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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# ARD GERMELİ BETONARME KİRİŞLERDE ARD GERME HALATININ GEOMETRİK FORMUNUN KİRİŞİN TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Gamze İZOL**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA**
**2021**

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**


ÖZET ..... i
ABSTRACT ..... ii
TEŞEKKÜR ..... iii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... iv
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... vii
1. GİRİŞ ..... 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ..... 3
3. MATERYAL ve YÖNTEM ..... 7
3.1. Materyal ..... 7
3.1.1. Öngerilmeli Betonun Tarihçesi ..... 7
3.1.2. Öngerilmeli Beton Kullanım Gereksinimi ..... 8
3.1.3. Öngerilmeli Betonun Faydaları ve Sakıncaları ..... 9
3.1.4. Öngerilmeli Betonun Tanımı ve Sınıflaması ..... 10
3.1.4.1. Öngerme (ön çekme) Yöntemi ..... 10
3.1.4.2.Ard Germe Yöntemi ..... 11
3.1.4.3.Kimyasal Öngerilme Yöntemi ..... 11
3.1.5. Öngerilme Betonarme Malzemesi ..... 12
3.1.5.1. Beton ..... 12
3.1.5.2. Öngerme Donatıları ..... 12
3.1.6. Öngerilmeli Betonda Malzeme Özellikleri ve Dayanımları ..... 14
3.1.7. Öngerilme Hesabı ve Temel İlkeleri ..... 14
3.1.8. Öngerilme Kayıplarının Hesabı ..... 16
3.1.8.1.Sürtünme Kayıpları ..... 16
3.1.8.2.Ankraj Kaçağı Kayıpları ..... 17
3.1.8.3.Sünme ve Büzülme (Rötre) Kayıpları ..... 17
3.1.8.4. Elastik Kısalma Kayıpları ..... 18
3.1.8.5. Donatıda Gerilme Kayıpları (Relaksasyon) ..... 18
3.1.8.6. Toplam Kayıplar ..... 19
3.1.9. Öngerilme Kuvvetinin Hesabı ..... 19
3.1.10. Deneysel Çalışma Programı ..... 23
3.1.11. Deneyde Kullanılan Malzemeler ..... 24
3.1.12. Elek analizi deneyi ..... 25
3.1.13. Özgül Ağırlık Deneyi ..... 27
3.1.14. Çelik Çekme Deneyi ..... 29
3.1.15. Karışımların Hazırlanması ..... 32
3.1.16. Taze Betona Yapılan Deneyler ..... 32
3.1.16.1. Çökme (Slump) Deneyi ..... 32
3.1.16.2. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneyler ..... 34
3.1.16.3. Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi ..... 34
3.2. Yöntem ..... 35
3.2.1. Deney Parametreleri ..... 36
3.2.2. Deney Düzeneği ..... 36
3.2.3. Numunelerin Hazırlanması ve Üretilmesi ..... 37
3.2.4. Numunelere Ard Germe İşleminin Uygulanması ..... 49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA ..... 51
4.1. Deneysel Çalışma ..... 51
4.1.1.Giriş ..... 51
4.1.2. Yük-Yerdeğiştirme ilişkileri ..... 51
4.1.3. Çatlama Parametreleri ve Kırılma Şekli ..... 55
4.1.4. Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk) ..... 59
4.1.5. Rijitlik Değerleri ..... 64

4.1.6. Elasto-Plastik Davranışın İncelenmesi ..... 66
4.1.7. Maksimum Moment ve Kesme Kuvvet Değerleri ..... 67
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER ..... 69
KAYNAKLAR ..... 71
ÖZGEÇMİŞ ..... **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

## ARD GERMELİ BETONARME KİRİŞLERDE ARD GERME HALATININ GEOMETRİK FORMUNUN KİRİŞİN TAŞIMA KAPASİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Gamze İZOL**

**Harran Üniversitesi**
**Fen Bilimleri Enstitüsü**
**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Recep Kadir PEKGÖKGÖZ**
**Yıl:2021, Sayfa: 73**

Bu tez çalışmasında yapılarda geniş açıklıkları geçmek için kullanılan ard germe tekniğiyle üretilmiş betonarme kirişlerin taşıma ve süneklilik kapasiteleri incelenmiştir. Gerçek boyutlarda üretilmiş betonarme kiriş numunelere beton dayanımını kazandıktan sonra, ard germe halatlarına düz ve parabolik form verilerek ard germe uygulanmıştır. Kiriş numuneler üzerinde dört noktalı yükleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kirişler üzerindeki yük kademeli olarak artırılmış ve kiriş ortasındaki yer değiştirme değerleri ölçülmüştür.

Deneyler sonucunda düz ve parabol halat formlu kirişlerin, normal (ard germesiz) kirişlere göre %58 daha fazla yük taşıyabildiği ve yaklaşık olarak %34 oranında daha sünek davrandıkları belirlenmiştir. Parabol halat formlu kirişlerin, düz halat formlu kirişlere göre kirişlerin kayma dayanımını önemli miktarda artırdığı anlaşılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELER:** Ard germe**,** Gerilme kayıpları, Kiriş taşıma kapasitesi, Halatın geometrik formu, Betonarme kiriş

## ABSTRACT

**MSc Thesis**

**THE INVESTIGATION OF THE GEOMETRIC FORM OF THE POST TENSIONING TENDONS ON THE LOAD CARRYING CAPACITY OF THE REINFORCED CONCRETE BEAM**

**Gamze İZOL**

**Harran University**
**Graduate School of Natural and Applied Sciences**
**Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Recep Kadir PEKGÖKGÖZ**
**Year:2021, Page: 73**

In this thesis, the bearing capacities and ductility of reinforced concrete beams produced by the post-tensioning technique, which are used to pass over long-span structures, were investigated. After the hardening of concrete, post-tensioning has been applied to the cables in the full-scale reinforced concrete beam specimens modeled as straight and parabolic form. Beam specimens were tested by means of a four-point bending test. In the experimental test, the force acting on the beams was increased gradually and the deflection at the middle of the span was measured.

As a result of the experimental test, it was determined that load-carrying capacity and ductility of concrete specimens strengthened with post-tension tendons that in the shape of straight and parabola are 58% and 34% more than plain beam respectively. It was also understood that post-tension tendons that in the shape of parabola significantly increased the shear strength of beams compared to straight one.

.



**KEY WORDS:** Post-Tensioning, Pre-stress Losses, Load Carrying Capacity of the beam, Geometrical Form of Tendons, Reinforced Concrete

# TEŞEKKÜR

Tez konumun belirlenmesinde ve hazırlanmasında gösterdiği yardım, emek ve ilgilerinden dolayı başta değerli danışman hocam Doç. Dr. Recep Kadir PEKGÖKGÖZ 'e teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen hocam Dr. Öğretim Görevlisi Fatih AVCİL 'e, çalışmamla yakından ilgilenen Prof. Dr. M. Arif GÜREL 'e, Prof. Dr. Kazım TÜRK 'e, Prof. Dr. Paki TURGUT 'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Ayrıca İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ve bölüm yüksek lisans öğrencisi Metin KATLAV 'a teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan ve bu yolda ilerlerken hiç yalnız bırakmayan maddi manevi desteklerini esirgemeyen aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa No**


Şekil 3. 1. Öngerilmeli kirişin açıklık ortasındaki gerilme dağılımı ..... 9
Şekil 3. 2. Sırasıyla öngerilme halatı ve öngerilme teli ..... 13
Şekil 3. 3. Ankraj kilidi ve öngerilme toronu (Hüsem, 2016) ..... 13
Şekil 3. 4. Öngerilmeli ve betonarme bir kirişin davranışı (Keyder, 2013) ..... 20
Şekil 3. 5. Enjeksiyon uygulamadan önce dışmerkez kablolu kiriş açıklığında gerilmeler ..... 21
Şekil 3. 6. Etkin gerilme ile sabit yük altındaki gerilmeler ..... 21
Şekil 3. 7. Etkin öngerme ile işletme yükü altındaki gerilmeler ..... 22
Şekil 3. 8. Çatlama durumu ..... 22
Şekil 3. 9. Taşıma gücü sınır durumu ..... 23
Şekil 3. 10. Kiriş modellemesi (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.) ..... 23
Şekil 3. 11. Kiriş kesiti ve donatı detayları (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.) ..... 24
Şekil 3. 12. Kullanılan çimento ..... 24
Şekil 3. 13. Elek analizi için numunelerin hazırlanması ..... 26
Şekil 3. 14. Elek analizi ..... 27
Şekil 3. 15. Numunelerin üretilmesinde kullanılan agregaların granülometrik eğrisi ..... 27
Şekil 3. 16. Özgül ağırlık deneyi ..... 28
Şekil 3. 17. 12 mm donatı gerilme – şekil değiştirme grafiği ..... 30
Şekil 3. 18. 10 mm donatı gerilme- şekil değiştirme grafiği ..... 30
Şekil 3. 19. Kullanılan donatılar hazırlanması ..... 31
Şekil 3. 20. Donatıların montajlanmış hâli ..... 31
Şekil 3. 21. Slump (çökme) deneyi ..... 33
Şekil 3. 22. Çökme miktarının ölçülmesi ..... 33
Şekil 3. 23. Küp numunelerin basınç dayanımının ölçülmesi ..... 35
Şekil 3. 24. Kirişe uygulanan dört noktalı eğilme deney düzeneği ..... 37
Şekil 3. 25. Kirişe uygulanan dört noktalı eğilme deneyi ..... 37
Şekil 3. 26. Kalıbın kurulması ve donatıların yerleştirilmesi ..... 38
Şekil 3. 27. Betonun hazırlanması ..... 39
Şekil 3. 28. Hazırlanan betonun kalıplara dökülmesi ..... 39
Şekil 3. 29. Halatın gerdirilmesi ..... 41
Şekil 3. 30. Halat gerdirme mekanizması ..... 42
Şekil 3. 31. Plastik boru ve halatın yerleşim detayı ..... 43
Şekil 3. 32. Kalıplara beton dökümünün tamamlanmış hali ..... 44
Şekil 3. 33. Parabol halatın belli mesafelerdeki kotlara bağlanması ..... 45
Şekil 3. 34. Parabol formundaki halatın donatıya belli noktalarda sabitlenmesi ..... 46
Şekil 3. 35. Hazırlanan beton karışımın kalıba dökülmesi ..... 47
Şekil 3. 36. Kiriş numunelerin küre tabi tutulması ..... 48
Şekil 3. 37. Kiriş numunelerin depolama alanında istif edilmesi ..... 49
Şekil 3. 38. Ankraj başlık ..... 50
Şekil 3. 39. Piston tabancası ..... 50
Şekil 4. 1. (a) NK1 numunesinin yük- yerdeğiştirme eğrisi ..... 52
Şekil 4. 2. (b) NK2 numunesinin yük- yer değiştirme eğrisi ..... 52
Şekil 4. 3. (c) ARDGP1 Yük- yerdeğiştirme eğrisi ..... 53
Şekil 4. 4. (d) ARDGP2 Yük- yerdeğiştirme eğrisi ..... 53
Şekil 4. 5. (e) ARDGD1 Yük – yerdeğiştirme eğrisi ..... 54
Şekil 4. 6. (f) ARDGD2 Yük – yerdeğiştirme eğrisi ..... 54
Şekil 4. 7. Tüm kirişlerin yük – yerdeğiştirme değerleri ..... 55
Şekil 4. 8. (a) NK1 kesme ve eğilme çatlakları ..... 56
Şekil 4. 9. (b) NK2 kesme ve eğilme çatlakları ..... 56
Şekil 4. 10. (c) ARDGP1 kesme ve eğilme çatlakları ..... 57
Şekil 4. 11. .(d) ARDGP2 kesme ve eğilme çatlakları ..... 57
Şekil 4. 12. (e) ARDGD1 eğilme ve kesme çatlakları ..... 58

Şekil 4. 13. (f) ARDGD1 eğilme ve kesme çatlakların yoğunluğu ..... 58
Şekil 4. 14. (g) ARDGD eğilme ve kesme çatlakların yoğunluğu ..... 59
Şekil 4. 15. Normal kiriş numunesi (NK1)..... 60
Şekil 4. 16. Normal kiriş numunesi (NK2)..... 60
Şekil 4. 17. Parabol halatlı ard germeli kiriş numunesi (ARDGP1)..... 61
Şekil 4. 18. Parabol Halatlı Ard Germeli Kiriş Numunesi (ARDGP2) ..... 61
Şekil 4. 19. Düz ard germe halatlı kiriş numunesi (ARDGD1)..... 62
Şekil 4. 20. Düz ard germe halatlı kiriş numunesi (ARDGD2)..... 62
Şekil 4. 21. Enerji yutma kapasitesi değişimi..... 63
Şekil 4. 22. Enerji yutma kapasitelerinin incelenmesi..... 63
Şekil 4. 23. Yük – yerdeğiştirme grafiği ..... 65
Şekil 4. 24. Tüm kirişlerin rijitlik değerleri..... 65
Şekil 4. 25. Kirişlerin ortalama rijitlik değerleri ..... 66

# ÇİZELGELER DİZİNİ

**Sayfa No**

Çizelge 3. 1. Çeliğin düzensizlik ve eğrilik sürtünme kayıpları ..... 17
Çizelge 3. 2. Rötre birim şekil değiştirme değerleri ..... 18
Çizelge 3. 3. Ortalama toplam kayıp değerleri ..... 19
Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri ..... 25
Çizelge 3. 5. Elek analizi ..... 26
Çizelge 3. 6. Donatı özellikleri ..... 31
Çizelge 3. 7. Ard germe donatı özellikleri ..... 32
Çizelge 3. 8. 1 $m^3$ beton için karışım oranları ..... 32
Çizelge 3. 9. Beton numunelerin 7 günlük beton basınç dayanımı sonuçları ..... 34
Çizelge 3. 10. Beton numunelerin 28 günlük beton basınç dayanımı sonuçları ..... 34
Çizelge 4. 1. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri ..... 64
Çizelge 4. 2. Elasto- plastik davranışın incelenmesi ..... 67
Çizelge 4. 3. Maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri ..... 67

# SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---|---|
| $a$ | Radyan cinsinden açısal sapma |
| $A$ | Beton brüt kesit alanı |
| $b$ | Kirişlerin başlık genişliği |
| $c$ | Tarafsız eksen derinliği |
| $C$ | Sabit |
| $C_{1,2}$ | Kesit üst ve alt liflerin kesit ağırlık merkezinden uzaklığı |
| $d$ | Kiriş yüksekliği |
| $e$ | Kablo dış merkezliği |
| e | Logaritma tabanı |
| $E_c$ | Beton elastisite modülü |
| $E_{ps}$ | Öngerilme kablosunun elastisite modülü |
| $E_s$ | Öngerilme uygulama anında beton elastisite modülü |
| $ES$ | Elastik kısalma nedeniyle öngerilme kaybı |
| $f$ | Gerilme |
| $f_0$ | Başlangıç kesitinde kablodaki gerilme |
| $f_{cir}$ | Öngerilme halatının serbest bırakılma sırasındaki ortalama gerilme |
| $f_{ck}$ | Karakteristik beton dayanımı |
| $f_p$ | Kablodaki gerilme |
| $f_{pi}$ | Başlangıç gerilmesi |
| $f_{pk}$ | Karakteristik kopma dayanımı |
| $f_x$ | Ankrajdan (x) uzaklığında kablodaki gerilme |
| $f_y$ | Donatı akma dayanımı |
| $I$ | Kesitin atalet momenti |
| $K$ | Düzensizlik katsayısı |
| $L$ | Kirişin boyu |
| $M$ | Moment |
| $M_0$ | Kendi ağırlığından oluşan moment |
| $M_{cr}$ | Çatlama momenti |
| $M_d$ | Tasarım momenti |
| $M_u$ | Taşıma gücü momenti |
| $n$ | Öngerilme kablo sayısı |
| P | Kesitteki toplam öngerilme kuvveti |
| $P$ | Öngerilme donatılarına verilen öngerilme kuvveti |
| $P_{et}$ | Etkin öngerilme |
| $P_i$ | Başlangıç öngerilme kuvveti |
| $q$ | Yayılı yük |

| | |
|---|---|
| $\mu$ | Sürtünme katsayısı |
| $\sigma$ | Betonda oluşan gerilme |
| $\varepsilon_{SH}$ | Rötre şekil değiştirme değerleri |
| $\Delta f_{pSH}$ | Rötre kaybı |

# 1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojik imkanlarla birlikte, insanoğlunun ihtiyaçları da artmıştır. Bu ihtiyaçlardan en önemli olanlarından biriside barınma ve kolaylık tesislerinin yapımı olarak söylenebilir. Büyük açıklıkların daha küçük kesitlerle geçilmek istenmesi ve bunun sonucu olarak daha hafif yapıların yapılması, yapıların deprem gibi doğal afetlerden daha az hasar görmesi açısından son derece önemlidir. Taşıyıcı sistemlerin bir kendi ağırlıkları, birde üzerinde taşıyabilecekleri yükleri vardır. Taşıyıcı sistemlerin üzerlerinde taşıyabilecekleri yüklere faydalı yük denilmektedir. Taşıyıcı sistemin kendi ağırlığı ne kadar az ve buna karşın taşıyabileceği faydalı yükü ne kadar fazla olursa bu taşıyıcı sistemin yük taşıma başarısının bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir. Klasik betonarme elemanlar ile büyük genişliklerin geçilmesi ancak büyük kesitlerle mümkün olabilmektedir. Bu durumda taşıyıcı sistemin kendi ağırlığı çok arttığından dolayı, sistemin taşıyabileceği faydalı yükü azalmaktadır. Bu tür bir yaklaşım, çözümü ekonomik olmaktan hızla uzaklaşmaktadır. Büyük açıklıkların geçilmesinde kullanılan yöntemlerden biriside ard germe tekniğiyle üretilmiş betonarme taşıyıcı sistemlerdir. Ard germe beton döküldükten ve belirli bir düzeyde mukavemetini kazandıktan sonra uygulanan germe işlemi ve tekniğidir. Basit kiriş, sürekli kirişler, konsol sistemler ve silo gibi yapılara kolaylıkla uygulanabilmektedir. Ard germe sistemlerinde çelik halatlar (tendon) beton dökülmeden önce bırakılan kılıflar içerisinden geçirilerek uygulanmaktadır. Dolayısıyla halatlara düz, parabolik, dairesel veya bunların birleşiminden oluşan istenen bir form (geometri) vermek mümkündür. Oysa ön germe tekniğinde çelik halatlar beton dökülmeden önce gerildiğinden bu teknikte yalnızca düz halat formu vermek mümkündür. Ard germe işlemiyle betonarme kesitte düşey yükler etkisiyle oluşan momentler azaltılırken, kesite etki eden eksenel basınç kuvvetleri bir miktar artar. Artan eksenel basınç kuvvetleri etkisi altında betonda oluşan basınç gerilmeleri kontrol edilerek kesitin güvenliği sağlanır.

Ard germe tekniğiyle üretilen taşıyıcı sistemlerin; sehim kontrolü, çatlak kontrolü ve geçirimsizlik, kullanılacak beton ve donatı miktarında azalma ile elde edilen hafiflik ve toplam inşaat süresinde kısalma gibi avantajları vardır. Ard germe

tekniğindeki gerilme kayıpları ise ön germe tekniğindeki gerilme kayıplarına göre daha fazladır.

Bu tez çalışmasında ard germe tekniğinde kullanılan parabol ve düz halat geometrisinin kirişin taşıma kapasitesine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla normal kiriş (ard germesiz), ard germe halatı düz ve ard germe halatı parabol formunda olmak üzere altı adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde dört noktalı yükleme deneyi yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düz halat ve parabol halat formlu kirişler benzer davranışları sergilerken, parabol halat formunun kirişin kayma dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Düz ve parabol halat formlu kirişler ard germe uygulanmamış kiriş numunelere göre %58 daha fazla yük taşıyabildiği tespit edilmiştir.

# 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Şener (2006) Öngerilmeli beton tekniğinde yüksek dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı çelik kullanıldığından aynı özellikte betonarme yapı ile karşılaştırıldığında daha az malzeme kullanımı gerektirir. Ayrıca yükler de artan insan nüfus ve teknolojinin ilerlemesi ile arttığından daha ekonomik yapılar öngerilme tekniği ile yapılabilmektedir. Bu sebepten ötürü yurtdışında olduğu gibi ülkemizde de öngerilmeli beton yapı uygulamasının yaygınlaşması beklenmektedir (Şener, 2006).

Ünal ve Kürklü (2007) yaptıkları bu çalışmada öngerilmeli betonun gelişiminden, inşaat mühendisliğinde kullanılan taşıyıcı sistem malzemeleri arasında giderek önem kazandığını belirtmektedir. Öngerilmeli betonun önemini artan araştırmalar ve çalışmalarla gelişerek taşıyıcı sistem malzemeleri arasında en çok tercih edilen malzemeler arasında yerini aldığından bahsetmektedir. Öngerilmeli betonun bu kadar çok tercih edilir olması, beton dökümünden önce veya (ön çekmeli), beton dökümünden sonra (ard çekmeli) betona öngerme kuvveti verilerek oluşturulan betonarme elemanlarla, büyük kesit açıklıkları ekonomik geçme, taşıyıcının ömrünü uzatma, daha estetik ve güvenli yapılar inşa etme olanağı sağladığından bahsetmektedir (Ünal & Kürklü, 2007).

Aktaş (2006) yapılan çalışmada, ard-germe çeliğinin beton dökümünden sonra gerilmesi ön çekmeli kolon kiriş birleşim elemanını deneysel işleme tabi tutulmuştur. Deprem etkinlik derecesi için tehlikeli olan bölgeler için ön üretimli ve ön-germeli kolon kiriş birleşim elemanları kullanılmaktadır. Kolon birleşim noktasında sürekli olup kiriş tek parça halindedir. Kolon ve kiriş elemanının birleştirilmesi ile oluşan çerçeve karma çerçeve olarak adlandırılır. Çünkü ard gerilme ve ön çekmeli beton birlikte kullanılmaktadır ve ayrıca akmaya göre tasarlanmış normal betonarme donatısı ile elastik kalmak üzere tasarlanmış sınırlandırılmış ard-germe halatları beraber kullanılmıştır. Ard-germe kabloları bir deprem esnasında elastik kalmak amacıyla tasarlanmışlardır. Deprem etkisi altında özel karma moment çerçevesinin tekparça çerçeveden farklı davranması beklenmektedir. Çerçevede oluşan deformasyonlarının çoğu, ön üretimli kolon ve kirişin birleşimindeki açılıp

kapanma noktalarında oluşur. Bu oluşan durumdan dolayı, depremden sonra oluşan hasar kolaylıkla tamir edilerek büyük bir deprem sırasında oluşan hasar sınırlandırılabilir. Bu konudaki ilk çalışmalar yeni bağlantı tipi olan ard germenin, yüksek deprem riski yüksek olan bölgeler için kullanılabileceğini göstermektedir (Aktaş, 2006).

Alharty ve Frangopol (1997), yaptıkları çalışmada eğilme davranışını belirlemek maksadıyla kullanılan modellerin yanında yükleme, malzeme niteliği ve öngerme kuvveti değerlerini gelişigüzel değişkenler olarak kabul etmişlerdir. Sistemin güvenirlik metotları, bu varsayımlar çerçevesinde öngerilmeli betonarme kirişlerin düşük performans ihtimalini hesap etmek amacıyla kullanılmıştır (Al-Harthy, 1997).

Algahtani vd. (1995), kısmî öngerilmeli betonarme kirişlerin en uygun dizaynı için etkin bir metot geliştirmişlerdir. Çalışmada, gerilme ve çatlama momenti, kesit, kablo profili ve kesme dayanımı benzeri kısıtlamalar göz önünde bulundurulmuştur. Elde edilen sonuç verileri Amerikan Beton Enstitüsü yönetmeliğine uygun hale getirilmiştir. (Algahtani, 1995.).

Fanning (2001), bu çalışma kapsamında betonarme ve ard germe yöntemiyle gerdirilmiş olan öngerilmeli beton kiriş laboratuvar ortamında teste tabi tutulduktan sonra, ANSYS sonlu elemanlar programı ile modellenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılmıştır (Fanning, 2001).

Demir (2003), bu çalışmada öngerilmeli beton kirişler nümerik (sayısal) olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında Hrennikoff'un Düzlem Çerçeve Elastisite Modülü Metodu kullanılarak öngerilmeli kiriş, iki ucu mafsallı çubuk sistemlere ayrılmış ve öngerilme kuvveti, öngerme kablosunun üretim esnasında ısı altında olduğu düşünülerek ısı etkisiyle oluşturulmuştur. Lineer – elastik şekil değiştirme bağıntısı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi analiz edilmiştir. Sonuç olarak öngerilmeli beton kirişlerde yük- deplasman ilişkisi grafiksel olarak çizilmiş ve sistemin kırılması yorumlanmıştır (Demir, 2003).

Wang vd. (2012), öngerilmeli kompozit kutu kirişlerin tasarım özellikleri üzerinde çalışılmıştır (Wang, 2012).

Keyder (2013) çeliğin gerilip betona yük aktarmaya başlamasıyla ön germe kuvvetinde azalma görülür. Bu kuvvet azalmaları ön germe kuvveti kayıpları olarak tanımlanır. Ön germe kuvveti kayıpları ikiye ayrılmaktadır; uzun dönem kayıpları ve kısa dönem kayıpları. Kısa dönem kayıpları; ankraj kayıpları, elastik kısalma ve sürtünme kayıplarıdır. Bu kayıplar yük aktarma sırasında meydana gelen kayıplardır. Uzun dönem kayıpları ise; sünme, büzülme (rötre), gevşeme kayıplarıdır. Bu kayıplar kullanım süresince meydana gelen kayıplardır (Keyder, 2013).

Keyder (2013) öngerilme, beton dökümünden önce yapılıyorsa ön çekme, beton dökümü yapılıp dayanımını aldıktan sonra yapılıyor ise ard çekme olarak adlandırılır. Öngerilmenin en eski uygulaması, ilk çağlardaki fıçı imalatına dayanmaktadır. İnce ahşap şeritler yan yana konulur, bunları bir arada tutup sıkıştırmak için metal şeritler kullanılırdı. Öngerilmeli betonun inşaatlardaki ilk örneği olarak kemer inşaatları gösterilebilir. Ortadaki kilit taşı diğer taşlara basınç uygulayarak öngerilme sağlıyordu. Çeliği ön germe yönteminin bir elemanı olarak kullanan ilk mühendis P. H. Jackson'dır. Günümüzde kullanılan öngerilmeli beton tekniğini ilk kullanan kişi Eugene Freyssinet olmuştur (Keyder, 2013).

Afefy vd. (2016), bu çalışma kapsamında öngerilmeli prekast kirişlerin bölgesel kullanımına bağlı oluşabilecek dayanım kayıplarını azaltmak için karbon fiber takviyeli elemanlarla güçlendirmişlerdir (Afefy Hamdy, Sennah, & Cofini, 2016).

Gao vd. (2017) yaptıkları çalışmada ard gerilimli beton kirişlerde uzun süreli ard gerilme kayıplarını araştırmak için ard germe ile gerilmiş sekiz tane beton kiriş 1 yıldan fazla gözlemlenmiştir. Gözlem sırasında kiriş uçlarındaki halat (tendon) kuvvetlerini ölçmek için elasto manyetik (EM) sensörler kullanılmıştır. Bu şekilde betonun sünme ve büzülme nedeniyle ard gerilme kayıpları ve halat boyunca toplam öngerilim kaybı hesaplanmıştır. İzlenen verilere göre; halat düzeni, donatı oranı, kanal

enjeksiyonu, gerilme seviyesi vb. faktörler analiz edilmiştir (Gao, Yang, & Qiao, 2017).

Xie ve Özbakkaloğlu (2015), öngerilmeli beton yapıların düşük sıcaklıklara sahip ortamlarda kullanımı yıllar içinde artmıştır. Bu çalışmada, ultra düşük sıcaklıklarda gerilme sonrası ard germeli kiriş örneklerinin öngerilme kayıpları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak zamana bağlı öngerilme kaybının, betondaki sıcaklık ve öngerilme kuvvetinin azaltılmasıyla, azaldığını tespit etmişlerdir (Xie & Özbakkaloğlu, 2015) .

Abdullah (2017), çift yönlü ard germeli betonarme plakların doğrusal olmayan modellemesi üzerine yaptığı çalışmasında, mesnet tipleri, halat yerleşimi, yük tipleri ve halat sayısı gibi etmenler üzerinden değerlendirmelerde bulunmuştur. Aynı zamanda, bir yönlü halat yerleşimiyle toplam sayısı eşit olacak biçimde çift yönlü halat yerleşimi verilerini karşılaştırmış ve iki yönlü kullanılan halat tekniğinin daha etkili sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur (Abdullah, 2017) .

Arslan (2018) ard germeli plak köprü dizaynı hususunda sonlu elemanlar metodu ile analizler gerçekleştirmiştir. Ard ve ön çekim metotlarının güvenirliğini ve maliyeti üzerine kıyaslamaları yapmıştır. Ard çekim metodunun daha düşük maliyetli olduğunu, reel fiyatlandırmalarla göstermiştir (Arslan, 2018).

Çorsuz (2004) ard germeli kiriş ile ilgili deneysel çalışmasında, kirişlerin çökme anına kadar olan davranışları ve yük taşıma seviyeleriyle başlangıç ard germe kuvveti arasındaki ilişkiyi incelemiştir (Çorsuz, 2004).

Hamad ve Tanhan (2018) kutu kesitli ard germeli kirişlerin “sonlu elemanlar” metoduyla analizini gerçekleştirmiştir. Yapım metotlarının kıyaslanması ile ilgili değerlendirmeler de sunmuştur (Hamad & Tanhan, 2018).

Colajanni vd. (2014), öngerilmeli kirişlerde eğilme ve kesme kuvveti etkisinde betonarme donatıların dizilişi ile ilgili tavsiyelerde bulunmuşlardır (Colajanni, Recupero, & Spinella, 2014. ).

# 3. MATERYAL ve YÖNTEM

## 3.1. Materyal

Öngerilme, dış yükler altındaki betona çekme gerilmelerine zıt yönde beton dökümü öncesinde istenen seviyede basınç verme işlemi olarak tanımlanmakta ve diğer bir deyişle bir yapı ya da sistemde, performans artırımı, kullanılabilirlik, emniyet ve güvenlik için kalıcı iç kuvvetlerin oluşturulmasıdır. Amaç dış kuvvetlerin neden olduğu iç kuvvetleri azaltmaktır (Ali, 2010; Şener, 2006)

Öngerilmeli beton, normal betonarmenin kullanıldığı binalar, köprüler, nükleer reaktörler, kazıklar, çapları kalın borular, açık deniz platformları, deniz yapıları, gemiler ve silolarda yaygın olarak hemen her yerde kullanılabilmektedir. (Keyder, 2013).

### 3.1.1. Öngerilmeli Betonun Tarihçesi

En eski öngerilme uygulaması, ilk çağlarda fıçı imalatında görülmüştür. Fıçı imalatı ince ahşap şeritler yan yana konulmuştur. Bunları bir arada tutmak ve sıkıştırmak için metal şeritler kullanılmıştır. Buradaki amaç metal şeritlerin fıçı içindeki sıvı nedeni ile çekme gerilmelerine karşı koyacak basıncı verecek şekilde tasarlanmasıdır (Şener, 2006).

İnşaat alanında öngerilmeli betonun ilk olarak kullanıldığı yer kemer inşaatı olarak gösterilebilir. Buradaki tasarım kemerin ortasına kilit taşı yerleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Kilit taşı diğer taşlara basınç uygulayarak öngerilmeyi sağlamaktadır. Çelik malzemesini ön germe elemanı olarak kullanan ilk mühendis P.H. Jackson'dır (Keyder, 2013).

Günümüzdekine benzer öngerilmeli beton yöntemini 1900'lü yıllarda ilk olarak Eugene Freyssinet kullanmış ve 1928 senesinde çalışmanın patentini almıştır.

Freyssinet öngerilme kayıplarının ehemmiyetini ortaya koyan ve kayıpları engellemenin yollarını bulan ilk araştırmacıdır. Aynı zamanda 1941 senesinde öngerilmeli beton yöntemini kullanarak inşa edilen ilk köprünün tasarımcısıdır (Ali, 2010).

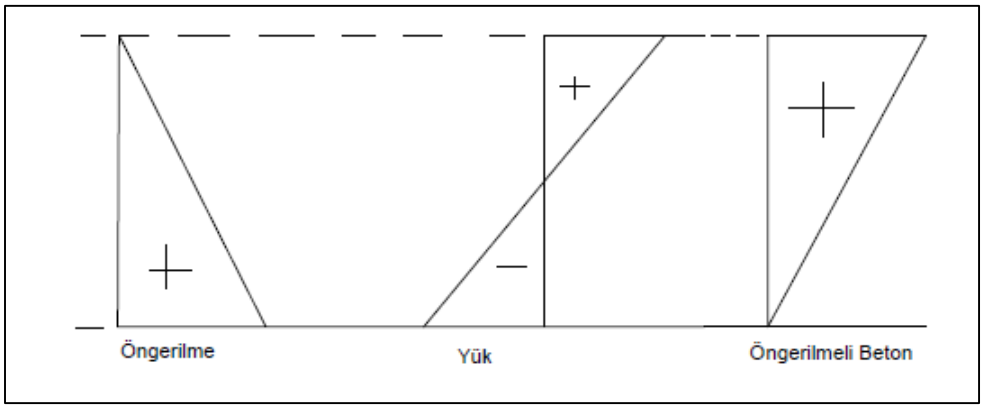
### 3.1.2. Öngerilmeli Beton Kullanım Gereksinimi

Beton; çimento, agrega, kimyasal ve mineral katkı maddeleri ve suyun bir araya farklı oranlarda gelmesiyle üretilmiş olan yapı malzemesidir. Basınç dayanımı yüksek olan betonun çekme dayanımı düşüktür. Betonun çekme dayanımının düşük olması sebebiyle yapı elemanlarında çekme gerilmelerini karşılamka amacıyla donatı kullanılır. Teknolojinin gelişme göstermesi ile yapı tekniği de oldukça değişmiş daha büyük açıklıkların geçilmesi gerekliliği doğmuştur. Betonarme yapı elemanlarda çekme gerilmelerinden kaynaklanan çatlaklar donatılarda korozyon oluşmasına neden olmaktadır (Keyder, 2013).

Betonarme elemanların çekme gerilmesi donatılar tarafından karşılanmaktadır. Eleman açıklığının artmasıyla, eleman ağırlığı da artmakta, bu durum da büyük açıklıklı kirişlerde faydalı yükün taşınmasında problem oluşmasına neden olmaktadır. Betonarme elemanların bu şekildeki dezvantajını yok etmek amacıyla betona dış yükler etki ederken çekme gerilmelerine karşı yönde, basıncı önceden uygulayarak oluşturulan tekniğin adı öngerilme tekniğidir (Keyder, 2013).

Öngerilmeli beton, dış yüklerin yapıya etki etmesinden önce oluşturulur. Öngerilmeli beton taşıyıcı sistemde işletme yüklerinden gelebilecek gerilmeleri amacına uygun olarak değiştiren sürekli bir gerilmenin verilmiş olduğu beton olarak açıklanabilir (Ali, 2010).

Dış yüklerden ötürü basit mesnetli bir kirişte, açıklığının ortasında meydana gelen çekme gerilmelerinin, kirişe öngerilme kuvveti vermek şartıyla ortadan kaldırılması Şekil 3.1'de gösterilmiştir (Öztürk, 2018).




Şekil 3. 1. Öngerilmeli kirişin açıklık ortasındaki gerilme dağılımı

### 3.1.3. Öngerilmeli Betonun Faydaları ve Sakıncaları

Faydaları;

a) Yüksek dayanımlı kablo ile yüksek dayanımlı beton beraber kullanılmaktadır.
b) Çekme dayanımı ile elastisite katsayısı yüksektir. Bu nedenlerle çatlama ihtimali düşüktür.
c) Elastisite modülü yüksektir. Dolayısıyla şekil ve yer değiştirme daha azdır.
d) Yüksek dayanımlı betonda kesitler küçük ve elemanlar daha hafif olacağından taşıma maliyetleri de azalacaktır
e) Öngerilmeli elemanlar betonarmedeki elemanlarla kıyaslandığında emniyet ve güvenlik açısından daha iyi oldukları görülmektedir. Kablo ve beton henüz kullanılmadan da öngerme aşamasında test imkânı sunmaktadır. Öngerme sırasında beton zayıfsa ezilecek, kablo kusurluysa da kopacaktır.
f) Betonarmeye göre öngerilmeli betondaki beton örtü kalınlığı büyük olduğundan dolayı yangın ve korozyona karşı daha fazla güvenlidir.
g) Betonarmeye göre daha ekonomiktir. Kesitlerin küçük olması ve hafiflikleri taşıma maliyetlerini azaltmaktadır. (Şener, 2006).

Sakıncaları;

a) En önemli sakıncası kayda değer bir ilk ağırlığının varlığıdır. Ancak bu olumsuz özelliği yüksek dayanımlı betonların üretimi ile ortadan kalkmıştır.

b) Malzeme ve işçilik daha hassas olmayı gerektirmektedir.
c) Öngerilme kayıpları önemli bir sorundur ve çok dikkat gerektirmektedir.
d) Bazı durumlarda yapının kendisi ya da yapı elemanları onarılamayabilmektedir ve bu da geri dönüşümü zorlaştırmaktadır (Öztürk, 2018).

### 3.1.4. Öngerilmeli Betonun Tanımı ve Sınıflaması

Öngerilme yöntemi, sahip olduğu sayısız avantajının yanısıra süregelen üretim yöntemlerinin fiziki açıdan eksik kaldığı durumlarda, çok geniş açıklıkların geçilmesinin gerekli olduğu özel durumların çözümü için geliştirilmiştir (Ali,2010).

Öngerilmeli beton yöntemi, betonarme yapı elemanlarının kullanım amacına göre içerisine üretim şekline uygun şekilde yerleştirilmiş olan yüksek dayanımlı çelik halatın, yapı elemanın kendi ölü ağırlığı ve üzerinde taşıyabileceği yükler yüklenmeden önce; dışarıdan pistonlarla çekilmek suretiyle öngerme kuvveti uygulanır. Böylelikle halatta oluşan çekme gerilmeleri, betona basınç gerilmesi şeklinde geçmiş olur. Basınç gerilmesi olarak aktarılan kuvvet eğilme dayanımını arttırarak taşıma kapasitesi yüksek yapı ya da yapı elemanları üretilebilir (Ali,2010).

Öngerilmeli beton döşemelerde, düşey yönlü perdelerde, silindirik veya dikdörtgen su depoları gibi alanlarda çift yönlü olarak uygulanabilmektedir. Kirişlerde ise öngerilme açıklık istikametinde tek yönlü olarak uygulanmaktadır. Öngerilmeli beton, öngerilme halatlarını gerilme yöntemine göre; önceden çekme ile (öngerme) yöntemi ve sonradan çekme ile (ard germe) yöntemi olarak iki gruba ayrılır (Ali, 2010).

#### 3.1.4.1. Öngerme (ön çekme) Yöntemi

Ön çekmeli sistemlerde öngerilme verilmiş kablolar kalıplara yerleştirilip üzerine beton dökülür. Beton dayanımını aldıktan sonra kablolar kesilerek elemana ön

çekme uygulanmış olur. Betonarme yapı eleman uçlarında ankraj kullanılmaz (Şener, 2006).

"Öngerme" terimindeki "ön" eki beton priz almadan evvel donatıların çekme gerilmesiyle yüklendiği anlamına gelmektedir. Öngerilme kablolarını germek amacıyla genel olarak hidrolik krikolar kullanılmaktadır (Ali, 2010).

TS-3233: 1979 Öngerme kavramını şöyle ifade etmektedir; "Öngerme, öngerme halatının beton dökülmeden önce çekilmesi işlemidir" (ÖYHYK, 1979).

### 3.1.4.2.Ard Germe Yöntemi

Ard çekmeli sistemlerde beton dökülüp dayanımını aldıktan sonra kablolar gerilerek öngerilme sonradan verilir. Çelik halatlar gerilmiş olur ve halatlar beton elemanın uç noktalarına ankraj edilir (Şener, 2006).

Ard germe yönteminde beton dökülmeden önce eleman boyunca halatı yerleştirmek amacıyla genellikle plastik borular yerleştirilir. Beton dökümünden önce halatlar bu borular içine serbest şekilde ya da beton dayanımını kazandığında yerleştirilebilir. Halatların gerilimleri gerçekleştikten ve uçlara ankrajlandıktan sonra, kılıf boruyla halat arasındaki boşluklar sonradan sertleşen bir harçla doldurulmaktadır. Bu harçla halat ve onu saran betonun aderansı temin edilir ve çatlamaya karşı direnç arttırılmış ve halatın korozyona uğrama riski azaltılmış olunur (Ali, 2010).

TS-3233:1979 Ard germe yöntemini şu şekilde tanımlamaktadır; "Ard germe, öngerme çeliğinin beton dökümü yapıldıktan ve yeterli dayanıma sahip olduktan sonra çekilme işlemidir" (ÖYHYK, 1979).

### 3.1.4.3.Kimyasal Öngerilme Yöntemi

Kimyasal öngerilme tekniğinde ise öngerilme halatları gerilmeden kalıp içerisine yerleştirilir ve sonra beton dökülür. Tercih edilen özel çimentolarla beton, kürünün ardından sertleşme işlemi süresince büzülmek yerine genleşme meyillindedir.

Ama beton ile halat arasındaki aderanstan dolayı, betonun, öngerilme donatısı yerleştirilen bölümler genleşemediğinden halatta çekme, betonda ise basınç gerilimi meydana gelmesi temin edilir. Betondaki genleşmenin kontrol edilememesi ve de öngerilme verilecek istikametin dışında da genleşme gerçekleşmesi gibi sakıncalar mevcut olduğundan henüz teoride kullanılamamaktadır (Ali, 2010).

### 3.1.5. Öngerilme Betonarme Malzemesi

#### 3.1.5.1. Beton

Öngerimeli betonarme elemanların üretiminde kullanılan betonun özellikleri şöyledir;

- Agrega: Yıkanmış ve genellikle yuvarlak agrega kullanılmalıdır.
- Çimento: Öngerilmeli betonda portland çimentosu kullanılmaktadır. Beton üretimi için kullanılacak olan agreganın maksimum tane çapı, en fazla 20 – 25 mm'yi aşmamalıdır. Tercihen agreganın 16 mm çaplı düzgün bir geometriye sahip olması beklenir (Öztürk, 2018).
- Katkı malzemeleri: Öngerilmeli betonda katkı maddesi kullanımı pek istenmemektedir. Sadece plastikliği arttırıcı, genleştirici özelliği olan katkı maddeleri kullanılabilir. $CaCI_3$ kesinlikle kullanımı istenmemektedir. Mineral katkılarda alkali – agrega reaksiyonunun oluşmasına izin vermeyecek şekilde dikkat edilmelidir (Ali, 2010; Öztürk, 2018)
- Su: İçilebilir olan her su kullanılabilir (Öztürk, 2018).
- Kum: Kum olarak sadece yıkanmış dere kumu kullanılır (Keyder, 2013).

#### 3.1.5.2. Öngerme Donatıları

Betonarme elemanların çekme gerilmelerine karşı yetersiz olduğu bilinmektedir. Ancak bu yetersizliği öngerilme yöntemiyle çekme bölgesine öngerilme elemanları eklenerek aşmak mümkün olmaktadır. Öngerilmeli ya da ard germeli yapıların inşasında kullanılan malzemeler aşağıda verilmiştir (Kozak, 2011);

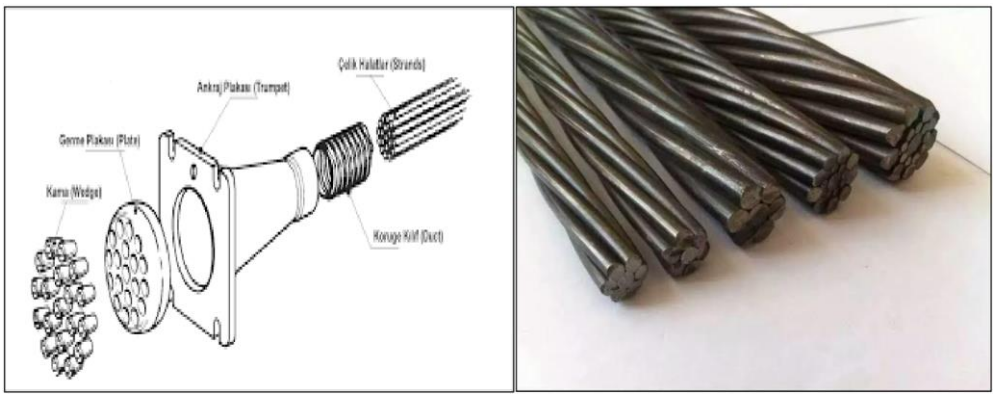
- Öngerilme Teli: Yüksek dayanımlı, çapları değişebilen kullanım amacına göre düz ve kıvrık olabilen çelik tellerdir.
- Öngerme Toronu: Birden fazla telin birbirine sarılmasıyla elde edilmiştir.
- Öngerilme Çubuğu: Çeşitli çaplarda üretilebilen yüksek dayanımlı özel çubuktur.
- Öngerilme Çeliği: Donatı olarak kullanılan tel, çubuk ve torondan oluşur.
- Öngerilme Kablosu: Toron, tel, çubukların birlikte kullanılmasıdır.
- Kılıf: Ard germe yönteminde kullanılan, öngerilme halatını yerleştirmek amacıyla kullanılan metal veya plastik borulardır.

Şekil 3.2.'de öngerilme teli ve öngerilme halatı verilmiştir.




Şekil 3. 2. Sırasıyla öngerilme halatı ve öngerilme teli

Ankraj Kilidi: Halat kesme işlemi yapıldıktan sonra öngerilme kablosunun geri kaçmasını engellemek amacıyla üretilmiştir (Öztürk, 2018).



Şekil 3. 3. Ankraj kilidi ve öngerilme toronu (Hüsem, 2016)

### 3.1.6. Öngerilmeli Betonda Malzeme Özellikleri ve Dayanımları

Öngerilme işlemi uygulanacak yapı elemanlarında beton sınıfı C35 üstü dayanıma sahip betonların kullanımı tavsiye edilmektedir. TS-3233 ve BS-8110'da yirmi sekiz günlük betonun kendine has dayanımı, ard germeli elemanlarda silindir dayanımı minimum 25 N/mm$^2$ ve küp dayanımı ise minimum 30 N/mm$^2$ olarak verilmektedir. Öngermeli elemanlarda silindir dayanımı minimum 35 N/mm$^2$, küp dayanımı da minimum 40 N/mm$^2$ olması gerektiği ifade edilmektedir (Ali, 2010; Öztürk, 2018).

Öngerilmeli beton için, su/çimento oranı 0.55'i aşmamalıdır (Ali, 2010).

Beton işlenebilir özellikte olmalıdır. Beton dökümü esnasında ortam sıcaklığı $5^0$ C ile $15^0$ C arasında olmalıdır. Segragasyonun (ayrışma) önlenmesi için beton çok yüksekten bırakılmamalıdır. Beton yerleşimi için vibratör kullanılmalıdır. Beton örtü kalınlığı 1.5-2 mm'yi aşmamalıdır (Şener, 2006).

Beton iyice sıkıştırılmalıdır. Kılıfların etrafı boşluk kalmayacak şekilde şişlenerek doldurulmalıdır. Sıkıştırılma işlemi yapılırken kılıfların kırılmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca yörüngelerinden kaymamasına özen gösterilmelidir (Ali, 2010).

Öngerilmeli beton elemanlarında genellikle 5 mm ve 7 mm çapında olan teller kullanılmaktadır. Öngerilme çelik elemanların çekme gerilmeleri $f_s$=1600-1800 MPa arasında değişebilmektedir. Öngerilme işleminde en yaygın olarak 7 telli toron kullanılmaktadır (Öztürk, 2018).

### 3.1.7. Öngerilme Hesabı ve Temel İlkeleri

Öngerilme hesabı mesnet ve açıklığa, öngerilme yapı eleman tipi ve öngerilme verilişine göre betondaki sınır gerilmeler TS 3233' te verilmiştir. Öngerilme aktarımı esnasındaki sınır değerler,

Basınç durumunda;

- Fabrika üretimi olan elemanda 0.60 $f_{ck}$,
- Şantiye üretimi olan elemanda 0.55 $f_{ck}$' dır.

Çekme durumunda;

- Birbirine eklenen parçalar şeklinde imal edilen yapı elemanlarının bağlantı noktalarında 0.60 $f_{ck}$
- Basit mesnetli yapı elemanların mesnet bölgelerinde $0.50\sqrt{fck}$,
- Diğer elemanlarda $0.50\sqrt{fck}$ 'dır.

Kullanım yükleri altında izin verilen gerilmeler altında izin verilen gerilmeler ise;

Basınç durumunda;

- Köprü elemanlarında 0.40 $f_{ck}$
- Diğer yapı elemanlarında 0.45 $f_{ck}$'dır.

Çekme durumunda; birbirine eklenen parçalar halinde imal edilmiş olan elemanların bağlantı noktasında 0, çekme bölgesinde ek donatı kullanıldığı, sınırlı öngerilme uygulaması durumunda, sehim değerinin öngörülen sınırı aşmadığı kanıtlanan durumda $1.0\sqrt{fck}$ 'dır.

Öngerilme halatında sınır değerlerin, geçici yükleme durumlu başlangıç değerleriyle sürekli kullanım yükleri durumunda da aşılmamasına dikkat edilmelidir. Öngerilme halatında verilecek azami öngerilme değeri 0.8 $f_{pk,}$ yük aktarımından sonra meydana gelebilecek çekme gerilmesi de 0.7 $f_{pk}$ olmalıdır (ÖYHYK, 1979).

Öngerilme hesaplanırken başlangıçta uygulanan tekil kuvvetin (hayali) kablo tarafından taşındığı varsayılmaktadır. Öngerilme kablolarının gerilmesinden sonra, beton ile çelikteki şekilsel bozulmalardan dolayı kablo kuvvetinde biraz azalma

meydana gelir. Bu düşüş "öngerilme kayıpları" olarak ifade edilmektedir. Kayıplar kablonun taşıdığı kuvvetten çıkarılarak öngerilme hesabındaki gerçek kablo kuvveti bulunmaktadır. Bulunan bu kuvvet için uygun sayıda kablo ve aralıkları hesaplanmalıdır (Ali, 2010).

### 3.1.8. Öngerilme Kayıplarının Hesabı

Kablo germe işlemi tamamlanınca kablo kuvvetinde belli bir oranda azalma olur. Azalma öngerilme kayıpları olarak adlandırılır. Öngerilme kayıpları yükün geçiş anında ani olabileceği gibi zaman içerisinde de ortaya çıkabilir(Ali, 2010).

Ani öngerilme kayıpları;

- Sürtünme Kayıpları,
- Ankraj Kaçağı Kayıpları,
- Sünme ve Büzülme (Rötre) Kayıpları,
- Elastik Kısalma Kayıpları,
- Donatıda Gerilme Kayıpları (Relaksasyon)
- Toplam kayıplar

Zamana bağlı olarak gelişen kayıplar uzun süreli kayıplar olarak adlandırılır.

#### 3.1.8.1.Sürtünme Kayıpları

Sürtünme kayıpları, ard germeli sistemlerde oluşan kayıpların önemli olacak derecedeki kısmını oluşturur. Oluşan kayıplar kablonun şekline ve kablodaki eğriliklere bağlıdır. Öngerilmeli yapı elemanın davranışı göz önünde bulundurularak kablonun şeklindeki oluşacak eğrilik payı elemanın amacına uygun tasarım aşamasında belirlenir. Kılıfın yerleştirilmesi esnasında yapılan hatalardan kaynaklanan istenmeyen eğrilikler ise yerel eğrilikler olarak adlandırılır. Bazı durumlardan dolayı önlenmesi mümkün olmayan bu eğrilikler için, farklı şekilde kılıf ve tel tiplerine göre eğrilik sürtünme katsayısı verilmiştir. Eğrilik sürtünme

katsayılarının Çizelge 3.1. ‘de verilen değerler arasından seçilebileceği TS-3233’da ifade edilmektedir (ÖYHYK, 1979).

Çizelge 3. 1. Çeliğin düzensizlik ve eğrilik sürtünme kayıpları

| **Aderans türü** | | **Donatı türü** | **Düzensizlik katsayısı** | **Eğrilik sürtünme katsayısı** |
|---|---|---|---|---|
| Spiral kılıf içinde Enjeksiyonlu öngerme | | Çelik teller | 0.003-0.005 | 0.15-0.25 |
| | | Çubuklar | 0.0003-0.002 | 0.08-0.30 |
| | | 7 telli toron | 0.015-0.006 | 0.15-0.25 |
| Aderanssız öngerme çeliği | Mastik kaplı | 7 telli toron | 0.003-0.006 | 0.05-0.15 |
| | Önceden yağlanmış | 7 telli toron | 0.001-0.006 | 0.05-0.15 |

$$f_x = f_0\, e^{-\mu(a+Kx)} \qquad (3.1)$$

### 3.1.8.2.Ankraj Kaçağı Kayıpları

Ankraj kayıpları, uygun ankrajların kullanılmaması durumunda, kilit sisteminde ya da ankraj bloğunda meydana gelen aşınma ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle öngerilme işleminde kullanılan enstrümanların kilit sistemindeki dişlerinin, hesap edilen öngerilme kuvvetini karşılayacak seviyede olması gerekmektedir (Öztürk, 2018).

### 3.1.8.3.Sünme ve Büzülme (Rötre) Kayıpları

Betonda büzülme yani Rötre; çimento tipi, agrega tipi, karışım oranı ve kür süresine bağlı olarak değişmektedir. Öngerilmeli betonarme elemanlar fabrika şartlarında üretildiğinden normal betona göre daha hassas çalışılması nedeniyle Rötre daha azdır. TS-3233’e göre Rötre hesaplaması için bazı şekil değiştirme değerleri Çizelge 3.2.’de verilmiştir (ÖYHYK, 1979).

Çizelge 3. 2. Rötre birim şekil değiştirme değerleri

| Elemanlar | Kuru | Normal | Nemli ortam |
|---|---|---|---|
| Öngerme | 500.10-6 | 300.10-6 | 100.10-6 |
| Ard germe | 350.10-6 | 200.10-6 | 70.10-6 |

Bu değerler uzun vadeli oluşan değerlerdir. Yük aktarma sırasında ve daha sonrasında için bu kayıpların yarısı göz önünde bulundurulur. Bazı durumlar için ¾ ‘ü dikkate alınabilir. Rötre kaybı, denklem (3.2) yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Delta f_{pSH=} E_{ps} . \varepsilon_{SH} \quad (3.2)$$

### 3.1.8.4. Elastik Kısalma Kayıpları

Elastik kısalma kayıpları, öngerilme işlemi uygulandıktan sonra öngerilme çeliğinde meydana gelen gerilmenin betona aktarılması sonucunda ortaya çıkan kayıplardır. Öngerilme kuvveti uygulandığı anda elemanın boyca kısalması nedeniyle bu kayıplar meydana gelir. Bu kısalmaya bağlı olarak, uygulanan öngerilme kuvvetinde bir düşüş ortaya çıkmaktadır. Bu kayıp denklem (3.3) ile ifade edilebilir:

$$E_s = \frac{E_s}{E_{Ci}} f_{cir} \quad (3.3)$$

Ard germeli elemanlarda bütün kabloların eş zamanlı çekildiği kabul edildiğinden elastik kısalma olmadığı da kabul edilir. Bu sistemlerde kablolar genel olarak eşzamanlı çekilmezler, bundan dolayı her bir kablonun çekilmesi esnasında diğer kabloda belirli bir düzeylerde kayıp meydana gelmektedir (Öztürk, 2018).

### 3.1.8.5. Donatıda Gerilme Kayıpları (Relaksasyon)

Çeliğin akma gerilmesinin altındaki daha düşük değerlerde gerilmesi durumunda zaman içinde oluşan gerilme kayıpları denklem (3.4) ile hesaplanır. Bu denklemde; $f_p$ kablodaki gerilmeyi, $f_{pi}$ başlangıç gerilmesini, $f_y$ donatı akma dayanımını ifade etmektedir.

$$1 - \frac{f_p}{f_{pi}} = \frac{logt}{10} . \left( \frac{f_{pi}}{f_y} - 0.55 \right) \qquad (t \geq 1\ saat) \qquad (3.4)$$

Bu durumda $0.55 \geq \frac{f_{pi}}{f_y}$ olması durumunda kayıp olmadığı varsayılır.

### 3.1.8.6. Toplam Kayıplar

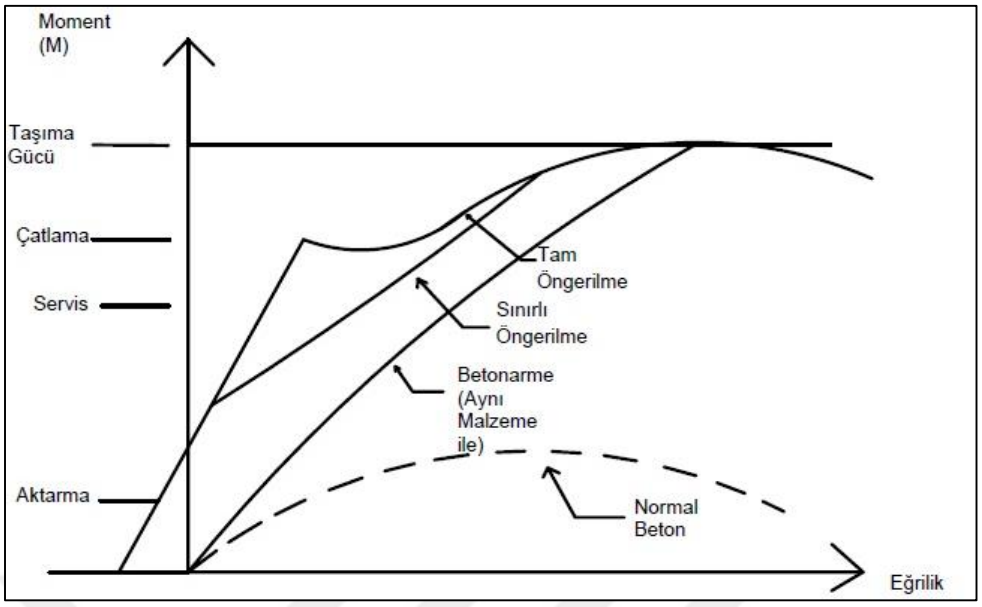
Ankraj ve sürtünme kayıplarının daha büyük çekme kuvveti ile çekerek giderildiği kabul edilir. Bu kabul ile ortalama kayıp değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir (Keyder, 2013).

Çizelge 3. 3. Ortalama toplam kayıp değerleri

| | **Ön çekme Kayıpları (%)** | **Ard çekme Kayıpları (%)** |
|---|---|---|
| Betonda Elastik Kısalma ve Eğilme | 4 | 1 |
| Betonda Sünme | 6 | 5 |
| Betonda Rötre | 7 | 6 |
| Çelikte Sünme | 3 | 3 |
| Toplam Kayıp | 20 | 16 |

### 3.1.9. Öngerilme Kuvvetinin Hesabı

Öngerilmeli yapı elemanlarını gerilme analizlerinin yapabilmek için, elemanın boyutlarının bilinmesi gerekir. Eğilmeye maruz kalan elemanlar, açıklık boyunca ve mesnette eğilme momenti etkisindedir. Öngerilmeli kirişlerin analizi dört aşamada yapılır. Aktarma, servis, çatlama, taşıma gücü aşamalarıdır. İlk üç aşama için kirişler elastik bir davranış sergilediklerinden dolayı elastik analiz ile, dördüncü aşama için taşıma gücü yaklaşımı yapılır. Şekil 3.4.'te öngerilmeli kiriş ve betonarme bir kirişin sergilediği davranış görülmektedir (Keyder, 2013).




Şekil 3. 4. Öngerilmeli ve betonarme bir kirişin davranışı (Keyder, 2013)

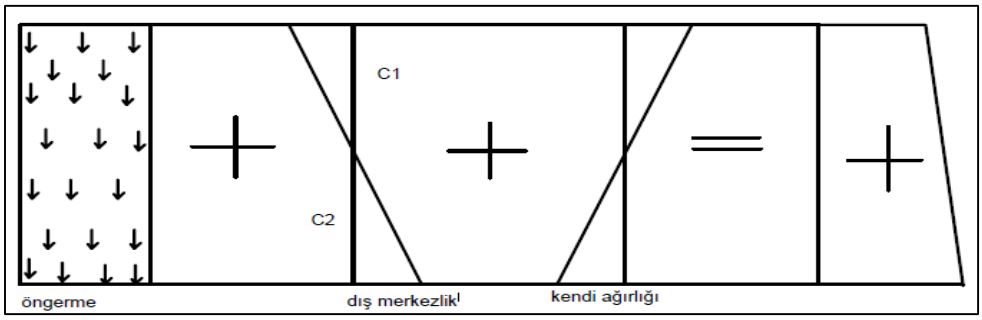
Öngerilmeli elemanlarda gerilme hesabı için önce öngerilme etkisi düşünülmeli ve hesaba katılmalıdır. Betonda oluşan gerilme kuvveti elastik olarak hesaplanır. Başlangıç veya etkin öngerilme kuvveti olan "P" kuvveti altında açıklık ortasında oluşmuş olan gerilme denklem (3.5) ile hesaplanır. Bu denklemde f kesitin ortasında oluşan gerilmeyi, P öngerme halatına verilen kuvveti ve A beton net kesit alanını ifade etmektedir.

$$f = \frac{P}{A} \tag{3.5}$$

Öngerme kuvveti olan 'P' açıklık ortasında 'e' dış merkezlik oluşturur. Dış merkezlik etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Oluşan momentten dolayı herhangi bir noktadaki gerilme denklem (3.6) ile hesaplanır (Öztürk, 2018).

$$\sigma = (t) = \frac{P}{A} + \frac{P.e}{I} y \tag{3.6}$$

Eğilme tasarımında 5 (beş) elverişsiz durum bulunmaktadır. Bu hususa dikkat edilmelidir.

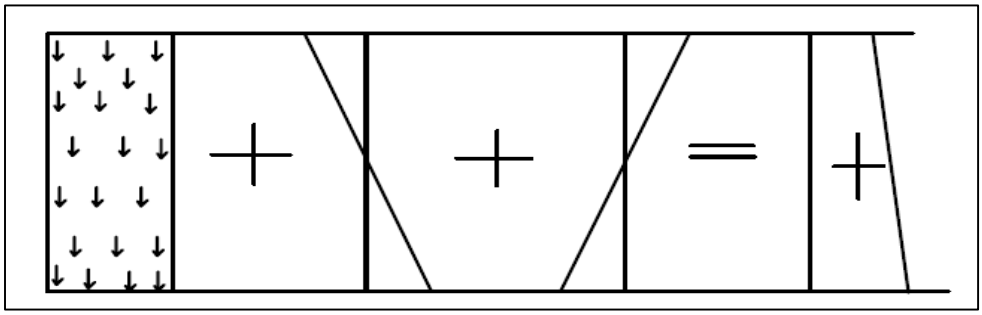



Şekil 3. 5. Enjeksiyon uygulamadan önce dışmerkez kablolu kiriş açıklığında gerilmeler

1. Öngerilmenin merkezde oluşturduğu eksantriste ve ters sehim sonucu kirişin kendi ölü ağırlığının oluşturduğu moment dikkate alınarak toplam gerilmeler denklem (3.7) ile hesaplanır.

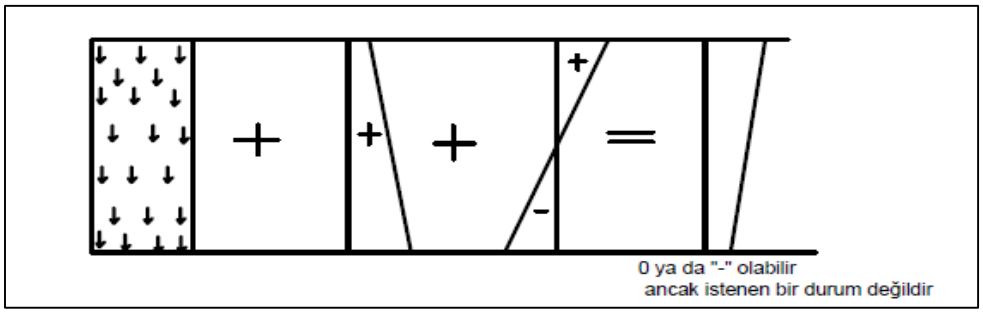
$$f_{1,2} = \frac{P_i}{A} \pm \frac{P_i\, C_{1,2}.e}{I} \pm \frac{M_0\, C_{1,2}}{I} \qquad (3.7)$$

2. Betona öngerilme kuvveti verildikten sonra elemana etkiyen sabit yükler altında oluşan analizdir. Bu durum Şekil 3.6. ‘da gösterilmiştir (Şener, 2006).



Şekil 3. 6. Etkin gerilme ile sabit yük altındaki gerilmeler

3. Eleman kullanıma hazır olduğunda elemanın işletme yükleri altındaki durumudur. Kayıpların dikkate alındığı etkin ($P_{et}$) öngerme kuvveti ile işletme yükünün birlikte bulunduğu durumda çekme gerilmelerinin oluşmasına izin verilmez (Hüsem, 2016).




Şekil 3. 7. Etkin öngerme ile işletme yükü altındaki gerilmeler

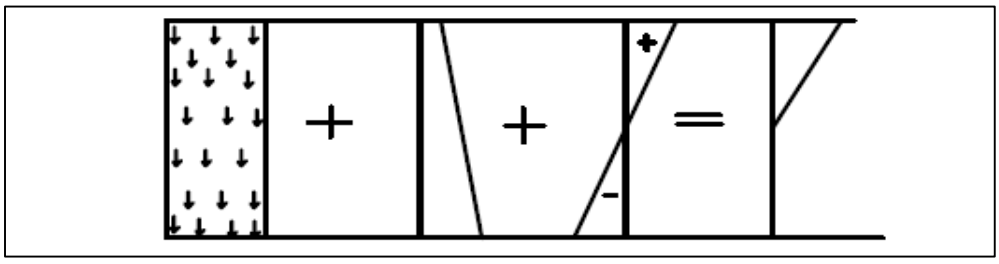
Şekil 3.7.'de etkin öngerme ve işletme yükü altındaki gerilme diyagramı gösterilmiştir.

Bu durumda gerilmeler denklem (3.8) ile hesaplanır.

$$f_{1,2} = \frac{P_{et}}{A} + \frac{P_{et}.e}{I} C_{1,2} \pm \frac{M_p C_{1,2}}{I} \qquad \left(w = \frac{I}{C_1 C_2}\right) \qquad (3.8)$$

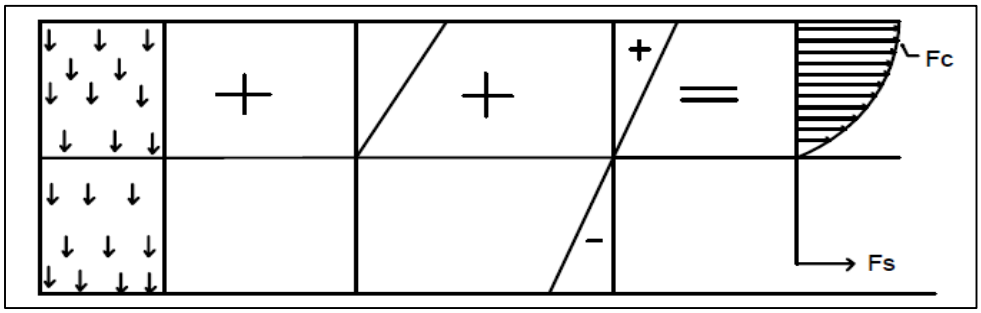
4. Çatlama durumu: basit mesnetli bir kirişte yüklenen yüklerin artması ile açıklık ortasındaki kesitin çekme lifinde (en dış lifte) betonun çekme dayanımına ulaştığı sınır durumudur (Hüsem, 2016).

   Çatlama durumu Şekil 3.8.'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. Çatlama durumu

5. Taşıma gücü sınır durumu: Dış momentle eşit olan ve en büyük momentidir. Taşıma gücü için sınır durumu şekil 3.9.'da gösterilmiştir (Hüsem, 2016).

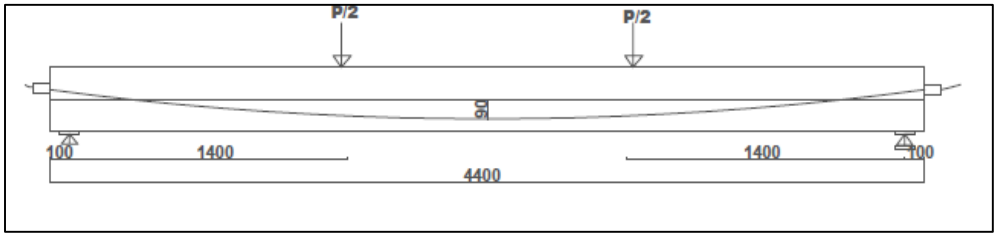



Şekil 3. 9. Taşıma gücü sınır durumu

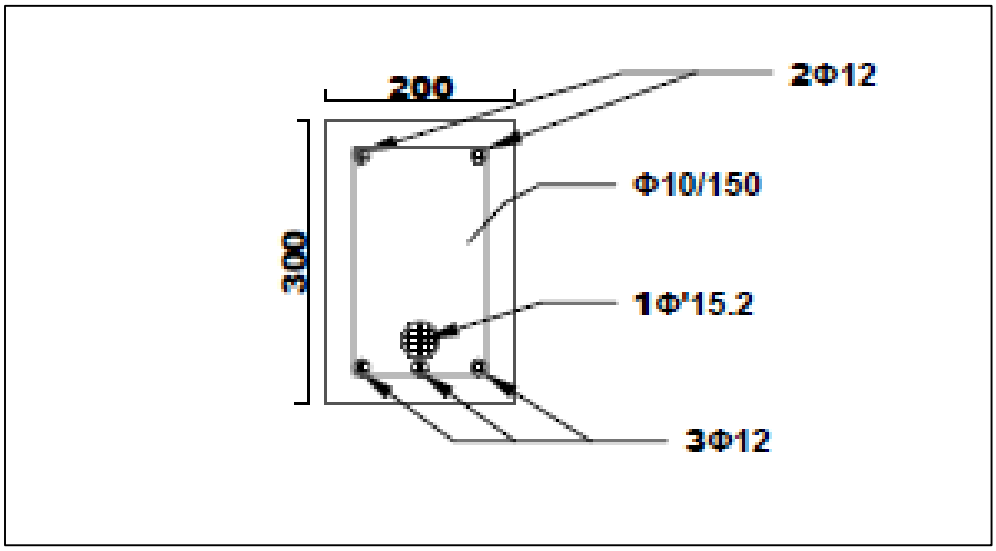
Elverişli olmayan yükleme işlemi ile elde edilmiş olan tasarım momenti ($M_d$) değeri eğilme elemanlarında oluşan taşıma gücü momenti ($M_u$) değerinden daha küçük bir değerde olduğu gösterilmelidir. Kesitin çatlama momenti hesaplanarak $M_u > 1.33M_{cr}$ çatlama momentinden %33'den büyük olması gerekir. Böylece elemanda çatlama oluşmamaktadır (Hüsem, 2016).

### 3.1.10. Deneysel Çalışma Programı

Çalışma kapsamında, ard germeli kirişler incelenerek, ard germe uygulamak amacıyla kullanılan halat formunun kirişin, taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın amacı; halat formunun kirişe olan etkisini ve kirişlerde ekonomiklik, işçilik, eğilme momenti, kesme kuvveti ve kirişte oluşan yer değiştirme bakımından en iyi halat formu tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla çalışmada ebatları (20x30x440 cm) olan 6 adet kiriş numunesi için Harran Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Deprem Laboratuvarında beton dökülmüştür. Bu kiriş numunelerinden 2'si normal betonarme kiriş olarak üretilmiştir. Diğer 4'ü öngerilmeli betonun ard germe yöntemiyle gerilmesi ile üretilmiş olup kirişlerin 2'si parabol halat formlu, diğer 2'si düz halat formlu olarak üretilmiştir. Şekil 3.10. ve üretilen betonarme kirişin boy kesiti ve en kesiti ise Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



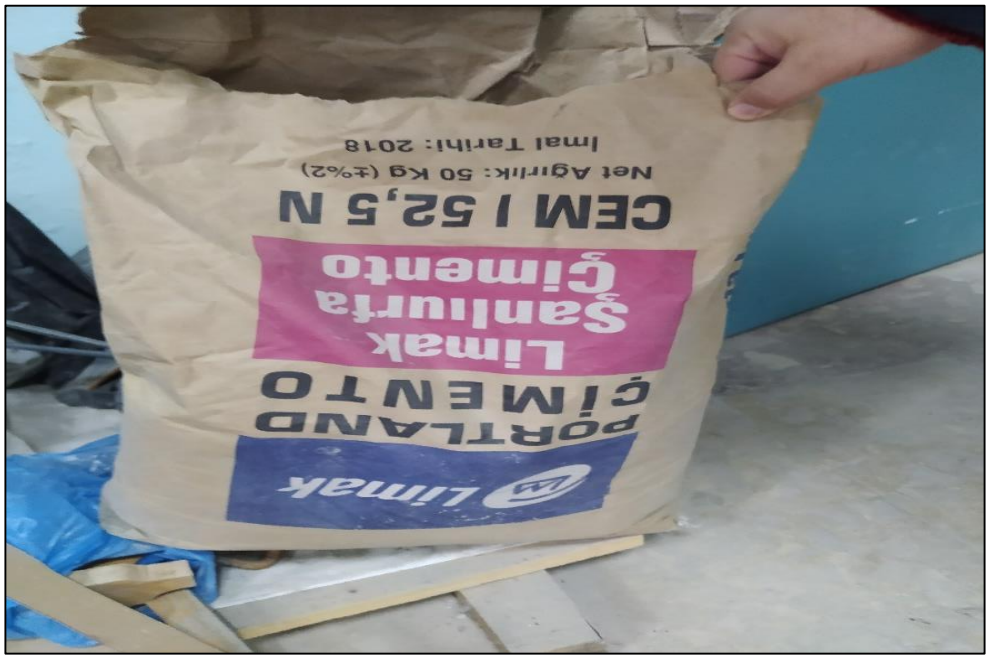

Şekil 3. 10. Kiriş modellemesi (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.)




Şekil 3. 11. Kiriş kesiti ve donatı detayları (ölçüler mm cinsinden verilmiştir.)

### 3.1.11. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Çimento olarak en az C40 dayanımına sahip bir beton üretebilmek için CEM I 52,5 N portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimento ile ilgili özellikler çizelge 3.4.'te sunulmuştur.




Şekil 3. 12. Kullanılan çimento

Çizelge 3.4. Deneylerde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

| Karakteristik silindir basınç dayanımı *fck (MPa)* | Eşdeğer küp basınç dayanımı *fck* (MPa) | Karakteristik eksenel çekme dayanımı *fctk* (MPa) | 28 günlük Elastisite modülü Ec (MPa) | $K_1$ | Poisson oranı |
|---|---|---|---|---|---|
| 40 | 50 | 2,2 | 34000 | 0,76 | 0,2 |

- İri agrega; iri agrega olarak çakıl veya kırmataş kullanılabilir. En iyi sonuca ulaşmak için deneyde kullanılan iri agrega önceden yüzeyleri temizlenmelidir. Kullanılan agregalardan max agrega çapı 16 mm'dir.
- İnce agrega; ince agrega olarak yıkanmış dere kumu ve 0-5 mm ince bazalt kullanılmıştır. Max tane çapı 5 mm'yi geçmemelidir.

### 3.1.12. Elek analizi deneyi

Hazırlanan karışımın TS-EN 933-1 ve TS 3530'e göre uygunluğunun tespiti için elek analiz deneyi yapılmıştır. Granülometri dağılımının sınır değerleri dışında olması durumunda betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılmayacağı bilinmektedir. İri agreganın fazla olması durumunda betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanılmayacağı bilinmektedir. İri agreganın fazla olduğu durumlarda beton homojen bir davranış göstermez boşluklar büyük ve bağlayıcılığı az olur. İnce agreganın fazla olması durumunda ise su ve çimentoya fazla ihtiyaç duymasından dolayı beton dayanımı düşük olmaktadır. İdeal karışım oranlarını hesaplayabilmek için elek analizi yapılarak uygun granülometri elde edilmektedir. Öngerilmeli beton üretimi için öncelikle kullanılacak olan üç farklı malzemenin uygun oranda karıştırılması gerekmektedir. Granülometri deneyinin laboratuvarda yapılma aşamaları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Üç malzeme; iri kırma bazalt (iri agrega), bazalt ve nehir kumudur. Uygun granülometri için hesaplama yöntemi ile üç farklı malzemenin karışım oranı bulunmuştur ve yapılan elek analizi deneyi ile değerler karşılaştırılmıştır. Değerlerin birbirlerine ve TS 706'daki değerlere uygun olduğu görülmüştür. Beton karışımlarında kullanılacak agregalar için yapılan elek analizi Çizelge 3.6.'da gösterilmiştir.

Çizelge 3. 5. Elek analizi

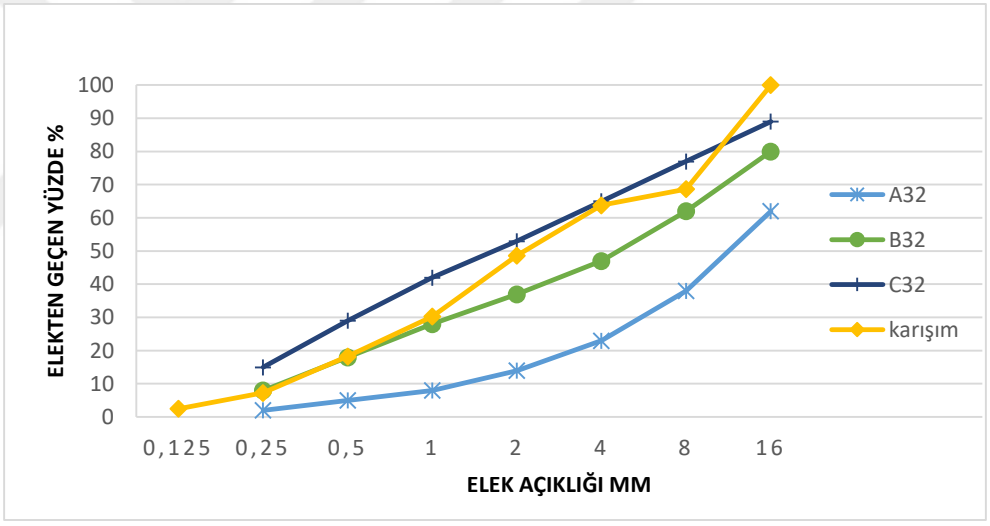
| Elek çapı (mm) | Elek üstü kalan (g) | Kümülatif kalan (g) | Elek üzerinde kalan (%) | Kümülatif kalan (%) | Kümülatif geçen (%) | Hesaplama yöntemiyle belirlenen gradasyon |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 99,60 |
| 8 | 1878,7 | 1878,7 | 31,32 | 31,32 | 68,68 | 61,97 |
| 4 | 292,8 | 2171,5 | 4,88 | 36,20 | 63,80 | 60,36 |
| 2 | 908,5 | 3080 | 15,14 | 51,34 | 48,66 | 47,29 |
| 1 | 1103,4 | 4183,4 | 18,39 | 69,73 | 30,27 | 29,96 |
| 0,5 | 719 | 4902,4 | 11,98 | 81,71 | 18,29 | 18,02 |
| 0,25 | 662 | 5564,4 | 11,03 | 92,74 | 7,26 | 7,61 |
| 0,125 | 286,8 | 5851,4 | 4,78 | 97,52 | 2,48 | 2,27 |
| Tava | 148,8 | 6000 | 2,48 | 100 | 0 | 0 |




Şekil 3. 13. Elek analizi için numunelerin hazırlanması




Şekil 3. 14. Elek analizi




Şekil 3. 15. Numunelerin üretilmesinde kullanılan agregaların granülometrik eğrisi

Şekil 3.15.'de gösterilen granülometri eğrisi standartta belirtilen eğrilerin arasında kalmaktadır. Böylelikle öngerilmeli beton üretimi için uygun bir granülometri dağılımı elde edilmiştir.

### 3.1.13. Özgül Ağırlık Deneyi

Betonarme numunelerinin yapılmasında kullanılacak agrega için T.S. 706 ve T.S. 1114'e göre özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. İnce ve iri agrega için numuneler

alınmış ve Şekil 3.16'da görüldüğü gibi özgül ağırlık deney sehpasına yerleştirilmiştir. Kuru ağırlıkları, suya doygun ağırlıkları ve su içindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Buna bağlı doygun birim hacim ağırlıkları, kuru birim hacim ağırlıkları ve su emme oranları hesaplanmıştır.



Şekil 3. 16. Özgül ağırlık deneyi

İri agrega:

Kuru ağırlığı: 1500 gr

Suya doygun ağırlığı: 1522 gr

Su içindeki ağırlığı: 967 gr

Kuru birim hacim ağırlığı:2.70 gr/$cm^3$

Doygun birim hacim ağırlığı:2.74 gr/$cm^3$

Su emme oranı :1,49 olarak hesaplanmıştır.

İnce agrega:

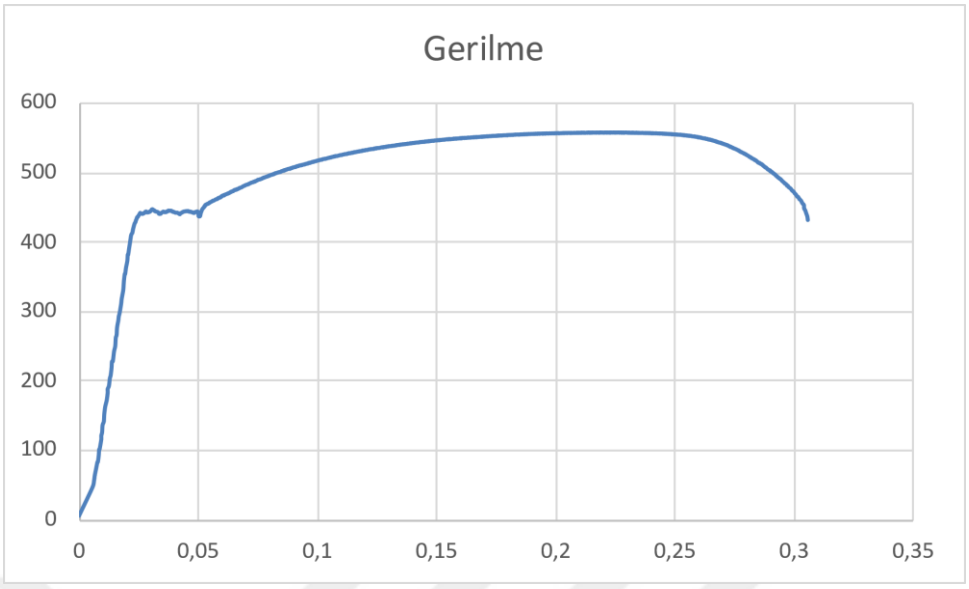
Kuru ağırlığı: 474 gr
Suya doygun ağırlığı: 500 gr
Beher ağırlığı: 389 gr
Kuru birim hacim ağırlığı:2.79 gr/$cm^3$
Doygun birim hacim ağırlığı:2.94 gr/$cm^3$
Su emme oranı:5,48 olarak hesaplandı.

- Su; içme suyu niteliğinde olmalıdır. Su/çimento oranı 0.40-0.45 olmalıdır.
- Katkı maddeleri; Kalsiyum klorür içeren katkı maddeleri kullanılmamıştır. Katkı malzemesi olarak Master Glenium Sky 608 katkısı kullanılmıştır. Polikarboksilik eter esaslı, süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Çimento taneciklerinin istenen işlenebilirliği sağlar. İstenilen süre boyunca etkili bir biçimde dağıtır ve birbirinden uzak kalmasını sağlar. Katkı maddesi karışım oranı çizelge 3.8.'te verilmiştir.

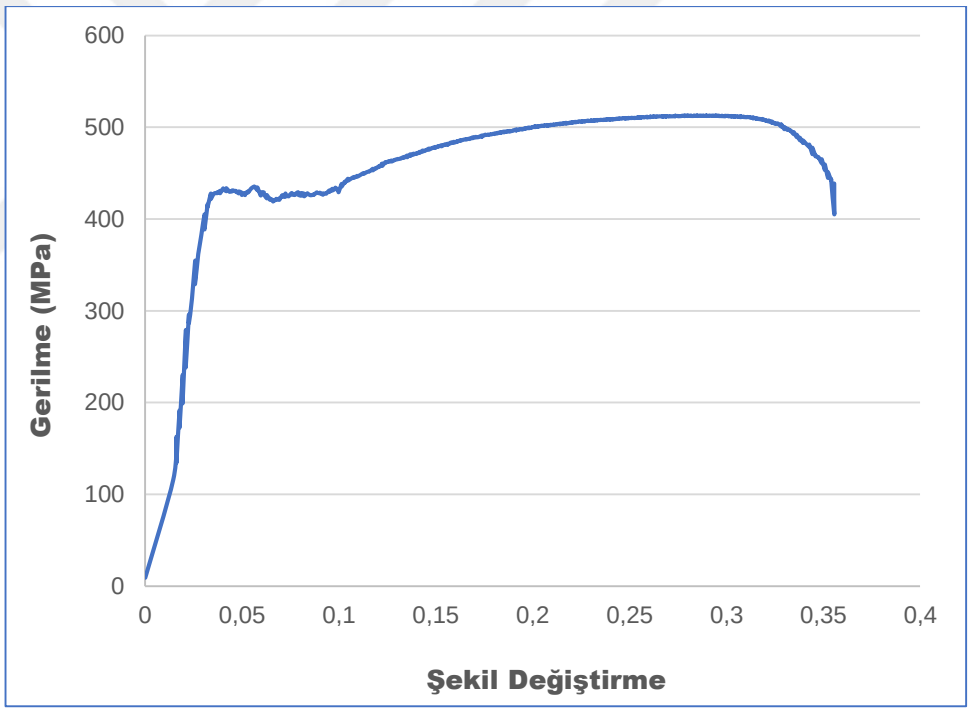
### 3.1.14. Çelik Çekme Deneyi

Deneylerde kullanılan donatıların taşıdığı yük ve gerilme değerleri buna bağlı olarak donatılarda meydana gelen şekil değiştirme değerlerini bulabilmek için UTM-3000 otomatik 500 kN kapasiteye sahip çelik çekme cihazı kullanılmıştır.

UTM-3000 deney cihazı güç ünitesi, gövde ve kontrol sistemi ve data toplama bölümlerinden oluşmaktadır. Değerlerin okunabilmesi için yük ölçüm sistemine basınç sensörü ve boy değişimini ölçmek için de LVDT (linear variable diffrential transformer) sensörü kullanılmıştır. Şekil 3.16.'da 12 mm donatının gerilme – şekil değiştirme grafiği ve Şekil 3.17.'de 10 mm donatının gerilme – şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir.




Şekil 3. 17. 12 mm donatı gerilme – şekil değiştirme grafiği




Şekil 3. 18. 10 mm donatı gerilme- şekil değiştirme grafiği

Boyuna ve montaj donatıları; öngerilmeli betonarme kiriş üretiminde kullanılan donatılar boyuna donatılar ve montaj donatılar olmak üzere iki tür donatı çapı kullanılmıştır. Boyuna donatıların çapı 12 mm montaj donatıları ve etriyeler için çapı 10 mm olan donatı kullanılmıştır. Laboratuvarda kullanılan donatıların hazırlanması sırasında çekilmiş bir fotoğraf Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 19. Kullanılan donatılar hazırlanması



Şekil 3. 20. Donatıların montajlanmış hâli

Kullanılan betonarme donatısının özellikleri Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 3. 6 Donatı özellikleri

| Çap (Φ) | Kesit Alanı ($mm^2$) | $f_y$ *(MPa)* |
|---|---|---|
| 12 (mm) | 113 | 440 |
| 10 (mm) | 78.5 | 480 |

- Ard germe halatının özellikleri çizelge 3.7.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 7. Ard germe donatı özellikleri

| Çapı (mm) (0,6 inç) | Akma dayanımı ($f_y$) MPa | Kopma dayanımı ($f_u$) MPa | Kesit alanı $A_{ps}$ ($mm^2$) | Elastisite modülü MPa | Poisson Oranı |
|---|---|---|---|---|---|
| 15,24 | 1676 | 1860 | 139,9 | $1,9*10^5$ | 0,3 |

### 3.1.15. Karışımların Hazırlanması

Deneylerde kullanılacak numunelerin üretiminde su/çimento oranı 0,41 olarak hesaplanmıştır. Hazırlanacak betonun 1 $m^3$ için kullanılan malzemelerin oranları Çizelge 3.8.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 8. 1 $m^3$ beton için karışım oranları

| **Su/çimento** | **Çimento (kg)** | **Su (kg)** | **Katkı (kg)** | **Nehir Kumu (kg)** | **İri bazalt (kg)** | **Bazalt (kg)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0,41** | 400 | 164 | 8 | 425 | 677 | 832 |

### 3.1.16. Taze Betona Yapılan Deneyler

#### 3.1.16.1. Çökme (Slump) Deneyi

Taze betonun işlenebilme özelliğini belirlemek için üç adet çökme (slump) deneyi yapılmıştır. Slump konisi üç aşamada doldurulmuştur. Her defasında üçte biri doldurulup 25 kez çelik çubuk ile şişlenmiştir. Slump konisi yavaş bir şekilde çekilerek kendi ağırlığı altındaki çökme Şekil 3.21.'de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Numuneler için hedef bir çökme değeri belirlenmiştir. Bu hedefe erişinceye kadar karışım oranları değiştirilerek deney tekrarlanmıştır. Hedef değerimiz S1 kıvam sınıfını tutturulmuştur.



Şekil 3. 21. Slump (çökme) deneyi



Şekil 3. 22. Çökme miktarının ölçülmesi

### 3.1.16.2. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneyler

Betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek ve beton dökülmeden önce dayanımını tayin etmek amacıyla 6 adet 150x150x150 mm küp numune dökülmüştür. Harran Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarında 7 günlük dayanım için üç adet, 28 günlük dayanım için üç adet küp numune kırılmıştır. Ayrıca her bir kiriş çifti dökülürken 3 adet küp beton numune alınmıştır. Betonun çekme dayanımını belirlemek amacıyla silindir yarma deneyi için 3 adet 150x300 mm silindir numune dökülmüştür. Bu şekilde betonun mekanik özellikleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

### 3.1.16.3. Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi

150x150x150 mm boyutlarında hazırlanan küp numunelerin basınç dayanım deneyleri 3000 KN yük uygulama kapasitesine sahip test cihazında ASTM C39 standartlarına uygun şekilde yapılmıştır. Numunelere Şekil 3.22 ve Şekil 3.23.'de görüldüğü gibi basınç deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin 7 günlük basınç dayanımları Çizelge 3.9.'da 28 günlük basınç dayanımları Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

Çizelge 3. 9. Beton numunelerin 7 günlük beton basınç dayanımı sonuçları

| Numune No | Beton Yaşı (Gün) | (150*150*150) Küp Basınç Dayanımı (MPa) | Ortalama Küp Basınç Dayanımı (MPa) | (150*300) Silindir Basınç Dayanımı (Mpa) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 7 | 44,32 | 50,63 | 40,50 |
| **2** | 7 | 44,59 | | |
| **3** | 7 | 62,97 | | |

Çizelge 3. 10. Beton numunelerin 28 günlük beton basınç dayanımı sonuçları

| Numune No | Beton Yaşı (Gün) | (150*150*150) Küp Basınç Dayanımı (MPa) | Ortalama Küp Basınç Dayanımı (MPa) | (150*300) Silindir Basınç Dayanımı (Mpa) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | 28 | 72,95 | 72,15 | 57,72 |
| **2** | 28 | 71,77 | | |
| **3** | 28 | 71,73 | | |




Şekil 3. 23. Küp numunelerin basınç dayanımının ölçülmesi




Şekil 3. 23. Küp numunelerin kırılması

## 3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında, ard germeli kirişler incelenerek, ard germe uygulamak amacıyla kullanılan halat formunun kirişin, taşıma kapasitesine ve enerji yutma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın amacı; halat formunun eğilme momenti, kesme kuvveti, kirişte oluşan yer değiştirme ve enerji yutma kapasitesi bakımından en iyi halat formu tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışmanın bu

kısmında deneyde kullanılan parametrelerden, deney düzeneğinden ve kullanılan kiriş numunelerinin üretim aşamaları anlatılmıştır.

### 3.2.1. Deney Parametreleri

Bu çalışmada ebatları (20x30x440 cm) olan 6 adet kiriş numunesi için laboratuvar ortamında beton dökülmüştür. Bu kiriş numunelerinden 2'si normal betonarme kiriş olarak üretilmiştir. Diğer 4'ü öngerilmeli betonun ard germe yöntemiyle gerilmesi ile üretilmiş olup kirişlerin 2'si parabol halat formlu, diğer 2'si düz halat formlu olarak üretilmiştir.

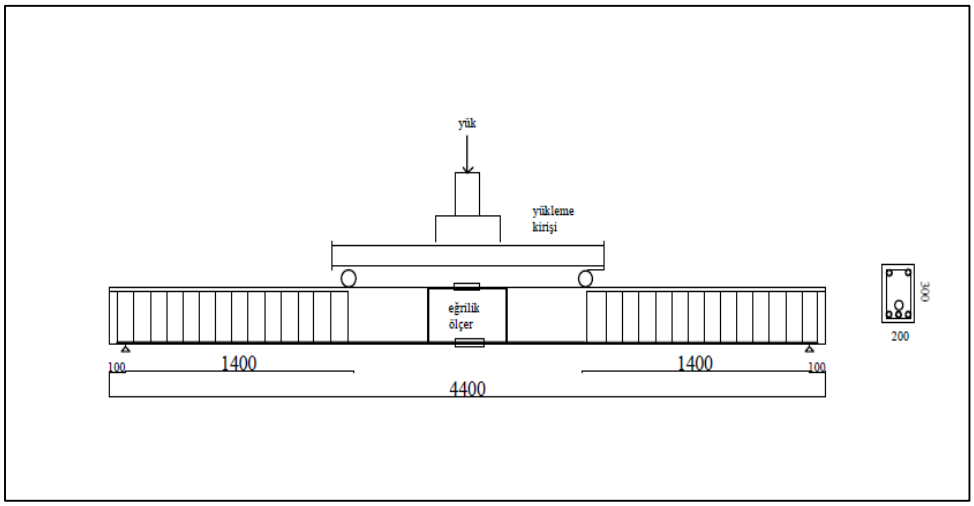
### 3.2.2. Deney Düzeneği

Çalışmada deney düzeneği olarak dört noktalı eğilme deney düzeneği kullanılmıştır. Dört noktalı eğilme deneyindeki amaç malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmektir. Dört noktalı eğilme deneyinde iki mesnet üzerinde duran kirişe, düşey yönde birbirine eşit iki kuvvet uygulanır. Kuvvetlerin uygulandığı noktalar, arası mesnetler arası uzaklığın 1/3'ü kadardır. Dört noktalı eğilme deneyinde maksimum moment belirli aralıklarda değer alır ve bu aralıklarda kesme kuvveti sıfırdır. (Baby, Graybeal, Marchand, & Toutlemonde, 2012).

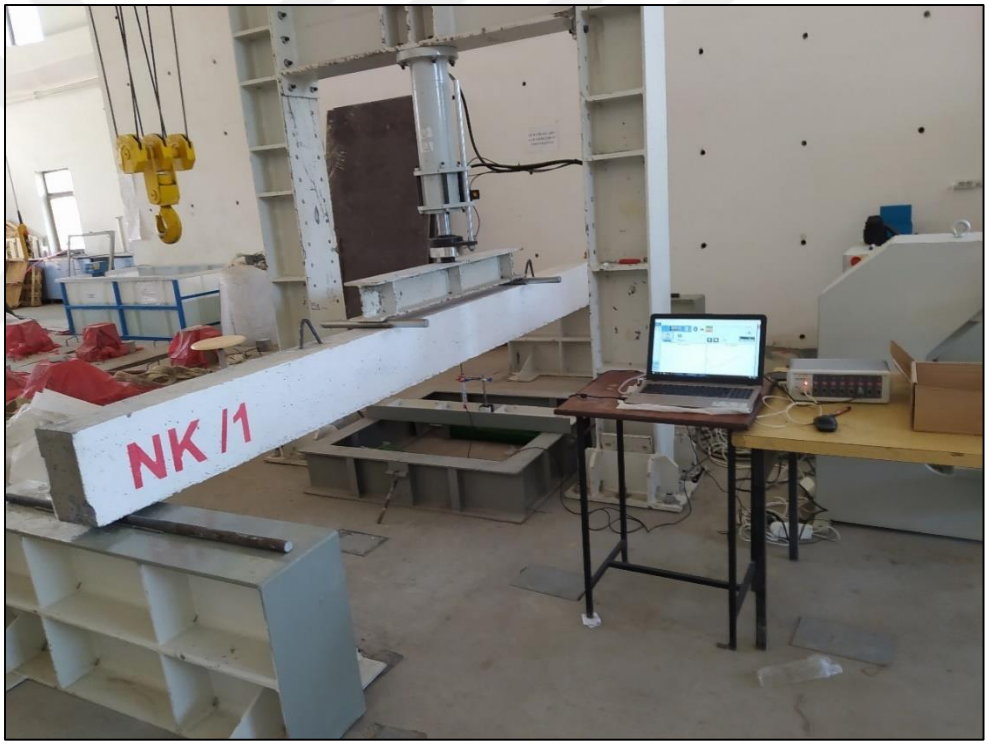
Kirişler için dört noktalı eğilme dayanımı formülü;

$$\sigma_e = \frac{F.L}{b.d^2}$$

$\sigma_e$ = Kirişin eğilme dayanımı (kgf/cm$^2$)
F = Kırılmaya neden olan yük (kgf),
L= Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi (cm),
b = Deney numunesinin genişliği(cm),
d = Deney numunesinin yüksekliği(cm).




Şekil 3. 24. Kirişe uygulanan dört noktalı eğilme deney düzeneği




Şekil 3. 25. Kirişe uygulanan dört noktalı eğilme deneyi

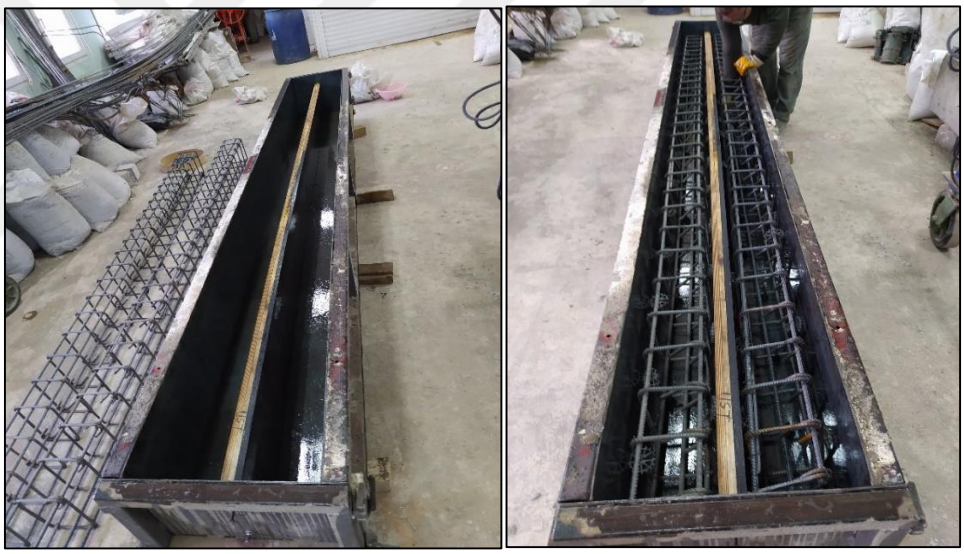
### 3.2.3. Numunelerin Hazırlanması ve Üretilmesi

Çalışmada kullanılmak üzere 6 adet kiriş üretilmiştir. Kirişlerin, 2 tanesi normal (halatsız) kiriş, 2 tanesi düz formlu halat ve diğer 2 tanesi parabol formlu halat ile üretilmiştir. Kiriş numuneleri Harran Üniversitesi Yapı ve Deprem Laboratuvarında üretilmiştir. Çalışmaya öncelikli olarak kirişlerin metrajı çıkarılarak

malzeme temini yapılmasıyla başlanmıştır Malzeme temini yapıldıktan sonra ön deneyler de yapılarak bir sonraki işleme geçilmiştir. Daha sonraki işlemde kiriş donatıları bağlanmış ve kiriş üretimine hazır hale getirilmiştir. Bu şekilde kiriş üretimine geçilerek 3 aşamada kiriş üretimi tamamlanmıştır.

***1. Aşama Normal Kirişlerin Üretilmesi;***

Kiriş üretimine ilk olarak kalıp kurulumu ile başlanmıştır. Kalıp boyutları Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da gösterildiği gibi 30x45x440 cm'dir. Kalıp kurulumu yapılıp kalıp yağlanmıştır. Kalıbın avantajlı boyutundan faydalanıp Şekil 3.27'de gösterildiği üzere araya playwood'dan imal edilmiş bölme panel konularak bir defada 2 adet kiriş numunesi için beton dökümü yapılmıştır.



Şekil 3. 26. Kalıbın kurulması ve donatıların yerleştirilmesi



Şekil 3. 27. Betonun hazırlanması



Şekil 3. 28. Hazırlanan betonun kalıplara dökülmesi

### *2. Aşama Düz Halat Formlu Kirişlerin Üretilmesi*

Kiriş üretimi aşamalı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Kalıp kapaklarında ard germe halatını geçirmek amacıyla delikler açılmıştır. Daha sonraki aşamada kalıp

kurulup donatılar yerleştirilmiştir. Ard germe halatını geçirmek amacıyla donatılar arasından 2,25 mm çapında 4,40 m boyundaki plastik boru (halat kılıfı) yerleştirilmiştir. Ard germe halatı plastik borudan geçirilerek, düz form kazandırmak amacıyla her iki uçtan gerdirme aparatı kullanılarak gerdirilmiştir. Şekil 3.29 ve Şekil 3.30.'da halatın gerdirilme noktası gösterilmiştir. Son kontroller yapıldıktan sonra beton dökümü yapılmıştır. Şekil 3.31. ve Şekil 3.32. kiriş imalatının farklı aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3. 29. Halatın gerdirilmesi



Şekil 3. 30. Halat gerdirme mekanizması



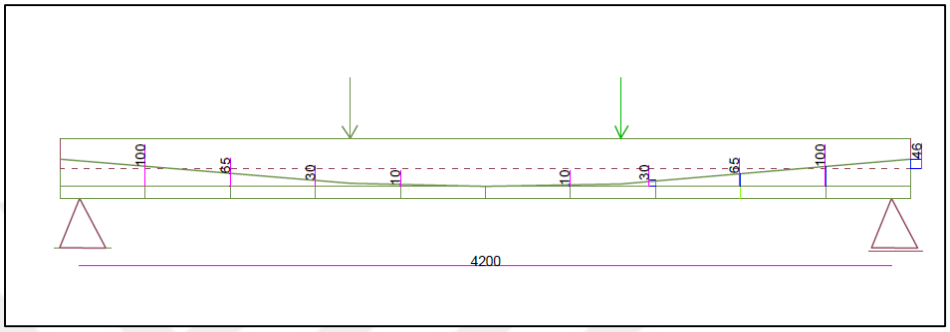
Şekil 3. 31. Plastik boru ve halatın yerleşim detayı



Şekil 3. 32. Kalıplara beton dökümünün tamamlanmış hali

### *3. Aşama Parabol Halat Formlu Kirişlerin Üretilmesi*

Kirişlerin üretilmeden önce bir takım ön hazırlıklar yapılmıştır. Öncelikli olarak halata parabol form kazandırmak amacıyla, belli aralıklarla belli noktalarda halat plastik borudan geçirilerek donatıya bağlanmıştır. Şekil 3.33.'de gösterildiği şekilde ard germe halatına uygulanmıştır.




Şekil 3. 33. Parabol halatın belli mesafelerdeki kotlara bağlanması

Mesafeler belirlendikten sonra kılıf içerisine geçirilen halat donatılara bağlanıp kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.34'te gösterildiği şekilde halata parabol formu verme işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 3. 34. Parabol formundaki halatın donatıya belli noktalarda sabitlenmesi

Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra donatılar kalıba yerleştirilmiş ve beton dökümü için hazırlık yapılmıştır. Beton döküm işlemi Şekil 3.35.'deki gibi tamamlanmıştır.



Şekil 3. 35. Hazırlanan beton karışımın kalıba dökülmesi

Her üç aşamada da beton dökümü yapıldıktan sonra kirişler küre tabi tutulmuştur. Beton prizini aldıktan sonra kalıptan çıkarılarak depo alanına yerleştirilmiştir. Bu şekilde toplamda 6 adet kiriş üretimi tamamlanmıştır. Şekil 3.36. ve Şekil 3.37.'de gösterilen şekilde kirişlere kür uygulanmış ve depolama alanına taşınarak istif edilmiştir.



Şekil 3. 36. Kiriş numunelerin küre tabi tutulması



Şekil 3. 37. Kiriş numunelerin depolama alanında istif edilmesi

### 3.2.4. Numunelere Ard Germe İşleminin Uygulanması

Ard germe işlemine başlamadan önce hazır olan kiriş numunelerden ard germe halatı geçirilerek yük uygulanması için hazır hale getirilmiştir. Daha sonra iki uca ankraj başlıklar yerleştirilmiştir. Bir uç sabit iken diğer uç serbest bırakılmıştır. Sabit olan uca yaylı başlık takılırken serbest uca yaysız (kapalı) başlık takılarak germe işlemine hazır hale getirilmiştir. Gerilme işlemi vereceğimiz piston tabancasının güç ünitesi 160 bar basınca ayarlanmış ve gerilme işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.38'de gösterildiği şekilde ankranlanmıştır.



Şekil 3. 38. Ankraj başlık



Şekil 3. 39. Piston tabancası

# 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

## 4.1. Deneysel Çalışma

### 4.1.1.Giriş

Bu bölüm deneysel çalışma sonuçlarının analizini ve yorumlanmasını kapsamaktadır. Her kiriş numunesinden ikişer tane olmak üzere altı farklı deney numunesi incelenmiştir. Bunlardan iki tanesi (NK1, NK2) normal kiriş, iki tanesi (ARDGP1, ARDGP2) parabol ard germe halatlı kiriş, iki tanesi (ARDGD1, ARDGD2) düz ard germe halatlı kiriş olarak üretilmiştir.

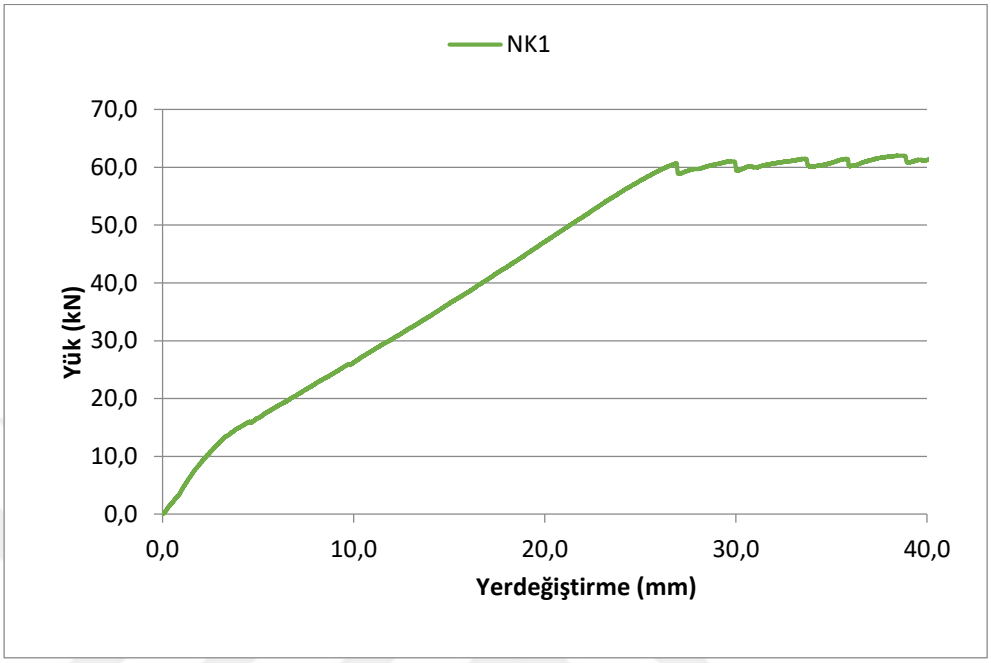
Üretilen betonarme kirişler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyle kirişlerin açıklık ortasında maruz kaldığı maksimum yük ve kirişin açıklık ortasında yaptığı yer değiştirme ölçülerek enerji yutma (tokluk) kapasiteleri ve süneklilikleri hesaplanmıştır. Böylece hangi kiriş türünün diğerinden daha sünek ve depreme dayanıklılık açısından faydalı olduğu belirlenmeye çalışılmıştır.

### 4.1.2. Yük-Yerdeğiştirme ilişkileri

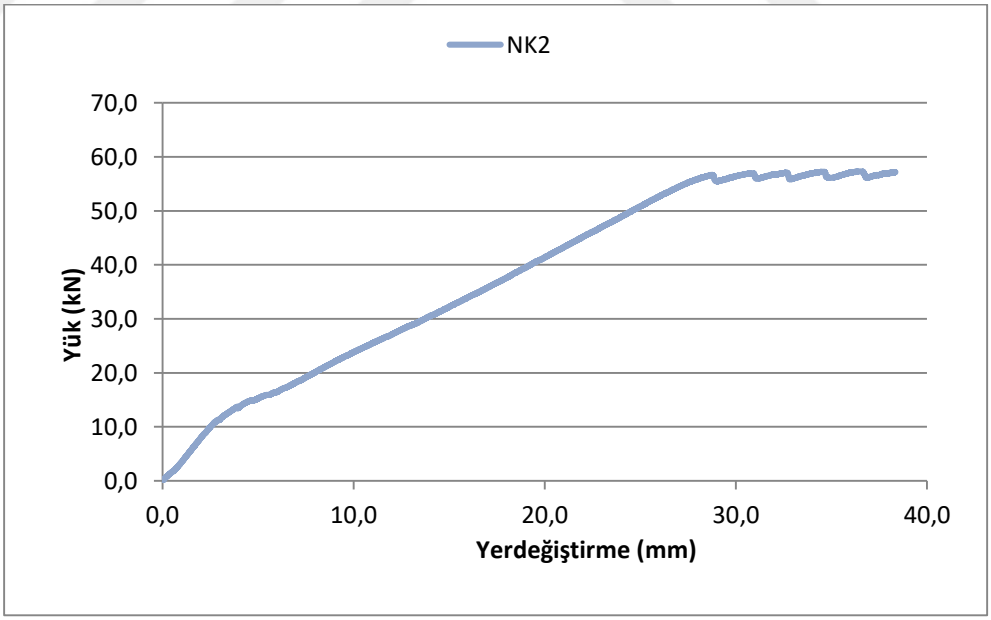
Numunelere uygulanan yükleme altında kiriş orta açıklığının yer değiştirmesi, kiriş ortasına yerleştirilen yer değiştirme ölçer (LVDT) aracılığıyla ölçülmüştür. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi tüm numunelere yük uygulanmıştır. Yük uygulanmaya başladığında elastik doğrusal davranış sergileyen bu betonarme kirişler yük miktarı arttıkça akma dayanım kapasitelerini aşmış ve doğrusal olmayan davranış sergilemeye başlamışlardır.

Ard germe halatsız iki adet normal beton kiriş numunesi yaklaşık 62 kN yüke maruz kalmıştır. Bu kiriş numunelerinden NK1 62 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra az da olsa direnç kaybetmiş ve son olarak 60 kN yük altında doğrusal olmayan davranış göstermeye başlamıştır. Şekil 4.1 (a)'da gösterildiği gibi NK1 yük- yerdeğiştirme

grafiği çizilmiştir. Aynı şekilde NK2 57 kN'a ulaşmıştır. Doğrusal olmayan davranışı ise Şekil 4.2 (b)'de görüldüğü üzere 56 kN'da göstermeye başlamıştır.



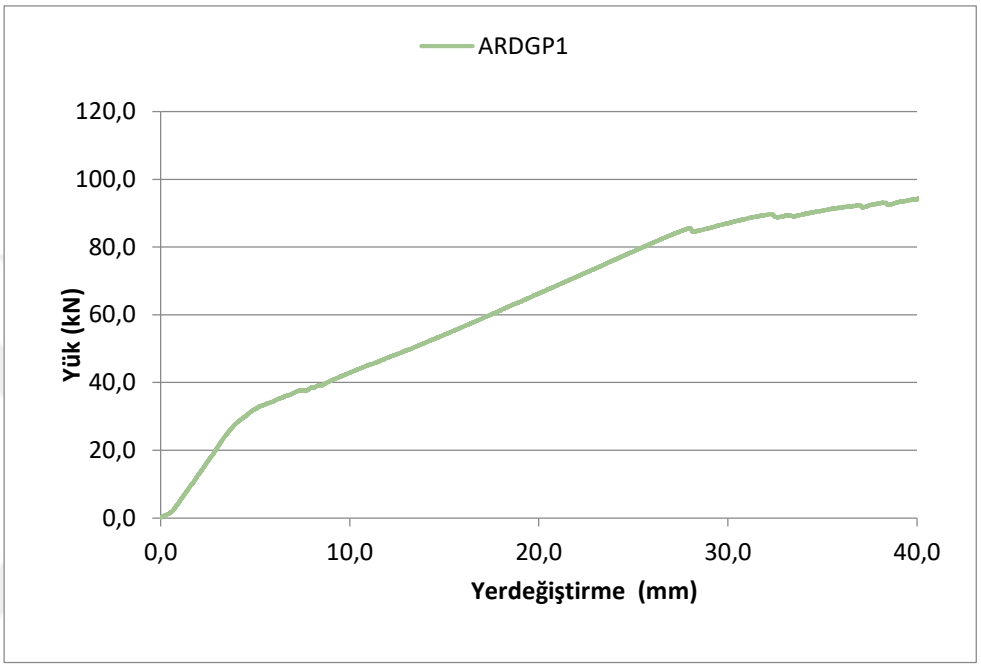

Şekil 4. 1. (a) NK1 numunesinin yük- yerdeğiştirme eğrisi



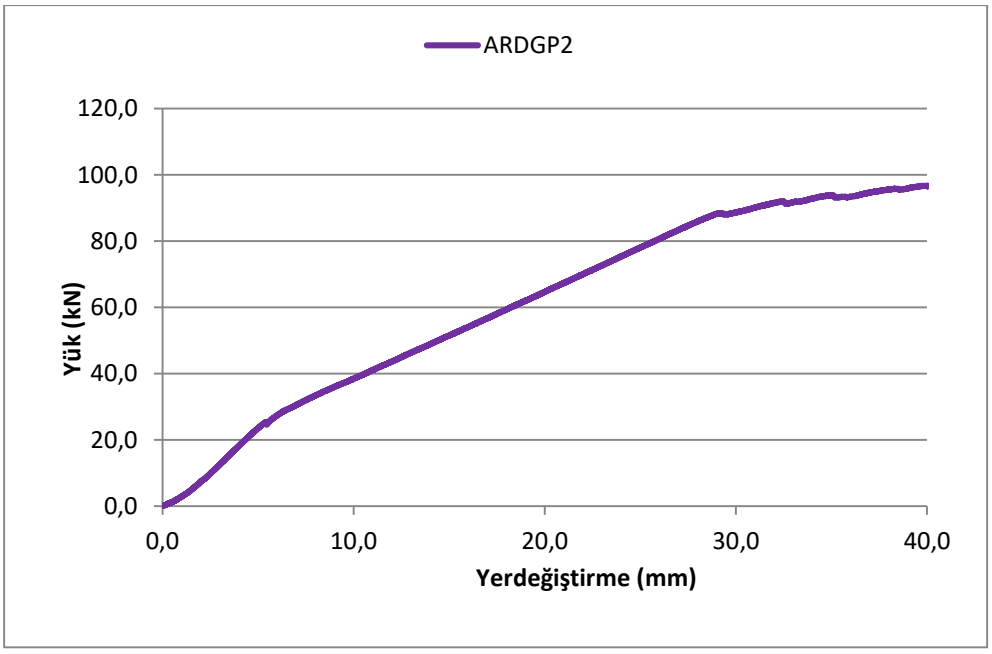

Şekil 4. 2. (b) NK2 numunesinin yük- yer değiştirme eğrisi

Parabol ard germe halatlı iki adet beton kiriş numunesi yaklaşık 96 kN yüke maruz kalmıştır. Bu kiriş numunelerinden ARDGP1 95 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamadan

sonra az da olsa direnç kaybetmiş ve son olarak 94,188 kN yük altında doğrusal olmayan davranış göstermeye başlamıştır. Şekil 4.3 (c)'de gösterildiği gibi ARDGP1 yük- yer değiştirme grafiği çizilmiştir. Aynı şekilde ARDGP2 97 kN'a ulaşmıştır. Doğrusal olmayan davranışı ise Şekil 4.4 (d)'de gösterildiği şekilde 96,64 kN'da göstermeye başlamıştır.

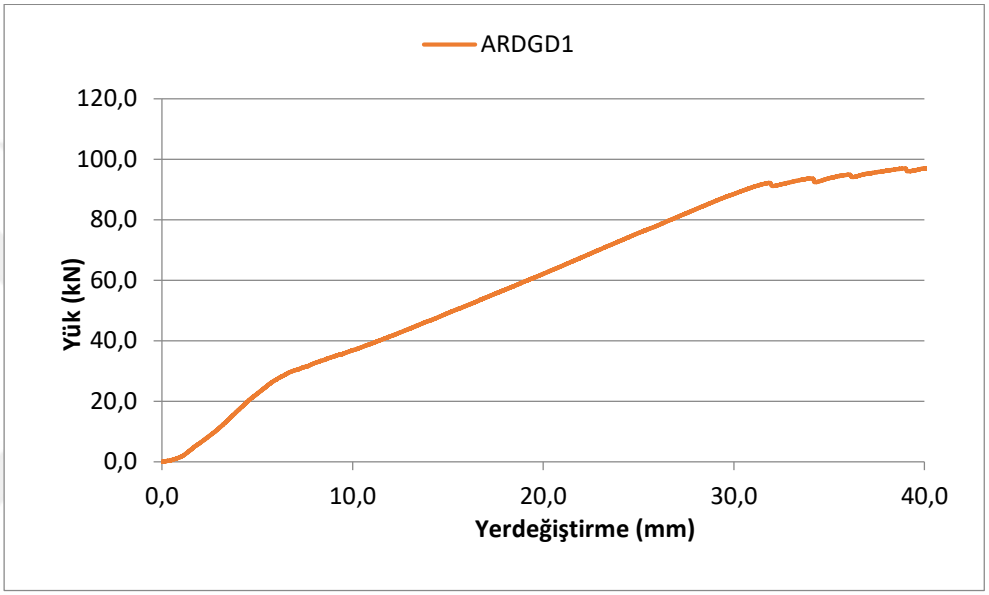



Şekil 4. 3. (c) ARDGP1 Yük- yerdeğiştirme eğrisi

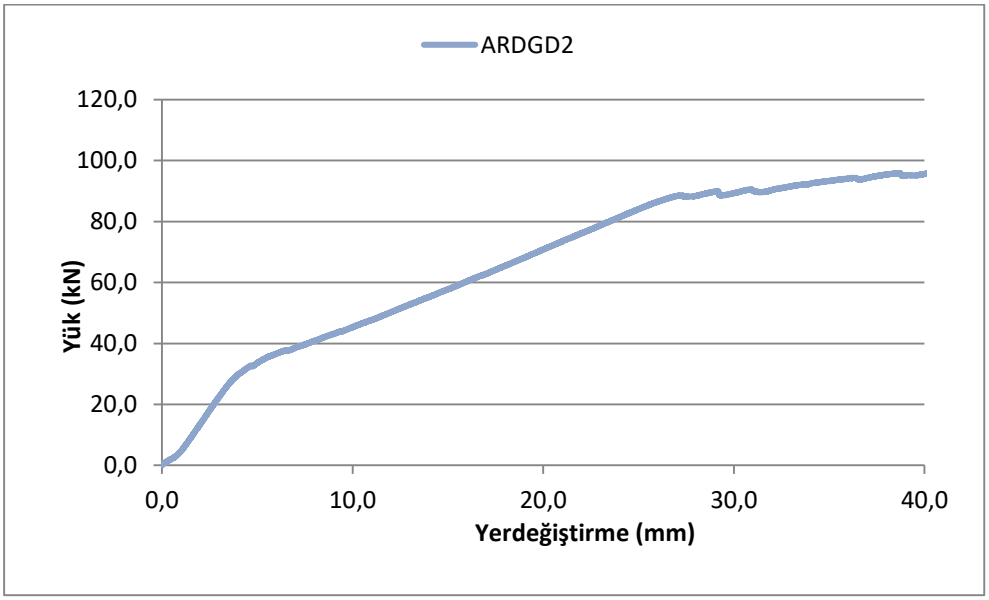



Şekil 4. 4. (d) ARDGP2 Yük- yerdeğiştirme eğrisi

Düz ard germe halatlı iki adet beton kiriş numunesi yaklaşık 97,585 kN yüke maruz kalmıştır. Bu kiriş numunelerinden ARDGD1 90 kN'a ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra az da olsa direnç kaybetmiş ve son olarak 94,188 kN yük altında doğrusal olmayan davranış göstermeye başlamıştır. ARDGP1 numunesinin yük- yer değiştirme eğrisi Şekil 4.5 (e)'de gösterildiği gibi çizilmiştir. Aynı şekilde ARDGD2 96,358 kN'a ulaşmıştır. Doğrusal olmayan davranışı ise Şekil 4.6 (f)'de gösterildiği gibi 94 kN'da göstermeye başlamıştır.

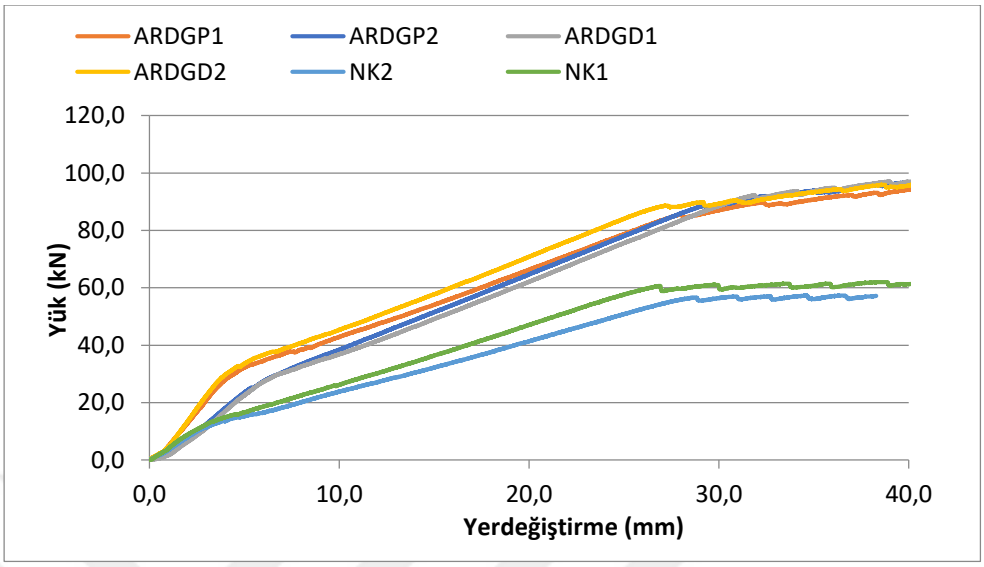



Şekil 4. 5. (e) ARDGD1 Yük – yerdeğiştirme eğrisi




Şekil 4. 6. (f) ARDGD2 Yük – yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 4.7’ de tüm kirişlerin yük – yerdeğiştirme değerleri karşılaştırılmıştır.




Şekil 4. 7. Tüm kirişlerin yük – yerdeğiştirme değerleri

Yukarıdaki Şekil 4.7’de tüm kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiğine göre halatsız normal betonarme kirişler (NK1, NK2) birbirine yakın yüklerde kırılmışlardır. Parabol halatlı kirişler (ARDGP1, ARDGP2) ve düz halatlı kirişlerde birbirine yakın yüklerde kırılıp aynı davranışı sergilemişlerdir.

### 4.1.3. Çatlama Parametreleri ve Kırılma Şekli

Tüm numunelerde, yükleme boyunca çatlakların oluşumu ve yayılması izlenmiştir. Kirişte deformasyon genellikle kiriş orta bölgesine yakın yerlerde eğilme çatlakları ile beraber başlamış ve yayılmıştır.

Şekil 4.8’de normal halatsız kirişlerin çatlak izleri gözlenmiştir. Halatlı kirişlere nazaran daha az çatlak görünümüne sahip olduğu anlaşılmıştır. Sebebi ise halatlı kirişlerin daha yüksek bir süneklilik sergilemesi olarak yorumlanabilir. Şekil 4.8 (a)’da NK1 ve Şekil 4.9 (b)’ de NK2 çatlak oluşumları gösterilmiştir. İlk çatlağın 13 kN ‘da oluşmaya başladığı gözlenmiştir.

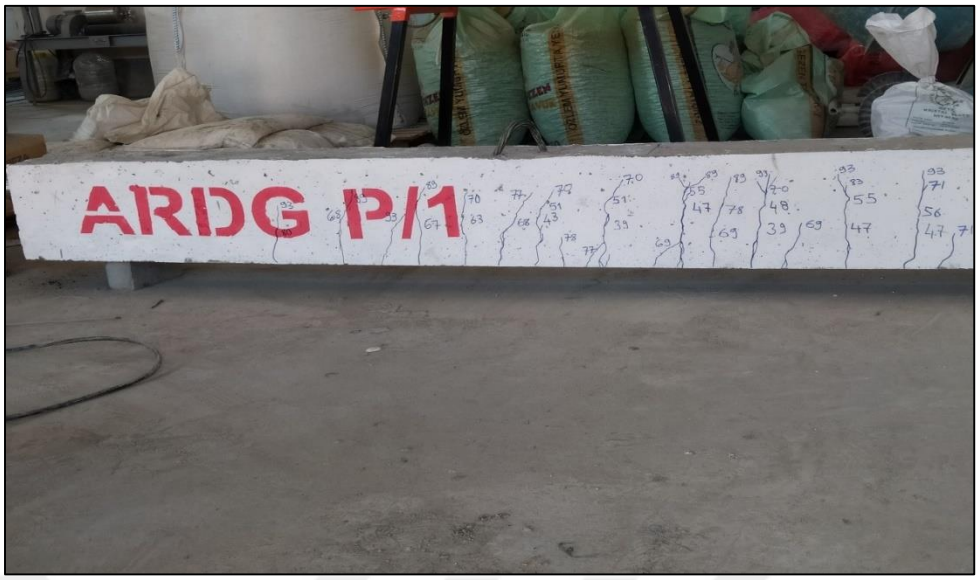



Şekil 4. 8. (a) NK1 kesme ve eğilme çatlakları




Şekil 4. 9. (b) NK2 kesme ve eğilme çatlakları

ARDGP1 ve ARDGP2 numuneleri incelendiğinde normal halatsız kirişlere göre daha dayanıklı olup çatlak oluşumunu daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kirişlerde eğilme ve kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Kesme çatlaklarının yok denecek kadar az oluşmasının sebebi; parabol halat formunun kiriş uç kısımlarında oluşan maksimum kesme kuvvetinden oluşan asal gerilmeleri karşılayarak etriye görevi üstlenmiş olmasıdır. Şekil 4.10 (c)'de ARDGP1 çatlakları gözlemlenmiştir ve Şekil 4.11 (d)'de ARDGP2 numunelerindeki çatlak oluşum mekanizması gösterilmiştir. İlk çatlakların 30 kN 'dan itibaren oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir.




Şekil 4. 10. (c) ARDGP1 kesme ve eğilme çatlakları




Şekil 4. 11. (d) ARDGP2 kesme ve eğilme çatlakları

ARDGD1 ve ARDGD2 kirişlerinde de çatlak oluşumunun fazla olduğu gözlemlenmiştir. Düz halatlı olan bu kiriş kesitinde basınç bölgesi oluşturduğundan eğilmeye dayanımını oldukça yükselmiştir. Kiriş açıklık ortasında meydana gelen maksimum eğilme momentini arttırmış, kiriş uçlarında bu değer minimum olarak kalmıştır. Böylece açıklık ortasında eğilme dayanımını daha da yükselmiştir. Parabol halatlı ard germe kirişlere göre kesme çatlakları daha fazla oluşmuştur. Çünkü düz

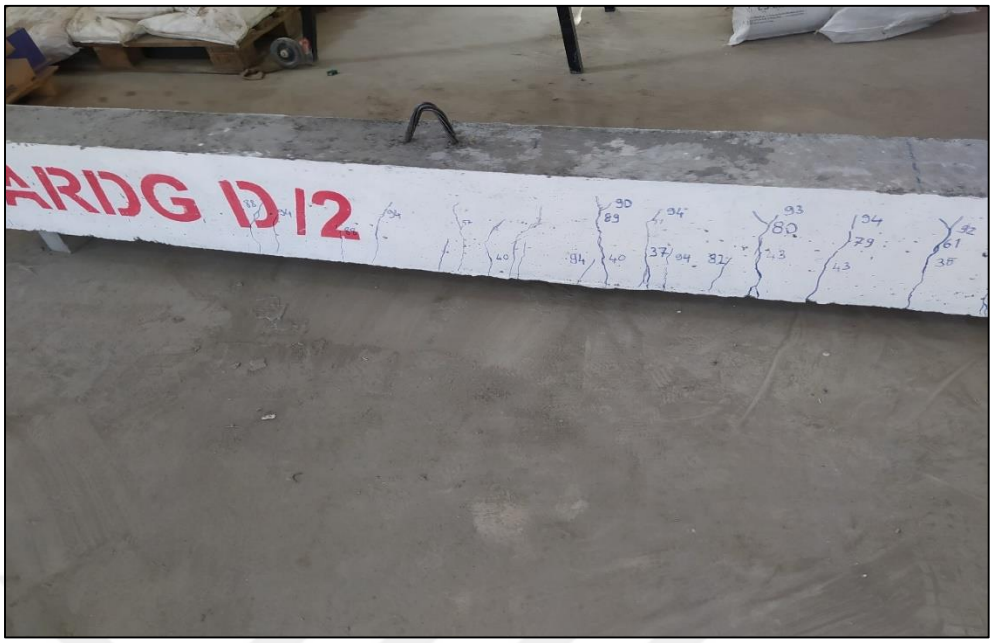
halatlı ard germeli kirişlerin parabol ard germeli kirişlere göre kayma dayanımı düşüktür. Şekil 4.12 (e)'de ARDGD1 eğilme ve kesme çatlakları gözlenmiştir. Şekil 4.13 (f)'de ARDGD2 eğilme ve kesme çatlakları gözlenmiştir. İlk çatlak 36 kN' da oluşmaya başlamıştır.




Şekil 4. 12. (e) ARDGD1 eğilme ve kesme çatlakları



Şekil 4. 13. (f) ARDGD1 eğilme ve kesme çatlakların yoğunluğu

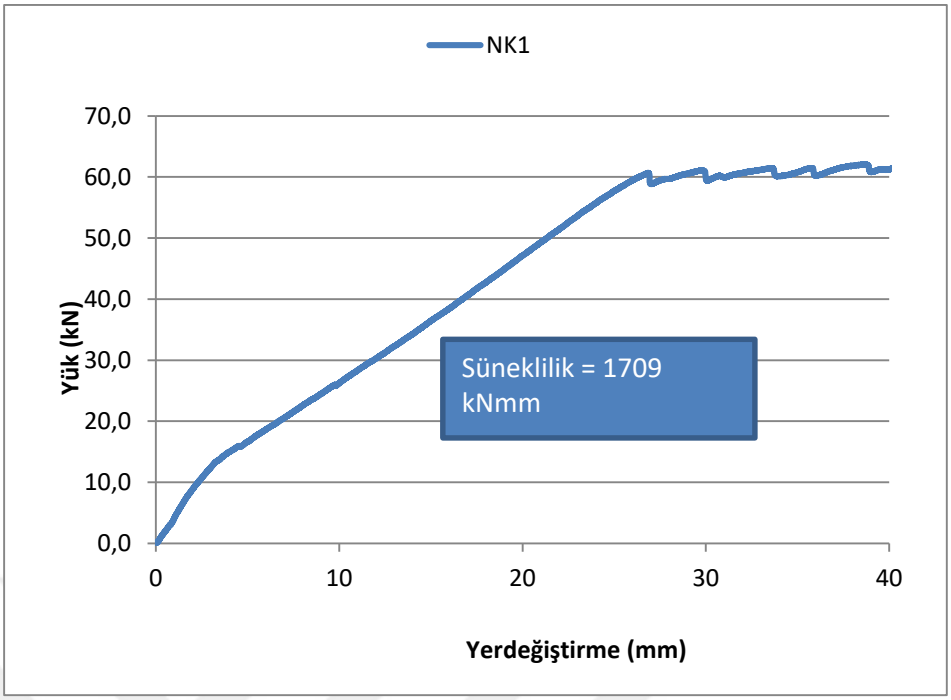



Şekil 4. 14. (g) ARDGD eğilme ve kesme çatlakların yoğunluğu

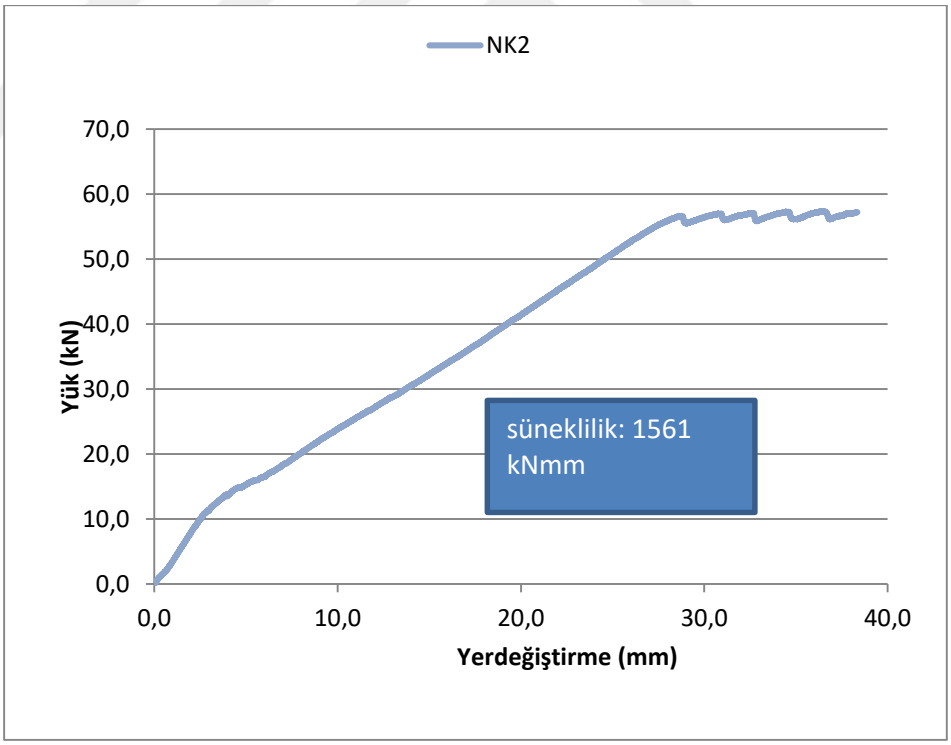
### 4.1.4. Enerji Yutma Kapasitesi (Tokluk)

Dünyanın pek çok yerinde şiddetli depremler meydana gelmektedir. Deprem etkisindeki yapıların dayanıklılığı, dayanımını kaybetmeden gerektiği kadar şekil değiştirme yapabilmesi, titreşimlere dayanabilmesi, sünek davranışa sahip olması, bir bütün olarak plastikleşmeye ve de sismik enerjiyi yutabilme kapasitesine bağlıdır. Bir yapıya etki eden sismik enerji kapasitesi, yapının sergilediği çevrimsel davranışla tüketilir. Enerji yutma kapasitesi, çevrimsel döngülerinin durumunu belirleyen eşdeğer sönümleme oranıyla belirtilmektedir (Chopra, 1995. ).

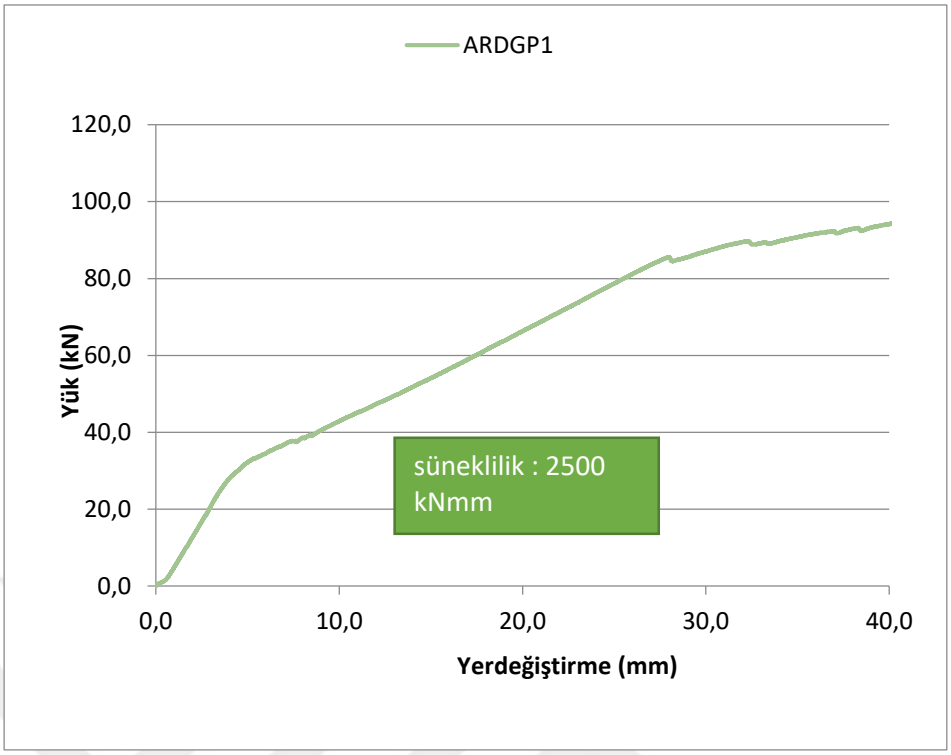
Örneklerin enerji yutma kapasiteleri hesap edilirken Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de gösterildiği gibi yük/yer değiştirme grafiklerinden her bir eğrinin altındaki alan hesaplanmıştır. Toplam alan her bir kiriş numunesinin enerji yutma kapasitesini (süneklilik, tokluk) ifade etmektedir.



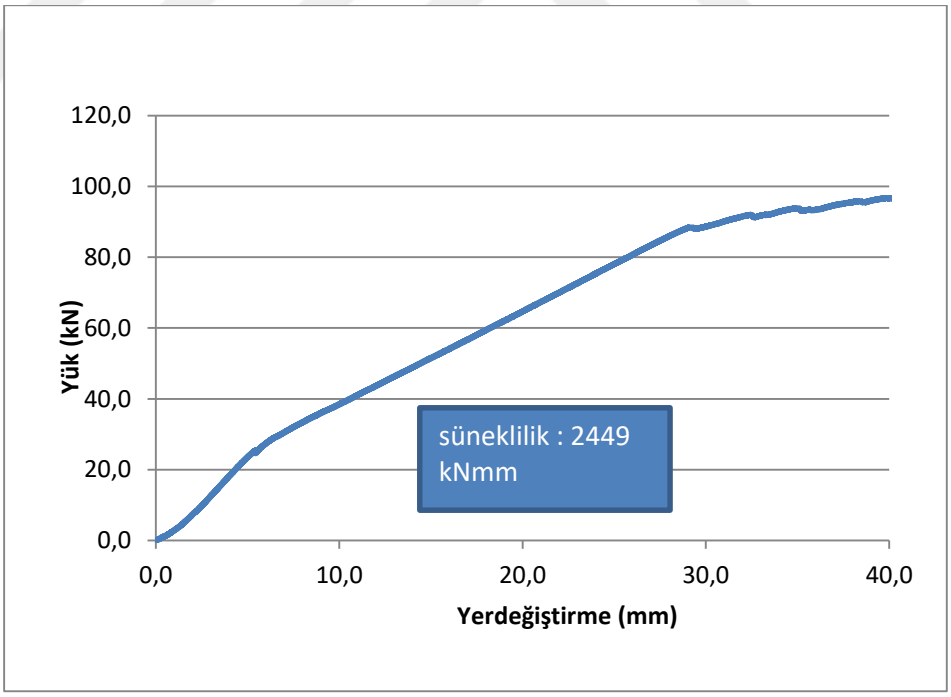

Şekil 4. 15. Normal kiriş numunesi (NK1)



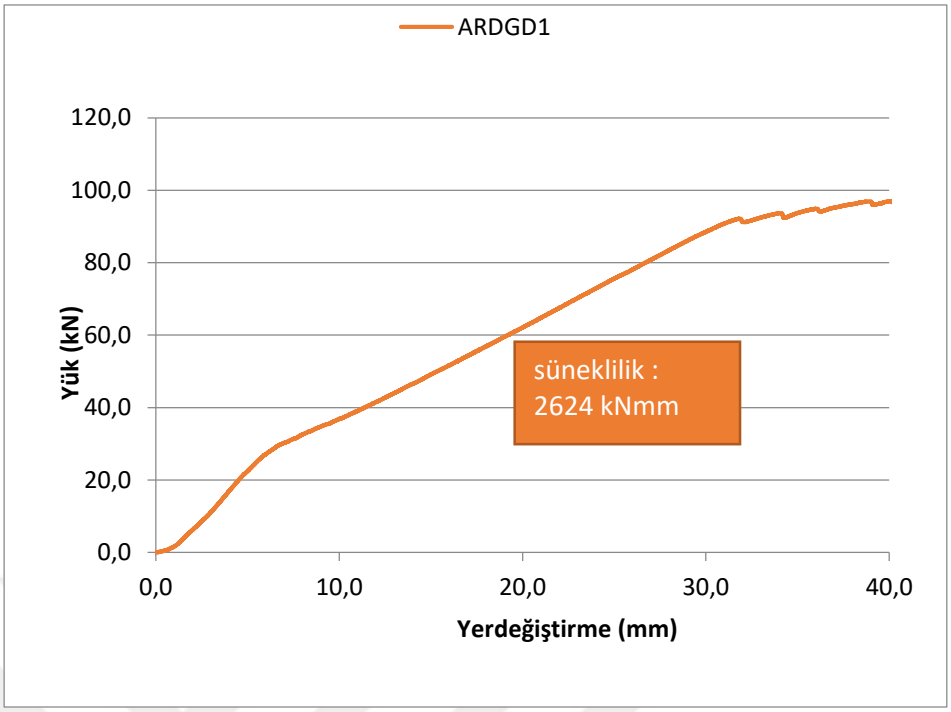

Şekil 4. 16. Normal kiriş numunesi (NK2)



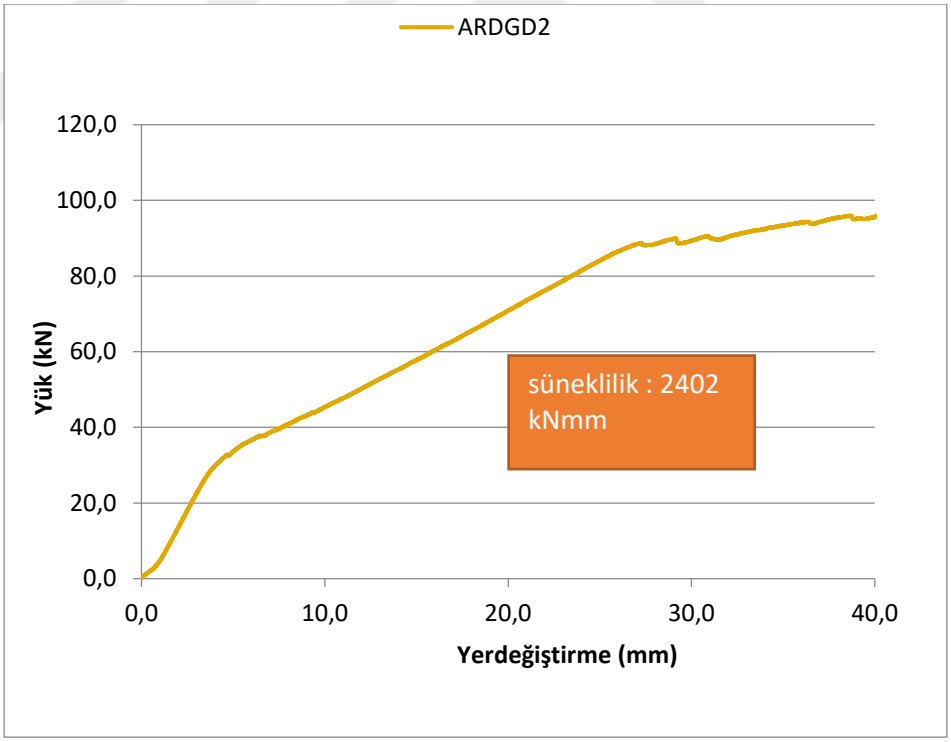

Şekil 4. 17. Parabol halatlı ard germeli kiriş numunesi (ARDGP1)




Şekil 4. 18. Parabol Halatlı Ard Germeli Kiriş Numunesi (ARDGP2)



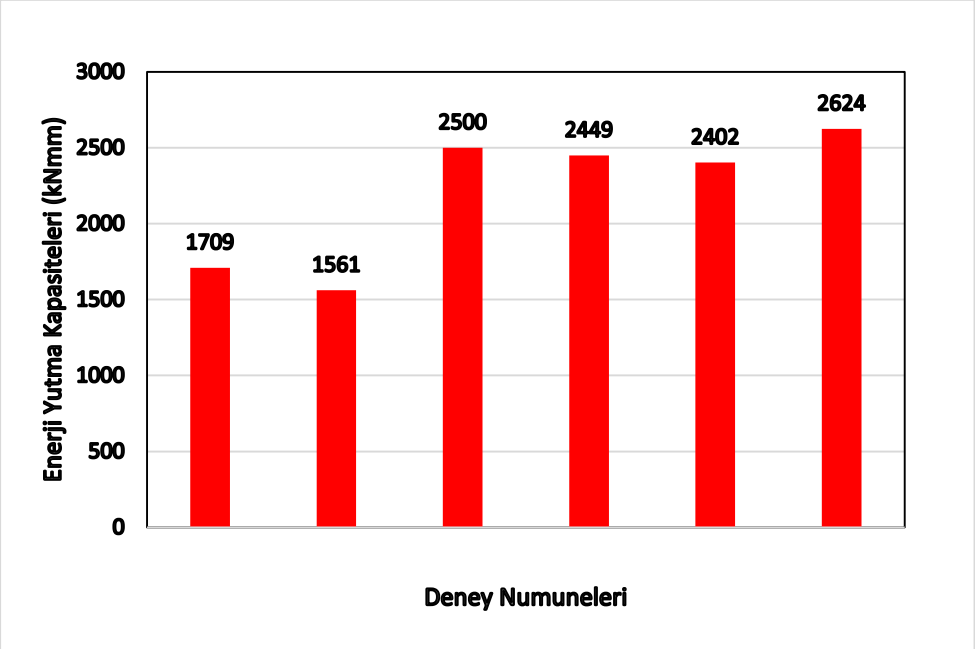

Şekil 4. 19. Düz ard germe halatlı kiriş numunesi (ARDGD1)



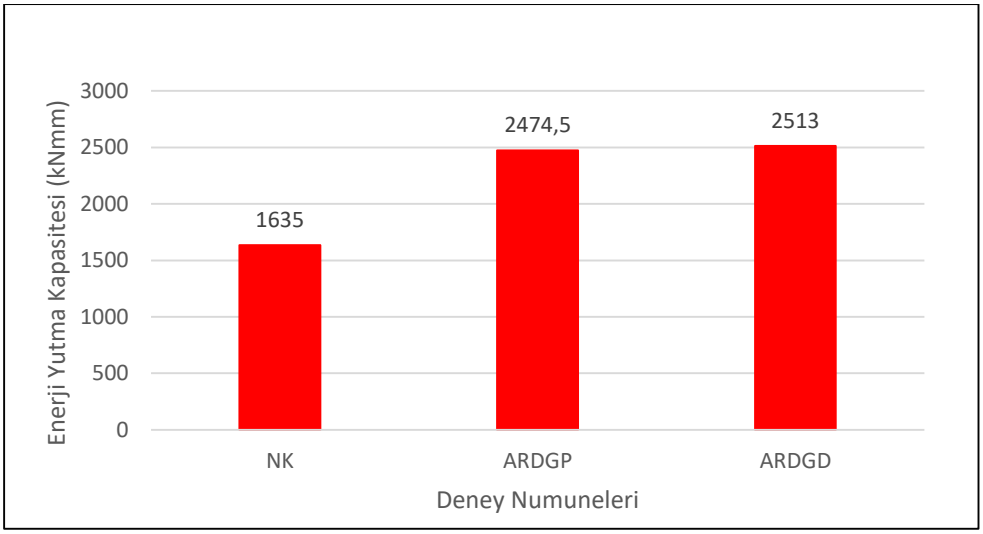

Şekil 4. 20. Düz ard germe halatlı kiriş numunesi (ARDGD2)

Yapıların depreme dayanıklı yapı tasarımında, hesaplanan enerji miktarı ile doğrusal sismik arasında güçlü bir ilişkinin olduğu kabul edilmektedir. Şekil 4.21'de

kiriş numunelerinin enerji yutma kapasiteleri verilmiştir. Her bir numuneden ikişer adet olduğundan aritmetik ortalamaları hesaplanıp bu veriler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Şekil 4.22'de kiriş numunelerinin enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır.




Şekil 4. 21. Enerji yutma kapasitesi değişimi




Şekil 4. 22. Enerji yutma kapasitelerinin incelenmesi

Tüm numunelerin ortalama enerji yutma kapasiteleri ve artış yüzdeleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Normal betonarme kiriş (NK) enerji yutma kapasitesi 1635 kNmm

olduğu görülmüştür. Parabol ard germe halatlı kirişin (ARDGP) enerji yutma kapasitesi 2474,5 kNmm ve düz ard germe halatlı kirişin (ARDGD) enerji yutma kapasitesi 2513 kNmm olduğu görülmüştür. NK, ARDGP ve ARDGD kiriş numunelerinin birbirine göre karşılaştırılması ve artış yüzdeleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. ARDGD, NK numunesine göre enerji yutma kapasitesi %34,84 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde ARDGP, NK numunesine göre %33,93 oranında artış göstermiştir. Düz ard germe halatlı (ARDGD) kiriş numunesinin, parabol ard germe halatlı (ARDGP) kiriş numunesine göre %1,54 oranında artış göstermiştir. Böylece enerji yutma kapasitesi açısından düz ard germe halatlı kiriş numunesinin %1,54'lük artışla daha avantajlı durumdadır.

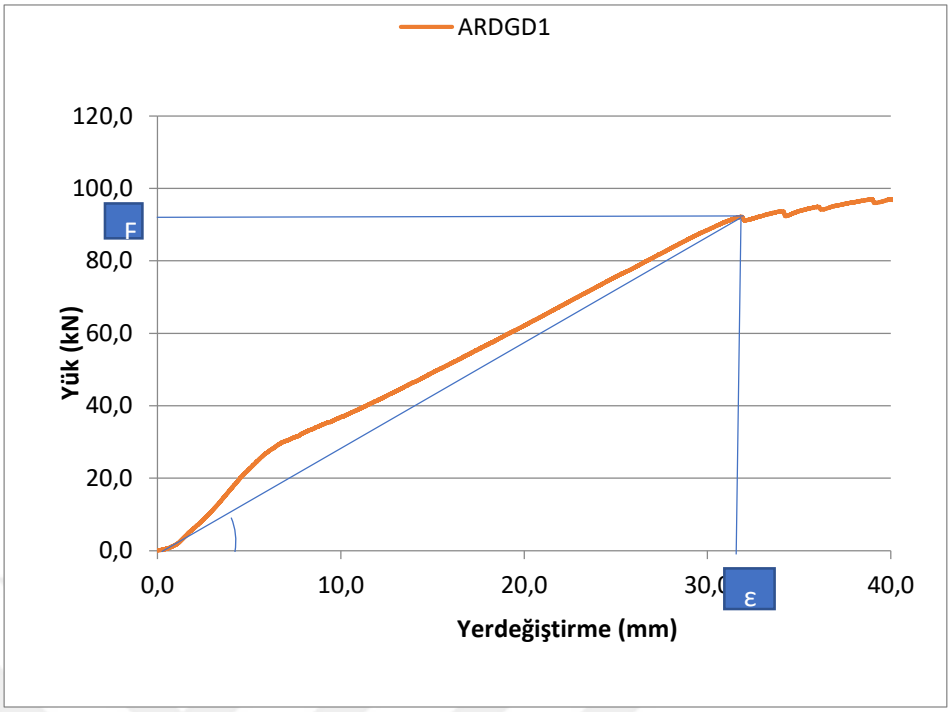
Normal halatsız olarak üretilen kirişlerin, ard germe halatlı kirişlere göre enerji yutma kapasitesi daha düşüktür. Ard germe halatlı kirişler yaklaşık olarak %35'lik bir artışla enerji yutma kapasitesi daha fazladır ve böylece üstünlük sağlamaktadır.

Çizelge 4. 1. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri

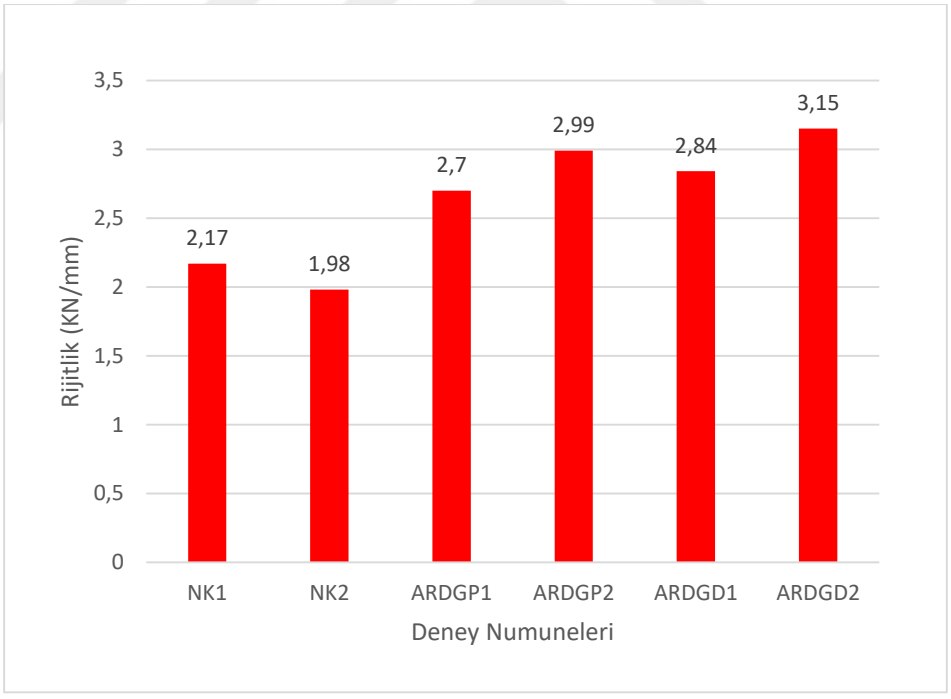
| Numune Adı | Enerji Yutma Kapasitesi (kNmm) | Enerji Yutma Kapasitesi Artışı (%) |
|---|---|---|
| NK | 1635 | 0 |
| ARDGD | 2513 | %53,70 |
| ARDGP | 2474,5 | %51,35 |

### 4.1.5. Rijitlik Değerleri

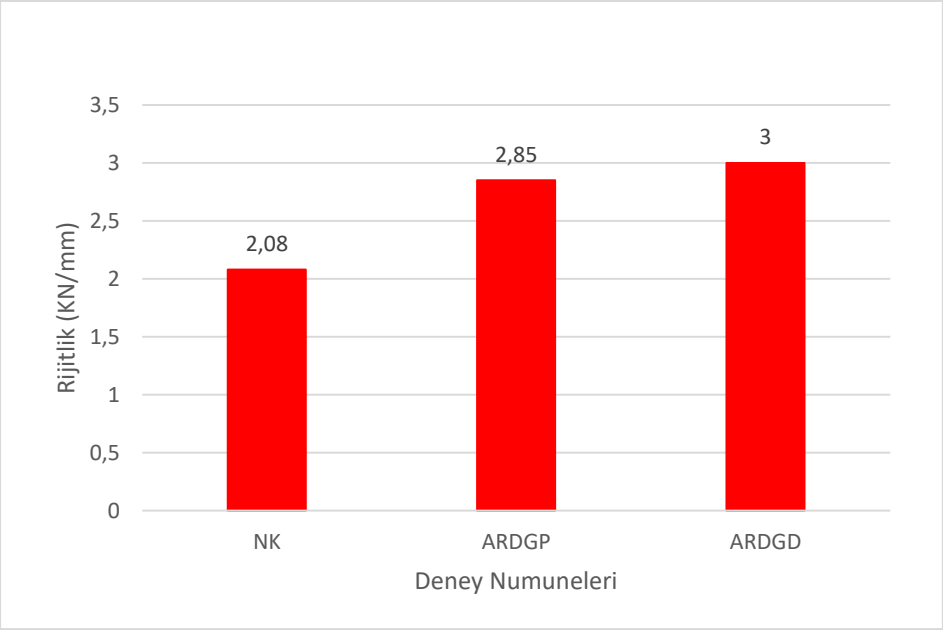
Yapısal bir sisteme veya elemana birim yerdeğiştirme yapmasını sağlamak için uygulanması gereken kuvvete rijitlik denilir. Numuneler için deneylerden elde edilen yük- yerdeğiştirme değişimleri kullanılarak Şekil 4.23'de gösterildiği gibi akma anındaki yerdeğiştirme ve yükün değerinden yararlanılarak bir doğru çizilmiştir. Çizilen bu doğrunun eğiminden ortalama bir rijitlik hesaplanmıştır. Kiriş numunelerinin rijitlikleri Şekil 4.24'de ve bu değerlerin ortalaması alınarak hesaplanmış ortalama rijitlik değerleri ise Şekil 4.25'de gösterilmiştir.




Şekil 4. 23. Yük – yerdeğiştirme grafiği




Şekil 4. 24. Tüm kirişlerin rijitlik değerleri




Şekil 4. 25. Kirişlerin ortalama rijitlik değerleri

Grafiklerin incelenmesinden düz ve parabol halat formlu kirişlerin normal kirişlere göre belirgin bir düzeyde rijitlik sağladığı görülmüştür.

### 4.1.6. Elasto-Plastik Davranışın İncelenmesi

Taşıyıcı sistemler yüklendikleri zaman, eğer oluşan gerilmeler taşıyıcı sistemin gerilme- şekil değiştirme ilişkisinde elastik bölgede kalıyorsa, yük kaldırıldıktan sonra taşıyıcı sistem orijinal durumuna döner. Yükleme etkisiyle oluşan gerilmeler elastik sınırın ötesine geçerse, taşıyıcı sistemde yük kaldırılırsa bile kalıcı hasarlar oluşur. Taşıyıcı sistem yük kaldırıldıktan sonra ne kadar orijinal durumuna dönebilirse, bir başka deyişle oluşan çatlaklar kapanırsa taşıyıcı sistemin yük taşıma açısından başarılı olduğunu söyleyebiliriz. Çatlakların kapanması donatılarda oluşacak paslanmayı ve su sızdırmazlığı önleyecektir. Dolayısıyla taşıyıcı sistemin servis ömrünü uzatacaktır.

Kiriş numuneleri incelenirken yukarıda bahsettiğimiz durumu tespit etmek amacıyla numunelerin elasto plastik geri dönüşümleri de araştırılmıştır. Çizelge 4.2. elasto plastik davranış incelenmiştir. Altı adet kiriş numunesinden NK1 22 mm, NK2 20 mm geri dönüş yaparak elasto plastik davranmıştır. Aynı şekilde ard germe halatı

kullanılarak üretilmiş olan (ARDGD, ARDGP) kiriş numunelerinde ise ARDGD1 27 mm ile %67,5 oranında, ARDGD2 26 mm ile %65 oranında geri dönüş yaparak elasto-plastik davranmıştır. ARDGP1 26,53 mm ile %66,33 oranında ve ARDGP2 29 mm ile %72,5 oranında geri dönüş yapmıştır.

Çizelge 4. 2. Elasto- plastik davranışın incelenmesi

| Numune Adı | Toplam Yer değiştirme (mm) | Elasto- plastik geri dönüş (mm) | Elasto-plastik geri dönüş (%) |
|---|---|---|---|
| NK1 | 40 | 22 | %55 |
| NK2 | 40 | 20 | %50 |
| ARDGD1 | 40 | 27 | %67,5 |
| ARDGD2 | 40 | 26 | %65 |
| ARDGP1 | 40 | 26,53 | %66,33 |
| ARDGP2 | 40 | 29 | %72,5 |

.

Bu değerlendirmeye göre ard germe uygulanmış numunelerin elasto- plastik davranış açısından, normal kirişlere göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

### 4.1.7. Maksimum Moment ve Kesme Kuvvet Değerleri

Dört noktalı yükleme deneyine tabi tutulan kirişlerin yük yerdeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler referans alınarak maksimum moment, maksimum kesme kuvvetleri hesaplanmıştır ve kirişler birbiri ile değerlendirilmiştir. Çizelge 4.3'te hesaplanan değerler gösterilmiştir.

Çizelge 4. 3. Maksimum moment ve kesme kuvveti değerleri

| Numune Adı | Vmax (KN) | Mmax(KNm) | Vmax (%) | Mmax (%) |
|---|---|---|---|---|
| NK | 29 | 40,6 | - | - |
| ARDGD | 48,28 | 77,04 | %39,94 | %47,28 |
| ARDGP | 40,85 | 76,61 | %29 | %47 |

Yukarıda halat formlu kirişler maksimum moment ve maksimum kesme kuvveti açısından halatsız (normal) betonarme kirişlerle karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'e göre düz halat formlu kirişlerin, parabol halat formlu kirişlere kesme kuvveti %15,39 daha fazla olduğu görülmüştür ve maksimum kuvvetlerinin yaklaşık birbirine eşit olduğu gözlemlenmiştir.

# 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Ard germe tekniğiyle üretilmiş taşıyıcı sistemlerde halat geometrisinin elemanın taşıma kapasitesine etkisini incelemek üzere kesit boyutları 200x300 mm olan ve 4400 mm uzunluğunda altı adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu numunelerden ard germesiz olanları NK /1 ve NK /2, ard germe halat formu düz olanları ARDG D/1 ve ARDG D/2 ve ard germe halat formu parabol olanlar ARDG P/1 ve ARDG P/2 olarak adlandırılmıştır. Kirişlere 4400/3 mesafeden dört noktalı yükleme deneyi kirişin ortasındaki yer değiştirme ölçülerek 1.2 mm/dakika yükleme hızıyla yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Deney esnasında numune üzerinde oluşan çatlaklar çizilmiş ve çatlağın oluştuğu andaki yük değerleri numuneler üzerinde işaretlenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır.

• Kısa zaman aralıklarında dökülen ikiz kiriş numunelerin halatsız normal kirişler (NK /1 ve NK 2), düz halatlı kirişler (ARDG D/1 ve ARDG D/2) ve parabol halatlı kirişler (ARDG P/1 ve ARDG P/2) kiriş ortasında oluşan yer değiştirmeler de dikkate alındığında birbirlerine yakın göçme yüklerinde kırılmıştır. Bu durum numunelerin üretilmesinde gösterilen dikkat ve titizliği göstermektedir.

• Ard germe tekniğinin uygulandığı (ARDG D/1 ve ARDG D/2, ARDG P/1 ve ARDG P/2) numuneler birbirlerine çok yakın davranış sergilemiştir. Parabolik halat formuyla üretilen (ARDG P/1 ve ARDG P/2) kiriş numunelerinde kesme çatlaklarının, düz halat formuyla üretilen (ARDG D/1 ve ARDG D/2) kiriş numunelerine göre daha az oluşmuştur. Bu durum parabol halat formunun kirişin kayma dayanımına sağladığı katkıyı ortaya koymaktadır.

Parabol halat formu kiriş uç kısımlarında yani etriye sıklaştırma bölgelerinde kesme kuvvetini karşıladığı için kayma dayanımını arttırmıştır. Bu nedenle parabol halat formu kullanıldığı zaman etriye sıklaştırması daha az yapılabilir. Bu durum hem işçilik, hem ekonomiklik açısından bir avantaj sağlayabilir.

• Ard germe uygulanmış numuneler ard germe uygulanmamış numunelere göre yaklaşık olarak %58 daha fazla yük taşımıştır.

• Deney sonunda numuneler üzerindeki yükün kaldırılmasıyla birlikte ard germe uygulanmış numunelerde geri dönüşün ve çatlakların kapanma hızının, ard germe uygulanmamış numunelere göre daha fazla ve hızlı gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu durum taşıyıcı sistemin dış ortamla olan temasını daha çabuk azaltacağından paslanmanın daha az oluşmasını sağlayacaktır. Böylece taşıyıcı sistemlerin servis ömrü arttırılabilir.

Ard germe uygulanmış numunelerin ard germe uygulanmamış numunelere göre yaklaşık olarak %35 oranında enerji yutma kapasitesi daha fazladır. Deprem bölgesi olan ülkelerde bu oran göz ardı edilemeyecek derecede önemlidir.

Üretilen kirişlerin kesit boyutları; laboratuvar ve koşullar göz önünde bulundurularak en uygun boyutlar tercih edilmiştir. Bu sebepten ötürü parabolik halat formlu kirişler (ARDGP1 ve ARDGP2) ile düz halat formlu kirişlerin (ARDD1 ve ARDGD2) birbirine yakın davranışlar sergilediği görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, deneylerde kullanılan numunelerin en kesit ve açıklık durumlarıyla ilgilidir. Parabol halat formunun, düz halat formuna yakın sonuçlar ortaya koyması bu şekilde açıklanmıştır. Prefabrik köprü kirişleri gibi en kesiti ve açıklığı büyük kirişlerde parabol halat formunun, düz halat formuna göre daha iyi sonuçlar göstereceği düşünülmektedir.

• Bu çalışma farklı halat formları denenerek genişletilebilir. Farklı halat formlarının kirişlerin taşıma kapasiteleri, süneklilik ve çatlak gelişimi gibi parametreler etkisi incelenerek, karma bir halat formu geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR


ABDULLAH, K. S. (2017). Ard germeli çift yönlü betonarme plakların doğrusal olmayan modellemesi. (Yüksek Lisans Tezi). Gaziantep Üniversitesi Gaziantep, 81s.

AFEFY HAMDY, M., SENNAH, K., & COFINI, A. (2016). Retrofitting Actual-Size Precracked Precast Prestressed Concrete Double-Tee Girders Using Externally Bonded CFRP Sheets. Journal of Performance of Constructed Facilities, *30*(2), 04015020. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000763

AKTAŞ, M. (2006). Ard-Germeli Kiriş-Kolon Birleşimi Deneysel İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 79s.

AL-HARTHY, A. S., FRANGOPOL, D. M. (1997). Integrating system reliability and optimization in prestressed concrete design. Computers and Structures, 64(1-4), 729-735.

ALGAHTANI, A. S., ALSAADOUN, S.S., ABULFEILAT, E.A. ( 1995.). Design Optimization of Continious Partially Prestressed Concrete Beams. Computers & Structures, 55, 365-370.

ALI, M. K. (2010). Öngermeli Betonarme Köprü Kirişi Modellenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara 129s.

ARSLAN, Z. (2018). Ard Germeli Plak Köprü Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 135s.

BABY, F., GRAYBEAL, B., MARCHAND, P., & TOUTLEMONDE, F. (2012). UHPFRC tensile behavior characterization: inverse analysis of four-point bending test results. Materials and Structures, 46(8), 1337-1354. doi:10.1617/s11527-012-9977-0

CHOPRA, A. K. (1995. ). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall.

COLAJANNI, P., RECUPERO, A., & SPINELLA, N. (2014. ). Design Procedure for Prestressed Concrete Beams. Computer and Concrete, 13(2), 235-253.

ÇORSUZ, İ. (2004). Ard Germe ile Güçlendirilen Kirişler. (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Ankara, 84s.

DEMIR, H. (2003). Öngerilmeli beton kirişlerinin nümerik olarak incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Elazığ, 77s.

FANNING, P. (2001). Nonlineer Models of Reinforced and Post-tensioned Concrete Beams. EJSE International Electronic Journal of Structural Engineering, 2, 111-119

GAO, Q., YANG, M. G., & QIAO, J.-D. (2017). A Multi-Parameter Optimization Technique for Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridges Considering Prestress in Girder, Structural Engineering and Mechanics. 64(5), 567-577.

HAMAD, H. E., & TANHAN, F. (2018). Analysis of post-tensioned concrete box-girder bridges. (Master Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Stokholm.

HÜSEM, M., (2016). Öngerilmeli Beton. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, .

KEYDER, E. (2013). Öngerilmeli Beton. Seçkin Yayıncılık Genel Dağıtım,Ankara, 245s.

KOZAK, M. (2011). Öngermeli Betonlar ve Özelliklerinin Teorik Olarak Araştırılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1), 100-106.

ÖZTÜRK, O. O. (2018). Öngerilmeli Betonarme Prekast Kirişlerde Farklı Kesit ve Halat Sayısına Bağlı Uygun Açıklığın Belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 117s.

ŞENER, S. (2006). Öngerilmeli Beton (Vol. 50). Alp Yayıncılık,Ankara, 275s.

TSI, TS EN 3233 (1979). Öngerilmeli Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları. Ankara, Türk Standartları Enstitüsü

ÜNAL, O., & KÜRKLÜ, G. (2007). Öngerilmeli Beton Teknolojisi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi(2), 26-35.

WANG, J., LI, Z. Q. HAO, X. W. (2012). Optimization Design of Cross-section of Prestressed Steel-Concrete Composite Box Girder , International Conference on Material Engineering, Architectural Engineering and Informatization, China. Advanced Materials Research, 366, 207-210.

XIE, T., ve ÖZBAKKALOĞLU, T. (2015). Behavior of steel fiber-reinforced highstrength concrete-filled FRP tube columns under axial compression. Engineering Structures, 90, 158-171.