

**T.C.  
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BETONARME KİRİŞLERDE HELEZONİK BİÇİMLİ GEOGRİD  
ETRİYE UYGULAMASININ DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ**

**Muhammed Emre ŞAVLUK**

**Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN  
2019  
Her Hakkı Saklıdır.**

## Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, Muhammed Emre ŞAVLUK tarafından hazırlanan bu çalışma 21/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/~~oy çokluğu~~ ( ... / ... ) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

İmza:

Üye : Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İmza:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 11 / 09 / 2019 tarih ve 37 / 15 ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



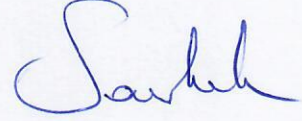
**Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY**  
Enstitü Müdürü

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

### **Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası**

“Betonarme Kirişlerde Helezonik Biçimli Geogrid Etriye Uygulamasının Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 21/08/2019



**Muhammed Emre ŞAVLUK**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BETONARME KİRİŞLERDE HELEZONİK BİÇİMLİ GEOGRİD ETRİYE UYGULAMASININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammed Emre ŞAVLUK

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Betonarme kirişlerin sadece eğilme momenti etkisine karşı donatılması, mukavemetini sağlamaya yetmez. Kirişin kesme kuvveti etkilerine karşı da dayanımının sağlanması gerekmektedir. Yeterli kesme donatısı bulunmayan bir kiriş, artan yük altında, eğilme mukavemetine ulaşmadan, mesnetlere yakın bölgelerde oluşan yatayla yaklaşık 45° eğimli çatlaklarla kırılma durumuna gelebilir. Bu çatlakları meydana getiren asal kayma gerilmelerini, bir düzeye kadar, beton karşılar. Asal çekme gerilmeleri ise, eğik çekme çatlaklarına neden olur; eğik çekmeyi alacak yeterli kesme donatısı yoksa çatlaklar genişler ve kiriş ani olarak kırılır. Bu çalışmanın temel amacı enine donatı olarak çelik yerine geogrid malzemesinin kullanılması ve farklı açılarda helezonik biçimde yerleştirilmesi halinde betonarme kirişlerin yapısal davranışları üzerindeki etkilerini incelemektir. Etriyesiz ve 30, 45, 60, 90 derece biçiminde yerleştirilen geogrid etriyeli kirişler üretilmiş, hazırlanan bu numuneler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak incelenmiştir.

**2019, 75 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme Kiriş, Geogrid, Helezonik Etriye, Kesme Dayanımı, Kesme Kuvveti, Yük-Sehim İlişkisi.

## ABSTRACT

Master Thesis

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SPIRAL GEOGRID STIRRUP APPLICATION IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

Muhammed Emre ŞAVLUK

Erzincan Binali Yıldırım University  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Reinforcement of reinforced concrete beams only against bending moment effect is not enough to provide its strength. It is also necessary to ensure the strength of the beam against the shear force effects. A beam without adequate shear reinforcement may break under increased load with cracks at a slope of approximately  $45^\circ$  with the horizontal formed in the regions close to the supports without reaching the bending strength. Up to a level, concrete compensates the principle shear stresses that make up these cracks. Principle tensile stresses, on the other hand, cause oblique tensile cracks; if there is not enough shear reinforcement to take the oblique tensile, the cracks widen and the beam breaks abruptly. The main objective of this study is to examine the effects of geogrid material on structural behavior of reinforced concrete beams when using geogrid material instead of steel as cross-section reinforcement and placing them in helical form at different angles. Geogrid beams, which were placed at 30, 45, 60, 90 degrees and without stirrups, were produced and these specimens were examined under four point loading test.

**2019, 75 Pages**

**Keywords:** Reinforced Concrete Beam, Geogrid, Spiral Stirrup, Shear Strength, Shear Force, Force-Deflection Relationship.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmaları süresince destek olan inşaat mühendisi arkadaşlarım; Muhammed Orhan ÖZTÜRK ve Mahmud YAĞAN' a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olup hiçbir desteğini esirgemeyen değerli aileme teşekkürü borç bilirim.

Bu süreç boyunca her zaman yanımda olup beni destekleyen sevgili eşim Yasemin ŞAVLUK'a teşekkür ederim.

Muhammed Emre ŞAVLUK

Eylül; 2019

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖZET.....  | i         |
| ABSTRACT.....  | ii        |
| TEŞEKKÜR.....  | iii       |
| İÇİNDEKİLER .....  | iv        |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....   | vi        |
| TABLolar LİSTESİ.....  | ix        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....   | x         |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>                                    | <b>6</b>  |
| 2.1. Basit Eğilme Etkisi.....  | 6         |
| 2.1.1. Tek donatılı dikdörtgen kesit .....                           | 15        |
| 2.2. Kesme Kuvveti Etkisi.....                                       | 23        |
| 2.2.1. Kayma donatısız kirişin davranışı .....                       | 24        |
| 2.2.2. Kayma donatılı kirişin davranışı .....                        | 31        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM .....</b>                                   | <b>41</b> |
| 3.1. Malzeme Özellikleri .....                                       | 41        |
| 3.1.1. Beton .....   | 41        |
| 3.1.2. Çelik donatı .....  | 43        |
| 3.1.3. Geogrid.....  | 44        |
| 3.2. Deney Numunelerinin Tasarımı .....                              | 49        |
| 3.2.1. Kirişlerde kapalı etriye ve helezonik etriye uygulaması ..... | 51        |
| 3.2.1.1. Çelik etriye.....   | 51        |
| 3.2.1.2. Geogrid etriye .....  | 52        |
| 3.3. Deney Düzeneği .....  | 53        |
| 3.3.1. Ölçüm ve veri toplama sistemi.....                            | 58        |
| 3.3.2. Yer değiştirme ölçerler.....                                  | 58        |
| 3.3.3. Gerinim pulları .....   | 60        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>                                  | <b>61</b> |
| 4.1. Enine Donatısız Kiriş (SH-N) .....                              | 61        |
| 4.2. 30° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G30).....          | 62        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 4.3.      | 45° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G45).....       | 63        |
| 4.4.      | 60° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G60).....       | 64        |
| 4.5.      | 90° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G90).....       | 65        |
| 4.6.      | 90° Açılı Çelik Etriye ile Sargılanmış Numune (SH-S90) ..... | 67        |
| 4.7.      | Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                   | 68        |
| <b>5.</b> | <b>SONUÇLAR</b> .....  | <b>70</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR</b> .....                                       | <b>73</b> |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....  | <b>76</b> |





## ŞEKİLLER LİSTESİ

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| Şekil 1.1. Dört noktalı eğilme deneyi.....   | 2            |
| Şekil 1.2. Geogridin enine donatı olarak uygulanması .....   | 3            |
| Şekil 2.1. Betonarme dikdörtgen kesitin eğilme momenti altında davranışı .....   | 8            |
| Şekil 2.2. Kesitte moment-eğrilik bağıntısı; a) denge altı donatılı (çekme göçmesi), b) denge üstü donatılı (basınç göçmesi) .....                       | 10           |
| Şekil 2.3. Beton ve çeliğin gerilme şekil değiştirme eğrileri .....  | 11           |
| Şekil 2.4. Dikdörtgen kesitte beton basınç gerilmeleri yayılışı; a) göçme durumu, b) dayanım hesabında esas olan eşdeğer dikdörtgen dağılım durumu ..... | 12           |
| Şekil 2.5. Basit eğilme durumunda kesit şekil değiştirme durumları .....   | 15           |
| Şekil 2.6. IIIa bölgesindeki kesitte iç kuvvetler .....  | 15           |
| Şekil 2.7. Gerilme yayılış katsayıları .....   | 16           |
| Şekil 2.8. II bölgesindeki kesitteki iç kuvvetler .....  | 21           |
| Şekil 2.9. Homojen bir kirişteki üç noktada asal gerilmeler ve çekme, basınç gerilme yörüngeleri .....   | 24           |
| Şekil 2.10. Kayma donatısız kirişte çatlama ve kesme kuvvetinin taşınması .....  | 25           |
| Şekil 2.11. Perçin etkisiyle taşınan kuvvet ile yer değiştirme ilişkisi .....  | 26           |
| Şekil 2.12. Kirişte kemerlenme etkisi ve donatının betona göre hareketi $\Delta$ .....   | 26           |
| Şekil 2.13. Yükleme yerinin kirişin taşıma gücüne etkisi.....  | 28           |
| Şekil 2.14. Güç tükenmesi durumunda kirişte çatlama biçimi .....   | 28           |
| Şekil 2.15. Beton tarafından karşılanan ortalama kayma gerilmesine normal kuvvetin etkisi .....  | 31           |
| Şekil 2.16. Betonarme kirişte kafes sistem benzeşimi .....   | 33           |
| Şekil 2.17. Kafes sistem benzeşiminde iç kuvvetler .....   | 34           |
| Şekil 2.18. Pilyelerle karşılanan kesme kuvveti değişimi.....  | 35           |
| Şekil 2.19. Kesme kuvvetinden oluşan a) eğik donatı çekme gerilmeleri, b) eğik beton basınç gerilmeleri .....  | 37           |
| Şekil 2.20. Kesme kapasitesi esas alındığında kesme kuvvetinin bulunması .....   | 40           |
| Şekil 3.1. Beton dökümüne hazır kiriş numuneleri .....   | 42           |
| Şekil 3.2. Beton dayanımının tespit işlemi .....   | 42           |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 3.3. Çelik donatı çekme deneyi.....  | 43 |
| Şekil 3.4. Çelik donatı gerilme – birim uzama grafiği.....                             | 44 |
| Şekil 3.5. Çeşitli geogrid modelleri.....  | 45 |
| Şekil 3.6. Donatı çekme aletine yerleştirilen geogrid çekme aparatı.....               | 46 |
| Şekil 3.7. Çekme deneyi için hazırlanmış geogrid numunesi .....                        | 47 |
| Şekil 3.8. ASTM D4595 – 11’ e göre gerçekleştirilen geogrid çekme deneyi .....         | 48 |
| Şekil 3.9. ASTM D6637/ D6637M – 15’ e göre gerçekleştirilen geogrid çekme deneyi ..... | 48 |
| Şekil 3.10. Geogrid malzemesinin kuvvet – birim uzama grafiği .....                    | 49 |
| Şekil 3.11. Geleneksel (a) ve helezonik (b) sargılama detayı .....                     | 50 |
| Şekil 3.12. Kiriş numunelerindeki donatı düzeni 1 .....                                | 51 |
| Şekil 3.13. Kiriş numunelerindeki donatı düzeni 2.....                                 | 52 |
| Şekil 3.14. SH-S90 numunesi kafes düzeni .....   | 52 |
| Şekil 3.15. SH-N numunesi kafes düzeni .....   | 52 |
| Şekil 3.16. SH-G90 numunesi kafes düzeni .....   | 53 |
| Şekil 3.17. SH-G30 numunesi kafes düzeni .....   | 53 |
| Şekil 3.18. SH-G45 numunesi kafes düzeni .....   | 53 |
| Şekil 3.19. SH-G60 numunesi kafes düzeni .....   | 53 |
| Şekil 3.20. Eğilme deneyi düzeneği.....  | 54 |
| Şekil 3.21. SH-N numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                           | 55 |
| Şekil 3.22. SH-G30 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                         | 55 |
| Şekil 3.23. SH-G45 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                         | 56 |
| Şekil 3.24. SH-G60 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                         | 56 |
| Şekil 3.25. SH-G90 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                         | 57 |
| Şekil 3.26. SH-S90 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği .....                         | 57 |
| Şekil 3.27. Kirişte bulunan yer değiştirme ölçerler.....                               | 59 |
| Şekil 3.28. Yer değiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki konumları .....                 | 59 |
| Şekil 3.29. Gerinim pullarının kiriş üzerindeki konumları .....                        | 60 |
| Şekil 4.1. SH-N numunesinin çatlak gelişimi .....                                      | 61 |
| Şekil 4.2. SH-N numunesinin yük – sehim grafiği .....                                  | 62 |
| Şekil 4.3. SH-G30 numunesinin çatlak gelişimi .....                                    | 62 |
| Şekil 4.4. SH-G30 numunesinin yük – sehim grafiği .....                                | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.5. SH-G45 numunesinin çatlak gelişimi .....      | 64 |
| Şekil 4.6. SH-G45 numunesinin yük – sehim grafiği .....  | 64 |
| Şekil 4.7. SH-G60 numunesinin çatlak gelişimi .....      | 65 |
| Şekil 4.8. SH-G60 numunesinin yük – sehim grafiği .....  | 65 |
| Şekil 4.9. SH-G90 numunesinin çatlak gelişimi .....      | 66 |
| Şekil 4.10. SH-G90 numunesinin yük – sehim grafiği ..... | 66 |
| Şekil 4.11. SH-S90 numunesinin çatlak gelişimi.....      | 67 |
| Şekil 4.12. SH-S90 numunesinin yük – sehim grafiği.....  | 68 |



## TABLULAR LİSTESİ

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Tablo 2.1. Beton sınıfına göre gerilme katsayıları .....                                    | 15           |
| Tablo 3.1. Çelik donatının mekanik özellikleri.....   | 44           |
| Tablo 3.2. Geogrid malzemesinin mekanik özellikleri .....                                   | 49           |
| Tablo 3.3. Çelik ve geogrid malzemelerinin mekanik özellikleri.....                         | 50           |
| Tablo 3.4. Deney Sisteminde Kullanılan Aletler .....  | 54           |
| Tablo 3.5. Ölçüm ve veri toplama cihazlarının listesi .....                                 | 58           |
| Tablo 4.1. Yük altında kirişlerde sehim, alt-üst lif uzama,çatlak genişliği sonuçları ..... | 68           |
| Tablo 4.2. Yük altında kirişlerde boyuna ve enine donatıdaki birim uzama sonuçları...       | 69           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|                    |   |
|--------------------|---|
| $a$                | basınç gerilmeleri bloğunun derinliği; mesnet genişliği;        |
| $A_s$              | çekme donatısı alanı  |
| $b$                | tablalı kesitte etkili tabla genişliği                          |
| $d$                | kirişte faydalı yükseklik                                       |
| $E_s$              | donatının elastiklik modülü                                     |
| $F$                | kuvvet  |
| $F_c$              | beton basınç kuvveti  |
| $F_s$              | donatının çekme kuvveti   |
| $f_{cd}$           | beton tasarım basınç dayanımı                                   |
| $f_{ctd}$          | baton tasarım çekme dayanımı                                    |
| $f_{ctk}$          | beton karakteristik çekme dayanımı                              |
| $f_{yd}$           | donatı tasarım akma gerilmesi                                   |
| $f_{ywd}$          | etriye donatısının tasarım akma gerilmesi                       |
| $k_1$              | baton basınç blok derinliğinin tarafsız eksen derinliğine oranı |
| $l_b$              | sonatı çubuğunun kenetlenme boyu                                |
| $l_n$              | serbest açıklık   |
| $M_d$              | hesap eğilme momenti  |
| $M_r$              | kesitin eğilme momenti taşıma gücü                              |
| $N_d$              | hesap aksenal kuvveti   |
| $s$                | etriye aralığı  |
| $V$                | kesme kuvveti   |
| $V_{cr}$           | beton kesitin kesme kuvveti dayanımına katkısı                  |
| $V_d$              | tasarım kesme kuvveti   |
| $x$                | tarafsız eksen derinliği  |
| $\alpha$           | eğik donatının eğim açısı                                       |
| $\varepsilon$      | birim boy değişimi  |
| $\varepsilon_c$    | betonda birim kısalma   |
| $\varepsilon_{cu}$ | betonun ezilme birim kısalması                                  |

|                    |                               |
|--------------------|-------------------------------|
| $\varepsilon_s$    | donatıda birim uzama          |
| $\varepsilon_{su}$ | donatının kopma birim uzaması |
| $\rho$             | çekme donatısı oranı          |
| $\rho_b$           | dengeli donatı oranı          |
| $\rho_w$           | etriye donatısı oranı         |
| $\sigma$           | normal gerilme                |
| $\sigma_s$         | çekme donatısındaki gerilme   |

### Alt Simgeler

|      |  |
|------|--|
| $c$  | beton ( $A_c$ beton kesit alanı )                |
| $d$  | tasarım ( $V_d$ tasarım kesme kuvveti )          |
| $cr$ | çatlama ( $V_{cr}$ tasarım kesme kuvveti )       |
| $g$  | özağırlık ( $M_g$ özağırlık momenti )            |
| $s$  | donatı çeliği ( $A_s$ donatı alanı )             |
| $r$  | taşıma gücü ( $M_r$ eğilme momenti taşıma gücü ) |
| $t$  | çekme ( $f_{ct}$ beton çekme dayanımı )          |
| $y$  | akma ( $f_{yd}$ hesap akma dayanımı )            |
| $w$  | enine ( $A_{sw}$ enine donatı alanı )            |

### Kısaltmalar

|      |  |
|------|--|
| ACI  | American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)                               |
| ASCE | American Society of Civil Engineers (Amerikan İnşaat Mühendisleri Birliği)           |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu) |
| TSE  | Türk Standartları Enstitüsü  |
| TS   | Türk Standardı   |

## 1. GİRİŞ

Betonarme yapıyı oluşturan elemanlar, genelde eğilmeye ek olarak kesme kuvveti de taşımak durumundadır. Betonun kayma dayanımı oldukça yüksek olduğundan, betonarme elemanlarda kesme kırılmasına pek rastlanmaz. Buna karşın, kayma ve normal gerilmelerin neden olduğu asal çekme gerilmeleri, betonun düşük çekme dayanımı nedeni ile önemli sorunlar doğurur.

Betonun kayma ve basınç dayanımı çekme dayanımından yüksek olduğundan, basit kayma durumunda bile kırılma, asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşur. Basit kayma durumunda, asal çekme ve basınç gerilmeleri kayma gerilmesine eşit olacağından, kırılma en düşük dayanım olan çekme nedeni ile oluşacaktır. Asal çekme gerilmeleri, kayma gerilmelerinin etkidiği yüzeye  $45^\circ$  lik açı yapan bir düzlem üzerinde etkiyeceğinden, kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla meydana gelecektir. Asal çekme gerilmelerinden oluşan bu tür bir çatlama eğik çatlak, buna neden olan asal gerilme de “eğik çekme” olarak adlandırılır (Ersoy, 1987).

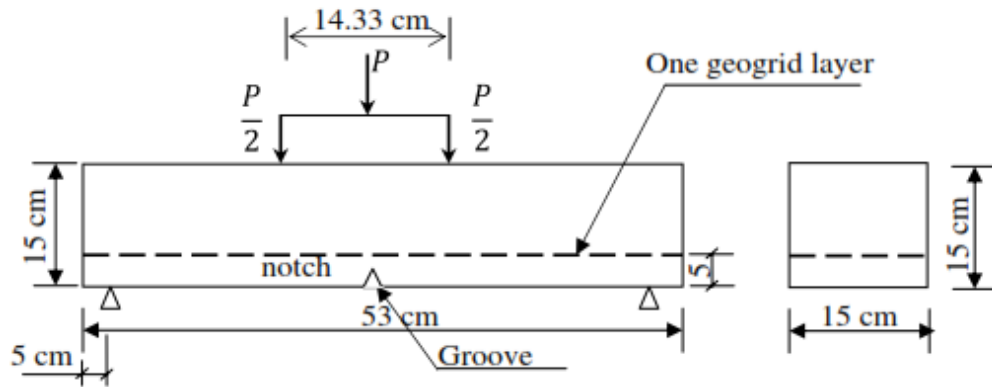
Kayma gerilmelerinden oluşan eğik çekme gerilmelerini, yalnız betonla karşılamak emniyetli ve ekonomik sonuçlar vermez. Önceleri, asal çekme gerilmeleri nedeni ile aynı yönde yerleştirilen pilyelerin, asal çekme gerilmelerine yaklaşık  $45^\circ$  lik bir açı yapan düşey etriyelerden daha etkili olduğuna inanılıyordu. Ancak yapılan araştırmalar, pilyelerin etriyeler kadar etkili olmadığını kanıtlamıştır. Mesnet yakınında uygulanan yükler, oluşan basınç çubuğu ile mesnete aktarılır ve bu çubuk bir kemer gövdesi gibi çalışır.  $90^\circ$  lik etriyeler bu kemere stabilite kazandırırken, pilyelerin etkisi az olmaktadır. Ayrıca, pilye kullanıldığında çatlak genişliği etriyeye oranla çok daha büyük olmaktadır (Celep, 1998).

Yapılan bu çalışmada betonarme kirişlerin kesme etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Hazırlanan numuneler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak sonuçları birbirleriyle kıyas edilmiştir. Bu deneyler kapsamında bir adet  $90^\circ$  açıyla yerleştirilmiş çelik etriyeli kiriş; 30, 45, 60, 90 derece açılıyla yerleştirilmiş çelik etriye yerine geogrid malzemesi kullanılmış kirişler ve bir adet etriyesiz kiriş olmak üzere 6 adet numune test edilmiştir. 30, 45 ve 60 derece olarak hazırlanan deney

numuneleri helezonik bir şekilde uygulanarak, farklı sargılama biçimlerinin kirişlerin kesme davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Güçlendirme amaçlı kullanılan çelik donatılar geleneksel olarak hareketli yükler tarafından uygulanan gerilmelere dayanmak ve gerekli mukavemeti sağlamak için Portland çimentolu betonda kullanılmaktadır. Çelikle güçlendirilmiş betonlar fonksiyonel ve dayanıklı yapı malzemesi olmakla birlikte uygun tasarım ve inşaat olanakları da sağlar fakat genellikle bazı kısıtlar kullanılmalarını sınırlar. Bu sınırlar inşaat için geniş zaman olmayan ve paslanma kaygısı bulunan beton döşemeler ve yol yüzeyleri gibi ince kesitlerin güçlendirilmesi gibi fiziksel sınırları kapsar. Bu nedenle FRP lifleri gibi yenilikçi ve geleneksel malzemeler çelik güçlendirmelere alternatif olarak yaygınlaşmaktadır.

El Meski ve Chehab (2014), 21 numune hazırlayarak bunları dört noktalı deneyine tabi tutmuştur (Şekil 1.1). Numunelerde tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli geogridleri tek katman olarak uygulamış ve bunların farklı çekme kapasitelerinde olan çeşitlerini kullanmıştır. Ayrıca güçlendirilmemiş iki adet kontrol numunesi test etmiştir. Deney sonuçlarında geogridli numunelerin yük taşıma kapasitelerinde artış ve çatlak açılma miktarında azalma olduğunu gözlemlemiştir.



Şekil 1.1. Dört noktalı eğilme deneyi (El Meski ve Chehab, 2014)

Chidambaram ve Agarwal (2015), çalışmalarında boyuna çelik donatı ve enine güçlendirme olarak da etriye kullanmıştır (Şekil 1.2). Bu araştırmacılar geogridin lifli beton ile kullanıldığında donatı yoğunluğu yaşanmadan kirişin kesme ve çekme mukavemetlerinin artırılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca geogridli enine güçlendirmenin



güçlendirilmemiş numuneye göre daha iyi kesme kuvvetine karşı direnç sağladığını ortaya koymuştur.



**Şekil 1.2.** Geogridin enine donatı olarak uygulanması (Chidambaram ve Agarwal, 2015)

Chidambaram ve Agarwal (2016), bir diğer çalışmada dört silindir numune ve 12 kiriş numunesi üzerinde geogrid kullanarak deneysel bir çalışma yapmıştır. Özellikle geogrid kullanılan silindir numunede diğerlerine kıyasla %50 fazlasına kadar maksimum gerilmede artış gözlenmiştir. Ayrıca gevrek kırılma davranışında azalma ve çatlak sonrası uzama kapasitesinde artış gözlemiştir.

Shobana ve Yalamesh (2015), yaptıkları çalışmada sekiz geogridli numune ve iki kontrol numunesini deneye tabi tutmuştur. Araştırmacılar farklı tip geogridleri farklı katmanlarda uygulayarak bunların etkisini incelemiştir. Bu deneyde;

- 2 adet 2 katmanlı ve 1 eksenli
- 2 adet 3 katmanlı ve 1 eksenli
- 2 adet 2 katmanlı ve 2 eksenli
- 2 adet 3 katmanlı ve 2 eksenli
- 2 adet kontrol kirişi

numuneleri test edilmiştir.

Deney sonuçlarında;

1. Tek ve iki eksenli geogridler çelik donatılar gibi sünek davranış göstermiştir.
2. Geogrid tipi ve katman sayısı eğilme davranışında önemli rol oynar.
3. Tek eksenli geogrid iki eksenli geogride göre eğilme davranışında daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tang vd. (2008), yaptıkları çalışmada numunelere dört noktalı tekrarsız yükleme yaparak eğilme davranışına odaklanmıştır. Rijit ve esnek iki geogrid tipi birleştirilerek beton kirişlerdeki çekme güçlendirmesi ve eğilme karşılanmıştır. Tüm numunelere tekrarsız yükleme yapılmıştır. Deney sonucunda rijit geogridli numune esnek geogridli numuneye göre daha fazla enerji absorbe etmiş ve daha fazla çatlama sonrası uzama göstermiştir.

Rebeiz (1999) tarafından  $a/d$ , eğilme donatısı oranı ve beton basınç mukavemetleri göz önüne alınarak göçme ve çatlama kesme mukavemetinin tahmini için deneysel çalışmalar yapılmış; kiriş etkisi ve kemer etkisi arasında davranıştaki fark işaret edilmiştir.  $1 < a/d < 2.5$  olması durumunda; ilk eğik çatlama oluşu sonrası toptan göçmeye kadarki safhada, önemli ölçüde ilave eğik kuvvet taşınabilmektedir (kemer etkisi). Yüksek (derin) kirişlerde gerilmenin bu yeniden dağılımı, mesnetler ve uygulanan yükler arasındaki mesafenin göreceli kısalığından kaynaklanmaktadır.  $a/d \geq 2.5$  olan hallerde ilk eğik çatlak oluşumunu toptan göçme izlemektedir; bu durumlarda çatlama kesme mukavemeti  $v_c$  ve göçme kesme mukavemeti  $v_u$  yaklaşık olarak eşit şiddettedir.

Eğik çatlama mukavemeti ve nominal kesme mukavemetini hesaplamak için kiriş ortasından tekil yükle yüklenmiş yüksek mukavemetli betonarme kirişlerde (Shin vd., 1999), deney sonuçları ile tutarlı uygulanan yük-yerdeğiştirme eğrisini veren uygun sonlu eleman boyutları araştırılmıştır. Pek çok araştırmada uygulanan toplam yük-yerdeğiştirme eğrileri ile deney sonuçlarının uyumluluğu ilk kriter olarak göz önüne alınmaktadır.

Çatlamış bir betonarme kesit, kendisine etkiyen kesme kuvvetini, basınç bölgesindeki beton, donatıdaki kaldıraç kuvveti (pim (perçin) etkisi) ve oluşan eğik çatlak yüzeyindeki sürtünme kuvveti ile karşılamaktadır. Eğik çatlak yüzeyindeki sürtünme kuvveti, agregalar ile harç kısmı arasındaki etkileşimden kaynaklanan agregakilitlenmesi adı verilen mekanizma ile sağlanmaktadır. Walraven (1980), bu mekanizma ile karşılanan kesme kuvvetinin, yaklaşık % 50 mertebesinde olduğunu deneysel olarak kanıtlamıştır. Diğer taraftan eğik çatlağın karşıladığı kesme kuvveti, kiriş boyutu arttıkça azalmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar (Kani, 1967), büyük boyutlu

kirişlerin kayma mukavemetinin, küçük boyutlu olanlara nazaran daha az olduğunu göstermektedir. Bunun en büyük sebebi, agraga kilitlemesi dayanımının giriş boyutuyla orantılı olarak değişmemesidir. Çünkü numune boyutu arttıkça, numune içerisindeki kusurların bulunma olasılığı artmaktadır (Weibull, 1939). Davranış ve güvenliği olumsuz etkileyen bu durum a/d oranının küçük olduğu betonarme girişlerde boyut etkisinin varlığını kanıtlamaktadır.

Shehata (1999), yapmış olduğu çalışmada FRP donatısının etriye olarak kullanılması halinde dayanımında önemli derecede azalma olduğunu belirlemiş ve bu donatıların kırılmasının daha çok eğilme bölgelerinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu nedenle FRP donatısının kesme donatısı olarak kullanılması durumunda daha büyük bir azaltma katsayısı kullanılması gerektiği ifade edilmiştir.

Nagasaka vd. (1993), 35 adet dikdörtgen kesitli farklı FRP donatısına sahip betonarme girişleri kesme etkisi altında yüklemeye tabi tutmuşlardır. Yüklemeye tabi tutulan girişlerin yarısı FRP etriyelerin eğildiği bölgelerdeki kırılmadan dolayı taşıma gücüne ulaşmıştır. Diğer numuneler ise beton basınç çubuklarının ezilmesi veya betonun ezilme birim kısalmasına erişmesi neticesinde kırılma konumuna ulaşmışlardır.

Hegger vd. (2009), betonun kesme dayanımına olan katkısı için FRP boyuna donatının etkisini de içerecek şekilde bir denklem geliştirmişlerdir. FRP kayma donatısının kesme dayanımına olan katkısını da deneysel çalışma sonuçlarını göz önünde bulunduracak şekilde sınırlandırmışlardır. Hegger vd. (2009), çalışmalarında önerdikleri formülasyonu 88 adet deneysel çalışma sonucuyla karşılaştırılmasından uygun sonuçlar elde etmişlerdir.

Spadea (2010), 40 adet CFRP ve GFRP boyuna ve enine donatılı betonarme girişini iki noktasal yük etkisi altında yüklemeye tabi tutmuşlardır. Teste tabi tutulan girişlerin büyük bir çoğunluğu kesmeden dolayı kırılma konumuna ulaşmışlardır. Girişlerin bir kısmında diyagonal kesme çatlakları 70°'lik bir açı yapacak şekilde yükün uygulandığı noktaya kadar ulaşmışlardır. Yüklemeye tabi tutulan girişlerin hiçbirinde kayma donatısının kırılması olmamıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Basit Eğilme Etkisi

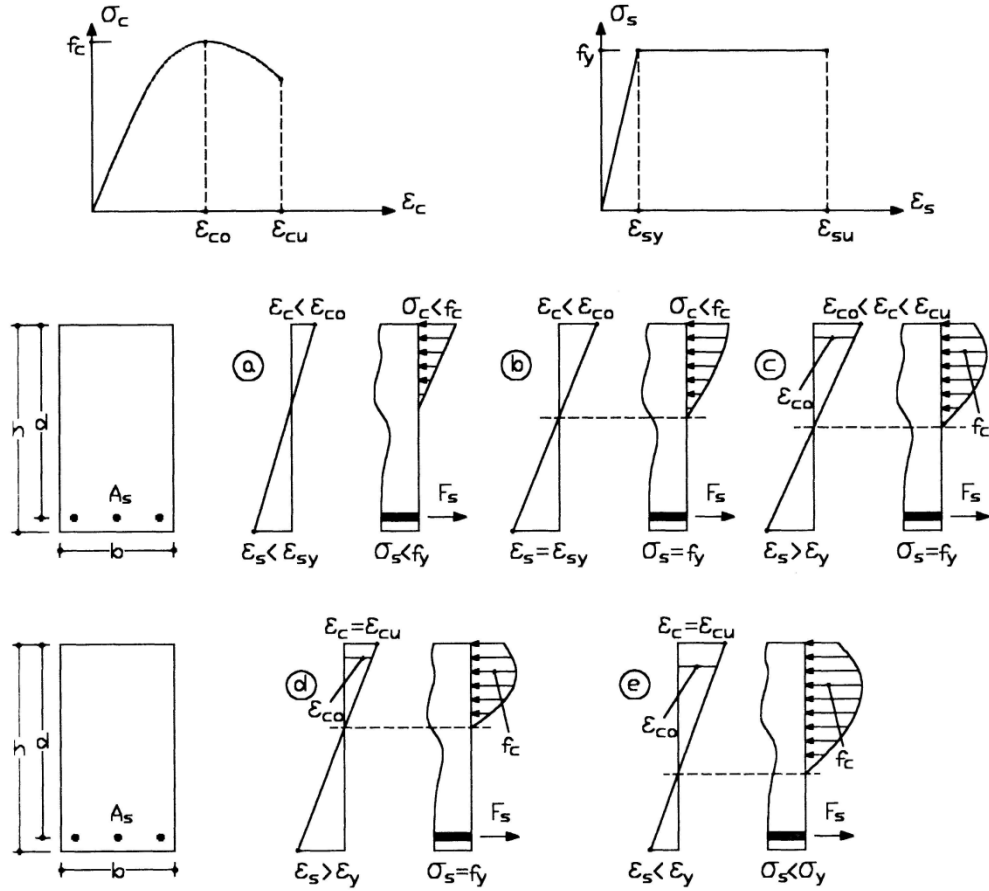
Yapı elemanlarının kesitlerinde basit eğilme etkisi aynı türden gerilme meydana getiren normal kuvvet ile genellikle beraber ortaya çıkar. Ancak kiriş ve döşeme gibi betonarme elemanlarda normal kuvvetin değeri küçük olduğu için, sadece eğilme momentinin varlığı kabul edilebilir. Şekil 2.1’de basit eğilme altındaki bir kesitte, etkinin artmasına bağlı olarak, kesitte oluşan şekil değiştirmeler (birim uzama ve kısaltmalar) ve bunlara karşı gelen gerilmeler gösterilmiştir. Şekil değiştirmelerle gerilmeler arasında kabul edilen basitleştirilmiş ilişki de verilmiştir. Davranışı incelenecek bu kesitin betonarme bir kirişin açıklık ortası civarındaki bir kesite karşı geldiği kabul edilebilir. Kirişin yükünün artırılması ile kesitte eğilme momenti artırılmış olacaktır.

Şekil 2.1’de verilen kesite eğilme momenti etkisiyle, üst bölümde basınç ve alt bölümde çekme gerilmeleri meydana gelecektir. Betonun çekme dayanımının çok düşük olması nedeniyle eğilme momentinin küçük değerlerinde bu dayanıma ulaşılır. Kesitin en alt bölümündeki gerilmeler çatlama sonucu kaybolurlar. Alt bölümünün kesitin tarafsız eksenine yakın kısımlarında çekme dayanımından küçük çekme gerilmeleri bulunabilir. Ancak değerlerinin diğer gerilmelere göre çok düşük olması ve tarafsız eksene yakın olmaları nedeniyle ihmal edilirler. Bu durumda kesitte çekme gerilmeleri sadece altta bulunan donatı çubuklarında meydana gelir. Tarafsız eksenin üst bölümünde ise betonda basınç gerilmeleri oluşur. Çekme gerilmelerinin karşılanması için alt bölümde donatı bulunması gereklidir. Ayrıca, eğilme momenti etkisine katkılarının büyük olması amacıyla donatıların tarafsız eksenden uzakta ve kesitin alt yüzünde bulunmaları uygundur. Ancak beton dış yüzünden biraz içeri yerleştirilerek, betonun donatıyı sarması, böylece donatının paslanması önlenmiş ve beraber çalışma sağlanmış olur.

Donatının dış beton yüzüne olan uzaklığı uygulamada pas payı veya beton örtüsü olarak isimlendirilir. Kesitin beklenen taşıma gücünü ortaya çıkabilmesi için, kesitteki beton ve donatının beraber şekil değiştirme yapması gerekir. Donatıda meydana gelecek çekme kuvveti değişikliğinin betona iletilmesi için beton ile donatı arasında aderansa ihtiyaç vardır. Bu nedenle donatı çubuklarının betonla sarılması önemli olur. Donatıların çok

sık olması bu sarılmayı önleyebileceği gibi, yeterli dış beton örtüsünün olmaması da aderansı azaltır ve hatta yetersiz kılabilir. Bu nedenle beton örtü tabakasının önemi vardır. Çevre koşullarının betona zarar verecek durumda olması, kimyasal gazlar veya zemin içindeki kesitlerde yer altı suyunun bulunması beton örtü tabakasının kalın olmasını gerektirebilir.

Şeki 2.1.a'da gerilmelerin küçük olduğu duruma ait şekil değiştirmeler ve gerilmeler gösterilmiştir. Davranış eğrilerinin başlangıcında olduğu için her iki malzemenin davranışı da doğrusal kabul edilebilir. Bu nedenle kesitteki beton basınç gerilmeleri dağılışı doğrusal olup, donatıda çekme gerilmesi, birim uzamayı çelik elastiklik modülü ile çarparak elde edilebilir. Şekil 2.1.b'de verilen değişimler artan kesit momenti ile donatının akma gerilmesine eriştiği duruma karşı gelmektedir. Büyüyen kısalmalar nedeniyle betondaki basınç gerilme dağılımı da doğrusal değişimden ayrılmaktadır. Bu adımdan sonra çekme kuvveti sabit kalacağı için eğilme momentindeki artış, basınç ve çekme kuvvetlerinin arasındaki kuvvet kolunun artması ile sağlanır. Şekil 2.1.c'de verildiği gibi bu sırada uzama ve kısalmalarda artışlar ortaya çıkar ve betondaki gerilme dağılışı, malzeme davranışında verilene benzer bir şekil alır. Betonun üst kenarında şekil değiştirmelerin artması gerilmelerde azalma sonucu mümkün olur. Çekme ve basınç kuvvetlerinin değişmemesi nedeniyle artan momentle tarafsız eksen üste kayarken, kısalma ve uzamalarda önemli artışlar meydana gelir. Eğilme momentinin daha da artmasıyla, betonda kısalma artarak güç tükenmesine karşı gelen en büyük değere erişir. Böylece kesit, Şekil 2.1.d'de verildiği gibi taşıma gücüne erişir. Bu durumda beton en büyük kısalmasını yapmış ve donatı akma gerilmesine erişmiş ve akma uzamasını aşmış durumdadır. Donatıdaki büyük uzamalar nedeniyle kirişte sık ve kalın çatlaklar meydana gelir. Bu sınır duruma erişildikten sonra, beton ezilerek dayanımını kaybedecek ve dağılacaktır. Kesitin bulunduğu kiriş de büyük şekil değiştirmeler sonucu oluşan yer değiştirmelerle, sünek bir davranışla göçme durumuna eriştiği için, bu tür sınır durum *haberli göçme durumu* olarak isimlendirilir. Ayrıca, bu göçme durumu donatının akma durumuna eriştikten sonra çekme kuvvetinin artmaması nedeniyle ortaya çıktığı için *çekme göçmesi* olarak da bilinir (Celep, 1998).



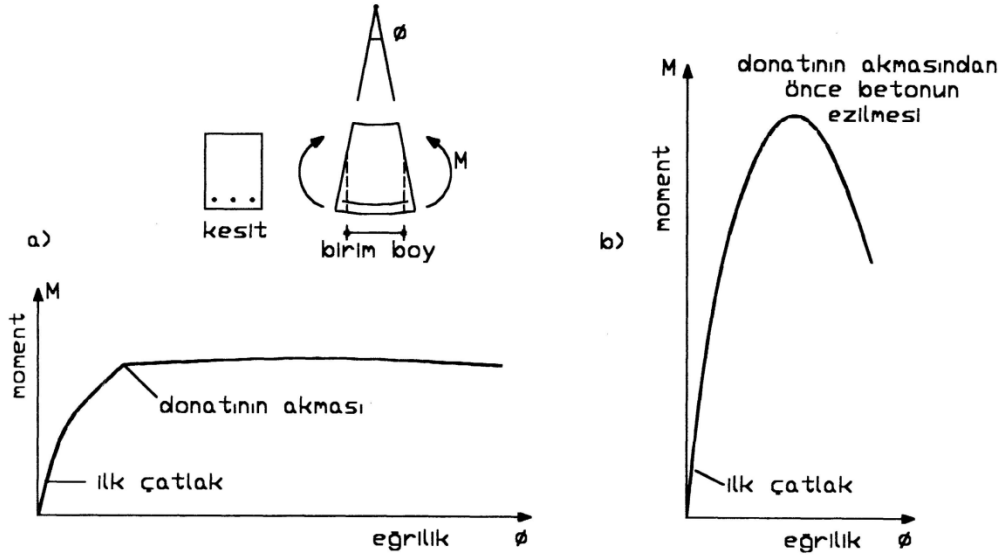
**Şekil 2.1.** Betonarme dikdörtgen kesitin eğilme momenti altında davranışı (Celep, 1998)

Yangın durumunda da beton ve çeliğin sıcaklıkla uzama katsayılarının birbirine yakın olması, beraber şekil değiştirme doğuracağı için farklı şekil değiştirmelerden meydana gelebilecek zorlamaların sınırlı kalmasını sağlar. Ancak iki malzemenin ısı iletim katsayılarının farklı olması, ısınan bölgeden uzaktaki kesitlerde, beton ve çelikte, farklı sıcaklıkların meydana gelmesine ve farklı şekil değiştirmelere ve bunun sonucu olarak beton ile donatı arasında ek zorlamaların çıkmasına neden olur. Bundan dolayı, donatının aşırı sıcaklıktan korunması için belirli kalınlıkta beton örtü tabakasının bulunması gereklidir.

Kesitte donatı fazla ise beton göçme kısılmasına eriştiği halde akmaya ulaşmayıp, elastik kalabilir. Donatının uzaması küçük kaldığı için kirişin çekme bölgesinde ancak seyrek ve ince çatlaklar oluşur. Göçmenin ani olarak, çoğu zaman bir patlama şeklinde ortaya çıktığı, sünek olmayan bu tür gevrek sınır durumu *habersiz göçme durumu* veya *basınç göçmesi* olarak adlandırılır. Yönetmelikler donatı miktarını sınırlayarak sünek

durumun ortaya çıkmasını şart koşmuşlardır. Yukarıda açıklanan iki durumu ayıran sınır kesit şekil değiştirmesi donatının akmaya erişirken betonun da kesitin üst kenarında mümkün en büyük kısalmayı yapmasıdır. Bu şekil değiştirme durumu *dengeli durum* olarak adlandırılır. Buna benzer olarak donatının göçme durumunda akmaya erişmeyecek kadar fazla olduğu ve gevrek bir şekilde göçen kesit *kuvvetli donatılı* veya *denge üstü donatılı* olarak bilinir. Göçme durumunda donatının akmaya eriştiği duruma karşı gelen ve sünek bir davranışla göçen kesit ise *zayıf donatılı* veya *denge altı donatılı* olarak isimlendirilir. Burada zayıf ve kuvvetli ifadeleri dengeli duruma kıyasla kullanılmaktadır (Celep, 1998).

Şekil 2.2’de eğilme momenti taşıyan bir kesitte moment-eğrilik bağıntısı gösterilmiştir. Birim boydaki kesitte enerji tüketimi, verilen eğrilerin altında kalan alan ile orantılıdır. Dengeli donatıdaki davranış da yaklaşık olarak denge üstü için verilene benzer olacaktır. Eğrinin tepe noktasında donatı  $f_y$  akma gerilmesine erişirken, beton da  $f_c$  dayanım değerine varacaktır. Tepe noktasına kadar eğri altında kalan sınırlı alan ani göçmeden önce tüketilecek enerji kapasitesinin bir ölçüsüdür. Donatı azaltılarak denge altı için verilen davranış elde edilir. Bu davranışta donatının azaltılmasıyla, moment kapasitesi azalmakta ve davranış eğrisinin tarafsız eksenin kesitte yukarı hareketiyle ortaya çıkan ve yataya yakın olan kısmı uzamaktadır. Davranış eğrisinin bu bölümünde çatlaklar sıklaşırken araları da açılmakta, fakat önemli bir hasar ortaya çıkmamaktadır. Eğrinin bu kısmı betonda  $\epsilon_{cu}$  birim kısalma kapasitesine erişilmesi ile sona ermektedir. Eğrinin altında kalan büyük alan davranışın sünek olduğunu göstermektedir. Güç tükenmesi durumundaki eğriliğin, donatının akmasındaki eğriliğe oranı sünekliğin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Donatı alanının artırılmasıyla, akmanın olduğu moment değeri büyümekte, eğrinin yataya yakın kısmı kısalmaktadır. Bu ise, düşük bir sünekliğe karşı gelir. Sünekliğin düşük olmasını önlemek amacıyla, TS500’de en büyük donatı oranı, dengeli durumun %85’i olarak sınırlandırılmıştır. Ancak, düşey yer değiştirmelerin sınırlı kalması koşulu ve donatının ekonomik kullanımı esas alındığında bu oran içi %40~60 gibi bir aralık verilebilir (Celep, 1998).



**Şekil 2.2.** Kesitte moment-eğrilik bağıntısı; a) denge altı donatılı (çekme göçmesi), b) denge üstü donatılı (basınç göçmesi) (Celep, 1998)

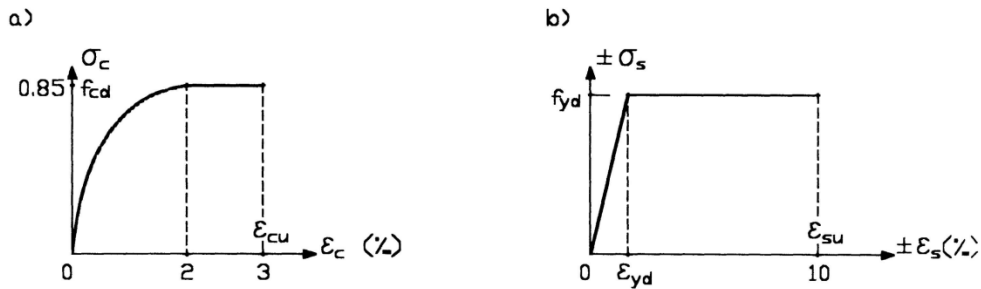
Yukarıda açıklanan davranış bilgilerine dayanarak basit eğilme altındaki kesitlerin eğilme momenti taşıma kapasitelerinin ve hesap değerlerinin bulunmasında aşağıda açıklanacak çeşitli kabullere ihtiyaç vardır:

- 1) Eğilme etkisinde, düzlem kesitin, şekil değiştirmeden sonra da düzlem kaldığı kabul edilir. Bernoulli hipotezi olarak bilinen bu beton ve donatıda oluşan uzama ve kısaltmaların tarafsız eksene olan uzaklıkla orantılı olduğu sonucunu doğurur. Yapılan deneyler alışlagelen boyuttaki kirişlerde bu kabulün, özellikle beton basınç bölgesinde büyük bir yaklaşımla doğru olduğunu göstermiştir. Çekme bölgesindeki yaklaşımı ise donatı ile beton arasındaki aderansın tamlığına bağlıdır. Çekme bölgesinde çatlakların oluşması az da olsa beton ile donatı arasında aderansın bozulduğuna, çatlak yakınında sıyrılmamanın olduğuna işaret eder. Ancak, yapılan deney sonuçları, bu bölgede de Bernoulli hipotezinin, ortalama anlamda, büyük ölçüde geçerli olduğunu ortaya koymuştur.



2) Betonun çekme dayanımı ihmal edilir. Tarafsız eksenin altında meydana gelen beton çekme gerilmeleri ve bunlarla ilgili kuvvet kolu küçüktür. Bu nedenle eğilme momentinin oluşumuna olan katkılarının göz önüne alınmaması iyi bir yaklaşım olarak kabul edilebilir.

3) Donatının gerilme-şekil değiştirme davranışı için yapılan kabul Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Normal olarak akma gerilmesine kadar doğrusal elastik ve daha sonra sabit gerilme ile akan bir davranış kabul edilerek, çeliğin pekleşmesi ihmal edilir. Genellikle çeliğin pekleşmesine ait bilgiler ilgili yönetmeliklerde verilmiştir. Buna rağmen pekleşme etkisinin hesaba katılmasıyla elde edilecek gerilme artışının büyük şekil değiştirmeler (uzama veya kısalmalar) sonucu elde edildiği unutulmamalıdır. Büyük yer değiştirmelerin önlenmesi yanında, bu nedenle de donatının birim uzamasının (veya kısalmasının) sınırlandırılması gerekebilir. TS500'de böyle bir sınırlandırma mevcut değildir. Ayrıca, böyle bir sınırlandırma ile eğilme momenti ile normal kuvvetin beraber bulunması durumunda basit eğilmeden basit basınç durumuna geçmek mümkün olabilir. Bu tür bir sınırlandırma DIN1045'te %0.5 olarak mevcuttur. Şekil 2.3.b'de  $\epsilon_{su} = \%1.0$  olarak verilmiştir. Pekleşmenin göz önüne alınmasıyla meydana gelecek dayanım artımı istenmeyen bir durum meydana getirecekse, bunun göz önüne alınması gerekir. Örneğin bir kirişin gevrek kesme göçmesinin sünek eğilme göçmesi ile karşılaştırılmasında, kesitin eğilme dayanımının pekleşmeyi de göz önüne alarak bulunması uygundur.

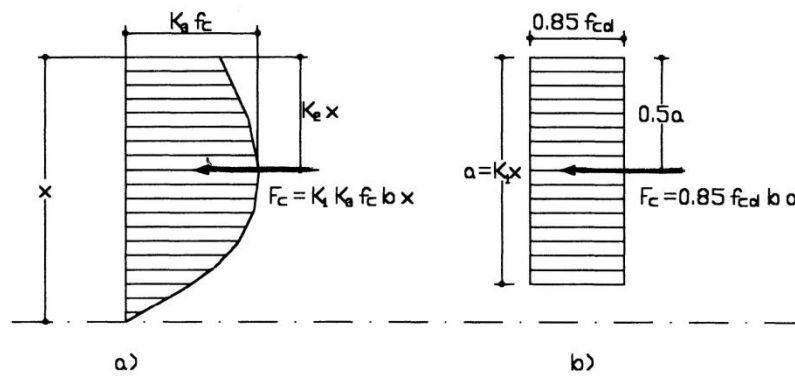


Şekil 2.3. Beton ve çeliğin gerilme şekil değiştirme eğrileri (Celep, 1998)

4) Betonarme bir kesitin dayanımının hesaplanması için, betonun gerilme-şekil değiştirme davranışı ve buna bağlı olarak kesitte beton basınç gerilmelerinin yayılışı hakkında kabul yapmak gerekir. Basınç bölgesindeki kısalmalar tarafsız eksen den uzaklıkla orantılı olduğu için, basınç gerilmeleri betonun gerilme-şekil

değiştirme eğrisine benzer olarak oluşur. Yapılan deneylere dayanılarak, TS500’de, kesit göçme durumuna eriştiğinde, betonun yapabileceği en büyük  $\varepsilon_{cu}$  kısalmasının 0.003 olduğu esas alınmıştır. Eğilme momentinin artmasıyla, eğrinin doğrusal olmayan bölümlerine geçilir. Kesitin göçme durumunda basınç gerime yayılımı, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tamamına benzer şekilde ortaya çıkar. Şekil 2.2.a’da dikdörtgen basınç bölgesine sahip bir kesitte, göçme durumunda basınç gerilmelerinin yayılımı verilmiştir. Değişimin şeklinin ifade edilmesi bakımından çeşitli katsayılar kullanılmıştır. Bunlardan  $K_3$ , eğilme durumunda meydana gelecek en büyük gerilmenin, basınç deneyinde elde edilene oranını göstermektedir. Gerilmelerin bileşkesinin yeri ise,  $K_2$  katsayısı kullanılarak basınç bölgesi yüksekliği ile ilişkilendirilmiştir. Toplam beton basınç kuvvetinin elde edilmesi için de,  $K_1$  katsayısı kullanılmıştır.

Şekil 2.4’te verildiği gibi beton basınç gerilme yayılımı dikdörtgen bir gerilme blokuna statik bakımdan eşdeğer tutularak basit bir hesap yöntemi oluşturulabilir. Ortalama gerilmenin  $0,85 f_{cd}$  ve derinliğin  $a = k_1 x$  olarak alındığı bu eşdeğer gerilme modeli ACI318-89 yanında TS500’de de verilmiştir. Kullanılan  $k_1$  katsayısı, Şekil 2.4’te verilen  $a/2 = K_1 x$  olacak şekilde yapılan deneylerden  $0,85$  olarak  $f_{ck} < 25 \text{ MPa}$  için belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 2.4’te  $K_2$ ’nin azalmasına paralel olarak, beton karakteristik dayanımının her MPa yükselmesinde  $k_1$ ’in  $0,03$  azaltılması öngörülmüştür (Tablo 2.1).



**Şekil 2.4.** Dikdörtgen kesitte beton basınç gerilmeleri yayılımı; a) göçme durumu, b) dayanım hesabında esas olan eşdeğer dikdörtgen dağılım durumu (Celep, 1998)

Betonarme bir dikdörtgen kesitte beton basınç kuvveti ve donatının akmaya eriştiği kabul edilerek, donatı çekme kuvveti

$$F_{cu} = K_1 K_3 f_c b x \quad F_{su} = A_s f_y \quad (2.1)$$

ve basit eğilme durumunda kuvvetlerin eşit olması nedeniyle

$$F_{cu} = F_{su} \quad x = A_s f_y / (K_1 K_3 f_c b) \quad (2.2)$$

yazılabilir. Kesitin göçme durumuna karşı gelen eğilme momenti ise,

$$M_u = F_s (d - K_2 x) = A_s f_y [ d - K_2 A_s f_y / (K_1 K_3 f_c b) ] \quad (2.3)$$

olarak bulunur. Yapılan deneylerden kullanılan katsayıların belirli bir dağılımla beton basınç dayanımına bağlı olduğu bulunmuştur. Bunların ortalama değişimi Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Son ifadenin incelenmesinden katsayıların ayrı ayrı bilinmesine gerek kalmadan  $K_2 / (K_1 K_3)$  değerinin belirli olmasıyla, eğilme momentinin elde edilebileceği anlaşılır. Yapılan deneyler bu büyüklüğü 0,55 ile 0,63 arasında değiştiğini göstermiştir.

Kesitin taşıyabileceği eğilme momentinin hesabında gerekli olan katsayılar, beton için deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesiyle bulunacak bir gerilme-kısalma eğrisi kabulüyle elde edilebilir. Şekil 2.3’te DIN1045’te beton için verilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi  $\varepsilon_{cu} = 0,003$  değeri için gösterilmiştir. Eğri, yatay teğeti  $\varepsilon_c = 0,002$ ’de olan biri ikinci derece parabol ve diğeri iki doğrusal parçadan oluşmaktadır. Eğilme momentinin boyutlamaya esas olacak değerinin bulunması esas alındığından betonun  $f_{cd}$  hesap dayanımı kullanılmıştır. Ayrıca, yapıda yüklemenin deneye göre uzun süre devam edeceği ve silindirik numunelerden elde edilen sonucun kiriş gibi ince ve uzun prizmatik elemanlarda kullanılmasında doğacak farklılık göz önüne alınarak betonun hesap dayanımı %85 azaltılmış durumdadır. Böyle bir davranış eğrisi kabul edilerek kesitteki herhangi bir şekil değiştirme durumuna ait beton basınç kuvvetini ve etki yerini hesaplamak mümkün olur. Ancak, böyle bir işlemde parabolik bir değişim alanının ve ağırlık merkezinin hesaplanması, dolayısıyla integrasyon gerekir.

Şekil 2.6’da çelik ve betonun olabilecek en büyük küçülme durumları gözönüne alınarak kesitin basit eğilmesinde oluşabilecek şekil değiştirme bölgeleri verilmiştir. Burada IIIa bölgesi yukarıda açıklanan güç tükenmesi şekil değiştirme durumlarını içerir. Zayıf donatılı kesitlerin göçme durumu şekil değiştirmesi bu bölgede B noktasından geçen bir doğru olarak meydana gelir. Donatının kuvvetli olması durumunda beton en büyük kışalmasını yaparken, donatı akmaya erişmeyecek ve güç tükenmesi IIIb bölgesinde B noktasından geçen bir doğru olarak belirecektir. IIIa ve IIIb bölgelerini ayıran doğrudan beton en büyük kışalmasını yaparken donatı da tam akmaya eriştiği için, bu durum dengeli şekil değiştirmeyi göstermektedir. Kesitteki donatı zayıf kalmışsa yani donatı alanı çok küçükse, donatıda büyük uzamalar meydana gelir ve beton en büyük uzamasına erişmeden güç tükenmesi ortaya çıkar. Bu durum II bölgesinde gösterilmiştir. Göçme şekil değiştirmeleri A noktasından geçen doğrular olarak oluşacaktır.

Gerilme bloku esas alındığında yönetmelikte tanımlanan güç tükenmesi durumunda, beton basınç kuvveti basınç blokunun hacmi olarak ve donatının akmaya eriştiği kabul edilerek, donatı çekme kuvveti

$$F_c = 0.85 f_{cd} b a \quad F_s = A_s f_{yd} \quad (2.4)$$

ve basit eğilme durumunda kuvvetlerin eşit olması nedeniyle

$$F_c = F_s \quad a = A_s f_{yd} / (0.85 f_{cd} b) \quad (2.5)$$

yazılabilir. Kesitte bu duruma karşı gelen eğilme momenti ise, beton ve donatıdaki kuvvet kolu ile çarpılması ile

$$M_r = F_s (d - a / 2) = A_s f_{yd} [d - 0.59 A_s f_{yd} / (f_{cd} b)] \quad (2.6)$$

olarak elde edilir. Yukarıda verilen (2.3) ve (2.6) ifadelerinin karşılaştırılmasından 0,59 değerinin  $K_2 / (K_1 K_3)$  katsayısına karşı geldiği anlaşılır. Şekil 2.4’te verilen  $k_1$  değerine sadece kesitteki şekil değiştirme durumunun belirlenmesi ve donatının akmaya erişip

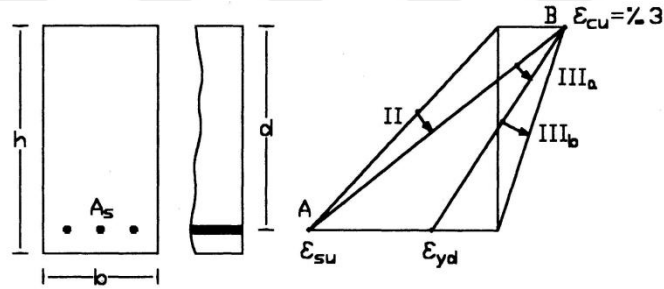
erişmediğinin kontrolünün sağlanması için ihtiyaç vardır. Donatının akmaya erişmesi durumunda, kesitin taşıma gücü momenti bu katsayıdan etkilenmez.

**Tablo 2.1.** Beton sınıfına göre gerilme katsayıları (Ersoy, 1987)

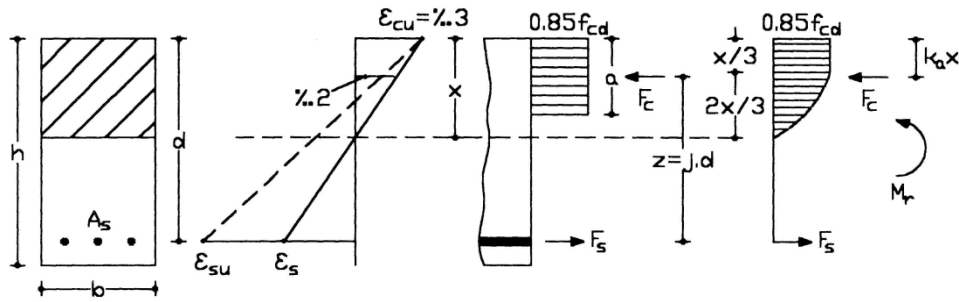
| Beton Sınıfı | C14–C25 | C30  | C35  | C40  | C45  | C50  |
|--------------|---------|------|------|------|------|------|
| $k_1$        | 0.85    | 0.82 | 0.79 | 0.76 | 0.73 | 0.70 |

### 2.1.1. Tek donatılı dikdörtgen kesit

Yönetmeliklerde basit eğilme durumunda sünek göçme öngörüldüğü için aşağıda önce IIIa bölgesindeki bir şekil değiştirme durumu esas alınarak kesit bağıntıları yazılacaktır.

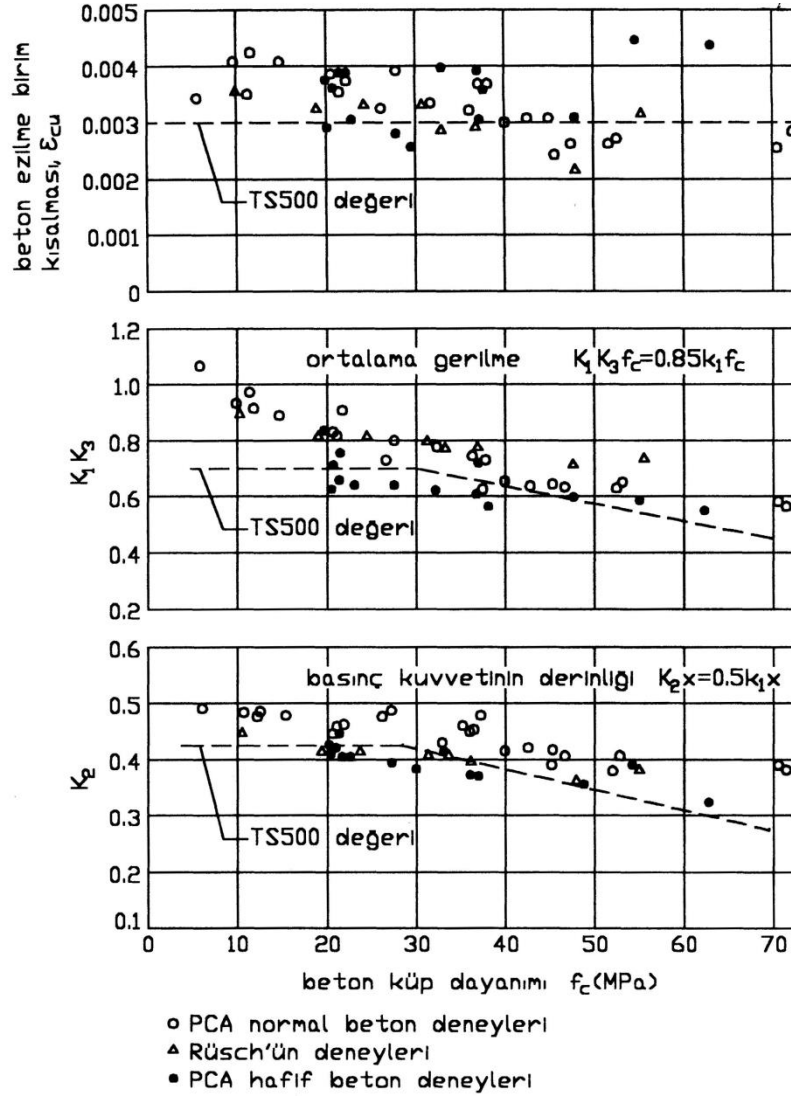


**Şekil 2.5.** Basit eğilme durumunda kesit şekil değiştirme durumları (Celep, 1998)



**Şekil 2.6.** IIIa bölgesindeki kesitte iç kuvvetler (Celep, 1998)

Donatı akmaya erişmiş ve beton en büyük kısalmasını yapmış ise ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon_{yd} < \epsilon_s < \epsilon_{su}$ ), kesitteki şekil değiştirme durumu ve karşı gelen kuvvetler Şekil 2.5'te verildiği gibi oluşur.



Şekil 2.7. Gerilme yayılış katsayıları (Çelep, 1998)

Donatının uzaması ile tarafsız eksen derinliği arasında bağıntı üçgen benzeşimlerinden donatı çekme kuvveti

$$\epsilon_s = \epsilon_{cu} (d - x) / x = \epsilon_{cu} (1 - k_x) / k_x \quad k_x = \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_s) \quad F_s = A_s f_{yd} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir. Burada  $k_x = x / d$  tarafsız eksen derinliğini ifade eden boyutsuz bir katsayı olarak tanımlanmıştır. Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için gerilme bloku kabulü yapılırsa, basınç kuvveti  $F_c$  ve etki yeri  $k_a x$  kolayca belirlenebilir:

$$F_c = 0,85 f_{cd} b a = 0,85 k_1 k_x f_{cd} b d \quad k_a = k_1 / 2$$

$$z = d - a / 2 = d - k_a x \quad j = z / d = 1 - k_1 k_x / 2 \quad (2.8)$$

Kesitte meydana gelen basınç ve çekme kuvvet çiftinin momenti kesitte bulunan eğilme momentine eşitlenerek eğilme momenti ve donatı alanı için kesit boyutlarını içeren aşağıdaki bağıntılar bulunabilir:

$$M_r = F_c z = 0,85 k_1 k_x (1 - 0,5 k_1 k_x) f_{cd} b d^2$$

$$M_r = b d^2 / k_d^2 \quad k_d^2 = 1 / [0,85 k_1 k_x j f_{cd}] \quad (2.9)$$

$$M_r = F_s z = A_s f_{yd} d j$$

$$A_s = k_s M_r / d \quad k_s^{-1} = j f_{yd} \quad (2.10)$$

Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için Şekil 2.1'de verilen parabol-dikdörtgen gerilme yayılımı kullanılırsa, basınç kuvveti  $F_c$  ve etki yeri  $k_a x$  aşağıdaki gibi parabol ve dikdörtgen kısımların toplamı şeklinde Şekil 2.5'den belirlenebilir:

$$F_c = 0,85 f_{cd} b (x/3) + (2/3) 0,85 f_{cd} b (2x/3) = 0,6611 k_x f_{cd} b d$$

$$a = F_c / (0,85 f_{cd} b x) = 0,7778$$

$$k_a x = \{ 0,85 f_{cd} b (x/3) (x/6) + (2/3) 0,85 f_{cd} b (2x/3) [x/3 + (3/8)(2x/3)] \} / F_c = 0,4048 x$$

$$z = d - a/2 = d - k_a x \quad j = z/d = 1 - k_a k_x = 1 - 0,4048 k_x \quad (2.11)$$

Burada  $\alpha$  kesitin basınç bölgesinin doluluk oranını göstermektedir. Basınç bölgesinin  $0,85 f_{cd}$  en büyük beton gerilmesi ile dolu olması  $\alpha=1$  değerini verirken tam dolu haline karşılık gelmektedir. Kesitin benzer şekilde basınç ve çekme kuvvet çiftinin momenti kesit momentine eşitlenerek, eğilme momenti ve donatı alanı için aşağıdaki bağıntılar bulunabilir:

$$M_r = F_c z = 0,6611 k_x j f_{cd} b d^2$$

$$M_r = b d^2 / k_d^2 \quad k_d^2 = 1 / [0,6611 k_x j f_{cd}] \quad (2.12)$$

$$M_r = F_s z = A_s f_{yd} d j$$

$$A_s = k_s M_r / d \quad k_s^{-1} = j f_{yd} \quad (2.13)$$

Bulunan son bağıntılarda  $k_d$  katsayısı, kesitin şekil değiştirme durumu yanında sadece beton kalitesine ve  $k_s$  katsayısı ise, sadece donatı kalitesine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Örneğin  $0 < \varepsilon_s = 0,0032 < 0,010$  gibi bir değer seçilirse, tarafsız eksenin yeri katsayısı için  $k_x = 0,003 / (0,003 + 0,0032) = 0,4839$  bulunur. Diğer katsayılar, C20 ( $f_{cd} = 1,3 \text{ kN/cm}^2$ ) beton ve S220 ( $f_{yd} = 19,1 \text{ kN/cm}^2$ ) çeliği için, dikdörtgen basınç bloku kabulüyle

$$j = 1 - 0,85 \times 0,4839 / 2 = 0,7942 \quad k_d^2 = 1 / \{0,85 \times 0,4839 \times 0,7942 \times 1,3\} = (1,5345 \text{ cm}^2/\text{kN})^2$$

$$k_s = 1 - \{0,7942 \times 19,1 \times 0,01\} = 6,5923 \text{ cm}^3/\text{kNm}$$

ve parabol-dikdörtgen gerilme yayılımı kabulüyle

$$j = 1 - 0,4048 \times 0,4839 = 0,8041$$

$$k_d^2 = 1 / \{0,6611 \times 0,4839 \times 0,8041 \times 1,3\} = (1,7293 \text{ cm}^2/\text{kN})^2$$

$$k_s = 1 / \{0,8041 \times 19,1 \times 0,01\} = 6,5111 \text{ cm}^3/\text{kNm}$$

değerleri elde edilir.

Şekil 2.6'da gösterilen IIIa bölgesinde, donatı miktarı arttıkça, daha küçük donatı uzaması ile daha büyük kuvvetler oluşabileceği için, göçme durumuna karşı gelen şekil değiştirme durumu  $B$  noktası etrafında döner. Şekilde verilen ve IIIa ve IIIb bölgelerini ayıran doğru dengeli şekil değiştirme durumu olarak isimlendirilir. Bu durum  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$  ve  $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$  olarak belirlidir. Karşı gelen tarafsız eksen derinliği

$$k_{xb} = \varepsilon_{cu} / (\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}) \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için dikdörtgen gerilme bloku kabulü yapılırsa, basınç kuvveti  $F_{cb}$  ve etki yeri  $k_a x_b$  kolayca belirlenebilir.

$$F_{cb} = 0,85 f_{cd} b a_b = 0,85 k_1 k_{xb} f_{cd} b d$$

$$z_b = d - a / 2 = d - k_a x_b \quad j_b = z_b / d = 1 - k_1 k_{xb} / 2 \quad (2.15)$$



Burada  $b$  indisi büyüklüklerin dengeli durumda hesaplandığına işaret etmektedir. Basınç ve çekme kuvvetlerinin eşitlenmesinden

$$F_{sb} = f_{yd} A_{sb}$$

$$\rho_b = A_{sb} / (b d) = 0,85 k_1 k_{xb} f_{cd} / f_{yd}$$

$$\rho_b = 0,85 k_1 f_{cd} \varepsilon_{cu} / [(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}) f_{yd}] \quad (2.16)$$

bulunur. Burada  $\rho_b$  dengeli durumda kesitteki donatı oranını göstermektedir.

Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için Şekil 2.3'te verilen parabol dikdörtgen gerilme yayılımı kullanılırsa, basınç kuvveti  $F_c$  ve etki yeri  $k_a x$  aşağıdaki gibi parabol ve dikdörtgen kısımların toplamı şeklinde Şekil 2.7'den belirlenebilir:

$$F_{cb} = 0,85 f_{cd} b (x_b / 3) + (2 / 3) 0,85 f_{cd} b (2 x_b / 3) = 0,6611 k_{xb} f_{cd} b d$$

$$z_b = d - a_b / 2 = d - k_a x_b$$

$$j_b = z_b / d = 1 - k_a k_{xb} = 1 - 0,4048 k_{xb} \quad (2.17)$$

Benzer şekilde basınç ve çekme kuvvetlerinin eşitlenmesinden dengeli donatı oranı için

$$\rho_b = A_{sb} / (b d) = 0,6611 k_{xb} f_{cd} b d$$

$$\rho_b = 0,6611 \varepsilon_{cu} / [(\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{yd}) f_{yd}] \quad (2.18)$$

bulunur.

Sünek bir kırılma için göçme durumunun Şekil 2.6'da gösterilen II ve IIIa bölgesinde oluşması ve IIIb bölgesinde meydana gelmemesi gerekir. Bunun için kullanılan donatı oranının dengeli donatıdan daha küçük olması lazımdır ( $\rho < \rho_b$ ) Dengeli donatı oranına etki eden büyüklüklerin, özellikle donatıda akmanın yaklaşık belirlenebilmesi nedeniyle TS500'de bu koşul

$$\rho < \rho_{max} = 0,85 \rho_b \quad (2.19)$$

olarak öngörülmüştür. Bu suretle sünek göçme biçiminin daha da keskin bir şekilde ortaya çıkması sağlanmış bulunmaktadır (Celep, 1998).

Gevrek göçme meydana geldiği için boyutlandırmada kesitin göçme durumunda IIIb bölgesinde bulunması istenmez. Ancak, mevcut bir kesitin taşıma gücünün hesabında bulunan donatının dengeli donatının üzerinde olması durumunda bu bölgeye ait bağıntılara ihtiyaç duyulabilir. Aşağıda bu bağıntılar incelemenin tamlığı ve farkın gösterilmesi yönünden ele alınacaktır. Yukarıda verilen ifadeler aynen kullanılabilir. Sadece donatının akma gerilmesine erişmediği ve birim uzamasının akmaya karşı gelenden küçük olduğu gözz önüne alınmalıdır. Bu durumda gerilme ile birim uzama arasında doğrusal bağıntı geçerli olacaktır:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c = \varepsilon_{cu} \quad 0 < \varepsilon_s < \varepsilon_{yd} \quad 0 < \sigma_s = E_s \varepsilon_s < \sigma_{yd} \\ F_s = A_s \sigma_s = A_s E_s \varepsilon_{cu} (d - x) / x = A_s E_s \varepsilon_{cu} (1 - k_x) / k_x \end{aligned} \quad (2.20)$$

Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için dikdörtgen gerilme bloku kabulü yapılırsa, benzer bağıntılar yazılabilir:

$$\begin{aligned} F_c = 0,85 f_{cd} b a = 0,85 k_1 k_x f_{cd} b d \quad k_a = k_1 / 2 \\ z = d - k_a x \quad j = 1 - k_1 k_x / 2 \\ M_r = F_c z = 0,85 k_1 k_x (1 - 0,5 k_1 k_x) f_{cd} b d^2 \\ M_r = F_s z = A_s \sigma_s d j \\ F_c = F_s \quad 0,85 k_1 k_x = (A_s / b d) (E_s \varepsilon_{cu} / f_{cd}) (1 - k_x) / k_x \end{aligned} \quad (2.21)$$

En son bağıntı kesitteki basınç ve çekme kuvvetlerinin eşitliğinden yazılmıştır. Bütün boyutları ve donatısı belirli olan kesitte tarafsız eksenin harap edilmesi için kullanılacak ifade  $k_x$  yönünden ikinci derece bir denklem olarak ortaya çıkmaktadır. Bulunacak iki çözümden  $k_x < 1$  olanın geçerli olacağı açıktır. Beton basınç gerilmelerinin dağılımı için verilen parabol-dikdörtgen gerilme yayılımı kullanılırsa aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir:

$$\begin{aligned} F_c = 0,6611 k_x f_{cd} b d \quad k_a x = 0,4048 x \\ 20 \end{aligned}$$

$$z = d - k_a x$$

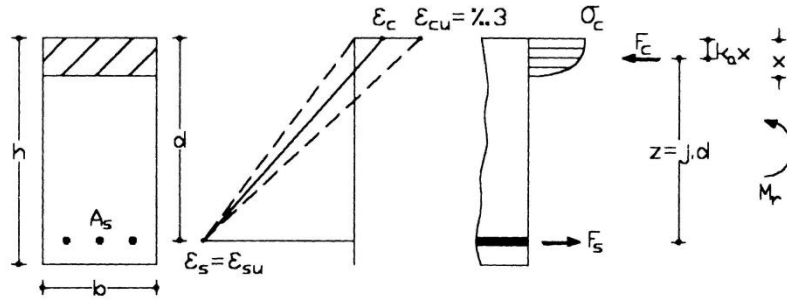
$$j = 1 - k_a k_x = 1 - 0,4048 k_x$$

$$M_r = F_c z = 0,6611 k_x j f_{cd} b d^2$$

$$M_r = F_s z = A_s \sigma_s d j$$

$$F_c = F_s \quad 0,6611 k_x = (A_s / b d) (E_s \varepsilon_{cu} / f_{cd}) (1 - k_x) / k_x \quad (2.22)$$

Kesitte donatının oldukça az olması donatının büyük uzamalar yapmasına sebep olabilir. Eğilme bölgesindeki çatlakların sınırlı tutulması amacıyla donatının birim uzamasının bir üst değerle sınırlandırılması uygundur. Bu durumda kesitin göçme şekil değiştirmesi Şekil 2.8 'de verildiği gibi II bölgesinde meydana gelecektir.



Şekil 2.8. II bölgesindeki kesitteki iç kuvvetler (Celep, 1998)

Bu bölgede donatı akmaya erişmiş ve en büyük uzamasını yapmıştır ve betonun kısılması ise en büyük sınır değerden daha küçüktür ( $\varepsilon_s = \varepsilon_{su}$ ,  $0 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 0,003$ ). Kesitteki şekil değiştirme durumu ve karşı gelen gerilmeler ve kuvvetler şekilde verildiği gibi oluşur. Betonun kısılması ile tarafsız eksen derinliği arasındaki ilişki ve donatı çekme kuvveti

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{su} x / (d - x) = \varepsilon_{su} k_x / (1 - k_x) \quad k_x = \varepsilon_c / (\varepsilon_c + \varepsilon_{su}) \quad F_s = A_s f_{yd} \quad (2.23)$$

olarak yazılabilir.

Beton gerilmeleri dağılımı için parabol-dikdörtgen gerilme yayılımı kullanılırsa, basınç bölgesinin en büyük gerilme ile olan doluluk oranı kullanılarak basınç kuvveti  $F_c$  yazılabilir:

$$F_c = a 0,85 f_{cd} b x \quad M_r = F_c z = F_c (1 - k_a) d = 0,85 a k_x (1 - k_a) f_{cd} b d^2 \quad (2.24)$$

Şekil değiştirme durumuna bağlı olarak hesaplanacak doluluk oranı ve basınç kuvvetinin etki yeri katsayısı geometrik bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. Elde edilecek ifadeler parabol değişim yanında sabit gerilmenin de bulunmasına göre farklı olacaktır.

$0,000 < \varepsilon_c < 0,002$  için

$$a = \varepsilon_c (0,006 - \varepsilon_c) / 0,000012 \quad k_a = (0,008 - \varepsilon_c) / (0,024 - 4\varepsilon_c)$$

$0,002 < \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} = 0,003$

$$a = (3 \varepsilon_c - 0,002) / (3 \varepsilon_c)$$

$$k_a = (3 \varepsilon_c^2 - 0,004 \varepsilon_c + 0,000002) / (6 \varepsilon_c^2 - 0,004 \varepsilon_c) \quad (2.25)$$

Benzer şekilde eğilme momenti ve donatı alanı için aşağıdaki bağıntılar bulunabilir:

$$M_r = b d^2 / k_d^2 \quad k_d^2 = 1 / (0,85 a k_x j f_{cd}) \quad j = 1 - k_s - k_a$$

$$M_r = F_s z = A_s f_{yd} d j$$

$$A_s = k_s M_r / d \quad k_s^{-1} = j f_{yd} \quad (2.26)$$

Yukarıdaki açıklamaların incelenmesinden betonarme bir kesitte  $b$  ve  $d$  kesitin geometrik boyutlarının, taşınması gereken  $M_d = 1,4 M_g + 1,6 M_q \leq M_r$  eğilme momentinin ve  $A_s$  donatı alanının kesit ana büyüklükleri olduğu anlaşılır. Basit eğilme durumunda kesit kuvvetlerinin dengesi için iki denge denklemi yazılabilir. Ancak, göçme durumunda kesit şekil değiştirme çizgisinin bir noktasının belirli olduğu hatırlanırsa ancak yukarıdaki dört büyüklükten birinin diğerlerine bağlı olarak elde edilebildiği anlaşılır. Uygulamada rastlanan kesit problem türlerini iki bölümde ele almak mümkündür.

- a) Boyutlama problemi: Kesitte gerekli donatının belirlenmesidir. Kesitin yaklaşık boyutları seçilerek, taşıyıcı sistemin statik hesabı yapılmış ve karşılanması gereken eğilme momenti  $M_d$  bulunmuştur. Yukarıdaki bağıntılar veya bunlara dayanılarak

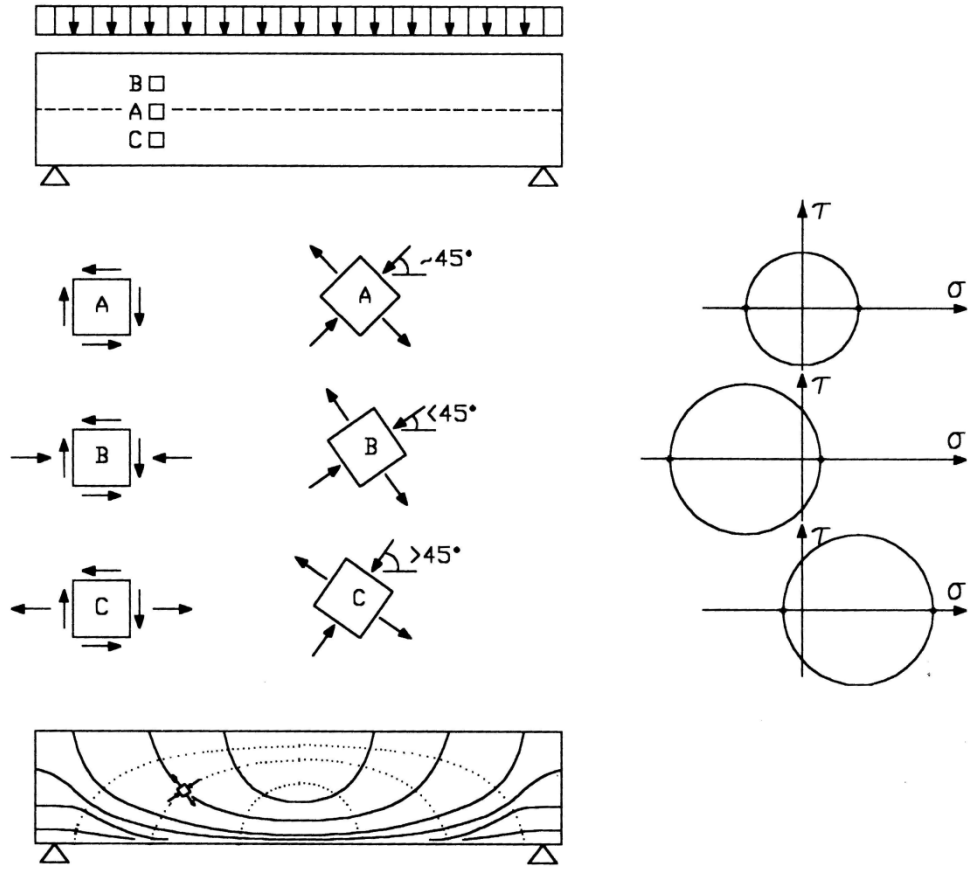
hazırlanan tablolar yardımıyla  $M_d = M_r$  alınarak,  $A_s$  donatı alanı hesap edilebilir. Bulunan donatı oranının dengeli donatı oranının %85'inden küçük olması sünek göçme için yeterli ise de, ekonomik bir boyutlama için bu oranın %40~60 civarı olması uygundur. Geometrik boyutlarda değişiklik yaparak bu sağlanabilir. Ancak, bir kesitte yükseklik ve genişliğin serbest seçimi her zaman mümkün olmayabilir. Mimari nedenlerle bunlardan biri veya ikisi belirli olmayabilir. Bu durumlarda bilinmeyen olarak görülen büyüklüklerin azaldığı seçime daha az büyüklüğün kaldığı görülür.

b) Kesit kontrolü: Boyutları ve mevcut donatısı belirli olan bir kesitin verilen bir eğilme momentini güveneli olarak taşıyıp taşıyamayacağını belirlenmesidir. Benzer şekilde yukarıda verilen işlemler veya hazırlanan tablolar yardımıyla bu işlem yapılabilir. Özellikle donatının akmaya eriştiğini kabul eden ifadelerin kullanılmasından sonra, elde edilen sonuçlardan donatıdaki birim uzama hesap edilerek, yapılan kabulün kontrolü gerekir (Celep, 1998).

## 2.2. Kesme Kuvveti Etkisi

Homojen taşıyıcı elemanların kesme kuvveti etkisi altındaki davranışı mukavemette kabul görmüş ilkeler vasıtasıyla yapılabilir. Eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisi elemanlarda iki eksenli bir gerilme ortaya çıkarır. Çatlama oluşmadığı betonarme kirişin davranışı ve meydana gelen gerilmeler bu kabullerden ortaya çıkan ifadelerle hesaplanabilir.

Şekil 2.9'da görülen kirişteki üç elemanda (A)'da sadece kayma gerilmeleri, (B)'de kayma gerilmesi ile basınç gerilmesi, (C)'de ise kayma gerilmesi ile çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Bu elemanlarda eğik asal basınç gerilmeleri yanında ona dik doğrultuda çekme gerilmeleri de oluşur. Yalnız kayma gerilmesinin bulunması durumunda asal gerilmeler  $45^\circ$  eğimle ortaya çıkarken, kayma gerilmesine ek olarak basınç veya çekme gerilmelerinin bulunması bu açının farklı olmasına neden olur. Basınç ve çekme asal gerilmelerinin ikisinin beraber bulunması sonucu yükün mesnetlere iletilmesi sağlanır (Celep, 1998).



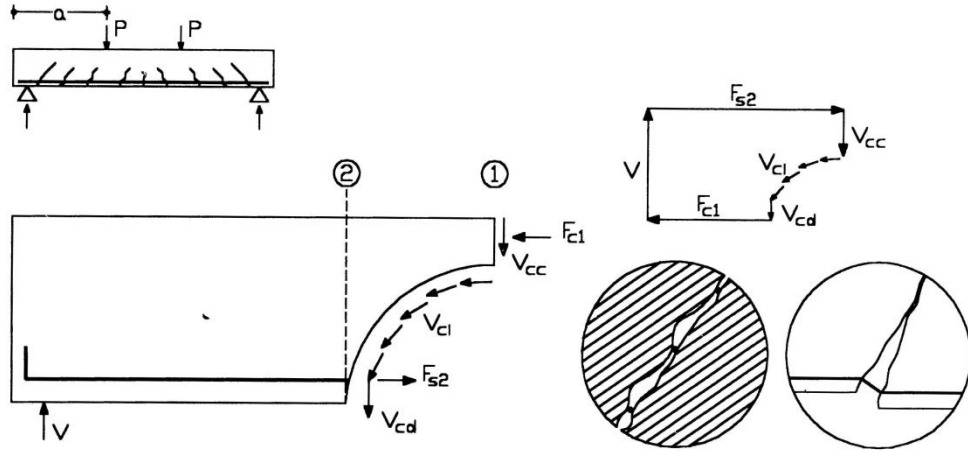
**Şekil 2.9.** Homojen bir kirişteki üç noktada asal gerilmeler ve çekme, basınç gerilme yörüngeleri (Celep, 1998)

### 2.2.1. Kayma donatısız kirişin davranışı

Yeterli eğilme donatısına sahip bir kiriş ele alındığında; asal gerilme yörüngelerinin incelenmesinden görüldüğü gibi, asal gerilmeler kirişin alt yüzüne yakın bölgede yataya yakın doğrultuda olduğu görülür. Kirişin orta bölgesinde asal çekme ve basınç gerilmeleri eğik olarak oluşur. Bu bölgede bunların değerlerinin de birbirine yakın olduğu ve betonun basınç dayanımının çekme dayanımına göre daha yüksek olduğu için, yükün arttırılması durumunda betonda eğik çekme çatlakları ortaya çıkar. Eğilme donatısı bulunan kirişte bu çatlaklar kiriş gövdesinde asal çekme yörüngelerine dik doğrultuda meydana gelir. Yükün arttırılmasıyla, bu eğik çekme gerilmelerinin neden olacağı göçme ani olup, gevrek kırılma türünden olur (Celep, 1998).

Şekil 2.10'da yeterli eğilme donatısı bulunan fakat kayma donatısı bulunmayan bir kirişte yükün arttırılması sonucu ortaya çıkan çatlaklar ve bu kirişe ait serbest cisim

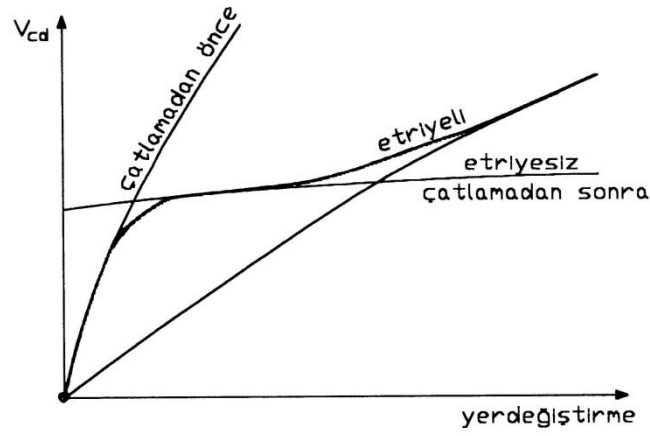
diyagramı gösterilmiştir. Şekildeki iç ve dış kuvvetlerle kiriş dengede bulunmaktadır. Burada  $V$  dış kesme kuvveti,  $V_{cc}$  basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti, çatlama sonucunda ortaya çıkan yüzeylerdeki agreganın birbirine değerek ortaya çıkan sürtünme kuvveti  $V_{ci}$  ile donatı çubuğundaki perçin etkisi olarak bilinen olay sonucu ortaya çıkan  $V_{cd}$  kuvvetleri dengelenir.



**Şekil 2.10.** Kayma donatısız kirişte çatlama ve kesme kuvvetinin taşınması (Celep, 1998)

$$V = V_{cc} + V_{ci} + V_{cd} \quad (2.27)$$

Şekil 2.11’de gösterilen beton basınç bölgesindeki basınç kuvvetinin eğik olması, karşılanacak kesme kuvvetinde etkili olur. Betonun basınç kuvveti mesnetlerin yakınında eğik olarak mesnet kuvveti ile dengeleneceğinden bu bölgede kesme kuvvetinin önemli bir kısmı basınç kuvvetinin düşey bileşeni ile dengelenir. Şekil 2.12’de bur durum çekme donatısı mesnette kenetlenmiş bir basit kiriş için gösterilmiştir. Kemerlenme etkisi, donatı kenetlenmesinin zorlanması ile oluşur. Bu durumda kiriş, gergili bir kemere benzetilebilir. Kirişte kesme kuvvetinin sabit olduğu  $a$  boyu kayma açıklığı olarak isimlendirilebilir. Bir betonarme kirişte kemerlenme etkisi, küçük bir mesnet bölgesi dışındaki tüm bölgede aderansın çözülmesi ve çekme donatısındaki kuvvetin iki mesnet arasında açıklıktaki büyük değerine ulaşması ile ortaya çıkar.

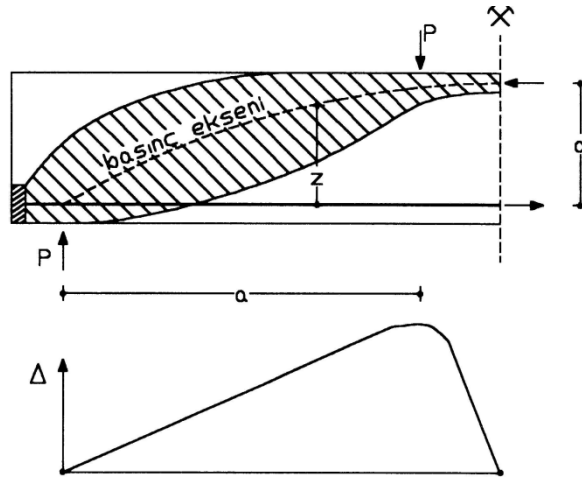


**Şekil 2.11.** Perçin etkisiyle taşınan kuvvet ile yer değiştirme ilişkisi (Celep, 1998)

Kesme kuvvetinin kemerlenme etkisi ile karşılanabilmesi Şekil 2.12’de gösterilen basınç ekseninin eğimine bağlıdır. Kayma açıklığının kiriş yüksekliğine oranı ( $a / d$ ) bu eğimin bir ölçüsü olarak anılabilir. Bu büyüklük aynı zamanda moment ve kesme kuvvetine bağlı olarak da ifade edilebilir:

$$a / d = V a / (V d) = M / (V d) \quad (2.28)$$

Bu şekildeki kemerlenme etkisinin olduğu kirişler taşıma gücünü değişik şekillerde kaybedebilir. Donatının mesnetlerdeki kenetlenmesinin çözülmesi veya donatının taşıma gücüne ulaşması sistemde kemerlenme etkisinin sona ermesine sebep olur.



**Şekil 2.12.** Kirişte kemerlenme etkisi ve donatının betona göre hareketi  $\Delta$  (Celep, 1998)



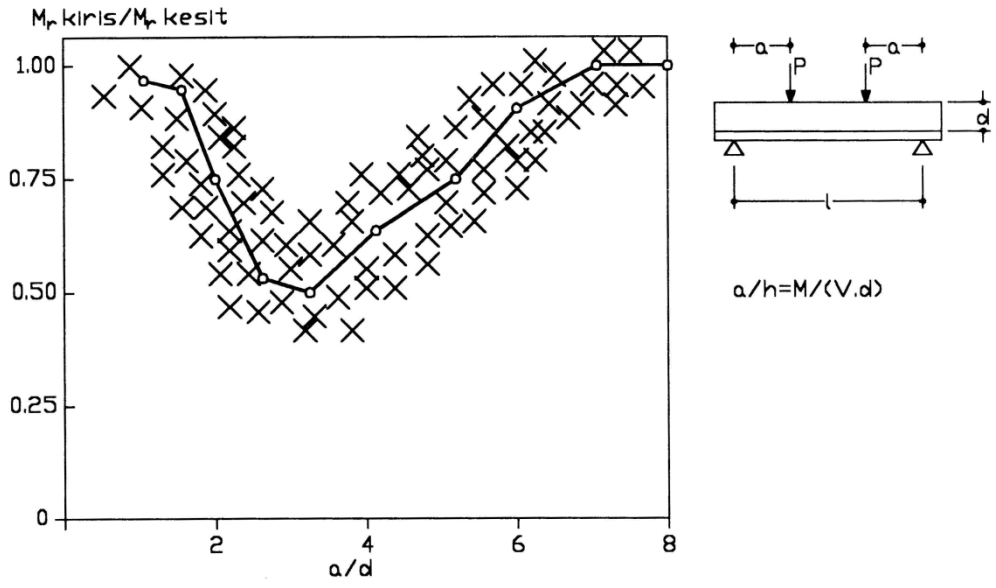
Şekil 2.13'te değişik açıklıktaki kirişlerin göçme momentleri kayma açıklığının kiriş yüksekliğine oranına bağlı olarak gösterilmiştir. Eğilme donatısına sahip olan fakat kayma donatısı bulunmayan kirişin eğilme ve kayma dayanımının gösterildiği bu şekilde farklı üç bölge görülmektedir.

1)  $a/d > 7$  ise ;

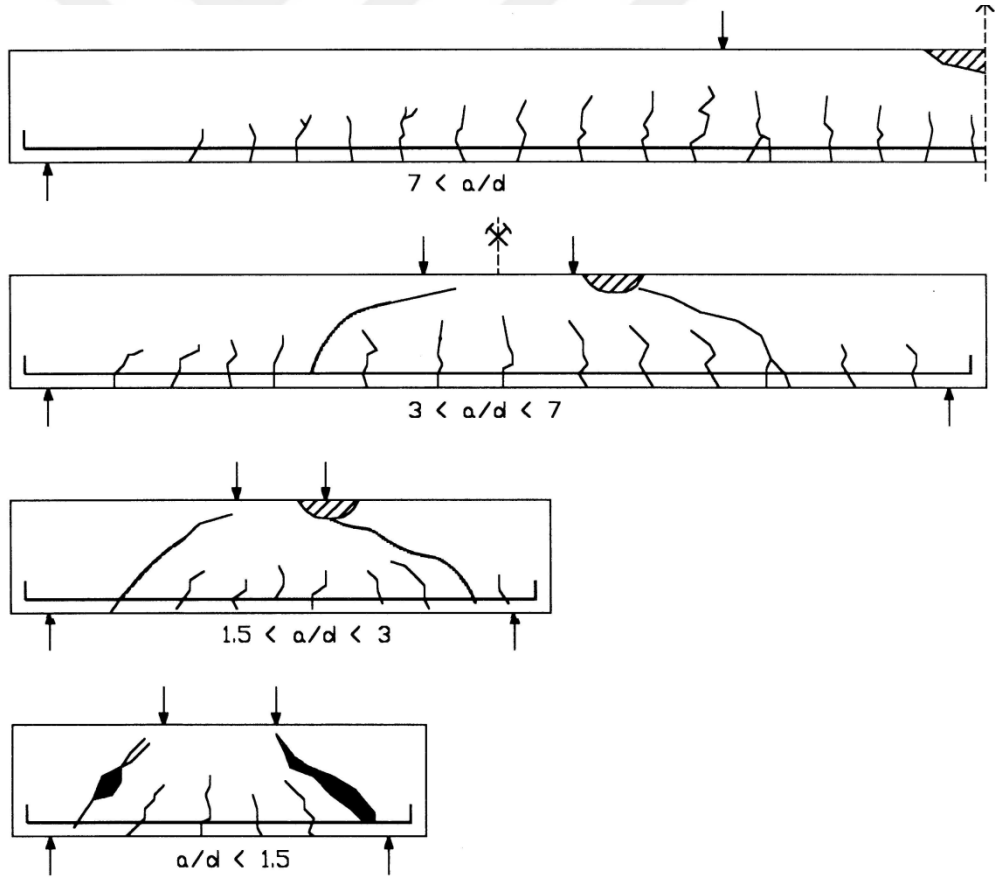
Kirişin göçmesi kesitin eğilme taşıma gücüne ulaşmasıyla oluşur. kayma açıklığı büyük olduğu için, küçük kesme kuvvetine karşılık büyük eğilme momenti meydana gelirken, oluşan eğilme çatlaklarının büyümesiyle kesit eğilme göçmesine erişir. Kesme kuvvetinin oluşturduğu eğik çekme gerilmeleri önemli değerlere ulaşmadığı için eğik çatlaklar kirişin göçmesinde etkili olmaz. Eğilme çatlaklarının ilerlemesi sonucu kirişte büyük yer değiştirmeler oluşur. sonuç olarak Şekil 2.14'te görüldüğü gibi basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle kiriş tamamen dayanım kaybeder. Göçme, büyük yer değiştirmelerden sonra olduğu için sünek ve önceden tahmin edilebilir türdendir.

2)  $3 < a/d < 7$  ise ;

Kayma açıklığı azaldığı için eğilme momenti artarken, kesme kuvveti de büyüyecektir. Yükün arttırılmasıyla eğilme çatlakları oluşurken, eğik çekme gerilmeleri kiriş gövdesinde önemli değerlere erişerek, çatlama sebepleri olur. Eğik çatlakların eğimi düşük olduğu için kemerlenme etkisinin yükün taşınmasında önemli katkısı olmaz. Göçme durumuna yakın eğilme çatlaklarından bir veya bir kaç ilerleyerek eğik çatlakla birleşir. Göçmeye betondaki eğik çatlaklar etkili olduğu için ve eğilme donatısında önemli düşey yer değiştirmeler oluşmadığı için göçme gevrek olup, habersiz olarak nitelendirilebilir. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi kiriş, kesitin eğilme dayanımına erişmeden göçer.  $a/d$  oranının küçülmesiyle kesme kuvvetinin etkisi eğilmeye göre önem kazandığından, eğik çekme gerilmelerine göre donatılmamış kirişin dayanımı kesitin eğilme dayanımına göre sürekli azalır (Rebeiz, 1999)



Şekil 2.13. Yükleme yerinin kirişin taşıma gücüne etkisi (Rebeiz, 1999)



Şekil 2.14. Güç tükenmesi durumunda kirişte çatlama biçimi (Celep, 1998)

3)  $1.5 < a/d < 3$

Kayma açıklığının daha da küçülmesi, eğilmeye ek olarak eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç bölgelerinin dikleşmesine ve kemerlenme etkisinin ortaya çıkmasına sebep olur. Eğik çatlağın varlığına rağmen yük beton basınç bölgesinde oluşan basınç çubuklarıyla iletilir. Yükün arttırılmasıyla beton basınç çubuklarında en büyük gerilmenin meydana geldiği bölge olan yükün uygulandığı noktada ezilme ortaya çıkarak kiriş göçer. Ezilme nedeniyle göçme ani olarak ortaya çıkmaz. Bu durumda kirişin taşıma gücü kesitin eğilme kapasitesine yaklaşır.

4)  $a/d < 1.5$

Kayma açıklığının küçülmesiyle kemerlenme etkisi önem kazanır. Kirişte güç tükenmesinde kesitin eğilme kapasitesi etkili olur. Kiriş, eğilme momenti kapasitesine erişirken yük, dolayısıyla kesme kuvveti büyük değerlere ulaşsa bile, kesme kuvveti yük ile mesnet arasında oluşan oldukça dik beton basınç çubuklarıyla mesnete iletildiği için kirişin dayanımına kesme kuvvetinin etkisi azdır. Bu durumda göçme, kesitin eğilme dayanımına erişildikten ve yapılan büyük düşey yer değiştirmelerden sonra yükü mesnete ileten beton basınç çubuğundaki ezilme ile ortaya çıkar. Kemerlenmenin kısmen veya tamamen ortaya çıktığı son iki durumda da çekme donatısının mesnetlerdeki kenetlenmesinin sağlanmaması ani ve önceden tahmin edilemeyecek bir göçme ortaya çıkarır.

Yukarıdaki açıklamalar çerçevesinde Şekil 2.13'te kayma açıklığının yaklaşık olarak  $1.5 < a/d = M / (V d) < 7$  olması durumunda gövdede oluşan eğik çekme gerilmelerinin meydana getirdiği çatlaklar nedeniyle kirişin taşıma gücüne eriştiği görülmektedir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi eğik çekme gerilmeleri kesitteki düşey ve yatay etkiyen kayma gerilmeleri ile yatay etkiyen normal gerilmenin asal gerilmesi olarak bulunabilir. Mukavemet formüllerinin kullanılması ve yapılan deney sonuçlarının değerlendirilmesiyle kirişin kesme kuvveti dayanımı, güvenli tarafta kalmak üzere,

$$V_{cr} = [ 0,41 f_{ctk} + 17 \rho V_d d / M_d ] b d < 0,86 f_{ctk} b d \quad (2.29)$$

şeklinde verilebilir. Burada  $V d / M \leq 1$  olmak üzere  $MPa$  ve  $m$  birimleri kullanılacaktır. Verilen ifade, kullanılan kabullerin karmaşıklığı ve deney sonuçlarının belirsizliği göz önüne alınarak

$$V_{cr} = 0,48 f_{ctk} b d \quad (2.30)$$

olarak basitleştirilebilir. TS500 de ise bu ifade

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctk} b d \quad (2.31)$$

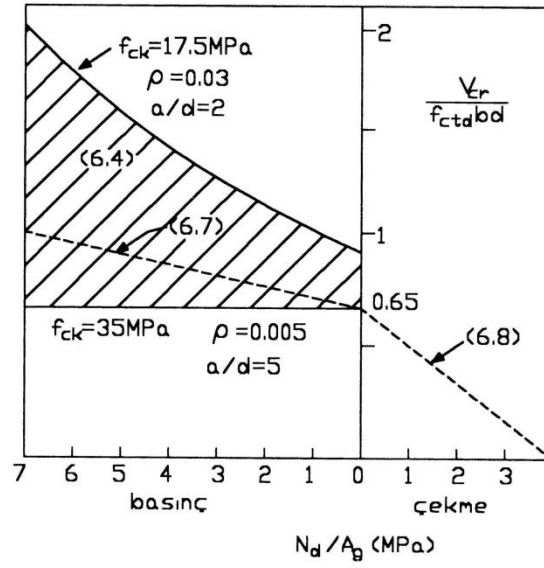
şeklinde verilmiştir.

Kayma donatısı bulunmayan elemanda kayma gerilmeleri oluşturan kesme kuvveti ve normal gerilmeler oluşturan eğilme momenti yanında ek olarak normal kuvvet de varsa, asal gerilme değerleri değişeceği için, taşınabilecek kesme kuvveti de değişir. Basınç normal kuvvet durumunda basınç asal gerilmesi artarken, çekme asal gerilmesi azalır, bu nedenle daha büyük kesme kuvveti beton tarafından karşılanabilir. Normal kuvvetin çekme olması durumunda basınç asal gerilmesi azalırken, çekme asal gerilmesi artar ve çekme çatlaması esas alınarak hesaplanan taşınabilecek kesme kuvveti değeri azalır. Bu durum aşağıdaki iki ifade ile verilebilir:

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctk} b d [ 1 + 0.07 N_d / A_g ] \quad N_d / A_g \text{ basınç (MPa)} \quad (2.32)$$

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctk} b d [ 1 - 0.03 N_d / A_g ] \quad N_d / A_g \text{ çekme (MPa)} \quad (2.33)$$

Çekme durumunda eğer brüt beton kesit alanı alınarak hesap edilen gerilme  $N_d / A_g > 0,5MPa$  ise betonun kesme kuvveti taşınmasına olan katkısı ihmal edilmelidir. Beton tarafından karşılanan  $V_{cr} / ( b d )$  ortalama kayma gerilmesine normal kuvvetin etkisini göz önüne alan (2.29) (2.32) (2.33) ifadeleri belirli bir kirişi kesiti için Şekil 2.15’de gösterilmiştir. şekilde taralı bölge donatı oranına bağlı olarak (2.29) dan elde edilmiştir. Görüldüğü gibi basınç durumunda (2.32) yaklaşık ifadesi, donatı oranını da göz önüne alan ve kayma açıklığına bağlı olan (2.29) ifadesinin bir ortalama değerini vermektedir. Çekme durumunda da karşılanabilecek ortalama gerilme daha kesin bir şekilde azalmaktadır.



**Şekil 2.15.** Beton tarafından karşılanan ortalama kayma gerilmesine normal kuvvetin etkisi (Celep, 1998)

### 2.2.2. Kayma donatılı kirişin davranışı

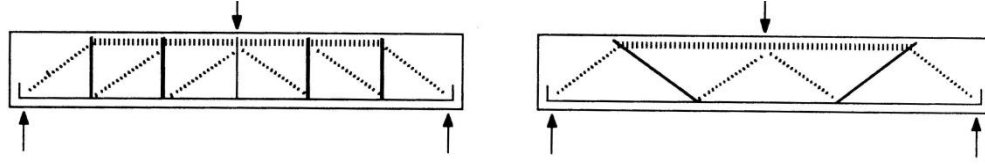
Uygulamadaki kirişlerin birçoğunda kesme kuvveti betonun karşılayacağından daha büyük değerde bulunur. Bu durumda en uygun yol, kesme kuvvetinden oluşan eğik çekme gerilmelerinin donatı ile karşılanmasıdır. İdeal kayma donatısı eğik çekme gerilmeleri yörüngesine yerleştirilen donatı olarak görülürse de, bu pratik değildir. Ayrıca bu yörüngeler her yükleme durumunda değişir. En çok rastlanan kayma donatısı boyuna donatıya dik olarak yerleştirilen enine donatılar ( etriyeler ) ve eğik çekme gerilmelerine bağlı olarak 45° eğimle yerleştirilen eğik donatılar ( pilyeler ) dir. Bazı durumlarda etriye yerine hasır donatılar da kullanılabilir. Sürekli kirişlerde kiriş açıklığında gerekmeyen boyuna donatıların kıvrılarak, kiriş üst tarafında ve mesnet kesitinde kullanılması ekonomi yönünden bazı durumlarda tercih edilir. Bu donatılardan kıvrım bölgesinde de kayma donatısı olarak faydalanılabilir. Pilye olarak isimlendirilen eğik donatılar etriyelere göre asal çekme gerilmeleri yörüngesinde bulunacağından daha etkili oldukları söylenebilir. Ancak, kirişte yayılı olarak bulunan asal çekme gerilmelerinin genellikle sayıları az olan pilyelerle karşılanması durumunda, yayılı etkinin belirli noktalarda toplanarak alınması ek bazı gerilmelerin çıkmasına sebep olur (Celep, 1998).

Etriyelerin kullanılmasının faydaları ise şu şekilde sıralanabilir:

- a) Eğik çekme gerilmelerinin kiriş eksenini boyunca yayılı olması nedeniyle, belirli aralıklarla düzgün yerleştirilen etriyeler, etkinin karşılanması bakımından uygundur.
- b) Eğik çekme gerilmeleri ile belirli açı yapan etriyeler kesme kuvvetinin işaretinin değiştiği durumda da uygundur.
- c) Etriyeler kiriş boyunca donatısını betona bağlayarak bunların kesme kuvvetinin karşılanmasındaki perçin etkisini arttırmırlar.
- d) Kesme kuvvetinin karşılanmasında ortaya çıkan beton basınç kuvvetleriyle beraber kafes sistem etkisi oluştururlar.
- e) Eğik çekme gerilmelerinden ortaya çıkan çatlakları sınırlayarak kesme kuvvetinin bir kısmının agrega sürtünmesi ile taşınmasını sağlarlar.
- f) Özellikle sık kullanılan etriye durumunda betonun yanal genişlemesini azaltarak betonun hem dayanımını ve hem de sünekliğini arttırmırlar.

Bu nedenlerle ve pilyelerin ek işçilik gerektirmesinden dolayı günümüzde pilye kullanımının eskiye göre azaldığı görülmektedir.

Betonarme kirişlerin kesme kuvveti taşımasındaki davranışı Mörsch tarafından ortaya atılan kafes sistem benzeşimi ile kolayca açıklanabilir. Buna göre betonarme kiriş eğilme momentinin işaretine göre başlıklarından biri çekme ve diğeri basınç taşıyan bir kafes kirişe benzetilir. Gövdedeki basınç köşegenleri 45° eğimli beton çubuklardan ve çekme çubukları da eğimi yerleştirilmeye bağlı olan donatılardan oluşur. Şekil 2.16'da bu durum yalnız etriye ile pilyelerin beraber kullanılması durumunda verilen statikçe belirli kafes sistemlerin üst üste getirilmesiyle kesme kuvvetinin taşınmasını temsil eden bir model hiperstatik kafes çubukları kirişin gövdesine yayılmış olarak ortaya çıkacaktır.



..... beton basınç çubukları

**Şekil 2.16.** Betonarme kirişte kafes sistem benzeşimi (Celep, 1998)

Şekil 2.17’de bir betonarme kirişte kesme kuvvetinin taşınmasında ortaya çıkan iç kuvvetler gösterilmiştir. Genel bir durum alınarak eğik donatıların eğimi  $\beta$  ile ve eğik beton basınç kuvvetlerinin eğimi  $\alpha$  ile gösterilmiştir. Düşey dengenin yazılmasından kesme kuvvetinin eğik donatı tarafından karşılanan kısmı

$$V_w = F_{cw} \sin \alpha = F_{sw} \sin \beta \quad (2.34)$$

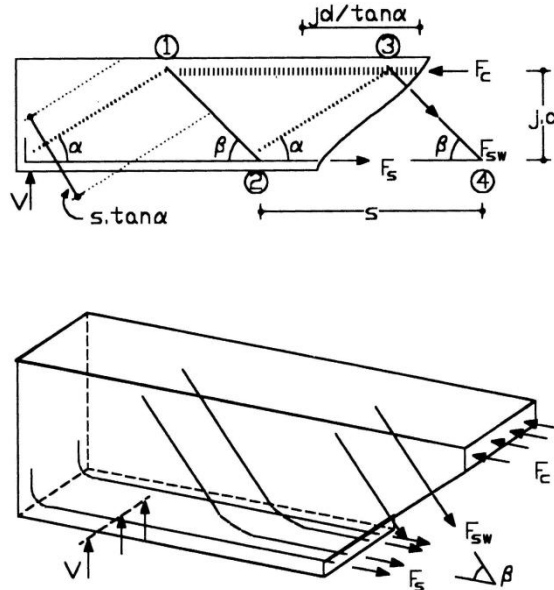
Olarak elde edilir. Burada  $F_{sw}$  eğik çatlak kesen donatılardaki çekme kuvvetinin bileşkesidir. Kiriş birim boyundaki eğik donatı kuvveti de  $F_{sw} / s$  olarak yazılabilir. Burada

$$s = jd ( \cot \alpha + \cot \beta ) \quad (2.35)$$

eğik donatıların kiriş eksen boyunca olan aralığını göstermektedir. Bu iki denklemin birleştirilmesiyle

$$V_w = F_{sw} j d \sin \beta ( \cot \alpha + \cot \beta ) / s = A_{sw} f_{ywd} j d \sin \beta ( \cot \alpha + \cot \beta ) / s \quad (2.36)$$

Elde edilir. Genellikle beton basınç çubuklarının  $45^\circ$  eğimli olduğu kabul edilir. Ancak deneyler bu eğimin kiriş boyunca değişken olduğunu göstermiştir. Enerji ilkelerinin kullanılmasıyla bu eğimin ortalama  $38^\circ$  civarında olduğu hesaplanmıştır. Çekme çatlaklarının eğiminin azalmasıyla çatlak tarafından kesilen eğik donatı sayısı da artacağından, yukarıdaki ifadenin incelenmesinden anlaşılacağı gibi, basınç çubuğunun eğiminin azalmasıyla, belirli kesme kuvveti daha az donatı ile karşılanabilir. Özellikle tekil yüklerin bulunduğu bölgelerde basınç çubukları dikleşir. Ancak, bu yerlerde kemerlenme etkisi önem kazandığı için kesitin kesme kuvveti kapasitesi oldukça artar.



**Şekil 2.17.** Kafes sistem benzeşiminde iç kuvvetler (Celep, 1998)

Genel olarak beton dayanımı yüksek ve kayma donatısı düşük olan sistemlerde, beton basınç çubukları  $45^\circ$  den daha eğik olarak belirir ve daha az kayma donatısı gerekir. Buna karşılık beton basınç dayanımının düşük olduğu kirişlerde ise, kesme kuvvetinin karşılanmasında donatının katkısına daha fazla ihtiyaç duyulur. Güvenli tarafta kalarak  $\alpha = 45^\circ$  kabul edilirse, ve  $j d \approx d$  yaklaşık eşitliği ile kiriş eksenine dik olan etriye durumunda ( $\beta = 90^\circ$ ) karşılanacak kesme kuvveti ile donatı alanı için

$$V_{ws} = d A_{sw} f_{ywd} / s \quad A_{sw} = V_{ws} s / (d f_{ywd}) \quad (2.37)$$

Bağıntıları elde edilir. Kesme kuvvetinin karşılanmasında  $\beta = 45^\circ$  eğimli pilyeler de kullanılabilir. Bu durumda (2.36) ifadesi benzer şekilde birleştirilirse,  $V_{wb}$  karşılanan kesme kuvveti olmak üzere

$$V_{wb} / d = \sqrt{2} A_{sw} f_{ywd} / s \quad (2.38)$$

Bulunur. Ancak, pilyelerin genellikle belirli sayıda olduğu için bu ifade kullanışlı değildir.

Kesme kuvvetinin belirli bir bölgesi esas alınarak bu ifade kiriş eksen boyunca integre edilirse,

$$\int V_{wb} dx / d = \sqrt{2} \int (A_{sw} / s) dx f_{ywd}$$



$$\int V_{wb} dx / d = \sqrt{2} A_{sb} f_{ywd} \quad (2.39)$$

Elde edilir. Burada  $A_{sb}$  göz önüne alınan kesme kuvveti bölgesindeki toplam pilye alanını ve  $\int V_{wb} dx$  bu bölgedeki kesme kuvveti değişiminin alanını göstermektedir. Örneğin, bu alanın Şekil 2.18'de olduğu gibi yamuk veya üçgen olması durumunda pilyelerle karşılanacak kesme kuvveti için

$$V_{wb1} = \sqrt{2} A_{sb} f_{ywd} d / (\beta l_b) \quad (2.40)$$

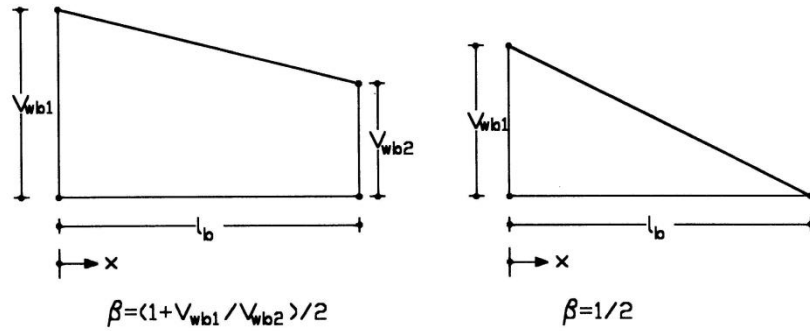
Yazılabilir. Burada  $l_b$  kesme kuvveti bölgesinin uzunluğu ve  $\beta$  kesme kuvveti değişim parametresi olup,

$$\beta = (l + V_{wb2} / V_{wb1}) / 2 \quad (2.41)$$

olarak hesaplanabilir. Değişim dikdörtgen olması durumunda  $\beta = 1,0$  ve üçgen olması durumunda  $\beta = 0,5$  değerinde olur. Pilyelerin sayılarının etriyelere göre az olması nedeniyle etkinlikleri etriyelere göre düşüktür. Bu sebepten (2.40) ifadesinin

$$V_{wb1} = A_{sb} f_{ywd} d / (\beta l_b) \quad (2.42)$$

şeklinde güvenli tarafta kalarak kullanılması önerilir.



**Şekil 2.18.** Pilyelerle karşılanan kesme kuvveti değişimi (Celep, 1998)

Yukarda verilen ifadelerde donatı gerilmesinin akma gerilmesine eriştiği kabul edilmiş, yani güç tükenmesi durumu göz önüne alınmıştır. Benzer ifadeler belirli kesme kuvvetine karşı gelen kayma donatısındaki gerilmenin hesaplanmasında da kullanılabilir. Bulunacak gerilme kesme kuvvetine doğrusal bağlı olarak değişecektir.

Şekil 2.19’da bu bağıntı gösterilmiştir. Aynı şekilde deneylerde ölçülen donatı gerilmelerinin değişimi de verilmiştir. Görüldüğü gibi eğik çatlamanın ortaya çıkmasına kadar donatı gerilmesi oldukça düşük kalmaktadır. Bu duruma kadar kesme kuvvetinin önemli bir kısmı beton tarafından taşınmaktadır. Çatlama sonrası donatıdaki gerilme artışı kafes sistem benzeşimine uygun olmakta ve iki değişim birbirine paralel seyretmektedir. Aradaki fark daha önce kayma donatısı bulunmayan kirişin davranışında açıklandığı gibi, eğik çatlak fazla açılmadığı durumlarda, çatlak boyunca ortaya çıkan agrega sürtünmesinin kesme kuvvetinin taşınmasına katkısından oluşmaktadır. Özellikle donatı kullanıldığı durumda, çatlak açılması sınırlandırıldığından, bu katkı önemli olur. Bu durumda kesme kuvvetinin beton kesit tarafından ve donatı tarafından olmak üzere

$$V_d = V_c + V_w \quad (2.43)$$

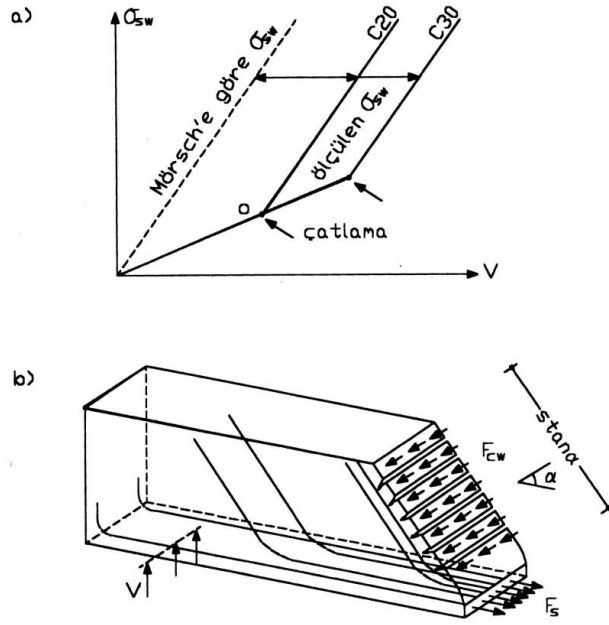
İki kısım halinde taşınabileceği söylenebilir. Beton tarafından karşı konulacak kısım  $V_c$  olarak da

$$V_{cr} = 0,65 f_{ctd} b d \quad (2.44)$$

Çatlama kesme kuvveti yerine biraz güvenli tarafta kalarak aşağıdaki değerin alınması önerilir:

$$V_c = 0,80 V_{cr} \quad (2.45)$$

Şekil 2.19’da görüldüğü gibi kafes benzeşiminde donatı tarafından karşılanan çekme çubukları yanında, beton tarafından karşılanan basınç çubukları da mevcuttur. Basınç çubuklarının taşıma kapasitesinden yola çıkarak taşınabilecek kesme kuvveti için bir üst sınırın belirlenmesi gerekli olur.



**Şekil 2.19.** Kesme kuvvetinden oluşan a) eğik donatı çekme gerilmeleri, b) eğik beton basınç gerilmeleri (Celep, 1998)

Bu amaçla sadece etriyelerin bulunduğu ( $\beta = 90^\circ$ ) bir kirişte, beton basınç çubuklarının  $\alpha = 45^\circ$  eğimle  $s \tan \alpha$  genişlikte bulunduğu ve  $s \approx d$  olduğu göz önüne alınarak

$$V_{kmax} = F_{cw} \sin \alpha \quad F_{cw} = s \tan \alpha b f_{ck} \quad (2.46)$$

Yazılabilir. Burada beton basınç çubuklarının taşıma güçleri esas alınmıştır. İfadelerin birleştirilmesiyle ve açılar için ilgili değerler kullanılarak

$$V_{kmax} = 0,50 b d f_{ck} \quad (2.47)$$

Bulunur. Malzeme dayanım azaltma katsayısını ve yük katsayısını eşit kabul ederek, bulunan karakteristik değerlerden hesap değerlerine geçilebilir:

$$V_r \leq V_{rmax} = 0,50 b d f_{cd} \quad (2.48)$$

Bu ifadenin değerlendirilmesinde;

- a) Beton basınç çubuklarının aksel basınç yanında eğilme donatısındaki çekme kuvvetinde meydana gelen değişiklikten dolayı ikinci dereceli de olsa bir eğilme momenti ile zorlandığı

- b) Etriyeler doğrultusundaki çekme kuvvetlerinden dolayı beton basınç çubuklarının biri basınç diğeri çekme olan iki eksenli gerilme zorlaması altında olduğu ve bulunan çekme gerilmesinin basınç dayanımını önemli derecede düşüreceği
- c) Kafes sistem benzeşiminde söz konusu edilen düğüm noktalarında beton basınç gerilmelerinin düzgün bir şekilde yayılmayacağı ve bazı dış merkezlikler olacağı
- d) Beton basınç çubuklarının 45° den daha eğik olacağı ve bu suretle basınç değerlerinin artacağı düşünülürse, bir azaltmanın yapılması gerektiği ortaya çıkar.

TS500 de donatı ile taşınabilecek en büyük kesme kuvveti için

$$V_r \leq V_{r \max} = 0,25 b d f_{cd} \quad (2.49)$$

İfadesi verilmiştir.

Etriyelerin kendilerinden beklenen fonksiyonu yapmaları için uçlarının uygun şekilde kenetlenmeleri sağlanmalıdır. Eğik çatlak, etriyenin boyundaki herhangi bir noktada ortaya çıkabilir. Bir etriye boyunca akma dayanımına erişebilmesi için bunların boyuna donatılarının üzerinden kıvrılmaları ve betona kenetlenmelerinin sağlanması gerekir.

Etriyenin yeterli olmaması durumunda, etriyenin akması sonucu eğik çatlaklar genişlemekte ve kesme kuvvetinin bir bölümünün taşındığı agrega sürtünmesi ortadan kalkmaktadır. Böyle bir durumda sünek olan eğilme güç tükenmesinden önce, sünek olmayan kesme kuvveti dayanımına erişir. Bu tür sünek olmayan göçmeyi önlemek için, elemanın kesme kuvveti kapasitesine ( etriyelerin akmasına ) erişmeden, eğilme momenti kapasitesine erişilmesi tavsiye edilir. Bu amaçla, donatı tarafından alınan kesme kuvvetinin, kirişin gövdesinde kayma çatlakları ortaya çıkmaksızın karşılanan kesme kuvvetinden büyük olması istenir. Donatı tarafından alınması gerek kesme kuvveti beton kalitesi arttıkça artacaktır. Ancak, donatı kalitesi artırılarak gerekli donatı alanı azaltılabilir. Bu düşünceye uygun olarak TS500 de minimum etriye donatısı oranı için aşağıdaki bağıntı verilmiştir:

$$\text{Min } \rho_w = 0,30 f_{ctd} / f_{ywd} \leq \rho_w = A_{sw} / ( b s ) \quad (2.50)$$

Herhangi bir kiriş veya kolonda kayma hesabına esas alınan eğilme momenti ve kesme kuvveti, arttırılmış yüklemeler esas alınarak ve taşıyıcı sistemin statik çözümüyle yapılarak bulunur. Tam bu değerlere uygun boyutlama yapıldığında, öngörülen yükleme altında elemandaki eğilme ve kayma donatıları akmaya erişir. Ancak, özellikle eğilme hesabında kesitlere konstrüktif nedenlerle eğilme hesabına öngörülenden daha fazla donatı konulabilir. Bu durumda elemanın eğilme momenti kapasitesi kesme kuvveti kapasitesinin üzerine çıkar. Böyle bir eleman, eğilme kapasitesi düzeyinde yüklenirse, hesap kuvvetinden daha büyük bir kesme kuvveti oluşacağından, eğik çekme gerilmelerinin büyümesiyle gevrek bir şekilde göçer. Bu durumun önlenmesi için, elemanın uçlarındaki eğilme momenti kapasiteleri esas alınarak karşı gelen kesme kuvvetine göre kayma donatısının hesaplanması önerilir. Yapılarda aşırı yüklemenin deprem etkisinde olduğu kabul edilirse, Şekil 2.20'den süneklik düzeyi yüksek kirişin tasarım kesme kuvvetinin aşağıdaki gibi hesaplanması gerekir.

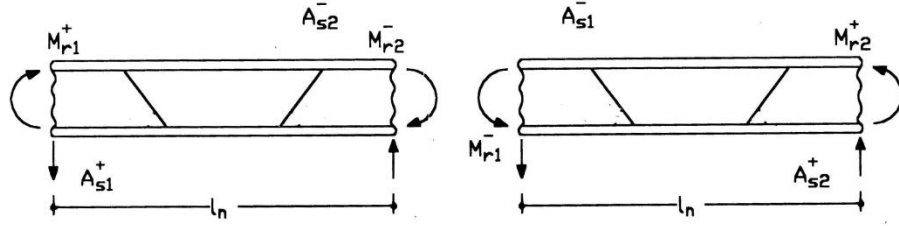
$$V_d = V_{dy} + 1.4 ( M_{r1}^+ + M_{r2}^- ) / l_n$$

$$V_d = V_{dy} + 1.4 ( M_{r1}^- + M_{r2}^+ ) / l_n \quad (2.51)$$

Burada  $V_{dy}$  karşı gelen yükleme durumunda düşey yüklerden mesnetlerde oluşan basit kiriş kesme kuvvetidir. Donatının pekleşmesi göz önüne alınarak kesit kapasiteleri % 40 arttırılmıştır. Kesitlerin pozitif ve negatif eğilme momenti kapasiteleri için

$$M_r = A_{s\ mevcut} f_{yd} \times 0,9 A_{s\ mevcut} f_{yd} d \quad (2.52)$$

İfadesi kullanılabilir. Burada kesitteki çekme ve basınç kuvvetleri arasındaki uzaklık yaklaşık olarak  $0.9 d$  kabul edilmiştir (Celep, 1998). Kayma kuvveti hesabında da donatı hesap gerilmesi kullanılacağı göz önünde tutularak donatı karakteristik gerilmesi kullanılmamıştır.



**Şekil 2.20.** Kesme kapasitesi esas alındığında kesme kuvvetinin bulunması (Celep, 1998)

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

Çalışmanın bu bölümünde TS 500 standardındaki hükümler esas alınarak hazırlanan kirişin tasarımına yer verilmiştir. Deney numunelerinde kesme donatısı olarak kullanılacak çelik ve geogrid malzemelerinin kapalı etriye ve helezonik uygulamaları açıklanmıştır. Daha sonra deney öncesi hazırlıklar, kullanılan malzemeler, deney düzenekleri ve aletleri ile deney verilerinin değerlendirilmesi gibi konularda açıklamalar yapılmıştır.

#### **3.1. Malzeme Özellikleri**

Bu kısımda deney numunelerinde kullanılan beton, çelik donatı ve geogrid malzemelerinin mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir.

##### **3.1.1. Beton**

Deney numunelerinin beton dökümü aynı günde uygun hava şartlarında yapılmıştır. Döküm işlemi beton santrali tarafından gönderilen bir transmikser yardımı ile titizlikle yapılmıştır. Beton dökümü sırasında dayanımını tespit etmek amacıyla 9 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler alınarak kiriş deneyleriyle aynı günde test edilmiştir. Beton dökümüne hazır hale getirilen donatı kafesleri Şekil 3.1'deki kalıplar içerisine yerleştirilerek döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.1.** Beton dökümüne hazır kiriş numuneleri

Beton dökümü sırasında alınan küp numunelerin basınç dayanımları Şekil 3.2'deki gösterilen ELE marka yükleme cihazında teste tabi tutulmuştur.



**Şekil 3.2.** Beton dayanımının tespit işlemi

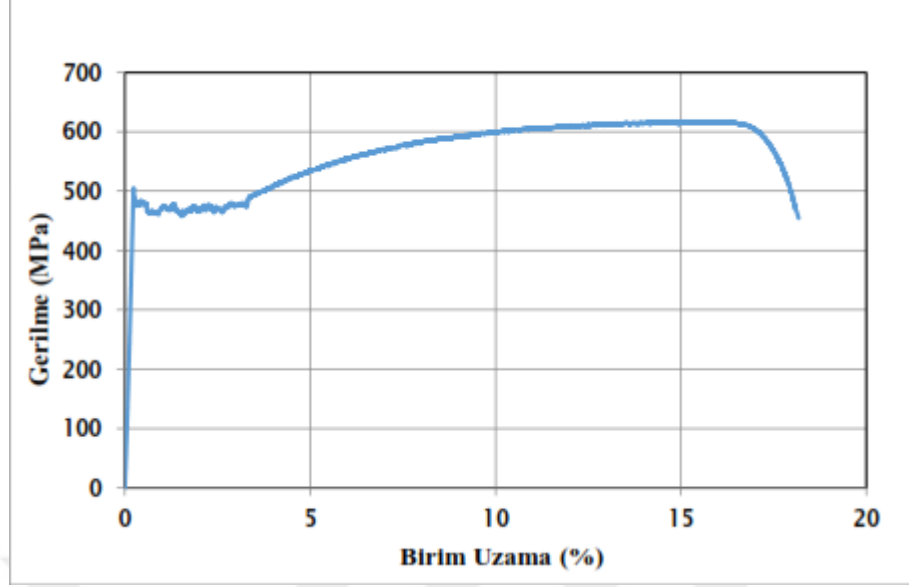


### 3.1.2. Çelik donatı

Kiriş numunelerinde kullanılan tüm donatılar S420 dayanım sınıfında olmak üzere, bir üretimden ve tek seferde alınmıştır. Kirişlerde kullanılan çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için 8, 12 ve 16 mm çapındaki nervürlü donatılardan üçer adet numune alınıp 50 cm boyunda kesilerek çekme aletinin 10 cm alttan ve 10 cm üstten çene boyları da göz önünde tutularak çekme mesafesinin 30 cm olması sağlanmıştır ( Şekil 3.3 ). Çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçların gerilme – şekil değiştirme grafiği Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Akma ve kopma anındaki gerilme ve uzama değerleri ise Tablo 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Çelik donatı çekme deneyi



Şekil 3.4. Çelik donatı gerilme – birim uzama grafiği

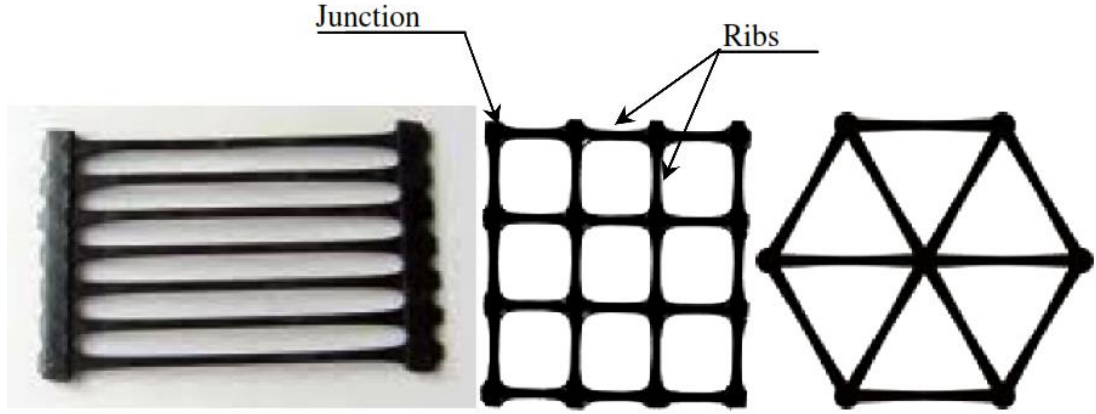
Tablo 3.1. Çelik donatının mekanik özellikleri

| Malzeme Cinsi | Akma Dayanımı (MPa) | Kopma Dayanımı (MPa) | Akmadaki Uzama (mm / mm) | Kopmadaki Uzama (mm / mm) | Elastisite Modülü (MPa) |
|---------------|---------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Çelik Çubuk   | 505,38              | 617,34               | 0,00235                  | 0,18                      | $2,15 \times 10^5$      |

### 3.1.3. Geogrid

Geogrid malzemesi genellikle zemin iyileştirmelerinde kullanılan geosentetik çatsı altındaki önemli ürünlerden biridir. Bunun yanında istinat duvarlarını, yolların veya yapıların zeminlerini güçlendirmek için de kullanılır.

Geogridler polyester, polipropilen ve polietilen gibi polimerlerden oluşur (Shukla, 2002). Açıklık şekli ve şerit yönleri açısından değerlendirildiklerinde üç çeşit geogrid vardır (Şekil 3.5).

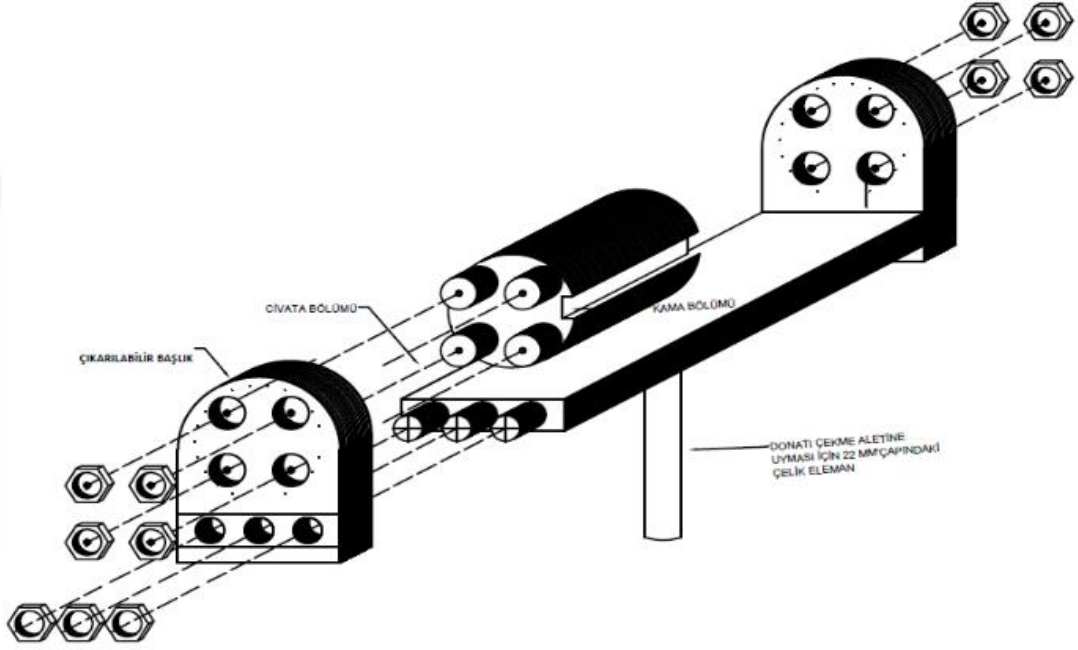


Şekil 3.5. Çeşitli geogrid modelleri (Maxwell, 2005)

Tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli geogridler mevcuttur. Tek eksenli geogridler esas olarak zemin iyileştirmelerinde örneğin; dik yamaçlar ve istinat duvarlarında kullanılırken iki eksenli geogridler yollarda titreşimi karşılamak için kullanılır (Webster, 1993). Üç eksenli geogridler diğer iki malzemeye karşılaştırıldığında yeni bir üründür. Özellikle zemin stabilizasyonunda ve güçlendirme uygulamalarında iki eksenli geogridler üzerinde yapılan çalışmalar iki eksenli geogridlerin farklı yönlerde çekme gerilmesine maruz kaldıklarında üniform bir davranış sergileyemediklerini göstermiştir. (Maxwell, 2005). Bu yoksunluk üç eksenli geogridlerin doğmasına öncülük etti. Geogridler mükemmel kimyasal direnç sağlayan malzemelerdir. Bu durum kemerler gibi mimari elemanlarda ve beton örtüsünün yeterli olmadığı ve bundan dolayı yüksek korozyon direnci arzu edilen ince kesitlerde geogridleri çelik donatılara alternatif duruma getirir. Geogridlerin etriye olarak kullanılması geleneksel yapı çeliğine göre daha kolay uygulanan, daha az işçilik gerektiren ve ayrıca daha etkili bir çözüm getirebilmektedir. Esasen geogridler geleneksel çelikler kadar rijit bir eleman değildir fakat yalnızca eğilme ve kesmeye karşı değil aynı zamanda daha etkili bir sargılama için başka bir alternatif olarak düşünülebilir. Deney sonuçları geogridlerin uygun kullanıldıklarında çatlama sonrası uzama kapasitesinde artma ve gevrek kırılmada azalma meydana getirdiğini ortaya koymuştur (Tang, 2008).

Geogrid malzemesinin kullanım miktarına laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler neticesinde dayanım ve şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak karar verilmiştir. Söz konusu deneyler sonucunda elde edilen verilerle 8 mm çelik donatının dayanım değerine karşılık gelen geogrid miktarı deney numunelerine uygulanmıştır.

Deneyleeri gerçekleştirebilmek için donatı çekme aletinden faydalanacak şekilde bir aparat yerleştirilmiştir. Bu aparatın detayları Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Donatı ekme aletine yerleştirilen geogrid çekme aparatı

Geogrid malzemesinin u kısımlarının çekme deneyi sırasında hasar görmemesi için aparat üzerinde bulunan kamaların içerisine yerleştirilir ve deney esnasında düzenekten sıyrılıp çıkması için 2 tur silindire sarılır. Aparata kaynatılmış 22 mm çapındaki demir eleman donatı çekme aletinin çenelerine yerleştirilip çekme deneyi gerçekleştirilir.

Bu çalışmada tek yönlü polyester örgülü geogrid hazır olarak fabrikadan temin edilmiştir. Geogridin mekanik zellikleri ASTM D6637/D6637M – 15 ve ASTM D4595 – 11 standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Bu yönetmeliklerde ifade edilen iki yöntem de test edilmiştir. ASTM D4595 – 11 standartına göre 200 mm genişliğinde 3 adet geogrid numune hazırlanmıştır (Şekil 3.7). Hazırlanan bu numuneler Şekil 3.8’de gösterilen şekilde deney düzeneğine sabitlenerek çekme işlemi gerçekleştirilmiştir. Her iki standarda göre de gerçekleştirilen deneylerde, geogrid malzemesinin sadece makine yönündeki mekanik özellikleri incelenmiştir.

Numunenin deney sırasında tüm kesitte eşit gerilme alabilmesi için düzeneğe oldukça hassas bir şekilde yerleştirilmiştir. Deneyin daha doğru sonuçlar verebilmesi için deney hızı 6 mm/dk olarak ayarlanmıştır.

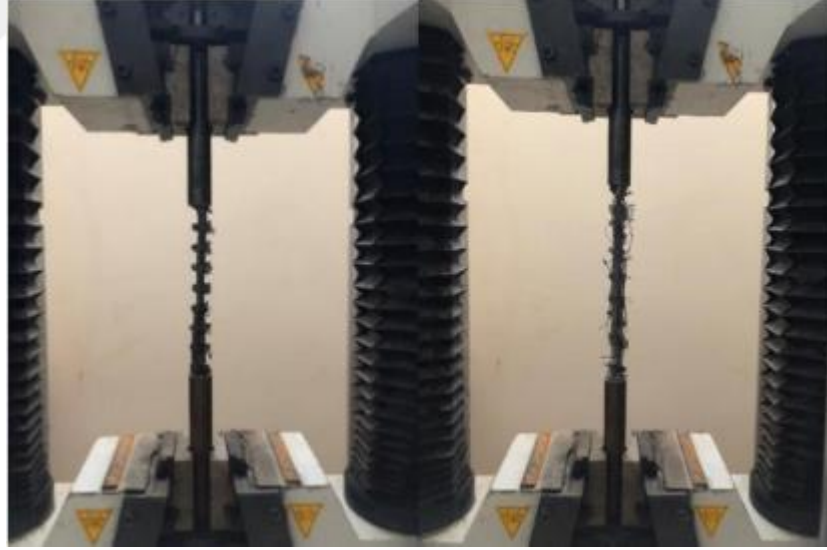
ASTM D6637/D6637M – 15 standardı dikkate alınarak yapılan deneyde ise 7 dış geogrid parçası katlanarak uçları çelik boruların içine epoksi ile sabitlenmiştir. Borular, donatı çekme aletinin çenelerine yerleştirilerek çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Her iki deneyden de elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın bulunmuş fakat, ASTM D4595 – 11 yöntemi ile elde edilen verilerin hatalı olabileceği öngörüldüğünden, ASTM D6637/D6637M – 15 standardında belirtilen yöntemden elde edilen veriler kullanılmıştır. Bu standarda göre elde edilen sonuçların kuvvet – birim uzama grafiği Şekil 3.10’da gösterilmiş olup, deney numunelerinin ortalama kopma yükleri kN/m cinsinden Tablo 3.2’de belirtilmiştir. ASTM D4595 – 11 standardına göre gerçekleştirilen deneyde geogrid numuneler 200 mm şeritler halinde hazırlanmış ve çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Buradan okunan değerler 1 m değerine uyarlanmış ve bu nedenle deney numunelerinin ortalama kopma yükleri kN/m cinsinden ifade edilmiştir.



**Şekil 3.7.** Çekme deneyi için hazırlanmış geogrid numunesi

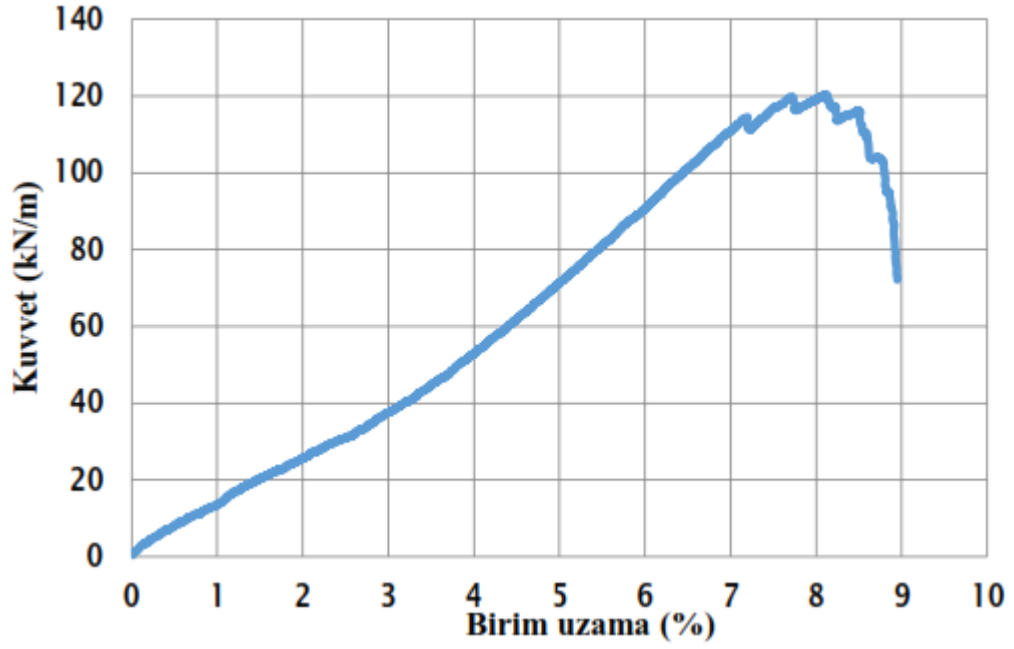


**Şekil 3.8.** ASTM D4595 – 11’ e göre gerçekleştirilen geogrid çekme deneyi



**Şekil 3.9.** ASTM D6637/ D6637M – 15’ e göre gerçekleştirilen geogrid çekme deneyi





Şekil 3.10. Geogrid malzemesinin kuvvet – birim uzama grafiği

Tablo 3.2. Geogrid malzemesinin mekanik özellikleri

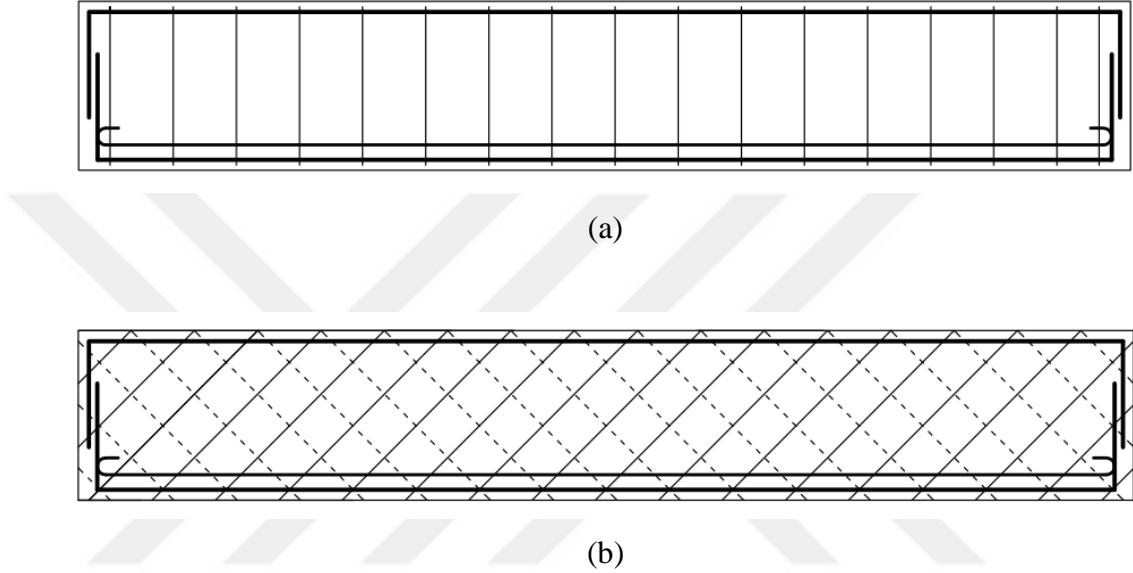
| Malzeme Cinsi | Kopma Dayanımı (kN / m) | Kopmadaki Uzama (mm / mm) |
|---------------|-------------------------|---------------------------|
| Geogrid       | 120,304                 | 0,0812                    |

### 3.2. Deney Numunelerinin Tasarımı

Yapılan deneylere göre numunelerde kullanılacak çelik donatı ve geogridin mekanik özellikleri belirlenmiş ve numunelerin tasarımında bu sonuçlar dikkate alınmıştır. Numunelerde kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 3.3'te gösterilmiştir. Tabloda malzemelerin akma dayanımları, kopma dayanımları, akmadaki yüzdesel uzama miktarı ve kopmadaki yüzdesel uzama miktarı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Böylece kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri karşılaştırılmış ve yapısal davranışları daha belirgin bir şekilde öngörülebilmiştir.

**Tablo 3.3.** Çelik ve geogrid malzemelerinin mekanik özellikleri

| Malzeme Cinsi | Akma Dayanımı | Kopma Dayanımı | Akmadaki Uzama % | Kopmadaki Uzama % |
|---------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|
| Geogrid       | -             | 120,304 kN/m   | -                | 8,12              |
| Çelik         | 505,38 MPa    | 617,34 MPa     | 0,235            | 18,17             |



**Şekil 3.11.** Geleneksel (a) ve helezonik (b) sargılama detayı

TS 500 standardına göre tasarlanan kirişler 250x400 mm en kesit ölçülerine sahiptir. Deney numunelerinin tamamında basınç ve çekme çubukları sayısı aynı olmak üzere, kullanılan enine donatı farklılık göstermektedir. Geleneksel olarak sargılanan yani 90° açıyla sarılanmış numuneler 150 mm aralıklarla uygulanmıştır. Bir adet geogrid ve bir adet çelik donatı olmak üzere iki adet numune bu şekildedir. Böylece deney sonuçlarına göre geleneksel yöntemle sargılanmış çelik ve geogrid malzemelerinin karşılaştırmaları yapılmış olacaktır. 2 adet  $\phi 12$  basınç donatısı, 6 adet  $\phi 16$  ve 2 adet  $\phi 12$  çekme donatısı olmak üzere bütün numunelerdeki donatı oranı sabit tutulmuştur. Şekil 3.12’de hazırlanan kiriş numunelerinin en kesiti gösterilmektedir.

Bu bilgiler dâhilinde kirişin moment taşıma kapasitesi TS500’e göre Doğangün (2014) tarafından önerilen excel tablosuyla hesaplanmıştır.



$$F_c = F_s \rightarrow k_1 f_{cd} b_w a = A_s f_{yd} \rightarrow a = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{k_1 \cdot f_{cd} \cdot b_w} \rightarrow a = \frac{1520 \cdot 365}{0,82 \cdot 20 \cdot 250} = 135,32 \text{ mm}$$

Taşıma gücü momenti ;

$$M_r = A_s \cdot f_{yd} \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \rightarrow M_r = 1520 \cdot 365 \left(362,5 - \frac{135,32}{2}\right) = 163,6 \text{ kNm}$$

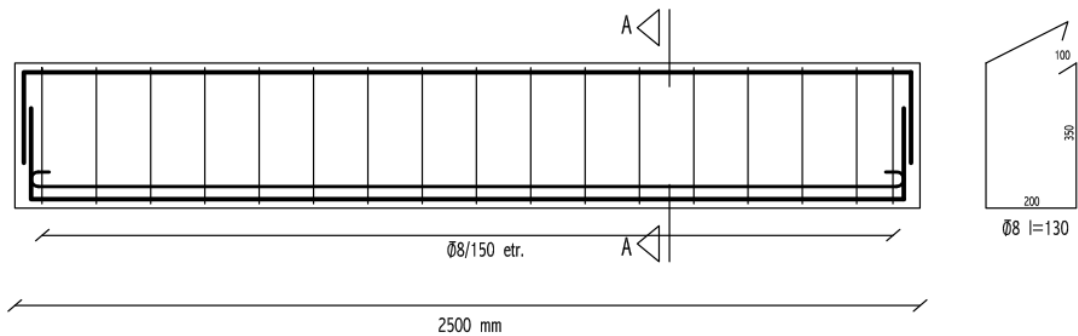
### 3.2.1. Kirişlerde kapalı etriye ve helezonik etriye uygulaması

Kirişlere geleneksel etriye olarak bir adet çelik donatıdan bir adet de geogrid malzemesinden olmak üzere iki adet numune hazırlanmıştır. Diğer deney numuneleri çekme çubuklarıyla 30°, 45°, 60° açı yapmak suretiyle kirişin bir ucundan başlanıp diğer ucuna kadar kesintisiz bir şekilde aynı adım aralıklarıyla uygulanmıştır. Bununla beraber bir adet kesme donatısı olmayan kiriş numunesi olmak üzere toplamda 6 adet kiriş numunesi deneye tabi tutulmuştur.

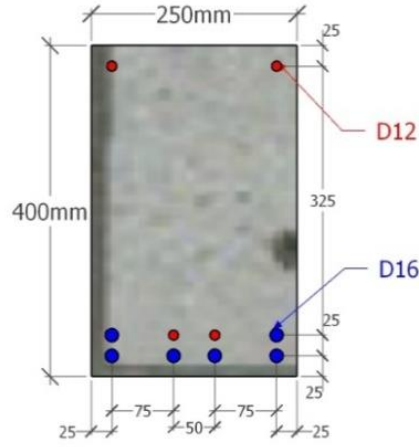
Enine donatı olarak 8 mm çapında ve 620 MPa yaklaşık kopma dayanımına sahip çelik donatı kullanıldığı göz önüne alınarak, geogrid malzemesi de aynı kopma kuvvetine denk gelecek şekilde tasarlanıp uygulanmıştır.

### 3.2.2. Çelik etriye

Çelik sargı donatısı olarak kullanılacak  $\Phi 8$  donatı fabrikadan 12 m boyunda düz bir şekilde sipariş edilmiş ve Şekil 3.12’de gösterilen ölçülerde bir etriye bükme kolu yardımıyla hazırlanmıştır. Çelik etriyenin numuneye uygulanmış hali Şekil 3.14’te gösterilmektedir. Enine donatı uygulanmamış numune ise Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kiriş numunelerindeki donatı düzeni 1



Şekil 3.13. Kiriş numunelerindeki donatı düzeni 2



Şekil 3.14. SH-S90 numunesi kafes düzeni



Şekil 3.15. SH-N numunesi kafes düzeni

### 3.2.3. Geogrid etriye

Geogrid malzemesi iki dış sırası olmak üzere üst üste katlanarak kiriş numunesi boyunca kesintisiz bir şekilde geleneksel numune hariç, sarmal olarak uygulanmıştır. Geleneksel sargılanmış numunede kullanılan malzemede ise etriye adım aralıklarına sadık kalarak Şekil 3.16'deki gibi her bir donatı çubuğuna plastik kelepçeler yardımıyla sabitlenerek uygulanmıştır. Sarmal olarak uygulanan diğer numuneler ise aşağıdaki gibi Şekil 3.17, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'de gösterilmiştir.



Şekil 3.16. SH-G90 numunesi kafes düzeni



Şekil 3.17. SH-G30 numunesi kafes düzeni



Şekil 3.18. SH-G45 numunesi kafes düzeni



Şekil 3.19. SH-G60 numunesi kafes düzeni

### 3.3. Deney Düzenegi

Deneyleyler, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Yükleme sistemi için kullanılan araçlar aşağıda Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



**Tablo 3.4.** Deney Sisteminde Kullanılan Aletler

| Malzeme Adı       | Kullanım amacı | Marka   | Kapasite / Özellik      |
|-------------------|----------------|---------|-------------------------|
| Hidrolik Silindir | Yük uygulama   | ENERPAC | 60 ton / İtme ve çekme  |
| Yük Hücresi       | Yük ölçümü     | CAS     | 100 ton / İtme ve çekme |

Deneyle, laboratuvarıda bulunan mesnetlerin kiriş ölçülerine göre açıklıklarının ayarlanması ve numunenin üzerine eşit yük dağılımı sağlanması amacıyla koyulan çelik profil yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği, Şekil 3.20’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.20.** Eğilme deneyi düzeneği

SH-N, SH-G30, SH-G45, SH-G60, SH-G90 ve SH-S90 deney düzenekleri de sırasıyla Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26’da gösterilmiştir.



**Şekil 3.21.** SH-N numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği



**Şekil 3.22.** SH-G30 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği



Şekil 3.23. SH-G45 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği



Şekil 3.24. SH-G60 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği





Şekil 3.25. SH-G90 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği



Şekil 3.26. SH-S90 numunesinin yükleme ve ölçüm düzeneği

### 3.3.1. Ölçüm ve veri toplama sistemi

Veri toplama bölgelerinin seçiminde, yükleme sırasında kırışte oluşabilecek muhtemel eğik eğilme çatlaklarını içine alan bölgeler hedeflenerek deplasman ölçerler yerleştirilmiştir. Bu ölçümlerde elde edilen değerler eş zamanlı olarak veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Yer değiştirme ölçerlerden (D) altı tanesi çatlak genişliklerini ölçmek üzere kırışin üzerinde belirlenen noktalara her deneyden önce sabitlenmiştir. Yük ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için ise hidrolik silindir ile yükün kırışe aktarılmasına olanak tanıyan çelik profil arasına yük hücresi yerleştirilmiştir. Yük seviyesinin ayarlanması için de hidrolik pompalara bağlı manometlerden basınç seviyesi okunmuştur. Kırışin üzerine donatılardaki birim şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla gerinim pulları (GP) beton dökümünden önce belirlenen noktalara yapıştırılmış ve bunların değerleri de deney esnasında eş zamanlı olarak bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Kullanılan ölçüm ve veri aktarma cihazlarının özellikleri Tablo 3.5'te listelenmiştir.

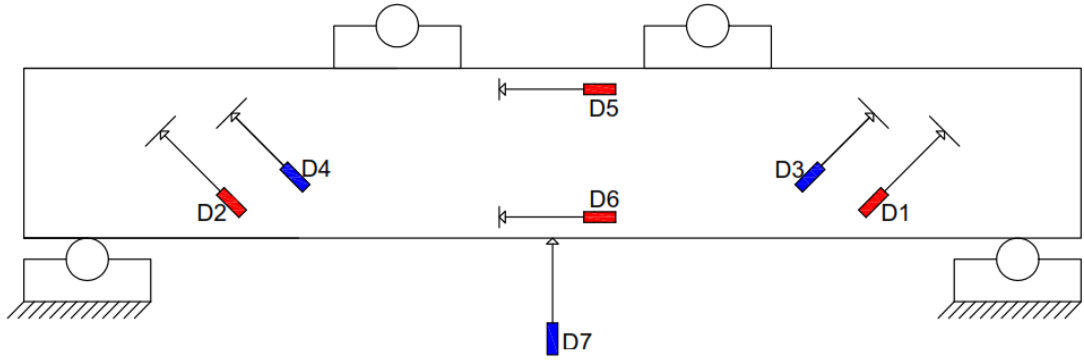
**Tablo 3.5.** Ölçüm ve veri toplama cihazlarının listesi

| Malzeme Adı                           | Kullanım Amacı                                    | Marka    | Kapasite / Özellik |
|---------------------------------------|---|----------|--------------------|
| Yer Değiştirme Ölçer (D1, D2, D5, D6) | Çatlak Genişliği Ölçümü                           | OPKON    | 100 mm             |
| Yer Değiştirme Ölçer (D3, D4, D7)     | Çatlak Genişliği Ölçümü                           | OPKON    | 50 mm              |
| Veri Aktarma Cihazı                   | Dijital Verilerin Bilgisayar Ortamında Saklanması | Test Box | 16 Kanal Girişi    |

### 3.3.2. Yer değiştirme ölçerler

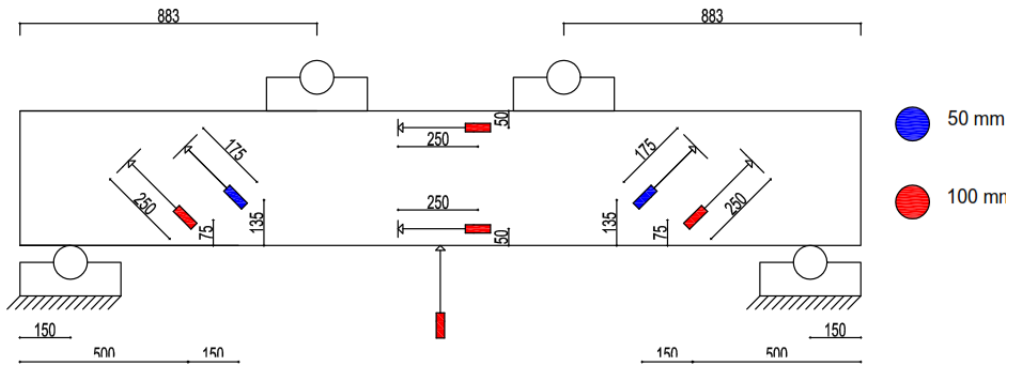
Yer değiştirme ölçerler, çatlak genişlikleri ve kırışin düşey düşey yer değiştirmesinin ölçülmesinde kullanılmıştır (Şekil 3.27).





**Şekil 3.27.** Kirişte bulunan yer değiştirme ölçerler

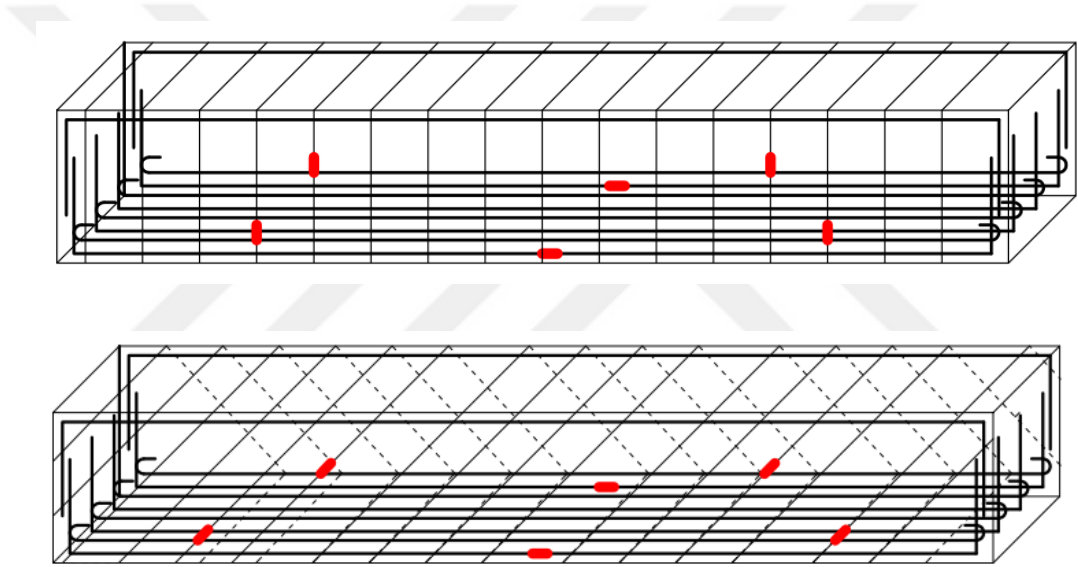
Çatlak genişliklerini ölçmek amacıyla kirişin sadece ön yüzüne olmak üzere D1, D2, D3, D4, D5, D6 isimli yer değiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Bu yer değiştirme ölçerlerden D1 ve D2, kiriş alt köşelerinden 500 mm yatay 75 mm düşey mesafede tutturulup ölçüm aralığı olarak 250 mm mesafe bırakılarak, D3 ve D4, kiriş alt köşelerinden 650 mm yatay 135 mm düşey mesafede tutturulup ölçüm aralığı olarak 175 mm mesafe bırakılarak, D5 ve D6, ölçüm aralıkları kirişin yatayda ortasında olacak şekilde kirişin alt ve üst kısmından 50 mm mesafede tutturulmuş ve ölçüm mesafeleri 250 mm olacak şekilde sabitlenmiştir. D7 yer değiştirme ölçeri ise kirişin yük altında düşeyde gösterebileceği yer değiştirmeyi ölçmek amacıyla kirişin taban kısmının ortasına yerleştirilmiştir. Yer değiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki detaylı konumu Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.28.** Yer değiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki konumları

### 3.3.3. Gerinim pulları

Gerinim pulları (GP), kiriş üzerinde kullanılan donatılardaki kritik bölgelerin birim şekil değiştirmelerini tespit etmek amacıyla kullanılmıştır. Yapılan deneylerde TML marka gerinim pulları, çekme donatılarında ve asal çekme gerilmelerin geçtiği doğrultuya denk gelen enine donatılarda konumlandırılmıştır. 10 mm uzunluğundaki bu gerinim pulları donatının nervürlü yüzeyi törpülenip düzleştirilerek temizlenmiş donatı yüzeyine yapıştırılmıştır. Enine donatı olarak kullanılan geogrid malzemesi de temizlenerek gerinim pulları yapıştırılmıştır. Gerinim pullarının yapıştırıldığı donatılar Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Gerinim pullarının kiriş üzerindeki konumları

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Enine Donatısız Kiriş (SH-N)

Bu kiriş numunesi TS 500 standardına uygun olarak tasarlanmış, boyuna donatıları bulunan fakat enine donatısı bulunmayan bir kiriştir.

Donatıları düzenlenen bu kiriş numunesi, 28 günlük beton basınç dayanımını aldıktan sonra eğilme deneyinin yapılabilmesi için deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

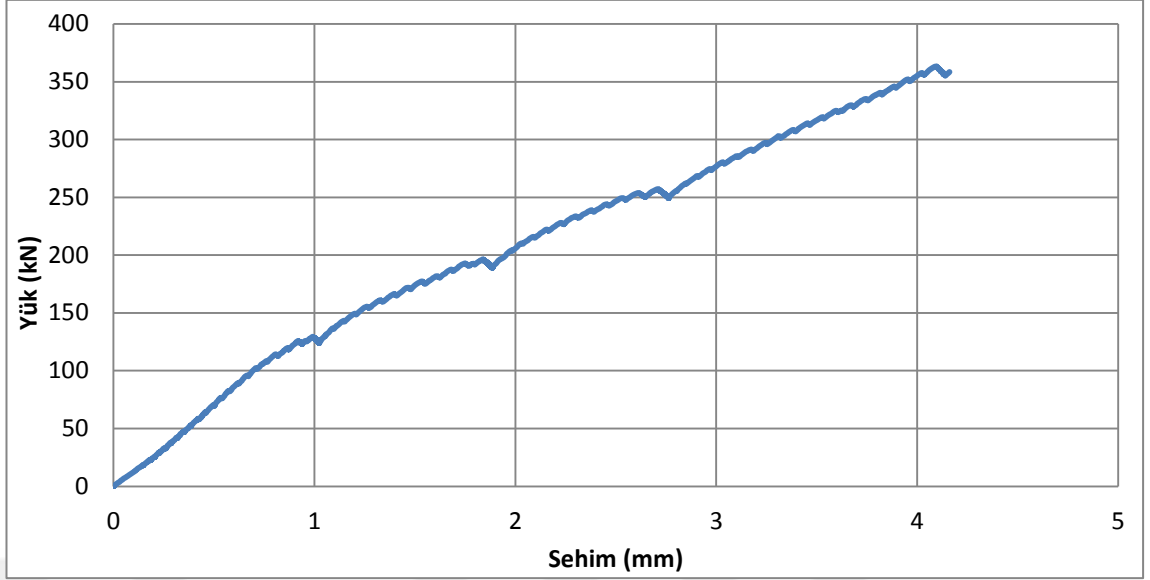
Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +2,0 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +2,0 mm ve +4,0 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle işaretlenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen çatlaklar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Kirişin göçmesine neden olan eğik çatlaklar daha önceden öngürülen bölgelerden geçmiş olup kirişin sağ ve sol kısmında simetrik olarak ilerlemiştir. Ancak kirişin sağ tarafındaki çatlak sol taraftakilere göre daha fazla büyüyerek kirişin göçmesine neden olmuştur. Göçme durumu enine donatısız bir elemanda tahmin edildiği gibi aniden olmuştur. Deney amacına uygun olarak boyuna donatılar akmadan kirişin göçmesi sağlanmıştır.

Şekil 4.2’de ise kirişin yük – sehimi grafiği gösterilmektedir. Kirişin ulaştığı maksimum yük değeri 357,80 kN olup yaptığı en fazla sehimi ise 4,16 mm olmuştur.



**Şekil 4.1.** SH-N numunesinin çatlak gelişimi



**Şekil 4.2.** SH-N numunesinin yük – sehim grafiği

#### **4.2. 30° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G30)**

Bu kiriş numunesi TS 500 standartlarında tasarlanmış, enine donatı olarak 30° açı ile helezonik şekilde geogrid malzemesi kullanılmıştır.

Numune beton dökümünün ardından 28 günlük basınç dayanımını sağladıktan sonra deneye hazır hale getirilerek deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

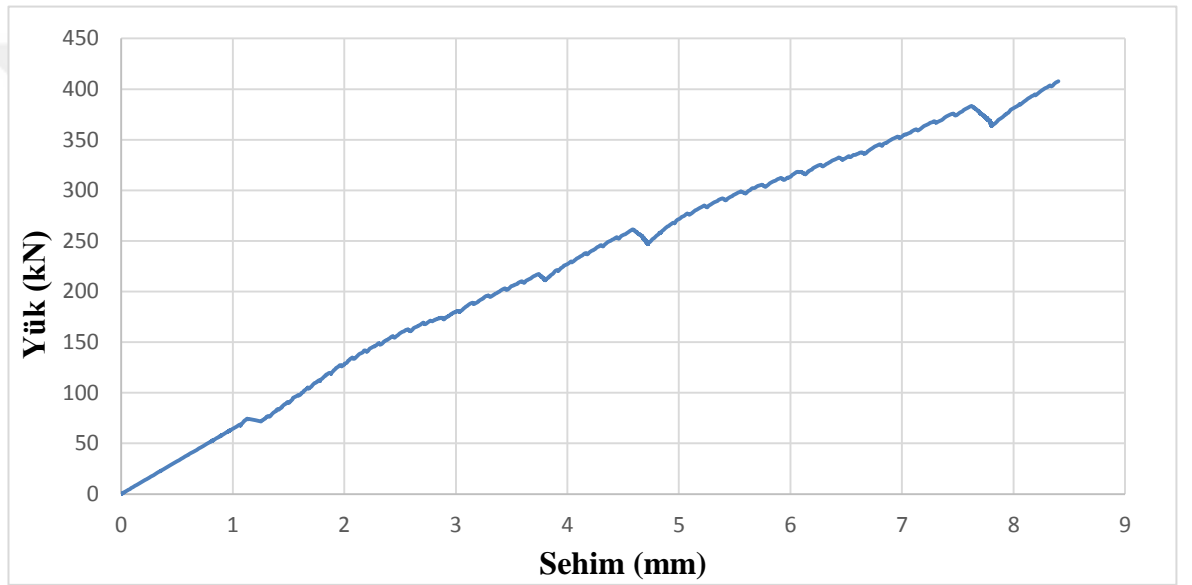
Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +7,5 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +7,5 mm ve +8,4 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle işaretlenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen bütün çatlaklar Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** SH-G30 numunesinin çatlak gelişimi

Kirişte oluşabilecek eğik çatlakların, deney esnasında öngürülen bölgelerden geçtiği görülmüştür. Kirişin sağında ve solunda neredeyse simetrik olarak ilerleyen eğik çatlaklarda önemli bir açılma görülmeden, enine donatı olarak kullanılan geogrid malzemesinin % 0,7 uzamasıyla kiriş yük taşıyamayacak duruma gelmiş ve deney sonlandırılmıştır. Deney amacına uygun olarak boyuna donatı akmadan, enine donatı olarak kullanılan geogrid malzemesinin kopmasıyla göçme durumuna ulaşmıştır.

Şekil 4.4'te ise kirişin yük – sehim grafiği gösterilmiştir. Kirişin ulaştığı maksimum yük 407,86 kN olup, alt kısmında ulaştığı en fazla sehim miktarı ise 8,40 mm olmuştur.



Şekil 4.4. SH-G30 numunesinin yük – sehim grafiği

#### 4.3. 45° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G45)

Bu kiriş numunesi TS 500 standartlarında tasarlanmış, enine donatı olarak 45° açı ile helezonik şekilde geogrid malzemesi kullanılmıştır.

Numune beton dökümünün ardından 28 günlük basınç dayanımını sağladıktan sonra deneye hazır hale getirilerek deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

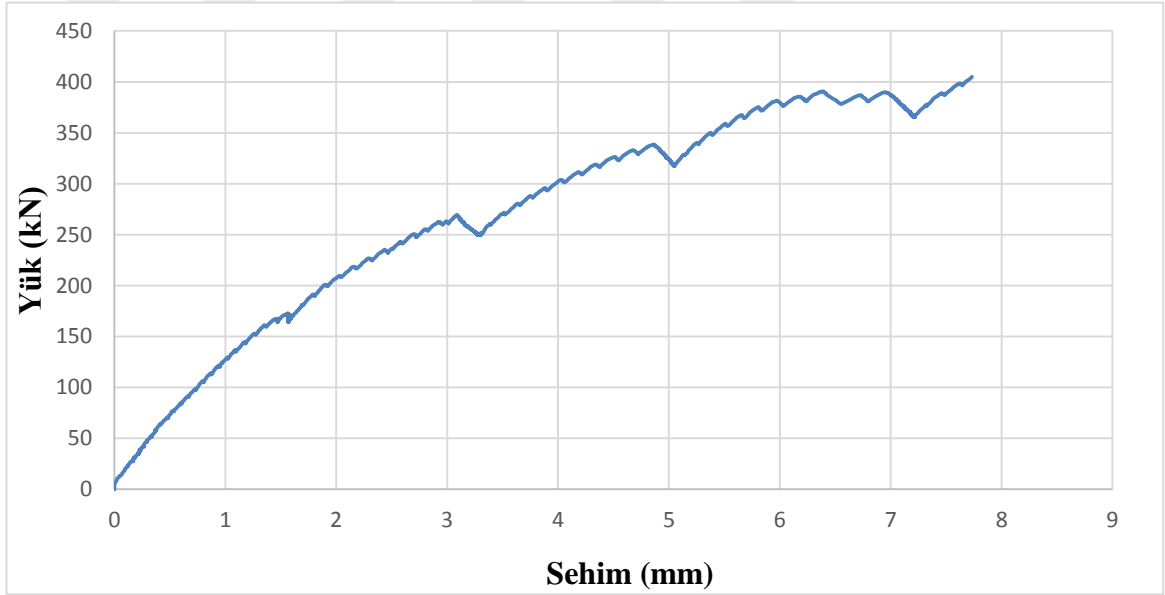
Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +3,71 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +3,71 mm ve +4,49 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle

işaretilenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen bütün çatlaklar Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. SH-G45 numunesinin çatlak gelişimi

Şekil 4.6’da ise kirişin yük – sehim grafiği gösterilmiştir. Kirişin ulaştığı maksimum yük 404,90 kN olup, alt kısmında ulaştığı en fazla sehim miktarı ise 7,73 mm olmuştur.



Şekil 4.6. SH-G45 numunesinin yük – sehim grafiği

#### 4.4. 60° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G60)

Bu kiriş numunesi TS 500 standartlarında tasarlanmış, enine donatı olarak 60° açı ile helezonik şekilde geogrid malzemesi kullanılmıştır.

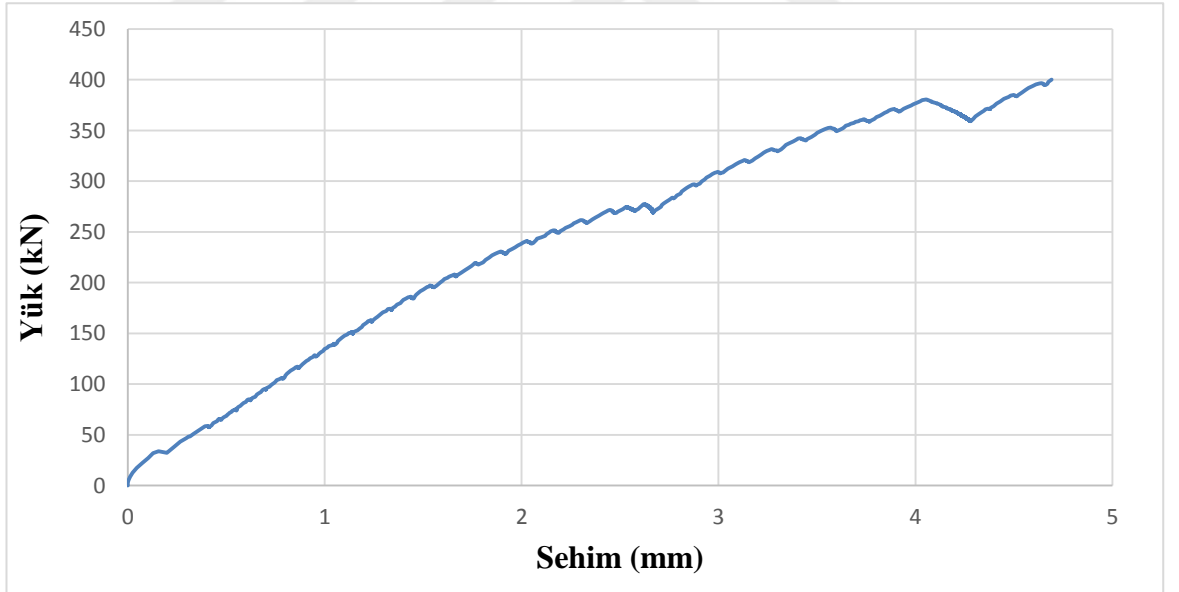
Numune beton dökümünün ardından 28 günlük basınç dayanımını sağladıktan sonra deneye hazır hale getirilerek gibi deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +4,50 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +4,50 mm ve +4,69 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle işaretlenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen bütün çatlaklar Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. SH-G60 numunesinin çatlak gelişimi

Şekil 4.8’de ise kirişin yük – sehim grafiği gösterilmiştir. Kirişin ulaştığı maksimum yük 399,97 kN olup, alt kısmında ulaştığı en fazla sehim miktarı ise 4,69 mm olmuştur.



Şekil 4.8. SH-G60 numunesinin yük – sehim grafiği

#### 4.5. 90° Açılı Geogrid ile Sargılanmış Numune (SH-G90)

Bu kiriş numunesi TS 500 standartlarında tasarlanmış, enine donatı olarak 90° açı ile geleneksel şekilde sargılanmış geogrid malzemesi kullanılmıştır.

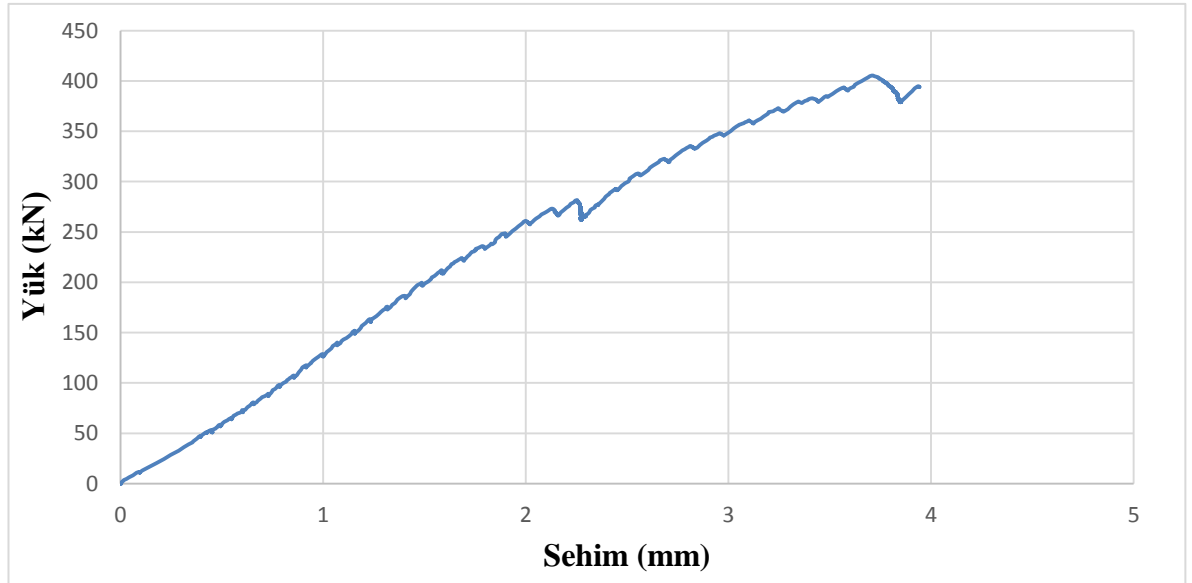
Numune beton dökümünün ardından 28 günlük basınç dayanımını sağladıktan sonra deneye hazır hale getirilerek deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +3,84 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +3,84 mm ve +4,94 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir ve bu değerler arasında gelişen başka önemli çatlak olmamıştır. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle işaretlenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen bütün çatlaklar Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. SH-G90 numunesinin çatlak gelişimi

Şekil 4.10'da ise kirişin yük – sehimi grafiği gösterilmiştir. Kirişin ulaştığı maksimum yük 394,13 kN olup, alt kısmında ulaştığı en fazla sehimi miktarı ise 3,94 mm olmuştur.



Şekil 4.10. SH-G90 numunesinin yük – sehimi grafiği



#### 4.6. 90° Açılı Çelik Etriye ile Sargılanmış Numune (SH-S90)

Bu kiriş numunesi TS 500 standartlarında tasarlanmış, enine donatı olarak 90° açılı ile geleneksel şekilde sargılanmış çelik etriye kullanılmıştır.

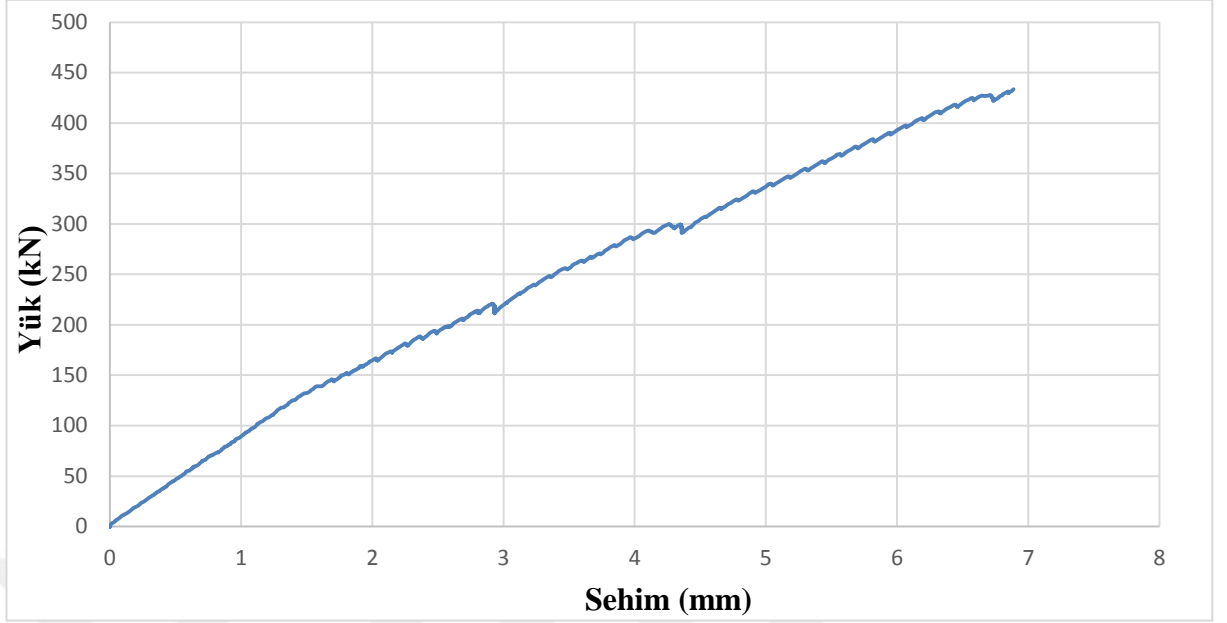
Numune beton dökümünün ardından 28 günlük basınç dayanımını sağladıktan sonra deneye hazır hale getirilerek deney düzeneğine yerleştirilmiştir.

Deney esnasında, ilk çatlak kirişin alt kısmında oluşan sehimin +6,27 mm değerine ulaştığında gözlemlenmiştir. Daha sonra oluşan eğik çatlaklar +6,27 mm ve +6,97 mm değerleri arasında gözlemlenmiştir ve bu değerler arasında gelişen başka önemli çatlak olmamıştır. Meydana gelen çatlaklar renkli bir kalemle işaretlenerek gelişimi takip edilmiştir. Deney sonlandırıldıktan sonra gözlemlenen bütün çatlaklar Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. SH-S90 numunesinin çatlak gelişimi

Şekil 4.12’de ise kirişin yük – sehim grafiği gösterilmiştir. Kirişin ulaştığı maksimum yük 433,49 kN olup, alt kısmında ulaştığı en fazla sehim miktarı ise 6,97 mm olmuştur.



Şekil 4.12. SH-S90 numunesinin yük – sehim grafiği

#### 4.7. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deney sonuçlarından elde edilen değerlerin karşılaştırıldığı en büyük sehim değerleri, şekil değiştirmiş elemandan elde edilen eğrilik değerleri, üst liflerin birim kısaltmaları, alt liflerin birim uzamaları ve çatlak genişlikleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Yük altında kirişlerde sehim, alt-üst lif uzama, çatlak genişliği sonuçları

| Kirişler | Sehim (mm)   | Alt Lif Uzama (mm) | Üst Lif Kısalma (mm) | Çatlak Genişlikleri (mm) | Taşıma Gücü (kN) |
|----------|--------------|--------------------|----------------------|--------------------------|------------------|
| SH-N     | 4,16         | 0,18               | 0,08                 | 4,32                     | 357,80           |
| SH-G30   | 8,40 (+2,02) | 0,56               | 0,13 (+%62,5)        | 1,21                     | 407,86 (+1,14)   |
| SH-G45   | 7,73 (+1,86) | 0,59               | 0,02 (-%75,0)        | 2,38                     | 404,90 (+1,13)   |
| SH-G60   | 4,69 (+1,12) | 0,43               | 0,01 (-%87,5)        | 2,92                     | 399,97 (+1,12)   |
| SH-G90   | 3,94 (-0,95) | 0,23               | 0,02 (-%75,0)        | 3,18                     | 394,13 (+1,10)   |
| SH-S90   | 7,22 (+1,74) | 1,01               | 0,01 (-%87,5)        | 3,34                     | 433,49 (+1,21)   |

Enine ve boyuna donatılarda meydana gelen asal birim uzamalar Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

**Tablo 4.2.** Yük altında kirişlerde boyuna ve enine donatıdaki birim uzama sonuçları

| <b>Kirişler</b> | <b>Boyuna Donatıda Maks. Birim Uzama (%)</b> | <b>Enine Donatıda Maks. Birim Uzama (%)</b> |
|-----------------|--|---|
| SH-N            | 0,1354                                       | -   |
| SH-G30          | 0,1670 (+1,24)                               | 0,07  |
| SH-G45          | 0,1562 (+1,15)                               | 0,36  |
| SH-G60          | 0,1469 (+1,09)                               | 0,72  |
| SH-G90          | 0,1240 (-0,92)                               | 0,37  |
| SH-S90          | 0,20 (+1,48)                                 | 0,36  |

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında betonarme kirişlerde kesme donatısı olarak çelik donatının yanında geogrid malzemesinin, sarmal etriye olarak kullanılmasının elemanın davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tasarım standartlarına uygun olarak hazırlanan betonarme kirişleri üzerindeki boyuna donatılar sabit tutularak enine donatılarda değişkenlik gösteren sargılama açıları ve malzemeler kullanılmıştır. Kesme donatısı olarak kullanılan çelik donatı ve literatürde kullanım örnekleri bulunan geogrid malzemesi kapalı etriye ve sarmal etriye şeklinde uygulanmış ve kiriş davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla bu numunelerden enine donatısız 1 adet, enine donatı olarak geogrid kullanılmış 4 adet ve enine donatı olarak çelik etriye kullanılmış 1 adet deney numunesi hazırlanmıştır.

Yapılan karşılaştırmalardan yola çıkarak numunelerin davranışları üzerinde varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Geogridin yapı malzemesi olarak kullanım alanı çalışmamızdan tamamen farklı olarak, genellikle zemin iyileştirme uygulamalarında kullanılan bir mühendislik malzemesidir. Ancak esnek yapıları sayesinde betonarme elemanlarda enine donatı olarak kullanımı kolaylık sağlamaktadır. Yapılan çalışmada görüldüğü üzere; kirişlerde enine donatı olarak kullanılan geogrid malzemesi uygulama kolaylığının yanı sıra yapısal performans açısından efektif sonuçlar vermektedir. Ayrıca bu malzemeler geniş bir yüzey alanına sahip olduğundan, yüzey alanı düşük çelik donatıya göre betonla daha fazla aderans oluşturmaktadır.

Kirişlerde enine donatının geleneksel kapalı sargılamanın dışına çıkılarak sarmal olarak uygulanmasının kirişin sünek davranışı üzerinde çok önemli etkileri olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar bize sargılama tekniğinin kiriş yapısal davranışını iyileştirdiğini göstermektedir. Sarmal etriyeli olarak imal edilen kirişler, geleneksel kapalı olarak imal edilen kirişlere göre önemli farklar da oluşturmaktadır. Çatlak genişliği değerleri ele alındığında kirişlerin taşıma kapasitesine ulaşmadan oluşan çatlak genişliklerinde en üstün başarıyı 3,34 mm değeri ile SH-S90 kirişi vermiştir. Bunun sebebi ise çeliğin geogrid malzemesine göre gösterdiği üstün sünek davranıştır. SH-G90 3,18 mm, SH-G60

2,92 mm, SH-G45 2,38 mm, SH-G30 ise 1,21 mm değerine ulaşmıştır. Dolayısı ile açılı sargılama yapılan numuneler karşılaştırıldığında enine donatının yatayla yaptığı açı büyüdükçe çatlak genişliği de artış göstermiştir.

Deneyle sonucunda kirişlerden okunan sehim değerlerine bakıldığında, etriyesiz numune olan SH-N kirişi 4,16 mm sehim yapmıştır. Diğer numunelerle kıyaslandığında SH-G30 kirişi 8,40 mm sehim yaparak enine donatısı olmayan numuneye göre iki kat fazla sehim yaparak daha fazla sünek davranış sergilemiştir. Diğer numunelerin sehim değerlerine bakıldığında geogrid kullanılan kirişlerde SH-G30 kirişini SH-G45, SH-G60 ve SH-G90 kirişleri izlemiştir. Etriyesiz numuneye göre kıyas yapıldığında SH-G30 +2,02, SH-G45 +1,86, SH-G60 +1,12, SH-G90 -0,95 ve SH-S90 ise 1,74 oranında sehim değerine ulaşmıştır.

Yani etriyelerin yatayla yaptığı açı arttıkça yapılan sehim miktarı azalmıştır. Buna karşın etriyelerin yatayla yaptığı açı azaldıkça taşıma güçleri artmıştır. Taşıma gücü değerleri kıyaslandığında, referans numunemiz SH-N etriyesiz kirişine göre SH-G30 1,14, SH-G45 1,13, SH-G60 1,12, SH-G90 1,10 ve SH-S90 1,21 oranında artış göstermiştir. Buradaki artış oranları incelendiğinde geogrid ile sargılanmış numunelerin yatayla yaptığı sargılama açıları azaldıkça numunelerin taşıma güçleri artmıştır. Bunun sebebi; enine donatının yatayla yaptığı açının küçülmesiyle kirişlerde oluşan çatlaklardan daha fazla sayıda etriye geçmesi ve bunun da taşıma gücünü artırmasıdır.

Geogrid yapısı itibariyle beton dökümü esnasında temas edebilecek keskin yüzeyli agregaga yüzeylerine karşı yapısal bütünlüğünü koruyabilmektedir. Geogridin genellikle kullanıldığı zemin iyileştirme çalışmaları düşünüldüğünde, uygun bir koruyucu ile kaplanması durumunda yapısal bütünlüğünü koruyarak istenilen performansı vermektedir. Yapısal davranışı iyileştirmesi amacıyla kullanılmak istenildiğinde, malzemenin düşük elastisite modülünün yükseltilmesi veya kullanım miktarının artırılması gerekmektedir. Kullanım miktarı arttığında ise malzeme kırış kesitinde yoğun bir miktara ulaşacak, bu da uygulanabilirliğini azaltacaktır.

Geogrid malzemesinin elastisite modülü çeliğe göre çok daha düşük olmasına rağmen, deney sonuçlarında da görüldüğü üzere yeterli şekil değiştirme değerlerine ulaşabilmiştir. Betonarme kirişte mikro çatlaklar oluşup etriyeye yük binmeye

başladığında çelik daha mukavim bir davranış sergileyerek daha yüksek performans sağlıyor ve kiriş daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşabiliyor. Çalışmadan da görüldüğü üzere, betonarme elemanlarda sargı donatısının sürekliliği elemanın yapısal davranışlarını iyileştirebilmektedir. Farklı bir bakış açısıyla ele alınan bu çalışmada da öngörüldüğü üzere; uygun oranlarda ve iyi bir işçilikle uygulanan geogrid malzemesi yapısal davranışları iyileştirme bakımından çelik donatıya alternatif olarak kullanılabilirliği görülmektedir.



## KAYNAKLAR

- ACI Committee 318, (2008) “Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary”, *American Concrete Institute*, Farmington Hills.
- ASTM Standard D6637/D6637M-15, (2015) “Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- ASTM Standard D4595-11, (2011) “Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- Banthia, N., Al-Asaly, M. and Ma S., (1995) “Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Fiber-Reinforced Plastic Grid”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 7, No. 4, 252–257.
- Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A. Rizkalla and S.H. Triantafillou, (2002) “T.C. Fiber-Reinforced Polymer Composite for Construction State of the Art Review”, *Journal of Composite for Construction*, Vol. 6(2), 73–87
- Celep, Z. Ve Kumbasar N., (1998) “Betonarme Yapılar” *Sema Matbaacılık*, 2. Baskı, İstanbul, 182-199.
- Chidambaram, R.S. and Agarwal, P., (2015) “Flexural and shear behavior of geo-grid confined RC beams with steel fiber reinforced concrete” *Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee (IITR)*, Roorkee 247667, India.
- Chidambaram, R.S. and Agarwal, P., (2016) “Performance Evaluation of Geogrid-Confining Beam-Column Joints With Steel Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic Loading” *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No 1, 582-598.
- Chidambaram, R.S. and Agarwal, P., (2014) “The confining effect of geo-grid on the mechanical properties of concrete specimens with steel fiber under compression and flexure” *Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology Roorkee (IITR)*, Roorkee, India.
- Clarke, J.L., (1993) “Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete”, *Blackie Academic and Professional*, New York.
- Comité Euro-International du Béton (CEB), (1990) “CEB-FIP Model Code” *Bulletin d’Information*, Thomas Telford Services, London, 213-214.
- Doğangün, A., (2010) “Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 475-487.

- Erki, M.A. and S.H. Rizkalla, (1993) “FRP Reinforcement for Concrete Structures”, *Concrete International*, 15(6), 48–53.
- Ersoy, U., (1987) “Betonarme, Temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı”, *Evrım Yayınevi*, 2. basım, İstanbul, 377-471.
- Ersoy, U. ve Özcebe G., (2001) “Betonarme: Temel İlkeler, TS500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap”, 6. baskı, *Evrım Yayınevi*, İstanbul.
- Güdüz, A., (1980) “Betonarme, taşıma gücü ilkesine göre hesabı”, *Kazmaz Matbaası*, İstanbul.
- Hacısalıhoğlu, M., (2010) “Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Plastik Çözümlenmeleri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hegger, J., Niewels, J. and Kurth, M., (2009) “Shear Analysis of Concrete Members with Fibre Reinforced Polymers (FRP) as Internal Reinforcement”, *9th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, FRPRCS-9, Sydney, 1-8.
- Khuntia, M. and Stojadinovic, B., (2001) “Shear Strength Of Reinforced Concrete Beams Without Transverse Reinforcement”, *ACI Struct Journal.*, 98(5), 648–656.
- Kong, F.K. and Evans, R.H., (1980) “Reinforced and Prestressed Concrete” 2<sup>nd</sup> ed., *Nelson*, London.
- Meski, F.E. and Chebab G.R., (2014) “Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Different Types of Geogrids”, *American Society of Civil Engineers*.
- Mitchell, D., (1974) “The Behaviour of Structural Concrete Beams in Pure Torsion”, *University of Toronto*, Toronto.
- Nagasaka, T., Fukuyama, H. and Tanigaki, M., (1993) “Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Sitrups”, *Transactions of the Japan Concrete Institue*, Detroit, Michigan, USA.
- Nanni, A. and Dolan, C.W., (1993) “Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the International Symposium on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures”, *American Concrete Institute*, Detroit, MI.
- Nawy, E.G., (2000) “Reinforced Concrete: A Fundamental Approach”, 4<sup>th</sup> Edition, *Prentice Hall*, New Jersey.



- Okamura, H. and Higai, T., (1980) "Proposed Design Equation For Shear Strength of R.C. Beams Without Web Reinforcement", *Proc Japan Soc Civil Eng*, 300, 131-141.
- Özkal, F.M., (2017) "Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi", *20. Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, 551-561.
- Rebeiz K.S., (1999) "Shear Strength Prediction for Concrete Members", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 125(3), 301-308.
- Shehata, E., (1999) "Fibre-Reinforced Polymer (FRP) for Shear Reinforcement in Concrete Structures", *PhD Dissertation, Manitoba University*, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Shin S-W, Lee K-S, Moon J and S.K.Ghosh., (1999) "Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams with Shear Span-to-Depth Ratios between 1.5 and 2.5", *ACI Structural Journal*, 96, 549-556.
- Spadea, S., (2010) "Comportamento di Elementi di Calcestruzzo Armato Con Barre di materiale Composito Fibroinforzato", *University of Salerno*, Fisciano, Italy.
- Topçu, A. , "Betonarme 1-2",  
[http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme\\_1\\_2.pdf](http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme_1_2.pdf)  
Son Erişim Tarihi: 21.04.2019.
- TS 500, (2000) "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40)" *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Walraven, J.C., (1980) "Aggregate interlock: atheoretical and experimental analysis", *Delft University of Technology*, Delft, The Netherlands.
- Weibull, W., (1939) "A statistical Theory of the Strength of Materials", *Royal Swedish institue for Engineering*, Stockholm.
- Webster, S.L., (1993) "Geogrid reinforced base course for flexible pavements for light aircraft: Test section construction, behavior under traffic, laboratory tests, and design criteria." *Technical Report GL-93-6, U.S. Army Corps of Engineers*, Waterways Experiment Station, Vicksburg.

## ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Emre ŞAVLUK, 1990 yılında Erzincan' da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzincan' da tamamladı. 2009 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' nden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı' nda yüksek lisans eğitimine başladı.

