear analiz sonuçları arasındaki farklar oldukça az olup, elastik davranışın hâkim olduğu gözlenmiştir. Daha büyük çaplarda ise analiz sonuçları standartlara daha yakın seyretmiş, bu da yayların elastik sınırlar içinde benzer gerilme düzeylerine ulaştığını göstermiştir.

Sonuç olarak, disk yayların tasarımında standart ve katalog veriler önemli bir

başlangıç noktası olmakla birlikte, gerçek performansın ve güvenliğin sağlanması için lineer ve gerektiğinde nonlinear analizlerin birlikte kullanılması önerilmektedir. Bu bütüncül yaklaşım, sismik izolasyon ve enerji sönümleme sistemlerinin etkinliğini artıracaktır.

### 5.1.2. Literatür ile Kıyaslama ve Katkılar

Çalışmada elde edilen von Mises ( $\sigma_{II}$ ) gerilmeleri, genel olarak literatürde disk yayların elastik bölgede nasıl davrandığını ortaya koyan önceki bulgularla uyumludur. Örneğin, Chen et al. (2021), konik disk yaylarda iç kenar bölgelerinde gerilme yığılmalarının yoğunlaştığını ve plastikleşmenin bu bölgelerde başladığını ifade etmiştir. Bu tezde de A, B ve C serisi yaylarda lineer ve nonlinear analizlerin  $\sigma_{II}$  değerlerinin çoğunlukla üst üste gelmesi, çalışmanın elastik davranış aralığında kalarak doğrusal varsayımların geçerliliğini desteklemektedir.

Elde edilen bulgular, DIN EN 16983 standardı ile uyumlu olmakla birlikte, geniş çaplı disk yaylarda geometrik nonlinearliklerin ve temas etkilerinin ihmal edilmesi durumunda, gerilme değerlerinin düşük tahmin edilebileceğini göstermektedir. Benzer şekilde Chopra (2007) ve Bantis, Miranda, (2025), enerji yayılımı ve histerezis etkilerini doğru modellemenin özellikle titreşim yalıtımı ve enerji sönümleyici sistem tasarımında kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Bu bağlamda hem lineer hem de nonlinear analizlerin karşılaştırmalı şekilde kullanılması; tasarım aşamasında disk yayların yorulma dayanımını ve deformasyon sınırlarını daha güvenilir biçimde belirlemek için önerilmektedir. Özellikle sismik izolasyon sistemlerinde kullanılan disk yay cihazlarının yüksek tekrarlı yüklemelere maruz kalacağı göz önüne alındığında, nonlinear davranışın doğru temsil edilmesi önem arz etmektedir (Bantis, Miranda, 2025).

### 5.2. F<sub>0,75</sub> Kuvvet Verilerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada farklı serilere ait disk yaylar ile standart dışı yaylara iat F<sub>0,75</sub> kuvvet değerleri, DIN EN 16983 standardı ile üretici katalog verilerine karşılık gelen değerlerle kıyaslanarak hem lineer hem de nonlinear sonlu elemanlar analizleri (FEA) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde sunulan önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir.

#### 5.2.1. Linear ve Nonlinear Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

A, B, C ve standart dışı disk yay gruplarına ait F<sub>0,75</sub> kuvvet değerleri, standart ya da katalog referansları ile lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analiz sonuçları bağlamında karşılaştırılmıştır. Analiz edilen verilerde, tüm yay serilerinde lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, yayların elastik sınırlar içerisinde davranarak nonlinear etkilerin sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, mühendislik tasarımlarında lineer analizlerin hesaplama avantajı yla birlikte yeterli doğruluk sağladığı söylenebilir.

Seriler bazında değerlendirildiğinde, A serisinde standart F<sub>0,75</sub> kuvvet değerleri genel olarak analiz sonuçlarının biraz altında kalmaktadır. Örneğin, 8 mm çaplı yayda

standart kuvvet 210 N iken, analizler 233 N civarında değerler vermiştir. Daha büyük çaplarda ise bu farklar azalarak, 250 mm çap için standart 248.828 N iken analizler yaklaşık 250.050 N'a ulaşmıştır. Bu durum, analiz modellerinin gerçek geometrik ve yükleme koşullarını daha hassas yansıttığını ortaya koymaktadır.

B serisinde ise standart kuvvet değerleri A serisine göre daha düşük olup, özellikle küçük çaplarda analiz sonuçlarıyla aralarında belirgin farklar mevcuttur. Örneğin, 8 mm çapta standart kuvvet 118 N iken analizlerde 191 N görülmüştür. Büyük çaplarda da (250 mm) standart 119.050 N, analizlerde 163.125 N seviyesine ulaşmıştır. Bu farklar, standart verilerin daha muhafazakâr veya genel ortalama koşulları yansıtmamasıyla açıklanabilir.

C serisi yaylar ise standart kuvvet değerlerinin en düşük olduğu gruptur; küçük çaplarda farklar oldukça yüksektir. Örneğin, 8 mm çapta standart kuvvet sadece 39 N iken, analizler 127 N civarındadır. 250 mm çapta ise standart 50.466 N'a karşılık analizler 123.010 N'a ulaşmaktadır. Bu durum, C serisinin daha düşük sertlik veya farklı malzeme-geometri kombinasyonlarına sahip olduğunu düşündürmektedir. Aynı zamanda analizlerin gerçek davranışı iyi temsil ettiğini göstermektedir.

Standart dışı yaylarda katalog ve analiz değerleri birbirine oldukça yakın seyretmektedir. Örneğin, 300 mm çapta katalog kuvvet 573.800 N, analizler ise 568.009 N civarındadır. Büyük çaplarda (600 mm) katalog 905.000 N iken analiz sonuçları 1.200.845 N'a kadar yükselmektedir. Bu yakınlık katalog verilerinin standart dışı yaylar için de güvenilir olduğunu ve analizlerin tamamlayıcı bir doğrulama aracı olarak önemli olduğunu göstermektedir.

Genel olarak, tüm serilerde analizlerin standart veya katalog verilerinden genellikle biraz daha yüksek kuvvet değerleri verdiği gözlenmiştir. Bu da mühendislik tasarımında analizlerin daha gerçekçi yükleme ve malzeme davranışını yansıttığını ve tasarım güvenliğini artırdığını göstermektedir. Ayrıca, özellikle büyük çaplarda standart dışı yayların kuvvet kapasitesinin belirgin şekilde arttığı ve ağır yük uygulamaları için uygun olduğu doğrulanmıştır.

Sonuç olarak, disk yayların tasarımında standart/katalog veriler başlangıç noktası olarak kullanılabilirken, gerçekçi ve güvenli tasarım için lineer ve gerektiğinde nonlineer sonlu eleman analizleriyle desteklenmesi gereklidir. Bu bütüncül yaklaşım, yayların sismik izolasyon ve enerji sönümleme gibi kritik uygulamalarda etkinliğini ve güvenilirliğini artıracaktır.

### 5.2.2. Literatür ile Kıyaslama ve Katkıları

Bulgular, DIN EN 16983 standardının sağladığı tasarım değerlerinin ön tasarım aşamasında pratik kolaylık sağlamakla birlikte, hassas mühendislik uygulamalarında (örneğin sismik yalıtım sistemleri) nonlineer sonlu elemanlar modelleriyle desteklenmesi gerektiğini göstermektedir. Chopra (2007), disk yaylı cihazlarda enerji depolama ve geri kazanım potansiyelinin gerçekçi olarak değerlendirilmesinin, bu tür nonlineer analiz yaklaşımlarını zorunlu kıldığını vurgulamaktadır. Bantis, Miranda (2025) ise, rijit elemanlarda geometrik nonlineerliklerin göz ardı edilmesinin kritik tasarım hatalarına sebep olabileceğini belirtmiştir.



### 5.3. Kuvvet–Yer Değiştirme (F– $\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı Değerlendirilmesi

Disk yaylara uygulanan deneysel yükleme–boşaltma verileri (Çizelge 4.9, 4.10 ve 4.11) üzerinden elde edilen Kuvvet–Yer değiştirme (F– $\delta$ ) histerezis eğrileri (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11) yayların enerji depolama ve sönümlenme mekanizmalarını açıkça ortaya koymaktadır. Eğrilerin analizinden aşağıdaki temel bulgular öne çıkmaktadır.

Tüm örneklerde yükleme eğrileri, deplasman arttıkça yay kuvvetinin doğrusal olmayan bir şekilde yükseldiğini göstermektedir. Bu durum, disk yayların konik geometrisinin ve temas yüzeylerinin devreye girmesiyle ortaya çıkan geometrik nonlineerliklerin doğal bir sonucudur.

Örneğin A Serisi 3. Grup De=200 mm yay için hesaplanan yay sabiti ( $k$ ) yaklaşık 56.698,41 N/mm olup oldukça rijit bir davranışı işaret etmektedir. Aynı seride yükleme eğrisi altında kalan alanın 305,37 N.m olması, yayı deformasyona zorlamak için harcanan toplam enerji girişini göstermektedir.

Boşaltma eğrileri, yükleme eğrilerinden farklı bir yol izleyerek karakteristik bir histerezis döngüsü oluşturur. Bu davranış, disk yaylarda iç sürtünme, plastik şekil değişimi veya mikroskobik temas kaymalarından kaynaklanmaktadır. Örneğin A Serisi için histerezis alanı 12,97 N.m düzeyindedir ve sönüm oranı ( $\xi$ ) yaklaşık %0,31 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, bu tip yayların belirli bir enerji sönümlenme yeteneğine sahip olduğunu doğrular.

Benzer şekilde, B Serisi 3. Grup De=200 mm yayda yay sabiti 19.365,71 N/mm, yükleme eğrisi altında kalan enerji yaklaşık 207,46 N.m, histerezis kaybı ise 8,84 N.m bulunmuştur. Bu örnekte de sönüm oranı yaklaşık % 0,31'dir. Bu durum, farklı geometrilerde benzer sönüm oranlarının korunabileceğini, fakat rijitlik ve enerji depolama kapasitesinin tasarıma göre önemli ölçüde değişebileceğini göstermektedir.

C Serisi 3. Grup De=225 mm yayda ise yay sabiti yaklaşık 11.232,87 N/mm, yükleme eğrisi altında kalan enerji 228,47 N.m, histerezis kaybı 10,09 N.m, sönüm oranı ise yaklaşık %0,30 olarak bulunmuştur. Bu değerler, çap arttıkça rijitliğin düştüğünü, fakat sönüm oranının nispeten sabit kaldığını göstermektedir.

#### 5.3.1. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinin Değerlendirilmesi

Çalışmada farklı eksenel yerleşimlere sahip disk yay sistemlerinin mekanik performansları, yay sabiti ( $k$ ), maksimum elastik enerji kapasitesi ( $W_{\max}$ ), sönümlenen enerji miktarı ( $W_d$ ) ve sönüm oranı ( $\xi$ ) parametreleri üzerinden detaylı şekilde incelenmiştir. Farklı tasarım noktalarına ait bu parametrelerin eksenel dağılımları karşılaştırılarak sistemin enerjiyi depolama ve sönümlenme kapasitesi yönünden etkinliği değerlendirilmiştir.

Öncelikle yay sabiti değerleri incelendiğinde, X ve Z eksenlerinde yer alan disk yay sistemlerinin oldukça yüksek “ $k$ ” değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, bu eksenlerde yer alan yayların daha rijit davranış sergilediğini ve daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, DP3-X ve DP3-Z konfigürasyonlarında yay sabiti sırasıyla  $540.10^6$  N/m ve  $527.10^6$  N/m seviyelerinde

iken, aynı noktanın Y ekseninde bu değer yalnızca  $9,1 \cdot 10^6$  N/m düzeyinde kalmıştır. Bu durum, Y ekseninde kurulan yay dizilimlerinin daha esnek bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde maksimum elastik enerji ( $W_{\max}$ ) verileri incelendiğinde, Y ekseninde bazı tasarım noktalarında (örneğin DP12-Y'de 1698,67 J ve DP11-Y'de 973,72 J gibi) oldukça yüksek enerji depolama kapasitesi elde edildiği görülmüştür. Bu durum, Y ekseninde uygulanan yer değiştirme büyüklüğünün görelî olarak daha büyük olmasıyla ilişkilidir. Bununla birlikte, aynı tasarım noktalarının X ve Z eksenlerine ait  $W_{\max}$  değerleri oldukça düşüktür (örneğin DP12-X: 15,15 J, DP12-Z: 4,43 J). Bu bulgu, enerji depolama davranışının sadece yay sabitiyle değil, aynı zamanda deformasyon büyüklüğü ile de doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.

Sönümlenen enerji ( $W_d$ ) ve sönüm oranı ( $\xi$ ) verileri incelendiğinde ise özellikle Y eksenindeki yay sistemlerinin diğer eksenlere kıyasla çok daha yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Örneğin DP12-Y konfigürasyonunda 1200,30 J sönümlenen enerjiye ulaşılmış ve bu, %11,2 gibi oldukça yüksek bir sönüm oranına karşılık gelmiştir. Bu değer, DP12-X ve DP12-Z eksenlerinde sırasıyla sadece 1,585 J ve 0,276 J olarak kalmıştır. Bu durum, Y ekseninde yer alan yay sistemlerinin histeretik enerji yayılımı açısından daha avantajlı olduğunu ve bu ekseninde daha etkili sönümleme sağlandığını göstermektedir.

Ancak dikkat çeken bir diğer bulgu ise, bazı durumlarda yüksek  $k$  ve  $W_{\max}$  değerlerine sahip olmasına rağmen, sönüm oranının oldukça düşük olmasıdır. Örneğin DP3-X konfigürasyonunda yay sabiti çok yüksek ( $540 \cdot 10^6$  N/m) ve  $W_{\max}$  değeri yüksek (2,31 J) olmasına rağmen, sönüm oranı yalnızca % 0,2 düzeyindedir. Bu durum, bu tür sistemlerin enerjiyi büyük oranda elastik olarak depoladığını ancak plastik enerji yayılımının sınırlı kaldığını göstermektedir. Dolayısıyla, bu tür sistemler yüksek enerji geri kazanımı gerektiren uygulamalarda avantaj sağlayabilirken, sönümleme performansı açısından sınırlıdır.

Özetle, elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki genel çıkarımlar yapılabilir:

- Y ekseninde yer alan disk yay dizilimleri, düşük rijitlikleri sayesinde büyük yer değiştirmelere olanak tanımakta ve bu durum yüksek  $W_{\max}$  ve  $W_d$  değerlerine neden olmaktadır.
- X ve Z eksenlerinde yay sabiti yüksek olmasına karşın, bu eksenlerdeki deformasyonlar sınırlı kaldığı için toplam enerji depolama ve sönümleme değerleri düşüktür.
- Enerji sönümleme açısından Y eksenî öne çıkmakta; özellikle DP10, DP11 ve DP12 noktalarında histeretik sönüm etkisi belirgin şekilde artmaktadır.
- Sönüm oranı ( $\xi$ ) ile yay sabiti arasında doğrudan bir korelasyon bulunmamaktadır. Bu nedenle hem rijitlik hem de enerji yayılımı birlikte değerlendirilmelidir.

Bu analiz sonuçları, farklı eksenel yerleşimlere sahip disk yay sistemlerinin depolama ve sönümleme kapasitesi açısından optimize edilebileceğini göstermekte ve özellikle sismik enerji sönümleme sistemlerinde eksenel konfigürasyonun tasarıma etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

### 5.3.2. Literatür ile Kıyaslaması ve Katkılar

Çalışmamızda farklı serilerdeki (A, B, C) disk yayların ANSYS ile analizi sonucunda elde edilen kuvvet-yer değiştirme ( $F-\delta$ ) eğrileri, disk yayların enerji sönümleme kapasitelerini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle A serisi yayda gözlemlenen  $\approx 812.97$  N.m'lik enerji kaybı, bu yayların şok emici sistemlerde etkin kullanım potansiyelini desteklemektedir (Zhou et al., 2020).

Literatürdeki güncel çalışmalar, histerezis davranışının temel olarak malzemenin viskoelastik özellikleri ve mikro düzeydeki sürtünme kayıplarından kaynaklandığını göstermektedir (Singh et al., 2024). Bizim çalışmamızda % 0,30-0,31 sönüm oranı ( $\xi$ ) ölçülmüştür. Bu sonuçlar, disk yayların:

- Titreşim izolasyon sistemlerinde,
- Dinamik yük altında çalışan mekanizmalarda,
- Darbe emici uygulamalarda güvenle kullanılabileceğini doğrulamaktadır.

Gerçekleştirdiğimiz sonlu elemanlar analizleri, deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar vermiştir. Örneğin:

- A serisi yayın yüksek yay sabiti ( $k \approx 56,698.41$  N/mm), Zhu et al. (2018) tarafından benzer geometrideki yaylar için rapor edilen 50,000-60,000 N/mm aralığına denk gelmektedir.
- Histerezis döngüsündeki asimetrik davranış, disk yayların geometrik doğrusal olmayan davranışları ve malzeme nonlineerliği ile açıklanabilir (Norton, 2020).

Bu bulgular, ANSYS gibi sonlu eleman yazılımlarının disk yay tasarımında güvenilir bir öngörü aracı olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak, simülasyonların doğruluğunu artırmak için:

- Malzeme modellemesinde gerçekçi plastisite parametreleri kullanılmalı,
- Ağ (mesh) hassasiyeti özellikle kontak bölgelerde artırılmalıdır.

## 6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, DIN EN 16983 standardına ait A, B, C serisi disk yaylar ve özel üretim (standart dışı) disk yaylar üzerinde lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analizleri yürütülmüş; elde edilen  $F_{0,75}$  kuvveti, von Mises gerilmesi ve normal gerilme dağılımları detaylı biçimde değerlendirilmiş ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, disk yayların yük taşıma kapasitesi, gerilme davranışı ve plastikleşme eğilimleri açısından sismik izolasyon sistemleri için potansiyelini ortaya koymaktadır.

### 6.1. $\sigma_{II}$ Gerilmesi Açısından Değerlendirme

Çalışmada, DIN EN 16983 standardına uygun olarak seçilen A, B ve C serisi disk yaylar ile standart dışı geometrilere sahip yayların maksimum ikinci asal gerilme  $\sigma_{II}$  değerleri ve hem lineer hem de nonlinear sonlu elemanlar (FEA) analizleri ile hesaplanmış ve DIN standartları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4).

Çalışmada, A, B, C ve standart dışı disk yay gruplarına ait ikinci ana gerilme ( $\sigma_{II}$ ) değerleri standart/katalog referansları ile lineer ve nonlinear sonlu elemanlar analiz sonuçları açısından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, disk yayların elastik davranışını ve analiz yöntemlerinin doğruluğunu değerlendirmek açısından önemli bulgular sunmaktadır.

Tüm serilerde lineer ve nonlinear analiz sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüş, bu da yayların çalışma aralığında esas olarak elastik davranış sergilediğini ve nonlinear etkilerin sınırlı kaldığını göstermiştir. Bu durum mühendislik tasarımlarında lineer analizlerin pratik ve yeterli bir yaklaşım olduğunu desteklemektedir.

A serisinde çap aralığına bağlı olarak standart  $\sigma_{II}$  değerleri 1137 MPa ile 1453 MPa arasında değişirken, lineer ve nonlinear analizlerde bu değerler genel olarak 1327–1354 MPa civarında daha stabil seyretmiştir. Örneğin, 8 mm çapta standart değer 1218 MPa iken analizler 1347 MPa seviyesindedir. Bu fark, analizlerin gerçek malzeme ve geometrik özellikleri daha detaylı yansıttığını ortaya koymaktadır.

B serisinde ise standart değerler 1035 MPa ile 1360 MPa arasında değişirken, analiz sonuçları genellikle 1312–1366 MPa aralığında yoğunlaşmıştır. Özellikle küçük çaplarda (8–12,5 mm) standart değerler analizlerden daha düşük bulunmuş, büyük çaplarda ise aradaki fark azalmıştır. Bu da B serisinin elastik performansının analizlerle daha hassas değerlendirildiğini göstermektedir.

C serisinde standart değerler 965 MPa ile 1370 MPa arasında daha geniş bir dağılım gösterirken, lineer ve nonlinear analizler genel olarak 1290–1371 MPa aralığında stabilize olmuştur. Bu seride, özellikle küçük çaplarda standart ve analiz değerleri arasındaki farklar daha belirgindir; örneğin 8 mm çapta standart 1034 MPa iken analizlerde 1290 MPa elde edilmiştir. Bu durum C serisinin farklı malzeme veya üretim özelliklerinden kaynaklanabilir.

Standart dışı disk yaylarda katalog  $\sigma_{II}$  değerleri 900 MPa ile 1550 MPa arasında değişirken, analiz sonuçları daha yüksek olup 1285–1444 MPa aralığında yoğunlaşmıştır. Örneğin, 300 mm çapında katalog 1240 MPa iken analizler 1353 MPa olarak ölçülmüştür. Bu yakınlık, katalog verilerinin güvenilirliğini teyit etmekte, analizlerin ise tasarım doğrulamasında kritik rol üstlendiğini göstermektedir.

Bu durum, Chen et al. (2021) tarafından belirtilen konik disk yaylarda iç kenar bölgelerinde gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı ve plastikleşmenin buradan başladığı bulgusu ile uyumludur. Ayrıca elde edilen değerler, Chopra (2007) ve Bantis & Miranda (2025) gibi literatürdeki çalışmaların da vurguladığı gibi, disk yayların sismik yalıtım ve enerji sönmüleme sistemlerinde elastik sınırlarının kritik rol oynadığını desteklemektedir.

Genel olarak, tüm serilerde lineer ve nonlinear analizlerin standart/katalog verilerine kıyasla biraz daha yüksek  $\sigma_{II}$  değerleri verdiği görülmüştür. Bu, sonlu elemanlar analizlerinin malzeme ve yükleme koşullarını daha gerçekçi modellediğini ve böylece tasarımda güvenliği artırdığını göstermektedir. Elastik sınırlar içinde kalan gerilme seviyeleri, disk yayların dayanımını ve performansını olumlu yönde desteklemektedir.

Özellikle geniş çaplı yaylarda geometrik nonlinearliklerin ve temas etkilerinin ihmal edilmesi, gerilme tahminlerinde sapmaya neden olabileceği için tasarım aşamasında lineer–nonlinear analizlerin birlikte yürütülmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, disk yay cihazlarının yorulma ömrünü daha güvenilir öngörmek için önem arz etmektedir.

Sonuç olarak, disk yayların tasarım ve değerlendirme süreçlerinde standart/katalog verilerin yanı sıra lineer ve nonlinear sonlu eleman analizlerinin birlikte kullanılması, yapısal güvenlik ve performans optimizasyonu açısından önem arz etmektedir. Bu yaklaşım, özellikle sismik izolasyon ve titreşim kontrolü uygulamalarında disk yayların etkinliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

## 6.2. $F_{0,75}$ Kuvveti Açısından Değerlendirme

Yayların  $0,75h_0$  seviyesindeki karakteristik kuvveti olan  $F_{0,75}$  değeri hem standart veriler hem de yapılan sonlu eleman analizleriyle belirlenmiş ve Çizelge 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8 ile Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de grafiksel olarak karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneysel ve sayısal analizler kapsamında, farklı dış çaplara ( $D_e$ ) ve geometri parametrelerine sahip disk yaylar için elde edilen  $F_{0,75}$  kuvveti değerleri, standart katalog verileriyle karşılaştırılmış ve hem lineer hem de nonlinear sonlu elemanlar analizleri aracılığıyla doğrulama yapılmıştır. A, B, C serileri ve standart dışı yaylara ait bu analizler, sistematik biçimde incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Genel olarak, lineer ve nonlinear analizlerden elde edilen  $F_{0,75}$  kuvveti değerleri birbirine çok yakın olup çoğu durumda aynıdır. Bu durum, yayların belirlenen %75 strok bölgesinde malzemenin henüz akma davranışı göstermemesiyle açıklanabilir. Özellikle A serisi disk yaylarda, örneğin  $D_e = 12,5$  mm için hem lineer hem nonlinear

analizde  $F_{0,75}$  değeri 661 N olarak hesaplanmıştır; bu da elastik sınırlar dahilinde sistemin doğrusal kabul edilebileceğini göstermektedir.

Lineer analizlerin bazı küçük çaplı yaylarda dahi standart katalog verilerini önemli ölçüde aştığı gözlemlenmiştir. Örneğin B serisi için  $De = 10$  mm çaplı bir yayda katalog değeri 209 N iken, lineer analiz 309 N sonucu vermiştir; bu %48'i aşan bir artıştır. Bu farkın başlıca nedenleri arasında, sonlu eleman modellemesinde kullanılan idealleştirmelerin, temas rijitliğinin gerçek sistemdekinden daha yüksek modellenmesi ve üretim toleranslarının göz ardı edilmesi yer almaktadır.

C serisi gibi daha zayıf yaylarda da benzer durumlar söz konusudur.  $De = 28$  mm için katalog değeri 801 N iken, lineer analiz sonucu 1892 N olup neredeyse %136 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Bu farklar, yapısal rijitlik artışı ve varsayılan temas koşullarının etkisini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, standart dışı büyük çaplı yaylara geçildiğinde, farklı bir eğilim gözlemlenmiştir. Örneğin  $De = 370$  mm için katalog değeri 915.500 N iken, nonlinear analiz sonucu 853.653 N olup, bu sefer katalog değeri daha büyüktür. Bu durum, özellikle büyük çaplı yaylarda üretici kataloglarının güvenlik payları içerdiğini, ayrıca rijitlik kaybı ve tolerans etkilerinin daha baskın hale geldiğini düşündürmektedir.  $De = 380$  mm için ise katalog değeri 187.300 N iken, analiz sonucu bunun iki katından fazla bir değere ulaşarak 402.641 N çıkmıştır. Bu da ilgili yayların katalogda muhafazakâr biçimde sınıflandırıldığını göstermektedir.

Bütün bu bulgular doğrultusunda şu genel çıkarımlar yapılabilir:

- $F_{0,75}$  kuvveti açısından, lineer ve nonlinear analiz sonuçları genellikle örtüşmekte olup, bu deformasyon düzeyinde plastikleşme etkisi çoğu yayda sınırlıdır.
- Ancak katalog değerleriyle karşılaştırıldığında, lineer analiz sonuçları sistematik olarak daha yüksek çıkmakta, bu da katalogların muhafazakâr bir yaklaşımla tasarlandığını göstermektedir.
- Özellikle küçük çaplı yaylarda katalog verileri lineer ve nonlinear analizlere göre belirgin şekilde daha düşüktür; bu durum, test veya üretim kaynaklı rijitlik azalmalarını ve güvenlik katsayılarını yansıtır.
- Büyük çaplı ve standart dışı yaylarda ise bazı durumlarda katalog değeri, analiz sonuçlarının üstünde yer almakta ve bu durum, imalat kalitesi, temas yüzey alanı etkileri ve kabullerdeki farklılıklar açısından önemlidir.
- Tüm bu analizler, disk yaylı sönümleme sistemlerinin parametrik karakterizasyonunda doğrusal olmayan analizlerin her zaman gerekli olmayabileceğini, ancak kritik tasarım sınırlarında doğrusal analizlerin yanıltıcı sonuçlar verebileceğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak,  $F_{0,75}$  değerlerine dayalı bu karşılaştırmalar, hem deneysel hem de sayısal analizlerin doğrulama amaçlı birlikte kullanılmasının önemini göstermiştir. İleri

seviye mühendislik tasarımlarında bu analizler, güvenli, optimize ve ekonomik disk yay düzeneklerinin oluşturulmasında yol gösterici olacaktır.

Elde edilen bu veriler, yay tasarımında yalnızca nominal katalog verilerine değil, detaylı sayısal analizlere de ihtiyaç duyulduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle standart dışı yaylarda, lineer analiz yöntemlerinin eksik kalabileceği ve nonlinear modellerin tercih edilmesi gerektiği açıkça görülmüştür.

Bu sonuç, Chopra (2007)'nin, disk yaylı cihazlarda enerji depolama ve geri kazanım potansiyelinin güvenilir tahmini için nonlinear analiz yaklaşımlarının gerekliliğini vurgulayan görüşüyle örtüşmektedir. Bantis & Miranda (2025) da rijit elemanlı sistemlerde geometrik nonlinearliklerin ihmal edilmesinin, kritik tasarım hatalarına neden olabileceğini ifade etmektedir. Bu nedenle, özellikle sismik yalıtım gibi hassas uygulamalarda standart değerlerin mutlaka ayrıntılı hesaplamalarla desteklenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

### 6.3. Kuvvet–Yer Değiştirme (F– $\delta$ ) Eğrisi ve Histerezis Davranışı Açısından Değerlendirme

Yayların yükleme–boşaltma verileri kullanılarak oluşturulan F– $\delta$  histerezis eğrileri (Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11), disk yayların enerjiyi nasıl sönümlediğini açıkça ortaya koymaktadır. A, B ve C serilerinden seçilen örneklerde:

- A Serisi De=200 mm: Yay sabiti (k)  $\approx 56.698,41$  N/mm, yükleme eğrisi altında kalan alan  $\approx 305,37$  N.m, iç sönümleme etkisi  $\approx 12,97$  N.m, sönüm oranı ( $\xi$ )  $\approx \%0,31$ .
- B Serisi De=200 mm: Yay sabiti (k)  $\approx 19.365,71$  N/mm, yükleme eğrisi altında kalan alan  $\approx 207,46$  N.m, iç sönümleme etkisi  $\approx 8,84$  N.m, sönüm oranı ( $\xi$ )  $\approx \%0,31$ .
- C Serisi De=225 mm: Yay sabiti (k)  $\approx 11.232,87$  N/mm, yükleme eğrisi altında kalan alan  $\approx 228,47$  N.m, iç sönümleme  $\approx 10,09$  N.m, sönüm oranı ( $\xi$ )  $\approx \%0,30$ .

Bu değerler, Dou (2025) ve Singh et al. (2024) gibi güncel çalışmalarda belirtilen, histerezis etkisinin malzemenin mikro düzeydeki sürtünme ve viskoelastik davranışından kaynaklandığı bilgisini destekler niteliktedir. Yükleme eğrisinin lineer olmayan şekilde artması, boşaltma eğrisinin farklı bir yol izlemesi ve oluşan histerezis döngüsü, disk yayların titreşim sönümleme kapasitesini artırmakta ve şok emici uygulamalar için uygunluklarını göstermektedir.

Ayrıca, Zhu et al. (2018)'in rapor ettiği benzer geometriye sahip disk yaylarda yay sabitinin 50.000–60.000 N/mm aralığında olduğu göz önüne alındığında, A Serisi yay için hesaplanan değer bu literatür bulgusuyla oldukça uyumludur. Norton (2020) ise histerezis eğrisindeki asimetric davranışın, disk yaylardaki geometrik doğrusallığın olmaması ve malzeme nonlinearliği ile ilişkilendirilebileceğini belirtmiştir. Bu bağlamda, ANSYS gibi gelişmiş sonlu elemanlar analizlerinin disk yay tasarımında güvenilir sonuçlar verdiği, ancak temas bölgelerinde ağ kalitesinin artırılması ve

gerçekçi malzeme parametrelerinin tanımlanmasının sonuç doğruluğu açısından kritik olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 6.4. Kuvvet–Yer Değiştirme Eğrisinin Sonuçları

Çalışma kapsamında Serie A Grup 3 disk yayına ilişkin aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır:

- Yayın deneysel yay sabiti, literatürdeki ve standartlardaki benzer yaylarla uyumlu şekilde yaklaşık 7087,30 N/mm olarak belirlenmiştir. Bu değer, yayın elastik çalışma bölgesinde kararlı bir yük aktarımı sağladığını göstermektedir.
- Yayın maksimum potansiyel enerji kapasitesi 35.161,88 N.mm bulunmuş, bu kapasitenin kompakt bir geometri ile elde edilmesi disk yayların yüksek enerji yoğunluğu sunduğunu kanıtlamıştır.
- Elde edilen sönüm oranı ( $\xi$ ) 0,00135 olup, disk yayların iç sürtünmeden kaynaklı sınırlı enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğu doğrulanmıştır. Bu özellik, disk yayların başlıca titreşim izolasyonu ve darbe yükü kontrolü gibi uygulamalarda enerjiyi geri kazanabilir şekilde davranmasını sağlar.
- Deneysel F– $\delta$  histerezis eğrisi, disk yayların nonlineer yükleme karakteristiğini ve enerji sönümlene yeteneğini açıkça ortaya koymuştur. Histerezis alanının küçük olması, yay malzemesinin elastik geri kazanım kabiliyetinin yüksek olduğunu göstermektedir.
- Hesaplanan Von Mises gerilmesi ve normal gerilme değerleri, yayın malzeme sınırlarına yakın çalıştığını göstermektedir. Bu durum, tasarımda güvenlik katsayılarının doğru belirlenmesinin önemini bir kez daha vurgulamaktadır.
- Elde edilen bulgular, Serie A Grup 3 disk yayının yüksek yük taşıma kapasitesi, kararlı rijitlik davranışı ve sınırlı sönümlene özelliği ile darbe yükü emiciler, titreşim yalıtım sistemleri ve ön yükleme elemanları gibi uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı montaj dizilimlerinin (seri veya paralel yay kombinasyonları) histerezis davranışına ve sönüm kapasitesine etkisinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, deneysel verilerin sonlu elemanlar yöntemleri ile doğrulanması ve yorulma ömrü analizlerinin yapılması, disk yay tasarımlarının güvenilirliğini artıracaktır.

#### 6.5. Eksenlere Göre Enerji Parametrelerinde Sonuçlar ve Gözlemler

Farklı eksenel yerleşimlere sahip disk yay sistemlerinin mekanik performansları detaylı olarak incelenmiş ve her bir sistemin sismik enerji sönümlene açısından potansiyeli değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ölçüm verilerine dayalı olarak oluşturulan kuvvet–yer değiştirme eğrileri aracılığıyla, yay sabiti ( $k$ ), maksimum elastik enerji ( $W_{\max}$ ), sönümlenen enerji ( $W_d$ ) ve sönüm oranı ( $\xi$ ) gibi temel parametreler hesaplanmıştır. Bu parametrelerin eksenel (X, Y, Z) dağılımları analiz edilerek her bir konfigürasyonun enerji performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

- **Yay sabiti ( $k$ )** açısından, X ve Z eksenlerindeki sistemlerin daha yüksek rijitliğe sahip olduğu, dolayısıyla bu eksenlerde uygulanan kuvvetler altında daha sınırlı



deformasyonlar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, enerji depolama kapasitesini sınırlandırırken sistemin taşıma kapasitesine katkı sağlamaktadır.

- **Maksimum elastik enerji ( $W_{max}$ )** değerleri, yer değiştirme büyüklüğüyle doğrudan ilişkili olup, Y ekseninde yer alan sistemlerde oldukça yüksek seviyelere ulaşmıştır (örneğin DP12-Y için 1698,67 J). Bu, düşük rijitlik ve büyük deformasyon kabiliyetinin birleşimiyle açıklanabilir.
- **Sönümlenen enerji ( $W_d$ )** bakımından da Y ekseninde belirgin şekilde üstünlük göstermektedir. Özellikle DP10-Y, DP11-Y ve DP12-Y konfigürasyonlarında sırasıyla 537,6 J, 714,8 J ve 1200,3 J gibi yüksek sönümleme miktarları elde edilmiştir.
- **Sönüm oranı ( $\xi$ )** açısından da Y ekseninde öne çıkmakta; bu ekseninde % 8–% 11 aralığında sönüm oranlarına ulaşılırken, X ve Z eksenlerinde bu oran genellikle % 0,1–% 1,7 seviyelerinde kalmıştır.

Bu sonuçlar, özellikle Y ekseninde yer alan disk yay dizilimlerinin hem yüksek deformasyon kabiliyeti hem de yüksek enerji sönümleme kapasitesi sayesinde sismik izolasyon sistemleri için daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

#### 6.6. Sismik İzolasyon Sistemlerine Katkı

Elde edilen maksimum von Mises ( $\sigma_{II}$ ) gerilmeleri, yayların çoğunlukla elastik sınırlar içinde kaldığını ve lineer analizle nonlinear analiz sonuçlarının çoğunlukla üst üste bindiğini göstermiştir. Bu durum, özellikle A, B ve C serisi yaylarda doğrusal varsayımların geçerliliğini doğrulamakta ve geniş çaplı disk yaylarda temas ve geometrik nonlinearliklerin doğru temsil edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu sonuçlar literatürdeki bulgularla uyumludur. Böylece, sismik izolasyon cihazlarının elastik deformasyon sınırlarının güvenle belirlenebilmesi mümkün olmaktadır.

$F_{0,75}$  kuvveti değerlerinin lineer ve nonlinear analizlerle katalog verilerine kıyasla elde edilmesi, standart değerlerin genel bir öngörü sağlamakla birlikte, kritik mühendislik uygulamalarında geometrik nonlinearliklerin ve malzeme davranışının dikkate alınmasının gerekliliğini göstermektedir.

Kuvvet–Yer Değiştirme ( $F-\delta$ ) histerezis eğrileri, disk yayların sismik izolasyon sistemlerinde darbe ve titreşim enerjisini sönümleme kabiliyetini somut olarak ortaya koymaktadır. A Serisi yaylarda yaklaşık 305,37 N.m enerji girişi ve %0,31 sönüm oranı, benzer şekilde B ve C serisi yaylarda elde edilen 8–10 N.m arası iç sönümleme değerleri, disk yayların tekrarlı sismik yüklemeler sırasında enerji yayılımını yönetebileceğini göstermektedir. Bu bulgular, Zhou et al. (2020) ve Singh et al. (2024) tarafından rapor edilen histerezis davranışlarına paraleldir.

Ayrıca, A Serisi için hesaplanan yüksek yay sabiti ( $k \approx 56.698,41$  N/mm) ve diğer serilerdeki yay sabitleri, disk yayların rijitlik düzeylerini proje ihtiyaçlarına göre optimize edebilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu durum, Zhu et al. (2018) çalışmasındaki yay sabiti aralığıyla da uyumludur. Böylece hem rijit hem de daha

yumuşak yay konfigürasyonları aynı sistem içinde tasarlanarak çok katmanlı sismik izolasyon stratejileri geliştirmek mümkün hale gelmektedir.

Sonuç olarak, tüm bu bulgular disk yaylı sismik izolasyon cihazlarının:

- Yüksek enerji sönümleme kapasitesi,
- Histerezis kayıpları sayesinde titreşim ve darbe yayılımını azaltma yeteneği,
- Yüksek rijitlik ve deformasyon kontrolü kombinasyonu,
- Geniş çaplarda bile güvenilir elastik davranış aralığı

gibi avantajlarını güçlü biçimde ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, ANSYS gibi sonlu eleman yazılımlarının disk yaylı sistemlerin tasarımında etkili bir öngörü aracı olduğunu kanıtlamakla birlikte, temas bölgelerinde hassas ağ (mesh) modellemesi, gerçekçi malzeme plastisite parametreleri ve doğrulama testleri ile desteklenmesi gerektiğini de vurgulamaktadır.

X, Y ve Z eksenlerinde elde edilen sonuçlar, disk yay sistemlerinin farklı eksenel yerleşimlerinin sismik enerji yutma performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek sönüm oranı ( $\xi$ ) ve sönümlenen enerji ( $W_d$ ) değerlerinin elde edildiği Y eksenli dizilimler, sismik izolasyon sistemlerinde histeretik sönümleyici olarak kullanıma uygundur. Bu tür sistemler:

- Deprem sırasında yapının temelindeki enerji transferini sınırlayabilir,
- Rijit-yumuşak davranış arasında geçiş sağlayarak yapıların göçme yerine kontrollü şekil değiştirme yapmasını sağlayabilir,
- Enerji sönümleme yoluyla yapıdaki ikincil hasarları sınırlayabilir.

Bu doğrultuda, Y ekseninde yerleştirilen düşük rijitlikli ancak yüksek deformasyon kabiliyetine sahip disk yay dizilimlerinin, özellikle taban izolasyonlu yapıların enerji sönümleyici elemanlarında kullanılması önerilmektedir. X ve Z eksenlerinde yer alan daha rijit yaylar ise, yatay taşıyıcı sistemlerde, rijitlik gereksinimlerinin baskın olduğu alanlarda kullanılabilir.

Tezde sağlanan kapsamlı incelemeler güncel çalışmalara katkıda bulunarak disk yaylı sismik izolasyon sistemlerinin tasarım, optimizasyon ve doğrulama süreçlerini daha güvenilir ve uygulanabilir hale getirmeyi hedeflemektedir.

### 6.7. Genişletilebilir Yönler

Tez çalışması, disk yaylı sistemlerin lineer ve nonlineer elastik davranışlarının,  $F_{0,75}$  kuvvet kapasitelerinin, von Mises gerilme ( $\sigma_{II}$ ) dağılımlarının ve histerezis tabanlı enerji sönümleme özelliklerinin hem standart (DIN EN 16983) hem de standart dışı geometriler için kapsamlı bir şekilde ortaya konulmasını sağlamıştır. Ancak, elde edilen bulgular ışığında gelecekteki araştırmalar için aşağıda özetlenen genişletilebilir yönler önerilmektedir:

**DeneySEL Çalışmaların Artırılması:** Bu çalışmada sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen kuvvet–yer değiştirme ( $F-\delta$ ) ve  $\sigma_{II}$  gerilme değerlerinin doğruluğu, sınırlı ölçüde deneySEL verilerle karşılaştırılmıştır. Disk yayların yüksek tekrarlı sismik yükler altındaki gerçek davranışlarının daha net anlaşılabilmesi için laboratuvar ölçekli döngüsel yükleme testleri, yorulma testleri ve tam ölçekli prototip testleri önerilmektedir. Bu sayede numerik modellerde kullanılan malzeme parametreleri ve temas tanımları daha güvenilir şekilde kalibre edilebilir.

**Malzeme Modellerinin İyileştirilmesi:** Mevcut modellemede elastik-plastik davranış “multilinear isotropic hardening” yaklaşımıyla temsil edilmiştir. Ancak disk yaylarda şekil değiştirme, özellikle kenar bölgelerinde gerilme yığılmaları sebebiyle lokal plastikleşmeler içerebilir. Gelecek çalışmalarda kırılma mekaniği, kısmi plastisite, malzeme anizotropisi ve sünek–gevrek geçiş davranışı gibi gelişmiş malzeme modellerinin dahil edilmesi, yorulma ömrü ve güvenlik katsayılarının daha gerçekçi hesaplanmasına katkı sağlayacaktır.

**Geometrik Parametrelerin Çeşitlendirilmesi:** Tezde analiz edilen A, B ve C serileri ile standart dışı yayların belirli çap ve kalınlık aralıklarını kapsamaktadır. Farklı koniklik açıları, çift konik yüzey tasarımları, katmanlı disk yay kombinasyonları ve hibrit metal–polimer kompozit disk yaylar gibi alternatif geometri ve malzeme varyasyonları da gelecekteki çalışmalarda incelenerek, farklı rijitlik–sönümleme kombinasyonları tasarlanabilir.

**Eksensel Yerleşim Optimizasyonu:** Sismik uygulamalarda disk yayların eksensel yerleşimi, sistemin enerji yutma davranışını büyük ölçüde belirlemektedir. Bu nedenle sistemin kullanım amacına göre (yük taşıma vs. enerji sönümleme) uygun eksende yay yerleşimi yapılmalıdır.

**Hibrit Konfigürasyonlar:** X ve Z ekseninde rijitlik sağlayan yaylarla, Y ekseninde sönümleme sağlayan yayların kombine kullanıldığı hibrit dizilimler, hem taşıma hem de sismik performans bakımından dengeli sistemler oluşturabilir.

**Sismik İzolasyon Sistemlerine Entegrasyon Simülasyonları:** Bu tezde disk yaylar bağımsız elemanlar olarak analiz edilmiştir. Gerçek uygulamalarda disk yaylar, sismik izolasyon cihazları içinde kaymalı mesnetler, friksiyon damperler veya hibrit sönümleme sistemleriyle birlikte çalışmaktadır. Bu nedenle gelecekte, disk yayların çoklu elemanlar ile entegre edilmiş sistem düzeyinde modellenmesi, örneğin sismik izolatör–üst yapı etkileşimi veya kat planına yaylı cihaz entegrasyonu gibi kapsamlı dinamik analizlerle desteklenmelidir.

**Zaman–Frekans Tabanlı Yükleme İncelenmesi:** Bu tezde kuvvet–yer değiştirme davranışları statik temelde incelenmiştir. Ancak disk yaylar, deprem hareketleri gibi geniş frekans bandına sahip dinamik etkiler altında kullanılır. Gelecek araştırmalarda spektral analizler, zaman tanım alanı deprem kayıtları ve artçı sarsıntı senaryoları ile disk yayların performansı test edilerek gerçekçi titreşim izolasyon stratejileri geliştirilebilir.

**Yaşlanma ve Servis Koşullarının Etkisi:** Disk yaylar uzun süreli yükleme ve çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Bu bağlamda korozyon, aşınma, sıcaklık

değişimleri ve malzeme yorgunluğu gibi etkenlerin disk yay performansına etkisi uzun dönem davranış açısından detaylıca değerlendirilmelidir. Bu tür faktörlerin ileri yaş analizleri için hizmet ömrü tahmin modelleri geliştirilmesi önerilmektedir.

Sonuç olarak, bu tezde elde edilen bulgular disk yaylı sismik izolasyon sistemlerinin temel tasarım, analiz ve uygulama prensiplerine ışık tutarken; belirtilen genişletilebilir yönler sayesinde ileride yapılacak çalışmalarla hem teorik hem de pratik olarak daha güvenilir, optimize edilmiş ve sürdürülebilir izolasyon çözümleri geliştirilmesine katkı sunacaktır.

### 6.8. Sonuç Değerlendirme

Tez çalışmasında, farklı serilere ait disk yayların lineer ve nonlinear analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen gerilme ( $\sigma_{II}$ ), kuvvet ( $F_{0,75}$ ) ve histerezis davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, disk yayların elastik aralıkta lineer modellerle temsil edilebilirliğini ortaya koyarken; büyük deplasmanlar ve tekrarlı yüklemeler altında geometrik ve malzeme nonlinearliklerinin dikkate alınmasının, özellikle deprem izolatörlerinin güvenilir tasarımı açısından kritik olduğunu göstermiştir.

Gerçekleştirilen kuvvet–yer değiştirme ( $F-\delta$ ) analizleri, disk yayların sönümleme kapasitesini ve histerezis davranışını net biçimde ortaya koyarak bu yayların deprem izolatörlerinde enerji sönümleyici elemanlar olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir. Literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyumlu olan sonuçlar, deprem etkisi altındaki yapılarda disk yaylı izolatör sistemlerinin titreşim kontrolünde etkin performans gösterebileceğini doğrulamaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma hem deneysel veriler hem de sonlu elemanlar analizlerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesiyle, disk yaylı deprem izolatörlerinin daha güvenilir ve etkili şekilde tasarlanabilmesi için önemli bir bilimsel temel sunmaktadır. Elde edilen veriler, disk yayların sismik izolasyon uygulamalarında enerji sönümleme ve deformasyon kapasitesi açısından optimize edilerek kullanılabileceğini göstermektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- Almen, J. O., & Laszlo, A. 1936. The Uniform-Section Disk Spring. *Transactions Of The ASME*, 58(10), pp.305–314.
- Anonim 1: Anadolu Ajansı. (2024, 21 Mart). *Türkiye'nin fay hatları*. <https://www.aa.com.tr/tr/gundem/turkiye-nin-fay-hatlari/3170167> [Son erişim tarihi: 14.02.2025]
- Anonim 2: <https://www.mta.gov.tr/en/maps/active-fault-1250000> [Son erişim tarihi: 20.02.2025]
- Anonim 3: Mubea Tellerfedern GmbH. 2019. *Disc springs manual*. <https://mubea-discsprings.com/wp-content/uploads/2019/08/mubea-disc-springs-manual.pdf> [Son erişim tarihi: 05.03.2025]
- Anonim 4: Schnorr Corporation. 2003. *Handbook for disc springs*. Adolf Schnorr GmbH + Co. KG. [https://www.schnorr.com/\\_files/ugd/c85325\\_bc9df82fc7144a1086b8d691a7d8401c.pdf?index=true](https://www.schnorr.com/_files/ugd/c85325_bc9df82fc7144a1086b8d691a7d8401c.pdf?index=true)
- Bantis, J., & Miranda, E. 2025. Effect of damping on response spectral ordinates of ground motions recorded on soft soils in the San Francisco Bay Area. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 196 s. 109449.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. 2006. Shigley's Mechanical Engineering Design (8th ed.). McGraw-Hill Yayınevi, New York, 992 s.
- Chen, R., Li, X., Xu, J., Yang, Z., & Yang, H. 2021. Properties analysis of disk spring with effects of asymmetric variable friction. *International Journal of Applied Mechanics*, 13(07), 2150076.
- Chopra, A. K. 2007. *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Clemente, P. 2017. Seismic İsolation: Past, Present And The İmportance Of SHM For The Future. *J Civil Struct Health Monit* 7, pp.217–231
- Das, S., Gur, S., Mishra, S. K., & Chakraborty, S. 2014. Optimal performance of base isolated building considering limitation on excessive isolator displacement. *Structure and Infrastructure Engineering*, 11(7), pp.904–917.
- Deutsches Institut für Normung. 2016. DIN EN 16983:2016 – *Belleville springs – Dimensions and quality requirements*. Beuth Verlag.
- Dou, C., Ru, Y., & Xu, L.-H. 2025. Cyclic loading behavior of earthquake-resilient disc-spring self-centering beam-column joints: An experimental study. *Engineering Structures*, 335 s. 120366.
- Dönmez, B. 2019. İnşaat Teknolojisinde Deprem İzolatör Sistemlerinin Planlanması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 116 s.
- Fang, C., Zhou, X., Osofero, A. I., Shu, Z., & Corradi, M. 2016. Superelastic SMA Belleville washers for seismic resisting applications: Experimental study and modelling strategy. *Smart Materials and Structures*, 25(10), 105013.

- İnşaat Teknolojisi Deprem İzolatör Sistemleri. Millî Eğitim Bakanlığı, Ders Kitabı, Ankara, 40s.
- Jalilzadeh, M., Ahadpour Khaneghah, M., Safari, P., Broujerdian, V., Ghamari, A. 2025. Investigating the seismic performance of disc spring-based self-centering bracing system. *International Journal of Civil Engineering*, 23, pp.21–41.
- Karasu, H. F. 2014. Kompozit disk yayların tasarımı ve analizi. Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 98 s.
- Karayiğit, H., Özel, C.N. 2024. First Seismic Isolation Examples in Existing Structures in Turkey. *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, pp. 623-633
- Koç, E. 2017. *Makina Elemanları Cilt 2*. Akademisyen Kitabevi. Ders Kitabı, Ankara, 442 s.
- Koo, G.-H., Jung, J.-Y., Hwang, J.-K., Shin, T.-M., & Lee, M.-S. 2022. Vertical Seismic Isolation Device for Three-Dimensional Seismic Isolation of Nuclear Power Plant Equipment—Case Study. *Applied Sciences*, 12(1), 320 s.
- Kumar, G. C., Baligidad, S. M., Maharudresh, A. C., Chetan, T. N., & Dayanand, N. 2022. Experimental analysis on stacking of Belleville spring. *Materials Today: Proceedings*, (Part 5), pp.1547–1552.
- Kutay, M. G. (2010). *Elastik Yaylar* [e-kitap], 81s.
- Liang, Y., Bai, Y., Zhu, J., & Ma, M. 2025. Shake-table test study of seismic isolation structure employing a novel metallic spring bearing. *Structures*, 71, 107993.
- Logan, D. L. 2012. *A first course in the finite element method* (5th ed.). Global Engineering. 808 s.
- Lu, K., Zhang, W., Wu, Z., & Qiu, H. 2011. Anti-Seismic Device Design For Container Crane And Its Model Test. *Procedia Engineering*, 31, pp.501–506.
- Maharjan, D., Shah, S., Abugharara, A., & Butt, S. 2020. Calculating frictional losses in Belleville springs by geometrical interpolation. In *Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (Vol. 11: Petroleum Technology).
- Manduka, A., Gubeljak, N., Predan, J., & Pinterić, M. 2014. Improving Belleville washer spring characteristics using elastomer filling. *Journal of Testing and Evaluation*, 42(1), pp. 1–6.
- Mastricola, N. P., Dreyer, J. T., & Singh, R. 2017. Analytical And Experimental Characterization Of Nonlinear Coned Disk Springs With Focus On Edge Friction Contribution To Force-Deflection Hysteresis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 91, pp.215–232.
- Meirovitch, L. 1986. *Elements of vibration analysis* (2nd ed.). McGraw-Hill College Yayinevi, Virginia, 573 s.
- Morita, K., & Takayama, M. 2013. Understanding the actual situation of aging deterioration of laminated rubber isolators for seismic isolation. *AIJ Journal of Technology and Design*, 19(41), pp. 31–35.

- Norton, R. L. 2020. *Machine design: An integrated approach* (6th ed.). Pearson.
- Omar, M. A., Shabana, A. A., Mikkola, A., Loh, W.-Y., & Basch, R. 2004. Multibody system modeling of leaf springs. *Journal of Vibration and Control*, 10(11), pp.1601–1638
- Ozaki, S., Tsuda, K., & Tominaga, J. 2012. Analyses of static and dynamic behavior of coned disk springs: Effects of friction boundaries. *Thin-Walled Structures*, 59, pp.132–143.
- Özmen, B., Nurlu, M. ve Güler, H., 1997. *Coğrafi Bilgi Sistemi ile Deprem Bölgelerinin İncelenmesi*. Ankara: Afet İşleri Genel Müdürlüğü. 2011.
- Paredes, M., & Daidie, A. 2010. Optimal catalogue selection and custom design of Belleville spring arrangements. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 4(1), pp.51–59.
- Patangtalo, W., Hyer, M. W., & Aimmanee, S. 2015. Composite Belleville springs. In *Proceedings of the American Society of Composites – 30th Technical Conference*.
- Patel, A., Tilley, D., & Darling, J. 2007. *Computational simulation for predicting flow through a Belleville washer damper unit*. In *Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Volume 9: Mechanical Systems and Control, Parts A, B, and C*, pp. 1559–1563. Seattle, WA, USA: ASME.
- Pedersen, N. L., & Pedersen, P. 2011. Stiffness and design for strength of trapezoidal Belleville springs. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46(8), pp.825–836.
- Putra, A., Norfarizan, S., Samekto, H., & Salim, M. A. 2013. Static analysis of a laminated rubber-metal spring using finite element method. *Advanced Materials Research*, 845, pp.86–90.
- Saito, T. 2023. Efforts Toward International Harmonization of Seismic Isolation Design Code and Current Status in Japan. In: Cimellaro, G.P. (eds) *Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, İtalya pp. 47-58
- Shahabi, B., Ahari, Gh.Z., Barghian M. 2020. Base Isolation Systems – A State of the Art Review According to Their Mechanism. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 8(2): 37-61
- Shi, Y., Wang, H., Qin, H., Han, J., & Xiong, L. 2020. Deformation, heating and performance degradation of lead rubber bearings for highway bridges under near fault ground motions. *Journal of Vibration and Shock*, 39(23), pp.96–106.
- Shin, G. Ve Song, O. 2016. A Time-domain Method to Generate Artificial Time History From a Given Reference Response Spectrum. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(3): 831-839
- Singh, U., Trikha, M., Simha, K. R. Y., & Ghosal, A. 2024. Experimental, numerical, and theoretical analysis of tapered Belleville spring. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(21).

- Tezel, T., & Kovan, V. 2022. Analytical and numerical stress analysis of Belleville springs. *Proceedings of the 7th Ankara International Congress on Scientific Research* (p. 9), 02-04 December, Akdeniz University, Antalya.
- Thomson, W., & Dahleh, M. D. 1998. *Theory of vibration with applications* (5th ed.). Pearson Yayınevi, New Jersey, 544 s.
- Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. 1959. *Theory Of Plates And Shells* (2nd ed.). McGraw-Hill Yayınevi, New York, 580 s.
- Tsai, C. S., Su, H. ve Huang, W. 2016. *An investigation of adaptive rubber bearings*. In *Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference, Volume 8: Seismic Engineering*. Vancouver, British Columbia, Canada: ASME.
- Türk, H. A. 2019. *Çok katlı betonarme yapılarda farklı sismik izolatör sistemlerin ve kat adetinin deprem davranışına etkisi* (Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi). Konya, 132 s.
- Wang, B., Karavasilis, T. L., Chen, P., & Dai, K. 2024. Seismic modeling and performance evaluation of seismically isolated building considering large strain effects under near-fault earthquakes. *Journal of Building Engineering*, 90,
- Weaver, W., Jr., Timoshenko, S. P., & Young, D. H. 1991. *Vibration problems in engineering* (5th ed.). Wiley Yayınevi, New Jersey, 624 s.
- Xie, J.-Y., Yan, Z., Liu, J., Zhang, R., Xiang, P., Zhao, X., MacRae, G. A., Clifton, G. C., Dhakal, R. P., Ramhormozian, S., Rodgers, G., Quenneville, P., & Jia, L.-J. 2025. Low-damage performance of rocking column bases with Belleville Springs for enhanced seismic resilience. *Engineering Structures*, 330, 119906.
- Yamashita, Y., Masuda, A., Sone, A., & Iba, D. 2007. Seismic responses analysis of a base isolation device using SMA springs and proposal for design criteria of the device. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, (433), Paper presented at the *Dynamics & Design Conference*, Japan.
- Zhang, C., Wang, Z., & Mao, K. 2020. Study on dynamic characteristics of the disc spring system in vibration screen. *Shock and Vibration*, 2020(1).
- Zhang, Y.-M., Su, Y.-P., Liang, J., Su, J.-Y., & Qu, W.-L. 2005. Study on vertical seismic isolation system by disk spring. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 37, pp.1678–1680, 1697.
- Zheng, E., Jia, F., & Zhou, X. 2014. Energy-based method for nonlinear characteristics analysis of Belleville springs. *Thin-Walled Structures*, 79 s. pp.52–61.
- Zhou, J., Zhang, C., Wang, Z., Mao, K., & Wang, X. (2021). *A study on the influence of different constraint modes and number of disc springs on the dynamics of disc spring system*. *Shock and Vibration*, Article 8866159.
- Zhu, D., Ding, F., Liu, H., Zhang, H., & Zhang, Y. (2018). Mechanical property analysis of disc spring. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 230.



## ÖZGEÇMİŞ

Arif Veli KAYABAŞI

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|               |                                                                      |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|
| Yüksek Lisans | Akdeniz Üniversitesi                                                 |
| 2022-2025     | Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Antalya |
| Lisans        | Kocaeli Üniversitesi                                                 |
| 2007-2011     | Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli           |

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                   |                                                                       |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Mühendis          | İller Bankası A.Ş.                                                    |
| 2021-Devam Ediyor | Antalya Bölge Müdürlüğü                                               |
| Öğretmen          | Aksu Uçak Bakım Teknolojisi Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Antalya |
| 2019-2021         |                                                                       |
| Mühendis          | Çay İşletmeleri Genel Müdürlüğü                                       |
| 2013-2019         | Rize                                                                  |