



**KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER (CFRP)
LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME
KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞININ SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

Kasem FARES

Danışman: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2020

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER (CFRP) LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ
BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

(Numerical Study for the Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by
Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Sheets)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kasem FARES

Danışman: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

Erzurum
Ağustos, 2020

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kasem FARES tarafından hazırlanan “Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP) Levhalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışının Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışması 18 / 09 / 2020 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Dr. Öğr. Üyesi Dilek OKUYUCU Erzurum Teknik Üniversitesi	
Danışman:	Danışman: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN Atatürk Üniversitesi	
Jüri Üyesi:	Asst. Prof. Dr. Mahmut KILIÇ Atatürk Üniversitesi	

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN danışmanlığında sunulan “Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP) Levhalarla Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışının Sayısal Olarak İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Yöntem	3	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuç ve Öneriler	0	20
Tezin Geneli	9	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)
Kasem FARES
18.9.2020
İmza:

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN
18.9.2020
İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayımlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

- ☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.
- ☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez konusunu seçtiğim andan itibaren tez çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan, tezin tüm aşamalarında son ana kadar bana destek olan ve tavsiyeleriyle bana rehberlik eden Doç. Dr. Oğuz Akın Düzgün hocama teşekkür ederim.

Her zaman beklentilerini karşılayabileceğimi, çalışmalarım ve eğitimimle mutlu etmeyi umduğum, bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda duran değerli anne ve babama, sahip olduğu her şeyle beni destekleyen, bu aşamaya gelene kadar benim için yorulup ayakta kalan sevgili eşime teşekkürü borç bilirim.

Kasem FARES



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON LİF TAKVİYELİ POLİMER (CFRP) LEVHALARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN KESME DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Kasem FARES

Danışman: Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

Amaç: Bu çalışmada karbon lif takviyeli (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışlarının sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Yöntem: Öncelikle literatürden elde edilen deneysel bir çalışma sayısal olarak modellenerek sonuçlar karşılaştırılmış, sonuçlar doğrulandıktan sonra çalışmada karbon lif takviyeli (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerde güçlendirme yöntemi, yükleme yöntemi ve kullanılan malzemelerin özellikleri gibi bazı parametreler değiştirilerek örnek olarak alınan deneysel çalışmada kullanılmayan farklı parametrelerin de davranış üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bulgular: Literatürden örnek olarak seçilen deneysel çalışmanın sonuçları ile bu çalışmada elde edilen sayısal modellemenin sonuçlarının büyük ölçüde uyduğu tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kirişlerin kesme davranışı üzerinde 45° açılı karbon liflerle güçlendirmenin 90° açılı karbon liflerle güçlendirmeden daha iyi sonuçlar verdiği, kesme alanlarının U şeklindeki karbon liflerle güçlendirilmesinin kirişin tamamının güçlendirilmesinden daha iyi sonuçlar verdiği ve karbon liflerle güçlendirmenin, kirişlerin göçme kuvvetlerine karşı dayanımını en az iki katına kadar artırdığı bulunmuştur.

Sonuç: Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların sayısal modelleme çalışmasının sonuçları ile tutarlılığı, karbon lif takviyeli (CFRP) levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme davranışlarının belirlenmesi için ANSYS programının etkili bir şekilde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: ANSYS, sonlu elemanlar analizi, CFRP, güçlendirme, kesme kırılması

Eylül 2020, 80 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

NUMERICAL STUDY FOR THE SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED BY CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) SHEETS

Kasem FARES

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

Purpose: This study aimed to numerically investigate the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

Method: First of all, a numerical modeling for a previous study was made and the results were compared; After validating the results, some variables were changed, such as the method of strengthening, the method of loading and the properties of the materials used in the reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber reinforced polymer (CFRP), finally, the effect of the various factors which are not used in the experiment was studied.

Findings: We have got a high match between the laboratory results and the numerical results, also, several results were obtained: the reinforcement on the shear with carbon fiber at of 45° angle is better than the stiffening with the fibers of 90° angle, the strengthening of the U-shaped shear areas is better and easier to apply than the stiffening by completely wrapping, the stiffening with fiber carbon increases the ability of RC beams to withstand breaking forces to the double at least.

Results: The consistency of the results obtained from the experimental studies with the results of the numerical modeling study leads us to the fact that ANSYS software can be used effectively to determine the shear behavior of reinforced concrete beams strengthened by (CFRP).

Keywords: ANSYS, finite element analysis, CFRP, strengthening, shear failure.

September 2020, 80 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	3
Betonarme Kirişlerde Kesme Kuvvetlerinin Oluşma Mekanizması.....	3
Kesme Donatısı Olmayan Betonarme Kirişlerin Davranışı	3
Karbon Lifli Polimer (CFRP).....	6
Karbon Liflerin ve Kompozitlerin Özellikleri (Artem 2010)	7
Karbon Lifli Polimerle Güçlendirme	8
Betonarme Yapılarda Doğrusal Olmayan Davranışlar ve Nedenleri	8
ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı	9
Literatür Özeti	10
MATERYAL VE YÖNTEM	18
Modellemesi Yapılan Kirişlerin Tanıtılması.....	18
Çalışmayı Modelleme Adımları	20
Geometrik modelin oluşturulması.....	20
Elemanların seçimi.....	23
Malzemelerin özellikleri ve davranışlarının girilmesi	26
Modelin sonlu eleman ağının oluşturulması	32
Yük ve mesnet koşullarının belirlenmesi.....	33
Çözümleme yapılması.....	34
Analiz ayarlarının yapılması	35
Sonuçların okunması.....	36
Parametrik Çalışma	36
Yükleme yönteminin değiştirilmesi	36
Güçlendirme yönteminin değiştirilmesi.....	38

Beton dayanımı değiştirilmesinin etkisi.....	40
Karbon liflerin elastisite modülünün değiştirilmesinin etkisi	42
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	44
Laboratuvar Sonuçlarının Modelleme İle Karşılaştırılması.....	44
Güçlendirilmemiş Kiriş İncelemesi (Kiriş 0).....	48
Güçlendirilmemiş Betonarme Kirişin (Kiriş 0) Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerle Karşılaştırılması	49
Parametrik Çalışma Tartışması	50
Farklı yükleme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması.....	50
Farklı güçlendirme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması	55
Beton dayanımının değiştirilmesi etkisi.....	58
Karbon liflerin elastisite modülünün değiştirilmesi etkisi	59
SONUÇ VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Güçlendirme malzemelerinin mukavemet ile dayanımı arasında karşılaştırma	7
Tablo 2. Desayi ve Krishnan modeli sonuçları	27
Tablo 3. Tüm kirişler için tek noktasal yük ile iki eşit simetrik noktasal yük arasında karşılaştırma	53
Tablo 4. Tüm kirişler için iki eşit simetrik noktasal yük ile düzgün yayılı yük arasında karşılaştırma	53
Tablo 5. CFRP sarım şeklinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	56
Tablo 6. CFRP - U sarım uygulamasında lif doğrultusunun kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	57
Tablo 7. Farklı beton dayanımlarının kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	58
Tablo 8. CFRP elastik modül değerinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Tipik FRP ve Çelik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	1
Şekil 2. İncelenen kesme donatısı olmayan kiriş	3
Şekil 3. $a/d = 3 \sim 7$ olan kiriş	4
Şekil 4. $a/d = 1.5 \sim 3$ olan kiriş	5
Şekil 5. $a/d < 1$ olan kiriş.....	5
Şekil 6. Tek yönlü karbon lifler.....	6
Şekil 7. Karbon liflerin Türkiye'deki bazı kullanımları	8
Şekil 8. CFRP gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi	9
Şekil 9. Deney çalışmasında kullanılan kiriş detayı.....	18
Şekil 10. Eğilmeye karşı güçlendirilen Kiriş A.....	19
Şekil 11. Eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilen B, D, C ve E Kirişleri.....	19
Şekil 12. ANSYS sonlu elemanlar programı ile analizin Adımları	20
Şekil 13. Mesnetler modelleme yöntemi.....	21
Şekil 14. Donatı çeliğinin betonla bağlantısı.....	21
Şekil 15. Beton içinde donatının modellenmesi.....	22
Şekil 16. ANSYS'te kirişin çeyreğinin modellenmesi	23
Şekil 17. ANSYS'taki Solid 65 elemanı.....	23
Şekil 18. ANSYS'te link 180 elemanı.	24
Şekil 19. (Gerilme-Şekil Değiştirme) donatının basınçta ve çekmede davranışı.....	24
Şekil 20. CFRP davranışı	25
Şekil 21. ANSYS'te Solid 185 elemanı.....	25
Şekil 22. ANSYS'te farklı açılarda karbon liflerin modellenmesi	26
Şekil 23. Desayi and krishnan modeline göre gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi.....	27
Şekil 24. Çalışmada kullanılan gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	27
Şekil 25. Beton basınç eğrisi	28
Şekil 26. Betonun elastisite modülünü hesaplama yöntemleri.....	29
Şekil 27. William Warnke göçme kriteri modeli değişkenlerinin girilmesi.....	29
Şekil 28. Boyuna ve enine donatının gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	30
Şekil 29. ANSYS'te girilen boyuna ve enine donatının gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	31
Şekil 30. 11 ve 22 eksen takımları	31
Şekil 31. CFRP özelliklerinin girilmesi	32
Şekil 32. Mesh sonrası beton ve karbon liflerin şekli	33

Şekil 33. Mesh Sonrası Donatı Şekli.....	33
Şekil 34. Yüklerin kiriş üzerine yerleştirilmesi.....	34
Şekil 35. Mesnetlerin kiriş üzerine yerleştirilmesi.....	34
Şekil 36. Analiz ayarlarının yapılması	35
Şekil 37. ANSYS'te Substep ve Load Step'in (yükleme adımı) anlamları.....	35
Şekil 38. Kirişin merkezinde tekil yük ile noktasal yükleme	37
Şekil 39. Kiriş boyunca düzgün yayılı yük yükleme	38
Şekil 40. Kirişin eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmesi.....	39
Şekil 41. ANSYS'te oluşturulan 33 ve 44 eksenleri	39
Şekil 42. $f_c=30$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	40
Şekil 43. $f_c=30$ Mpa İçin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin girilmesi	41
Şekil 44. $f_c=50$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi.....	41
Şekil 45. $f_c=30$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin girilmesi	42
Şekil 46. Karbon liflerin elastisite modülünün ($E=50$ GPa) girilmesi	42
Şekil 47. Karbon liflerin elastisite modülünün ($E=600$ GPa) girilmesi	43
Şekil 48. Kiriş A'nın nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma.....	44
Şekil 49. Kiriş B'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma	44
Şekil 50. Kiriş C'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma	45
Şekil 51. Kiriş D'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma.....	45
Şekil 52. Kiriş E'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma	45
Şekil 53. Yüklerin artmasıyla çatlakların artması	46
Şekil 54. Göçme anında çatlaklar	46
Şekil 55. ANSYS'e göre çatlak kodlarının açıklaması	47
Şekil 56. Deney çalışmasındaki tüm kirişler arasında karşılaştırma	47
Şekil 57. Nümerik çalışmadaki tüm kirişler arasında karşılaştırma	47
Şekil 58. Deney çalışmasındaki kirişlerin göçmesi	48
Şekil 59. Güçlendirilmemiş betonarme kirişin boyutları	49
Şekil 60. A, B ve 0 kirişlerinin karşılaştırması	49
Şekil 61. Kiriş A'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma	50
Şekil 62. B'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma	51
Şekil 63. C'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma	51
Şekil 64. D'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma	52
Şekil 65. Kiriş E'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma.....	52
Şekil 66. Tek noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar	54
Şekil 67. İki eşit simetrik noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar	54

Şekil 68. Düzgün yayılı noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar.....	54
Şekil 69. Deneydeki kirişin düzgün yayılı yükte göçmesi	55
Şekil 70. Kesme alanları lif ile sarılarak güçlendirilen kiriş ile kiriş C arasında karşılaştırma	55
Şekil 71. 45° lif ile kesme alanlarında güçlendirilen kiriş ile kiriş C arasında karşılaştırma ...	56
Şekil 72. Kiriş D'nin farklı beton dayanımları arasında karşılaştırma	58
Şekil 73. Kiriş 0'ın farklı beton dayanımları arasında karşılaştırma	59
Şekil 74. Kiriş D'nin farklı elastisite modülleri arasında karşılaştırma	60



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A_s	: Çekme donatısı alanı
$\{d\}$	: Yer değiştirme vektörü
ϵ_c	: Beton Birim şekil değiştirmesi
$\{F\}$:	: Yük vektörü
E_c	: Elastisite modülü
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_{ctk}	: Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
f_y	: Donatı akma dayanımı
$[k]$	: Rijitlik matrisi
$\emptyset_i$	: Hacim oranı
v_i	: Hacim
σ_c	: Beton basınç gerilmesi

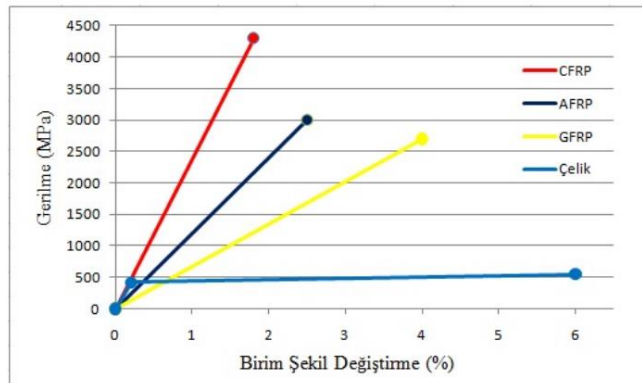
Kısaltmalar

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
AFRP	: Aramid Lif Takviyeli Polimer
CFRP	: Karbon Lif Takviyeli Polimer
EBR	: Dışarıdan Güçlendirme
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemin
FRCM	: Lif Takviyeli Çimento Esaslı Matris
FRP	: Lif Takviyeli Polimer
GFRP	: Cam Lif Takviyeli Polimer
Hi-CFRP	: Yüksek Mukavemet-Karbon Lif Takviyeli Polimer
NSM	: Yüzeye Yakın Montaj Güçlendirme
RC	: Betonarme

GİRİŞ

Betonarme yapı elemanları, zamanla zayıflaması, inşa edilme amacının sonradan değişmesi veya yeni kuvvetlerin eklenmesi gibi çeşitli nedenlerden dolayı çoğu zaman güçlendirmeye ihtiyaç duyar. Yapısal elemanlarda görülen kusurlar, betonun basınç kuvvetlerine düşük bir mukavemet göstermesi ve beton içindeki sargı donatısının yetersiz olmasıdır. Bu problemler, yüksek gerilmelere maruz kalan taşıyıcı elemanların dayanımını ve sünekliğini olumsuz yönde etkiler. Bunun sonucu olarak da elemanların enerji yutma kapasiteleri beklenenden çok daha düşük olmaktadır. Bu kusurları ortadan kaldırmak için, çeşitli güçlendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan, çelik plakalarla güçlendirme yöntemidir. Bu yöntemde çelik plakalar yapısal elemanın dışına uygulanır veya elemanın tamamı çelik veya betonarme (betonarme ile güçlendirme, eski yapısal elemanın betonarme ile kaplanması anlamına gelir) ile mantolama yapılır. Son yıllarda, lifli polimer kullanan yeni bir güçlendirme yöntemi kullanımı yaygınlaşmıştır (Phalla ve Dara 2003).

Bu madde, içindeki lif türüne göre isimlendirilmiştir. Örneğin, CFRP: *Carbon Fiber Reinforced Polymer* yani karbon lifli polimerin içinde karbon lifler bulunmaktadır. Ayrıca, GFRP: *Glass Fiber Reinforced Polymer* ve AFRP: *Aramid Fiber Reinforced Polymer* gibi lif türleri bulunmaktadır. Şekil 1'de görüldüğü gibi karbon lifler, diğer lif türlerine kıyasla en güçlüsüdür. Bu nedenle bu çalışmada, betonarme kiriş numunelerini kesmeye karşı güçlendirmek için karbon lifler kullanılacaktır (Demirer 2011).



Şekil 1. Tipik FRP ve Çelik gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri (Demirer 2011)

CFRP maddenin, son derece dayanıklı, son derece güçlü, hafif ve bu çalışmada değinilecek diğer özellikler gibi birçok özelliği mevcuttur. Bu ve diğer özellikler, CFRP maddeyi özellikle güçlendirme için kullanılan en iyi maddelerden biri haline getirmiştir. Maddenin birçok avantajına rağmen, inşaat alanındaki kullanımı hala çok az ve sınırlıdır, bu

nedenle yayılmasını ve kullanımını önleyen engelleri kaldırmak için çalışmalar yapılmalıdır (Aytaç 2015).

Dünyamız, mühendislik alanı da dahil olmak üzere yaşamın her alanına giren teknolojik gelişmeye tanık olmaktadır. Günümüzde, bilgisayar ortamında birçok yapısal elemanın özellikleri ve çevresindeki koşulları girilip modeli hazırlanarak göstereceği davranış incelenebilir olmuştur. Böylece, model üzerinde çalışılarak, yapısal elemanın ideal yöntemi ve formu elde edilebilir, gelecekte meydana gelecek problemler tahmin edilip gerekli önlemler alınabilir. Bu suretle, çeşitli bilgisayar programlarındaki modelleme süreçleri laboratuvar çalışmalarına kıyasla daha fazla zaman, emek ve ekonomik tasarruf sağlamıştır.

Bu çalışmada betonarme kirişler modellenip karbon liflerle güçlendirilip, doğrusal olmayan analizi ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı aracılığıyla davranışı incelenecektir. Böylece bu çalışma ile daha önce laboratuvardan elde edilen sonuçlar programın vereceği sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Dolayısıyla test edilen elemanların davranışını modellemede programın etkinliği değerlendirilebilecektir. Böylelikle, laboratuvarda zamandan ve araştırmacılara çok fazla çaba ve ekonomik açıdan tasarruf edilecektir.

Bu çalışmada, laboratuvar sonuçları ile modelleme sonuçları arasında bir fikir birliğine varıldıktan sonra, güçlendirme ve yükleme şeklinin değiştirilmesi, betonun ve karbon liflerin özelliklerinin değiştirilmesi gibi deneysel çalışmadaki bazı parametrelerin değiştirilip sonuçlarda meydana gelebilecek değişiklikler ve nedenleri incelenecektir.

KURAMSAL TEMELLER

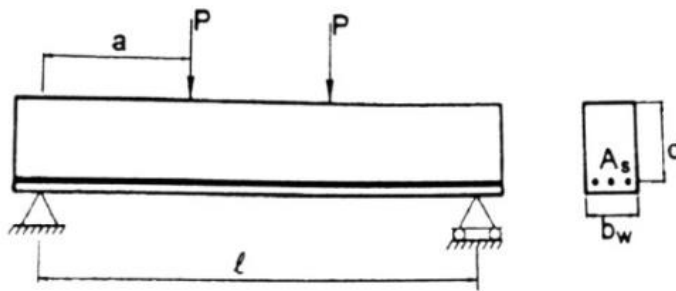
Betonarme Kirişlerde Kesme Kuvvetlerinin Oluşma Mekanizması (Ersoy 2001)

Betonun kesme ve basınç kuvvetlerine olan dayanımı yüksek iken çekme kuvvetlerine olan dayanımı çok düşüktür. Bir betonarme kirişin bir yüke maruz bırakılması durumunda kirişin üst yarısının lifleri basınç kuvvetine, alt yarısının lifleri ise çekme kuvvetlerine maruz kalacaktır. Dolayısıyla bu çekmeler, betonarme kirişin içinde, mesnetlerin yanlarında başlayıp çökünceye kadar 45° açıyla hızlıca gelişen çatlakların ortaya çıkmasına neden olan asal çekme gerilmelerinin oluşmasına yol açacaktır.

Basit kesme durumunda asal çekme gerilmeleri ve asal basınç gerilmeleri kesme gerilmelerine eşit olur. Asal çekme gerilmeleri kesme gerilmesine 45° açı yapan bir yüzeye etkidiğinden kırılma asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan eğik bir çatlakla gelişir. Bu da, betonun düşük çekme mukavemeti nedeniyle göçmeye neden olacaktır. Oluşan bu çatlaklar eğik çekme gerilmesinden kaynaklanır. Bu nedenle bu çatlığa eğik çatlak denir. Bu çatlaklar son derece tehlikelidir ve aynı zamanda betonun gevrek kırılmasının nedenidir. Çatlakların gelişimi de asal çekme gerilmelerinin yönü ile ilgilidir. Bu çatlaklar yukarıda anlatıldığı gibi betonun çekilmiş liflerinden başlayıp bastırılmış liflerine doğru ilerler.

Kesme Donatısı Olmayan Betonarme Kirişlerin Davranışı

Betonarme kirişlerde kesme davranışını incelemek için çeşitli simetrik kirişler üzerinde, yalnızca alttan donatısı olan L uzunluğunda kirişler üzerine her biri $F/2$ değerinde iki kuvveti simetrik bir biçimde uygulayan pres kullanılarak çeşitli laboratuvar deneyleri Ersoy tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırma, Şekil 2'de gösterildiği gibi iki yükten biri ile yakınındaki mesnet arasındaki yatay mesafeyi temsil eden a 'nın, betonarme kirişin faydalı derinliği olan d 'ye bölünmesinden elde edilen a/d oranı olan en önemli parametre üzerine yapılmıştır (Ersoy 2001).

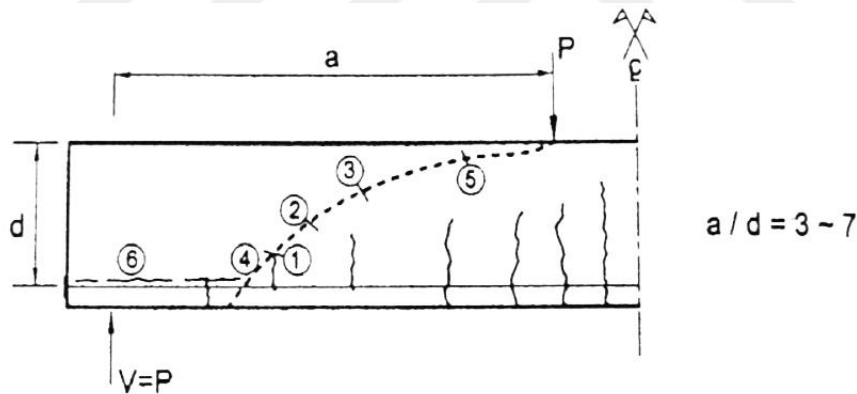


Şekil 2. İncelenen kesme donatısı olmayan kiriş (Ersoy 2001)

a/d oranının farklı olduğu kirişler kullanılmıştır. Dolayısıyla bu kirişlerin dayanımında, çatlağın oluşum biçiminde ve göçme mekanizmasında farklılık bulunmaktadır.

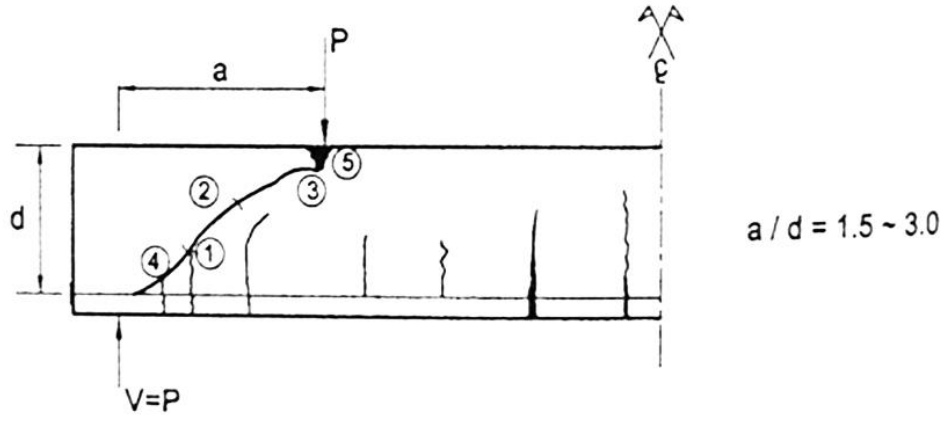
$a/d > 7$ olduğu kirişlerde taşıma gücü, donatıyı akma noktasına getirememiştir. Böylelikle, asal çekme gerilmelerinin düşük düzeyde kalması nedeniyle eğik çatlaklar oluşmamıştır. Dolayısıyla oluşan kesme kuvvetleri göçmeye etkisini bırakmamıştır (Ersoy 2001).

$3 < a/d < 7$ olduğu durumda başlangıçta kırış eksenine dik eğilme çatlakları oluşup yükün artmasıyla tarafsız eksene ulaşana kadar yayılır. Yükün artmasıyla birlikte bu çatlaklardan en az biri asal çekme gerilmelerine dik olarak bükülmeye başlayacaktır. Bu süreç Şekil 3'te gösterilmiştir. Ayrıca aynı şekilde, 1, 2 ve 3 numaralarda olduğu gibi çatlak yayılınca 4 numarada gösterilen eğik çatlak aniden oluşur. Bu çatlağın oluşmasıyla tam bir eğik çatlak ortaya çıkar. Eğik çatlakların bulunması nedeniyle, donatıdaki gerilmelerde ani artış olacaktır. Dolayısıyla 6 numaradaki donatı donatıya paralel aderans çatlakları oluşmaya başlayacaktır. Yükte hafif bir artışla, bu çatlaklar 5 ile 6 arasında yüksek bir hızla gelişir. Böylece, sonunda gevrek ve ani kırılmalar meydana gelir. Bu tür kırılmaya literatürde gerçek eğik çekme kırılması adı verilir (Ersoy 2001).



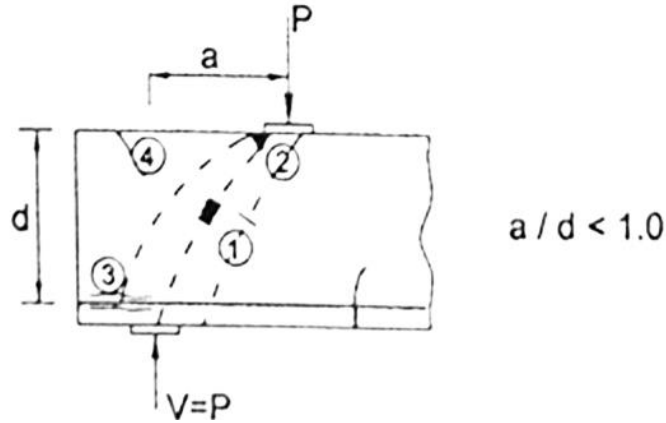
Şekil 3. $a/d = 3 \sim 7$ olan kiriş (Ersoy 2001)

$1.5 < a/d < 3$ olduğu durumda –Şekil 4- kirişler eğik kesme çatlağına ulaşır ve noktasal yük altında basınç gerilmeleri sebebiyle bu çatlaklar üst seviyeye ulaşmaz. 2 ile 4 arasındaki çatlak oluştuğundan sonra kiriş üzerine yüklemeye devam edilir. Bu durumda, çatlakların üzerindeki çatlamamış alan, yüksek kayma gerilmeleri ve yüksek basınç gerilmelerine maruz kalır. Bu alandaki basınç gerilmeleri, yüksek yükleme seviyelerinde 5 numarada olduğu gibi betonarmeyi aşır. Dolayısıyla kiriş göçmeye mahkûm olur (Ersoy 2001).



Şekil 4. $a/d = 1.5 \sim 3$ olan kiriş (Ersoy 2001)

$a/d \geq 1$ olduğu durumda (Şekil 5) donatı, kirişin göçmeye ulaşmasından önce akma noktasına gelir. Yani kiriş eğilme noktasına gelir. Bu kirişteki göçme iki şekilde ortaya çıkar. İlki 1 ve 2'de olduğu gibi betonarmenin yüksek basınç gerilimlerinin varlığı nedeniyle ezilmesi, diğeri ise 3 numarada olduğu gibi göçmenin, kirişin kenarındaki donatının etrafındaki betonun çatlaması ve çatlamanın 4 numaraya kadar yayılması sonucu kenarda meydana gelmesidir (Ersoy 2001).



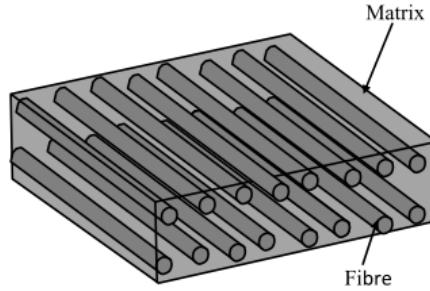
Şekil 5. $a/d < 1$ olan kiriş (Ersoy 2001)

Böylelikle ve gösterdiğimiz gibi a/d oranına göre göçmenin yöntemi ve şekli değişir. Bu oranın bu çalışmada olduğu gibi noktasal yükü olan kirişler için geçerli olduğuna dikkat edilmelidir. Yayılı yük gibi başka bir yükün olması durumunda a/d dışında farklı bir oran kullanılır (Ersoy 2001).

Bu oranlar, kesme davranışı üzerine bu çalışmamda yararlı olmadığı için ele alınmayacaktır.

Karbon Lifli Polimer (CFRP)

FRP kompozitler, Şekil 6 'da gösterildiği gibi bir polimer reçinesi matrisine gömülü yüksek dayanımlı liflerden oluşmaktadır.



Şekil 6. Tek yönlü karbon lifler (Al-Obaidat 2010)

FRP'de yaygın olarak kullanılan lifler; cam, karbon ve aramiddir. Lif özellikleri için tipik değerler Tablo 1'de verilmiştir. Bu liflerin tamamı, çeliğe kıyasla önemli bir akma dayanımı olmaksızın göçmeye karşı doğrusal elastiktir. Kompozitteki matrisin temel fonksiyonları, stresi lifler arasına aktarmak, çevresel koşullara karşı bir bariyer sağlamak ve liflerin yüzeyini mekanik aşınmadan korumaktır.

Epoksinin tipik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kompozitlerin mekanik özellikleri, liflerin özelliklerine, matrisin özelliklerine, lifler ile matris arasındaki bağın özelliklerine, liflerin miktarına ve yönüne bağlıdır. Bir kompozitte, tüm lifler tek bir yönde ise, tek yönlü olarak adlandırılır. Lifler dokunmuş veya birkaç yönde yönlendirilmişse, kompozit çift yönlü veya çok yönlüdür.

Bu çalışmada olduğu gibi çoğu güçlendirme uygulamasında tek yönlü Şekil 2 kompozitler kullanılır. Tablo 1 'de, hacim oranı %65 karbon lifler ile tek yönlü karbon liflerin yaklaşık rijitliği ve dayanımı bulunmaktadır. Aynı tabloda donatı ile bir karşılaştırma da vardır. Çalışmada hacimsel oran %75 olacaktır. Hacimsel oran, liflerin matrisin toplam hacminden aldığı hacim anlamına gelir ve aşağıdaki formüle göre hesaplanır (Gold 2014):

$$\phi_i = \frac{V_i}{\sum_j V_j} \quad (1)$$

Bir parçanın ϕ_i 'si o parçanın hacminin, matrisin tüm hacimlerinin toplamına bölünmesiyle elde edilir.

$$\sum_{i=1}^N V_i = V \quad ; \quad \sum_{i=1}^N \phi_i = 1 \quad (2)$$

Kompozitleri betona bağlamak için yapıştırıcılar kullanılır. En yaygın yapıştırıcılar akrilik, epoksi ve üretdir. Epoksi yüksek sıcaklık dayanımı ile yüksek yapışma mukavemeti

sağlarken, akrilik iyi mukavemet ile orta sıcaklık dayanımı sağlar. Yapıştırıcıların etkili bir şekilde uygulanmasında birkaç husus söz konusudur.

Beton çıkıntılarının kaldırılması, disk zımpara ile yüzeyin silinmesi ve hava fanı kullanılarak yüzeyin taşlanması sonucu oluşan tozun giderilmesi gibi yüzeyin yapıştırma için hazırlanması son derece önemlidir (Obaidat 2010).

Tablo 1. Güçlendirme malzemelerinin mukavemet ile dayanımı arasında karşılaştırma (Obaidat 2010)

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Yoğunluk (Kg/m ³)	Elastisite Modülü/Yoğunluk Oranı (mm ² /s ²)
Karbon	2200-5600	240-830	1800-2200	130-380
Aramid	2400-3600	130-160	1400-1500	90-110
Cam	3400-4800	70-90	2200-2500	31-33
Epoksi	60	2,5	1100-1400	1.8-2,3
CFRP	1500-3700	160-540	1400-1700	110-320
Çelik	280-1900	190-210	7900	24-27

Karbon Liflerin ve Kompozitlerin Özellikleri (Artem 2010)

Karbon liflerin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar;

Avantajları:

- Çok çeşitli özelliklere sahip birçok şekil ve boyutta bulunur
- Elastisite modülü çok yüksek
- Çok yüksek mukavemet
- Çok düşük yoğunluk
- Oksijen (O₂) olmaması durumunda iyi termal stabilite
- Çok yüksek termal iletkenlik ve bu da yorulmaya iyi özellikler verir
- Düşük termal genleşme katsayısı
- Mükemmel sürünme direnci
- İyi kimyasal dayanım
- Düşük elektriksel direnç

Dezavantajları:

- Maliyeti nispeten yüksek, ancak fiyatlar zamanla düşer
- Kırılmaya yol açan düşük gerilme
- Basınç dayanımı çekme dayanımından az ve daha büyük çaplı liflere gelişmiş basınç özellikleri vermez.
- Düşük darbe dayanımı

- Elektriksel olarak iletken olduğundan ve elektrik sistemlerine zarar verebileceğinden dolayı karbon fiberleri kullanırken gereken özen
- 450°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksitlenir
- Anizotropik; eksenel ve çapraz yönlerde farklı özelliklere sahip

Karbon Lifli Polimerle Güçlendirme

Karbon lifler yapı mühendisliğinde iki alanda kullanılır. Birincisi, çelik yerine donatı olarak kullanımı ve bu çalışmanın odak noktası olan bir diğer kullanım, karbon lif plakaları kullanılarak yapısal elemanların dışarıdan güçlendirilmesidir. Bu yöntem, kolonlar, kirişler, döşemeler ve duvarlar gibi birçok elemanda kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Artem 2010).

Şekil 7'de karbon liflerin Türkiye'de bazı kullanımlarının resimleri bulunmaktadır:



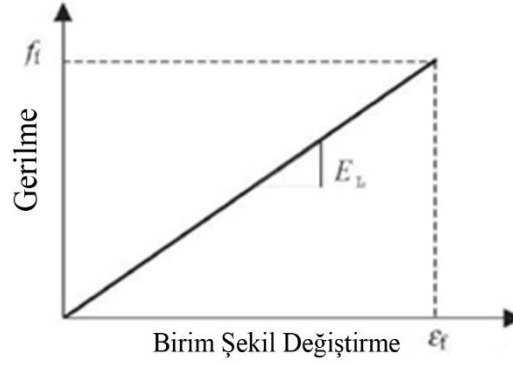
Şekil 7. Karbon liflerin Türkiye'deki bazı kullanımları (Anonim 2004)

Karbon lif plakalar, harici yapıştırma, eleman sarma ve yüzeye yakın montaj (NSM: Near Surface Mounting) gibi çeşitli teknikler kullanılarak yapısal elemanlara bağlanır. Plakalar veya levhalar, eğilme mukavemetine dayanım sağlamak için yapısal elemanın çekme tarafına tutturulabilir veya kesme dayanımını desteklemek için kiriş gövdesinin yanına yapıştırılabilir. Ayrıca sargılama sağlamak için kolonun etrafına sarılabilir, böylece dayanım ve süneklik artar. Yüzeye yakın montaj (NSM), betonda uzun oluklar yapıp oluğa yapıştırıcı uygulayıp ardından karbon lifler çubukları veya şeritleri ekleyerek yapılır (Artem 2010).

Betonarme Yapılarda Doğrusal Olmayan Davranışlar ve Nedenleri

Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin çoğu Doğrusal Olmayan özelliklere sahiptir. Ancak buna rağmen bu malzemeler, çoğu zaman tasarımda ve analizde doğrusal özelliklere sahip malzeme olarak muamele edilir. Bu sonuçlar tam olarak doğru değildir, ancak bazen doğruluğun çok önemli ve gerekli olmadığı durumlarda kabul edilir.

Malzemenin doğrusal olması, belirli bir yükü bir malzemeye yüklendiğinde malzemenin yükle orantılı bir miktarda şekil değiştirmesi ve bu yükü kaldırıncı malzemenin eski haline dönüşmesi anlamına gelmektedir. Buna örnek olarak karbon lifler CFRP.



Şekil 8. CFRP gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi (Çetin 2007)

Yapılarda kullanılan betonarmede ise, yükün etkisi altında bırakıldığında deplasman artar ve gelişir ve yük kalktıktan sonra malzeme asıl durumuna dönüşmez. Bu nedenle doğrusal olmayan özelliklere sahip bir malzeme olarak kabul edilir. Yapı sistemlerinin analizinde bu değişimleri şekil ile birleştirildiğinde daha doğru ve gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilir. Genel olarak, dış etkenlerin etkisi altında olan yapılardaki doğrusal olmayan davranışın nedenlerini iki ana nedende özetlemek mümkündür (Çetin 2007):

1. "Malzemenin doğrusal-elastik olmaması nedeniyle gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının (bünye denklemlerinin) doğrusal olmaması.
2. Sistemin geometrisindeki değişiklikler nedeniyle denge denklemlerinin doğrusal olmaması". Sebepleriyle doğrusal değildir (Çetin 2007).

ANSYS Sonlu Elemanlar Yazılımı

Analizlerde sonlu elemanlar yöntemini ve nümerik çözümleri kullanan bir yazılımdır. Malzemeleri doğrusal ya da doğrusal olmayan statik ve dinamik problemlerde kullanılır. Isı, termal transfer ve elektromanyetik sorunların yanı sıra sıvı problemlerinde de kullanılır. Bir başka avantajı ise, birden fazla tip içeren karışık problemleri çözebilmesidir (Altunışık vd 2018).

Bu çalışmada, *APDL Mechanical* 18,2 sürümü klasik ana ara yüzü ile kullanılacaktır. Bu yazılım, doğruluğun gerekli olduğu akademik konularda kullanılan *WORKBENCH* yazılımından daha hassastır.

Literatür Özeti

Karbon lif takviyeli polimerler kullanılarak betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesi ve eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin modellenmesi konularını inceleyen geçmiş bazı çalışmalar ve araştırmalar ele alınmıştır.

Saadatmanesh ve Ehsani (1991) tarafından, plaka alanı, plaka sertliği ve dayanımı, beton basınç dayanımı ve donatı oranı olmak üzere dört değişkenin etkisini incelemek için karbon liflerle eğilmeye karşı güçlendirilen T-kirişleri ve dikdörtgen kesitli kirişleri üzerine parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışma, betonarme kirişlerin karbon liflerle güçlendirilmesinin sertliği ve göçme mukavemetini artırabileceğini ve göçme olması durumunda deplasmanı azaltabileceğini göstermiştir. Parametrik çalışma ise, karbon liflerle güçlendirmenin nispeten düşük donatı oranına sahip kirişlerde özellikle etkili olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca, karbon liflerin esnek davranışının bir sonucu olarak göçmenin, karbon lif plakalarının kırılması, betonun basınç alanında ezilmesi veya beton kaplamasının ayrılmasıyla meydana geldiğini göstermiştir (Saadatmanesh Ehsani 1991).

Karbon lifler takviyeli kesmelerde çatlak ve kırılma mekanizmasının gelişimini izlemek için Li vd (2001) tarafından iki simetrik kuvvete maruz bırakılmış, eğilmeye ve kesmeye karşı karbon liflerle güçlendirilmiş 5 tane kiriş incelenmiştir. Birincisi eğilmeye karşı güçlendirme ve diğeri eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirme olmak üzere iki tür güçlendirme yapılmıştır. İkinci türde, kesmeye karşı güçlendirmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Kesme ve eğilmeyi birlikte incelemenin amacı, her birinin diğeri üzerindeki karşılıklı etkisinin kapsamını öğrenmektir. Kirişlerde göçme mekanizmalarını ve çatlakların gelişimini anlamak için kirişlerdeki deformasyonu ölçmek için kirişlerin farklı bölümlerinde gerinim ölçer koyulmuştur. Sonuçta bazı kirişler, kesme kuvvetleri nedeniyle karbon lifler çatlaması sonucu göçmüştür. Ayrıca, karbon lifler ile beton arasındaki kenetlenme kaybının bir sonucu olarak göçme meydana gelebilir, ancak bu nadirdir ve genellikle deneydeki bir hatanın sonucudur. Kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinin ilk çatlakların görünümünü geciktirdiği bulunmuştur. Ayrıca, güçlendirme alanının artmasıyla çatlakların azaldığı gözlemlenmiştir ve bu da, deneyde gösterilen kırılma biçimlerinde görülmektedir (Li vd 2001).

Yang vd (2003) tarafından, eğilmeye karşı güçlendirilen ve karbon liflerin kesilmesi veya beton kapağın ayrılması nedeniyle göçen kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi yapılmıştır. Karbon liflerin tam potansiyelinde kullanılmadığı için bu tür göçmenin erken olduğu araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir. Nümerik çalışmada, New Mexico Üniversitesi'ndeki bir dizi araştırmacı tarafından geliştirilen AUTOFRAP bilgisayar programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, modelin

yükleme sırasında çatlakların yayılma yöntemini ve göçme davranışını başarıyla simüle ettiğini göstermiştir. Güçlendirilen kirişlerdeki çatlakların güçlendirilmeyen kirişlerdeki çatlaklara göre daha az ve daha küçük olduğu ve eğilme alanındaki güçlendirme plakalarının uzunluğunun, göçme durumu üzerinde büyük bir etkisi olduğu bulunmuştur. Nümerik model, diğer tüm parametrelerin sabit kalması durumunda, beton kapağın ayrılması nedeniyle kısa plakalarla güçlendirilen kirişlerin göçme ihtimalinin yüksek olduğunu göstermiştir (Yang vd 2003).

Santhakumar ve Chandrasekaran (2004) tarafından yapılan çalışmada, 1997 yılında karbon liflerle kesmeye karşı güçlendirilen kirişler üzerine yapılan deney çalışmasına modelleme yapılmıştır. Çalışma, 45° ve 90° açılı karbon liflerle güçlendirilmiş kirişler ve karşılaştırma yapmak için güçlendirilmemiş kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, modellemede ANSYS sonlu elemanlar programının ne kadar verimli kullanıldığını ortaya çıkarmaktır. Betonü temsil etmek için *Solid 65* elemanı, donatıyı temsil etmek için *Link 8* elemanı ve karbon lifleri temsil etmek için *Solid 46* elemanı kullanılmış ve beton ile karbon lifler arasındaki bağlantının tam bağlantı olduğu varsayılmıştır. Sonuçta, nümerik analiz sonuçları, deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, ANSYS'teki göçme kuvvetinin deney modellerine göre % 8 daha fazla olduğu, deplasmanın ise tüm kirişler için nümerik modellerde % 10,5 daha büyük olduğu görülmüştür (Santhakumar ve Chandrasekaran 2004).

Elyasian vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada, ANSYS programı yardımıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak karbon liflerle kesmeye karşı güçlendirilen kirişler üzerinde çalıştıkları deney çalışmasının modellemesi incelenmiştir. Modelleme beş kiriş için yapılmış ve güçlendirme, birincisinde 90° açılı, ikincisinde 45° açılı, üçüncüsünde, birincisi 45° ve ikincisi 0° açılı iki katman karbon lifler ve dördüncüsünde birincisi 90° derecelik, ikincisi 0° açılı karbon lifler kullanılarak yapılmıştır. ANSYS'te kirişi modellemek için kullanılan elemanlar, beton için *Solid 65*, donatı için *Link 8* ve karbon lifler için *Shell 43*'tür. Bunun yanı sıra, mesnetlerin altındaki çelik plakaları temsil etmek için *Solid 45* kullanılmıştır. 90° açılı liflerle güçlendirmenin kirişlere daha fazla dayanım ve daha fazla süneklik sağladığı, 0° açılı liflerle güçlendirme ise sadece çatlakların yayılmasını önlediği ve kirişin dayanımını önemli ölçüde etkilemediği gözlemlenmiştir. Çalışmada, genel olarak karbon liflerle güçlendirmenin çatlakların gelişmesini etriyelerden daha iyi bir şekilde engellediği bulunmuştur. Çalışma, modellerin deney sonuçlarıyla yüksek derecede tutarlı sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu nedenle, daha sonra etriyeler arasındaki mesafe, çeliğin çaplarının değişmesi ve betonun basınç kuvvetinin değişmesi gibi birçok değişken incelenmiştir (Elyasian vd 2006).

Hashemi vd (2007) tarafından yapılan çalışmada, karbon liflerle güçlendirme yöntemi kullanılarak yüksek dayanımlı beton içeren betonarme kirişler incelenmiştir. Çalışma 6 kiriş üzerinde yapılmıştır. Bunların 4'ü, birincisi tek bir katman ile güçlendirme, ikincisi üst üste 4 katman ile güçlendirme olmak üzere iki farklı yöntemle eğilmeye karşı güçlendirilmiş ve 2'si karşılaştırmalı kiriş olarak güçlendirmesiz bırakılmıştır. Betonü temsil etmek için *Solid* 65 elemanı, donatıyı temsil etmek için *Link* 8 elemanı ve karbon lifleri temsil etmek için *Solid* 46 elemanı kullanılmış, beton ile karbon lifler arasındaki bağlantının tam bağlantı olduğu varsayılmış ve yük –deplasman eğrileri incelenmiştir. Çalışmanın amacı, karbon liflerin, kirişlerin eğilmeye karşı dayanım kuvvetlerini artırma kabiliyetini ortaya çıkarmak ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deney kirişlerine mutabık modeller geliştirmektir. Sonuçlar, karbon liflerin yüksek mukavemetli kirişlerde çatlakların gelişmesini önleme kabiliyetini göstermiştir. Deney sonuçları nümerik sonuçlarla karşılaştırıldığında ANSYS modellerindeki kirişlerin dayanım kuvvetinin deney modellerine göre % 9 daha fazla olduğu bulunmuştur (Hashemi vd 2007).

Camata vd (2007) tarafından yapılan çalışmada, Colorado Üniversitesi'nde geliştirilen sonlu elemanlar yöntemini kullanan program olan Merlin'de modellenerek karbon lifler plakaları ile eğilmeye karşı güçlendirilmiş döşemeler ve kirişler incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, göçmenin durumlarını ve deney sonuçlarının Merlin'de yapılan modelleme sonuçlarıyla ne ölçüde eşleştiğini incelemektir. Betondaki çatlaklar, yapışkan katmanın davranışı ve plakaların uzunluğu gibi değişkenlerin kırılma mekanizmaları üzerine etkisi incelenmiştir. Programda geliştirilen modeller deney çalışması ile tutarlı sonuçlar vermiştir. Uzun plakalarla güçlendirme yapıldığında, göçmenin kirişin ortasında meydana geldiği, oysa kısa plakalarla güçlendirildiğinde göçmenin plakaların sonlarında meydana geldiği gözlemlenmiştir. Plakaların genişliğinin kiriş genişliğine oranının göçmenin oluşumunda ve hesaplanmasında çok önemli bir oran olduğuna varılmıştır. Ayrıca, sonlu eleman modeli analizi, eğilme çatlakları arasındaki mesafenin dikkate alınması gereken önemli bir değişken olduğunu göstermiştir (Camata vd 2007) .

Barros vd (2007) tarafından Birincisi, yüzeye yakın montaj (NSM) ile güçlendirme ve ikincisi, dışarıdan güçlendirme (EBR) olarak adlandırılan karbon liflerin dışarıdan yapıştırılması ile güçlendirme olmak üzere betonarme kirişleri güçlendirmek için iki farklı yöntem kullanmanın etkinliğini incelemek amacıyla deney çalışması yapılmıştır. Bu güçlendirme yöntemleri iki grupta yapılmıştır. Birinci grup eğilmeye karşı güçlendirilmiş ve iki farklı güçlendirme yöntemi olan NSM ve EBR'nin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu grupta ayrıca, donatı oranının yanı sıra karbon lifler şeritleri arasındaki mesafenin güçlendirme

üzerindeki etkisi NSM yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. İkinci grup ise, kesmeye karşı güçlendirilmiş ve NSM yöntemiyle güçlendirmenin etkisi incelenmiştir. Bu grupta, birincisi kesmeye karşı hiç güçlendirilmemiş, ikincisi etriyelerle güçlendirilmiş, üçüncüsü EBR güçlendirme yöntemiyle U şeklinde karbon liflerle güçlendirilmiş ve dördüncüsü MSN yöntemiyle yatay açılı ve 45 derecelik açılı karbon liflerle güçlendirilmiş olmak üzere dört kiriş incelenmiştir. NSM yöntemiyle güçlendirilmiş kirişlerin dayanımındaki artış %83 iken EBR yöntemiyle güçlendirilmiş kirişlerin dayanımındaki artış % 54 olmuştur. Dolayısıyla, NSM yöntemiyle güçlendirmenin EBR yöntemiyle güçlendirmeden daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 45 açılı karbon liflerle güçlendirmenin 90 açılı karbon liflerle güçlendirmeden daha etkili olduğu, demir etriyelerle ve karbon lifli etriyelerle güçlendirmenin sonuçlarının neredeyse aynı olduğu tespit edilmiştir (Barros vd 2007).

Sundarraja (2009) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişleri kesmeye karşı güçlendirmenin iki yöntemi incelenmiştir. Birinci yöntemde kirişin her iki tarafına yapıştırılan eğik GFRP (fiberglas polimerler) şeritleri kullanılırken ikinci yöntemde u-wrap şeklinde GFRP şeritleri kullanılmıştır. Eğik şeritlerle güçlendirilen kirişlerin dayanımındaki en yüksek artış %50 iken u-wrap şeklindeki şeritlerle güçlendirilen kirişlerin dayanımındaki artış %50'yi aşmıştır. Güçlendirilmiş kirişlerdeki çatlaklar, profili aynı olan karşılaştırma kirişlerine kıyasla daha yüksek bir yükte ortaya çıkmıştır. U-Wrap şeklindeki şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin sınır yükü, kirişin iki yanına yapıştırılan şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerin sınır yükünden daha yüksek olmuştur. Eğik şeritlerin bulunması, diyagonal çatlakların gelişimini engellemiştir ve eğrinin (yük - deplasman) davranışının daha iyi hale geldiği görülmüştür. Ayrıca, eğilmede göçme, eğik şeritlerin bulunduğu kesmedeki göçmeden daha yaygındı, bu da kirişlerin ani göçmesinden kaçınmak anlamına gelmektedir (Sundarraja 2009).

Kesmeye karşı güçlendirmek için lifleri betonarme kirişe yapıştırma yönünün etkisini incelemek amacıyla Nadeem (2009) tarafından, eğilmeye karşı güçlü ve kesmeye karşı zayıf olacak şekilde tasarlanan basit mesnetli üç betonarme kiriş üzerinde çalışma yapılmıştır. Birinci kiriş karşılaştırma kirişi olmak üzere güçlendirmesiz bırakılmıştır. İkinci kiriş 90° açılı CFRP şeritleri kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Üçüncü kiriş ise, 30° açılı CFRP şeritleri kullanılarak güçlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kesitin kesmeye dayanım kuvvetinde gözle görülür bir artış göstermiştir. Eğik CFRP şeritlerinin, 90° açılı şeritlerin kullanımına kıyasla kesitin dayanım kuvvetini ve deplasman kabiliyetini artırmada daha etkili olduğu bulunmuştur. Bunun nedeni ise eğik şeritlerin, diyagonal gerilme kuvvetlerinin neden olduğu çatlakların genişlemesini önlemede dikey şeritlerden daha etkili olmasıdır. Karşılaştırma kirişindeki göçme, kesme üzerinde olmuştur. Mesnette başlayan çatlak, uygulanan yükün artmasıyla

birlikte göçmenin meydana gelmesine kadar 45° açıyla devam etmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerdeki göçmenin nedeni ise, eğik şeritlere kıyasla dikey şeritlerde daha çok meydana gelen CFRP şeritleri ile kiriş yüzeyi arasındaki kenetlenmenin kaybolmasından kaynaklanmaktadır (Nadeem 2009).

Ibrahim (2009) tarafından yapılan çalışmada, karbon lifler ve cam lifler ile güçlendirilen kirişler için modelleme çalışması yapılmıştır. Kirişlerin bir kısmında tek bir güçlendirme katmanı, bir kısmında iki güçlendirme katmanı kullanılırken bazıları tamamen karbon liflerle sarılmıştır. Tüm güçlendirme işlemleri, kirişleri sadece kesmeye karşı güçlendirmek için yapılmıştır. Modellemeden sonra kirişin ortasında yük-deplasman eğrisinin sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar, karbon liflerin, kesmeye karşı güçlendirmede cam liflerden daha etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, karbon liflerin eklenmesinin, kirişlerin davranışını, kirişin uçlarına yakın kesme göçmesinden kirişin ortasında eğilme göçmesine değiştirdiği bulunmuştur. Çalışma, deney sonuçları ile nümerik sonuçlar arasında bir tutarlılığın olduğunu göstermiştir. Ancak ANSYS sonuçları deney sonuçlarından biraz daha hassas olmuş ve tüm vakalar için göçme yükleri arasındaki maksimum farkın %7,8 olduğu bulunmuştur (Ibrahim ve Mahmood 2009).

Al-Obaidat (2010) tarafından dört benzer kiriş üzerine çalışma yapılmıştır. Bunlardan ikisi karşılaştırma için kesmeye güçlendirmesiz bırakılırken kalan kirişler, kesmeye karşı 300 mm uzunluğunda ve 50 mm genişliğinde CFRP şeritleri ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilmemiş iki kiriş, ince bir şekilde kesme üzerine göçerken, güçlendirilmiş iki kiriş ise, şeritler ile beton yüzeyi arasındaki kenetlenme kaybının sonucu olarak göçmüştür. Güçlendirilmemiş kirişlerin sınır yükü 220 kN iken güçlendirilmiş kirişlerin sınır yükü 270 kN olmuştur. Dolayısıyla kirişin kesmeye karşı dayanım kuvvetindeki artış %23 olmuştur. Bunun yanı sıra, güçlendirilmiş kirişlerdeki çatlakların genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Al-Obaidat 2010).

Vulaş (2010) tarafından yapılan çalışmada, kırılma mekanizmalarını ve farklı güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini doğrulamak için kesmeye karşı karbon lifler ve cam lifler ile çeşitli yöntemlerle güçlendirilen T-kirişler incelenmiştir. Güçlendirme işlemi, epoksi yapıştırıcısı ve ankraj çivileri yardımıyla lifler U harfi şeklinde yapıştırılarak CFRP, GFRP ve Hi-CFRP olmak üzere çeşitli lif türleriyle yapılmıştır. Çalışmada, lifleri ankraj çivileriyle sabitlemenin, yalnızca epoksi ile yapıştırmaktan daha etkili olduğu, karbon lifleriyle güçlendirmenin, cam liflerden daha etkili olduğu bulunmuş, kenarları düşük bir yükte kırılarak U harfi şeklinde yapıştırmanın etkisi olduğu ve kırılma bir malzeme olduğu için Hi-CFRP cam liflerin kullanılmaması önerilmiştir (Vulaş 2010).

Farklı uzunluklarda CFRP şeritleri kullanmanın etkisini test etmek için Al-Obaidat vd (2010) tarafından güçlendirilmiş kirişler için bir model oluşturmak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış ve Şekil 10'de gösterildiği gibi biri, 100 mm, 200 mm ve 300 mm uzunluklarında 90° açılı şeritlerle güçlendirme, ikincisi, 100 mm, 200 mm ve 300 mm uzunluklarında 45° açılı şeritlerle güçlendirme olmak üzere iki güçlendirme yöntemi test edilmiştir. Kirişin modellenmesi, ABAQUS yazılımı kullanılarak yapılmış ve diyagonal çatlaktan kaynaklanan kesme gerilmelerinin yoğunlaşması nedeniyle betonarme ile karbon lifler arasındaki kenetlenmenin kaybindan dolayı tüm kirişlerin göçtüğü bulunmuştur. Çatlakların şeritlerin uçlarından geçmesinden dolayı 200 mm veya 100 mm uzunluğundaki şeritlerin kirişi güçlendirmede gözlemlenmiştir. Ayrıca, kiriş kesitinin ortasındaki alanın göçme sürecinde sınır alanı olması ve 200 mm uzunluğundaki şeritlerin sonlarının bu alanda bulunmasından dolayı 200 mm uzunluktaki şeritlerin 100 mm uzunluktaki şeritlerden daha önce göçtüğü fark edilmiştir. Kesme çatlağının diyagonal şekilde yayıldığı için, şeritlerin yönü bir etkiye sahip olmalıdır. Bu nedenle, tüm uzunluklar için 45° açılı şeritler, 90° açılı şeritlere kıyasla daha büyük bir yük kapasitesi taşıma kabiliyeti göstermiştir. 90/300, 90/200 ve 90/100 şeritlerinin dayanım kuvvetindeki değişim sırasıyla %11,9, %1,8 ve %1,1 iken 45/300, 45/200, 45/100 şeritli betonarme kirişlerin kesmeye karşı dayanım kuvvetindeki artışın, karşılaştırma kirişine göre sırasıyla %20,1 , %2 ve %5 olduğu kaydedilmiştir. Bu da, şeritlerin yönünün güçlendirilmiş kirişin davranışı üzerindeki etkisini doğrulamaktadır (Al-Obaidat vd 2010).

Attari (2012) tarafından yapılan analitik ve deneysel çalışmada, içinde cam lifler ve karbon lifler bulunan HFRP plakaları, cam lif plakaları ve karbon lif plakaları kullanılarak eğilmeye karşı güçlendirilen bir grup betonarme kiriş incelenmiştir. Güçlendirme işlemi, aynı veya farklı türden iki katmanla güçlendirme, ankrajlarla güçlendirme, U-şeklindeki liflerle veya cam lifler ve karbon liflerden oluşan HFRP ile güçlendirme olmak üzere çeşitli yöntemlerle yedi kiriş üzerine yapılmıştır. Sonuçlar, iki farklı lif katmanı ile güçlendirmenin çok etkili olduğunu ve kirişin dayanımında % 114 artış elde edildiğini göstermiştir. Diğer güçlendirme yöntemlerine kıyasla, iyi uzanıma sahip olduğu için ister tek başına bir katmanda ister karbon ve cam lifleri içeren bir hibrit doku içinde olsun cam liflerle güçlendirmenin, yavaşça başlayan göçmeye yol açtığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal modeller ise, deneysel sonuçlarla tatmin edici bir şekilde uyumlu olmuştur (Attari 2012).

Choi (2013) tarafından, hibrit karbon lifler ile eğilmeye karşı güçlendirilmiş kirişlerin analitik ve deneysel çalışmasını içeren bir araştırma yürütülmüştür. Kirişler, ya karbon lifli veya cam lifli bir veya iki katman, ya da birincisi karbon lifli ve ikincisi cam lifli iki farklı katman olmak üzere farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Bu kirişler, ABAQU programında modellenmiş

ve ayrıca 3 hibrit katmanla güçlendirme durumunda ödüllerin davranışını tahmin etmek için parametrik bir çalışma yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, daha sert ve daha ince malzeme olan karbon liflerin bir veya iki katmanıyla güçlendirilen kirişlerin kırılma mukavemetinin, daha kalın ve daha az sert olan GFRP katmanlarının kırılma mukavemetinden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, hibrit katmanlı güçlendirme durumundaki en iyi güçlendirme yönteminin, CFRP karbon liflerin betona yapıştırılmasından sonra üzerine GFRP cam liflerin yapıştırılması olduğu bulunmuştur. Araştırmacılar, çökme türünün genellikle çalışmada kullanılan yapıştırıcı türüne bağlı olduğu tespit edilmiştir. Analitik çalışmanın sonuçları, deneysel sonuçlarla yakınsama ve uyum göstermiştir. Ancak göçme, analitik çalışmada daha erken meydana gelmiştir (Choi 2013).

Baggio vd (2014) tarafından, CFRP, GFRP ve FRCM (*fiber reinforced cementitious matrix*) olmak üzere üç tür karbon lifler kullanılarak farklı yöntemlerle kesmeye karşı güçlendirilen 9 betonarme kiriş üzerine deney çalışması yapılmıştır. Kullanılan güçlendirme yöntemleri ise şu şekildeydi: Kısmi derinlikte U şeklinde güçlendirme, tam derinlikte U şeklinde güçlendirme ve ankrajla güçlendirme. Güçlendirmede en güçlü lif türü CFRP, ardından GFRP ve FRCM'nin olduğu bulunmuştur. Deney sonuçları, FRP plakalarının uygulanmasının kirişin kesmeye karşı dayanımını artırdığı, tam derinlikte U şeklinde sarılmış FRP plakalarının kısmi derinlikte U şeklinde sarılmış FRP plakalarına göre daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, FRP ankrajlarının kullanılması, kirişlerin kesme kuvvetlerine karşı dayanımını artırdığı, FRP ile güçlendirmenin, göçme durumunu kesme nedeniyle göçmeden eğilme nedeniyle göçmeye değiştirebileceği ve karbon liflerin sökölme sürecini geciktirdiği tespit edilmiştir (Baggio vd 2014).

Ibrahim (2014) tarafından yapılan çalışmada, kesmeye karşı güçlendirmek için cam lifler şeritleriyle desteklenen betonarme kirişler modellenerek GFRP ile kesmeye karşı güçlendirilen kirişlerin davranışını modellemek için önerilen bir modeli kullanmanın etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışmadaki kirişler, birincisi karşılaştırma yapmak için güçlendirmesiz kirişler, ikincisi 90° açılı dikey şeritlerle güçlendirilmiş kirişler ve üçüncüsü 45° açılı eğik şeritlerle güçlendirilmiş kirişler olmak üzere üç gruptan oluşmuştur. Sonuçlar, birinci grupta göçme yükünün deneme kirişlerinin göçme yükünden %4 daha fazla olduğunu, ikinci grupta modellenen kirişlerin göçme yükünün deney kirişlerine göre %1,8 daha az olduğunu ve üçüncü grupta modellenen kirişlerin göçme yükünün deneme kirişlerine göre %1,16 daha az olduğunu göstermişti. Bu küçük değişikliklerin nedeni, gerçekte üç aşamadan oluşan ancak burada yalnızca iki aşamadan oluşan basitleştirilmiş gerilme-yerdeğiştirme eğrisinin çelik için

kullanılmasına ve ANSYS'te çatlak oluşum mekanizmasının gerçekte olandan farklı olmasına bağlanmıştır (İbrahim 2014).

Hawileh (2014) tarafından, çeşitli yöntemler kullanılarak karbon fiberlerle yalnızca eğilmeye karşı güçlendirilmiş beş betonarme kirişlerin davranışının deneysel ve analitik bir çalışması gerçekleştirilmiştir. birincisi kontrol kirişi olarak güçlendirmesiz bırakılmış, ikincisi CFRP ile güçlendirilmiş, üçüncüsü GFRP ile güçlendirilmiş ve geri kalan iki kiriş ise, çoklu katmanla güçlendirme anlamına gelen hibrit FRP ile güçlendirilmiştir. kirişlerin eğilmeye karşı dayanımındaki artışın % 30 ile % 98 arasında değiştiği ve en yüksek artışın hibrit karbon lifler katmanlarıyla güçlendirilmesine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte deneysel çalışmanın sonuçları ile analitik çalışmanın sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu ve aralarındaki farkın % 5 ile % 17 arasında değiştiği bulunmuştur (Hawileh 2014).

Al-Assi (2014) tarafından yapılan çalışmada, ANSYS programı yardımıyla kirişin alt bölümüne farklı uzunluklarda karbon lifler yerleştirilerek karbon lifler uzunluğunun betonarme kirişlerin dayanımına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada, ANSYS sonuçlarının deney sonuçlarından en kötü durumlarda sadece % 11 farklı olduğu, ideal güçlendirme uzunluğunun, etkin uzunluğun % 80'ini kaplayan uzunluk olduğu, % 80'den küçük herhangi bir uzunluğun kirişin dayanım kuvvetini fark edilir bir değer kadar düşürdüğü ve bu yüzdenin üzerine çıkmanın ise kirişin dayanım kuvvetini, güçlendirme malzemelerinin maliyetini düşürmek için ihmal edilebilecek küçük bir değer kadar artırdığı bulunmuştur (Al-Assi 2014).

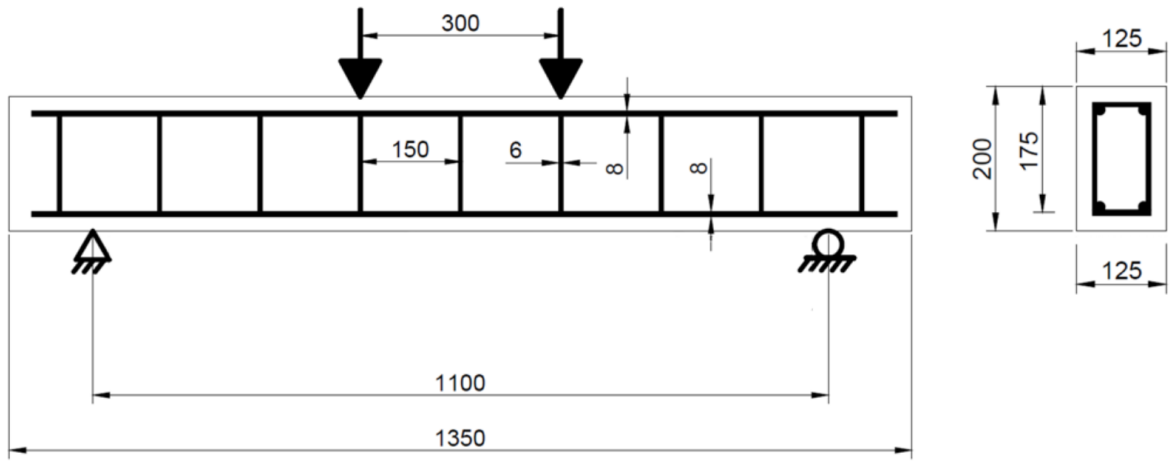
Betonarme kirişlerin tamamen karbon liflerle sarılmasının fizibilitesini öğrenmek için Mhanna (2019) tarafından yapılan çalışmada, birincisi U şeklinde karbon liflerle güçlendirilmiş T-kirişi, ikincisi ve üçüncüsü karbon liflerle tamamen sarılmış olmak üzere toplam üç kiriş kesmeye karşı güçlendirilmiştir. U şeklindeki karbon liflerle güçlendirilen T-kirişinin dayanımı % 114,2 artarken karbon liflerle tamamen sarılmış kirişin dayanımı % 201,6 artmıştır. Böylelikle, kirişin tamamının güçlendirilmesinin, U şeklindeki güçlendirmeden daha etkili olduğu bulunmuştur. Ancak bu yöntem, uygulamada kirişin sarmayı engelleyen çeşitli engellerle çevrelendiği için yapıların güçlendirilmesinde tercih edilmemektedir (Mhanna 2019).

MATERYAL VE YÖNTEM

Modellemesi Yapılan Kirişlerin Tanıtılması

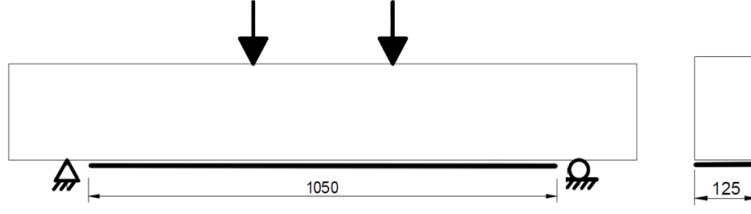
Bu çalışmadaki modelleme, tümüne karbon plakalar uygulanmış 5 kirişten oluşan Li vd (2001) tarafından yapılan bir deney çalışması verileri kullanılarak yapılmıştır (Li vd 2001).

Bu deney çalışmasının seçilmesinin nedeni, kullanılan kirişlerin boyutlarının küçük olmasıdır. Bu da, modellemenin sorunsuz geçmesi ve bilgisayarın zorlanmaması için kullanılan bilgisayar kapasitesi ile ilgili bir durumdur. Kirişler, donatı düzeni, boyutlar ve yükleme yöntemi bakımından tamamı aynı iken yalnızca karbon liflerin yerleşimi değiştirilmiştir (Şekil 11). Şekil 9'da kirişin genel bir açılımı bulunmaktadır:



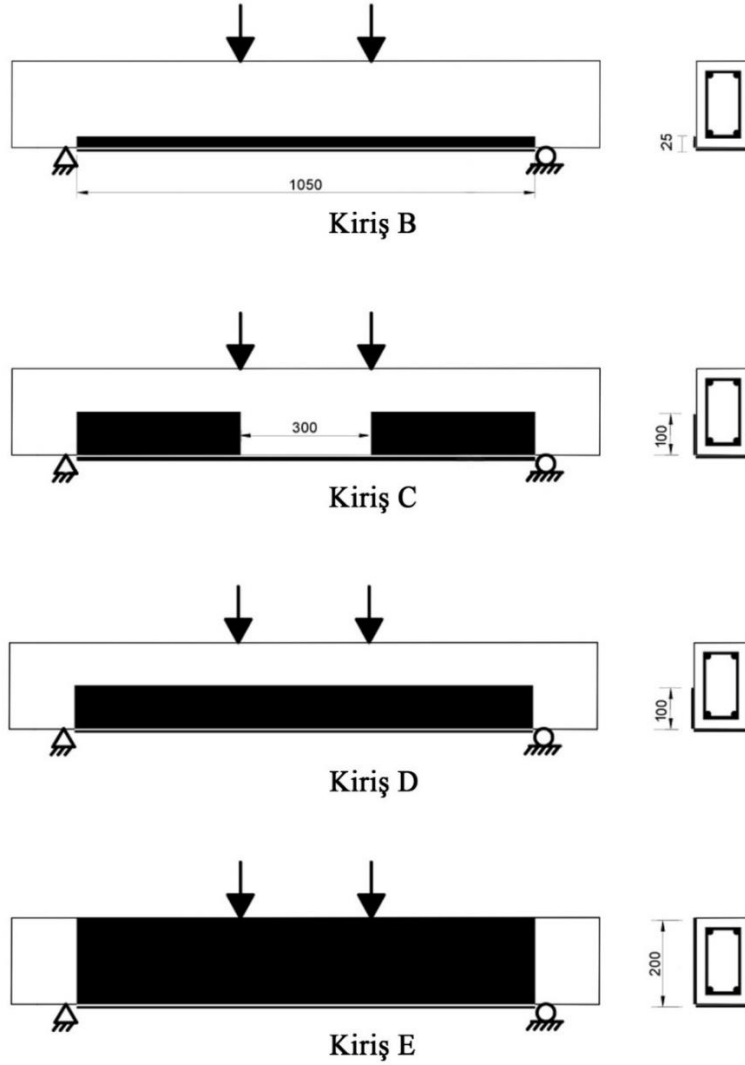
Şekil 9. Deney çalışmasında kullanılan kiriş detayı

Kirişlerin boyutları 125 mm x 200 mm x 1350 mm, mesnetler arasındaki etkili uzunluk 1100 mm ve aralarındaki mesafe 300 mm olan her biri $F/2$ değerinde kirişin ortasına iki simetrik kuvvet uygulanmıştır. Bu yükleme yöntemi, eğilme dayanımının belirlenmesi için seçilmiştir. Bu yöntemde kesme kuvvetleri olmayan net bir eğilme dayanımı elde edilir. Bu da, İki yükleme noktası arasındaki alanın sabit momente maruz kaldığı ve kesme kuvvetleri olmadığı bulunan kesme ve moment grafiklerinde görülür. Donatı ise, 8 mm çapında üstte iki ve altta iki çubuk şeklinde olmuştur. Etriye ise, $S = 150$ mm aralıklı 6 mm çapında ve beton üzerindeki beton örtü kalınlığı 25 mm dir. Karbon lif, aşağıdaki şekillerde gösterildiği gibi, kirişi eğilmeye ve çekmeye karşı güçlendirmek için kullanılmıştır:



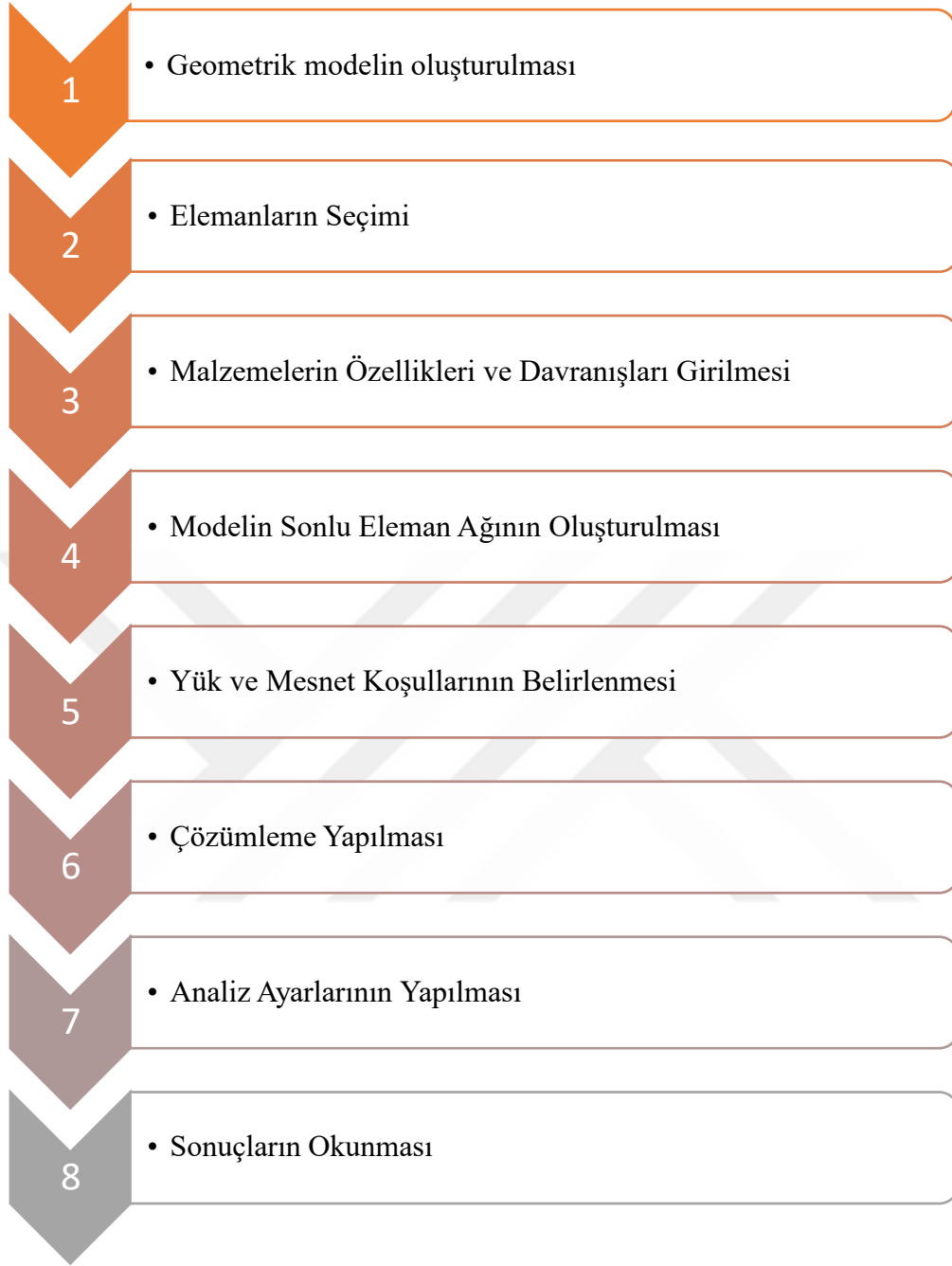
Şekil 10. Eğilmeye karşı güçlendirilen Kiriş A

Bu kiriş Şekil 10'da, 1 mm kalınlığında, 1050 mm uzunluğunda ve 125 mm kiriş genişliğinde kirişin altına yerleştirilerek sadece eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Kalan kirişler, Kiriş A'daki aynı boyutlara sahip CFRP levhaları ile eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı güçlendirme ise, boyutları farklıdır. Tüm güçlendirme yöntemlerinde ankraj yapılmamış, CFRP levhalar epoksi yapıştırıcı ile betona yapıştırılmıştır. Ve aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 11. Eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilen B, D, C ve E Kirişleri

Çalışmayı Modelleme Adımları (Altunışık vd 2018)



Şekil 12. ANSYS sonlu elemanlar programı ile analizin adımları

Geometrik modelin oluşturulması

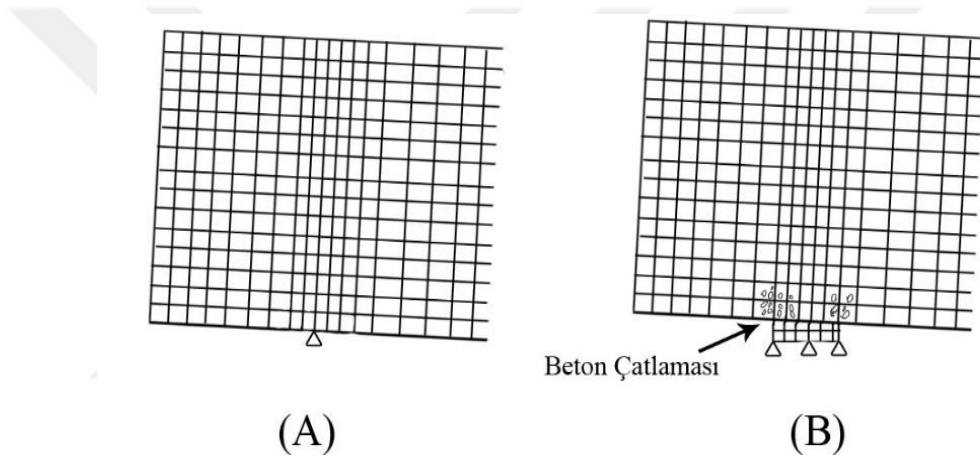
İlk olarak, modellemeye başlamadan önce, iki boyutlu mu yoksa üç boyutlu mu, simetrik mi, bir simetri eksenini var mı yoksa bir veya iki düzlem etrafında mı simetrik gibi sorularla modellemek istenen modelin düşünülmesi gerekir.

Tek bir modelin çeşitli şekillerde modellenebileceği unutulmamalıdır, ancak bu yöntemlerin tümü *Modeling* menüsünden yapılır. Problemin iki boyutlu olması durumunda temel ve basit yöntemde, ilk olarak noktalar koyulur, sonra bu noktalar çizgiler oluşturacak

şekilde birbirine bağlanır ve daha sonra alanlar oluşturulur. Problemin üç boyutlu olması durumunda ise, ikili alanlar oluşturulur, daha sonra bu alanlara alt menülerden derinlik eklenir.

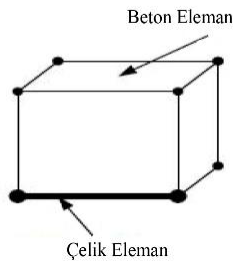
Bilinen bazı sabit formlar için alt menülerden bir model oluşturulabileceğine dikkat edilmelidir. Çalışmamın konusuna gelince, beton, blokun koordinatları girilerek üç boyutlu bir blok çizilerek oluşturulacaktır.

Yükleri ve mesnetleri uygulamak için, bazıları kirişin yüzeyine plakalar koyup yükleri bunların üzerine uygular. Ancak, modellemede plakaları kaldırıp yükleri doğrudan uygulamakla sonuçların daha doğru olacağı ve daha kolay uygulanacağı bulunmuştur. Çünkü plakalar, kirişi sabitler ve gerçekliğin tersi olan dönmesini önlerler ve bu, plakanın yerleştirildiği alanlar üzerindeki betonda çatlakların oluşmasına yol açar. Bu yüzden modellemede şekil 13 (A) yöntemi benimsenecektir.



Şekil 13. Mesnetler modelleme yöntemi

Aynı yöntem yüklerin uygulanması için de geçerlidir ve yükler doğrudan kirişe uygulanacaktır. Donatıya gelince, Şekil 14'te gösterildiği gibi donatı noktaları beton elemanların noktalarına tam oturarak beton ile donatı arasında tam aderans olduğu varsayılmıştır.



Şekil 14. Donatı çeliğinin betonla bağlantısı

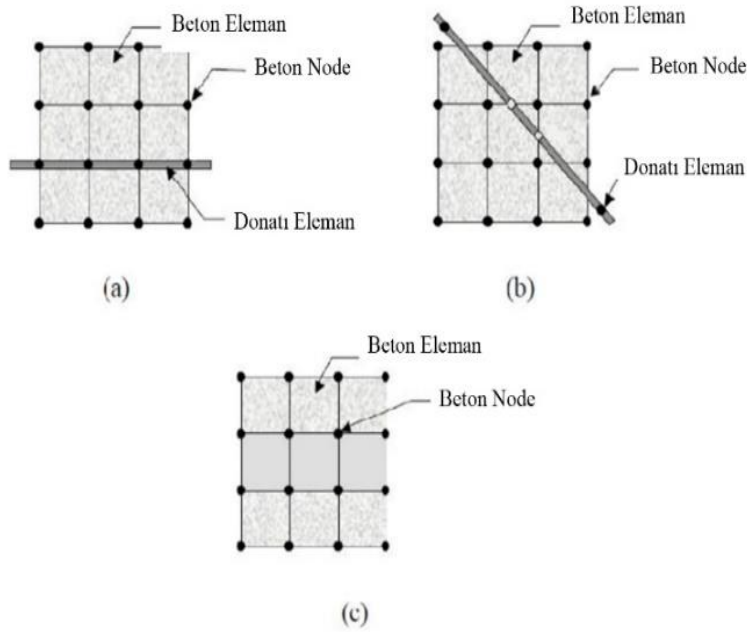
Donatı çeliğinin sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak modellenmesine gelince, üç model vardır, bunlar (Salman 2018):

- 1- Ayırık Model (*Discrete Model*)
- 2- Gömülü Model (*Embedded Model*)
- 3- Sürülmüş Model (*Smearred Model*)

Donatının modellenmesi için en iyi yöntemin Ayırık Model (Tavarez 2001) olduğu bulunup bu çalışmada benimsenmiştir.

Ayrık Model:

Donatı modellemesi, çubuk eleman veya kiriş eleman kullanılarak yapılır. Şekil 15(a)'da gösterildiği gibi sonlu elemanlara böldükten sonra bu elemanların düğüm noktaları betonun düğüm noktalarıyla birlikte çalışmış olur. Böylece, donatı ile betonun düğüm noktaları ortak olacaktır. Bu yöntemle ilgili sorun, beton düğümlerin donatı düğümlerine tam oturduğundan betonun ve donatıların sonlu elemanlara bölünmesi kısıtlı olacaktır.



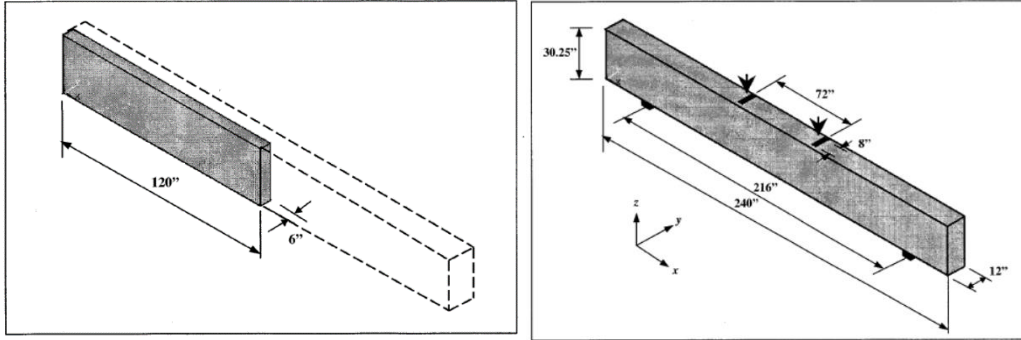
Şekil 15. Beton içinde donatının modellenmesi (Salman 2018)

Etriye gelince, sadece bir etriye için modelleme yapılmış ve daha sonra 150 mm aralıklarla kopyalanmıştır.

Karbon lifleri modellemek için, bir blok oluşturulmuş ve bu lifler için koordinatlar girilmiştir.

Çalışma ile ilgili olan kirişler, iki düzlem etrafında simetriktir, yani kirişin çeyreği modellenenebilir, ama bu adım uygulanmamıştır. Çünkü bu adım, kirişler büyük boyutlara sahip olduğunda, bütün kirişin modellemesi karmaşık hesaplamalardan dolayı bilgisayarı yoracağından ani kapanmaya sebep olacaktır. Bu çalışmadaki kirişler küçük boyutlu olduğu

için bu adıma gerek duyulmamıştır (Altunışık vd 2018). Kirişin çeyreğinin modellenmesi Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. ANSYS'te kirişin çeyreğinin modellenmesi (Kachlakev vd 2001)

Elemanların seçimi

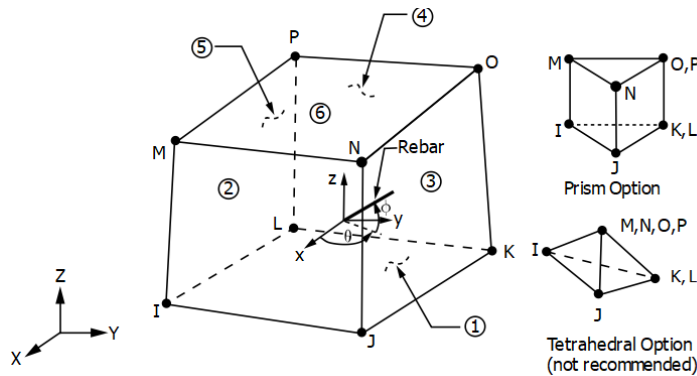
Program, 150'den fazla eleman içermektedir. Bunlar kiriş, çubuk, kabuk, plak, kontak elemanları vb. gibi elemanlardır.

Beton Malzemesinin Seçimi

Betonun modellenmesi için ise literatürdeki tüm çalışmalarda *Solid 65* elemanı seçilmiştir.

Solid 65:

Sekiz düğümden oluşan üç boyutlu bir elemandır. Her düğümün 3 serbestlik derecesi vardır ve X, Y, Z yönünde hareket kapasitesine sahiptir. Şekil 17, Solid 65 elemanının geometrik şeklini göstermektedir.



Şekil 17. ANSYS'taki Solid 65 elemanı (ANSYS 2005)

Solid 65 elemanı, malzemenin doğrusal olmayan davranışı ve X,Y,Z yönlerinde çatlama kabiliyetine ek olarak, basınçta göçme ve çekmede çatlaklar oluşması davranışının modellenebilmesi kabiliyeti ile diğer elemanlardan farklıdır. Beton malzemesi modellenirken

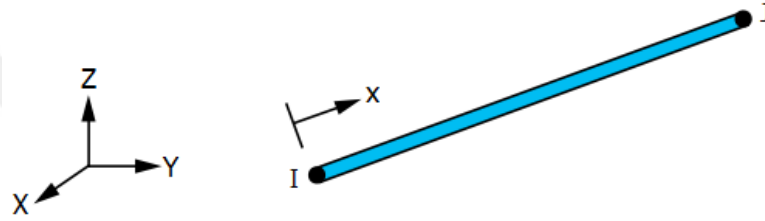
yukarıdakilerin hepsi önemlidir ve bu nedenle *Solid 65* elemanının betonarme modellemesi için çok uygun bir eleman olduğu söylenebilir.

Solid 65 elemanın varsayımları:

- 1- X,Y ve Z yönünde çatlama
- 2- Beton malzemesi izotropik bir malzemedir (her doğrultuda aynı özelliğe sahiptir)
- 3- Modele donatı çeliği yerleştirme imkânı (daha önce açıkladığımız gibi).
- 4- Çatlamanın ve göçmenin yanında elastik özellik gösterebilir.

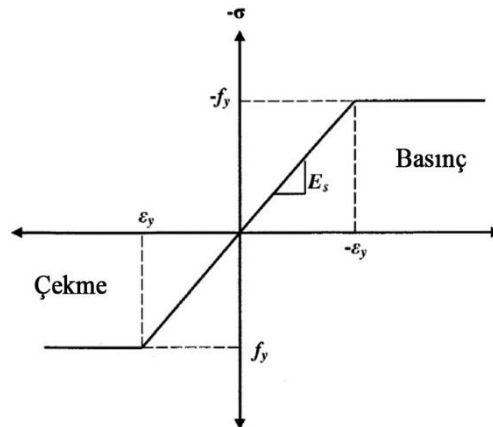
Çelik donatı malzemesinin seçimi

Şekil 18'de gösterildiği gibi her biri 3 serbestlik derecesine sahip iki noktadan oluşan *Link 180* elemanı kullanılmıştır. Bu eleman elasto plastik şekil değiştirme özelliğine sahiptir (ANSYS 2005).



Şekil 18. ANSYS'te link 180 elemanı (ANSYS 2005).

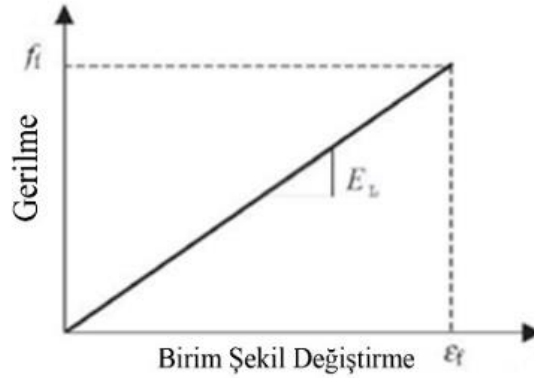
Donatı davranışı, f_y değerine ulaşılan kadar doğrusal elastik davranış gösterirken daha sonra davranışı tamamen plastik olur. Bu davranış çekmede veya basınçta aynıdır ve Şekil 19'da çeliğin davranışı gösterilmektedir (Kachlakev vd 2001).



Şekil 19. (Gerilme-Şekil Değiştirme) donatının basınç ve çekmede davranışı (Kachlakev vd 2001)

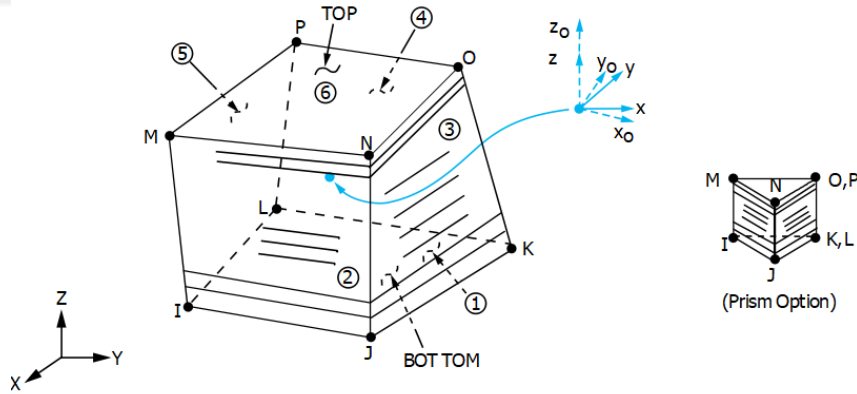
Karbon lif malzemesinin seçimi

Karbon Lifli Polimer bölümünde bahsedildiği gibi bu malzemenin davranışı, göçmeye ulaşana kadar doğrusal elastik davranıştır ve elastik sınırlar içerisinde deforme olduğu için plastik bölgeye ulaşmamaktadır (Şekil 20).



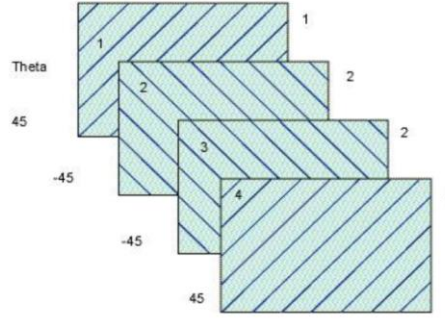
Şekil 20. CFRP davranışı (Çetin 2007)

CFRP'nin modellenmesi için ise program, CFRP şeritlerini temsil etmek için *solid* (katı cisim) eleman ile *layer*(tabaka) eleman arasında değişiklik gösteren bir dizi uygun eleman içermektedir. Bu çalışmada, liflerin modellenmesi *Solid185* elemanı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 21).



Şekil 21. ANSYS'te Solid 185 elemanı (ANSYS 2005)

Eleman *Solid 185*, malzemeyi *Solid* veya *layer* olarak temsil etmek için kullanılabilen, her katman için farklı özelliklere sahip bir dizi katmanın modellenmesine izin veren ve her biri 3 serbestlik derecesi olan sekiz düğüme sahip üç boyutlu bir elemandır. Aşağıdaki şekil, liflerin farklı özelliklerle nasıl modellenebileceğini göstermektedir (ANSYS 2005).



Şekil 22. ANSYS'te farklı açılarda karbon liflerin modellenmesi (ANSYS 2005)

Malzemelerin özellikleri ve davranışlarının girilmesi

Laboratuvarda elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde etmek için ANSYS'te kullanılan betonun, donatının ve karbon liflerin deney malzemeleri ile tamamen aynı özelliklere sahip olması önemlidir. Maddelerin özellikleri gerçek davranışa ne kadar yakın olursa sonuçlar gerçeğe o kadar yakın olur.

Beton malzemesinin özellikleri ve davranışları

Bu araştırmada inceleyeceğimiz betonun mekanik özellikleri arasında basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı bulunmaktadır. Beton malzemenin davranışına gelince, beton davranışını temsil etmek ve gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi çizmek için bilim adamları ve araştırmacılar tarafından geliştirilen birkaç model vardır ve bu çalışmada bunlardan birkaçı denenmiş ve Desayi ve Krishnan modeli uygulanmaya karar verilmiştir.

Desayi and Krishnan Modeli (Kachlakev vd 2001)

Basitliği ve ANSYS programında uygulama kolaylığından dolayı betonun davranışını modellemek için birçok araştırma ve çalışmada kullanılan modeldir. Gerilme denklemleri şu şekilde verilir:

$$f = E_c \times \varepsilon / (1 + (\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0})) \quad (3)$$

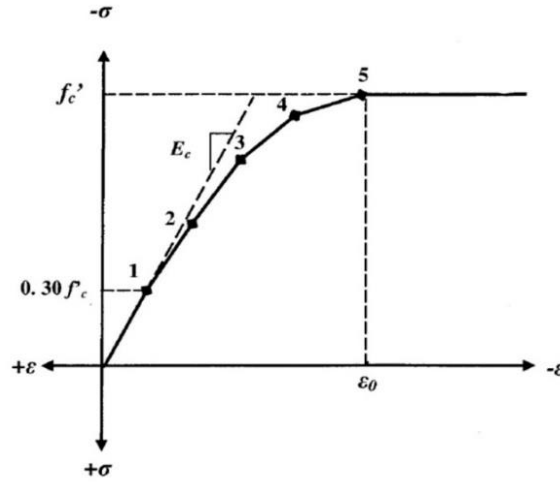
$$\varepsilon_0 = 2 \times \frac{f_c}{E_c} \quad (4)$$

Ayrıca:

$$E_c = f / \varepsilon \quad (5)$$

Beton davranışının, yüklemenin başlamasından gerilmelerin değeri $(0,3 \times f_c)$ 'a eşit olana kadar doğrusal ve bu değerin aşılmasıyla doğrusal olmayan bir davranış gösterdiği

anlaşılmış (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemlerine dayanarak bu çalışmada beton davranışı modellenmiştir. Yani denklem (3.3), betonun doğrusal davranışı aşamasında uygulanırken, denklemler (3.1) ve (3.2), betonun doğrusal olmayan davranışı aşamasında uygulanır. Gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi temsil eden eğri, Şekil 24'te olduğu gibi, eğrinin içinden geçen birkaç noktanın hesaplanması ve saptanmasıyla çizilmiştir.

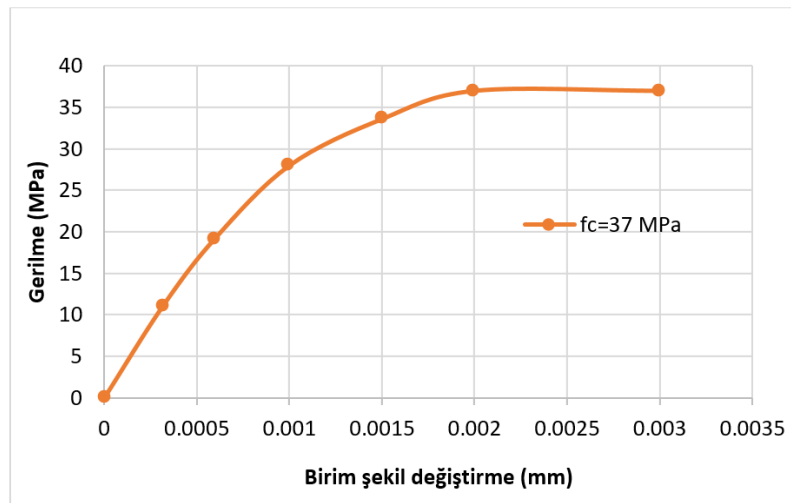


Şekil 23. Desayi and Krishnan modeline göre gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi (Kachlakev vd 2001)

Daha önce verilen (3.1), (3.2) ve (3.3) denklemlerine dayanarak Tablo 2'deki gösterilen sonuçlar elde edilmiş ve Şekil 24'te gösterildiği gibi gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi çizilmiştir.

Tablo 2. Desayi ve Krishnan modeli sonuçları

Birim Şekil Değiştirme (mm)	0	0.00032	0.0006	0.001	0.0015	0.002	0.003
Gerilme (MPa)	0	11.1	19.266	28	33.6	37	37

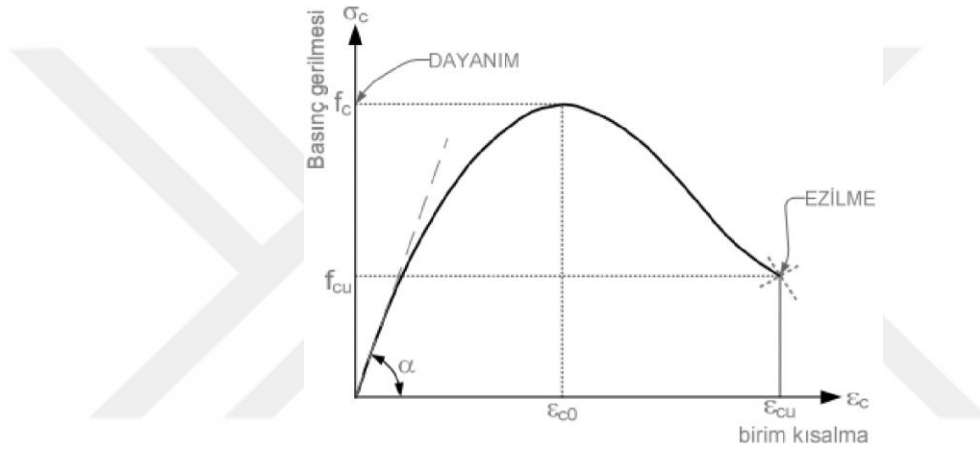


Şekil 24. Çalışmada kullanılan gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

Betonun basınç dayanımı:

Betonun en önemli mekanik özelliği, beton sınıfının belirlenmesinde kullanılan basınç dayanımıdır. Betonun dayanımını ölçmek için beton numuneleri çapı 150 mm, uzunluğu 300 mm veya çapı 160 mm ve uzunluğu 320 mm olan silindirik veya küp kalıplara yerleştirilir.

Beton döküldükten 28 gün sonra, preslerde eksenel basınç ile kırılıp basınç dayanımı belirlenir. Bu çalışmada, 160 mm çapında ve 320 mm uzunluğunda numuneler alınmış ve basınç dayanımı 37 MPa olarak bulunmuştur. Betonun basınç dayanımı, numunelerin geometrisi ve boyutları, yükleme hızı, malzeme oranları ve deney presi gibi birçok değişkenden etkilenmektedir. Genel olarak, betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 25'te gösterildiği gibi verilir (Camata vd 2007).



Şekil 25. Beton basınç eğrisi (Camata vd 2007)

Betonun çekme dayanımı

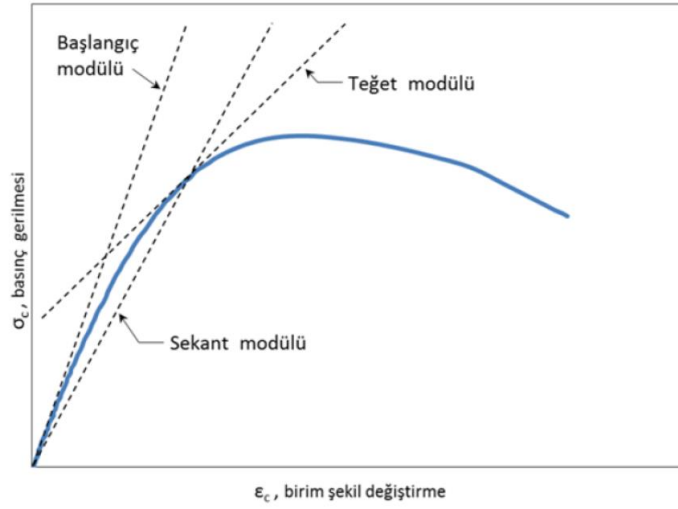
Genel olarak, betonun çekme dayanımı beton kalitesine göre değişir ve betonun basınç dayanımına göre nispeten düşüktür. Genellikle, basınç dayanımının % 7 ile %17'si arasında değişir ve farklı şekillerde belirlenir, ancak burada aşağıdaki denklemde belirtilen ACI koduna göre kabul edeceğiz:

$$f_{ctk} = 0.62\sqrt{f_c} \quad (6)$$

Betonun elastisite modülü:

Betonun elastisite modülünü hesaplamak, özellikleri zamanla değiştiği için zordur. betonun elastisite modülünü hesaplamak için çeşitli yöntemler bulunmakta ve gerilme - birim şekil değiştirme eğrisi aracılığıyla yapılmaktadır. Birinci yöntem, betonun gerilme - birim şekil değiştirme eğrisinin, doğrusal elastik bölgesinin eğimi olan başlangıç modülünün kullanılmasıdır. İkincisi, teğet modülü, üçüncüsü ise sekant modülü kullanılan yöntemlerdir.

Çalışmada birinci yöntem kullanılmış ve elastisite modülü 35 GPa olarak bulunmuştur. Tüm yöntemler Şekil 26'da gösterilmiştir.



Şekil 26. Betonun elastisite modülünü hesaplama yöntemleri (Ersoy 2001)

Poisson oranı:

Poisson oranı, yatay deplasmanın dikey deplasmana oranıdır. Çalışmada 0,2 olarak kabul edilmiştir (Kachlakev vd 2001).

William Warnke Göçme Kriteri Modeli:

Bu model, üç eksendeki gerilmelerin etkisi altındaki göçmenin şeklini temsil eder. Bu da, ANSYS'te aşağıdaki görüntüde verilen değişkenler ile elde edilir:

Şekil 27. William Warnke göçme kriteri modeli değişkenlerinin girilmesi

Open Shear Transfer Coef: Açık çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer “0 ile 1” arasında değişmekte olup “0” olması çatlakta hiç kesme transferinin olmadığını “1” olması ise çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamen aktarıldığını göstermektedir.

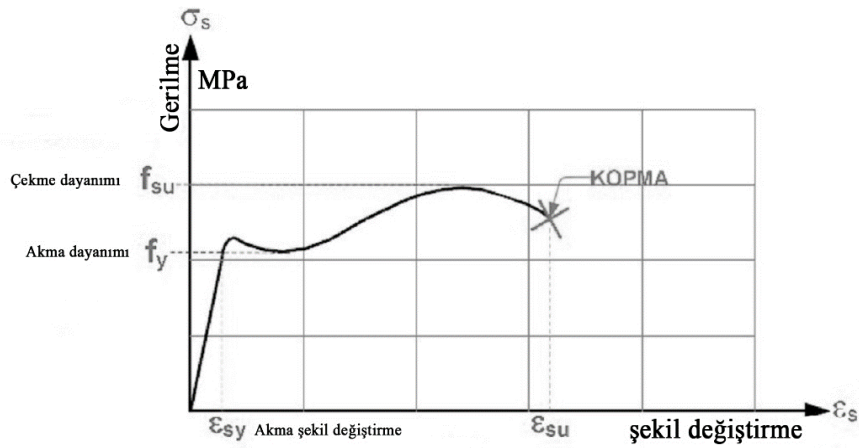
Close Shear Transfer Coef: Kapalı çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer “0 ile 1” arasında değişmekte olup “0” olması çatlakta hiç kesme transferinin olmadığını “1” olması ise çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamen aktarıldığını göstermektedir.

Uniaxial Cracking Stress: Betonun tek eksenli çekme dayanımıdır. Modülü şu denklemden alınır (ACI koduna göre): $\sqrt{f_c} * 0,62 = 4,08$

Uniaxial Crushing Stress: Betonun tek eksenli ezilme dayanımıdır. Etkisini iptal etmek için bu çalışmada -1 olarak alınmıştır.

Donatının davranışı ve özellikleri

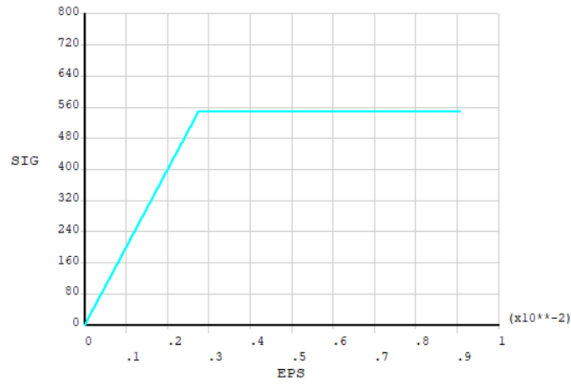
Bu Çalışmada boyuna ve enine donatıların özellikleri benzerdir, ve arasındaki tek fark çaptır. Donatının gerilme - şekil değiştirme eğrisi Şekil 28'e göre verilir:



Şekil 28. Boyuna ve enine donatının gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

Üç aşamadan oluşur. Birinci aşamada bağıntı doğrusal olur ve çelik donatı doğrusal elastik malzeme davranışı gösterir. İkinci aşama ise, akma sınırından başlayan akma bölgesi aşamasıdır ve bu aşamada önceki şekilde gösterildiği gibi şekil değiştirmedeki artışa rağmen gerilme sabit kalmıştır. Bundan sonra üçüncü aşama başlar ve çelik tekrar pekleşir. Böylelikle gerilmeler tekrar artar ve göçme meydana gelir.

ANSYS'te sınır gerilmesi akma gerilmesi olarak alınacaktır. Bu çalışmada, 550 MPa olarak bulunmuştur. Dolayısıyla gerilme - şekil değiştirme eğrisi Şekil 29'de gösterildiği gibi sadece iki aşamadan oluşacaktır:



Şekil 29. ANSYS'te girilen boyuna ve enine donatının gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

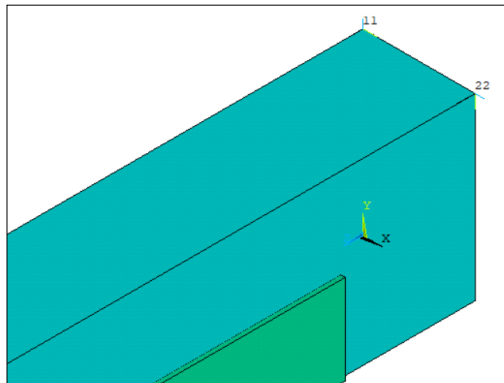
Çalışmada, boyuna ve enine donatının elastisite modülü $E = 200.000 \text{ MPa}$ ve Poisson oranı ise 0,3 olarak kabul edilecektir.

Karbon liflerin davranışı ve özellikleri

Karbon lifler, geçmiş bir bölümde açıklandığı gibi yüksek gerilme mukavemeti ile karakterize edilir ve bu nedenle güçlendirmede kullanılan en iyi malzemelerden biridir.

Karbon lifler, ortotropik bir malzemedir. Başka bir deyişle, liflerin özellikleri yönler göre değişir. Çalışmada kullanılan karbon lifler sadece bir yönde etkili olur. Diğer iki yönde ise özellikleri farklıdır ve daha az dayanıklı olduğu düşünülür. Bu nedenle bu iki yönde karbon lifler matrisindeki diğer bileşik olan epoksinin avantajlarından yararlanılmıştır.

Modellemede eleman tipi *Solid 185* olarak kabul edilmiştir. Aktif yönü, inaktif iki yönden ayırt etmek için de modellenen tüm şeritler için ANSYS'te bir takım yeni eksenler oluşturulmuştur. Birisi, kirişin altındaki şeritler için 11, diğeri kirişin her iki yanındaki dilimler için 22 olarak adlandırılacak iki eksen takımı elde edilmiştir. Şekil 30'da gösterilmiştir:

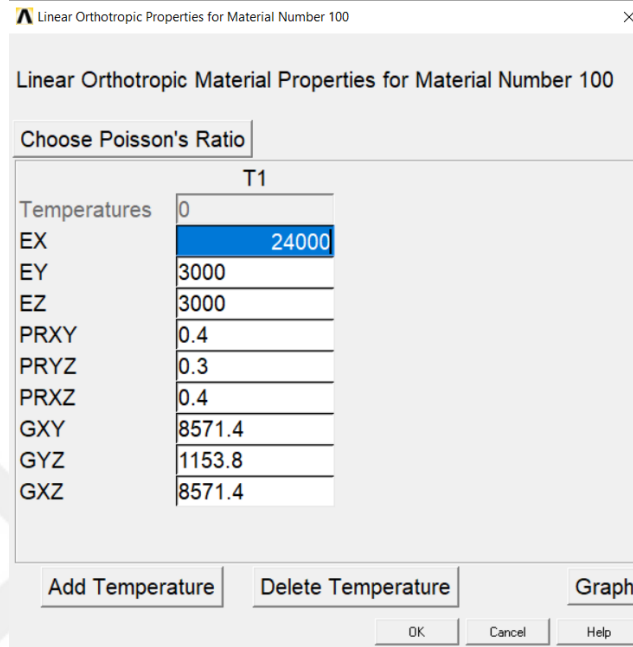


Şekil 30. 11 ve 22 eksen takımları

Deney çalışmasında 1 mm kalınlığında CFRP şeritleri kullanılmıştır. Ancak ANSYS'te birbirine bağlı elemanların boyutlarındaki sınırlamalar nedeniyle modellemede deney çalışmasındaki CFRP şeritlerinden daha kalın 5 mm kalınlığında şeritler kullanılmıştır. Bu

kalınlıktaki değişiklik elastisite modülüne yansımış, dolayısıyla elastisite modülü azalmıştır (Bulut 2009).

Epoksiyi ANSYS'te temsil etmek için beton ile karbon lifler arasında tam aderans olduğu varsayılmıştır. Özellikler Şekil 31'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.



T1	
Temperatures	0
EX	24000
EY	3000
EZ	3000
PRXY	0.4
PRYZ	0.3
PRXZ	0.4
GXY	8571.4
GYZ	1153.8
GXZ	8571.4

Şekil 31. CFRP özelliklerinin girilmesi

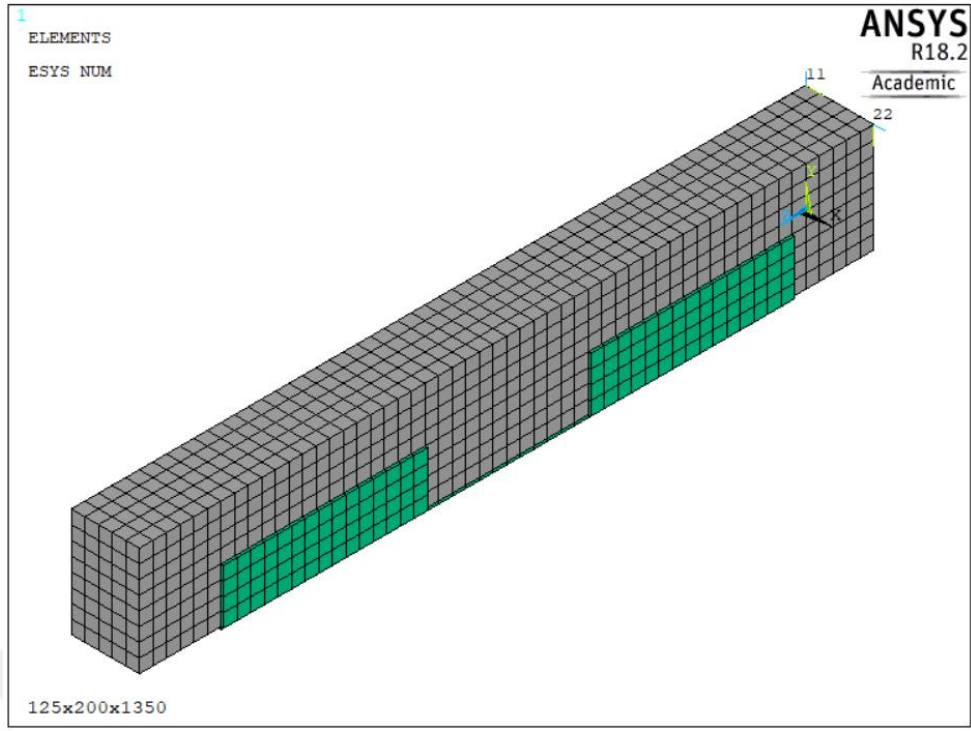
Modelin sonlu eleman ağının oluşturulması

Aę yoğunluğu seçimi temel ve önemli bir süreçtir ve elde edilmek istenen sonuçların doğruluğu, sonlu eleman sıklığının sonuçlarda etkisi önemsiz olduğu zaman gerçekteşir.

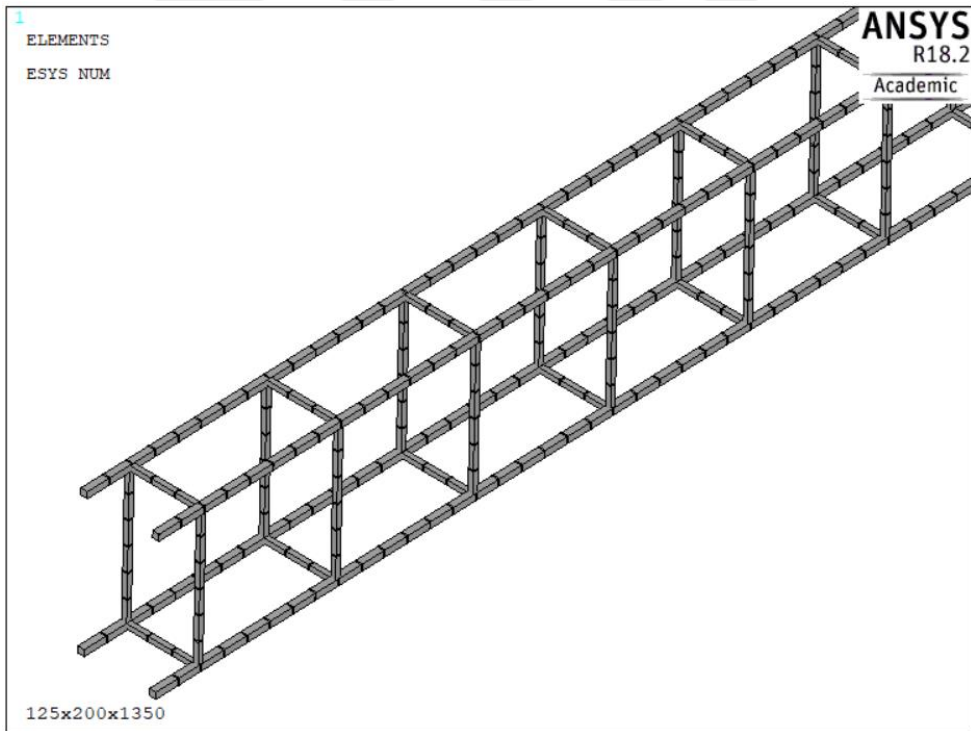
Çalışmada sonlu elemanlara bölme işlemi sırasında (25mm x 25mm x 25mm) olarak çok küçük boyutlar seçilmiştir. Abartılı sonlu elemanlara bölme, sonuçları etkilemese de işlemleri artırdığı için bilgisayarı zorlar. Bu durumla bu çalışmada karşılaşılmamıştır. Çünkü çalışmadaki kiriş boyutları çok büyük değildir.

Program rastgele bir sonlu elemanlara bölme işlemi (*free mesh*) yapar. Program ayrıca, çalışmada benimsenen üç yönde sonlu elemanlara planlı bölme (*mapped mesh*) işlemi de yapabilmektedir.

Sonlu elemanlara bölme işleminde önce bölünecek eleman belirlenir. Daha sonra önceki paragrafta anlatılan özellikler girilir. Bu işlemden sonra elemanlar aşağıdaki şekillerde gerçekte haliyle gösterilebilir:



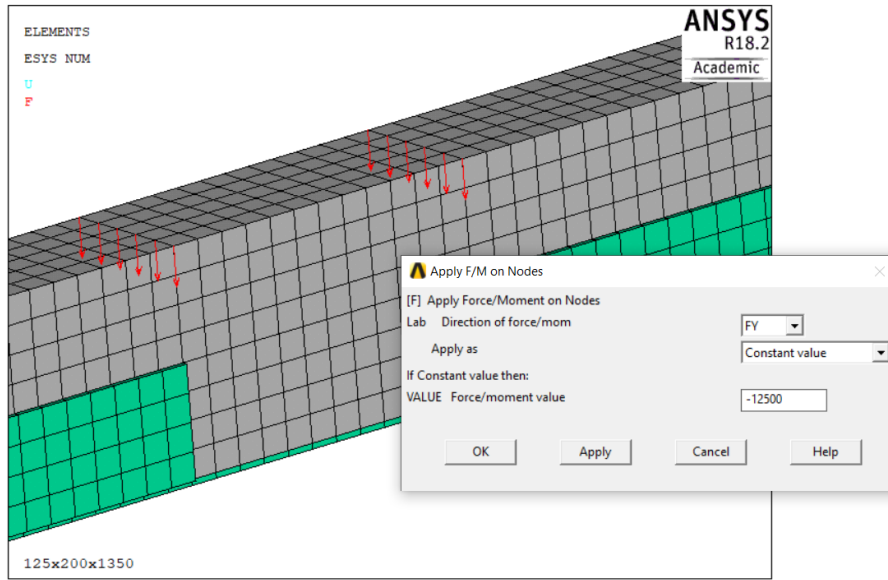
Şekil 32. Mesh sonrası beton ve karbon liflerin şekli



Şekil 33. Mesh sonrası donatı şekli

Yük ve mesnet koşullarının belirlenmesi

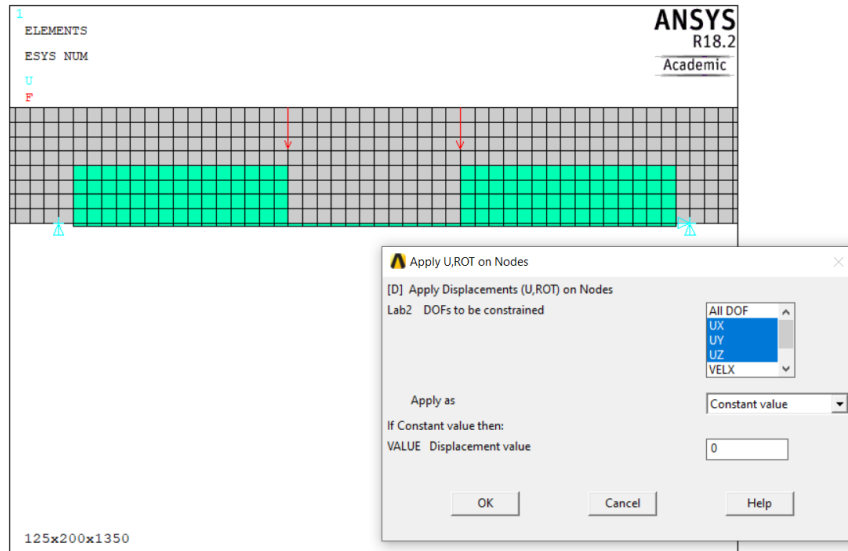
Sonlu elemanlara böldükten sonraki işlem yük ve mesnet şartlarını uygulamaktır. Çalışmadaki yükler, Şekil 34'te gösterildiği gibi Y ekseninin tersi yönünde, yani yüklerin yönü aşağıya olacak şekilde kirişin ortasında doğrudan kirişlere ve derinlik boyunca uygulanmıştır.



Şekil 34. Yüklerin kiriş üzerine yerleştirilmesi

Yüklerin değeri ise noktalara eşit olarak dağıtılır. Kirişte 12 nokta bulunmaktadır. Her noktaya 12500 N değerinde bir kuvvet uygulanmıştır. Bu da toplam yükün kirişin göçmesinin beklendiği maksimum yükten daha büyük olan 150.000 N'e eşit olduğu anlamına gelmektedir.

Mesnetlere gelince, Şekil 35'te gösterildiği gibi biri sabit mesnet (üç ekseninde hareket etmesi kısıtlanmıştır), diğeri hareketli mesnet (Z yönünde hareket edebilirken X ve Y yönlerinde hareket etmesi kısıtlanmıştır) olarak ayarlanmıştır.



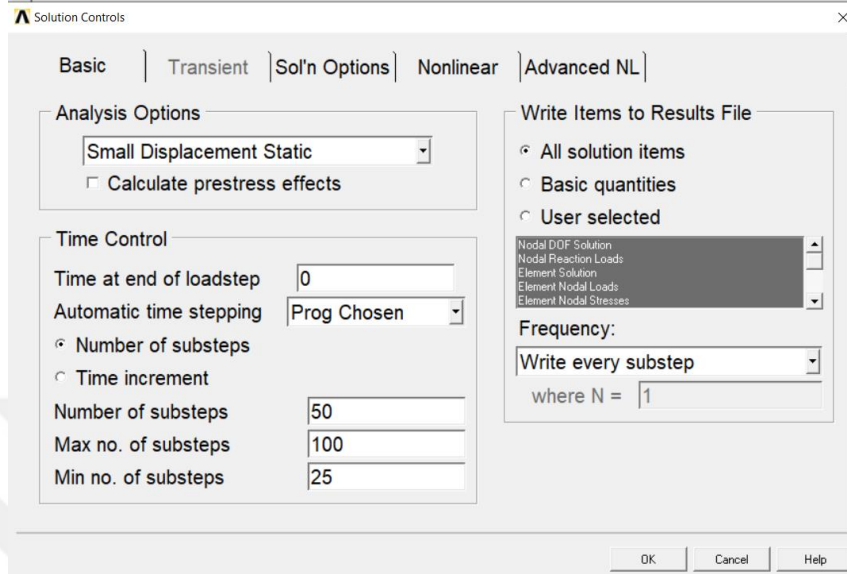
Şekil 35. Mesnetlerin kiriş üzerine yerleştirilmesi

Çözümleme yapılması

Yük ve mesnet atanması adımları tamamlandıktan sonra belirlenen analiz sürecine başlanır. Burada analiz şekli ve türü statiktir, yani statik yük durumları altında gerilme ve yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan analiz yapılmaktadır.

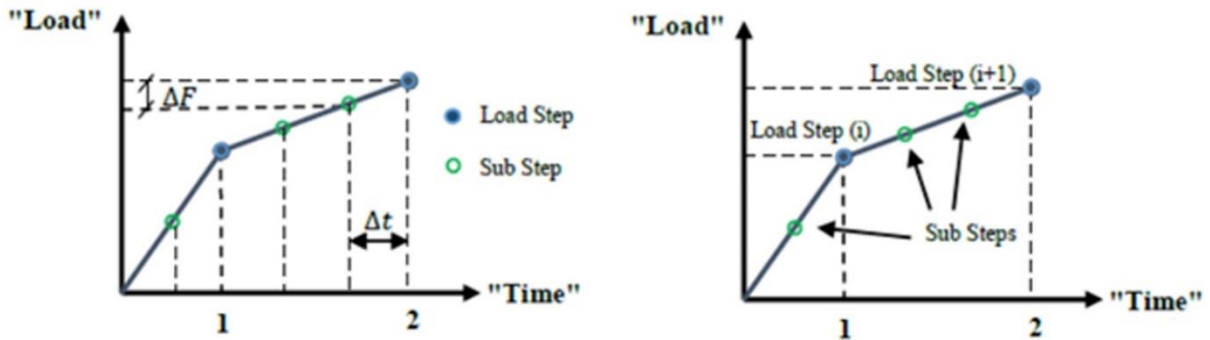
Analiz ayarlarının yapılması

Bu pencereden, analiz süresi ve yük uygulamasındaki artış miktarının belirlenebilir ve her bir yükte önizleme sonuçlarının etkinleştirilebileceği analiz ayarlarını ayarlamak ve kontrol etmek mümkündür.



Şekil 36. Analiz ayarlarının yapılması

Burada, statik analizdeki *Time* sadece sayaç içindir ve yüklerle uyumludur. Substep ise bir yükleme adımı anlamına gelir ve her yükleme adımı zamanla uyumludur. Örneğin, gösterilen Şekil 37'deki $T = 1$ ilk yükleme aşamasının sonunu ve $T = 2$ ikinci yükleme aşamasının sonunu temsil eder. Her iki yükleme adımı arasındaki zaman farkına ΔT zaman adımı denir ve yükün artışını da (Δt) belirler. Program, belirli bir yükleme aşamasındaki tüm yükleme adımları için artışı otomatik olarak kontrol edebilir (Husain ve Seffo 2017).



Şekil 37. ANSYS'te Substep ve Load Step'in (yükleme adımı) anlamları (Husain ve Seffo 2017)

Program, doğrusal olmayan çözüm işlemine başlarken çözümün yineleme yöntemi ile bulunduğu Newton-Raphson yöntemini kullanır. Sorunun çözümü doğrusal ise program sadece birkaç yinelemeye ihtiyaç duyarken doğrusal olmaması durumunda çok sayıda yinelemeye ihtiyaç duyacaktır.

Sonuçların okunması

Sonlu eleman analizi tamamlanıp istenen adım sayısındaki sonuçlar ANSYS'e kaydolunduktan sonra bu sonuçlar, görsel veya zamana bağlı olarak sayısal bir şekilde elde edilebilir. “General Postprocessor” menüsü, istenen alt adımdaki, herhangi bir model bileşenindeki tepkilerin görülmesine müsaade eder. “Time-History Postprocessor” menüsü, seçilen alt adım veya zaman artış dilimine tabi olarak sayısal sonuçların elde edildiği menüdür (Altunışık vd 2018).

Parametrik Çalışma

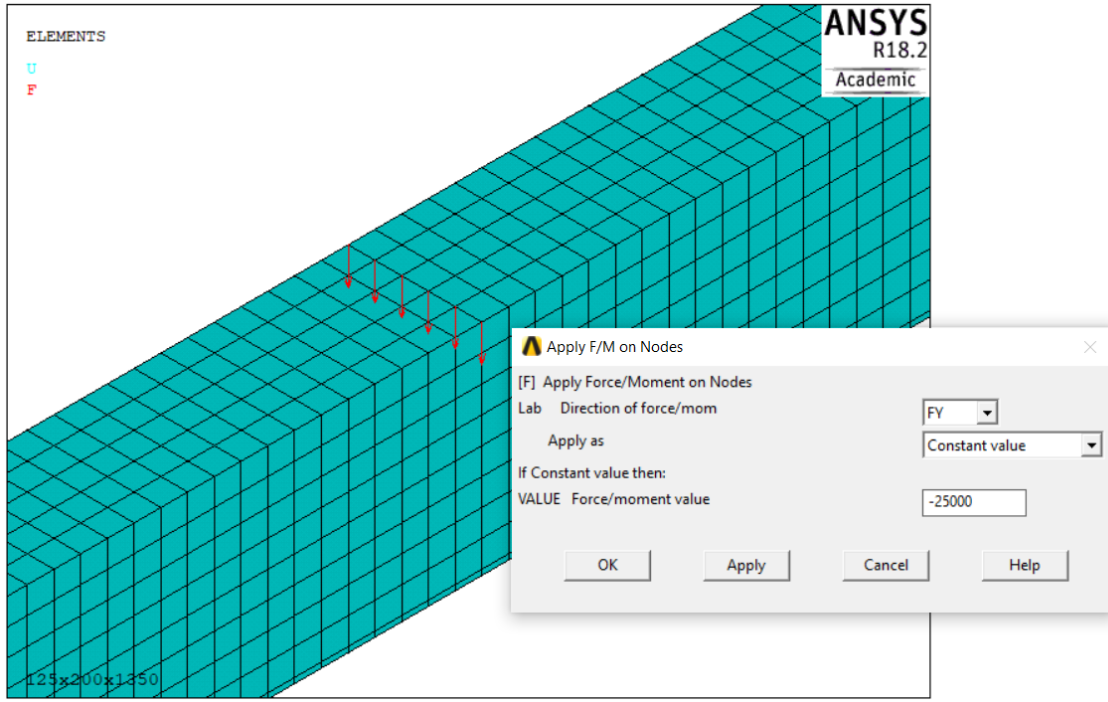
Bu bölümde, parametreler seçilip değiştirilerek deneysel çalışmada yapılmayan testler yapılacaktır. Bu değişikliklerin nasıl yapılacağı ANSYS programında açıklanacak ve sonuçlar, bulgular ve tartışma bölümünde incelenecektir.

Yükleme yönteminin değiştirilmesi

Deneysel çalışmada, kirişin merkezine simetrik iki çizgi boyunca yüklem yapılmıştır. Bu yüklem türü tüm Kirişler için uygulanmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, farklı yüklem türleri kullanmanın sonucu olarak kirişlerde meydana gelen değişiklikleri incelemek için önerilen diğer yüklem türleri uygulanacak ve bu türler arasında bir karşılaştırma yapılacaktır.

Kirişin merkezinde tekil yük ile noktasal yüklem

Diğer tüm değişkenler sabit tutulmuş ve kirişin merkezinde bir yük şeklinde alınarak yalnızca yükte değişiklik yapılmıştır. Aslında noktasal yüklem, kirişin merkezine bir yük yerleştirilerek yapılır. Ancak kirişin genişliği boyunca dağılır. Bunu ANSYS'de modellemek için yükler bir çizgi boyunca, (*nod*)a veya noktalara (*keypoint*) yerleştirilerek farklı yöntemlerde yüklem yapılır. Bu yöntemlerin en hassası, yükü (*Nod*)lara yerleştirmektir (Altunışık 2018). Daha sonra bu yükün toplamı, yükün yerleştirildiği *nod* sayısına bölünür. Burada tek noktasal yüklemde 150 kN değerinde yük uygulanmış ve aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi noktalara dağıtılmıştır:

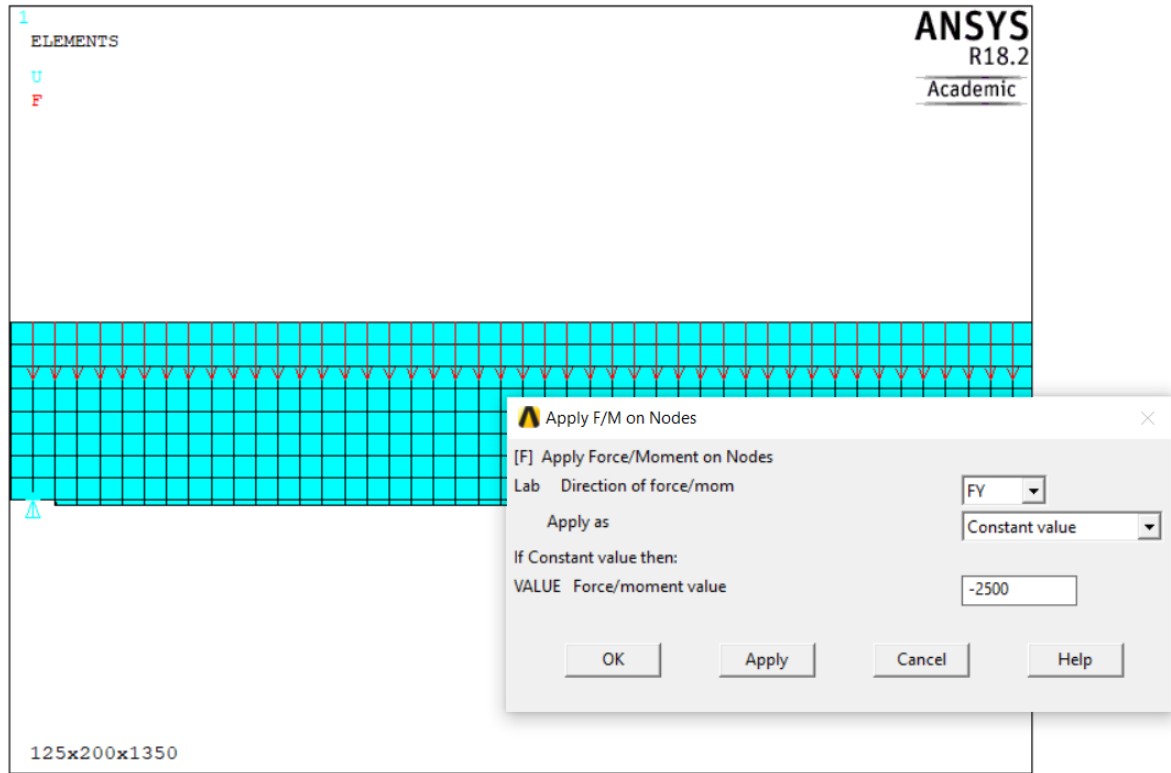


Şekil 38. Kirişin merkezinde tekil yük ile noktasal yükleme

Yükleme işlemindeki en önemli husus, yüklemenin, kirişin göçmesinin beklendiği maksimum yükten daha büyük bir yük ile gerçekleştirilmesidir. Bu nedenle, 150 kN'lık bir yük yerleştirilmiş ve beş kirişe de aynı şekilde (kirişin merkezine) yüklenmiştir.

Kiriş boyunca düzgün yayılı yük yükleme

Burada yük, kiriş boyunca ve merkezinde yayılmıştır. Ayrıca yük, iki mesnet arasındaki *nod* sayısına bölünmüş ve tüm kirişlere bu şekilde yüklenmiştir. Toplamda 225 kN değerinde yük dağıtılmıştır. Şekil 39'de yükleme yöntemi gösterilmiştir:

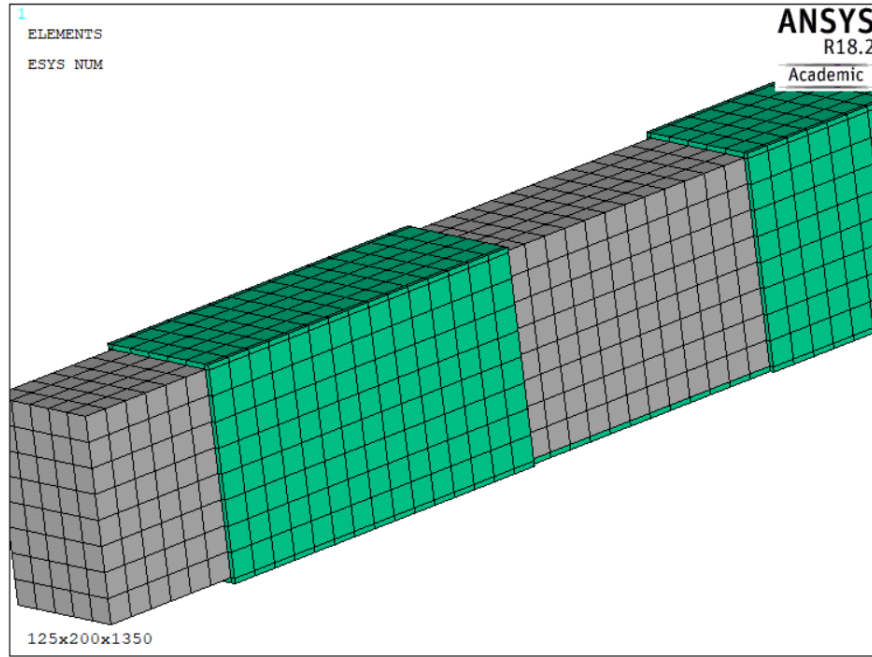


Şekil 39. Kiriş boyunca düzgün yayılı yük yükleme

Güçlendirme yönteminin değiştirilmesi

Güçlendirme şeklinin değiştirilmesi

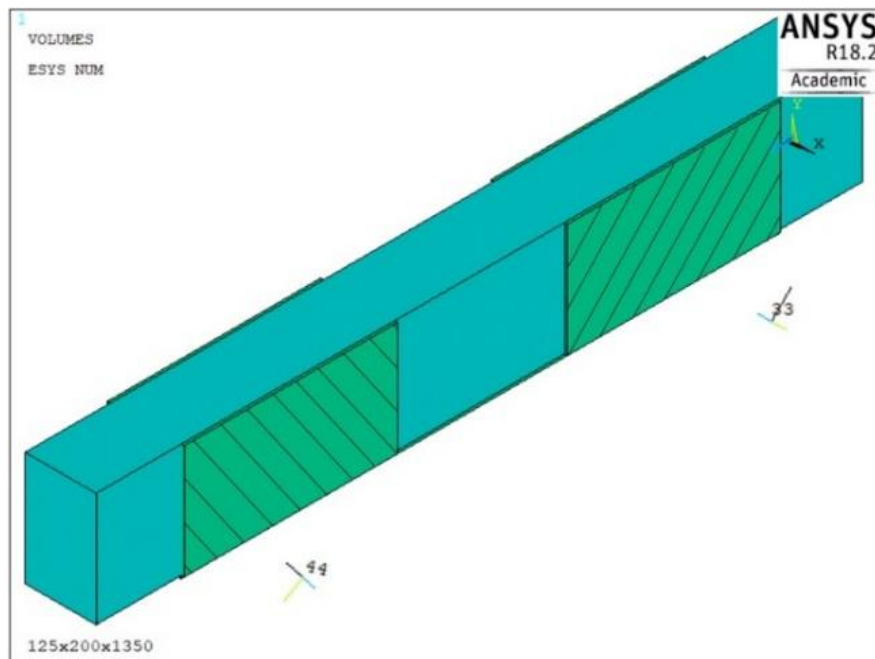
Deneysel çalışmada güçlendirme, karbon liflerin yalnızca kirişin altına ve her iki tarafına yapıştırılmasıyla yapılmıştır. Burada ise, iki yük arasındaki alanın kesme alanı sayılmadığı için mesnet ile noktasal yük arasındaki alanı, kesme alanı olarak kabul ederek karbon lifler, altından, üstünden ve yanlarından olmak üzere kirişin kesme alanlarına sarılı bir şekilde yapıştırılacaktır. Yapıştırmak için ankraj kullanılmamıştır, sadece epoksi yapıştırıcı kullanılmış. Bu güçlendirme yöntemi, en iyi güçlendirme yönteminin ne olduğunu görmek için önceki güçlendirme yöntemleriyle karşılaştırılacaktır. Böylece bu güçlendirme, Şekil 40'te gösterildiği gibi kirişin altına yerleştirilen karbon lifler ile eğilmeye karşı ve kesmenin iki alanını saran karbon lifler ile kesmeye karşı güçlendirme olmuştur. Bu güçlendirme yöntemi, kirişin üzerinde bulunan engeller nedeniyle gerçekte mümkün değildir. Ancak bu çalışmada, bu yöntemin en iyi güçlendirme yöntemi olup olmadığı, faydalı olup olmadığı, dayanımın artışı etkileyip etkilemediği araştırılacaktır.



Şekil 40. Kirişin eğilmeye ve kesmeye karşı güçlendirilmesi

Güçlendirme açısının değiştirilmesi:

Burada karbon liflerin açısı 45° açılı olacak şekilde değiştirilecektir. Bu güçlendirme yönteminin seçilme nedeni, daha öncede açıklandığı gibi göçmenin, mesnetlerden başlayıp 45° açıyla yayılan çatlakların oluşmasıyla gerçekleşmesidir. Burada benimsenecek güçlendirme, çatlaklara dik olacak şekilde 45° bir açıyla olacaktır. Bunu ANSYS'te uygulamak için, liflerin yönünün kirişin her iki yanındaki çatlakların yönüne dik olacak 45° bir açı yapacağı şekilde ve Şekil 41'de 33 ve 44 olarak adlandırılan 45° bir açıyla sahip iki yeni eksen takımı oluşturulmuştur.



Şekil 41. ANSYS'te oluşturulan 33 ve 44 eksenleri

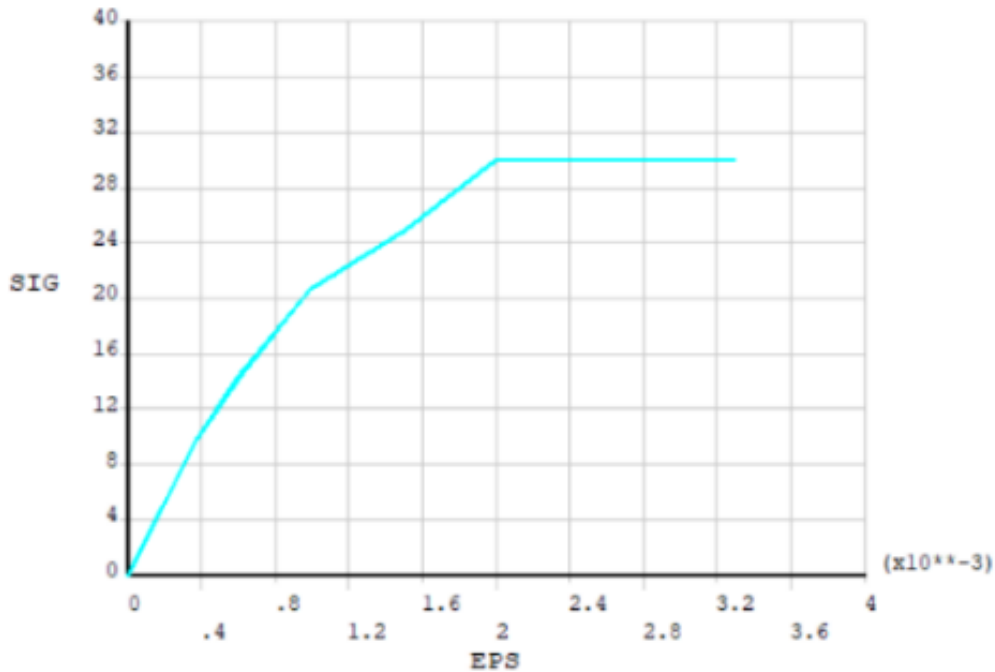
Beton dayanımı değiştirilmesinin etkisi

Dayanımın değiştirilmesinin sonuçlar üzerindeki etkisini bulmak için, birincisi orijinal dayanımdan daha küçük ve ikincisi orijinal dayanımdan daha büyük olmak üzere iki farklı dayanım alınmıştır. Diğer değişkenler sabit tutulup sadece beton dayanımı değişkeni değiştirilmiştir.

Çalışmada yüksek dayanımlı beton incelenmiştir. Çünkü kullanılan betonun dayanımı yüksek olmasına rağmen etriye eksikliği, bir depreme maruz kalma sonucunda çatlakların oluşumu veya yapısal elemana daha sonra ilave yüklerin eklenmesi gibi nedenlerden dolayı bazen güçlendirme yapılması gerekebilir.

Düşük dayanımlı betonun incelenmesinin nedeni ise, yapımında düşük dayanımlı beton kullanılan eski bir yapısal elemanın güçlendirilmesi sonucu meydana gelen artış miktarının öğrenilmesidir.

Karşılaştırılan kirişin beton dayanımından daha küçük $f_c = 30$ MPa olarak bir dayanım değeri ve elastisite modülü $E_c = 26$ GPa olarak alınmıştır. Gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi, çalışmada benimsenen Desayi ve Krishnan modeline göre yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:



Şekil 42. $f_c=30$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi

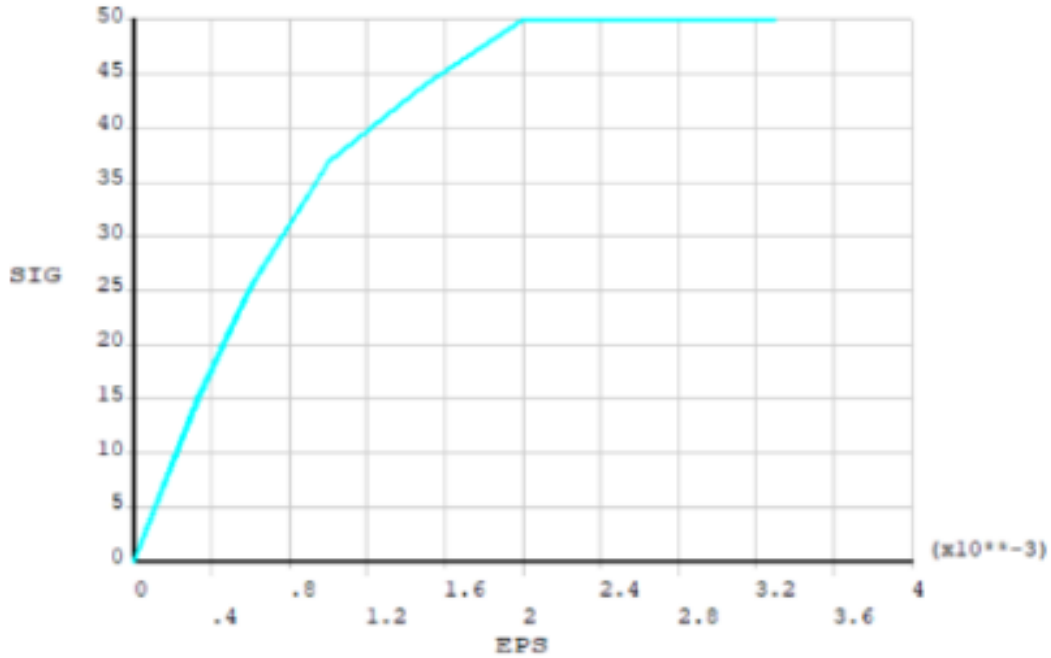
Multilinear Isotropic Hardening for Material Number 1

Stress-Strain Options: Stress versus Total Strain

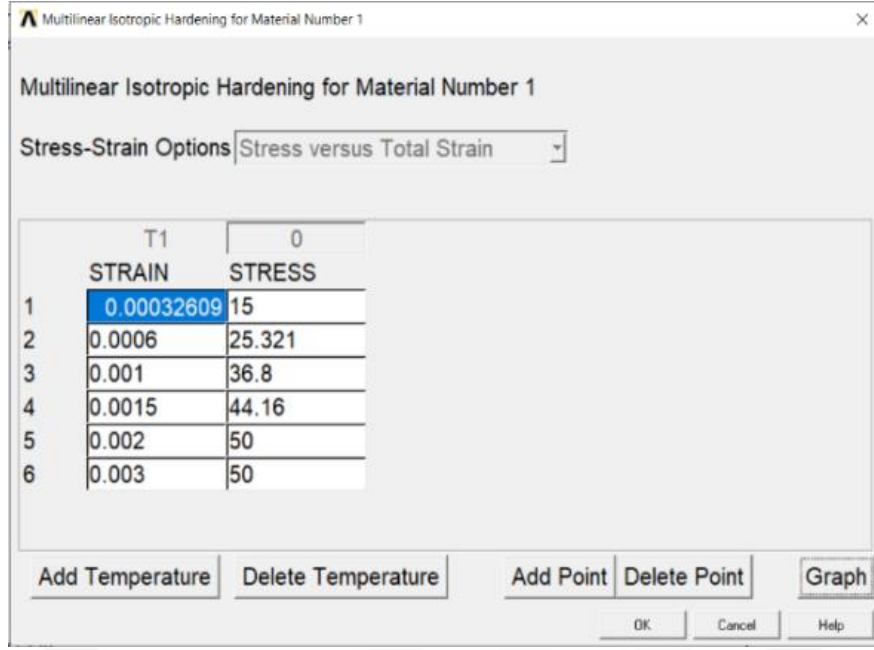
	T1	0
	STRAIN	STRESS
1	0.00038462	10
2	0.0006	14.312
3	0.001	20.8
4	0.0015	24.96
5	0.002	30
6	0.003	30

Şekil 43. $f_c=30$ Mpa İçin gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin girilmesi

Ayrıca, karşılaştırma kirişinin dayanımından büyük $f_c = 50$ MPa olarak başka bir dayanım değeri ve elastisite modülü $E_c = 46$ GPa olarak alınmıştır. Desayi and Krishnan yöntemine göre gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi sonuçları aşağıdaki gibi elde edilmiştir:



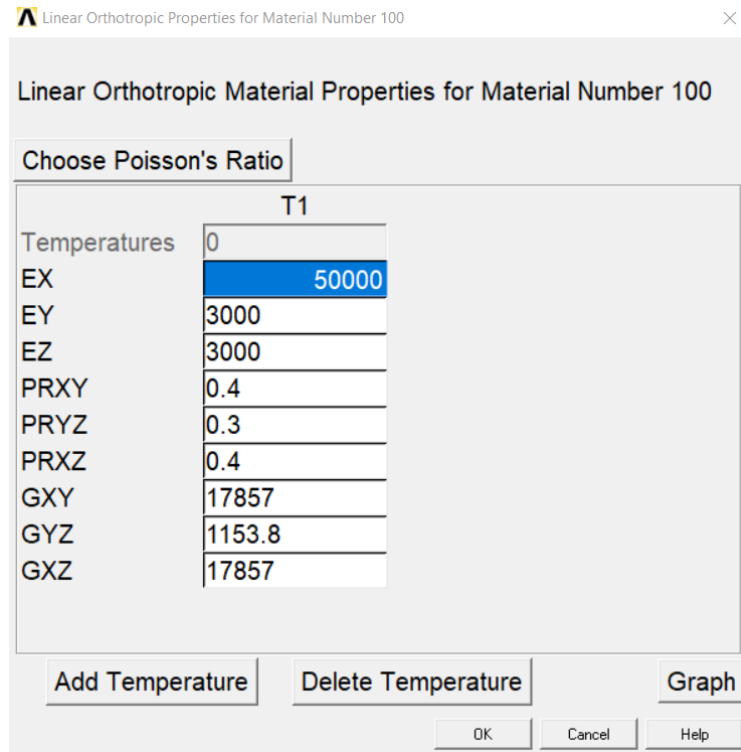
Şekil 44. $f_c=50$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi



Şekil 45. $f_c=30$ MPa için gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinin girilmesi

Karbon liflerin elastisite modülünün değiştirilmesinin etkisi

Burada da Kiriş D, diğer değişkenler aynı kalmakla birlikte elastisite modülünü, Kiriş D'nin karbon liflerinin elastisite modülünden küçük olan $E= 50$ GPa ve Kiriş D'nin karbon liflerinin elastisite modülünden büyük olan $E= 600$ GPa olarak alıp değiştirerek bir karşılaştırma kirişi olarak alınmış ve Şekil 46 ve Şekil 47'de olduğu gibi ANSYS'te yapılmıştır.



Şekil 46. Karbon liflerin elastisite modülünün ($E=50$ GPa) girilmesi

Linear Orthotropic Properties for Material Number 100

Choose Poisson's Ratio

	T1
Temperatures	0
EX	6e5
EY	3000
EZ	3000
PRXY	0.4
PRYZ	0.3
PRXZ	0.4
GXY	214285
GYZ	1153.8
GXZ	214285

Add Temperature Delete Temperature Graph

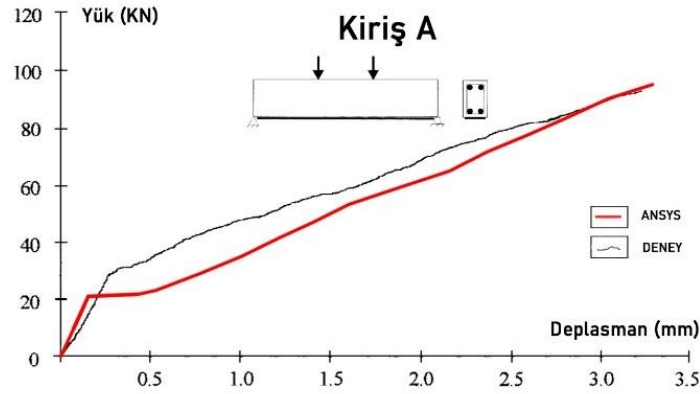
OK Cancel Help

Şekil 47. Karbon liflerin elastisite modülünün ($E=600$ GPa) girilmesi

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

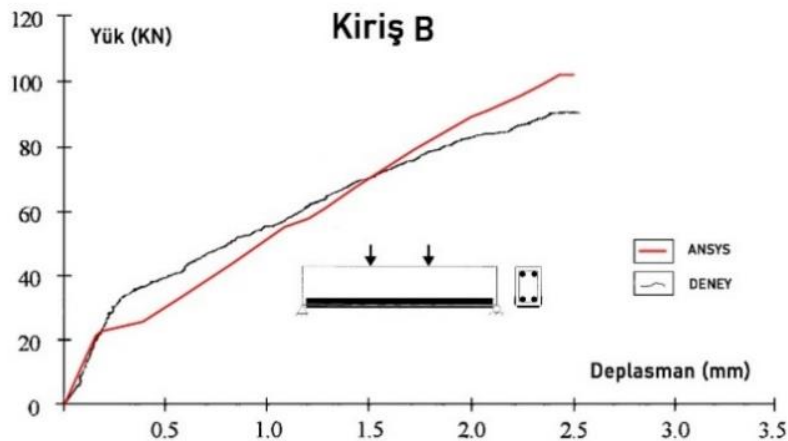
Laboratuvar Sonuçlarının Modelleme İle Karşılaştırılması

Eğilmeye karşı güçlendirilen Kiriş A'daki sonuçlar Şekil 48'de gösterilmiştir.

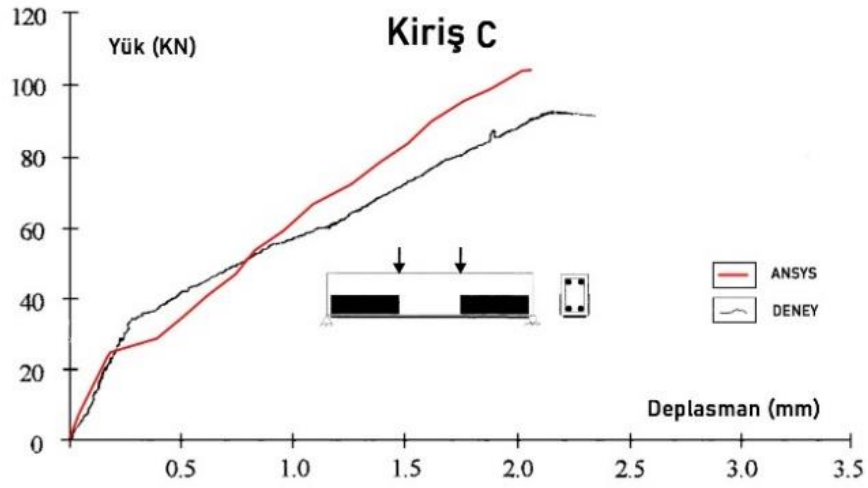


Şekil 48. Kiriş A'nın nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma

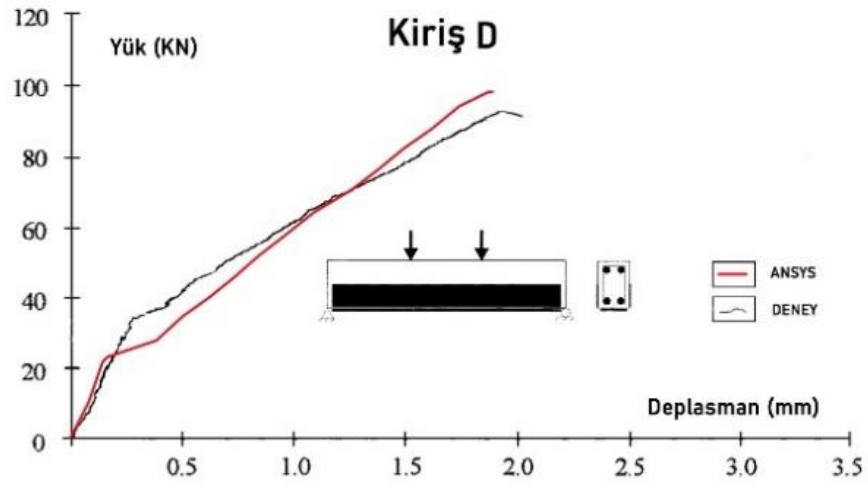
Deney kirişi A ile ANSYS'te modellenmiş Kiriş A arasında bir karşılaştırma içeren aşağıdaki gerilme – birim şekil değiştirme eğrisinden, ANSYS'te güçlendirilmiş kirişin deney numunesinden % 4 daha büyük bir kuvvette göçtüğü gözlemlenebilir. Eğilmeye ve kesmeye karşı (hibrit güçlendirme ile) güçlendirilmiş B, C, D ve E kirişlerinde farkın bundan daha büyük ve % 6 ile % 9 arasında olduğu bulunmuştur. Bu da, sonuçlar arasında %8'lik bir fark bulan Santhakumar ve Chandrasekaran (2004) tarafından bulunan sonuçlarla uyuşmaktadır. Aynı şekilde bu sonuçlar, sonuçlar arasında %9'luk bir fark bulan Hashemi vd (2007) tarafından bulunan sonuçlara uyum göstermektedir.



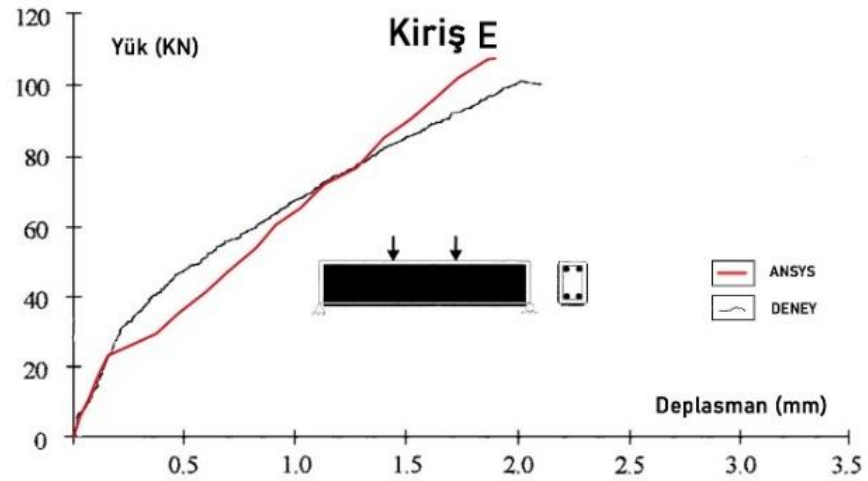
Şekil 49. Kiriş B'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma



Şekil 50. Kiriş C'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma



Şekil 51. Kiriş D'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma

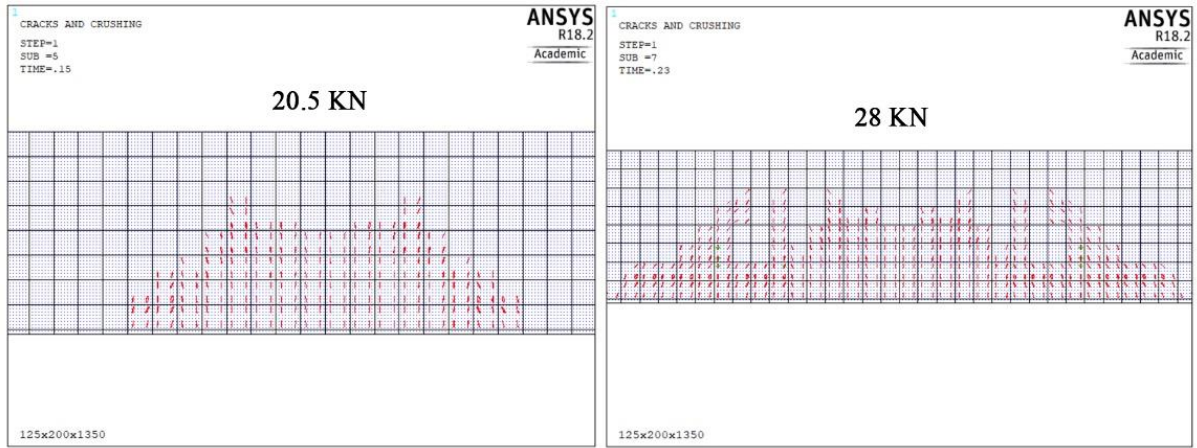


Şekil 52. Kiriş E'nin nümerik ile deney sonuçları arasında karşılaştırma

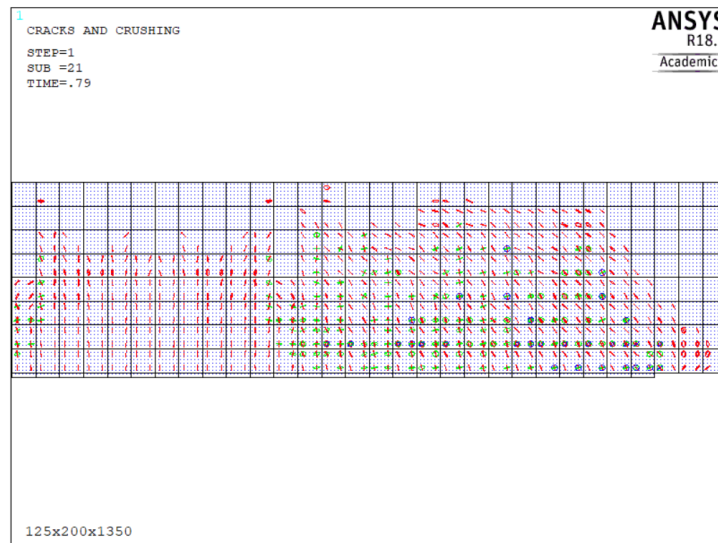
Deney numunelerinin ANSYS'taki kirişlere göre daha az kuvvetle göçtüğü ve deney kirişlerinin rijitliğinin, yüklemenin artmasıyla modellenen kirişlerin rijitliğinden daha az olduğu görülür. Bu da, deney numunelerinde betonla donatı ve betonla karbon lifler arasındaki

aderansın tam aderans olmaması, gerçekte beton ile donatı veya beton ile karbon lifler arasında meydana gelen kaymalar olması gerçeğiyle açıklanabilir. Halbuki ANSYS'te bu durum meydana gelmez, çünkü aderans analizinin sonuna kadar tam aderans olarak kalır. Bu da, deneysel kirişlerin rijitliğinin modellenen kirişlerin rijitliğinden az olduğu araştırmacılar Mahmood ve İbrahim'in (2009) çalışmasının sonuçlarına uyuşmaktadır.

İlk çatlaklar, deney kirişlerinde yaklaşık 28 kN yükte görünürken; modellemede, eğrilerin eğimini değiştirmeye başladığı kuvvet olan 20,5 kN yükte görünmeye başlar. Bunu, daha önce çatlak oluşmamış bölgede 20,5 kN yükten sonra çatlakların ortaya çıktığı program aracılığıyla görülmüştür. Program aynı zamanda Şekil 53'te gösterildiği gibi yüklerdeki artışın çatlakları artırdığını gösterir. Bu, modelleme ile gerçeklik arasındaki göçme mekanizmasının uyumlu olduğu anlamına gelir.



Şekil 53. Yüklerin artmasıyla çatlakların artması



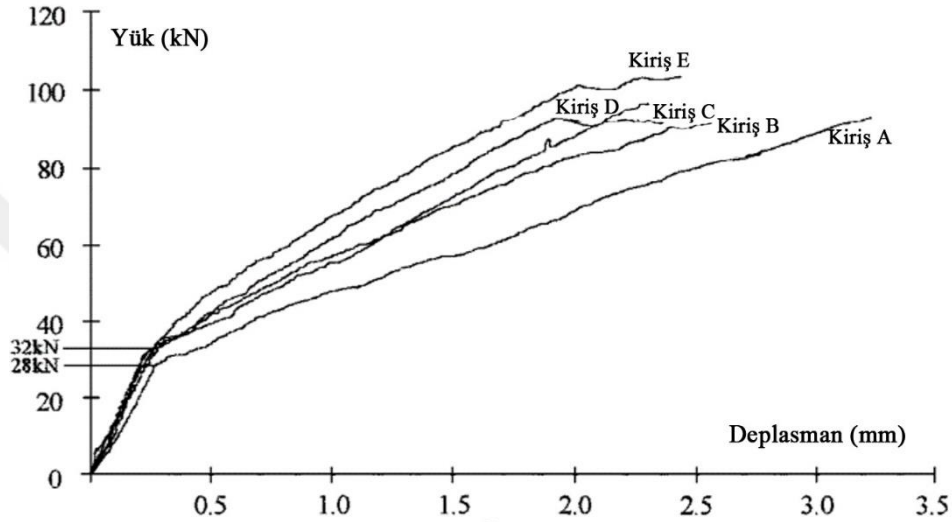
Şekil 54. Göçme anında çatlaklar

Şekil 55'de ANSYS'e göre çatlak kodlarının açıklaması bulunmaktadır (ANSYS 2005).

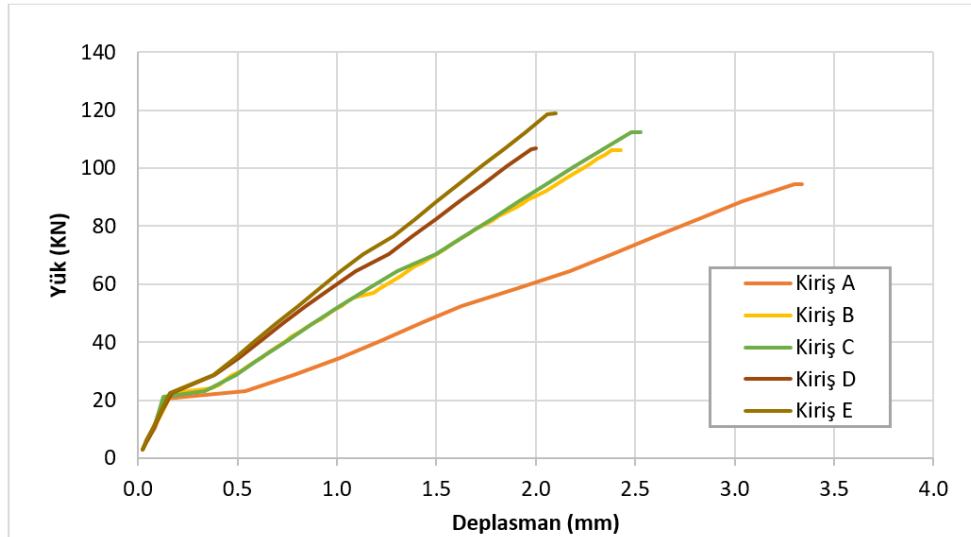
- | Eğilme çatlaklığı
- Basınç çatlaklığı
- / Çekme çatlaklığı (Eğik)
- ⊗ İki çatlak (çekme ve basınç)

Şekil 55. ANSYS'e göre çatlak kodlarının açıklaması

Aşağıda, tüm kirişlerin deney sonuçlarını, ANSYS'teki sonuçlar ile karşılaştıran grafikler bulunmaktadır:

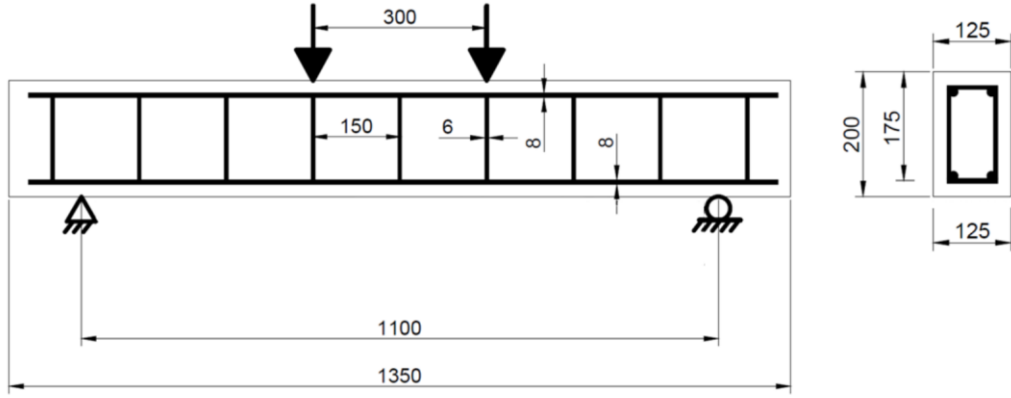


Şekil 56. Deney çalışmasındaki tüm kirişler arasında karşılaştırma (Li vd 2001)



Şekil 57. Nümerik çalışmadaki tüm kirişler arasında karşılaştırma

Her iki şekilde de yanlardan kesme güçlendirmesi ilk çatlakların görünümünü biraz geciktirdiği görülür. Çatlaklar, deneysel sonuçlarda eğilmeye karşı güçlendirilmiş kiriş A'da 28 kN yükünde ve B, C, D ve E kirişlerinde 32 kN yükünde ortaya çıkarken ANSYS'te modellenen Kiriş A'da 20,5 kN ve B, C, D ve E kirişlerinde 22,5 kN yükünde ortaya çıkmıştır.

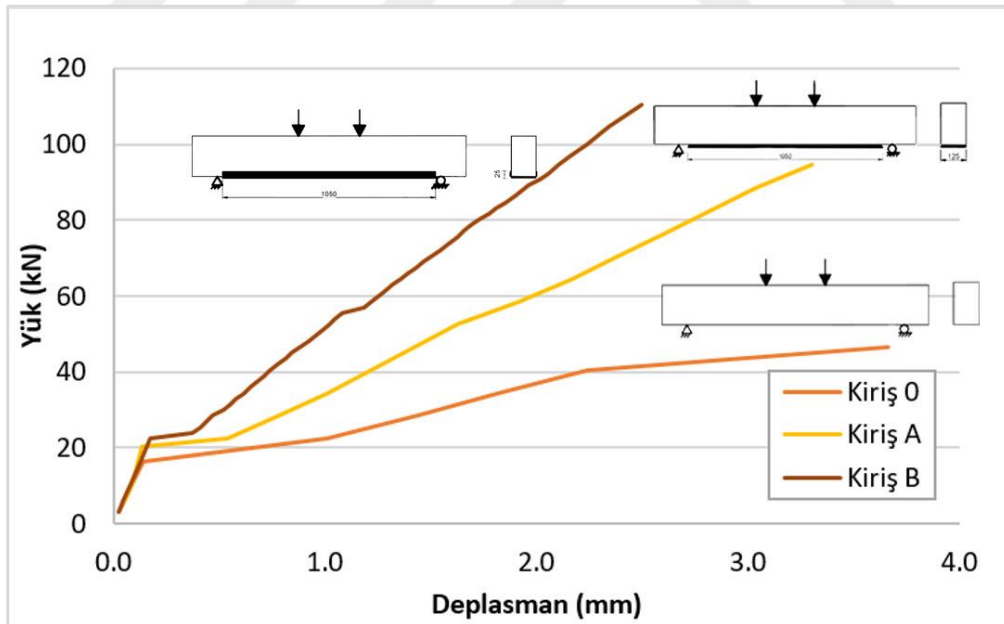


Şekil 59. Güçlendirilmemiş betonarme kirişin boyutları

Kiriş, modelleme aşamalarında belirtildiği gibi modellenmiştir. Bu kirişte farklı olan, hiç karbon lif içermemesidir.

Güçlendirilmemiş Betonarme Kirişin (Kiriş 0) Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerle Karşılaştırılması

Güçlendirilmemiş kiriş, eğilmeye karşı güçlendirilmiş Kiriş A ve hem eğilmeye hem de kesmeye karşı (hibrit güçlendirme) güçlendirilmiş Kiriş B ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:



Şekil 60. A, B ve 0 kirişlerinin karşılaştırması

Kiriş 0'ın göçme yükü 46 kN iken, Kiriş A'da 94 kN ve Kiriş B'de 110 kN olmuştur. Dolayısıyla güçlendirme sayesinde meydana gelen artış miktarı Kiriş A'da yaklaşık % 100 ve Kiriş B'de yaklaşık % 135 olmuştur. Yani, güçlendirdikten sonra kirişin dayanımı en az iki kat artmıştır. Bu da, güçlendirmenin önemini gösterir. Ayrıca, Şekil 60'ta güçlendirme sayesinde ilk çatlakların ortaya çıkmasının geciktiği görülebilir. Hawileh (2014) tarafından yapılan

çalışmada eğilmeye karşı %98 oranında güçlendirildiği için kirişin dayanımının arttığı bulunarak aynı sonuca varılmıştır. Bu sonuç, yapılan bu çalışmada elde edilen sonuca yakın olmuştur.

Çatlaklar Kiriş 0'da 16,5 kN yükünde, A ve B Kirişlerinde sırasıyla 20,5 kN ve 22,5 kN yüklerinde ortaya çıkmıştır. Ayrıca güçlendirme sayesinde deplasmanın Kiriş A'da % 10, Kiriş B'de % 32 azaldığı görülür.

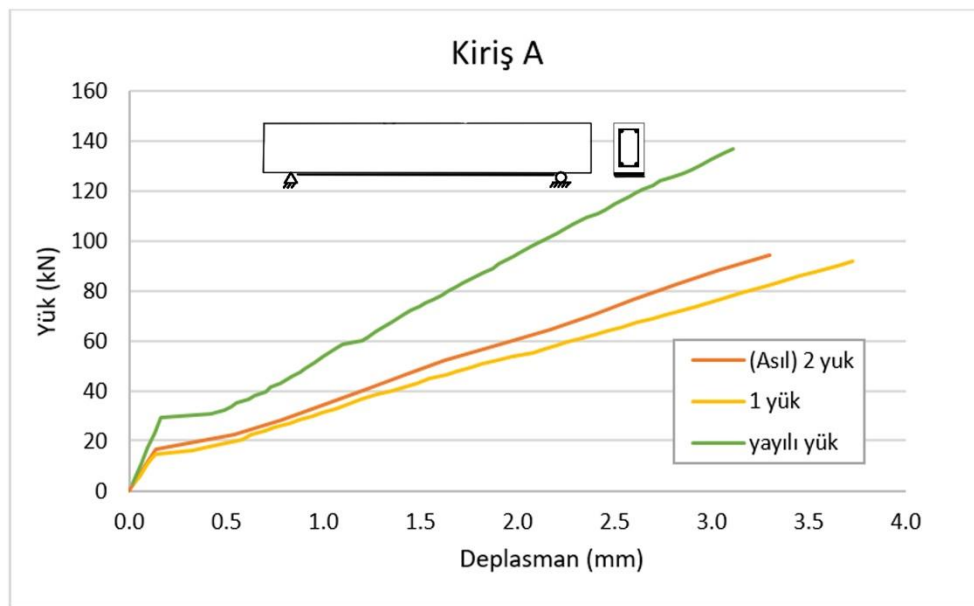
Parametrik Çalışma Tartışması

Farklı yükleme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması

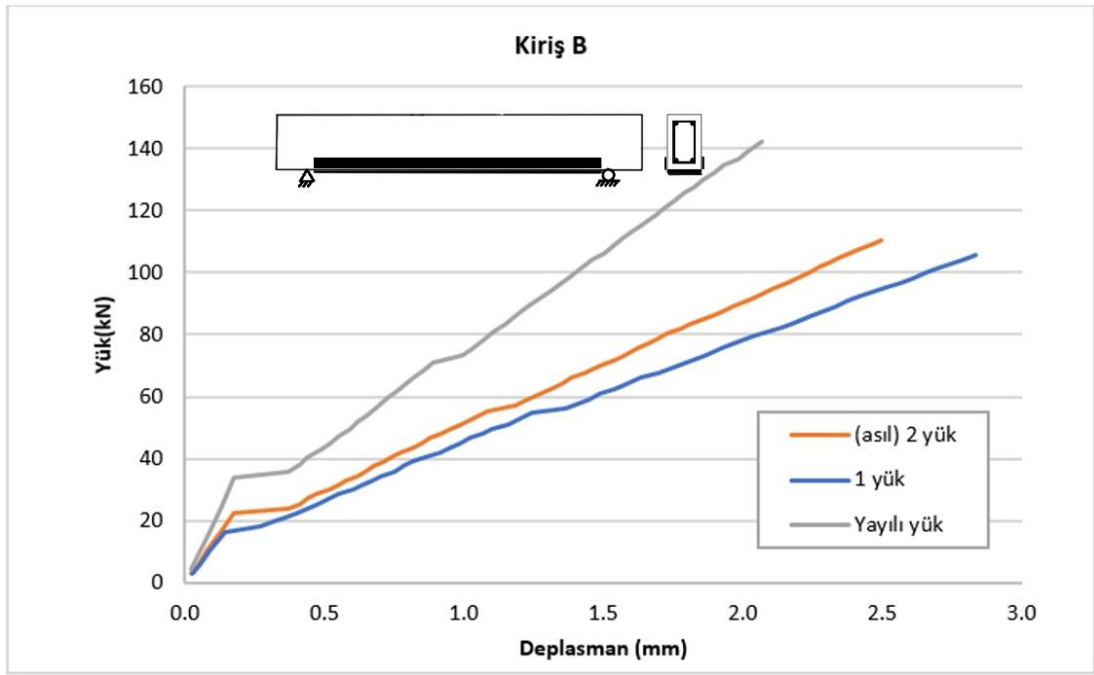
Çalışmada, kirişe yükleme yönteminin değiştirilmesinin sonuçları önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur.

Sonuçlar, iki eşit simetrik noktasal yükün tek noktasal yük ile değiştirilmesi durumunda, kirişin, iki noktasal kuvvete sahip kirişin göçme yükünden daha az bir yükte göçeceğini göstermiştir. Tersine, deplasman için tek noktasal yük durumunda tüm kirişler, iki eşit simetrik noktasal yükten daha büyük bir deplasmanda göçmüştür. Düzgün yayılı yük ile yüklemeye gelince, kirişler göçme için daha fazla yüke ihtiyaç duymuş ve iki eşit simetrik noktasal yükten daha küçük bir deplasmanda göçmüştür (Hind vd 2016).

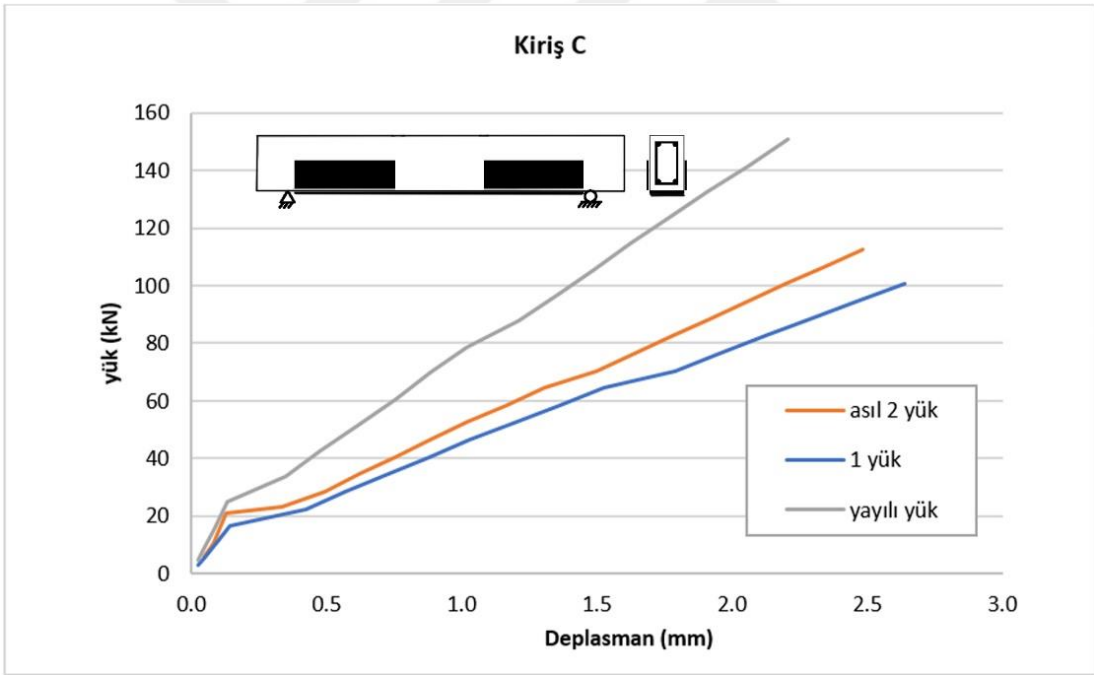
Bu durum, her kiriş için karşılaştırma eğrilerinin ayrı ayrı gösterildiği Şekil 61, Şekil 62, Şekil 63 Şekil 64 ve Şekil 65'te olduğu gibi tüm kirişlerde meydana gelmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4, farklı yükleme yöntemlerindeki kirişlerin yükleri ile deplasmanları arasındaki karşılaştırmaları göstermektedir:



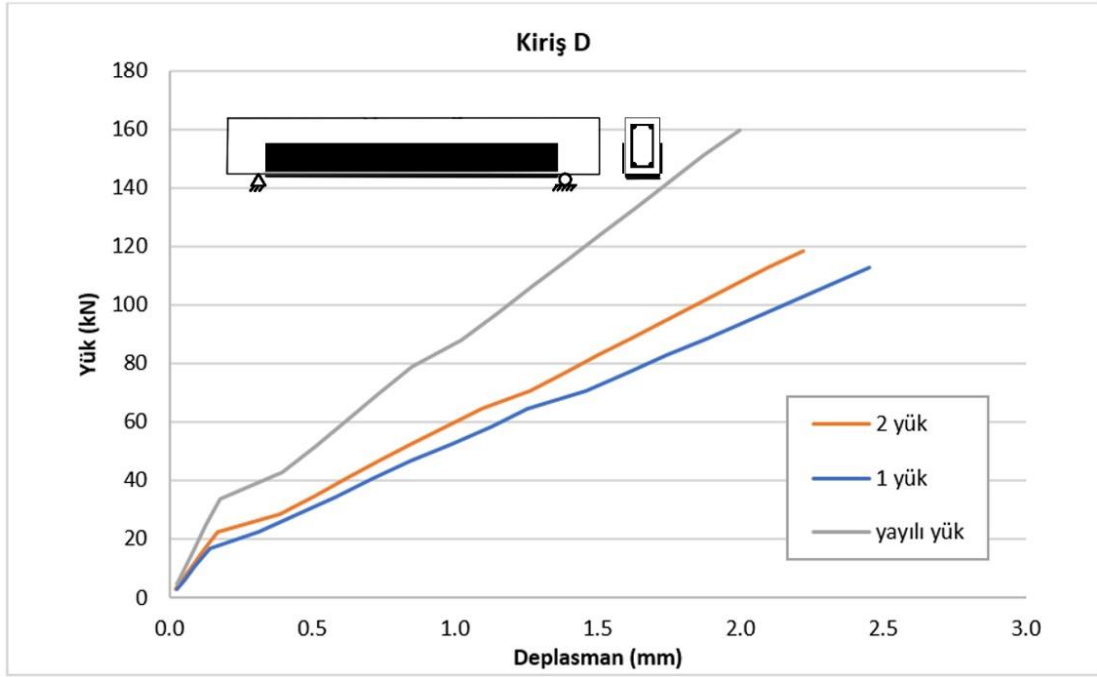
Şekil 61. Kiriş A'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma



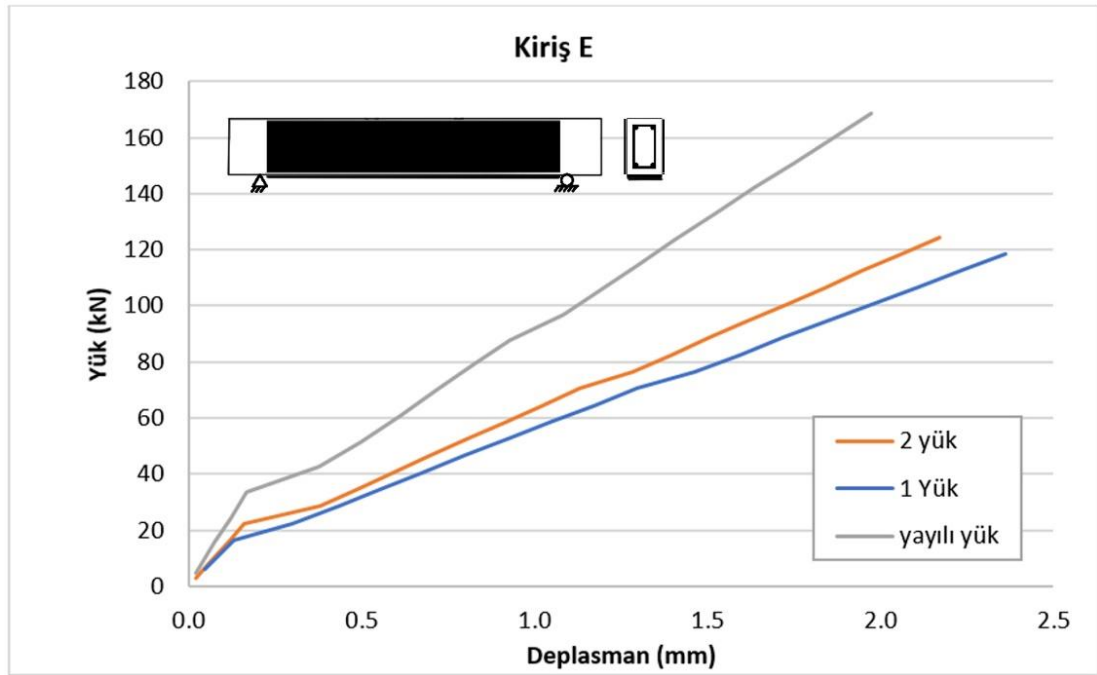
Şekil 62. Kiriş B'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma



Şekil 63. Kiriş C'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma



Şekil 64. Kiriş D'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma



Şekil 65. Kiriş E'de yükleme yöntemleri arasında karşılaştırma

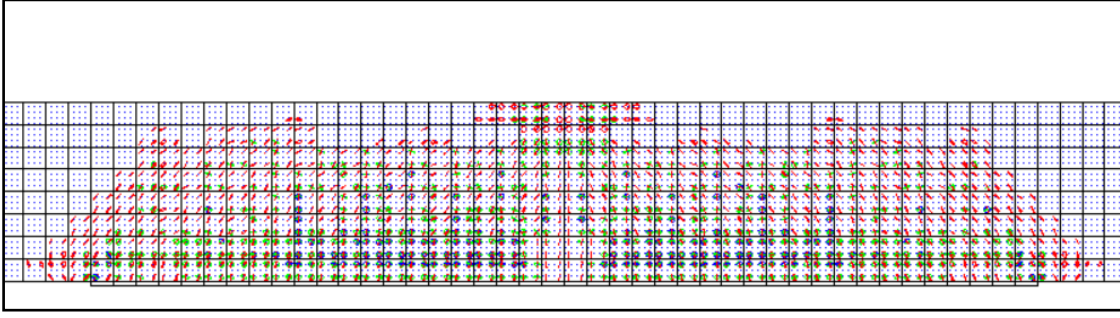
Tablo 3. Tüm kirişler için tek noktasal yük ile iki eşit simetrik noktasal yük arasında karşılaştırma

	İki Merkezli Yük (Asıl Deneme)		Tek Merkezli Yük		İki Yüklemenin Karşılaştırması	
	Göçme Yüğü (kN)	Deplasman Değeri (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Deplasman Değeri (mm)	Yükteki Azalış	Deplasmandaki Artış
Kiriş A	94,5	3,30	91,95	3,73	2,77 %	11,51 %
Kiriş B	110,63	2,5	105,75	2,84	4,61 %	11,97 %
Kiriş C	112,5	2,48	100,5	2,64	11,94 %	6,06 %
Kiriş D	118,5	2,22	112,5	2,45	5,33 %	9,39 %
Kiriş E	124,5	2,17	118,5	2,36	5,06 %	8,05 %

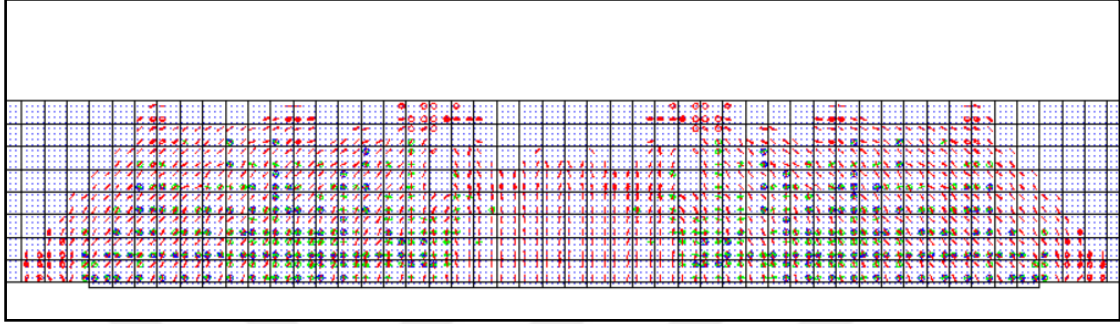
Tablo 4. Tüm kirişler için iki eşit simetrik noktasal yük ile düzgün yayılı yük arasında karşılaştırma

	İki Merkezli Yük (Asıl Deneme)		Yayılı Yük		İki Yüklemenin Karşılaştırması	
	Göçme Yüğü (kN)	Deplasman Değeri (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Deplasman Değeri (mm)	Göçme Yükündeki Artış	Deplasmandaki Azalış
Kiriş A	94,5	3,30	136,94	3,11	30,99	6,13
Kiriş B	110,63	2,5	142,31	2,07	22,26	20,77
Kiriş C	112,5	2,48	150,75	2,21	25,37	12,22
Kiriş D	118,5	2,22	159,75	1,99	25,82	11,56
Kiriş E	124,5	2,17	168,75	1,97	26,22	10,15

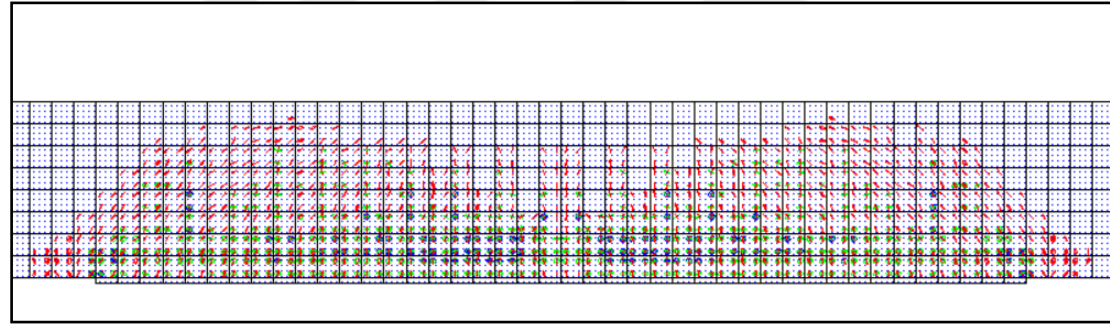
Tek noktasal yükleme durumunda, göçme yükünde % 3 ile % 12 arasında değişen bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu da mantıklı bir azalmadır. Çünkü, kuvvet daha küçük bir alanda yoğunlaştığında etkisi artar. Aynı yöntem için deplasmanın da % 6 ile % 12 arasında arttığı görülmüştür. Bu düzgün yayılı yük için de geçerlidir. Çünkü yük daha geniş bir alana yayılmıştır. Dolayısıyla deplasman ve göçme yükü üzerindeki etkisi küçük olmuştur ve kiriş göçme için iki noktasal yükleme yönteminde olduğundan çok daha büyük bir yük gerektirmiştir. Gerçekleşen artış % 23 ile % 31 arasında değişmiştir.



Şekil 66. Tek noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar



Şekil 67. İki eşit simetrik noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar



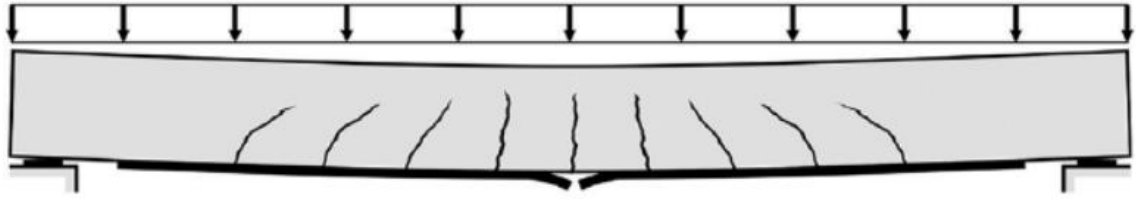
Şekil 68. Düzgün yayılı noktasal yükte göçme anındaki çatlaklar

Yükleme yönteminin değiştirilmesi, kirişlerin göçme şeklini değiştirmiştir. Tek noktasal yük durumunda, Şekil 66'da olduğu gibi çatlakların kirişin çekme alanında (alt alan) yoğunlaştığı ve ortaya çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, yükün altındaki alanın sıkıştırılmış bir alan olduğu ve yük altında betonun ezilmesine neden olan basınç sonucu çatlaklara dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Şekil 67'de çatlakların kirişin ortasından uzaklaştığı ve göçmenin, kirişin altında ve mesnetlerin yakınında çatlakların oluşması ve ardından yüklerin iki uygulama noktasına yayılmasıyla meydana geldiği görülmüştür.

Şekil 68'teki çatlaklar önceki iki kirişin çatlaklarından farklı olmuştur. Eğilme çatlaklarının, kirişin altındaki çekme alanı boyunca oluştuğu, kiriş boyunca oluşan eğilme çatlakları ile kirişin üstündeki betonun üst liflerinin kiriş boyunca dağıtılan yüklerden büyük bir basınca maruz kalmadığı görülür. Böylece beton, önceki iki kirişte olduğu gibi yükler

altında ezilmemiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar, karbon liflerle güçlendirilmiş kirişe dağıtılmış yükler uygulanarak Hind vd'nin laboratuvar araştırmalarında varılan sonuçlarla tutarlı olmuştur. Hind vd çalışmasındaki çatlakların Şekli 69 gösterilmiştir (Hind vd 2016).

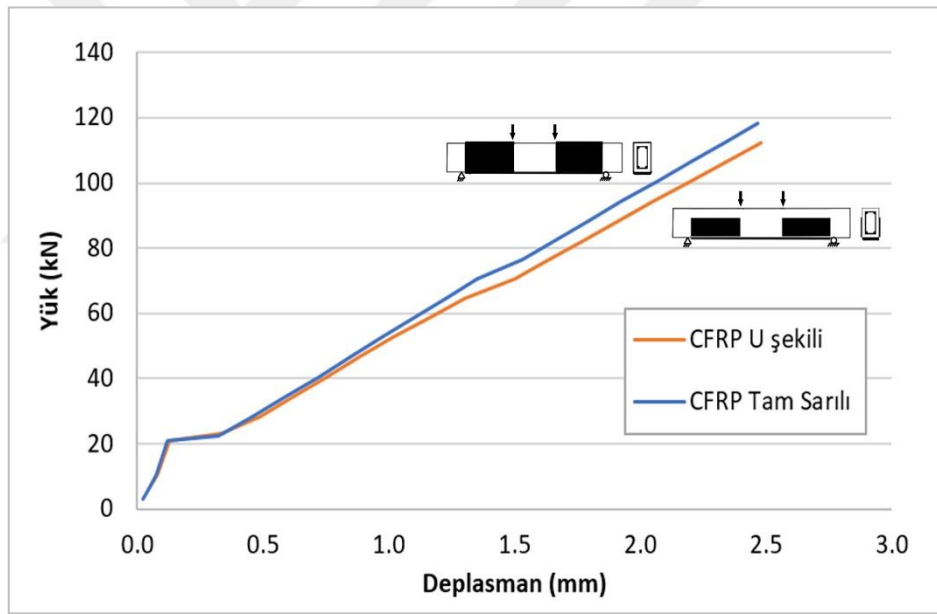


Şekil 69. Deneydeki kirişin düzgün yayılı yükte göçmesi (Hind vd 2016)

Farklı güçlendirme yöntemlerinin sonuçlarının karşılaştırılması

Kesme alanlarının sarılmasıyla güçlendirme

Kesme alanları güçlendirildiği için Kiriş C ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 70'ta iki kirişin arasındaki fark gösterilmiştir:



Şekil 70. Kesme alanları karbon lifler ile sarılarak güçlendirilen kiriş ile kiriş C arasında karşılaştırma

Önceki Şekil 70'ta görüldüğü gibi kirişin dayanımındaki artış % 5 olup çok düşük olmuştur. Bu da, yanlardan güçlendirme yapmanın çok faydalı olduğu, kirişin kesme alanlarında güçlendirme yapmanın gereksiz olduğu anlamına gelmektedir. Bu da mantıklıdır. Çünkü, daha öncede açıklandığı gibi kesmeye karşı güçlendirilmiş tüm kirişlerin göçme yöntemi izlendiğinde kirişin üstündeki kesme alanlarında (birincil veya üstü) herhangi bir çatlak olmadığı, göçmenin bu alanda meydana gelmediği ve sadece basınç kuvvetlerine maruz kalan bir alanda olduğu bulunacaktır (Ersoy 2001). Mhanna (2019) tarafından yapılan çalışmada, U şeklindeki karbon liflerle güçlendirmenin, kirişlerin dayanımını %114 oranında

artırdığı ve kirişlerde ani göçmenin oluşumunu engellediği bulunarak U şeklindeki güçlendirmenin, tüm yanların güçlendirilmesinden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Sarım şeklinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisine ilişkin değerlendirme Tablo 5’ te sunulmaktadır.

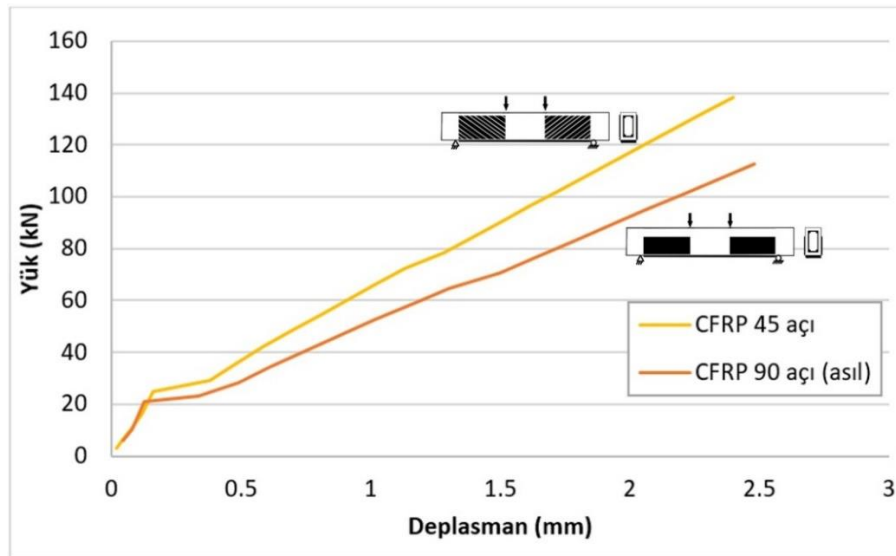
Tablo 5. CFRP sarım şeklinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

KİRİŞ	AÇIKLAMA	KESME KUVVETİ TAŞIMA KAPASİTESİ (KN)	KAPASİTE ARTIŞI (%)	DEĞERLENDİRME
REFERANS	37 MPa basınç dayanımı olan kiriş	46	-	Güçlendirilmemiş referans kiriş
KİRİŞ C	CFRP - U Şekli	116	152.2	U şekilli sargı ile kiriş kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %152,2 artış hesaplanmıştır.
KİRİŞ C	CFRP - Tam Sarılı	120	160.9	Tam sarılı CFRP uygulaması ile kiriş kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %160,9 artış hesaplanmıştır.

Tablo 5 incelendiğinde, kiriş kesit çevresine tam sarım yapılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesindeki artışın U şekilde sarım yapılmasına göre daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Ancak, uygulamada tam sarım yapılmasının döşeme varlığı nedeniyle mümkün olmayacağı da dikkate alınmalıdır.

45° açılı karbon liflerle güçlendirme

Karşılaştırma, güçlendirme yönteminde en yakın kiriş olduğu için Kiriş C ile yapılmıştır. Şekil 71 karşılaştırılan iki kirişi göstermektedir:



Şekil 71. 45° Açılı karbon lifler ile kesme alanlarında güçlendirilen kiriş ile kiriş C arasında karşılaştırma

45° açılı liflerle güçlendirme, 90° açılı liflerle güçlendirmeye kıyasla, kirişin dayanımını % 19 artırarak sonuçlarda gözle görülür bir artışa yol açmıştır. Bir önceki Şekil 82'de, çatlakları dik liflerle güçlendirmenin bu çatlakların oluşumunu büyük ölçüde geciktirdiği görülmüştür. Liflerin 90° açılı olduğu Kiriş C'de birincil çatlaklar, 21 kN'lik bir yükleme kuvvetinde görülürken, 45° açılı güçlendirmede 25 kN'lik bir yükleme kuvvetinde görülmüştür. Araştırmacılar Barros vd (2007) ve Al-Obaidat vd (2010) tarafından yapılan çalışmalarda, 45°'lik açıyla güçlendirmenin 90° açılı güçlendirmeden çok daha iyi sonuçlar verdiği bulunarak aynı sonuca varılmıştır.

Tablo 6'da CFRP liflerinin yatay ile yapmış olduğu açının kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

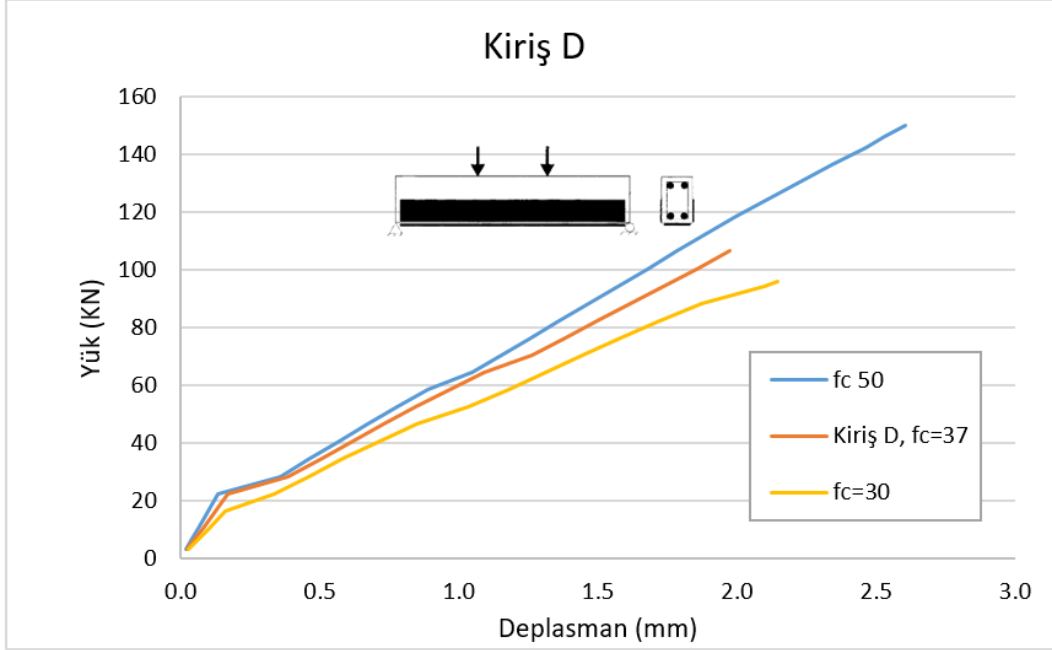
Tablo 6. CFRP - U sarım uygulamasında lif doğrultusunun kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Kiriş	Açıklama	Kesme Kuvveti Taşıma Kapasitesi (kN)	Kapasite Artışı (%)	Değerlendirme
Referans	37 MPa basınç dayanımı olan kiriş	46	-	Güçlendirilmemiş referans kiriş
Kiriş C	Liflerin yatayla 45° açı yapması	140	204.3	Liflerin yatayla 45° açılı olarak sarılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %204,3 artış hesaplanmıştır.
Kiriş C	Liflerin yatayla 90° açı yapması	116	152.2	Liflerin yatayla 90° açılı olarak sarılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %152,2 artış hesaplanmıştır.

Tablo 6 incelendiğinde liflerin yatayla 45° açı yapacak şekilde güçlendirme uygulaması yapılmasının, liflerin yatayla 90° açı yapacak şekilde gerçekleştirilen uygulamaya kıyasla daha fazla kapasite iyileştirmesi sağladığı hesaplandığı görülmektedir. Bu da, 45° açılı liflerle güçlendirmenin, kirişin diyagonal çekme kuvvetlerinden kaynaklanan çatlakların gelişimini sınırladığını ve dolayısıyla göçmenin oluşumunu geciktirdiğini gösterir. Yani, lifler 45° açıyla yerleştirilerek, diyagonal çekme kuvvetlerinin yönüne zıt kuvvetler aynı açıda oluşturulur. Ayrıca araştırmacı Sundarraja (2009) tarafından yapılan çalışmada aynı sonuca varılmıştır. Bununla birlikte, 45° açı yapacak şekilde sarım yapılması durumunda malzeme kaybının daha fazla olabileceği de dikkate alınmalıdır.

Beton dayanımının değiştirilmesi etkisi

Değişiklik Kiriş D'de yapılmıştır. Birinde yüksek dayanımlı beton ve diğerinde düşük dayanımlı beton olmak üzere beton türü iki kez değiştirilmiştir. Modelleme sonrasında sonuçlar Şekil 72'de gösterildiği gibi olmuştur:



Şekil 72. Kiriş D'nin farklı beton dayanımları arasında karşılaştırma

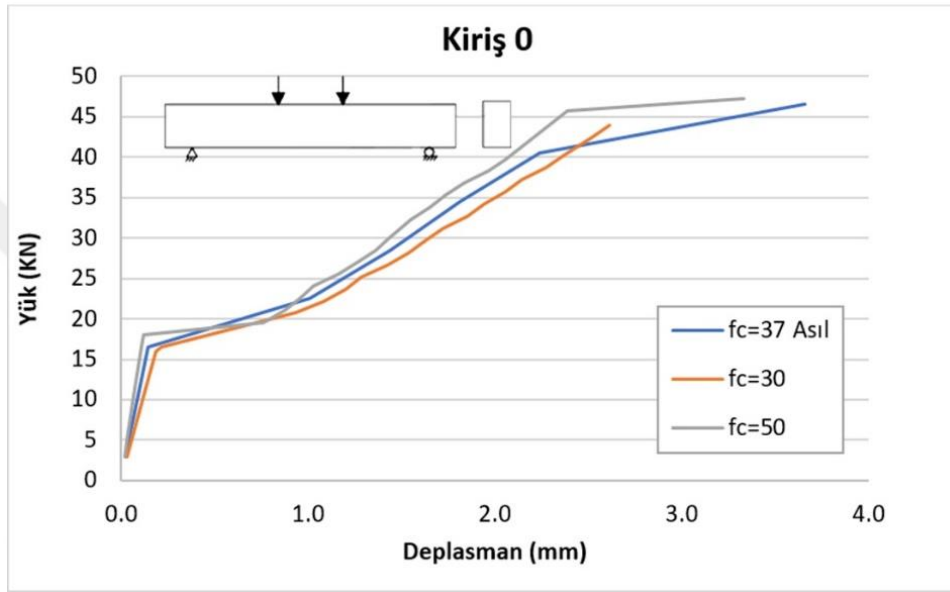
Tablo 7'de farklı beton dayanımlarına sahip kirişlerin CFRP uygulaması ile güçlendirilmesi halinde kesme kuvveti taşıma kapasitesinde meydana gelen değişim karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

Tablo 7. Farklı beton dayanımlarının kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Kiriş	Açıklama	Kesme Kuvveti Taşıma Kapasitesi (kN)	Kapasite Artışı (%)	Değerlendirme
Referans	30 MPa basınç dayanımı olan kiriş	39	-	Güçlendirilmemiş referans kiriş
Kiriş D	-	98	151.3	30 MPa basınç dayanımlı kirişe tam U sarımlı güçlendirme uygulanması halinde kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %151,3 oranında artış hesaplanmıştır.
Referans	50 MPa basınç dayanımı olan kiriş	47	-	Güçlendirilmemiş referans kiriş
Kiriş C	-	150	219.1	50 MPa basınç dayanımlı kirişe tam U sarımlı güçlendirme uygulanması halinde kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %219,1 oranında artış hesaplanmıştır.

Tablo 7 incelendiğinde beton basınç dayanımı yüksek olan ancak, kesme donatısı yetersiz olan kirişlerde CFRP uygulamasıyla, beton basınç dayanımı nispeten düşük olan kirişlerdeki güçlendirme uygulamasına kıyasla daha fazla kapasitesi artışı olduğunun hesaplandığı görülmektedir.

Sonuçlar, $f_c=30$ MPa dayanımlı beton kullanılması, kirişin dayanımında sadece % 10'luk bir azalmaya yol açtığını gösterirken $f_c=50$ MPa dayanımlı beton kullanılması kirişin dayanımında % 50'lik bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Bu da, yüksek beton dayanımının kirişin dayanımında çok büyük bir etkiye sahip olduğunu gösterir.

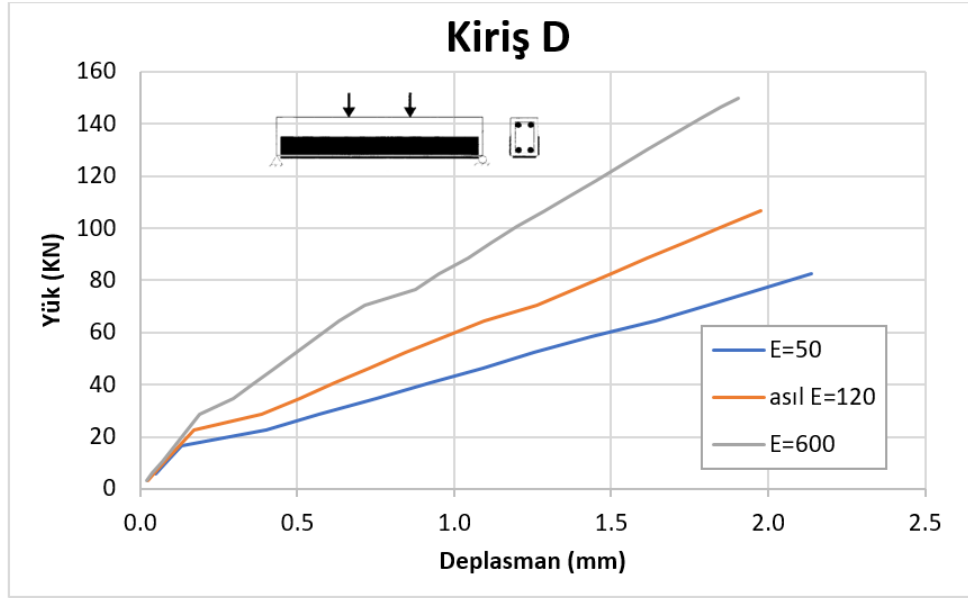


Şekil 73. Kiriş 0'nun farklı beton dayanımları arasında karşılaştırma

Oysa $f_c=50$ MPa için güçlendirilmemiş kirişin dayanımındaki artış sadece % 1,6 olurken $f_c=30$ MPa için güçlendirilmemiş kirişin dayanımındaki düşüş ise yalnızca % 5,5 olmuştur. Güçlendirilmiş kiriş ile güçlendirilmemiş kiriş arasındaki sonuçları karşılaştırarak güçlendirilmiş kirişin göçme yükündeki artışın, güçlendirilmemiş kirişin göçme yükündeki artıştan çok daha büyük olduğu bulunmuştur. Bu da, karbon liflerle güçlendirme ile kullanılan beton dayanımının türü arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Karbon liflerin elastisite modülünün değiştirilmesi etkisi

Şekil 74'te, karbon liflerin elastisite modülünü 50 GPa, 120 GPa ve 600 GPa olmak üzere üç farklı değer olarak gözlemlenen sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır:



Şekil 74. Kiriş D'nin farklı elastisite modülleri arasında karşılaştırma

Elastisite modülündeki artışın birincil çatlakların ortaya çıkmasındaki gecikmeyi % 21 oranında etkilediği, elastisite modülündeki azalmanın ise çatlakların görünümünü % 26 oranında hızlandırdığı ve 16,5 kN gücünde görüldüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 8' de CFRP elastik modülünün güçlendirilmiş kiriş kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tablo 8. CFRP elastik modül değerinin kesme kuvveti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Kiriş	Açıklama	Kesme Kuvveti Taşıma Kapasitesi (kN)	Kapasite Artışı (%)	Değerlendirme
Referans	37 MPa basınç dayanımı olan kiriş	46	-	Güçlendirilmemiş referans kiriş
Kiriş D	CFRP Elastik Modülü = 50 GPa	81	76.1	Elastik modülü 50 GPa olan CFRP ile U şeklinde kiriş boyunca güçlendirme yapılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %76,1 oranında artış hesaplanmıştır.
Kiriş D	CFRP Elastik Modülü = 120 GPa	109	137.0	Elastik modülü 120 GPa olan CFRP ile U şeklinde kiriş boyunca güçlendirme yapılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %137 oranında artış hesaplanmıştır.
Kiriş D	CFRP Elastik Modülü = 600GPa	150	226.1	Elastik modülü 600 GPa olan CFRP ile U şeklinde kiriş boyunca güçlendirme yapılması durumunda kesme kuvveti taşıma kapasitesinde %226,1 oranında artış hesaplanmıştır.

Tablo 8 incelendiğinde, CFRP elastik modül değerinin artması halinde güçlendirme etkisinin de kesme kuvveti taşıma kapasitesi bakımından önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

Ayrıca, $E = 600$ GPa değerine sahip kirişin dayanımı, $E = 120$ GPa değerine sahip kirişe kıyasla % 30 oranında artarken, elastisite modülü $E = 50$ GPa değerine düşürüldüğünde % 22 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, geçmiş bir çalışmada laboratuvarda oluşturulan bir takım kiriş, ANSYS programı yardımıyla modellenip kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Çalışmada, deneysel çalışmanın sonuçları ile sayısal çalışmanın sonuçları arasında ve kirişlerin göçme mekanizmalarında büyük bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, betonun dayanımını değiştirmenin etkisi, karbon fiberin elastisite modülünü değiştirmenin etkisi, yükleme yöntemini değiştirmenin etkisi ve karbon fiberin şeklini ve açısını değiştirmenin etkisi gibi deneysel çalışmada ele alınmayan bazı değişkenler için parametrik çalışma yapılmıştır.

Çalışmanın sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. ANSYS programı, göçme kuvveti sonuçlarında deneysel sonuçlara kıyasla en kötü durumda % 9'luk bir fark göstermiştir. Bu nedenle, ANSYS yardımıyla modellemenin laboratuvar deneyleri için güçlü bir destek olacağı, dolayısıyla malzeme maliyetleri düşürülüp zamandan ve emekten tasarruf edileceği söylenebilir.
2. Karbon liflerle güçlendirme, göçme aniden meydana geldiği için kirişler için en tehlikeli çatlak tipi olan kirişin yanlarındaki kesme çatlaklarını, kirişin ortasında eğilme çatlaklarına dönüştürerek kırılma şeklini tamamen değiştirmiştir.
3. Modellenen kirişlerin kırılma mekanizması deney kirişlerinin kırılma mekanizmasıyla uyuşmaktadır.
4. Kirişlerin yanları ve altlarının liflerle güçlendirilmesi, yalnızca altların güçlendirilmesinden daha iyi sonuçlar verdiği hem incelenen deneysel çalışmada hem de tez kapsamında yapılan sayısal modelleme sonucunda görülmüştür. Başka bir deyişle, güçlendirme alanının artmasıyla kirişlerin kesme dayanımının arttığını ifade etmek mümkündür.
5. Karbon liflerle güçlendirmenin etkisi, kullanılan beton dayanımının (fc) artmasıyla arttığı sayısal olarak hesaplanmıştır.
6. Yüksek elastik modüle sahip karbon liflerle güçlendirme, düşük elastik modüle sahip karbon liflerle güçlendirmeye kıyasla betonarme kirişlerin dayanım ve rijitliğini daha fazla artırdığı çatlakların oluşumunu geciktirdiği yapılan sayısal hesaplamalar sonucunda görülmüştür.
7. Kirişin orta alanının güçlendirilmesinin kesme etkisi bakımından gereksiz bir güçlendirme olup kirişin kesme kuvveti taşıma kapasitesinde son derece küçük bir

artışla sonuçlandırıldığı sayısal olarak doğrulanmış model üzerinde hesaplanmıştır. Bu nedenle, CFRP malzemesi pahalı bir malzeme olduğu için kirişin orta alanının güçlendirilmesinden vazgeçilip yalnızca kesme alanlarının güçlendirilmesi önerilir.

8. Çalışmada sayısal olarak incelenen güçlendirme parametrelerinden biri, kesme alanlarının (yanlardan, üstten ve alttan) tamamen sarılması uygulamaları olmuştur. Kiriş kesiti çevresinin tamamen sarılmasının pratikte döşeme varlığı nedeniyle mümkün olmayacağı da dikkate alınarak; kirişin U şeklinde sargı kullanmanın yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
9. Yüklerin şeklindeki değişiklik, göçme bölgesini tamamen değiştirmiştir. Bu esasen temel statik davranış dikkate alındığında beklenen bir durumdur. Tekil yük durumunda göçme, kirişin merkezine daha yakın ve yükün uygulama noktasına kadar uzanan çatlaklar şeklinde olmuş, iki eşit simetrik yük durumunda göçmeye neden olan çatlaklar merkezden daha uzak olmuştur. Yayılı yük durumunda çatlaklar, kirişin altındaki tüm alana yayılmış ve kirişin ortasındaki bu çatlaklardan biri kirişin üst alanına ulaşmış ve göçmeye neden olmuştur.
10. Tekil yüke maruz kalan kiriş, iki eşit simetrik yüke maruz kalan kirişin göçmesine neden olan yükten daha küçük bir kuvvetle göçmüştür. Aksine, düzgün yayılı yüklere maruz kalan kirişte, iki eşit simetrik yüke maruz kalan kirişin göçmesine neden olan kuvvetten daha büyük bir kuvvete ihtiyaç duyulduğu hesaplanmıştır. Statik olarak iç kuvvet dağılımları dikkate alındığında bu sonucun beklenen bir davranış olduğu değerlendirilmesi yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Alkhatib, w., 2014. Evaluation The Efficiency of a Suggested Model in Emulation The Behavior of R.C. Beams Strengthened with GFRP Strips. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies, 37 (1), 305-316.
- Altunışık, A., Günaydın, M., Genç, A., Okur, F., 2018. İnşaat Muhendisliğinde ANSYS Uygulamaları, Daynamic Academy, Trabzon.
- Anonim, 2004. FRP Yapısal Güçlendirme Sistemleri, www.tekstar.com.tr/uygulamalar/frp (24.10.20014).
- ANSYS, 2005. ANSYS User's Manual Revision 10.0, ANSYS, Inc., Cannonsburg, Pennsylvania.
- Artem, L., 2010. Applying Carbon Fiber In Building Structures. Y.Lisans Tezi, Saimaa University, Finland.
- Assi, N., 2014. The Effect of Carbon Fiber Reinforced Polymer Length on the Strengthened of Concentrically loaded Reinforced Concrete Beams : Finite Element Analysis. Eng. & Tech. Journal, 32 (7), 1671-1683.
- Attari, N., Amziane, S., and Chemrouk, M., 2012. Flexural Strengthening of Concrete Beams Using CFRP. Construction and Building Materials, Elsevier, 746–757.
- Aytaç, A. 2015. Karbon Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitler. Kocaeli Üniversitesi. Kimya Mühendisliği Bölümü.
- Baggio, D., Soudki, K., And Noël, M., 2014. Strengthening of Shear Critical RC Beams with Various FRP Systems. Construction And Building Materials, Elsevier, 634–644.
- Barros, J., Dias, S., And Lima, J., 2007. Efficacy Of CFRP-Based Techniques for The Flexural and Shear Strengthening of Concrete Beams. Cement & Concrete Composites, (29), 203–217.
- Bulut, N., 2009. CFRP İle Kesmeye Karşı Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Doğrusal Olmayan Analizi. Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Camata, G., Spacone, E., Zarnic, R., 2007. Experimental and Nonlinear Finite Element Studies of RC Beams Strengthened with FRP Plates, Elsevier Composites Part B: Engineering, (38), 277–288.
- Choi, E., Utui, N., And Kim, H., 2013. Experimental and Analytical Investigations on Debonding of Hybrid FRPs For Flexural Strengthening of RC Beams. Composites, elsevier, 248–256.
- Çetin, C., 2007. Mevcut Betonarme Binaların Deprem Performanslarının Belirlenmesinde Doğrusal Olmayan Yöntemlerin Karşılaştırılması Üzerine Sayısal Bir İnceleme. Y.Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Demirer, A., 2011. Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Eleman Plastik Çözümlemeleri. Y.Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Elyasian, N., Abdoli, N., Ronagh, R., 2006. Evaluation of Parameters Effective In FRP Shear Strengthening of Rc Beams Using FE Method, Asian Journal of Civil Engineering, 7(3), 249-257.
- Ersoy, U., Özcebe, G., 2001. “Betonarme” , Evrim Yayınevi, İstanbul, 17-46 , 459-464.
- Gold, B., 2014. volume fraction. International Union of Pure and Applied Chemistry, www.goldbook.iupac.org/terms/view/V06643 (24.2.2014).
- Hacısalıhoğlu, M., 2010. Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Çözümlemeleri İle Betonarme Kolonlarda Boyut Etkisinin İrdelenmesi. Y.Lisans Tezi, Yıldız Teknik Ünivesitesi, İstanbul.

- Hashemi,S., Rahgozar,R,. 2007. Finite Element and Experimental Serviceability Analysis of HSC Beams Strengthened with FRP Sheet, American Journal of Applied Sciences, 4(9), 725-735.
- Hawileh, R., Rasheed, H., Al-Tamimi, A., And Abdalla, J., 2014. Behavior Of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Externally Bonded Hybrid Fiber Reinforced Polymer Systems. Materials And Design, Elsevier, 972–982.
- Hind, M., Özakça, M., Ekmekyapar, T,. 2016. A Review on Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers, Journal of Advanced Research in Applied Mechanics, 22 (1), 13-48.
- Husain, M., Seffo, M., 2017. Application ANSYS Program in Civil Engineering, Aleppo Universi
- Ibrahim, A., Mahmood, M,. 2009. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, European Journal of Scientific Research, 30 (4), 526-541.
- Kachlakev, D., Miller, T., And Yim, S., 2001. Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Federal Highway Adminsitation, Washington.
- Kartal, S., 2014. Cam Elyaf Donatılı Kirişlerin Eğilme Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. Y.Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Li, A., Assih, J., 2001. Shear Strengthening of Rc Beams with Externally Bonded CFRP Sheets. Journal of Structural Engineering, 127(4), 374-380.
- Mhanna, H., Hawileh, R., Abdalla, J., 2019. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using CFRP Wraps. Procedia Structural Integrity, (17), 214–221.
- Obaidat, Y., 2010, Structural Retrofitting of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fibre Reinforced Polymer. Y.Lisans Tezi, Lund University, Sweden.
- Obaidat, Y., Heyden, S., 2010. Retrofitting of Reinforced Concrete Beams Using Composite Laminates. Construction and Building Materials, 25, 591–597.
- Phalla,C., Dara, Y., 2003.Repair of Concrete Structure. Cambodia, www. openjicareport. jica.go. (2003).
- Saadatmanesh, H.,Ehsani, M., 2015. RC Beams Strengthened with FRP Plates. Journal of Structural Engineering, 3434-3455.
- Salman, W., 2018. Nonlinear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Reinforced with Internal Fiber-Reinforced Polymer. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9 (11), 2811–2825.
- Santhakumar, R., Chandrasekaran, E,. Dhanaraj, R,. 2004. Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams using Carbon Fiber Composites. Electronic Journal of Structural Engineering, 4 (2004) , 66-74.
- Siddiqui N., 2009. Experimental Investigation of Rc Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Composites. Latin American Journal of Solids and Structures, 6, 343 – 362.
- Sundarraja, M. Rajamohan, s.,2009. Strengthening of RC Beams in Shear Using GFRP Inclined Strips—an Experimental Study. Construction and Building Materials, 23, 856–864.
- Tavarez, F., 2001. Simulation of Behavior of Composite Grid Reinforced Concrete Beams Using Explicit Finite Element Methods. Yüksek Lisans Tezi, Wisconsin University, Wisconsin.
- Vulaş, Y., 2010. Betonarme Kirişlerin Kesmeye Dayanımlarının Lifli Polimerlerle Arttırılması. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Yang, Z., Chen, J., And Proverbs, D., 2003. Finite Element Modelling of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams. Construction and Building Materials, Elsevier, 3–13.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Kasem Fares
Doğum tarihi:	15 Ocak 1990
Doğum Yeri:	Suriye/Daraa
Uyruğu:	Suriyeli, T.C.
Adres:	Değirmicem Mah. Şehitkâmil, Gaziantep
Tel:	05530781210
E-mail:	Semo.far.9090@gmail.com
Eğitim	
Lise:	Daraa Lisesi (Suriye'de)
Lisans:	Philadelphia Üniversitesi, İnşaat Mühendislik (Ürdün'de)
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
Arapça:	Ana Dili
İngilizce:	Çok İyi
Türkçe:	Çok İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Ürdün Mühendislerinin Sendikası	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
-	