



**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MOD-II KESME KIRILMASI
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İffet Gamze MÜTEVELLİ ÖZKAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2018

İffet Gamze MÜTEVELLİ ÖZKAN tarafından hazırlanan “YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MOD-II KESME KIRILMASI DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Lutfullah TURANLI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Bengi AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 08/02/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İffet Gamze MÜTEVELLİ ÖZKAN

08/02/2018

YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MOD-II KESME KIRILMASI
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

İffet Gamze MÜTEVELLİ ÖZKAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2018

ÖZET

Beton heterojen bir malzeme olup içinde barındırdığı kusurlardan dolayı gerilme durumlarında oldukça zayıftır. Özellikle yüzey kaymasına bağlı olarak gelişen kesme gerilmeleri gevrek kesme kırılmalarına sebep olabilmektedir. Bilhassa yüksek dayanımlı betonlardaki bu aşırı gevrekliği azaltmak için beton karışımlarda çeşitli lifler kullanılmaktadır. Yüksek performanslı betonlarda en yüksek verim kesme etkisi altında alınmaktadır. Bu yüzden bu çalışmanın yapılmasına karar verilmiş olup yüksek performanslı betonlarda kesme açısının önemi ve meydana gelen çatlak yörüngeleri araştırılmıştır. Düşük su/çimento oranına sahip beton karışımında belirli oranlarda mikro polimer ve mikro çelik lifler kullanarak 250x250x30 mm boyutlarında deney elemanları hazırlanmıştır. Elde edilen her bir numuneye, karşılıklı olmak üzere ikişer çentik açılarak her bir lif oranı için 5 farklı açıda Mod II kesme kırılması durumu oluşturulmuştur. Referans numunesiyle birlikte toplamda 35 farklı durum değerlendirilmiştir. Elde edilen simetrik deney numunelerinin sol tarafına ve sağ tarafına üçer adet, alt kısmına da bir adet olmak üzere toplam 7 adet LVDT ile yatay deplasmanlar ve düşey deplasman hesaplanmıştır. Aynı zamanda kısa kenarına dik yönde statik yük uygulanarak numunelerin maksimum kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Elde edilen yük-yatay deplasman grafikleri ile yük-düşey deplasman grafikleri birbiri ile kıyaslanmış olup meydana gelen çatlak yörüngeleri incelenmiştir. Yüksek performanslı betonlarda kesme açısı büyüdükçe maksimum kesme kuvvetinin de artacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca bulunan sonuçlar ACI 318M-11 ile TS 500 standardı ve bazı araştırmacılar tarafından önerilen kesme gerilmesi yaklaşımlarıyla da karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Bilim Kodu : 91111

Anahtar Kelimeler : Mod II kesme kırılması, maksimum kesme kuvvetleri, kesme açısı, yüksek performanslı beton, çift çentikli simetrik test

Sayfa Adedi : 173

Danışman : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

INVESTIGATION OF MODE-II SHEAR FRACTURE BEHAVIOUR OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

(M. Sc. Thesis)

İffet Gamze MÜTEVELLİ ÖZKAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2018

ABSTRACT

Concrete is a heterogeneous material and has unfavourable effect under stress due to the inherent defects. Especially the shear stress due to sliding of surface can cause brittle shear fractures. Various fibers are used in the concrete mixes to reduce this excessive brittleness, especially in high-strength concretes. In high performance concrete, the favorable performance is taken under effect of shear. Therefore, it was decided to study this test, and in high performance concretes, the importance of the angle of shear and the cracked trajectories were investigated. Test specimens with dimensions of 250x250x30 mm have been prepared by using micro polymer and micro steel fibers in concrete mixture with low water/cement ratio. For each specimen, double edge notches were obtained to get a Mode II shear fracture at 5 different angles for each fiber ratio. A total of 35 different situations were evaluated with the reference specimens. Lateral displacements and vertical displacements were obtained with a total of 7 LVDTs, three on the left side and the right side and one on the lower side of the symmetric test samples. At the same time, the maximum shear forces of the specimens were determined by applying a static load perpendicular to the short edge. The load-lateral displacement graphs and load-vertical displacement graphs are compared with each other and the cracked paths are analysed. In high-performance concrete, the maximum shear strength increases the angle of shear. The results are also discussed in comparison with the ACI 318M-11 and TS 500 standard and the shear stress approach proposed by some researchers.

Science Code : 91111

Key Words : Mode II shear fracture, maximum shear forces, angle of shear, high performance concrete, punch through test

Page Number : 173

Supervisor : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen, bilgilerini ve tecrübelerini paylaşarak beni yönlendiren, katkılarıyla tezin şekillenmesini ve tamamlanmasını sağlayan danışman hocam saygıdeğer Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan, bana her konuda destek çıkan çok değerli anneme ve babama, bu çalışmada manevi yardımını esirgemeyen kıymetli dayıma; her anımı paylaşarak bana her zaman yardımcı olan çok değerli eşim Şenol ÖZKAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin laboratuvar aşamasında tecrübelerini benimle paylaşan, tezime önemli katkılar sağlayan sayın hocam Uzman Faruk OGÜN'e; çalışmama yardımcı olan Arş. Gör. Meryem BÖCEK'e, Anıl YILDIZHAN'a ve yüksek lisans eğitimimin ilk gününden itibaren her anımda yanımda olarak manevi desteğini esirgemeyen kıymetli arkadaşım Arş. Gör. Duygu DEMİRTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma görevlisi olarak çalıştığım Kastamonu Üniversitesi'nde tezimin tamamlanmasında bana desteğini esirgemeyen değerli hocalarıma ve iş arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxv
1. GİRİŞ.....	1
2. YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR VE LİF KULLANIMI	5
2.1. Normal Beton	5
2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar	5
2.3. Yüksek Performanslı Betonlar	6
2.4. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar	7
2.5. Silis Dumanı ve Kimyasal Katkıların Betonda Kullanımı	8
2.5.1. Silis dumanının beton özelliklerine etkileri	8
2.5.2. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkileri	9
2.6. Lif-Matris İlişkisi, Çelik ve Polimer Liflerin Betonda Kullanımı	10
2.6.1. Lif-matris ilişkisi.....	10
2.6.2. Betonda mikro lif kullanımı	11
2.6.3. Çelik liflerin beton özelliklerine etkileri	12
2.6.4. Polimer liflerin beton özelliklerine etkileri	13
3. KIRILMA MEKANİĞİ.....	15

	Sayfa
3.1. Kırılma ve Önemi.....	15
3.2. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Gelişimi	16
3.3. Çentik Etkisi.....	18
3.4. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)	19
3.4.1. Giriş.....	19
3.4.2. Griffith teorisi.....	19
3.4.3. Irwin teorisi	20
3.5. Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği ve Tokluk Deneyleri.....	23
3.5.1. Giriş.....	23
3.5.2. Çatlak ucu açılma deplasmanı (ÇUAD).....	24
3.5.3. J integrali.....	25
3.5.4. R eğrisi	26
4. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ	29
4.1. Giriş.....	29
4.2. Betonun Kırılma Mekanizması	29
4.3. Kırılma Mekaniğinin Betona Uygulanması ve Gelişimi.....	30
4.4. Betonun Kırılma Parametrelerini Tespit Etmeye Yönelik Çalışmalar.....	31
4.5. Betonda Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği ile İlgili Modeller	32
4.5.1. Fiktif çatlak modeli	33
4.5.2. Çatlak bant modeli	34
4.5.3. İki parametrelili model	34
4.5.4. Boyut etkisi parametreleri	35
4.5.5. G_F kırılma enerjisi	36
5. BETONDA MOD II KESME KIRILMASI	37

	Sayfa
5.1. Giriş.....	37
5.2. Kırılma Mekaniğine Göre Kesme Kırılması	37
5.3. Mod II ve Karışık Mod Durumları İçin Çeşitli Deney Numuneleri.....	39
5.3.1. Arrea ve Ingraffea'nın çalışmaları	40
5.3.2. Bazant ve Pfeiffer'in çalışması	41
5.3.3. Ingraffea ve Panthaki'nin çalışması.....	43
5.3.4. Swartz ve diğerlerinin çalışması	43
5.3.5. Swartz ve Taha'nın çalışması.....	44
5.3.6. Schlangen ve van Mier'in çalışması	45
5.4. Delft Teknik Üniversitesinde Yapılan Çalışmalar	47
5.5. Cardiff Üniversitesinde Yapılan Çalışmalar	48
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
6.1. Beton Karışım Malzemeleri	53
6.1.1. Çimento.....	53
6.1.2. Agrega.....	53
6.1.3. Silis dumanı.....	54
6.1.4. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi.....	55
6.1.5. Karışım suyu	56
6.1.6. Mikro çelik lifler	56
6.1.7. Mikro polimer lifler.....	56
6.2. Beton Karışım Oranları	57
6.3. Çentikler Açılarak Deney Elemanlarının Hazırlanması.....	58
6.4. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi	58
6.5. Deneyleerde Kullanılan Cihazlar ve Deney Düzeneği	60

	Sayfa
6.5.1. Yük hücresi (load cell)	60
6.5.2. Deplasman ölçer (LVDT)	60
6.5.3. Veri toplayıcı (data logger)	61
6.5.4. Yükleme cihazı ve ölçüm düzeneği	61
7. DENEY SONUÇLARI	63
7.1. Lifli ve Lifsiz Numunelerin Basınç Dayanımları.....	63
7.2. Kesme Deneyleleri	64
7.2.1. NF-68 numunesi.....	65
7.2.2. MP01-68 numunesi	66
7.2.3. MP02-68 numunesi	68
7.2.4. MP03-68 numunesi	69
7.2.5. MS1-68 numunesi	71
7.2.6. MS2-68 numunesi	72
7.2.7. MS3-68 numunesi	74
7.2.8. NF-73 numunesi.....	75
7.2.9. MP01-73 numunesi	77
7.2.10. MP02-73 numunesi	78
7.2.11. MP03-73 numunesi	80
7.2.12. MS1-73 numunesi	81
7.2.13. MS2-73 numunesi	83
7.2.14. MS3-73 numunesi	84
7.2.15. NF-79 numunesi.....	86
7.2.16. MP01-79 numunesi	87
7.2.17. MP02-79 numunesi	89

	Sayfa
7.2.18. MP03-79 numunesi	90
7.2.19. MS1-79 numunesi	92
7.2.20. MS2-79 numunesi	93
7.2.21. MS3-79 numunesi	95
7.2.22. NF-84 numunesi.....	96
7.2.23. MP01-84 numunesi	98
7.2.24. MP02-84 numunesi	99
7.2.25. MP03-84 numunesi	101
7.2.26. MS1-84 numunesi	102
7.2.27. MS2-84 numunesi	104
7.2.28. MS3-84 numunesi	105
7.2.29. NF-90 numunesi.....	107
7.2.30. MP01-90 numunesi	108
7.2.31. MP02-90 numunesi	110
7.2.32. MP03-90 numunesi	111
7.2.33. MS1-90 numunesi	113
7.2.34. MS2-90 numunesi	114
7.2.35. MS3-90 numunesi	116
7.3. Lif Oranlarına Göre Düşeyde Yük-Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması .	117
7.3.1. 68° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma	117
7.3.2. 73° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma	121
7.3.3. 79° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma	125
7.3.4. 84° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma	129
7.3.5. 90° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma	133

Sayfa

7.4. Denev Elemanlarının Düşeyde Yüv-Deplasman Grafiklerinin Kesme Açılara Göre Karşılaştırılması	137
7.5. Denevlerden Elde Edilen Sonuçların Farklı Kesme Gerilmesi Yaklaşımlarına Göre Karşılaştırılması.....	141
7.6. Sonuçların Farklı Yaklaşımlara Uyarlanması	143
7.7. Kesme Dayanımını Veren Eşitliğin Tasarlanması	155
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	159
KAYNAKLAR	163
ÖZGEÇMİŞ	171

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonlarının (RPB) karşılaştırılması	8
Çizelge 6.1. CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosunun kimyasal özellikleri	53
Çizelge 6.2. CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri	53
Çizelge 6.3. Silis kumunun kimyasal analiz sonuçları	54
Çizelge 6.4. Silis kumunun elek analizi sonuçları	54
Çizelge 6.5. Silis dumanının teknik özellikleri	55
Çizelge 6.6. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri	55
Çizelge 6.7. Mikro polimer liflerin fiziksel özellikleri	56
Çizelge 6.8. Lifli ve lifsiz beton numunelerin karışım oranları (kg/m^3)	57
Çizelge 6.9. Deney elemanlarının isimleri	59
Çizelge 7.1. Ortalama basınç dayanımları	63
Çizelge 7.2. Açılara göre değişen kesme açıklığı, yüksekliği ve numune derinliği	144
Çizelge 7.3. Lifsiz numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	145
Çizelge 7.4. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	146
Çizelge 7.5. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	146
Çizelge 7.6. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	147
Çizelge 7.7. %1 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	147
Çizelge 7.8. %2 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	148
Çizelge 7.9. %3 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)	148

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi	6
Şekil 2.2. Çatlamamış matrise ait lif-matris ilişkisi a) yüklenmemiş matris b) çekme etkisinde matris c) basınç etkisinde matris).....	10
Şekil 2.3. Çatlamış bir matrise ait lif- matris ilişkisi	11
Şekil 2.4. Çatlak arasında köprü oluşumuna farklı tel boyutlarının etkisi.....	11
Şekil 3.1. Kırılma mekaniğinin tarihsel gelişim süreci.....	17
Şekil 3.2. Basit çekme etkisindeki bir levhada çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları	18
Şekil 3.3. Çekme gerilmesi altında eliptik boşluklu sonsuz bir plak ve yük-deplasman grafiği.....	20
Şekil 3.4. Kırılma modları	21
Şekil 3.5. Kırılma süreci bölgesi.....	22
Şekil 3.6. Çatlak ucu plastik bölge ve efektif çatlak.....	23
Şekil 3.7. Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli.....	24
Şekil 3.8. Çatlak açılma deplasmanı	24
Şekil 3.9. J integrali yöntemi	25
Şekil 3.10. Gevrek malzemeler için R direnci	26
Şekil 3.11. Sünek malzemeler için R direnci	27
Şekil 4.1. Tek eksenli gerilme altında betonda çatlak yayılmasını evreleri.....	29
Şekil 4.2. Fiktif çatlak modeli.....	33
Şekil 4.3. Betonun gerilme-şekil değiştirme ve gerilme-çatlak ucu açılması diyagramları.....	33
Şekil 4.4. Betonun mikro çatlak bant modeli ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı....	34
Şekil 4.5. İki parametrelili kırılma modeli ve kırılma parametreleri	35

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Boyut etkisine göre nominal gerilme üzerindeki değişim	35
Şekil 5.1. Bazant ve Pfeiffer'in tanımladığı kesme çatlakları.....	38
Şekil 5.2. Kesme kuvvetine maruz kalmış kırılma bölgesi.....	38
Şekil 5.3. Karışık mod I-II yüklemeleri altında çatlak eğrisinin yayılması	38
Şekil 5.4. Çeşitli mod II ve karışık mod durumları için test numuneleri.....	39
Şekil 5.5. Arrea ve Ingraffea'nın kullandığı tek çentikli kiriş	40
Şekil 5.6. Çekme gerilmelerinden kaynaklı kesme kırılmaları.....	41
Şekil 5.7. Mod I mikro çatlaklarından gelişen mod II kesme çatlakları	42
Şekil 5.8. Bazant ve Pfeiffer' in kullandığı kesme deney elemanları	42
Şekil 5.9. Eğrisel çatlakların gösterimi	43
Şekil 5.10. Kesme yükü ve aksenal basınç etkisi altındaki kirişte oluşan çatlak yörüngeleri.....	44
Şekil 5.11. Schlangen ve van Mier tarafından kullanılan deney geometrisi.....	45
Şekil 5.12. Sırasıyla dönen ve sabit mesnetli durumlar için yükleme cihazları.	45
Şekil 5.13. Tek çentikli kirişlerde sırasıyla dönen mesnet ve sabit mesnetli durumlar için kırılma mekanizması.....	46
Şekil 5.14. Çift çentikli kirişlerde sırasıyla dönen mesnet ve sabit mesnetli durumlar için kırılma mekanizması.....	47
Şekil 5.15. Delft Teknik Üniversitesi Stevin Laboratuvarında iki eksenli test düzeneği a) deneye başlarken, b) çatlama sonrası.....	48
Şekil 5.16. Dairesel çentikli silindirik kesme deney elemanı	49
Şekil 5.17. Kesme testi için kübik kompakt deney elemanı	49
Şekil 5.18. Barr ve Hughes tarafından önerilen farklı geometriler.....	50
Şekil 5.19. Aksenal delme (punch through) test geometrileri a) farklı geometriler, b) 3-6 arası gösterilen deney elemanlarının ölçüleri	50
Şekil 5.20. Karışık mod kırılma için tasarlanan geometri	51
Şekil 6.1. Deney elemanlarının boyutları ve tasarlanan açıların gösterimi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 6.2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	62
Şekil 7.1. Mikro polimer ve mikro çelik liflerin basınç dayanımına etkisi	64
Şekil 7.2. NF-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği	65
Şekil 7.3. NF-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikler	66
Şekil 7.4. MP01-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	67
Şekil 7.5. MP01-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	67
Şekil 7.6. MP02-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	68
Şekil 7.7. MP02-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	69
Şekil 7.8. MP03-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	70
Şekil 7.9. MP03-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	70
Şekil 7.10. MS1-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	71
Şekil 7.11. MS1-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	72
Şekil 7.12. MS2-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	73
Şekil 7.13. MS2-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	73
Şekil 7.14. MS3-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	74
Şekil 7.15. MS3-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	75
Şekil 7.16. NF-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği	76
Şekil 7.17. NF-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri.....	76
Şekil 7.18. MP01-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	77
Şekil 7.19. MP01-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	78
Şekil 7.20. MP02-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	79
Şekil 7.21. MP02-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	79
Şekil 7.22. MP03-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	80
Şekil 7.23. MP03-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	81

Şekil	Sayfa
Şekil 7.24. MS1-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	82
Şekil 7.25. MS1-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	82
Şekil 7.26. MS2-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	83
Şekil 7.27. MS2-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	84
Şekil 7.28. MS3-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	85
Şekil 7.29. MS3-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	85
Şekil 7.30. NF-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği	86
Şekil 7.31. NF-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri.....	87
Şekil 7.32. MP01-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	88
Şekil 7.33. MP01-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	88
Şekil 7.34. MP02-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	89
Şekil 7.35. MP02-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	90
Şekil 7.36. MP03-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	91
Şekil 7.37. MP03-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	91
Şekil 7.38. MS1-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	92
Şekil 7.39. MS1-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	93
Şekil 7.40. MS2-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	94
Şekil 7.41. MS2-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	94
Şekil 7.42. MS3-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	95
Şekil 7.43. MS3-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	96
Şekil 7.44. NF-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği	97
Şekil 7.45. NF-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri.....	97
Şekil 7.46. MP01-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	98
Şekil 7.47. MP01-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	99

Şekil	Sayfa
Şekil 7.48. MP02-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	100
Şekil 7.49. MP02-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	100
Şekil 7.50. MP03-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	101
Şekil 7.51. MP03-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	102
Şekil 7.52. MS1-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	103
Şekil 7.53. MS1-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	103
Şekil 7.54. MS2-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	104
Şekil 7.55. MS2-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	105
Şekil 7.56. MS3-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	106
Şekil 7.57. MS3-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	106
Şekil 7.58. NF-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği	107
Şekil 7.59. NF-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri.....	108
Şekil 7.60. MP01-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	109
Şekil 7.61. MP01-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	109
Şekil 7.62. MP02-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	110
Şekil 7.63. MP02-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	111
Şekil 7.64. MP03-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	112
Şekil 7.65. MP03-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	112
Şekil 7.66. MS1-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	113
Şekil 7.67. MS1-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	114
Şekil 7.68. MS2-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	115
Şekil 7.69. MS2-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	115
Şekil 7.70. MS3-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği.....	116
Şekil 7.71. MS3-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri	117

Şekil	Sayfa
Şekil 7.72. 68° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	118
Şekil 7.73. 68° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	118
Şekil 7.74. 68° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	119
Şekil 7.75. 68° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	119
Şekil 7.76. 68° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	120
Şekil 7.77. 68° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	120
Şekil 7.78. 68° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	121
Şekil 7.79. 73° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	122
Şekil 7.80. 73° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	122
Şekil 7.81. 73° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	123
Şekil 7.82. 73° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	123
Şekil 7.83. 73° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	124
Şekil 7.84. 73° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	124
Şekil 7.85. 73° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	125
Şekil 7.86. 79° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	126
Şekil 7.87. 79° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	126

Şekil	Sayfa
Şekil 7.88. 79° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 7.89. 79° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	127
Şekil 7.90. 79° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 7.91. 79° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 7.92. 79° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	129
Şekil 7.93. 84° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	130
Şekil 7.94. 84° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	130
Şekil 7.95. 84° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 7.96. 84° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	131
Şekil 7.97. 84° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	132
Şekil 7.98. 84° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	132
Şekil 7.99. 84° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	133
Şekil 7.100. 90° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	134
Şekil 7.101. 90° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	134
Şekil 7.102. 90° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	135
Şekil 7.103. 90° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması.....	135

Şekil	Sayfa
Şekil 7.104. 90° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	136
Şekil 7.105. 90° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	136
Şekil 7.106. 90° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması	137
Şekil 7.107. Lifsiz deney elemanlarının karşılaştırılması	138
Şekil 7.108. Mikro polimer lif oranı %0,1 olan deney elemanlarının karşılaştırılması..	138
Şekil 7.109. Mikro polimer lif oranı %0,2 olan deney elemanlarının karşılaştırılması..	139
Şekil 7.110. Mikro polimer lif oranı %0,3 olan deney elemanlarının karşılaştırılması..	139
Şekil 7.111. Mikro çelik lif oranı %1 olan deney elemanlarının karşılaştırılması	140
Şekil 7.112. Mikro çelik lif oranı %2 olan deney elemanlarının karşılaştırılması	140
Şekil 7.113. Mikro çelik lif oranı %3 olan deney elemanlarının karşılaştırılması	141
Şekil 7.114. Deney elemanına etkiyen kuvvetler ve kesme yüzeyi	144
Şekil 7.115. 68° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	149
Şekil 7.116. 73° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	149
Şekil 7.117. 79° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	150
Şekil 7.118. 84° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	150
Şekil 7.119. 90° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması.....	151
Şekil 7.120. Lifsiz numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması.....	152
Şekil 7.121. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması	152
Şekil 7.122. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması	153

Şekil	Sayfa
Şekil 7.123. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması	153
Şekil 7.124. %1 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması.....	154
Şekil 7.125. %2 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması.....	154
Şekil 7.126. %3 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması.....	155
Şekil 7.127. Lif içermeyen numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması.....	156
Şekil 7.128. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	157
Şekil 7.129. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	157
Şekil 7.130. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	157
Şekil 7.131. %1 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	158
Şekil 7.132. %2 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	158
Şekil 7.133. %3 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	158

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Yük hücresi (Load cell)	60
Resim 6.2. Deplasman ölçerler (LVDT).....	60
Resim 6.3. Veri toplayıcı ve haberleşme birimi	61
Resim 6.4. Hidrolik yükleme cihazı	61
Resim 6.5. Yükleme sehpası ve deney düzeneği	62
Resim 7.1. 2000 kN kapasiteli hidrolik yükleme cihazı ve kırılan küp numuneler.....	63
Resim 7.2. NF-68 numunesinde çatlak yörüngesi	65
Resim 7.3. MP01-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	66
Resim 7.4. MP02-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	68
Resim 7.5. MP03-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	69
Resim 7.6. MS1-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	71
Resim 7.7. MS2-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	72
Resim 7.8. MS3-68 numunesinde çatlak yörüngesi.....	74
Resim 7.9. NF-73 Numunesinde çatlak yörüngesi	75
Resim 7.10. MP01-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	77
Resim 7.11. MP02-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	78
Resim 7.12. MP03-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	80
Resim 7.13. MS1-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	81
Resim 7.14. MS2-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	83
Resim 7.15. MS3-73 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	84
Resim 7.16. NF-79 numunesinde çatlak yörüngesi	86
Resim 7.17. MP01-79 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	87
Resim 7.18. MP02-79 numunesinde çatlak yörüngesi.....	89

Resim	Sayfa
Resim 7.19. MP03-79 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	90
Resim 7.20. MS1-79 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	92
Resim 7.21. MS2-79 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	93
Resim 7.22. MS3-79 Numunesinde çatlak yörüngesi.....	95
Resim 7.23. NF-84 numunesinde çatlak yörüngesi	96
Resim 7.24. MP01-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	98
Resim 7.25. MP02-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	99
Resim 7.26. MP03-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	101
Resim 7.27. MS1-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	102
Resim 7.28. MS2-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	104
Resim 7.29. MS3-84 numunesinde çatlak yörüngesi.....	105
Resim 7.30. NF-90 numunesinde çatlak yörüngesi	107
Resim 7.31. MP01-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	108
Resim 7.32. MP02-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	110
Resim 7.33. MP03-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	111
Resim 7.34. MS1-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	113
Resim 7.35. MS2-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	114
Resim 7.36. MS3-90 numunesinde çatlak yörüngesi.....	116

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
d_f	Aderans faktörü
σ_{ak}	Akma dayanımı
a_0	Başlangıç çatlak uzunluğu
γ_{mc}	Beton için malzeme katsayısı
f'_s	Beton silindir basınç dayanımı
f_{ck}	Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{ctk}	Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
f'_c	Beton küp basınç dayanımı
Λ	Betonun mekanik özellik modifikasyon faktörü
f_{ctd}	Betonun tasarım eksenel çekme dayanımı
f'_t	Betonun yarmada çekme dayanımı
E_t	Betonun yumuşama bölgesindeki rijitlik
A_g	Brüt beton alanı
w	Çatlak ucu açılması
γ_e	Çatlama dayanımına eksenel kuvvet etki katsayısı
f_t	Çekme dayanımı
σ	Çekme gerilmesi
α_p	Çentik açısı
a	Çentik boyu veya eliptik çatlak genişliğinin yarısı
d'_y	Deney elemanına ait kesme yüksekliği
ρ	Eğilme donatısı oranı
N_u	Eksenel basınç kuvveti
σ_n	Eksenel basınç
E	Elastisite modülü
G	Enerji yayılma hızı
a_e	Etkili çatlak uzunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

Y	Geometri faktörü
K	Gerilme şiddet faktörü
K_y	Gerilme yığılması katsayısı
δ	Göçme anındaki deplasman
A_c	Gövde kesiti beton alanı
V_f	Hacimsel lif oranı
h₁	İç mesnetler arasındaki mesafe
τ	Kayma gerilmesi
e	Kemer etkisi faktörü
A'	Kesit alanı
V_{cr}	Kesitin kesmede çatlama dayanımı
a	Kesme açıklığı
a/d	Kesme açıklığı-kesme derinliği oranı
θ	Kesme açısı
v_u	Kesme dayanımı
V	Kesme kuvveti
d_y	Kesme kuvvetinin etkidiği deney elemanı yüksekliği
R	Kırılma direnci
G_F	Kırılma enerjisi
h_c	Kırılma işlem bölgesinin genişliği
r_p	Kırılma süreci bölgesinin uzunluğu
w_c	Kritik çatlak ucu açılması sabiti
a_c	Kritik çatlak uzunluğu
G_C	Kritik çatlak yayılma hızı
K_C	Kritik gerilme şiddet faktörü
m	Kütle
W	Levha genişliği
D_f	Lif çapı
f_{ft}	Lif çekme dayanımı
F	Lif faktörü
τ₀	Lif matrisinin ortalama ara yüzey dayanımı

Simgeler**Açıklamalar**

L_f	Lif uzunluğu
σ_{maks}	Maksimum yerel gerilme
B	Malzeme genişliği
σ_N	Nominal gerilme
N	Normal kuvvet
d	Numune boyut yüksekliği veya faydalı yükseklik
b_w	Numune derinliği
t	Numune kalınlığı
h	Numune üzerinde açılan ana çentik derinliği
σ_{ort}	Ortalama gerilme
ν	Poisson oranı
ϵ	Şekil değiştirme
f_I	Şekil fonksiyonu mod I
f_{II}	Şekil fonksiyonu mod II
N_d	Tasarım eksenel kuvveti
U	Yapılan iş veya yer değiştirme enerjisi
D	Yapının karakteristik boyutu
g	Yerçekimi ivmesi
P	Yük
U_0	Yük-deplasman eğrisi altında kalan alan
A	Yükleme doğrultusuna paralel yüzey alanı
Y	Yüzey enerjisi

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ÇAD	Çatlak açılma deplasmanı
ÇUAD	Çatlak ucu açılma deplasmanı
ÇUAD_c	Kritik çatlak ucu açılma deplasmanı
EPKM	Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği
GPa	Gigapascal
LEKM	Lineer elastik kırılma mekaniği

Kısaltmalar**Açıklamalar****MPa**

Megapascal

NDB

Normal dayanımlı beton

RPB

Reaktif pudra betonu

S/B

Su/bağlayıcı malzeme

SD

Silis dumanı

SHRP

ABD' de Stratejik Otoyol Araştırma Programı

UYPB

Ultra yüksek performanslı beton

YDB

Yüksek dayanımlı beton

YPB

Yüksek performanslı beton

1. GİRİŞ

Beton, çağımızın vazgeçilmez bir yapı malzemesidir ve geçmişten günümüze sürekli bir gelişim göstererek popülerliğini korumaktadır. Gelişen beton teknolojisiyle birlikte betona istenilen özellikleri verebilmek ya da zayıf bazı özelliklerini iyileştirebilmek mümkün olmaktadır. Önceki yıllarda yapılan araştırmalarda, betondan beklentiler betonun basınç dayanımı üzerinde yoğunlaşmaktayken artık bu heterojen malzemenin sünekliği de hızla ön plana çıkmıştır. Yani yüksek dayanımların beraberinde getirdiği aşırı gevreklik sorunu beton teknolojisine ayrı bir boyut kazandırmıştır. Bunun için de beton karışımlarında farklı türlerde ve farklı oranlarda lifler kullanılmaya başlanmış ve yüksek performanslı betonlar elde edilmiştir.

Beton karışımlarında kullanılan çeşitli lifler, beton basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklere pek fazla etki etmemesine rağmen, betonun darbe dayanımında, eğilme-çekme dayanımında, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerinde oldukça önemli iyileşmeler göstermiştir [1]. Bu iyileşmeler lif çeşidi, lif miktarı ve beton bileşenleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir.

Yüksek performanslı betonlar içerisinde üniform şekilde dağılmış olan lifler, matriste ilerleyen çatlağın yol açtığı gerilmeleri kendi üzerlerine alıp matristeki çatlamamış bölgelere ileterek betonda gerilme köprüsü görevi görmektedirler. Böylelikle betona süneklik ve tokluk sağlayarak betonun kırılmadan önce sönümleyebildiği enerji miktarını önemli kılmaktadır.

Beton çok yönlü heterojen bir malzeme olup içerisinde barındırdığı kusurlardan dolayı gerilme durumlarında oldukça zayıftır. Klasik mukavemet yaklaşımında beton elemanda yükleme sonucu ortaya çıkan maksimum gerilme, betonun basınç dayanımına göre kıyaslanmakta iken kırılma mekaniği yaklaşımında ise yükleme sonucu elemanda oluşan gerilmeyle beraber parça içinde bulunan süreksizlikler de göz önüne alınmakta ve bulunan değerler betonun kırılma tokluğu ile kıyaslanmaktadır.

Beton yapıların tasarımında eski yıllarda elastik analiz (emniyet gerilmeleri yöntemi) kullanılırken günümüzde plastik limit analiz (taşınma gücü yöntemi) kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de betonun basınç dayanımı dikkate alınmış, çekme dayanımı ihmal edilmiştir.

Bu durumdan dolayı gerçeğin çok da doğru yansıtılamaması, son yıllarda araştırmacıları betonun kırılma mekaniği üzerine yoğunlaştırmıştır.

Beton elemanlar tasarlanırken doğrudan basınç dayanımı kriteri yerine kırılma enerjisi, çatlak direnci ve gerilme şiddet faktörü gibi ifadelerin kullanılması kırılma mekaniği açısından oldukça önemli rol oynamaktadır. Böylelikle betonun uygulanması esnasında gevreklik göz ardı edilmemiş olup çözüm için yeni yöntemler araştırılabilecektir. Bu durum kırılma mekaniğinin önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Betonda yüzey kaymasına bağlı olarak gelişen kesme gerilmeleri malzemeler ve yapılar için oldukça tehlikelidir. Kesme gerilmelerinin sebep olduğu kesme kırılması diğer kırılmalara göre daha ani ve daha yıkıcı bir kırılmadır. Betonun mekanik davranışı açısından kesme kırılmasının nasıl geliştiğinin ve nasıl ilerlediğinin bilinmesi gerekmektedir. Geçmişte bu konuyla ilgili yapılan bazı çalışmalar kesme kırılmasının önemini özellikle vurgulamaktadır.

Arrea ve Ingraffea kesme kırılması ile ilgili yaptığı çalışmalarında tek çentikli beton kirişler kullanarak deney sonucunda oluşan çatlakların büyük asal gerilmelerden kaynaklandığını ve bu gerilemelere dik yönde oluştuğunu söylemişlerdir [2]. Bazant ve Pfeiffer ise çalışmalarında karşılıklı iki çentik içeren kirişler kullanarak Arrea ve Ingraffea' nın aksine dar bir kesme bölgesi elde etmişlerdir. Böylece çentik uçlarından iki çatlağın başladığını ve kirişin ortasında birbirleriyle birleştiğini göstererek kesme kırılmasının varlığını ifade etmişlerdir [3]. Çatlakların, maksimum asal gerilme kriterinden ziyade enerji yayılım hızının maksimum olduğu yönde yayıldığını belirtmişlerdir [4].

Beton teknolojisinin gelişmesiyle birlikte betonun mekanik davranışı da değişime uğramakta ve bazı eksik noktaların araştırılması gerekmektedir. Özellikle gün geçtikçe kullanım alanı artan yüksek performanslı betonlarda kesme kırılması davranışının tam olarak bilinmemesi yapılarda tehlikeli durumlara neden olabilmektedir. İlgili standart ve yönetmeliklerdeki eksiklikler bu araştırmanın yapılmasında önemli bir oynamıştır. Bu çalışmada yüksek performanslı betonlar için kırılma mekaniği esasları dikkate alınarak mod II kesme kırılması ve çatlak yörüngeleri incelenmiş olup özellikle değişen lif oranına göre kesme açısının etkisi araştırılmıştır.

Çalışmada 2 çeşit lif türü için 3 farklı lif oranı kullanılarak 250x250x30 mm boyutlarında beton levhalar dökülmüştür. Beton karışımı içerisine beton ağırlığının %1, %2 ve %3 ü oranında mikro çelik lif ile yine toplam beton ağırlığının %0,1; %0,2 ve %0,3 ü oranında mikro polimer lif kullanılmıştır. Aynı zamanda lif içermeyen referans numuneleri de elde edilmiştir. Daha sonra her bir numune için karşılıklı olmak üzere ikişer çentik açılarak her bir durum için 5 farklı açıda kesme kırılması durumu oluşturulmuştur. Bu açılar 68°, 73°, 79°, 84° ve 90° olarak belirlenmiş olup çalışmada 35 farklı durum incelenmiştir.





2. YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR VE LİF KULLANIMI

2.1. Normal Beton

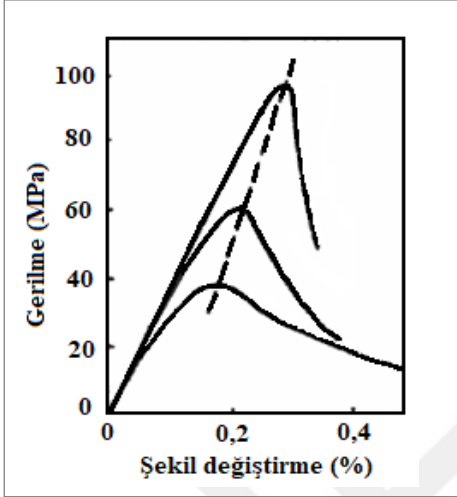
Beton; agrega, çimento, su ve ihtiyaç durumuna göre bazı katkı maddelerinin de birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir [5]. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren şehirleşme ve sanayileşmenin etkisiyle beton üretimi hızlı bir artış göstermiştir. Üretim de kolaylık ve uygun maliyet gibi önemli avantajları sayesinde inşaat sektörünün vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. Evler, okullar, hastaneler, spor merkezleri, alt yapı şebekeleri, su artıma tesisleri gibi birçok yapı beton kullanılarak inşa edilmektedir [6]. Günümüzde en çok tercih edilen bu yapı malzemesi en basit haliyle normal beton olarak nitelendirilmektedir.

Normal betonlar; özel nitelikler gerektirmeyen, kolay ve ekonomik üretilen malzemelerdir. Basınç dayanımları 20-60 MPa ve kırılma enerjileri 100-120 J/m² civarındadır [7]. Normal dayanımlı betonlar (NDB) üretim kolaylığı ve uygun maliyet gibi avantajları sayesinde yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmasına rağmen gelişen teknolojiye ve değişen ihtiyaçlara göre beton teknolojisinde de önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle 1980'li yıllardan itibaren beton dayanımlarında önemli artışlar sağlanmıştır ve çalışmalar neticesinde yüksek dayanımlı betonlar elde edilmiştir [8].

2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar (YDB); yüksek kalitede agrega ve çimento ile birlikte silis dumanı kullanılarak, aynı zamanda su/çimento oranı 0,20 değerlerine düşürülüp süperakışkanlaştırıcı katkı ile yüksek işlenebilirlik sağlanarak üretilmektedir. Yüksek dayanımlı beton tasarımında betonu oluşturan malzemeler arasında oluşabilecek boşlukları en aza indirerek hedeflenen düşük porozite ve yüksek durabilite ile YDB'lerin agrega-çimento hamuru ara yüzeyleri daha güçlü olabilmektedir. Bununla birlikte basınç dayanımları ise yaklaşık olarak 100 N/mm² civarlarına kadar çıkabilmektedir [9,10]. Betonda dayanımın artmasıyla betonun eksenel şekil değiştirme kapasitesi de artış göstermektedir. Aynı zamanda Şekil 2.1'de görüldüğü gibi yüksek dayanımlı bir betona ait olan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tepe noktası aşıldıktan sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve beton normal betona göre daha gevrek bir kırılma sergilemektedir [7]. Yüksek

dayanımlı betonlarda meydana gelen bu aşırı gevrekliği önlemek için beton karışımlarında farklı türlerde ve oranlarda lifler kullanılarak iyi derecede sünek olan yüksek performanslı betonlar elde edilmiştir.



Şekil 2.1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi [8]

2.3. Yüksek Performanslı Betonlar

Yüksek performanslı betonlar (YPB) aslında iyi bir durabiliteye sahip olan yüksek dayanımlı betonlardır [7]. Ancak YDB'larda ani ve yıkıcı kırılmalara sebep olan gevreklik önemli bir sorundur. Bunu engellemek için beton karışımlarda çeşitli lifler kullanılmakta ve YPB'lar elde edilmektedir. Karışım içerisine katılan çelik, naylon ve karma lifler beton basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklere çok fazla etki etmez iken, betonun darbe dayanımında, eğilme-çekme dayanımında, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerinde oldukça önemli iyileşmeler sağlamaktadır [1]. Bu iyileşmeler lif çeşidi, lif miktarı ve beton bileşenleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim sergilemektedir.

Aynı zamanda ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına göre yüksek performanslı betonları aşağıdaki gibi tanımlamak da mümkündür [7,11].

- Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $\geq 17,5$ MPa,
- Çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa,
- Çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- Durabilite çarpanı $\geq \%80$ (donma – çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$.

Yüksek performanslı betonlar gerek içerisindeki malzemeler gerekse hidratasyon hızı ve ürünleri açısından normal betonlardan farklıdır. Yani, YPB'ların normal betonların gelişmiş bir türü olmadığı, farklı bir yapı malzemesi olduğu söylenebilir. Buna ek olarak bu betonların kullanım alanları da farklılık göstermekte ve daha çok yüksek dayanım ve yüksek dayanıklılık gerektiren özel yapılarda tercih edilmektedir. Bu yapılara örnek olarak açık deniz petrol platformları, aşınmaya dayanıklı yol betonları, baraj boşaltma kanalları, yüksek katlı yapılar ve endüstriyel döşemeler gösterilebilir [12].

2.4. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar

Ultra yüksek performanslı betonlar (UYPB), yüksek performanslı betonlardan daha iyi durabilite ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olan yeni nesil bir betondur. Ultra yüksek performanslı betonlarda çok yüksek dayanımlara ulaşılmakta ve aynı zamanda yüksek bir süneklik de elde edilebilmektedir. UYPB'ların temel prensibi; homojenlik ve maksimum yoğunluk sağlayarak bünyesindeki kusurları minimum seviyeye indirmek ve böylece karışım bileşenlerinin mikro ve makro özelliklerini geliştirmektir [13]. UYPB'larda kullanılan çimento oranı, normal dayanımlı ve yüksek performanslı betona kıyasla nispeten daha yüksektir [14]. Bu betonların karışımlarında çok düşük oranda su/bağlayıcı (s/b) oranı kullanılır. En az s/b oranı 0,08 olarak Richard ve Cheyrezy [15] tarafından denenmiş ancak bu oran yoğun tane dizilimine olanak vermemiştir. Bundan dolayı maksimum bağıl yoğunluğu ve dağılıma akışını sağlamak için önceki çalışmalar dikkate alınarak optimum s/b oranı 0,13-0,20 olarak belirlenmiştir [13]. Ultra yüksek performanslı betonlara Reaktif pudra betonları (RPB) örnek olarak gösterilebilir.

1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından ilk defa geliştirilen RPB'ların küp basınç dayanımları 200-800 MPa'a kadar ulaşmıştır. Aynı zamanda bu betonların çekme dayanımlarının 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjilerinin de yaklaşık 30000 J/m² civarında olduğu gözlemlenmiştir [16].

Çizelge 2.1'de gösterilen karşılaştırmada normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonları arasındaki mekanik farklılıklar net olarak anlaşılmaktadır. Çizelgede de görüldüğü gibi çelik tellerin eklenmesi betona büyük ölçüde tokluk sağlamıştır.

Çizelge 2.1. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonlarının (RPB) karşılaştırılması [16]

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi (J/m^2)	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75

2.5. Silis Dumanı ve Kimyasal Katkıların Betonda Kullanımı

2.5.1. Silis dumanının beton özelliklerine etkileri

Silis dumanı (SD), beton için önemli bir bağlayıcı olup elektronik endüstrisinde yarı iletkenlerin üretiminde kullanılan saf silisyum ve alaşımlarının elektrik ark fırınlarında yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile üretilirler. Silis dumanı (SiO_2), fırının düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf bir şekilde yoğunlaşarak baca külü olarak ortaya çıkar [17].

Silis dumanıyla ilgili ilk çalışmalar 1950'li yıllarda çevre koruması amacı ile Norveç'te başlamış ve çimento katkısı olarak denenmesi 1969'da yine Norveç'te olmuştur. Beton karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılması, endüstriyel atıkların betonda kullanılarak çevre kirliliğinin azalması ve silis dumanının beton özelliği üzerindeki olumlu etkilerinin fark edilmesi ve gibi faktörler silis dumanı konusundaki çalışmalarını hızlandırmıştır [18]. Çok ince taneli küresel parti küllerden meydana gelen silis dumanı, bünyesinde yüksek silis oranı içermesinden dolayı betonda kullanılan önemli bir mineral katkıdır. Beton ve çimento üretiminde kullanılan silis dumanının rengi genellikle gri renktedir. Danelerinin ortalama çapları $0,1 \mu m$ civarında olup çimento danelerinden oldukça küçüktürler.

SD, betonda durabilitenin yükseltilmesi ve hidrasyon hızının azaltılması gibi nedenlerle bir miktar çimento ile ikame edilerek kullanıldığı gibi taze ve sertleşmiş beton özelliklerini geliştirmek için mineral katkı olarak da kullanılır [7]. SD beton hamuru içerisindeki çimento ve agrega danelerinden çok daha küçük olduğu için öncelikle çok küçük boşlukları bile doldurarak daha yoğun ve daha yüksek mukavemete sahip bir beton matrisi oluşturur. Bir diğer önemli özelliği puzolanik aktivitesidir. Çimentonun ana bileşenlerinden olan

dikalsiyum silikat (C_2S) ve trikalsiyum silikat (C_3S) bileşenlerinin hidrate olması sonucu CSH ve $Ca(OH_2)$ bileşikleri oluşmaktadır. Beton karışımı içerisine katılan silis dumanı puzolanik özelliği sayesinde $Ca(OH_2)$ ile reaksiyona girerek daha yüksek mukavemete sahip olan yeni C-S-H jeli oluşturmaktadır [18]. Böylelikle çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderans kuvvetlenmekte ve betonun dayanımı ve durabilitesi artmaktadır [7]. Yani silis dumanı, yüksek performanslı betonların elde edilmesinde oldukça önemli bir faktördür.

Silis dumanı; su geçirimsizliğini düşürme, alkali silika reaksiyonunu azaltma, sülfata karşı dayanıklılığı artırma gibi durabilite özelliklerinde de iyileşme sağlarken ve basınç dayanımını artırırken beton üzerinde bazı olumsuz etkilere de neden olabilmektedir. Bunları karışım suyu ihtiyacında artma, daha koyu renkli beton üretme, beton yüzeyini düzeltmede zorluk ve meydana gelen plastik rötre çatlakları olarak sıralayabiliriz [5].

2.5.2. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkileri

Kimyasal katkı maddeleri betonun fiziksel ve kimyasal bazı özelliklerinde değişiklik yapmak amacıyla kullanılırlar. Genellikle sıvı halde olan bu malzemeler, uygulamalarda betondan beklenen özelliklere göre seçilip çimentonun ağırlıkça yüzdesi olarak beton karışım suyuna eklenirler [17]. Kimyasal katkıları, doğru kullanılmadıklarında veya iki kimyasal katkı bir arada kullanıldığında beton üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bunun için beton üretiminde katkı maddesi kullanılmadan önce laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir [19]. Kimyasal katkıları örnek olarak su azaltıcıları, yüksek oranda su azaltıcıları, priz hızlandırıcıları, korozyon önleyicileri, rötre azaltıcıları, hava sürükleyicileri ve geçirimsizlik azaltıcı katkıları verebiliriz. Beton üretiminde en fazla kullanılan kimyasal katkıları su azaltıcı ve yüksek oranda su azaltıcı olarak isimlendirilen betona işlenebilme kolaylığı kazandıran akışkanlaştırıcılarıdır. Bu maddeler ilk kez 1930'da lignosülfonatlar esaslı olarak üretime başlamış ve 1960'larda sülfonatlı naftalin polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları olarak geliştirilmiştir. 1990'lar sonrasında ise önce vinil kopolimerler ve en son olarak da modifiye polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcıları olarak üretilerek ultra yüksek dayanımlı ve ultra yüksek performanslı betonların üretiminde kullanılan önemli bir katkı malzemesi haline almıştır [19].

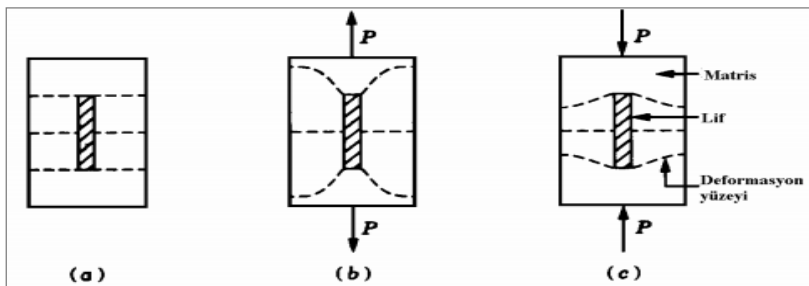
Süper akışkanlaştırıcı katkıları, taze betonda aynı su/çimento oranında çok daha yüksek işlenebilirlik veya aynı işlenebilirlikte çok daha düşük su/çimento oranı elde ederek betonda daha yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlarlar [20]. Süper akışkanlaştırıcılar sayesinde taze betonda kullanılan suyun azalmasıyla birlikte karışımda kullanılan çimento miktarı da azalır ve hidrasyon ısı düşer. Aynı zamanda azalan hamur hacminin yerini agregaların almasıyla da büzülme azalır [21].

Süper akışkanlaştırıcıların çalışma mekanizması malzemenin çimento taneleri tarafından emilmesiyle başlar. Akışkanlaştırıcılar çimento tanelerinin yüzeylerini kuşatarak negatif yüklerle yüklenir ve tanelerin elektrostatik etki ile birbirlerini itmesini sağlarlar. Daha sonradan geliştirilen yeni nesil hiper akışkanlaştırıcılar da ise durum biraz daha farklıdır. Bu malzemeler değişik bir kimyasal yapıya sahip oldukları için elektrostatik etkinin yanında sterik etki de gösterirler. Yani hiper akışkanlaştırıcı molekülleri uzun kenarlı zincirlere sahip olduğundan sterik bir engel oluşturarak çimento tanelerinin birbirine olan uzaklığını korur ve mükemmel bir dağılım gerçekleştirirler [20].

2.6. Lif-Matris İlişkisi, Çelik ve Polimer Liflerin Betonda Kullanımı

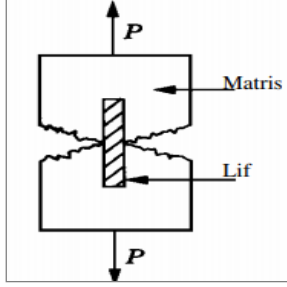
2.6.1. Lif-matris ilişkisi

Lif takviyeli kompozitlerde yüklem olmadığında matris ve lifin her ikisinde de gerilmeler sıfır kabul edilir. Matrise yük uygulandığında uygulanan yükün bir kısmı lif yüzeyi boyunca etkir. Lif ile matris arasındaki elastisite farkından dolayı lif boyunca kayma gerilmeleri oluşur ve bu kayma gerilmeleri, uygulanan yükün bir kısmını liflere aktarır. Lif, matristen daha kuvvetli bir yapıya sahip ise Şekil 2.2b ve 2.2c’de görüldüğü lif ve çevresinde küçük bir deformasyon oluşur.



Şekil 2.2. Çatlamamış matrise ait lif-matris ilişkisi a) yüklenmemiş matris b) çekme etkisinde matris c) basınç etkisinde matris [22,23]

Çekme gerilmelerine maruz kalan lifli kompozitlerde ise gerilmeler belli bir değere ulaştınca matris çatlak ve lifler matrisin bir tarafından diğer tarafına yükü iletir. Eğer lifler iletmesi gereken yükü çatlak boyunca iletirse çok sayıda çatlak ayrılmadan tutulmuş olur. Şekil 2.3’de çatlamış bir matrise ait lif- matris ilişkisi gösterilmiştir.

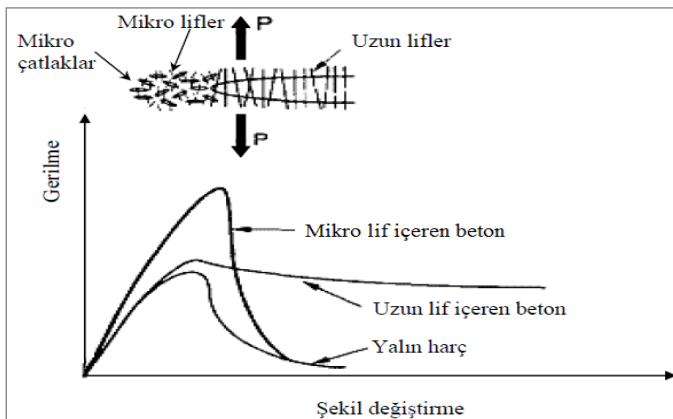


Şekil 2.3. Çatlamış bir matrise ait lif- matris ilişkisi [22,23]

2.6.2. Betonda mikro lif kullanımı

Mikro çatlaklar, numune boyutlarına ya da yapının boyutlarına göre çok küçük uzunluğa sahip olan çatlaklardır. Mikro lifler ise matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük olan liflerdir. Mikro lifler, matris içinde sık bir lif dağılımı oluşturarak çatlakları makro düzeye gelmeden engeller ve elastik bölge davranışını iyileştirirler [7]. Böylece mikro çatlakların başlangıcını ve gelişimini kontrol altında tutmuş olurlar [24]. Çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü vazifesi görerek çatlakların ilerlemesini engeller.

Mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler harç fazını ve makro lifler ise betonu güçlendirmektedir. Mikro ve makro düzeydeki liflerin çatlaklar arasında köprü oluşturması Şekil 2.4’de gösterilmektedir [25].



Şekil 2.4. Çatlak arasında köprü oluşumuna farklı tel boyutlarının etkisi [25,26]

2.6.3. Çelik liflerin beton özelliklerine etkileri

Yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar çok gevrek malzemeler olduğu için yeterli süneklığe sahip değildirler. Bunun için beton karışımlar içerisine lifler katılır. Bu sayede normal betonlara göre daha sünek ve çekme dayanımı daha yüksek olan betonlar üretilebilmektedir. Bunun için betonda en yaygın ve en etkili kullanılan lif çeşidi çelik liflerdir. Çelik liflerin kesitleri yuvarlak, kare ve düzensiz olabilirken şekilleri ise düz, çengelli, kıvrımlı, paletli, oyuklu, çift formlu, tek formlu gibi özelliklerde olabilir.

Çelik teller, kullanıldığı karışımlarda yüksek taşıma kapasitesine sahip sünek bir beton oluşmasını ve etkin çatlak kontrolü sağlarlar. Aynı zamanda yapıda donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesinde, donatı işçiliğinde azalmada ve dayanıklılık elde etmede oldukça önemlidirler [27]. Lifler sayesinde betonun eğilme momenti kapasitesi, rijitliği ve çekme gerilme mukavemeti artmaktadır [28]. Çelik lifli betonların mekanik özellikleri ACI 544'e göre betonda kullanılan lifin hacmi, çekme dayanımı, elastisite modülü ve kenetlenme boyu ile ilişkilidir [29].

Takviye edilen çelik lifler betonun yapısını değiştirerek betona plastik davranış kazandırmakta ve betonun enerji yutma kapasitesini artırmaktadır [17]. Çeliğin elastisite modülü betonunkinden çok daha büyük olduğu için çelik lifli betona gelen yükün taşınmasında çelik liflerin payı fazladır. Beton içerisinde üniform şekilde dağılmış olan bu lifler, matriste ilerleyen çatlağın yol açtığı gerilmeleri kendi üzerlerine alıp matristeki çatlama bölgesine aktararak betonda gerilme köprüsü görevi görürler. Bu sayede çatlak uçlarında daha düşük gerilme yığılması oluşmakta ve beton içerisindeki çelik lifler oluşan çatlakların ilerlemesini önleyerek çatlama kesiti bir arada tutmaktadırlar.

Çelik tel donatılı betonlarda ilk çatlak sonrası dayanım çelik telin boyuna, dağılımına ve gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır [30]. Aynı zamanda çelik lifler betonun eğilme ve kesme dayanımında iyi derecede, basınç dayanımında ise sınırlı derecede bir artış sağlarlar [31,32]. Özellikle elastisite modülü betonunkinden yüksek olan liflerin kullanılması durumunda betonun kırılma enerjisinde önemli ölçüde artışlar fark edilmiştir [33].

Çelik tel ile güçlendirilmiş betonlarda göçme, maksimum yüke ulaşıldıktan sonra çelik tellerin matristen tamamen sıyrılmasıyla gerçekleşir. Ancak çekme dayanımı 1100 N/mm^2 olan geleneksel çelik lif içeren yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu durum değişmektedir. Bu betonlar güçlü bir matrise sahip olduklarından çelik teller matristen sıyrılmadan kopma eğilimi sergilerler. Bunun sonucunda yüksek çekme dayanımına sahip çelik tellere ihtiyaç duyularak çekme dayanımı 2000 N/mm^2 yi aşan çelik lifler üretilmiştir [7,34].

2.6.4. Polimer liflerin beton özelliklerine etkileri

Polimer lifler 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren önemli gelişmeler göstermiştir. Polimer liflerin uygulama alanları oldukça geniştir. Petrokimya ve tekstil endüstrisinde yapılan çalışmalar ve gelişmeler sonucu sentetik polimer lifleri üretilmiştir. Üretilen bu polimerlerin çoğu çok düzenli ve kopya edilebilir özelliklere sahip sentetiklerdi. Ancak düşük elastisite modülüne sahip olduklarından kullanım alanları sınırlı kalmaktaydı. Bunun için sağlam ve elastisite modülü yüksek olan sentetik polimerik liflerin yapılması gündeme gelerek 1950'lerin sonları ve 1960'ların başlarında yoğun araştırmalar yapılmıştır. Çalışmalar neticesinde aramid ve uzun zincirli polietilen gibi sağlam ve yüksek elastisite modülüne sahip lifler elde edilmiştir [35-37]. Başlıca polimer lifler akrilik, aramid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen olup hepsi çok yüksek çekme dayanımlarına sahiptir. Ancak aramid hariç bu liflerin çoğunun elastisite modülleri düşüktür. Polimer liflerin çap ve uzunluk oranları kalitesini belirlemekte olup çapları mikron düzeyindedir [35].

Polimer lifler, çelik liflere göre betonun mekanik özelliklerini artırmada çok fazla etkili olamazlar, hatta belli bir değerden fazla kullanılan uygulamalarda olumsuz etki oluştururlar. Ancak az da olsa betona enerji yutma özelliği sağlarlar. Diğer yandan betonda plastik rötrede oldukça etkili olurlar [35].

Polipropilen lifler

Polimer liflerden beton ve harçların güçlendirilmesinde en yaygın kullanılan lif türü polipropilen liflerdir. Beton matrisinde polipropilen liflerin kullanılması ilk kez 1965 yılında gerçekleştirilmiş olup, 1970'li yıllarda polipropilen lif donatılı betonların üretimi hız kazanmıştır [38]. Günümüzde polipropilen lifler rötre çatlaklarının engellenmesi amacıyla

kullanılmaktadır [39]. Aynı zamanda betonun yangına karşı dayanımını da artırmaktadırlar. Bu lifler, yangın esnasında sıcaklıkta eriyerek gerekli boşlukların ve kanalcıkların oluşmasını sağlarlar ve su buharının dışa çıkmasına yardımcı olurlar [40].

Aramid lifler

Aramid lifler yüksek elastisite modülüne sahiptirler ve bu sayede betonda lif olarak kullanıldıklarında betonun mekanik özelliklerinde iyileşme sağlarlar. Çekme ve eğilme dayanımını artırırılar [35]. Düşük yoğunluğa sahip olan bu lifler yüksek darbe direncine sahiptirler [41]. Aynı zamanda hem elektrik geçirgenliğini hem de ısıyı yalıtabilmede iyidirler [42]. Ancak bu liflerin maliyetinin diğer liflere göre yüksek oluşu bu liflerin kullanımında bir dezavantaj oluşturmaktadır [35].

3. KIRILMA MEKANİĞİ

3.1. Kırılma ve Önemi

Gerilemeler altındaki katı bir cismin iki ya da daha fazla parçaya ayrılması olarak tanımlanana kırılma olayı geçmişten günümüze teknolojinin de gelişmesiyle birlikte büyüyerek kendini gösteren bir problem olmuştur.

Kırılma olayı çeşit olarak genellikle sünek ve gevrek olarak iki grupta değerlendirilir. Çatlak oluşumunda ve ilerlemesinde, sünek kırılmada önemli ölçüde kalıcı şekil değiştirmeler görülürken gevrek kırılmada kalıcı şekil değiştirmeler önemsiz derecede görülür ve çatlak büyük bir hızla ilerler. Yapısal olarak gevrek olarak bildiğimiz malzemelerle beraber klasik çekme deneylerinden sünek olarak bildiğimiz malzemeler de gevrek kırılma gösterebilir. Gevrek kırılmanın oluşmasına yol açabilecek faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [43].

- Çok eksenli gerilme durumları (çentik)
- Hızlı zorlamalar (darbe)
- Düşük sıcaklıklar

Gevrek kırılma, önceden farkına varılmadan büyük bir hızla oluşur. Bu yüzden geçmişte meydana gelen hasarların çoğu bir facia ile sonuçlanmış olup ilerleyen yıllarda malzemelerin gevrek kırılma davranışlarının iyi bilinmediği fark edilmiştir [43]. Yani herhangi bir mühendislik ürününün tasarımında, yapımında ve kullanılmasında meydana gelebilecek herhangi bir ihmal; yeni uygulanan bir tasarımda veya bir malzemede beklenmedik bir durum geri dönülmez sonuçlar doğurabilmektedir. Bunun için malzemelerin kullanılmadan önce gerekli testlerden geçmesi, büyük bir dikkatle incelenmesi gerekmektedir [44]. Özellikle II. Dünya Savaşı yıllarında üretilen “Liberty Ship” adındaki kargo gemilerinin yanlış malzeme seçiminden dolayı ortadan ikiye bölünerek batması ve yine füzelerin hedefe ulaşmadan havada infilak etmesi gibi olaylar araştırmacıları malzemelerin karmaşık yapısını daha ayrıntılı bir şekilde araştırmaya sevk etmiştir [45]. Böylece Kırılma Mekaniği olarak adlandırılan yeni bir bilim dalı ortaya çıkmıştır.

3.2. Kırılma Mekanizmasının Tarihsel Gelişimi

Kırılma olayından ilk zamanlarda kayaların içinde erimiş halde bulunan değerli taşların çıkarılmasında yararlanılmış olup günümüzde yeni kaynakların tespitinden gıda ve kimya sanayisinde öğütmeye kadar birçok alanda faydalanılmaktadır [45].

Mukavemet ve kırılma olayının bilimsel olarak incelenmesi Leonardo da Vinci ve Galileo Galileo gibi araştırmacıların yaşadığı Rönesans Dönemine kadar dayanmaktadır. Leonardo da Vinci ipin uzunluğu ile dayanımı arasındaki ters ilişkiyi ifade ederken Galileo ise ahşap çubuklarda yaptığı çalışma ile parçanın hasara uğramadan taşıyabileceği yükün kesit alanı ile orantılı olduğunu ve çubuğun boyunun buna etkisinin olmadığını ortaya koymuştur. Daha sonra Coulomb basınç altındaki kayaların kırılması ile ilgili araştırmalarıyla, malzeme kusurlarının bulunmasına dolayısıyla kırılma mekaniğine öncülük etmiştir [45]. English ise eliptik bir boşluğa sahip sonsuz levha üzerinde yaptığı bir çalışma ile levha üzerindeki gerilme durumunu incelemiştir [46].

Sonrasında Griffith, English'in çalışmalarını geliştirmiş ve 1921'de kırılma mekaniğinin temellerini ilk olarak cam lifler üzerine yaptığı deneylerle atmıştır. Griffith, cam liflerin dayanımının camın dayanımının on katı civarında olduğunu fark etmiş ve bu durumun malzeme yüzeyindeki kusurlardan kaynaklandığını belirterek Lineer Elastik Kırılma Mekanizması'ndan (LEKM) bahsetmiştir [47]. Daha sonra Irwin 1957'de seramik levhalar üzerinde yaptığı bir çalışmayı genişletip metalleri de içine alarak çatlak ucundaki gerilmeleri hesaplamış ve K adı verilen gerilme şiddet faktörünü ortaya atmıştır. Irwin, malzemeye uygulanan gerilmeye bağlı olarak sırasıyla açılma, kayma ve burulma durumlarına karşılık gelen mod I, mod II ve mod III genel kırılma modları ile bunların kombinasyonundan oluşan karışık mod kriterlerini öne sürmüştür ve çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına ulaşıldığında kırılma gerçekleşeceğini ifade etmiştir. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasında, gerilme şiddet faktörü "K" parametresini geliştirerek bunun çatlak boyut, şekil ve geometrisinin bir fonksiyonu olduğunu savunmuştur [48]. 1959'da Barenblatt [49] çatlak ucu bölgesinde bulunan kohezif kuvvetleri dikkate alarak çatlak ucundaki gerilme dağılımını Irwin'den farklı olarak $q(x)$ gibi bir fonksiyon olarak göstermiş ve probleme matematiksel bir bakış getirmiştir. Dugdale [50] ise bu kohezif kuvvetleri elasto-plastik bir malzeme için sabit olarak kabul etmiştir.

Çatlak ucunda sınırlı miktarda deformasyon olduğu durumlarda LEKM; önemli deformasyonlar olduğu durumlarda ise Elasto-Plastik Kırılma Mekanikliği (EPKM) kullanılmaktadır [44]. EPKM, 1961 yılında Wells'in [51] Çatlak Açılma Deplasmanı (ÇAD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlamış ve 1968 yılında Rice'in [52] çatlak açılım deplasmanını kendi adıyla J integrali yaklaşımıyla bulmasıyla devam etmiştir. 1976 yılında ise Hillerborg [53] tarafından fiktif çatlak modeli geliştirilmiştir.

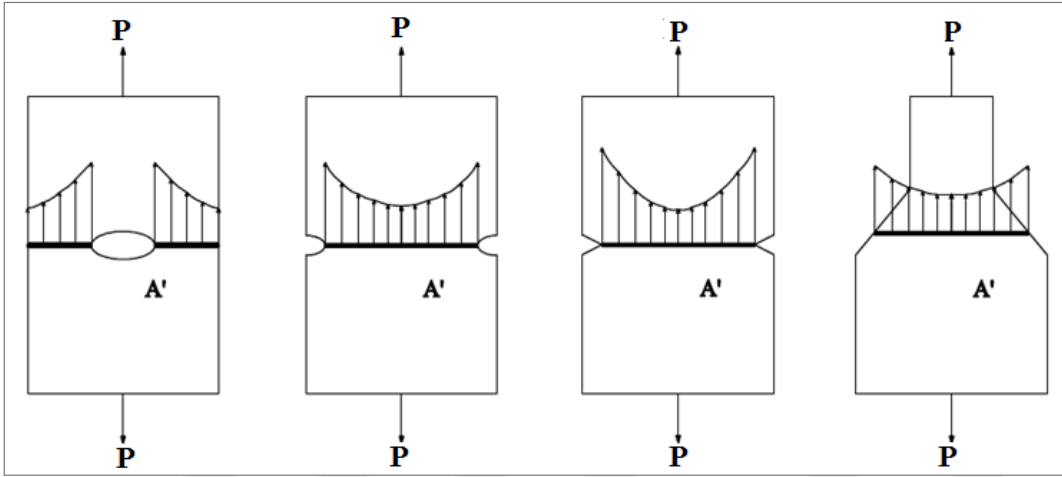
Kırılma mekanikliği, 1980 yılında Carpinteri'nin "Gevreklik İndeksi" kavramıyla ve 1984 yılında da Bazant'ın [54] boyut etkisi teoremiyle büyük ilerlemeler kaydetmiştir. 1986 yılında ise Carpinteri tarafından "Enerji Yaklaşım Teoremi" geliştirilerek sünek ve gevrek malzemelerin yapı davranışıyla ilgili araştırmalar yapılmıştır [55].

Taş Devri ve Orta Çağ
Leonardo da Vinci ve Galileo Galileo (1500 ler)
Coulomb Yaklaşımı (1776)
Inglish Yaklaşımı (1913)
Griffith Modeli (1920)
Irwin Modeli (1957)
Barenblatt Modeli (1959)
Dugdale Modeli (1960)
Wells Modeli (1961)
Rice Modeli (1968)
Hillerborg Modeli (1976)
Carpinteri Modeli (1980)
Bazant Boyut Etkisi Modeli (1984)
Carpinteri Enerji Yaklaşımı Modeli (1986)

Şekil 3.1. Kırılma mekanikliğinin tarihsel gelişim süreci [55]

3.3. Çentik Etkisi

Malzeme içinde bulunan süreksizlikler gerilme yığılmalarına yol açabilmektedir. Malzemelerin üretimi sırasında meydana gelen boşluk, çatlak ve süreksizlik durumlarında gerilmeler üniform bir şekilde dağılmayabilir. Yani, gerilmeler bazı bölgelerde ortalama değerlerinden uzaklaşarak maksimum değerine ulaşırlar. Bu durum Şekil 3.2’de gösterilmiş olup gerilme yığılması veya çentik etkisi olarak isimlendirilir [45].



Şekil 3.2. Basit çekme etkisindeki bir levhada çentikli kısımlarda gerilme yığılması [45]

Bu gibi durumlarda oluşan gerilme yani yerel gerilme σ_{maks} aşağıdaki Eş. 3.1’de verilmiştir. Formülde A' kesit alanını, K_y gerilme yığılması katsayısını göstermektedir. K_y gerilme yığılması, maksimum yerel gerilmenin ortalama gerilmeye σ_{ort} oranı olarak Eş.3.2’deki gibi ifade edilebilir.

$$\sigma_{maks} = K_y \frac{P}{A'} \quad (3.1)$$

$$K_y = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{ort}} \quad (3.2)$$

Gerilme yığılması mikro çatlaklarda, mikro boşluklarda, keskin köşelerde, deliklerde, kesit değişikliklerinde ve çentikler gibi süreksizliklerde meydana gelmekte olup özellikle gevrek malzemelerde oldukça zarar vericidirler. Sünek malzemelerde ise çatlak ucundaki plastik şekil değiştirmiş bölgenin boyutu daha büyük olup gerilmeler üniform olarak dağılmaktadır [45].

3.4. Linear Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)

3.4.1. Giriş

Linear Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) gevrek ve ideal homojen malzemelerde çatlaktaki ilerlemeyi hesaplamak için geliştirilmiştir. Kırılma mekaniğinin incelenmesinde, malzemedeki tüm davranışların elastik sınırlar içinde kaldığını varsayar. Çatlak ucunda oluşan gerilmeleri; parçaya uygulanan gerilmeye, çatlağın uzunluğuna ve yönüne bağlı olarak ifade eder. Bu metoda göre çatlak ilerlemesi, yükleme sonucu parçada depolanan kritik enerji miktarına ve çatlak ucundaki gerilmenin kritik değerine göre hesaplanmaktadır [45].

3.4.2. Griffith teorisi

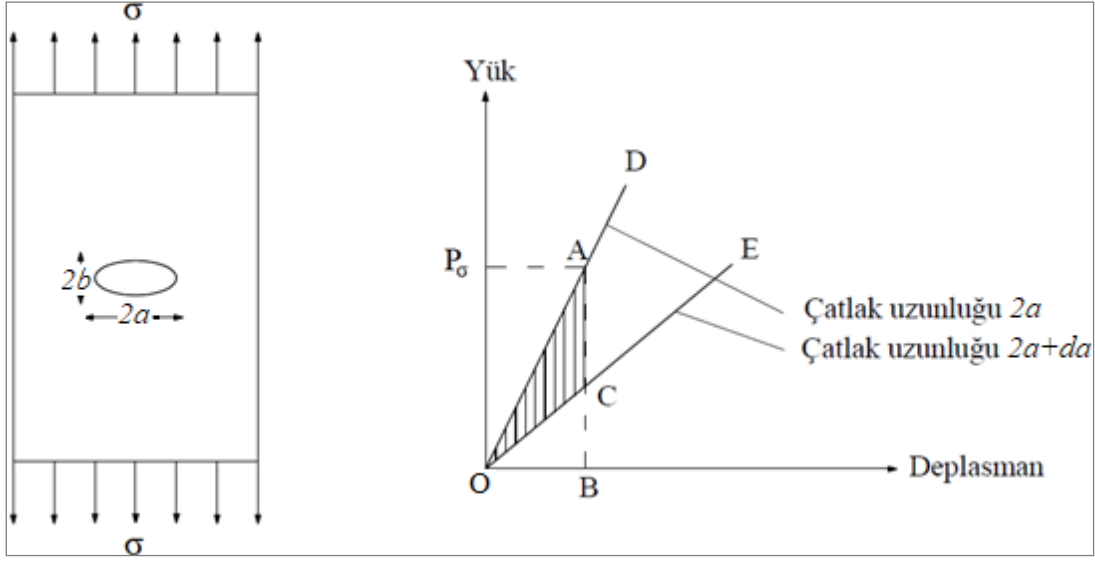
Griffith 1920'lerde teorik mukavemet ile deneysel verilerden elde edilen mukavemet arasındaki farkı açıklayabilmek için çalışmalar yapmıştır. İzotropik malzemeler için, içlerinde buldukları ve boyutları moleküller arasındaki uzaklığa göre çok daha büyük olan süreksizliklerin ya da kılcal çatlakların düşük mukavemet değerlerine sebep olduğunu belirtmiştir. 1913 yılında English'in açıkladığı sonsuz bir levhada eliptik bir boşluk çevresindeki gerilme dağılımı modelini dikkate alarak gevrek kırılma kuramını incelemiştir.

Griffith cam lifler üzerinde yaptığı deneylerde, cam lif çapı arttıkça lif mukavemetinin azaldığını, azaldıkça değerlerin teorik mukavemete yaklaştığını ifade etmiştir. Yani cam liflerin dayanımının camın dayanımının on katı civarında olduğunu görmüş ve bu farkın malzeme yüzeyindeki kusurlardan kaynaklandığını belirtmiştir [47].

Griffith kırılma konusuna enerji kuramı ile yaklaşmıştır. Gerilme altındaki bir elemanda çatlak ilerledikçe elastik şekil değiştirme enerjisinde bir azalma olduğunu ve bunun da yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjiyi meydana getirdiğini savunmuştur.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \quad (3.3)$$

Bu formülde σ çatlağın yayılması için gerekli olan çekme gerilmesi, γ yüzey enerjisini, E elastisite modülünü ve a çatlak boyunun yarısını ifade etmektedir.



Şekil 3.3. Çekme gerilmesi altında olan eliptik boşluklu sonsuz bir plak ve yük-deplasman grafiği [56]

İlk başta elastik enerji OAB alanıyla belirlenirken çatlak uzunluğu da kadar artınca elastik enerjinin yeni değeri OCB alanına eşit olur. Yani çatlak $2a$ dan $2a+da$ uzunluğuna ulaştığında OAC alanı kadar elastik enerji serbest kalır [57]. Aynı zamanda yeni çatlak yüzeyleri oluştuğundan yüzey enerjisi şeklinde bir miktar enerji meydana gelir [56]. Çatlağın birim yüzeyde ilerlemesi için gerekli olan enerji miktarı G ifadesi ile gösterilmektedir. Bu enerji, kritik değeri olan G_C değerine ulaştığı zaman kırılma meydana gelmektedir.

$$G_C = 2\gamma \quad (3.4)$$

Çatlağın yayılması için gerekli olan gerilme, Eş. 3.4, Eş. 3.3'te kullanılmasıyla aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{EG_C}{\pi a}} \quad (3.5)$$

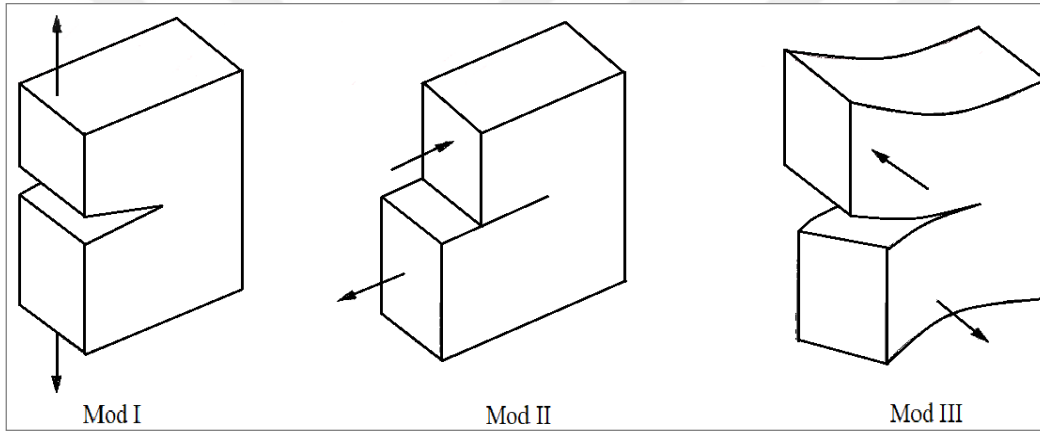
3.4.3. Irwin teorisi

Irwin [48], kırılma mekaniğinde yeni bir döneme imza atmıştır. Seramik levhalar üzerinde yaptığı bir çalışmayı genişletip metalleri de içine alarak çatlak ucundaki gerilmeleri hesaplamış ve K adı verilen gerilme şiddet faktörünü tanımlamıştır. Irwin, malzemeye uygulanan gerilmeye bağlı olarak sırasıyla açılma, kayma ve burulma durumlarına karşılık

gelen mod I, mod II ve mod III genel kırılma modları ile bunların birleşiminden oluşan karışık mod kriterlerini geliştirmiş ve çatlak ucunda kritik bir gerilme dağılımına ulaşıldığında kırılma oluşacağını söylemiştir [48].

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma\sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau\sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau\sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde σ malzemeye uygulanan çekme gerilmesini, τ kayma gerilmesini ve a yarı çatlak uzunluğunu göstermektedir.



Şekil 3.4. Kırılma modları

Gerilme şiddet faktörü; yükleme durumuna, malzemenin ve çatlağın geometrisine bağlı bir sabit olup malzeme sabiti değildir. Ancak K , belirli bir kritik değere ulaştığı zaman her malzeme için ayrı bir değer olarak *kırılma tokluğu* diye isimlendirilir ve K_C olarak gösterilir. Birimi ise $MPa\sqrt{m}$ olarak ifade edilir. Mühendislik bakımından çatlağın yayılma hızı ve başlangıcı önem arz etmektedir. Irwin, çatlak yayılma hızından bahsederek G_C ile K_C arasındaki bağlantıyı şu şekilde açıklamıştır.

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (3.7)$$

Irwin'in tanımladığı K , sonsuz düzlemde geçerli olup sonlu boyutta LEKM için gerilme şiddet faktörü Eş. 3.8'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.8)$$

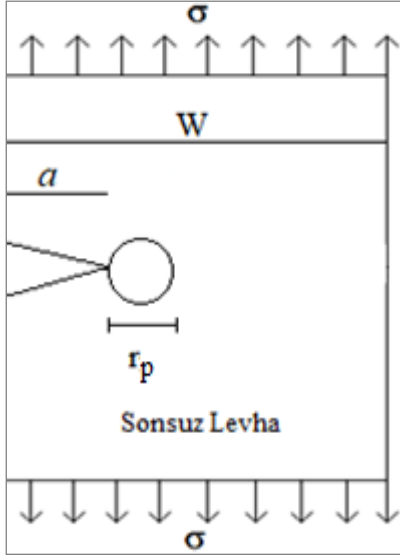
$$Y = f\left(\frac{a}{d}\right) \quad (3.9)$$

Yukarıdaki eşitliklerde Y geometri faktörü ve d ise numune boyut yüksekliğini temsil etmektedir.

Griffith, çalışmalarında malzemenin içerisinde çatlakın ilerlemesini durduracak bir mekanizma olmadığını varsayarken Irwin [58], çatlakın hemen ucunda gerilme dağılımının sabit olduğu *kırılma süreci bölgesi* (*çatlak ucu plastik bölge*) adında Şekil 3.5'te gösterilen bir bölgeden bahsetmiştir ve bu bölgede gerilme değerlerinin malzemenin akma dayanımına eşit olduğunu kabul etmiştir. Kırılma süreci bölgesi uzunluğunu ise Eş. 3.10'daki gibi ifade etmiştir.

$$r_p = \frac{K_{IC}^2}{2\pi f_t^2} = \frac{EG_C}{2\pi f_t^2} \quad (3.10)$$

Denklemden f_t malzemenin çekme dayanımını, E ise elastisite modülünü göstermektedir.



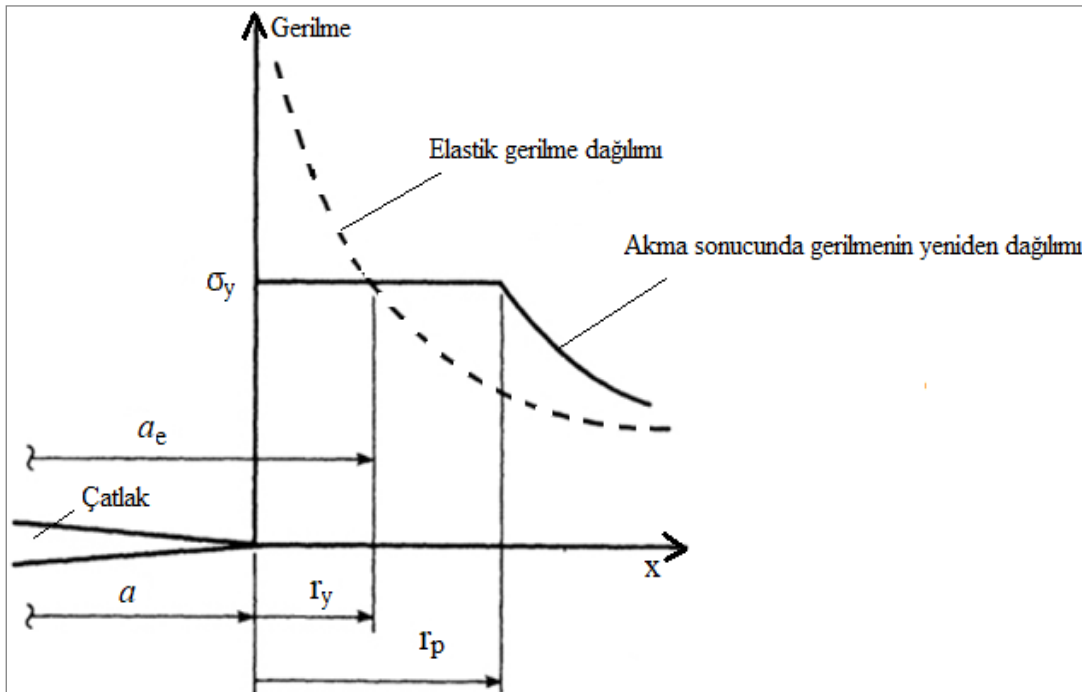
Şekil 3.5. Kırılma süreci bölgesi

Şekil 3.5'te r_p kırılma süreci bölgesi uzunluğunu, W levhanın genişliğini ve a çentik boyunu ifade etmektedir.

Irwin, LEKM'nin çatlak ucunda oluşan plastik bölgeye rağmen birtakım değişikliklerle sünek malzemelerde de kullanılabileceğini göstermiştir.

$$a_e = a + r_y \quad (3.11)$$

Eş. 3.11'de r_y plastik bölgenin yarıçapını ve a_e ise efektif çatlak boyunu göstermektedir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi efektif çatlak boyunun kullanılmasıyla LEKM için elde edilen tüm bağıntılar geçerliliğini korumuştur [45].



Şekil 3.6. Çatlak ucu plastik bölge ve efektif çatlak [59]

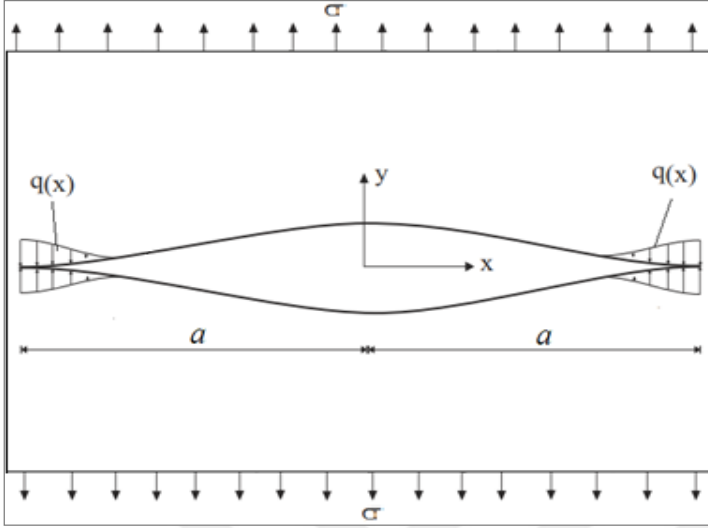
3.5. Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği ve Tokluk Deneyleri

3.5.1. Giriş

Çatlak ucunda sınırlı miktarda deformasyon olduğu durumlarda LEKM; önemli deformasyonlar olduğu durumlarda ise Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği geçerli olmaktadır [44].

1959'da Barenblatt [49], çatlak ucu bölgesinde bulunan kohezif kuvvetleri dikkate alarak çatlak ucundaki gerilme dağılımını $q(x)$ gibi bir fonksiyon olarak göstermiştir (Şekil 3.7).

Dugdale [50] ise bu kohezif kuvvetlerin elasto-plastik malzemeler için sabit olduğunu kabul etmiştir.

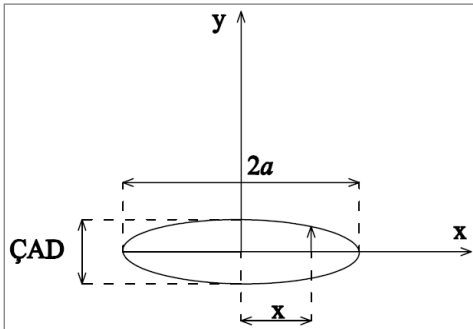


Şekil 3.7. Barenblatt'ın kohezif çatlak modeli

3.5.2. Çatlak ucu açılma deplasmanı (ÇUAD)

EPKM, 1961 yılında Wells'in Çatlak Açılma Deplasmanı (ÇAD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlamıştır. Daha sonra Billby ile diğerleri [60] ve Dugdale [50], Barenblatt'ın elastisite sınırları içerisinde uyguladığı kohezif çatlak modelini, elasto plastik ince levhalara uygulayarak Çatlak Ucu Açılma Deplasmanı (ÇUAD) teriminden bahsetmişlerdir. Bu metot daha çok sünek malzemelerin kırılma tokluğunu tespit etmek için kullanılmaktadır.

$$\text{ÇAD} = 2\vartheta = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (3.12)$$



Şekil 3.8. Çatlak açılma deplasmanı [45]

Çatlağın ortasında, yani $x = 0$ 'da maksimum açılma gerçekleşir. Bu bağıntıda $x = a + r_p$ alınırsa eşitliğin yeni hali Eş. 3.13'teki gibi olmaktadır.

$$\zeta AD = 2\vartheta = \frac{4\sigma}{E} \sqrt{(a + r_p)^2 - x^2} \quad (3.13)$$

Burada ϑ malzemenin poisson oranını, σ çekme gerilmesini ve E elastisite modülünü göstermektedir.

Çatlak ucundaki açılma deplasmanı $x = a$ durumunda gerçekleşeceğinden ve sonsuz genişlikteki bir parçada $K_I = \sigma\sqrt{\pi a}$ alınabileceğinden ÇUAD, Eş. 3.14'deki gibi olacaktır.

$$\zeta UAD = 2\vartheta = \frac{4K_I^2}{\pi E \sigma_{ak}} \quad (3.14)$$

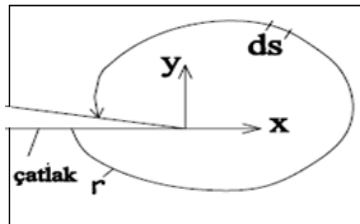
Burada σ_{ak} elasto-plastik malzemenin akma dayanımıdır.

1970'li yıllardan sonra ise Hillerborg [53] ve Carpinteri [61] yaptığı çalışmalar neticesinde çatlak ucu açılma deplasmanının kritik bir değer olan w_c 'ye ulaştığında çatlağın ani olarak ilerleyeceğini söyleyerek bunun bir malzeme sabiti olarak kullanılabileceğini ispatlamışlardır.

$$G_C = \sigma_{ak} w_c \quad (3.15)$$

3.5.3. J integrali

Çatlak açılma deplasmanı metotlarından bir diğeri, Rice tarafından geliştirilen J integrali yöntemidir [52].



Şekil 3.9. J integrali yöntemi

J integrali yöntemi Şekil 3.9'da görüldüğü gibi çatlak içeren bir malzemede, çatlak ucunu çevreleyen bölgenin çizgisel integrali olarak tarif edilmektedir. Genel olarak J integrali, çatlak ilerlemesi sırasında potansiyel enerjideki değişimi ifade etmektedir. J , en geniş anlamı ile şu şekilde ifade edilebilir.

$$J = \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial a} \quad (3.16)$$

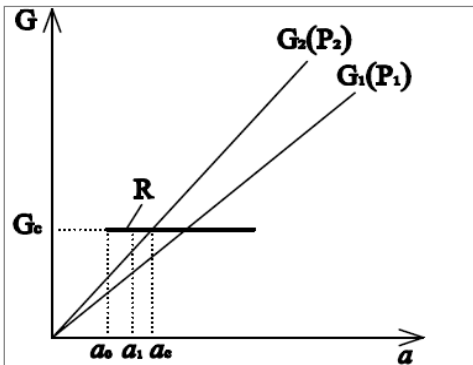
Burada, B malzeme genişliğini ve U yapılan işi ya da yer değiştirme enerjisini ifade etmektedir. Bu metot plastik şekil değişimi gösteren malzemelerde kırılma tokluğunu belirlemek için kullanılmaktadır [45].

3.5.4. R eğrisi

R eğrisi kavramı ilk kez Irwin [58] tarafından ortaya atılmış olup daha sonra 1961 yılında Kraft ve diğerleri tarafından geliştirilerek devam etmiştir [62]. Bununla birlikte R eğrisi, kırılma direnci olarak tanımlanmakta ve yapıda birim çatlak alanı oluşması için gereken enerjiyi karakterize etmek için kullanılmaktadır. Başlangıç çatlağı içeren bir malzemeye yük uygulandığında malzemede şekil değiştirme enerjisi meydana gelirken çatlak ucundaki ilerleme için de bir miktar enerji gerekir. R eğrisinin, yapı geometrisinin ve malzemenin kırılma özelliğinin bir fonksiyonu olduğu söylenebilir [63].

Lineer elastik malzemeler için R direnci

Çatlak ucunda plastik bölge olmadığı için en ideal lineer elastik malzeme gevrek malzemelerdir. Bu malzemeler için R geometriden bağımsız bir malzeme sabitidir.



Şekil 3.10. Gevrek malzemeler için R direnci

Yukarıdaki şekilde $P_2 > P_1$ olmak üzere, yük sıfırdan P_2 değerine yükseldiğinde, G değeri de sıfır noktasından dik eksen boyunca yükselir. P_2 değerinde Eş. 3.17 elde edilir ve çatlak başlar.

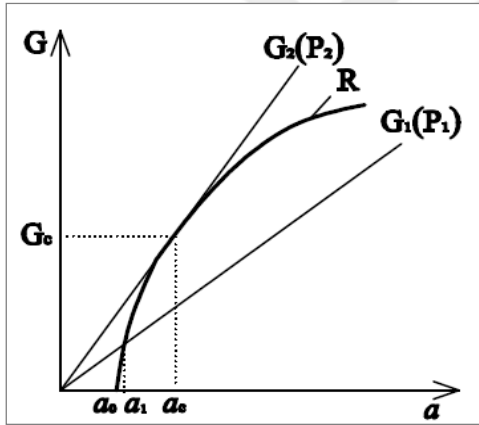
$$G_C = R \quad (3.17)$$

Çatlak uzunluğu ilerlediğinde ise aşağıdaki eşitlik meydana gelir ve çatlak ilerlemesi kararsız ve yıkıcı bir şekilde gerçekleşir.

$$G_C > R \quad (3.18)$$

Elastik olmayan malzemeler için R direnci

Elastik olmayan malzemeler için R eğrisi aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.11. Sünek malzemeler için R direnci

Başlangıç çatlağı içeren sünek bir malzemeye P_1 yükü uygulandığında Eş. 3.19 geçerli olur ve kararlı çatlak yayılması gerçekleşir.

$$G = R, \quad \frac{dG}{da} < \frac{dR}{da} \quad (3.19)$$

Yük P_2 değerine ulaştığında ise Eş. 3.20 geçerli olup bu nokta kritik nokta olarak tanımlanır.

$$G = R, \quad \frac{dG}{da} = \frac{dR}{da} \quad (3.20)$$

Kritik noktadan sonra ise Eş. 3.21 her zaman geçerliliğini koruyup azalan yük ile birlikte $G = R$ eşitliğine ulaşır ve çatlak kararsız bir şekilde ilerler. Yani yükün düşmesine rağmen çatlak ilerlemesi daha hızlı bir şekilde devam eder.

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (3.21)$$

Genel olarak yapıdaki çatlak uzaması; malzemenin kırılma özelliğinden, uygulanan yükten, başlangıç çatlak uzunluğundan, yapının boyut ve geometri sınır şartlarından etkilenmektedir.

Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve yukarıdaki eşitliklerde G_1 , G_2 ve G_c enerji yayılma hızlarını; P_1 ve P_2 uygulanan yükleri; a_0 başlangıç çatlak uzunluğunu; a_1 , P_1 yükü uygulandığı andaki çatlak uzunluğunu ve a_c kritik çatlak uzunluğunu ifade etmektedir.

4. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ

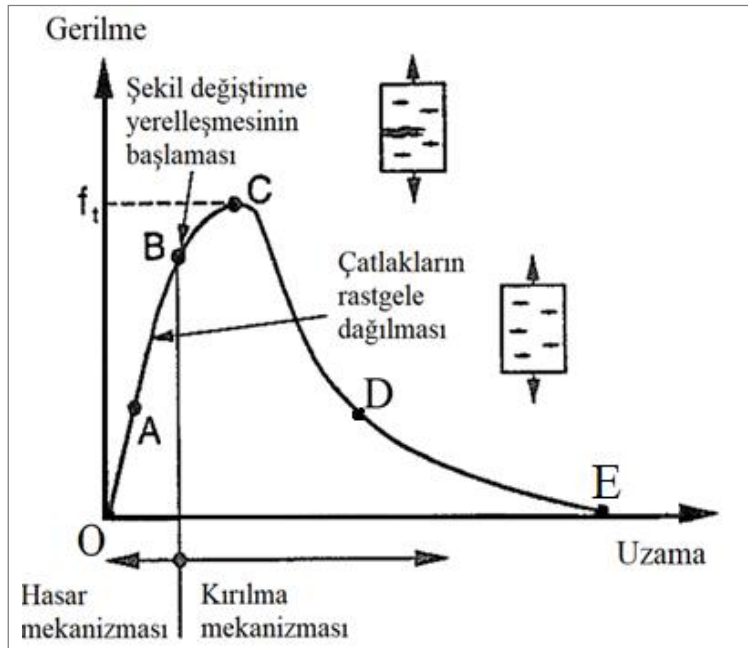
4.1. Giriş

Beton, üretiminden kullanımına kadar içyapısında daima kusurlar bulunduran bir yapı malzemesidir. Farklı boyutlarda bulunan bu kusurlar; agrega-matris ara yüzeyinde oluşan mikro çatlaklar, taze betonun kusması sonucu meydana gelen mikro çatlaklar, çimentonun hidratasyonu sonucu meydana gelen jel boşlukları ve hava boşlukları olabilmektedir.

Beton çekme dayanımına ulaştığı anda çatlak oluşumu başlar ve genellikle bu çatlaklar maksimum gerilmeye dik bir şekilde beton içerisindeki en kolay yolu takip ederek ilerlerler. Betonun göçme mekanizması çatlağın, en kritik kusur ve en kritik gerilme yığılması noktalarında belirmesiyle başlar, diğer çatlaklarla ya da süreksizliklerle de birleşip kararsız bir şekilde ilerlemesiyle devam eder.

4.2. Betonun Kırılma Mekanizması

Beton, düşük yükler altında lineer elastik bir davranış gösteren heterojen ve yarı gevrek bir malzemedir.



Şekil 4.1. Tek eksenli gerilme altında betonda çatlak yayılmasının evreleri [63]

Yukarıdaki şekilde; A noktası tepe noktasının yaklaşık %30'una karşılık gelmekte ve OA arasındaki bölgede çimento matrisi ile agrega arasındaki ara yüzey çatlakları önemsiz seviyededirler. B noktası ise tepe noktasının %80'i civarındadır. AB arasındaki bu bölgede iç çatlaklar oluşmaya başlayıp evre boyunca rastgele dağılırlar. Aynı zamanda bu bölgede yüklemeye yönündeki uzama artışı hemen hemen aynı ölçüde devam etmektedir.

BC arasında ise numunedeki iç çatlaklar gerilemeye maruz kalan ana çatlakta yerleşmeye başlar ve yük arttıkça çatlak yayılmaya devam eder. Oluşan yeni çatlaklar enerji harcadığı için gerilme-uzama eğrisi lineer olmayan bir şekilde artış gösterir. Çatlak ucunda kırılma süreci bölgesi meydana gelirken ana çatlağın ilerlemesi tepe noktasına kadar kararlı bir şekilde devam eder. Yani bu bölgede, yüklemeye yönündeki uzama artışı aynı ölçüde olmaz. Çatlaklar adım adım ilerleyerek betonun yük taşıma kapasitesinin aniden sıfıra düşmesini engeller ve tepe noktası sonrasında betona tokluk kazandırır. CD arasında ise, tepe noktası aşıldıktan sonra yük düşmesine rağmen ana çatlak ilerlemeye devam eder. Yani bu bölgede mikro çatlaklar sonucu oluşan şekil değiştirme yumuşaması görülür. Son olarak DE bölgesi ise bu eğrinin kuyruk kısmı olup agrega kilitlemesi ve yüzeyler arası sürtünme sebebiyle meydana gelir. Bu nedenle beton, yarı gevrek bir malzeme olarak kabul edilir [63].

Betonda meydana gelen bir takım mekanizmalar çatlak ilerleyişini engelleyerek tokluk artışı sağlarlar. Çatlak ucundaki agregaların kalkan görevi yaparak çatlağın ilerlemesini engellemesi, çatlağın agregayla karşılaşması sonucu yön değiştirmesi, agregaların birbirine sürtünerek çatlağın ilerlemesini engellemesi, çatlak ucuna denk gelen boşlukların çatlak ucu keskinliğini azaltması ya da çatlağı dallandırması, lifli betonlarda kullanılan lifler gibi agregaların da çatlağın bir tarafından diğer tarafına yük aktarımında bulunması, gibi mekanizmalar betonun tokluğunu artırmada etkilidirler [64].

4.3. Kırılma Mekanizmasının Betona Uygulanması ve Gelişimi

Griffith teorisini betona uygulayan ilk araştırmacı Neville [65] olmuştur. Neville çalışmasında beton içerisindeki kusurların rastgele dağılım gösterdiğini ve numune boyutu ile bağlantılı olduğunu savunmuştur. Böylelikle Weibull'un [66] zayıf bağ teorisini esas alarak ilk kez boyut etkisi teorisinden bahsetmiştir. Ancak kırılma mekanizmasının betona ilk uygulaması 1961 yılında Kaplan [67] tarafından gerçekleştirilmiş ve kritik deformasyon enerjisi yayılma hızının betona uygulanabileceği gösterilmiştir. Daha sonra Glucklich [68]

Griffith'in teorisini daha ayrıntılı bir şekilde betona uygulamış ve kritik deformasyon enerjisi yayılım hızının, betonun yüzey enerjisinin iki katından daha fazla olduğunu belirtmiştir. Betonun tek bir çatlakla göçme durumuna gelmediğini çatlak ucunda mikro boyutta çatlak bölgesinin olduğunu ve bunların daha fazla kırılma enerjisi gerektirdiğini söylemiştir. Beton içerisinde yüksek dayanıma sahip olan agregaların çatlağı daha sert bir bölgeden geçmeye ya da agreganın etrafından dolaşmaya zorladığını ve bununda kırılma enerjisini artıracığını ifade etmiştir.

1960'lı yıllarda yapılan araştırmalarda betonun yarı gevrek ve heterojen bir malzeme olması nedeniyle K_c (kritik gerilme şiddet faktörü) ifadesinin sürekli değişim göstermesi gibi durumlardan dolayı 1980'li yıllarda betonun kırılma parametrelerinin LEKM ile elde edilemeyeceği görülmüştür. Bu nedenle, daha sonraki yıllarda LEKM modifiye edilerek Nonlinear Kırılma Mekaniği modelleri oluşturulmuştur.

Bu modellerden bazıları kohezif çatlakları temel alırken bazıları da eşdeğer elastik çatlaklarını temel almaktadır. Kohezif çatlak modelleri Hillerborg ve diğerleri tarafından önerilen fiktif çatlak modeli [53] ile Bazant ve Oh tarafından geliştirilen çatlak bant modellerini [69] içermektedir. Eşdeğer elastik çatlak modelleri ise Jenq ve Shah tarafından önerilen iki parametrelili model [70] ile Bazant [54] tarafından geliştirilen boyut etkisi parametrelerini kapsamaktadır. Bu modellere göre beton içerisinde bulunan bir çatlak, çekme gücüne maruz kalmamış olan etkili bir çatlak ile simule edilmiştir [71].

4.4. Betonun Kırılma Parametrelerini Tespit Etmeye Yönelik Çalışmalar

Yüksek mukavemetli betonlar oldukça gevrek malzemelerdir. Lifli betonlar ise iyileştirilmiş betonlar olup tokluk özellikleri yüksektir. Laboratuvarlarda kullanılan küçük boyutlu deney elemanları ile gerçek boyutlarda olan beton elemanların kırılma özellikleri de birbirinden farklıdır. Bunun için farklı malzeme özelliklerine ve boyutlarına sahip betonların kırılma mekaniği parametrelerinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Betonun kırılma parametrelerini belirleme çalışmaları daha çok açılma modu (mod I) durumu için yapılmıştır.

Kaplan [67], 1961 yılında LEKM yaklaşımını betona ilk kez uygulamış olup çalışmasında, farklı çentik uzunluklarına sahip olan 3x3x16 inç ve 6x6x20 inç boyutlarında, harç ve beton deney elemanları üzerinde üç noktalı ve dört noktalı eğilme deneyleri yapmıştır. Kaplan

yaptığı deneyler sonucunda G_C 'nin betonun yüzey enerjisinden 12 kat daha büyük olduğunu ifade ederek küçük kırışlerde ise büyük kırışlere göre %38 daha az olduğunu savunmuştur. Aynı zamanda dört noktali eğilme testinden elde edilen sonuçların üç noktali eğilme testinden elde edilen sonuçlara göre %15 daha küçük olduğunu göstererek G_C değerinin farklı çentik uzunluklarında birbirine yakın değerler aldığını söylemiştir.

Naus ve Lott [72] betonun kırılma direncini tayin etmek için tek çentikli 2x2x12 inç ve 4x4x12 inç boyutlarındaki kırışlerde; harç, çimento hamuru ve beton üzerine dört noktali eğilme deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda K_C nin zamanla arttığını, aynı zamanda kaba kum/çimento oranının ve maksimum agrega boyutunun artmasıyla da artış göstereceğini söylemiştir. Ancak su/çimento oranının artmasıyla birlikte çimento hamurunda ve matraste K_C 'nin azaldığını, betonda sabit kaldığını da ifade etmiştir.

Carpinteri [61], fiziksel olarak benzer olan numunelerde, Buckingham-Pi teoremini kullanarak betonda ve harçta K_{IC} , G_{IC} , J_{IC} kırılma parametrelerini belirlemiştir. Carpinteri, numunelerde maksimum agrega boyutu ve çentik derinliğini değişken olarak almıştır. Çalışmasını hem deneysel hem de analitik olarak devam ettirmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda, karakteristik çentik uzunluğunun 0,25-0,30 aralığında olması durumunda K_{IC} 'nin arttığını ve sonra sabit kaldığını göstermiştir.

Mindess ve diğerleri [73], 3x3x14 inç boyutlarında çentikli kırışler üzerinde dört noktali eğilme testi yapmışlardır. Çimento harcı, normal beton ve 8 değişik çelik ve cam lifli beton numuneler üzerinde K_C , G_C ve J_C kırılma parametrelerini tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda, lif içeriğinin hacimce %0,75'de az olduğu durumlarda, cam ve çelik liflerin kırılma davranışına etkisinin çok az olduğunu söylemişler ve beton için J_C 'nin K_C ve G_C 'ye kıyasla daha iyi bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmalara ek olarak, Bar ve Bear [74] yaptığı deneylerde beton numuneleri eksantrik basınca maruz bırakarak K_C değerinin çentik uzunluğu ile ters orantılı olduğunu göstermiştir.

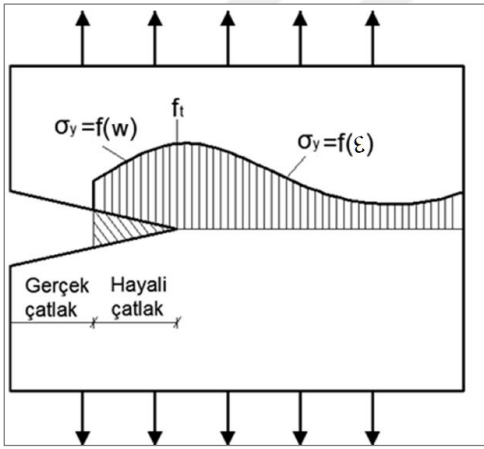
4.5. Betonda Lineer Olmayan Kırılma Mekanikliği ile İlgili Modeller

Betonda lineer olmayan kırılma mekanikliği ile ilgili modellerden bazıları kohezif çatlakları bazıları da elastik çatlakları dikkate alır. Yani, *fiktif çatlak modeli* ve *çatlak bant modeline*

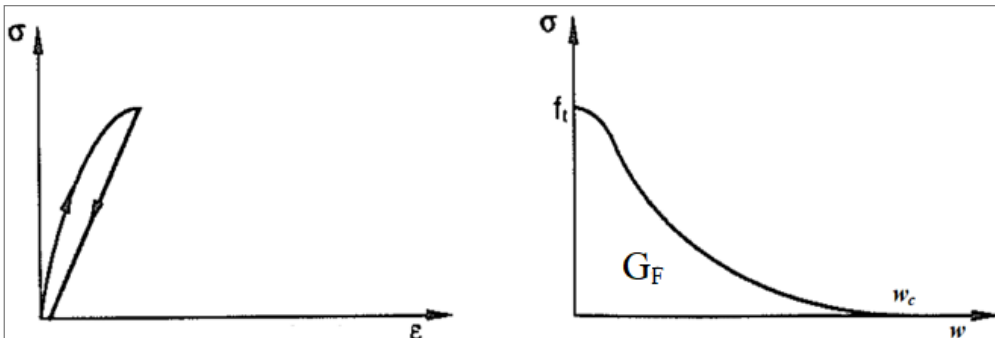
göre çatlak yayılması sırasında çatlak yüzeylerini birleştiren kohezif bir kuvvet olduğu kabul edilirken *iki parametrelili model* ve *boyut etkisi parametrelerine* göre ise eşdeğer elastik çatlaklarından yararlanır.

4.5.1. Fiktif çatlak modeli

Fiktif çatlak modeli ilk defa 1976 yılında Hillerborg [53] tarafından önerilmiştir. Modelde çentikli bir numune, çekme gerilmelerine maruz bırakılmaktadır. Çekme gerilmesine maruz kalan bu numunede çatlak ucundaki birim deformasyon, limit değerine ulaştığında kırılma bölgesi oluşmaktadır. Hillerborg, problemin sayısal çözümü için hayali bir çatlağın varlığını kabul etmiş olup, gerilmelerin bu hayali çatlak bölgesinin genişliğine bağlı olarak Şekil 4.2'deki gibi $\sigma(w)$ olarak aktarıldığını belirtmiştir. Gerilme- çatlak ucu açılması diyagramını ise Şekil 4.3'teki gibi tanımlamıştır. Hillerborg'a göre numuneye gelen gerilmeler arttıkça hayali çatlağın genişliği de artmaktadır. Çatlak ucundaki açılma kritik değerine ulaştığında ise gerilme, çatlak ucunda sıfıra düşmekte ve fiktif çatlak gerçek bir çatlağa dönüşmektedir.



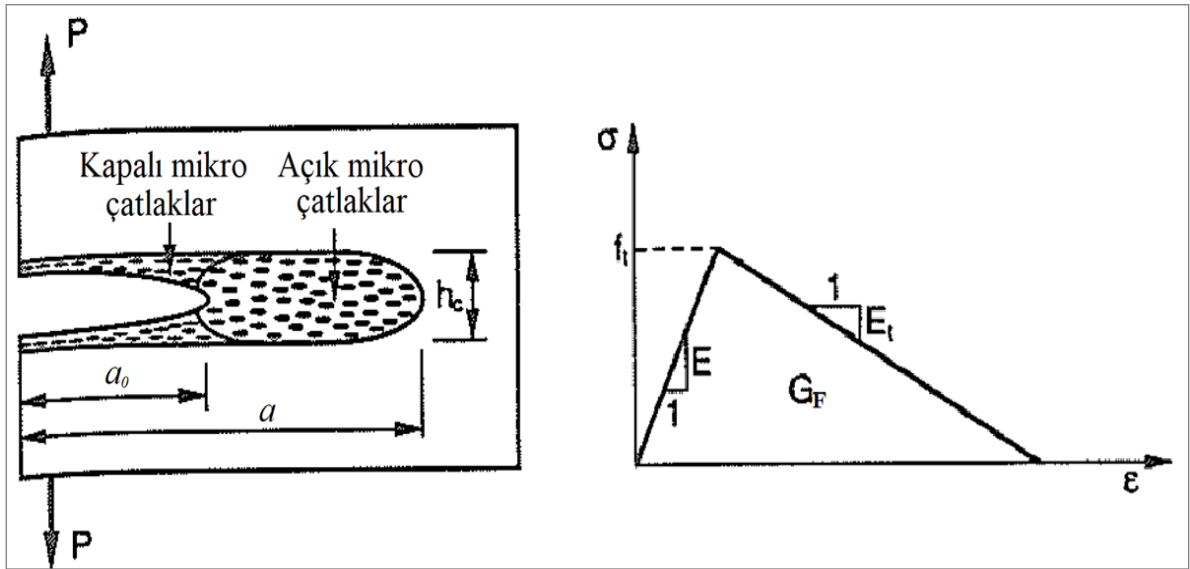
Şekil 4.2. Fiktif çatlak modeli



Şekil 4.3. Betonun gerilme-şekil değiştirme ve gerilme-çatlak ucu açılması diyagramları

4.5.2. Çatlak bant modeli

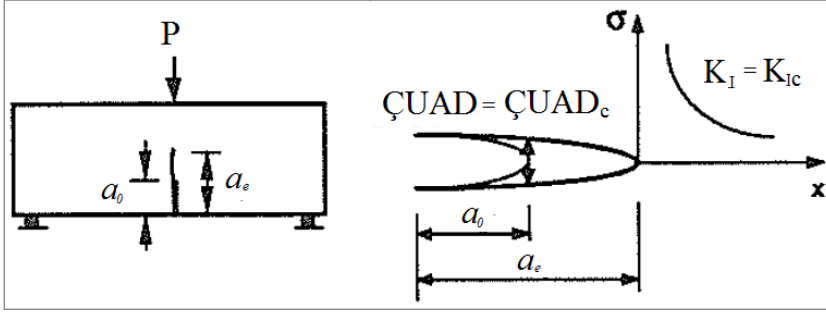
Bu modelde Bazant ve Oh [69], düzgün ve sürekli bir şekilde h_c genişliğinde dağılmış mikro çatlaklardan oluşan kırılma işlem bölgesi tanımlamıştır. Şekil 4.4' te görüldüğü gibi yumuşama bölgesinin numunenin diğer kısmından farklı bir rijitlikte olduğu kabul edilmiştir. Yumuşama alanı içerisindeki deformasyonların σ - w eğrisine, diğer bölgelerdeki deformasyonların σ - ε eğrisine benzediği varsayılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.4. Betonun mikro çatlak bant modeli ve gerilme-şekil değiştirme diyagramı [63]

4.5.3. İki parametrelili model

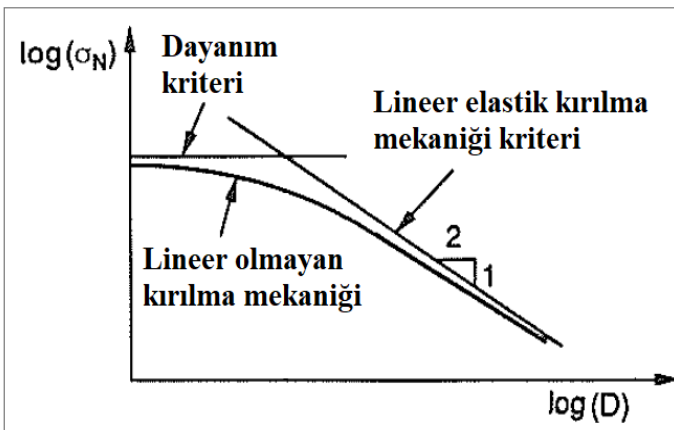
Bu model Jeng ve Shah [70] tarafından önerilmiş olup, başlangıç çatlaklı içeren beton bir elemanda pik yükten önceki lineer olmayan davranış incelenmektedir. Çentikli bir kirişe üç noktalı eğilme deneyi uygulanarak, yük – çatlak ağzı açılma deplasman eğrisinin tepe yükü noktasında yükleme - boşaltma yapılmaktadır. Böylelikle yük- çatlak ağzı açılması ilişkisini veren eğrinin eğiminin nasıl azaldığı araştırılmaktadır. Burada a_e etkili çatlak uzunluğu yardımıyla K_{IC} ve ÇUAD_c olmak üzere iki adet kırılma parametresi belirlenir. Kırılma için iki adet parametre belirlenmesi ve tek tip deney numunesi gerektirmesi bu yöntemi avantajlı kılmaktadır. Ancak bu model maksimum yük sonrasındaki yumuşa durumunu hesaplamada kullanılamamaktadır.



Şekil 4.5. İki parametrelili kırılma modeli ve kırılma parametreleri [63]

4.5.4. Boyut etkisi parametreleri

Boyut etkisi teorisi Bazant ve Kazemi [75] tarafından önerilmiş olup başlangıç çatlaklı içeren, geometrik olarak benzer ancak farklı boyutlarda olan kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılarak incelenmiştir. Hazırlanan deney elemanlarında başlangıç çatlak uzunluğu a_0 'ın yapının karakteristik boyutu D 'ye oranı sabit tutulmuştur. Farklı boyutlarda geometrik olarak benzer yapıların maksimum yükleri karşılaştırılmaktadır. Elemana uygulanan maksimum yükün kesit alanına bölünmesiyle nominal dayanım elde edilir. Numune boyutunun artmasıyla birlikte, elemanın içerisinde bulunan kritik kusurlar da artmakta ve nominal dayanım azalmaktadır. Bu yöntemde tepe yükü ile birlikte kritik enerji yayılma hızı ve kırılma süreci bölgesi uzunluğu olmak üzere iki adet kırılma parametresi belirlenmektedir. Bu yöntemde deneyler üç farklı boyuta sahip numuneler üzerinde yapılmakta olup parametreler tepe yükü kullanılarak bulunmaktadır. Geometrik olarak benzer olan farklı boyutlardaki yapıların nominal gerilmelerindeki değişim Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Boyut etkisine göre nominal gerilme üzerindeki değişim [63]

4.5.5. G_F kırılma enerjisi

Kırılma enerjisinin belirlenmesi için çekme deneyleri yapılmakta ve bu deneylerde numunenin gerilme-deformasyon eğrisi belirlenmektedir. Ancak deneyler stabil şartlarda, deformasyonlar ani sıçramalar yapmayacak biçimde artırılmalıdır. Bunun için direkt çekme deneyi yapmak oldukça zordur. G_F kırılma enerjisini belirlemek için çentikli numuneler üzerinde eğilme deneyleri yapmak daha kolaydır ve kırılma enerjisi çentikli bir kiriş numunesinin üç noktalı eğilme altında birden çok parçaya ayrılması için gerekli olan enerji toplamının yeni çatlakların oluşmasında yüzey enerjisine dönüşmesi olarak ifade edilebilmektedir. Eğilme testinde G_F , yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunmaktadır. RILEM TC 50-FMC, betonun kırılma enerjisini Eş. 4.1'deki gibi ifade etmiştir [76].

$$G_F = \frac{U_0 + mg\delta}{A} \quad (4.1)$$

$$A = b(h - a) \quad (4.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde U_0 , yük-deplasman eğrisi altında kalan alanı (N.mm), m kütleyi (kg), g yerçekimi ivmesini ($9,81\text{mm/s}^2$), δ göçme anındaki deplasmanı (mm), A yükleme doğrultusuna paralel yüzey alanını (mm^2), a çentik boyunu (mm), b numunenin kesit genişliğini (mm) ve h numunenin kesit yüksekliğini (mm) göstermektedir.

5. BETONDA MOD II KESME KIRILMASI

5.1. Giriş

Beton çok yönlü bir malzemedir ve doğası gereği içerisinde barındırdığı kusurlardan dolayı gerilme durumlarında oldukça zayıftır. Betonlarda kesme dayanımı yetersizliği önceden tahmin edilemeyen ani ve gevrek kırılmalara neden olabilmektedir. Özellikle yüksek performanslı betonlar ve bunların kesme kırılması ile ilgili yönetmeliklerdeki bilgi eksiklikleri hatalara neden olabilmektedir.

Betonda kesme çatlakları çekme gerilmelerine dik yönde şekillenmektedir. Gerçekte betonun çekme dayanımı kayma dayanımından daha küçüktür. Bu yüzden kırılma genelde çekme mukavemetinin aşılmasıyla meydana gelmektedir.

Malzemede yüklenme kapasitesi çekme gerilmeleri tarafından aşılmış ise oluşan çatlaktan sonra yük etkisi altında kayma hareketleri oluşmaktadır. Bu kesme durumunda aşağıda belirtilen üç farklı evre söz konusudur.

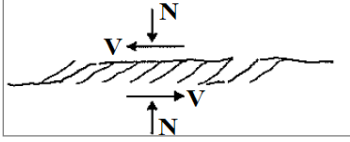
- Betonun çatlamadığı süre zarfında (düzlem gerilme şartlarında) iki asal gerilme mevcuttur.
- Çatlak oluşumu başladığında çatlak asal çekme gerilmelerine dik yönde şekillenir.
- Kayma hareketi çatlak yüzeyleri boyunca kesme modunu gösterir.

Kırılma mekaniği açısından bakıldığında başlangıçta her zaman güçlü bir K_I ve zayıf bir K_{II} söz konusudur. Ancak çatlağın uzaması ve gerilmelerin yeniden dağılmasıyla düşük bir gerilme değerinde mod II daha önemli olabilmektedir.

5.2. Kırılma Mekaniğine Göre Kesme Kırılması

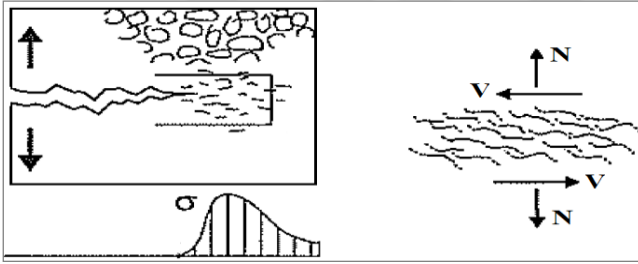
Kırılma mekaniğine göre kesme kırılmasıyla ilgili olarak iki farklı yaklaşım söz konusudur. İlk yaklaşım lineer elastik kırılma mekaniğine dayanmaktadır. Düzenli kesme gerilmeleri altında mod II kesme çatlağının başladığı ve yayıldığı kabul edilmektedir. Örneğin, Bazant ve Pfeiffer [3] Şekil 5.1'deki gibi bir kesme çatlağı tanımlamışlardır. Malzemede son kesme

çatlağı olarak şekillenecek olan bu çatlak, eğik mikro çekme çatlakların dizilimi ile meydana gelir. Yani kırılma anında eğik çatlaklar birleşerek basit bir kesme düzlemi oluştururlar.



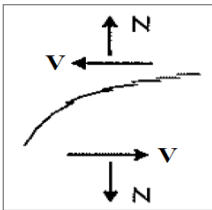
Şekil 5.1. Bazant ve Pfeiffer'in tanımladığı kesme çatlağı [77]

İkinci yaklaşım ise Hillerborg'un lineer olmayan fiktif çatlak modelini dikkate almaktadır. Bu yaklaşımda gerilmenin sıfır olduğu bir makro çatlak önündeki mikro boyutlardaki çatlaklardan oluşan bir kırılma bölgesi tanımlanmaktadır. Bu durum Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Kesme kuvvetine maruz kalmış kırılma bölgesi [77]

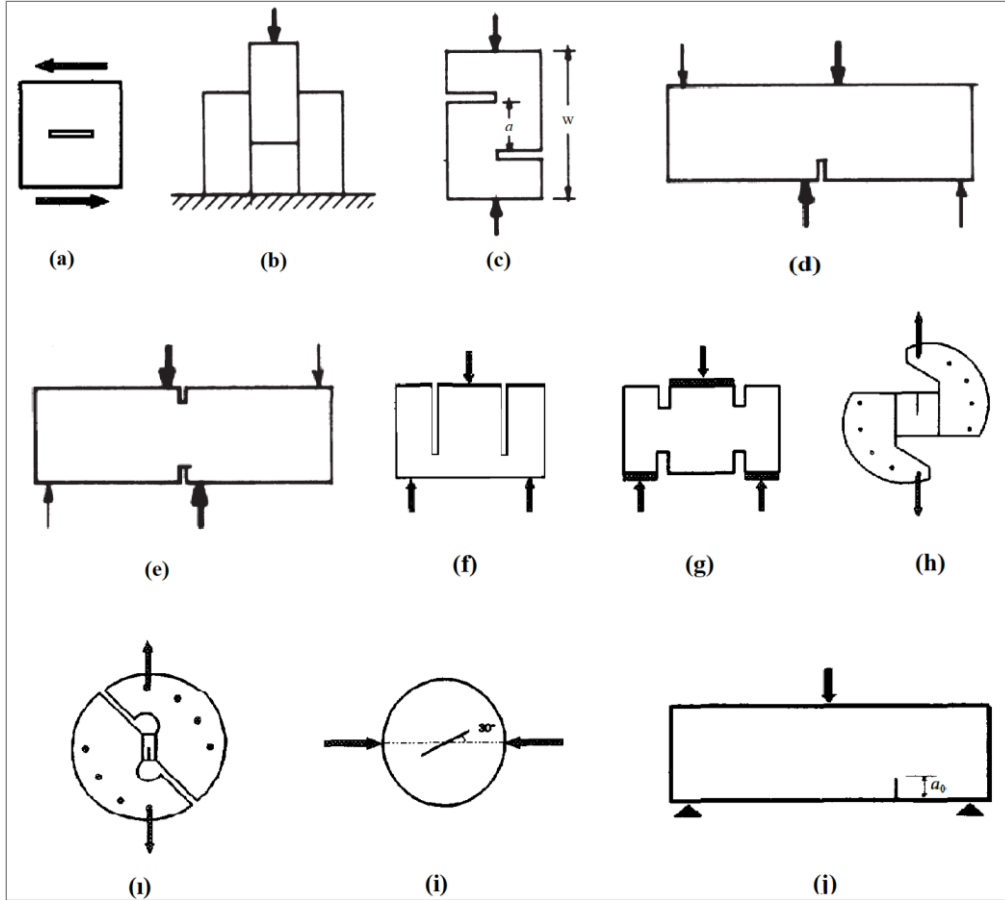
Yukarıdaki yaklaşımlara ek olarak farklı bir durum daha söz konusudur. Bu durum kesme bölgesinin karışık gerilme modları altında tam olarak tanımlanamadığında geçerli olmaktadır. Oluşan çatlak Şekil 5.3'teki gibi lineerlikten ayrılmakta ve bir eğri boyunca yayılmaktadır. Bununla ilgili değişik yorumlar vardır. Araştırmacıların bazıları Mod II çatlak yayılmasının ölçülmesi için mod II kırılma enerjisini bazıları karışık mod I-II kırılma enerjisini kullanmıştır. Bazı araştırmacılar da fiktif çatlak modelini karışık mod I-II durumlarına göre geliştirmek için çalışmalar yapmıştır. Ancak her iki durumda da çatlak büyümesinin küçük bir alanla sınırlandırılması gerekmektedir.



Şekil 5.3. Karışık mod I-II yüklemeleri altında çatlak eğrisinin yayılması [77]

5.3. Mod II ve Karışık Mod Durumları İçin Çeşitli Deneysel Numuneleri

Makro seviyelerde kırılma davranışını belirlemek için çeşitli test geometrileri önerilmiştir. Bu geometriler üç noktalı eğilme kirişi, dört noktalı eğilme kirişi, çift çentikli karesel numune ve çekme-kesme deney numunesi olarak sıralanabilmektedir. Aşağıdaki şekilde çeşitli şekillerde mod II kesme kırılması davranışına ait geometriler gösterilmiştir.



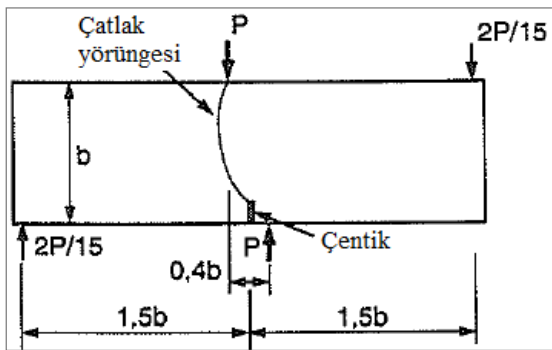
Şekil 5.4. Çeşitli mod II ve karışık mod durumları için test numuneleri [78]

Şekil 5.4'de (a), bir çatlak boyunca saf kayma gerilmelerinin durumunu göstermektedir. Test edilerek öngörölmüş olan bu geometri gerçekleştirilememektedir. Şekil 5.4.(b), genellikle ahşap yapılarda birleşim yerlerindeki testlerde kullanılan geometridir. Şekil 5.4.(c), itme (push-off) numune geometrisi betonarmede ara yüzeyleri incelemek için Mattock and Hawkins [79] tarafından önerilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemine göre çatlak ucunda kesme gerilmesi ile aynı büyüklükte olan bir çekme gerilmesinin varlığından bahsedilmiştir. Yani bu durum, karışık modda gerilme durumunu göstermektedir. Şekil 5.4.(d) ve Şekil 5.4.(e)'de verilen deney numuneleri ise Iosipescu [80] tarafından geliştirilen oldukça kullanışlı ve etkili

bir geometridir. Şekilde görüldüğü üzere bir çentikli ve iki çentikli örnekleri mevcuttur. Şekil 5.4.(f)'de gösterilen geometri ise aksenal delme (punch through) deney elemanı Tada [81] tarafından analiz edilmiştir. Ancak yapılan sayısal çalışmalar büyük çekme gerilmelerinin çatlak ucunda oluştuğunu göstermiştir. Daha sonra yapılan bir çalışma ile de dört çentik açılarak ve çentiklerin derinlikleri de değiştirilerek çekme gerilmelerinin kayda değer bir şekilde azaltılabileceği belirtilmiştir [82]. Şekil 5.4.(g), dört çentikli silindirik bir deney elemanı olup Luong [83] tarafından önerilmiştir. Bu geometride, karışık modda gerilmeler meydana gelmektedir. Richard' a [84] göre Şekil 5.4.(h) ve Arcan'a [85] göre Şekil 5.4.(ı) geometrileri öne sürülmüş olup Izumi ve diğerleri [86] bu zahmetli geometrileri basınç yüklemesine uygun bir hale çevirerek betonda kullanmışlardır. Basınç yüklemesinden dolayı K_I negatif bir değer almış ve çatlak açılmasından kaynaklı bir kırılma oluşmamıştır. Böylelikle mod II durumu çalışılabilmiştir. Şekil 5.4.(i) geometrisi ise Irobe ve Pen [87] tarafından tasarlanmış olup Jia ve diğerleri [88] tarafından da denenmiştir. Son olarak Şekil 5.4.(j) merkezden uzak bir çentik içeren kiriş numunesi Jenq ve Shah [89] tarafından tasarlanmış olup karışık modda kırılma çalışmaları için kullanılmıştır.

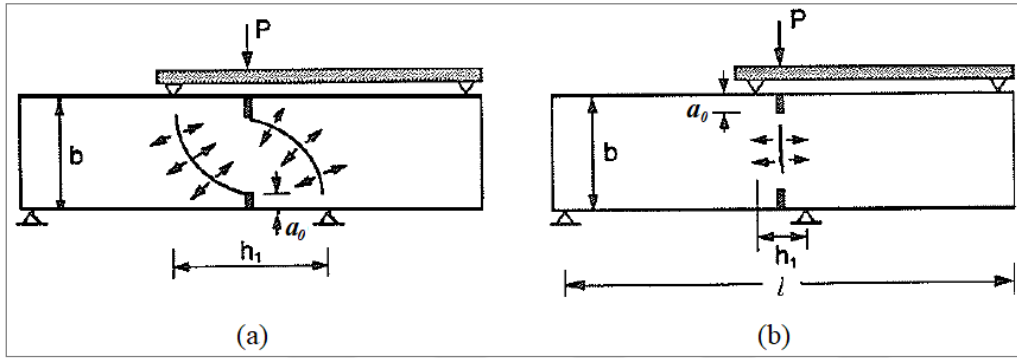
5.3.1. Arrea ve Ingraffea'nın çalışmaları

Arrea ve Ingraffea [2] tek çentikli bir kiriş tasarlayarak çentik ucundan belli bir açıda yayılan bir çatlak tanımlamışlardır. Bu çatlak deney numunesinin üstünden uygulanan yüke kadar çok dik olmayacak bir şekilde ilerlemektedir. Arrea ve Ingraffea çalışmasında aslında kesme kırılmasının var olmadığını, çatlakların en büyük asal gerilmeden kaynaklandığını ve çatlakların bu asal gerilmeye dik yönde şekilleneceğini söylemişlerdir (Şekil 5.5). Bu deneyler sonlu elemanlar yöntemini kullanan çeşitli araştırmacılar tarafından da analiz edilmiştir.



Şekil 5.5. Arrea ve Ingraffea'nın kullandığı tek çentikli kiriş

Arrea ve Ingraffea betonda kırılma modları ile ilgili olarak iki farklı durumu tartışmıştır. Arrea ve Ingraffea'nın çalışmasına göre iç mesnetler arasındaki mesafe büyük olduğunda deney elemanında oluşan çatlak yörüngesi Şekil 5.6.(a)'daki gibi çatlak ucundan zıt yönlü kuvvete doğru gelişirken iç mesnetler arasındaki mesafe küçük olduğunda deney elemanının merkezinde nihai çekme dayanımı aşılmıştır. Şekil 5.6.(b)'deki gibi hemen hemen dik bir çatlak, çentik ucundan uzakta Brezilya yarma testindeki gibi aşağı ve yukarı doğru çekirdeklenme göstermiştir [63].



Şekil 5.6. Çekme gerilmelerinden kaynaklı kesme kırılmaları [63]

Ingraffea ve diğerleri gerilme şiddetlenmesini alt ve üst çentikten gelişen iki çatlak ucundaki bölgede göstermişler ve mod I ve mod II gerilme şiddet faktörlerini Eş.5.1'deki gibi ifade etmişlerdir.

$$K_I = \frac{P}{t\sqrt{b}} f_I \left(\frac{1}{b}, \frac{a}{b}, \frac{h_1}{b} \right)$$

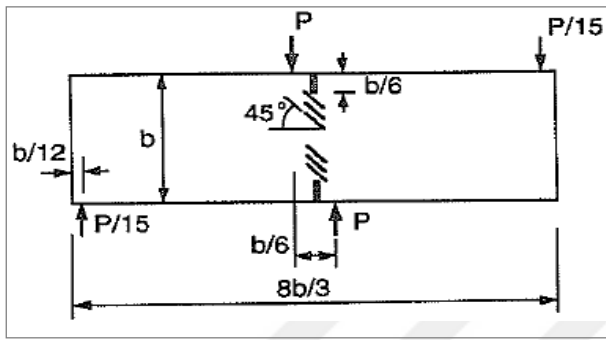
$$K_{II} = \frac{P}{t\sqrt{b}} f_{II} \left(\frac{1}{b}, \frac{a}{b}, \frac{h_1}{b} \right) \quad (5.1)$$

Burada f_I ve f_{II} şekil fonksiyonunu, t numune kalınlığını ifade etmektedir.

5.3.2. Bazant ve Pfeiffer'in çalışması

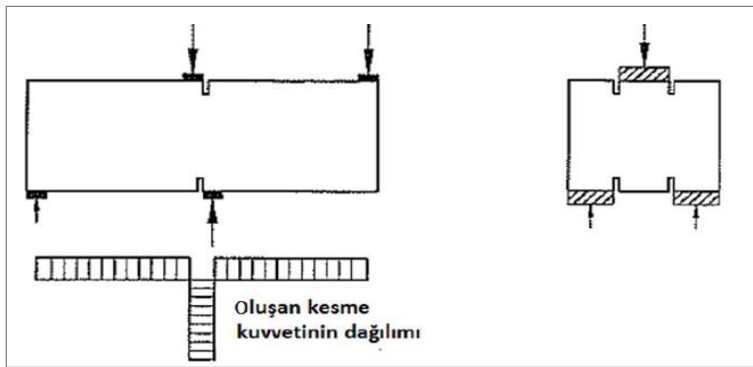
Bazant ve Pfeiffer'in [3] çalışmasında, Arrea ve Ingraffea'nın aksine kesme kırılmasının var olmadığı fikrini şiddetle reddetmişlerdir. Aynı zamanda Arrea ve Ingraffea'nın çalışmasındaki Şekil 5.5'teki çatlak yönünün elde edilen geniş kesme kuvveti bölgesinden kaynaklandığını savunmuşlardır. Bu yaklaşımı desteklemek için Şekil 5.7'deki gibi karşılıklı

iki çentik içeren ve dar bir kesme kuvveti bölgesi bulunduran bir kiriş tasarlamışlardır. Çalışmalarında karşılıklı iki çentiğin ucundan da çatlak yayılmaya başlamış ve bunlar kiriş yüksekliğinin hemen hemen yarısında birbirleriyle birleşmişlerdir. Araştırmacılar bu çalışmalarında kesme kırılmasının varlığını ispatlamış ve çatlak yayılmasının mod II kesme gerilmelerinden kaynaklandığını söylemişlerdir. Aynı zamanda kesme çatlağının mikro boyutlardaki eğik çekme çatlaklarının birleşmesiyle şekillendiğini ifade etmişlerdir. Yani çatlak yayılma yönünü, en büyük asal gerilme kriterinden ziyade maksimum enerji yayılma kriterinin belirlediğini söylemişlerdir.



Şekil 5.7. Mod I mikro çatlaklarından gelişen mod II kesme çatlağı

Bazant ve Pfeiffer çalışmalarında en çok Iosipescu [80] kiriş geometrilerini kullanmışlardır. Şekil 5.8'de gösterilen iki çentikli, dört noktalı kesme deney kirişlerini veya simetrik dik yönde ayırma (punch through) deney küplerini tercih etmişlerdir.



Şekil 5.8. Bazant ve Pfeiffer' in kullandığı kesme deney elemanları [77]

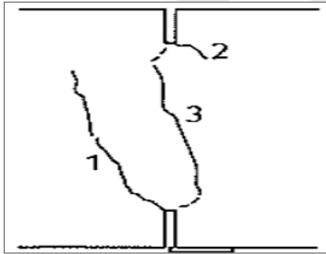
Bazant ve Pfeiffer, dış yüklerin dağılımının, deney elemanı ölçülerine ve mesnetlerin uzaklığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu araştırmacılar çalışmalarında dört noktalı kesme kirişlerinde iç mesnet yükünü dış mesnet yükünün 15 katı olacak şekilde tasarlamışlardır.

Bazant ve Pfeiffer'e göre mod II kesme kırılması enerjisi mod I kırılma enerjisinden 25 kat daha fazladır. Bu önemli fark sadece çekme mikro çatlaklarının oluşumu için değil, aynı zamanda agrega kilitlenmesinden dolayı kesme direncini kırmak için gereken enerjiden ve kırılma cephesinin gerisindeki çatlak yüzeylerinde bulunan pürüzlerden de kaynaklanmaktadır.

Bazant ve Pfeiffer çalışmalarında vuruş kontrollü basma cihazı kullanmışlardır. Ancak piston yer değiştirmesi tepe noktasında patlayıcı kırılmalara neden olacağı için çok da tercih edilen bir yöntem değildir. Aynı zamanda bu metot kırılma çalışmalarında dengede olmadan yanlış tepe yüklerinin ölçülmesine ve zamansız kırılmalara da sebep olabilmektedir.

5.3.3. Ingraffea ve Panthaki'nin çalışması

Ingraffea ve Panthaki [90], Bazant ve Pfeiffer tarafından belirtilmemesine rağmen çentik uçlarından sınırlı çekme çatlakları geliştiğini ileri sürmüşlerdir. Yani alt ve üst çentiklerden iki eğrisel çatlak ilerlemektedir.



Şekil 5.9. Eğrisel çatlakların gösterimi

Ingraffea ve Panthaki'nin çalışmasında hareket eden ana yükler arasındaki mesafe Arrea ve Ingraffea'nın çalışması ile kıyaslandığında birbirine daha yakındır ve çentikler arasındaki kesme gerilmeleri yoğunluğu artmak yerine azalmaktadır. Bu bölgedeki kesme gerilmeleri dağılımı, büyüklüğü ve yönü basit kiriş teorisi kullanılarak tahmin edilememektedir.

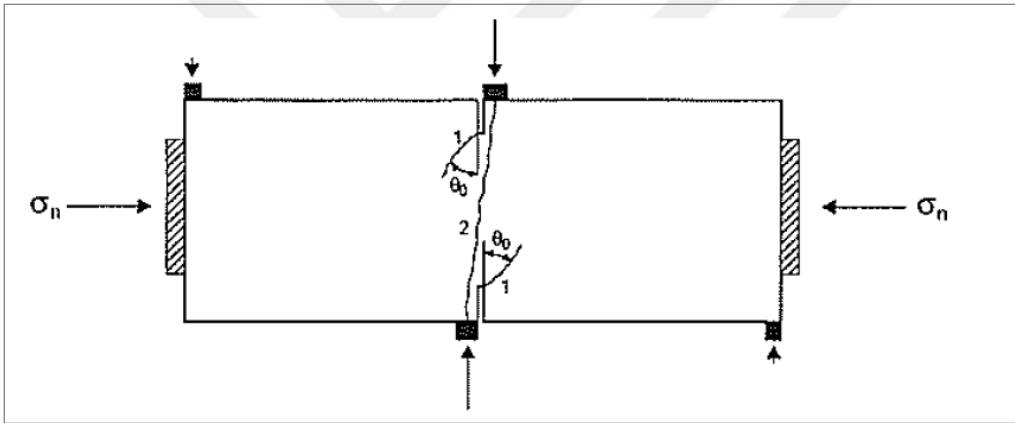
5.3.4. Swartz ve diğerlerinin çalışması

Swartz ve diğerleri [91] Şekil 5.5'teki kirişe benzer tek çentikli, dört nokta yüklemeli bir kirişte çalışma yapmışlardır. Eğer LEKM kabul edilirse sonlu elemanlar analizine göre mod II çatlak yayılmasının yaklaşık 70°'de başladığını belirtilmiştir. Yavaş çatlak ilerlemesinden sonra çatlakın yönü değişerek yaklaşık 30°-40° olmaktadır. Bu durum çatlak yayılmasını

mod I şartları altında olduğunu göstermektedir ve çatlak yolu pürüzlüdür. Aslında bu durum mod I durumundan ziyade agrega kilitlenmesi ve sürtünmeden kaynaklı karışık mod kırılmasıyla ilişkilidir. Kırılma sürecinin sonunda çatlak yüzeyleri basınç gerilmelerine maruz kalmaktadır. Ancak işlem bölgesinin varlığı hesaba katılmamıştır. Eğer kirişlerin boyutu büyür, işlem bölgesi daha geniş bir alana yayılırsa LEKM geçerli olmamaktadır.

5.3.5. Swartz ve Taha'nın çalışması

Ingraffea ve Panthaki' ne benzer araştırma Swartz ve Taha [92] tarafından da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kiriş eksen yönündeki kısıtlamadan dolayı alt ve üst çentiklerden gelişen eğrisel çatlaklar birbirine daha yakın yani daha dar bir şekillenme göstermişlerdir.

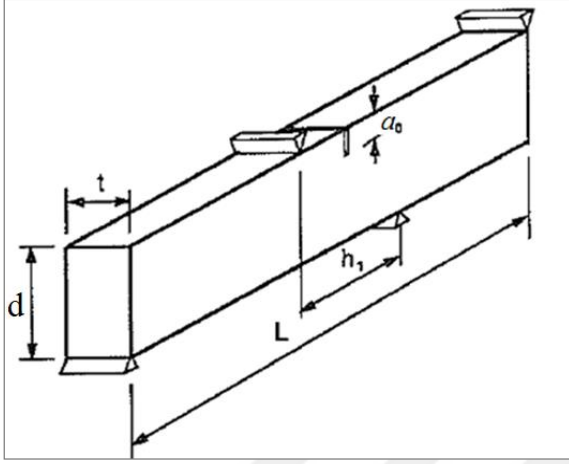


Şekil 5.10. Kesme yükü ve aksenal basınç etkisi altındaki kirişte oluşan çatlak yörüngeleri

Swartz ve Taha'nın çalışmalarında aksenal kuvvet etkisi altında olmayan kirişler deplasman kontrollü kırılmasına rağmen çatlaklar dengesiz bir şekilde hızlıca yayılmıştır. Deney elemanlarında alt ve üst çentiklerden eşzamanlı olmak üzere iç açısı 40° - 71° arasında değişen çatlaklar başlamıştır. Ancak Swartz ve Taha'nın çalışmalarında aksenal kuvvet etkisi altında olan kirişler yükleme kontrollü kırılmakta olup oluşan kırılmalar kararlıdır. Kesme kuvvetleri ve aksenal basınç etkisi altındaki kirişler maksimum yüke ulaştığında iki çatlak (1 numaralı çatlaklar) Şekil 5.10'daki gibi iç açılı olarak 50° civarında olacak biçimde eş zamanlı olarak gelişmektedir. Kiriş tepe yüküne ulaştığında bu çatlaklar dengede kalmakta ve kiriş ortasında başka bir çatlak (2 numaralı çatlak) meydana gelmektedir. Tepe yükünden sonra bu çatlak kiriş derinliği boyunca yayılmaktadır [92].

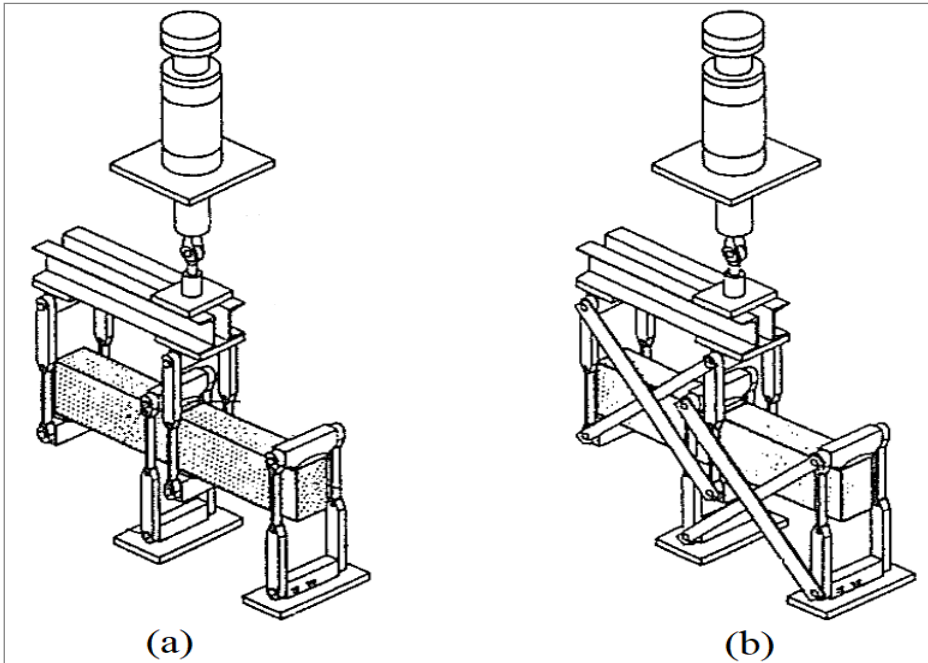
5.3.6. Schlangen ve van Mier'in çalışması

Araştırmacılar kullandıkları deney elemanları üzerinde yükleme noktalarındaki sürtünmeye neden olacak mesnet koşulları üzerinde yoğunlaşmışlardır. Şekil 5.11'de verilen numune geometrisi mesnet türleri, sürtünme, yükleme yeri, bir veya iki çentikli olma durumu ve giriş boyutları dikkate alınarak Schlangen ve van Mier [93] tarafından analiz edilmiştir.



Şekil 5.11. Schlangen ve van Mier tarafından kullanılan deney geometrisi

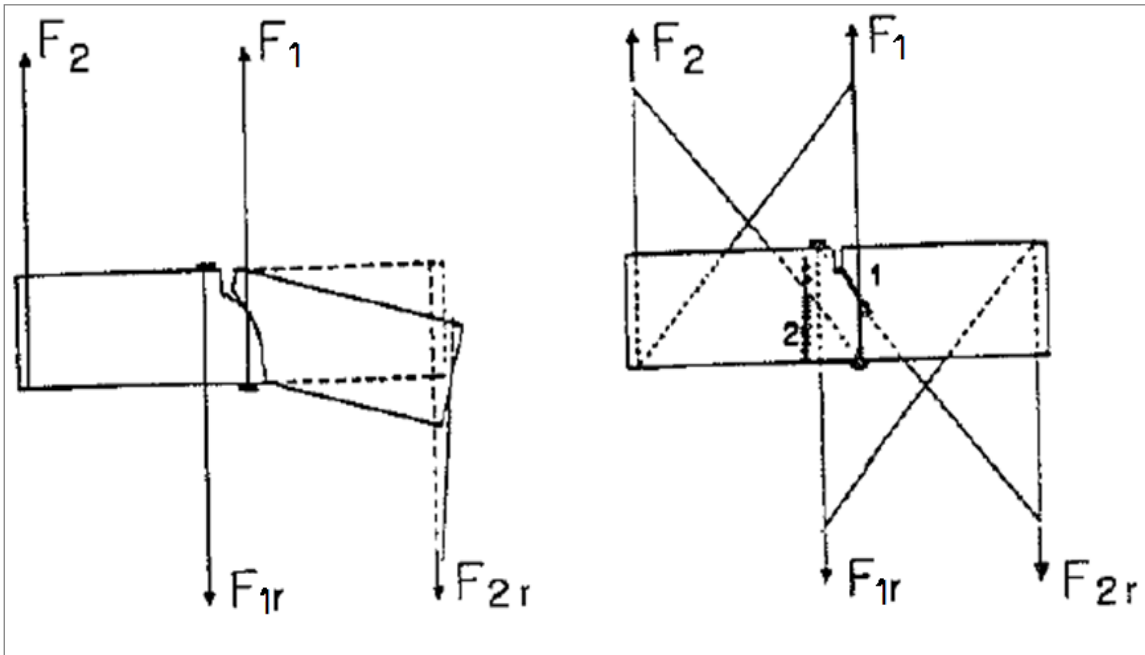
Schlangen ve van Mier'in çalışmasında dönen mesnetli ve sabit mesnetli durumlar için kullanılan yükleme cihazları Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Sırasıyla dönen ve sabit mesnetli durumlar için yükleme cihazları

Serbest dönme yapabilen tek çentikli kirişte Arrea ve Ingrassia'nın çalışmasına benzer şekilde çentik ucundan belli bir açıda çatlak yayılmıştır (Şekil 5.13).

Sabit mesnetli tek çentikli kirişte ise iki kırılma mekanizması mevcuttur. Çentikten eğrisel bir çatlak başlamış ancak kirişteki yatay sınırlamadan dolayı tamamen yayılmamıştır. Bu çatlağın ilerlemesi durduğunda ise çentik olmayan alt kısımda ikinci bir çatlak yani eğilme çatlağı görülmüştür. Bu çatlak kiriş derinliğince yayılmış ve kırılma gerçekleşmiştir (Şekil 5.13).

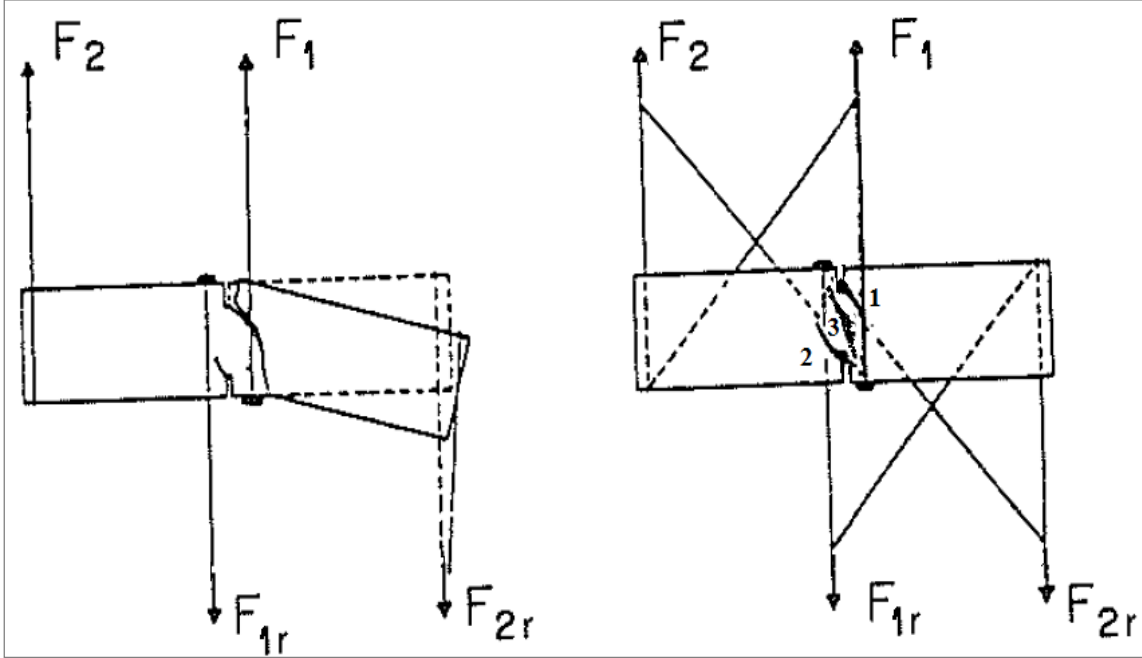


Şekil 5.13. Tek çentikli kirişlerde sırasıyla dönen mesnet ve sabit mesnetli durumlar için kırılma mekanizması

Serbest dönme yapabilen iki çentikli kirişte, çentiklerden gelişen birer çatlak yayılması görülmektedir. Bu durum çentiklerden çatlak büyümesine sebep olan ve dönme yapabilen mesnetlerden kaynaklanmaktadır. Ancak tepe noktasından sonra sadece tek bir çatlak kırılma ile sonuçlanmıştır (Şekil 5.14). Swartz ve Taha'nın [92] çalışmasında iki çatlakta kiriş boyunca yayılmasına rağmen bu durum Swartz ve Taha tarafından yapılan çalışmayla benzerdir.

Sabit mesnetli iki çentikli kirişte ise çentiklerden gelişen birer çatlak yayılması görülmektedir. Bu çatlakların ilerlemesi yatay kuvvetler tarafından önlenmiş olup bunların arasından üçüncü bir çatlak gelişerek iç mesnetlerdeki yüklemeye noktasına doğru

yayılmaktadır. Böylece kırılma gerçekleşmektedir (Şekil 5.14). Bu durum Swartz ve Taha [92] tarafından gerçekleştirilen aksel basınç altındaki kesme testiyle aynı sonucu vermektedir.

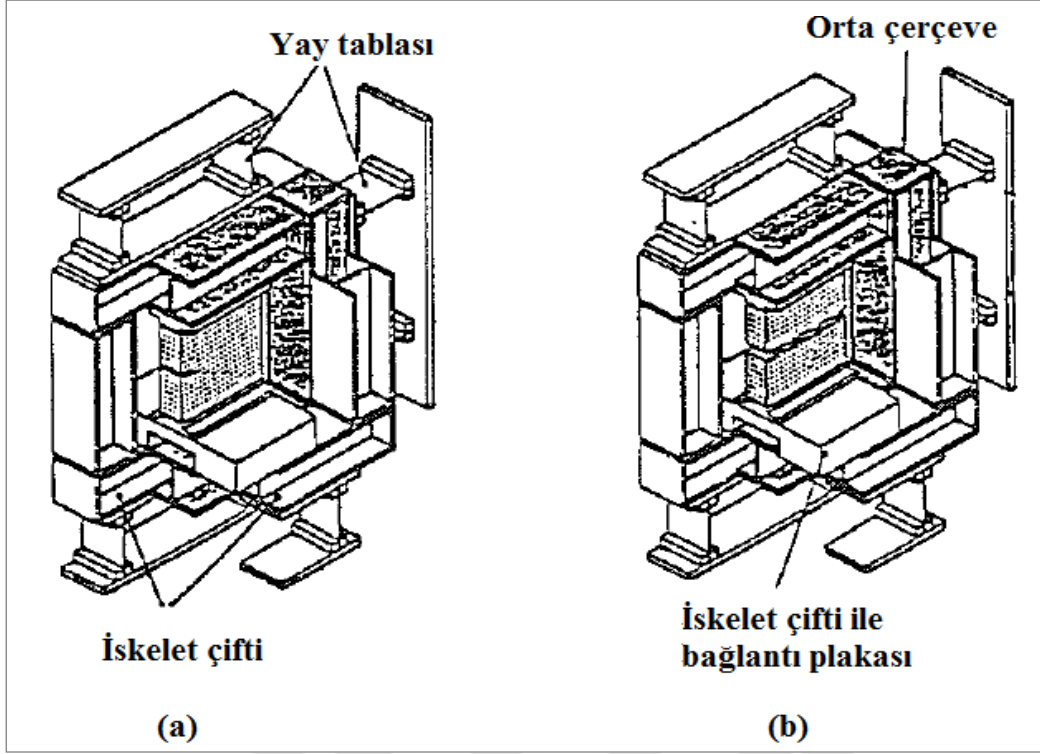


Şekil 5.14. Çift çentikli kirişlerde sırasıyla dönen mesnet ve sabit mesnetli durumlar için kırılma mekanizması

5.4. Delft Teknik Üniversitesinde Yapılan Çalışmalar

Swartz ve Taha'nın çalışmalarındaki test düzeneği iki eksenli test düzeneklerinin yolunu açmıştır. Delft Teknik Üniversitesi Stevin laboratuvarında gerçekleştirilen iki eksenli kesme testlerinde ayrı ayrı mod I ve mod II yer değiştirmelerini kontrol etmek mümkündür. Asal gerilmeler malzemenin çekme dayanımına ulaşır ulaşmaz çatlakın başlayacağı varsayılır.

İki eksenli test düzeneği basitçe birbirinden bağımsız iki rijit çerçevenin boydan boya bir yay tablası aracılığıyla sabitlenmesi ile oluşturulmuştur. İki rijit çerçeveden biri iki çift iskeletten oluşmaktadır. İkincisi ise bu iskeletlerin arasında kaymaktadır. Bu çift iskeletler düşey yönde boydan boya sabitlenmiş olup yatay yönde hareket edebilmektedirler. Orta kısımdaki çerçeve ise yatay yönde sabitlenmiş olup düşey yönde hareket edebilmektedir.



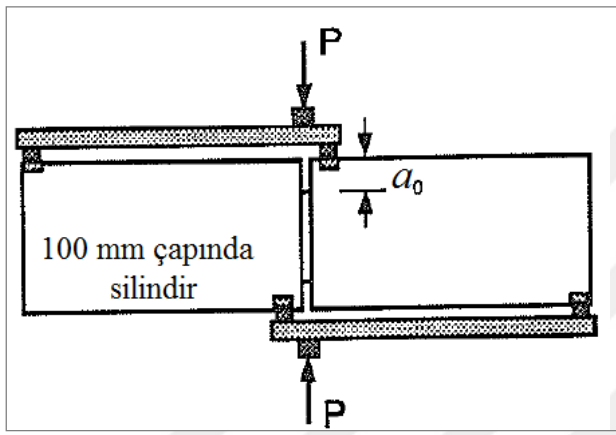
Şekil 5.15. Delft Teknik Üniversitesi Stevin Laboratuvarında iki eksenli test düzeneği a) deneye başlarken, b) çatlamadan sonra

Tek eksenli gerilmelerde beton plaka orta çerçevenin üst kısmı ile dış iskelet çiftinin arasına yerleştirilmiştir. Deney başladığında dış çerçeve çifti düşey yönde hareketi engellemiş ve beton elemanda çekme gerilmesi gerçekleşmiştir. Aynı prosedür kesme yükü uygulanmasında da kullanılmaktadır. Numuneler tek çentikli veya çift çentikli olabilmektedir. Bu deney deformasyon kontrollü gerçekleştirilmiştir [63].

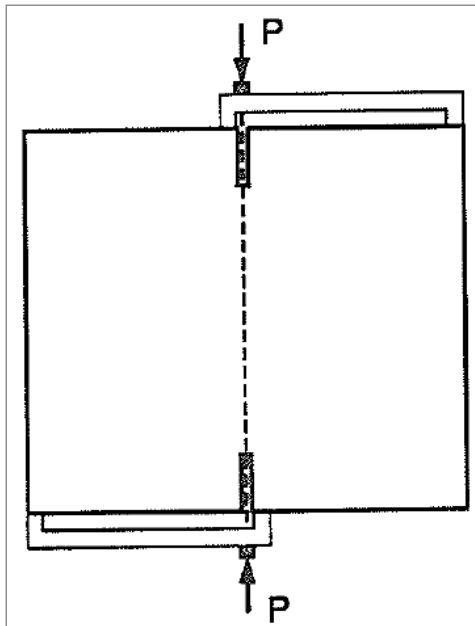
5.5. Cardiff Üniversitesinde Yapılan Çalışmalar

Barr ve diğerleri [94] betonda kesme testi çalışmak için iki farklı geometri geliştirmiştir. İlk geliştirilen geometriye simetrik olarak çentikler açılmış ve hemen yanından yükleme yapılarak kesme bölgesi oluşturulmuştur. Ancak bu geometrinin dezavantajı kesme kırılmasının yeteri kadar elde edilememesi olmuştur ve geometri üzerindeki sayısal bir analiz çekme bölgelerinin hemen çentik uçları yakınında oluştuğunu göstermiştir. Bu durum uygulamada çekme gerilmelerinin kesme kırılması haricindeki kırılmalara neden olabileceğini göstermektedir. Ayrıca geometri üzerindeki yanlış yerden yüklemeler, açılan çentik derinlikleri ya da her ikisi testlerde hatalara neden olabilmekte beklenen kesme kırılması yerine farklı kırılmalara yol açabilmektedir. Bütün bunlar göz önüne alındığında

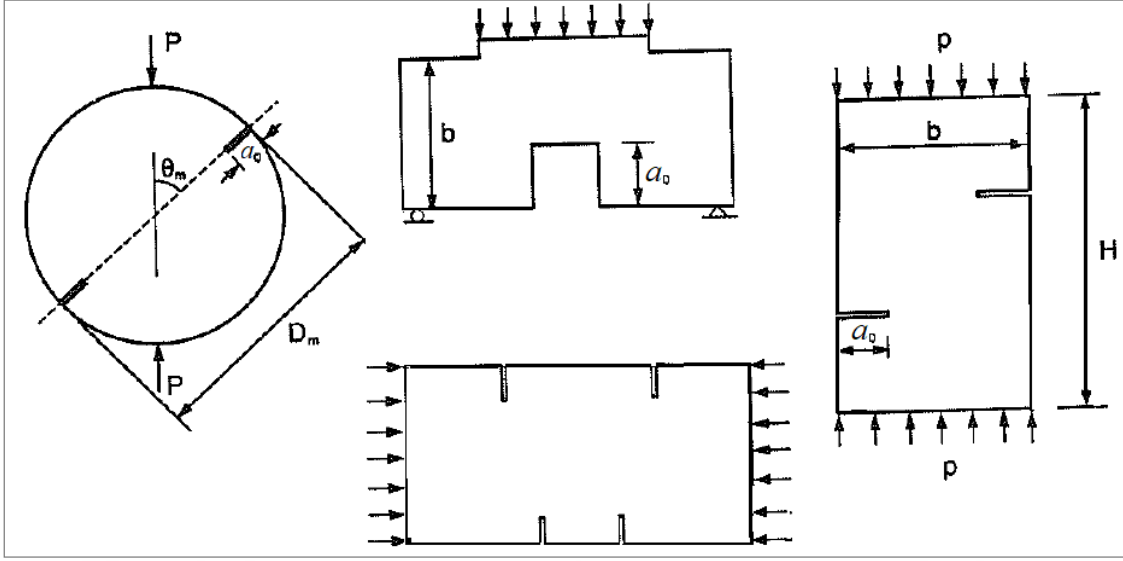
dairesel olarak açılmış çentik bulunduran ve tekrarı sağlanabilen kesme deney numunesi geliştirilmiştir (Şekil 5.16). Böylece farklı beton karışımları için kesme gerilmelerinin çentik boyundan ve maksimum agrega çapından bağımsız olduğu ifade edilmiştir. Ancak zamanla boyut etkisi çalışmalarında agrega boyutunun önemi ayrıca gündeme gelmiştir. Diğer yandan bu iki geometrinin betonda kesme kırılması çalışmasına uygunluğu tartışılırken Cardiff'te düzlem boyut etkisi ve lif takviyeli beton karışımlar için daha kompakt dikdörtgen kiriş bir deney elemanı geliştirilmiştir (Şekil 5.17). Bazı farklı geometriler Barr ve Hughes [95] tarafından da önerilmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.16. Dairesel çentikli silindirik kesme deney elemanı

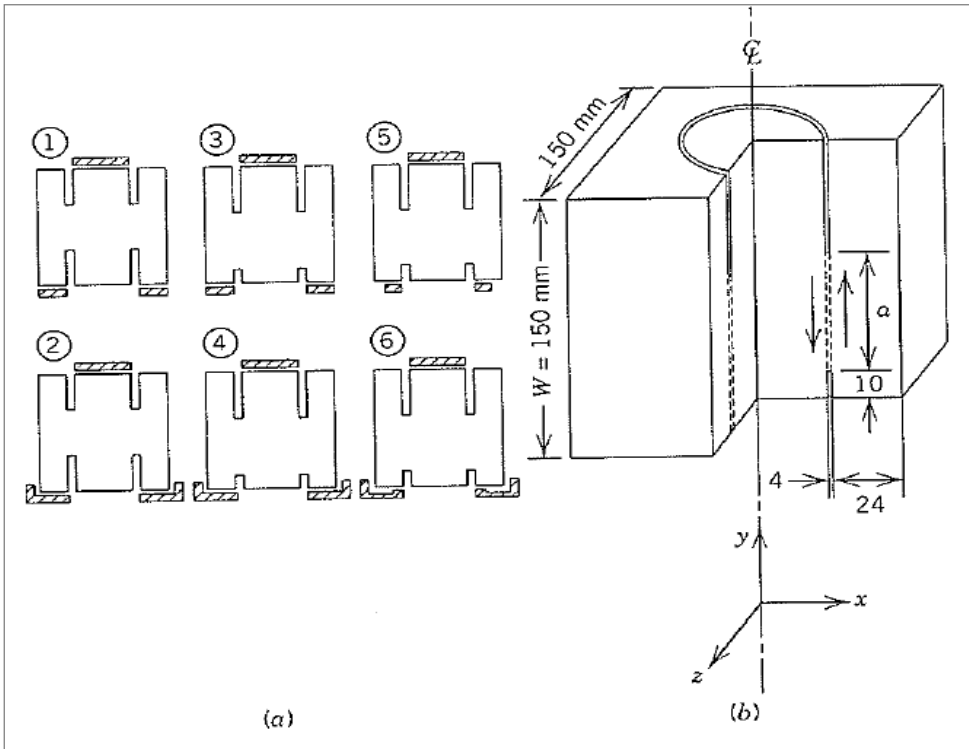


Şekil 5.17. Kesme testi için kübik kompakt deney elemanı



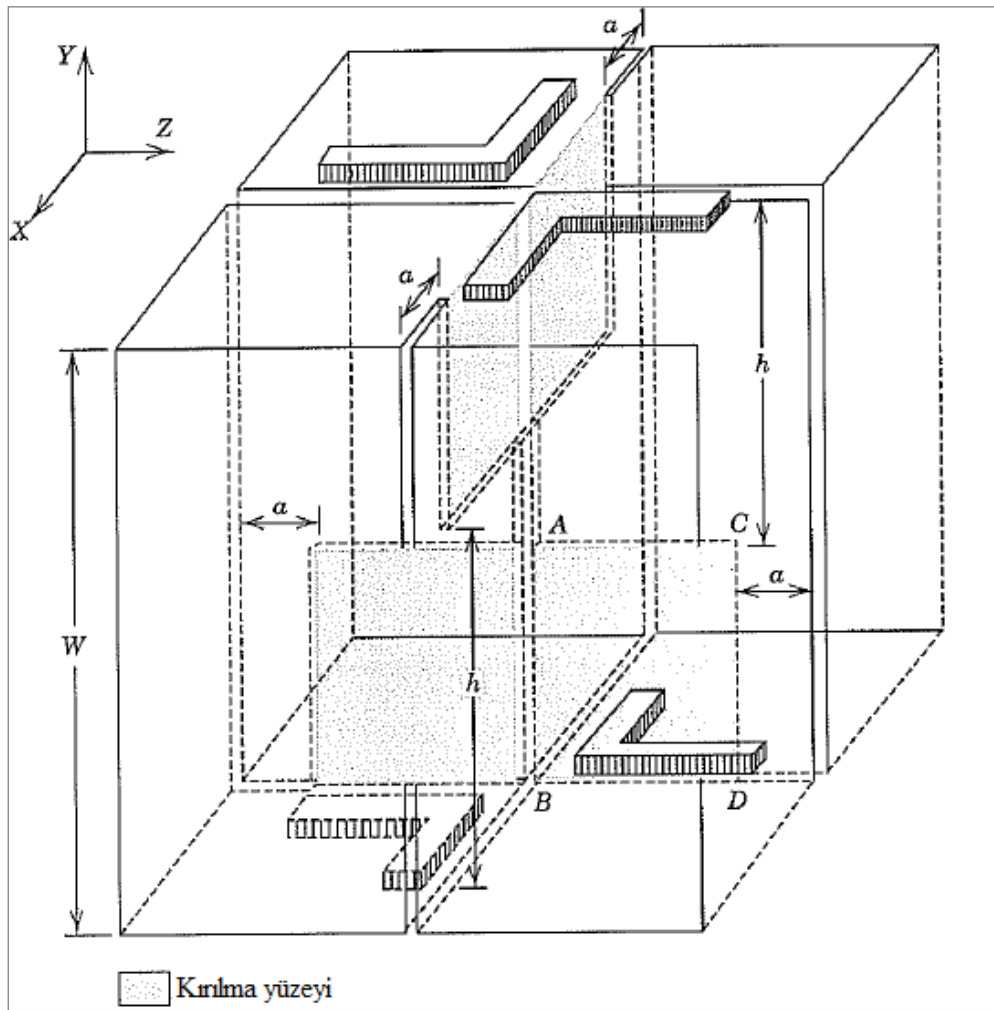
Şekil 5.18. Barr ve Hughes [95] tarafından önerilen farklı geometriler

Bir başka geometri ise Arslan ve diğerleri [96] tarafından çalışılmıştır. Şekil 5.19’da gösterilen deney geometrileri üzerinde yapılan çalışmada numuneye açılan dairesel çentiklerden alt bölgede olanların iç yüzeyinde ve üst bölgede olanların da dış yüzeyinde çekme kırılması meydana gelmiştir. Kırılma yüzeyi “S” şeklinde bir yol izlemiştir.



Şekil 5.19. Eksenel delme (punch through) test geometrileri a) farklı geometriler, b) 3-6 arası gösterilen deney elemanlarının ölçüleri

Arslan ve diğeri [97] 150 mm boyutlarında beton küp numuneler kullanarak farklı bir çalışma daha yapmışlardır. Küp üzerinde iki tane h derinliğinde çentik açarak dört ayrı kırılma düzlemi tasarlamışlardır. Bu kesikleri ana çentikler olarak adlandırmışlardır. Daha sonra a derinliğinde dört tane daha ek çentik açılarak bunları da ikincil çentikler olarak isimlendirmişlerdir. Çalışmada h ve a 'nın derinliğine bağlı olarak mod I-II, mod I-III ve karışık mod I-II-III kırılma davranışları elde edilmiştir (Şekil 5.20). Bu çalışma lif takviyeli ve düzlem betonların karışık mod kırılma davranışının incelenmesi için etkili bir çalışma olmuştur.



Şekil 5.20. Karışık mod kırılma için tasarlanan geometri



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Beton Karışım Malzemeleri

Bu çalışmada yüksek dayanım elde edebilmek için su/çimento oranı düşük bir beton tasarımı yapılmıştır. Bunun için çimento ile birlikte ince agrega, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı ve puzolan malzeme kullanılarak beton karışımlar hazırlanmıştır. Elde edilen yüksek dayanımlı beton karışımlara farklı oranlarda mikro çelik ve mikro polimer lifler eklenerek betonun mekanik özelliklerinde iyileşme hedeflenmiştir.

6.1.1. Çimento

Deneyde yüksek performanslı beton karışımının elde edilmesinde çimento olarak Mersin ÇİMSA fabrikasının “Çimsa Süper Beyaz - CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosu” kullanılmıştır. Bu çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 6.1’de, fiziksel ve mekanik özellikler ise Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosunun kimyasal özellikleri

Çözünmeyen Kalıntı (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Kızdırma Kaybı (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Klorür (%)	Serbest CaO (%)
0,18	21,6	4,05	0,26	65,7	1,3	3,3	3,2	0,3	0,35	0,01	1,6

Çizelge 6.2. CEM I 52,5 R Beyaz Portland Çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)			Priz Başlangıcı (dakika)	Priz Sonu (dakika)	Hacim Sabitliği (mm)	Özgül Yüzey (cm ² /gr)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Beyazlık Y Değeri (%)
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük						
52,5	37	50	60	100	130	1	4600	3,06	85,5

6.1.2. Agrega

Elde edilen betonlarda agrega olarak maksimum dane çapı 1 mm olan silis kumu kullanılmıştır İstanbul/Şile’de ÇELİKTAŞ A.Ş. tarafından üretilen AFS 40-45 kodlu

silis kumuna ait kimyasal analiz sonuçları ve elek analizleri Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Silis kumunun kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Analiz	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Al ₂ O ₃ ve Diğerleri
% Mak.	98,85	0,32	0,015	0,03	0,054	0,771	1,187
% Min.	98,02	0,11	0,01	0,018	0,03	0,048	0,39

Çizelge 6.4. Silis kumunun elek analizi sonuçları

Elek Boyutu (µm)	Analiz Sonucu (%)
1000	0,1
710-1000	1,7
500-710	9,7
355-500	28,2
250-355	41,5
180-250	16,7
125-180	1,7
90-125	0,3
0-90	0

6.1.3. Silis dumanı

Karışımlarda puzolanik beton katkı malzemesi olarak temini İKSA firmasının Lalahan fabrikasından sağlanan amorf yapıda gri renkte toz silis dumanı kullanılmıştır. Aşağıda Çizelge 6.5’de silis dumanına ait teknik özellikler gösterilmektedir.

Çizelge 6.5. Silis dumanının teknik özellikleri

Analizler	Test Metodu	Standard Değerleri	Deney Metodu İKSA	Analiz Sonuçları
Çözünürlük	Gözle	Suda Çözünmez	İksa Lab(TA-87)	Suda Çözünmez
Bağıl yoğunluk	ASTM C1240-12	2.0-2.2 (gr/cm ³)	İksa Lab(TA-12)	2.08 (gr/cm ³)
Renk	GÖZLE	Gri-Açık Gri Toz	İksa Lab	Gri-Açık Gri Toz
Nem içeriği	ASTM C1240-11	En fazla %3	İksa Lab(TA-14/15)	%2.01
Yığın yoğunluk	ASTM C1240-19	150-250 (kg/m ³)	İksa Lab(TA-82)	247 (kg/m ³)
Kimyasal yapı	Gözle	Amorf, mikron altı toz	İksa Lab	Amorf, mikron altı toz
SiO ₂ (%)	ASTM C1240-10	En az %80	İksa Lab(TA-81)	%87
Kızdırma kaybı	ASTM C1240-11	En fazla %5	İksa Lab(TA-14/15)	%2
40µm elekte kalan	ASTM C1240-13	En fazla %10	İksa Lab(TA-83)	%5
Puzolanik aktivite indeksi (7 gün)	ASTM C1240-16	En az %105	İksa Lab(TA-83)	%108

6.1.4. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı malzemesi

Karışımların su/çimento oranları düşük olduğundan işlenebilirliği artırmak için yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan ürün Chryso firmasına ait polikarboksilat destekli Optima 284 no'lu yeni nesil süperakışkanlaştırıcıdır. Ürüne ait teknik özellikler Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Yeni nesil süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Teknik Özellikler					
Görünüm	Yoğunluk (gr/cm ³)	Renk	pH	Katı Madde	Klorür İçeriği
Sıvı	1,080 ± 0,02	Kahverengi	6,00 ± 1	30,50 ± %5	<%0,1

6.1.5. Karışım suyu

Beton karışımların tamamında Ankara İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

6.1.6. Mikro çelik lifler

Kesme deneylerinde kullanılmak üzere hazırlanan numunelerde ayrı ayrı %1, %2 ve %3 oralarında mikro çelik lif kullanılmıştır. Kullanılan mikro çelik lifler Bekaert firmasından temin edilen OL 13/.16 kodlu parlak ve düz şekilli liflerdir. Kullanılan bu mikro çelik lifler 13 mm uzunluğuna; 0,16 mm çapına ve 2600 MPa çekme dayanımına sahiptir.

6.1.7. Mikro polimer lifler

Kesme deneylerinde kullanılmak üzere elde edilen numunelerde ayrı ayrı %0,1; %0,2 ve %0,3 oralarında mikro polimer lif kullanılmıştır. Bu lifler, Forta firmasından temin edilmiş olup polipropilen ve aramid karışımından oluşan forta fi adlı mikro polimer liftir. Forta fi lif malzemesine ait fiziksel özellikler aşağıda Çizelge 6.7’de gösterilmiştir [98].

Çizelge 6.7. Mikro polimer liflerin fiziksel özellikleri

	Malzemeler	
	Polipropilen	Aramid
Özelliği	Bükülerek fibrilleştirilmiş lif	Çok filamentli lif
Özgür ağırlığı	0,91	1,45
Çekme dayanımı (MPa)	483	3000
Uzunluğu (mm)	19	19
Rengi	Açık taba rengi	Sarı
Asit/alkali direnci	Etkisiz	İyi
Ayrışma sıcaklığı (°C)	157	>450

6.2. Beton Karışım Oranları

Hazırlanan beton karışımlarda ayrı ayrı olmak üzere toplam beton ağırlığının %1, %2 ve %3'ü oranında mikro çelik lif ile yine toplam beton ağırlığının %0,1, %0,2 ve %0,3'ü oranında mikro polimer lif kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan karışım oranları 1 m³ beton için Çizelge 6.8'de gösterilmiştir.

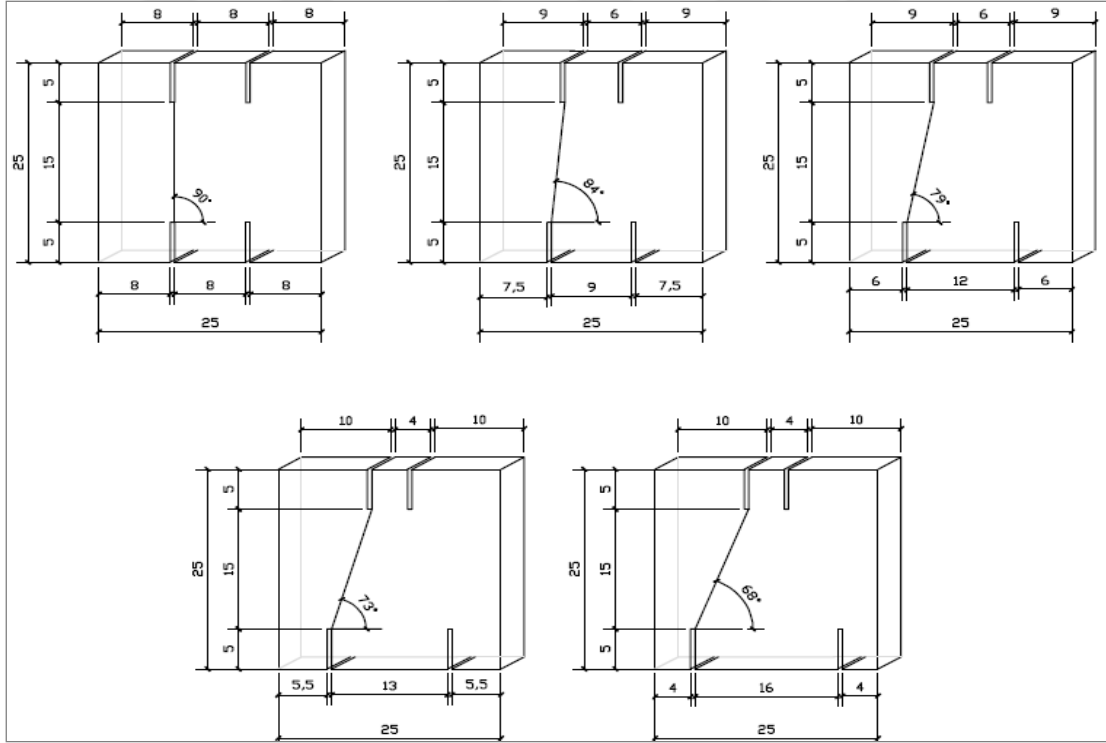
Çizelge 6.8. Lifli ve lifsiz beton numunelerin karışım oranları (kg/m³)

Beton Karışım Türü	Silis Kumu (kg/m ³)	Çimento (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Yeni Nesil Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Lif Miktarı (kg/m ³)
Lifsiz	1210	990	148,5	198	29,7	-
%0,1 Mikro polimer lifli	1210	990	148,5	198	29,7	2,58
%0,2 Mikro polimer lifli	1210	990	148,5	198	29,7	5,15
%0,3 Mikro polimer lifli	1210	990	148,5	198	29,7	7,73
%1 Mikro çelik lifli	1210	990	148,5	198	29,7	25,76
%2 Mikro çelik lifli	1210	990	148,5	198	29,7	51,52
%3 Mikro çelik lifli	1210	990	148,5	198	29,7	77,29

Beton karışımlar hazırlanırken öncelikle silis kumu, çimento ve silis dumanı karıştırılarak kuru karışım elde edilmiştir. Daha sonra ilk olarak suyun %70'i ile süperakışkanlaştırıcının %50'si karıştırılıp kuru karışıma birlikte ilave edilmiştir ve karışım 3 dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından kalan su ve süperakışkanlaştırıcı birlikte tekrar ilave edilerek 7 dakika daha karışım sağlanmıştır. En son çeşitli oranlardaki lifler de eklenerek beton karışımı tamamlanmış ve daha önceden yağlanan 250x250x30 mm boyutlarında ahşap kalıplara ve basınç testi için 100x100x100 mm boyutlarında küp kalıplara yerleştirilmiştir. Bir gün sonra kalıplardan çıkarılan beton levhalar ve küp numuneler oda sıcaklığında bulunan kür havuzunda 28 gün boyunca kür edilmiştir.

6.3. Çentikler Açılarak Deney Elemanlarının Hazırlanması

Kesme deneyleri için elde edilen her bir numuneye, karşılıklı olmak üzere ikişer çentik açılarak her bir lif oranı için 5 farklı açıda simetrik deney elemanları oluşturulmuştur. Bu açılar 68° , 73° , 79° , 84° ve 90° olarak belirlenmiştir. Çentiklerin her biri, uzunluğu 50 mm ve genişliği 5 mm olacak şekilde açılmıştır. Hazırlanan deney elemanlarının boyutları ve tasarlanan açılar Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Her bir açı değeri için; mikro çelik lifli, mikro polimer lifli ve lifsiz referans numunesi olmak üzere 35 farklı durumun araştırılması hedeflenmiş ve bu farklı durumlardan üçer adet olmak üzere toplam 105 adet deney elemanı hazırlanmıştır. Daha sonra teste tabi tutulan bu deney elemanları incelenerek her bir durum için çalışmanın amacına uygun sonuçlanan birer numune dikkate alınmıştır.



Şekil 6.1. Deney elemanlarının boyutları ve tasarlanan açılarının gösterimi

6.4. Deney Elemanlarının İsimlendirilmesi

Deney elemanları kesme testi için 250x250x30 mm boyutlarında ve basınç testi için de 100x100x100 mm boyutlarında üretilmişlerdir. Deneyde kullanılan betonarme kirişler, içeriğindeki lif türü, lif oranı ve çentiklerin açılmasıyla tasarlanan açıya göre Çizelge 6.9’da gösterildiği gibi isimlendirilmiştir. İlk iki harf lif türünü ondan sonra gelen sayılar lif oranını

ve son iki sayı da kesme açısını ifade etmektedir. Örneğin MP01-68 kodlu numune %0,1 oranında mikro polimer lif içeren 68° kesme açısına sahip numuneyi temsil etmektedir.

Çizelge 6.9. Deney elemanlarının isimleri

Lif Türü	Lif Oranı (%)	Kesme Açısı	Numune İsmi
Lifsiz	0,0	68°	NF-68
		73°	NF-73
		79°	NF-79
		84°	NF-84
		90°	NF-90
Mikro polimer lif	0,1	68°	MP01-68
		73°	MP01-73
		79°	MP01-79
		84°	MP01-84
		90°	MP01-90
Mikro polimer lif	0,2	68°	MP02-68
		73°	MP02-73
		79°	MP02-79
		84°	MP02-84
		90°	MP02-90
Mikro polimer lif	0,3	68°	MP03-68
		73°	MP03-73
		79°	MP03-79
		84°	MP03-84
		90°	MP03-90
Mikro çelik lif	1,0	68°	MS1-68
		73°	MS1-73
		79°	MS1-79
		84°	MS1-84
		90°	MS1-90
Mikro çelik lif	2,0	68°	MS2-68
		73°	MS2-73
		79°	MS2-79
		84°	MS2-84
		90°	MS2-90
Mikro çelik lif	3,0	68°	MS3-68
		73°	MS3-73
		79°	MS3-79
		84°	MS3-84
		90°	MS3-90

6.5. DeneYlerde Kullanılan Cihazlar ve DeneY Düzeneği

DeneYler Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup buradaki cihazlar kullanılmıştır.

6.5.1. Yük hücresi (load cell)

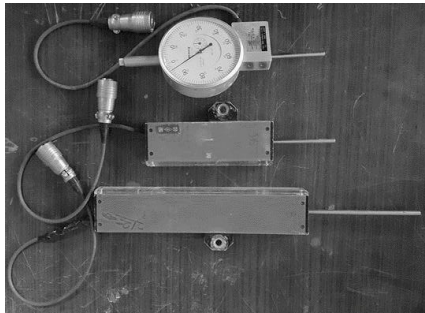
220 kN basma özelliğine sahip yük hücresi (load cell) kullanılmıştır. DeneYe başlamadan önce yük hücresinin pres altında kalibrasyonu yapılmıştır (Resim 6.1).



Resim 6.1. Yük hücresi (Load cell)

6.5.2. Deplasman ölçer (LVDT)

DeneYlerde 100 mm, 50 mm ve 20 mm ölçüm kapasitesine sahip deplasman ölçerler kullanılmıştır. Üç tanesi numunenin sol tarafına üç tanesi sağ tarafına ve bir tanesi de numunenin altına yerleştirilmek suretiyle hem yatay yer değiştirmeler hem de düşey yer değiştirme değerleri gözlemlenmiştir. DeneYde kullanılmadan önce, deplasman ölçerin kalibrasyonu yapılmıştır (Resim 6.2).



Resim 6.2. Deplasman ölçerler (LVDT)

6.5.3. Veri toplayıcı (data logger)

Deneysel LVDT'lere gelen değerleri bilgisayara aktarmak için, saniyede 8 ölçüm alabilme özelliğine sahip olan 8 kanallı bir adet veri toplayıcı ve haberleşme birimi kullanılmıştır. Yük hücresi, deplasman ölçerler ve birim deformasyon ölçer için ayrı ayrı kanal ayarları yapılmıştır. Veri toplayıcının bilgisayar üzerinde kurulu yazılımı sayesinde deney verileri kayıt altına alınmıştır (Resim 6.3).



Resim 6.3. Veri toplayıcı ve haberleşme birimi

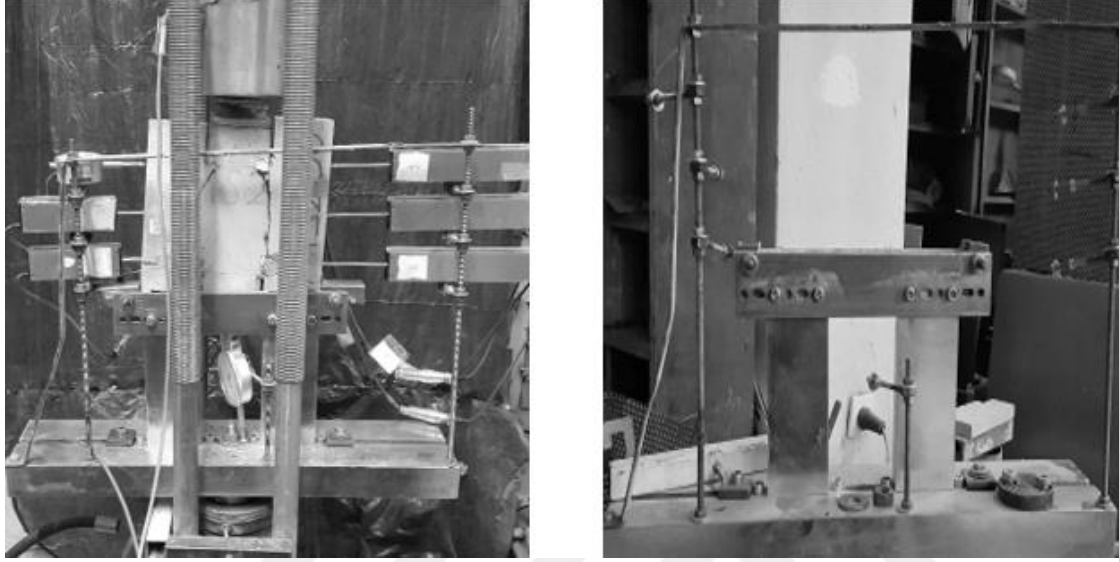
6.5.4. Yükleme cihazı ve ölçüm düzeneği

Deneysel hızı elle ayarlanabilir hidrolik yükleme cihazı kullanılmıştır (Resim 6.4). Deney esnasında yükün eşit dağılımı için yük hücresinin altına 10 mm kalınlığında üst çentiklerin arasına oturacak ebatlarda demir bir levha konulmuştur. Aynı zamanda 10 mm kalınlığındaki demir levhanın altına ince bir kontrplak konularak yükün uygulandığı noktada betonun ezilmesi engellenmek istenmiştir.

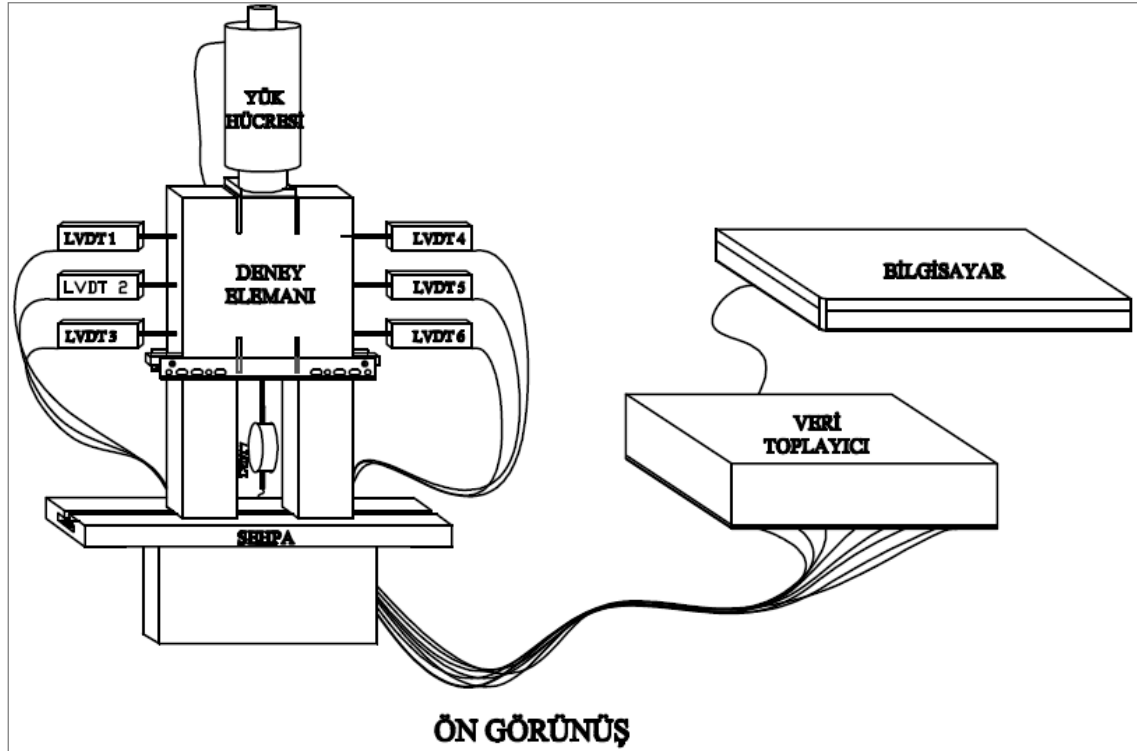


Resim 6.4. Hidrolik yükleme cihazı

Deneyleerde yüklemeyi yapabilmek ve mesnet ayarlarını sağlayabilmek için bir yükleme sehvası tasarlanmıştır (Resim 6.5.). Mesnetlerde yanal ve düşey hareketler engellenerek yükleme sırasında basınç yüklemesinden kaynaklı açılma oluşması önlenmek istenmiştir. Deneyle düzeneyinin şematik gösterimi Şekil 6.2' de verilmiştir.



Resim 6.5. Yükleme sehvası ve deneyle düzeneyi



Şekil 6.2. Deneyle düzeneyinin şematik gösterimi

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Lifli ve Lifsiz Numunelerin Basınç Dayanımları

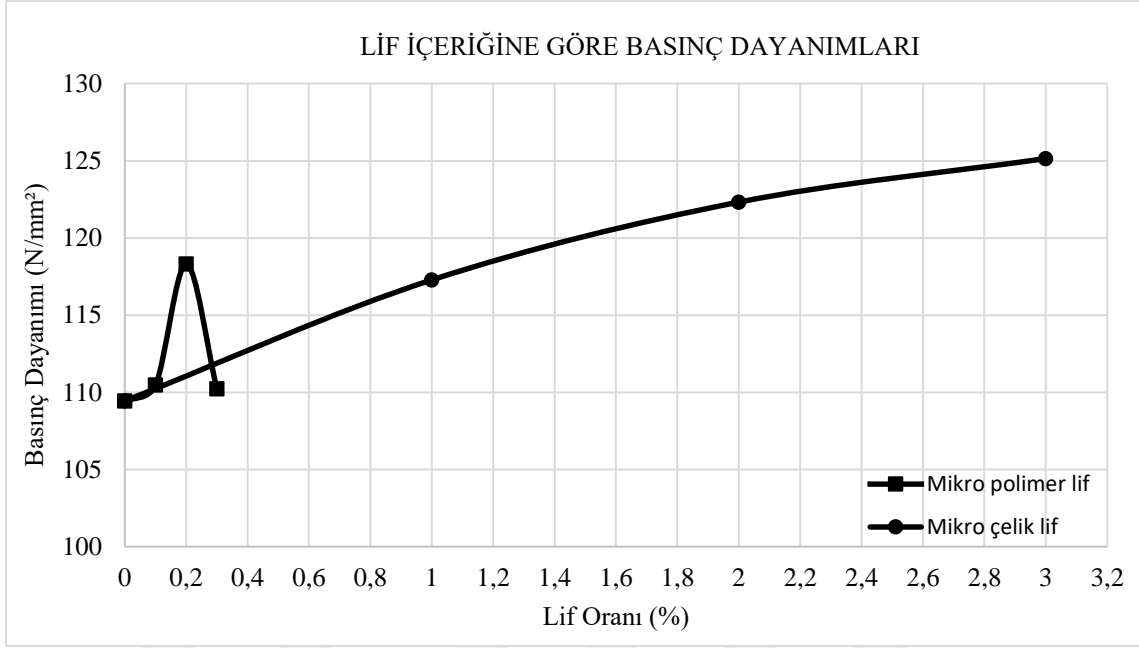
Toplam beton ağırlığının ayrı ayrı %0,1; %0,2; %0,3'ü oranında mikro polimer lif ve %1, %2, %3'ü oranında mikro çelik lif içeren; referans numunesi olarak da herhangi bir lif içermeyen karışımlardan alınan 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılan basınç deneyi sonuçları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Basınç dayanımı için hazırlanan küp numuneler, 2000 kN kapasiteli hidrolik yükleme cihazında 9 kN/saniye hızda yükleme yapılarak kırılmıştır (Resim 7.1).

Çizelge 7.1. Ortalama basınç dayanımları

Numune Kodu	Ortalama Basınç Dayanımı (N/mm ²)
NF-90	109,4
MP01-90	110,5
MP02-90	118,3
MP03-90	110,2
MS1-90	117,3
MS2-90	122,3
MS3-90	125,1



Resim 7.1. 2000 kN kapasiteli hidrolik yükleme cihazı ve kırılan küp numuneler



Şekil 7.1. Mikro polimer ve mikro çelik liflerin basınç dayanımına etkisi

Mikro çelik liflerin, lif içeriğine paralel bir şekilde basınç dayanımında artış sağladığı ancak mikro polimer liflerin betonun basınç dayanımına önemli bir etki sağlamadığı gözlemlenmiştir. Mikro polimer lifli numuneler arasında %0,1 ve %0,3 lif içeriğine sahip olanların basınç dayanımları hemen hemen birbirine eşit iken %0,2 lif içeriğine sahip olanlar en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Aynı zamanda her iki lif çeşidi de lif içermeyen referans numunelerine göre basınç dayanımında artış sağlamıştır.

7.2. Kesme DeneYleri

Deney düzeneğinde teste tabi tutulan numunenin alt tarafına bir adet, sol tarafına ve sağ tarafına üçer adet olmak üzere toplamda yedi adet LVDT kullanılmıştır. Sağ ve sol tarafa konulan LVDT'lerin birincisi alt çentiğin 5 mm üstüne, ikincisi üst çentiğin 5 mm altına ve üçüncüsü çentiklerin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra hidrolik yükleme cihazı elle kontrol edilerek numunelere gelen maksimum kesme kuvvetleri belirlenmiştir. Böylelikle numunenin yatayda ve düşeyde yük-deplasman grafikleri elde edilmiştir. Aynı zamanda çatlakların başlangıcı, gelişimi ve yörüngesi de incelenmiş olup deney elemanının nasıl bir kırılma gösterdiği tartışılmıştır.

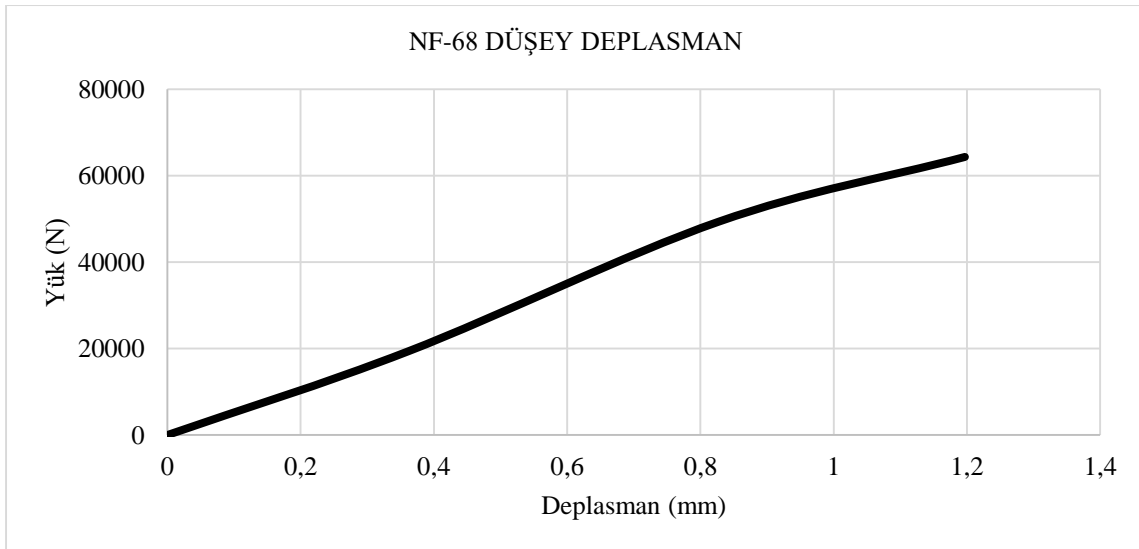
7.2.1. NF-68 numunesi

Bu numune herhangi bir lif içermemektedir ve 68° kesme açısına sahiptir. Kesme deneyi sonucunda lifsiz olmasından dolayı gevrek bir kırılma göstermiştir. Önce sol kesitte eğilme çatlağı başlamış olup kırılma yine sol kesitte gerçekleşmiştir (Resim 7.2). Hem mod I hem mod II kırılmaları meydana gelmiştir. NF-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de gösterilmiştir.

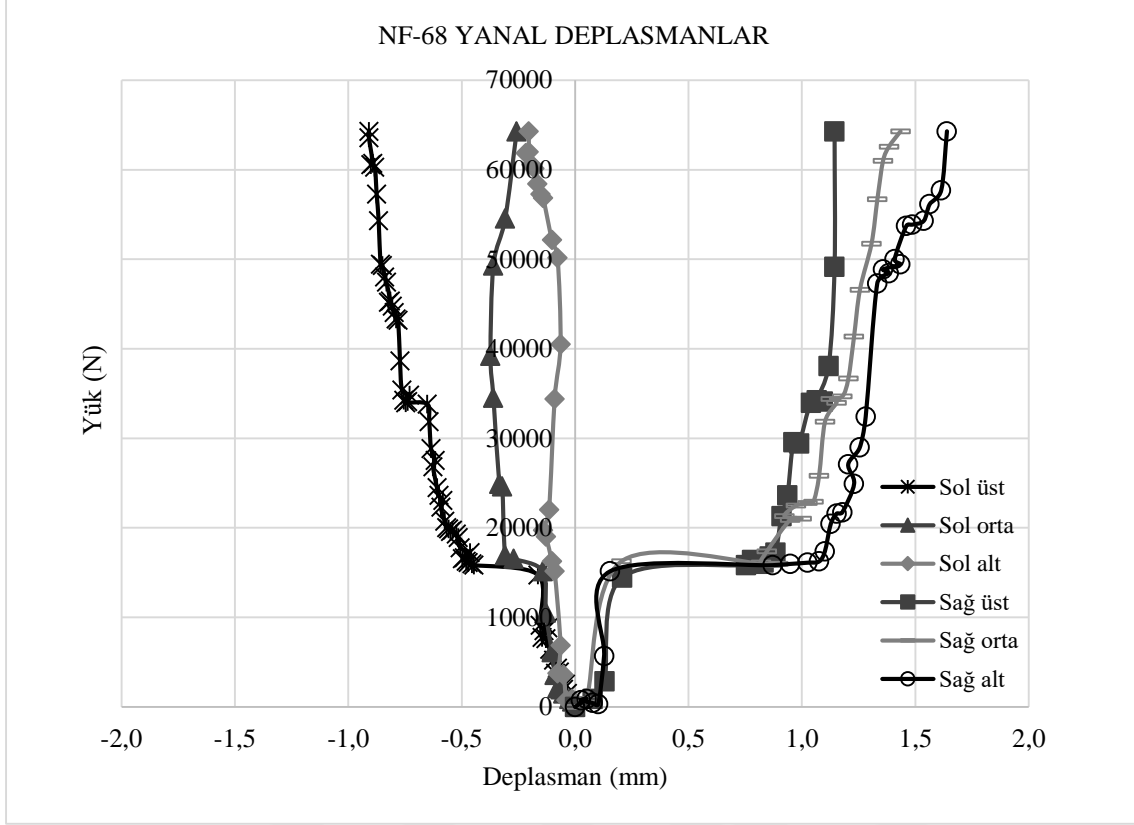


Resim 7.2. NF-68 numunesinde çatlak yörüngesi

NF-68 numunesi 64286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,197 mm deplasman yapmıştır. 15139 N değerinde ilk çatlak meydana gelmiş olup açılma başlamıştır.



Şekil 7.2. NF-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği



Şekil 7.3. NF-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikler

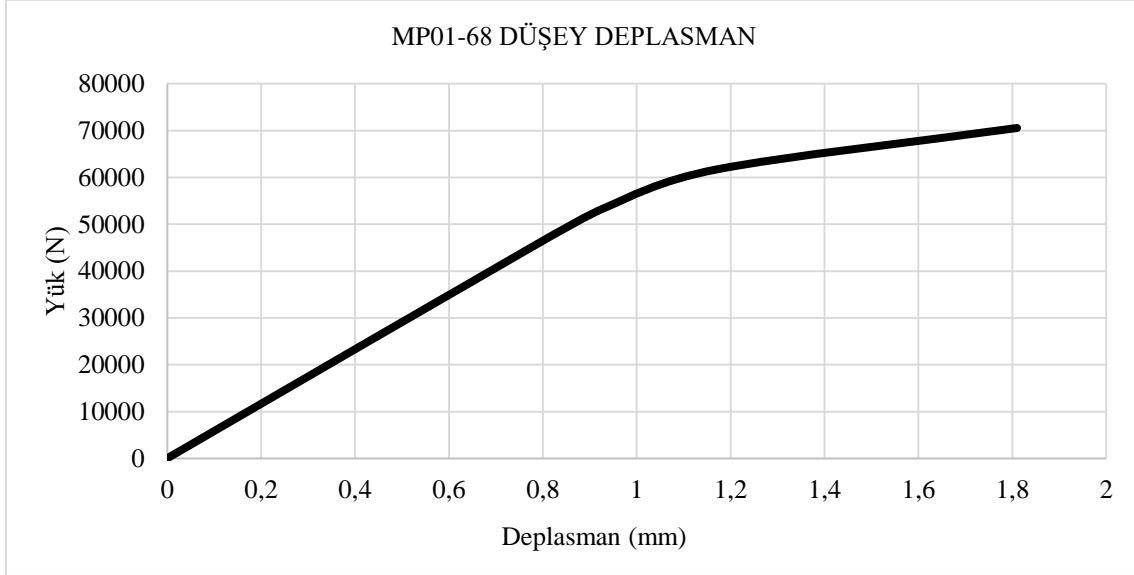
7.2.2. MP01-68 numunesi

Bu numune %0,1 mikro polimer lif içeriğine ve 68° kesme açısına sahip olup kesme deneyi sonucunda kesme çatlakları her iki çentikte de gelişmiş olup numunede mod I ve mod II kırılmaları gözlemlenmiştir. Ancak göçme Resim 7.3’de görüldüğü gibi sol çentikten ilerleyen çatlaklarla gerçekleşmiştir.

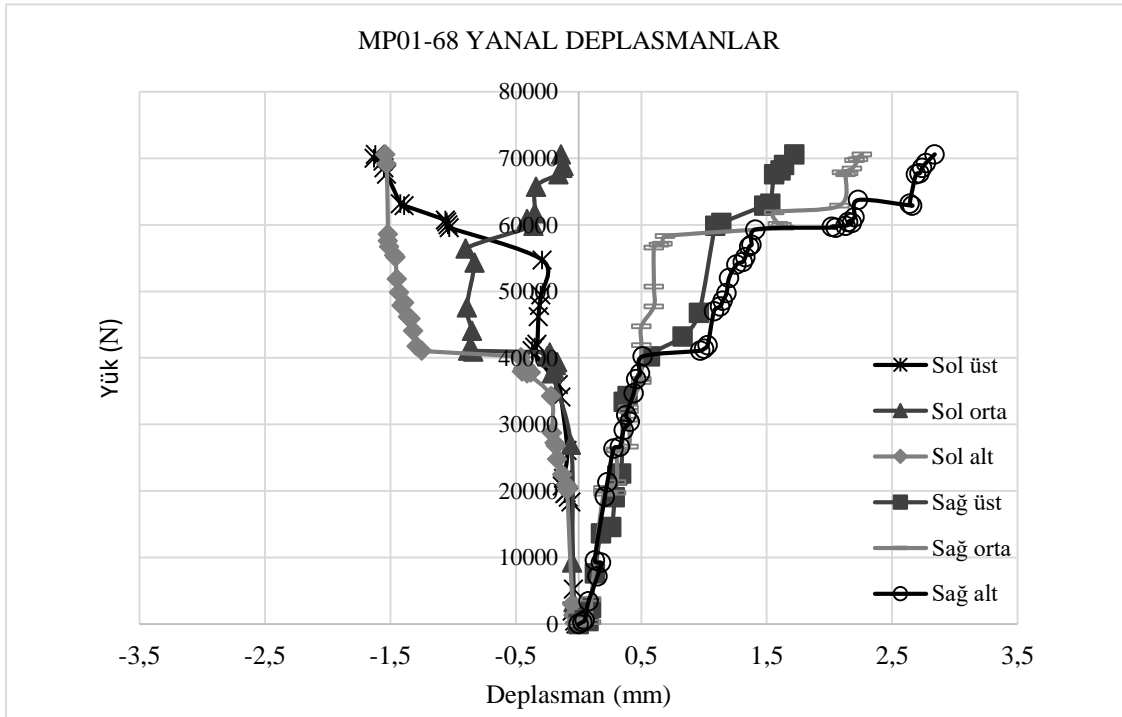


Resim 7.3. MP01-68 numunesinde çatlak yörüngesi

MP01-68 numunesi 70571 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,81 mm deplasman yapmıştır. Yaklaşık 60000 N sonrasında düşeyde ve yatayda yaptığı yer değiştirmeler artış göstermiş olup numune açılmaya zorlanmıştır. MP01-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.4 ve Şekil 7.5’de gösterilmiştir.



Şekil 7.4. MP01-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği



Şekil 7.5. MP01-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

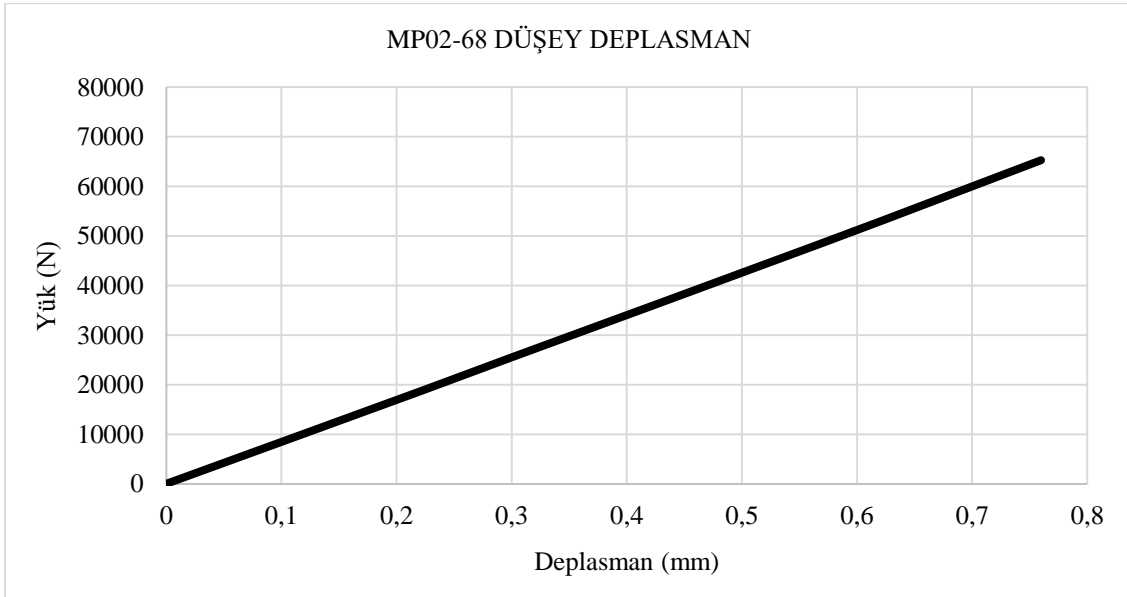
7.2.3. MP02-68 numunesi

Bu numune %0,2 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 68° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Mesnetlerdeki yatay kuvvetler sol çentikten ilk gelişen eğik çatlakın ilerlemesini önlemiştir. Deney sonucunda numuneyi kıran kesme çatlakları Resim 7.4'deki gibi sol alt mesnetten başlayıp üst kısımda yükün uygulandığı noktaya doğru uzanmıştır.

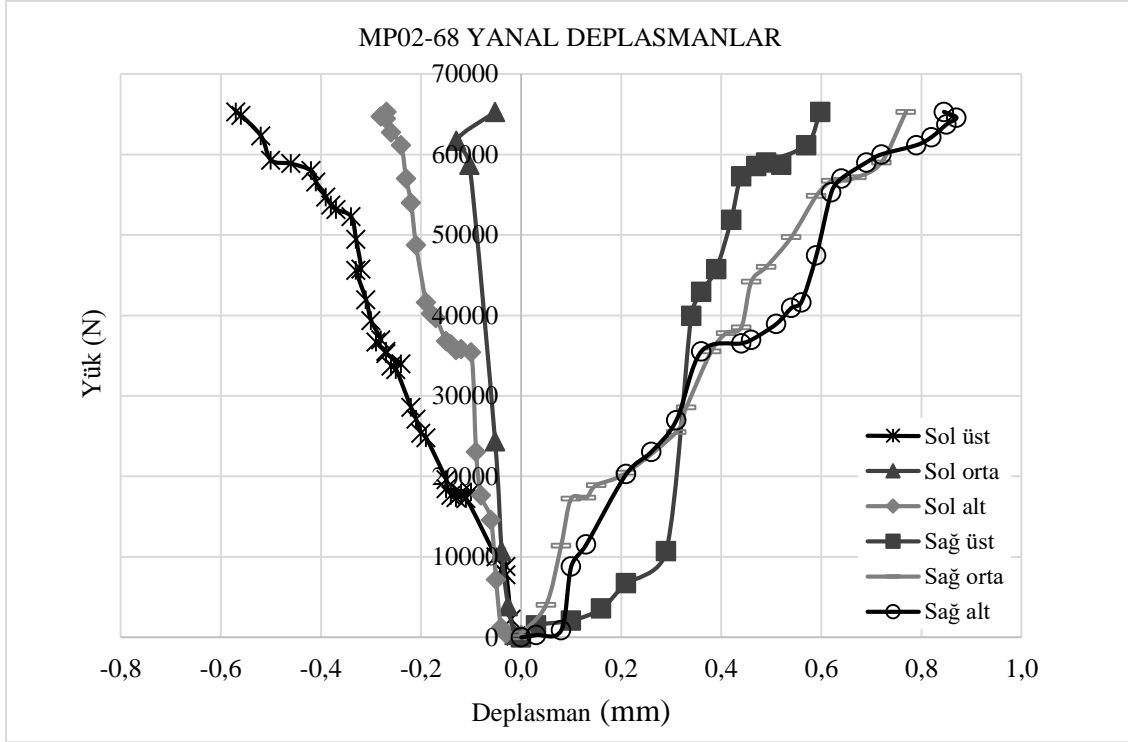


Resim 7.4. MP02-68 numunesinde çatlak yörüngesi

MP02-68 numunesi 65286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,76 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de gösterilmiştir.



Şekil 7.6. MP02-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği



Şekil 7.7. MP02-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

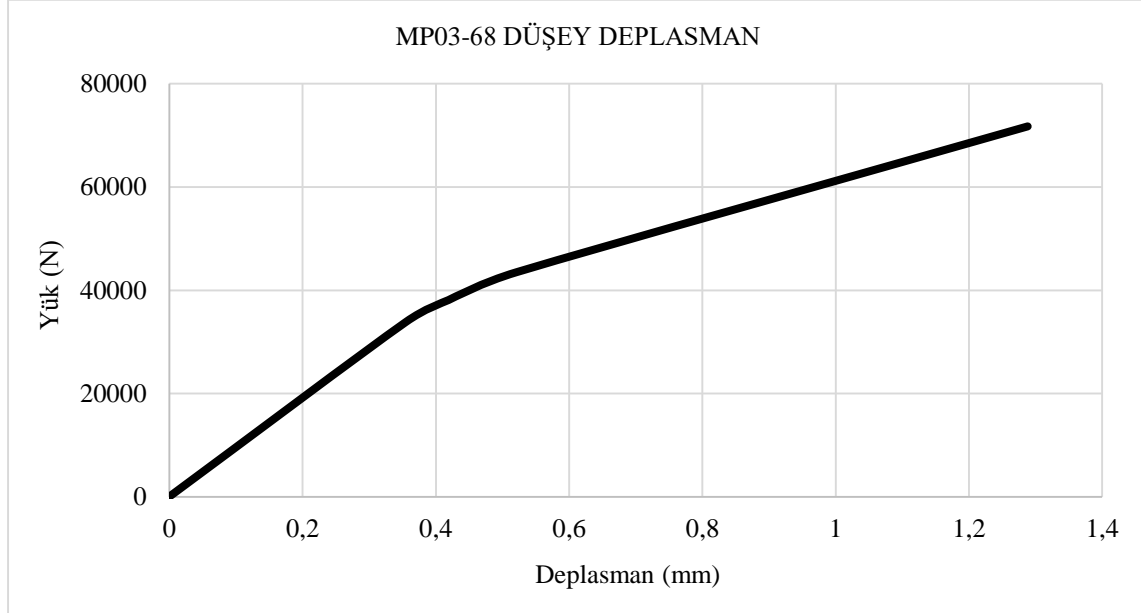
7.2.4. MP03-68 numunesi

Bu numune %0,3 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 68° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MP03-68 numunesinde çok belirgin bir kesme çatlak elde edilememiştir. Kırılma mod I durumuna yaklaşmış ve beliren eğilme çatlak sağ çentiği seçmiştir. Çatlak yayılması dallanarak devam etmiştir (Resim 7.5).

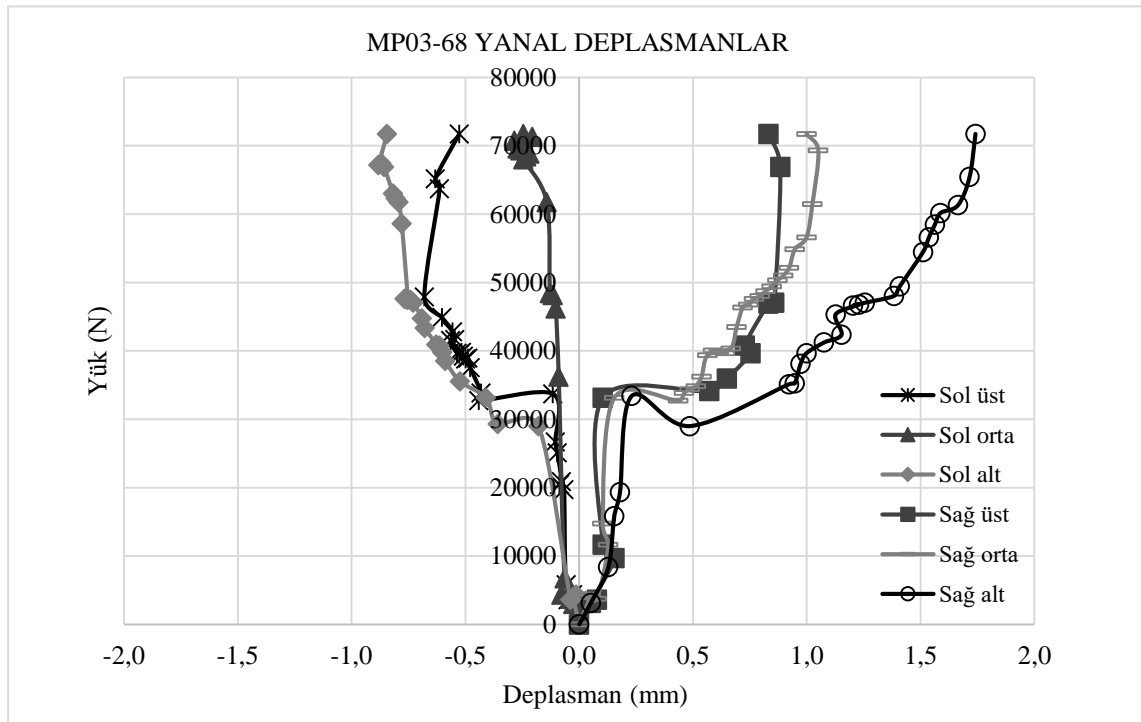


Resim 7.5. MP03-68 numunesinde çatlak yörüngesi

Sağ çentikler arasında nihai çekme dayanımı aşılmış ve Mod I (açılma modu) baskın gelmiştir. Aynı zamanda üst çentikler arasında ezilme gözlemlenmiştir. MP03-68 numunesi 71714 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,288 mm deplasman yapmıştır. Deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'da gösterilmiştir.



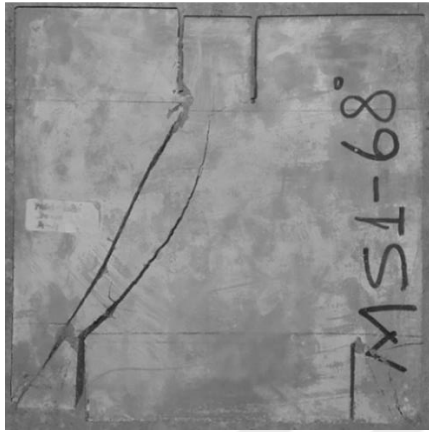
Şekil 7.8. MP03-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği



Şekil 7.9. MP03-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

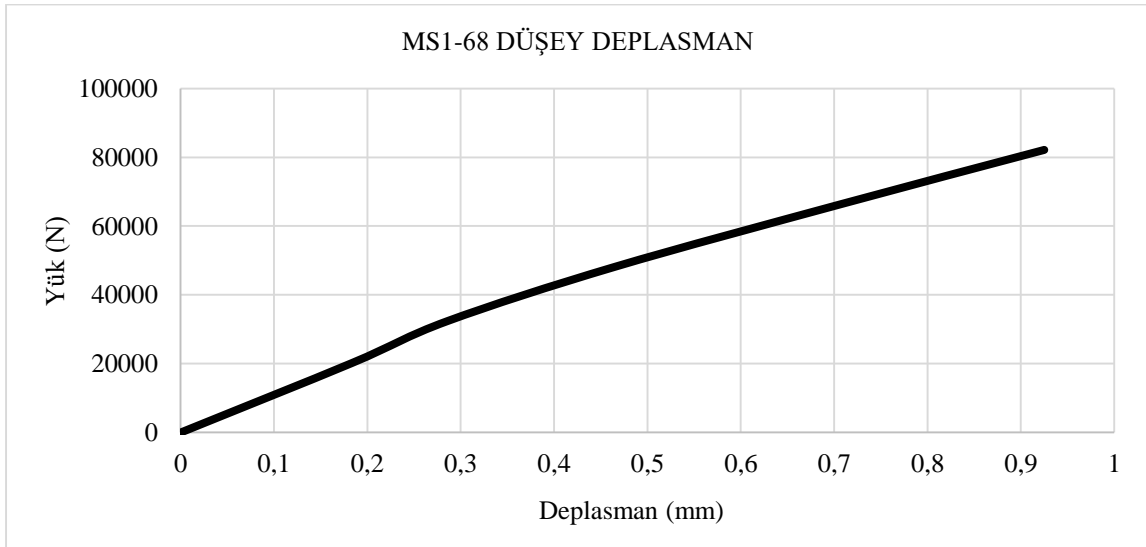
7.2.5. MS1-68 numunesi

Bu numune %1 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 68° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MS1-68 numunesinde çatlaklar Resim 7.6'da görüldüğü gibi sol çentikler arasında ve zıt yönlü kuvvetlere doğru gelişmiştir. Çentiklerden başlayan çatlaklar mesnetlerdeki yatay kuvvetler tarafından tam olarak önlenemediği için bu çatlaklar ilerlemiş ve deney elemanında mod I-II kırılmaları gerçekleşmiştir.

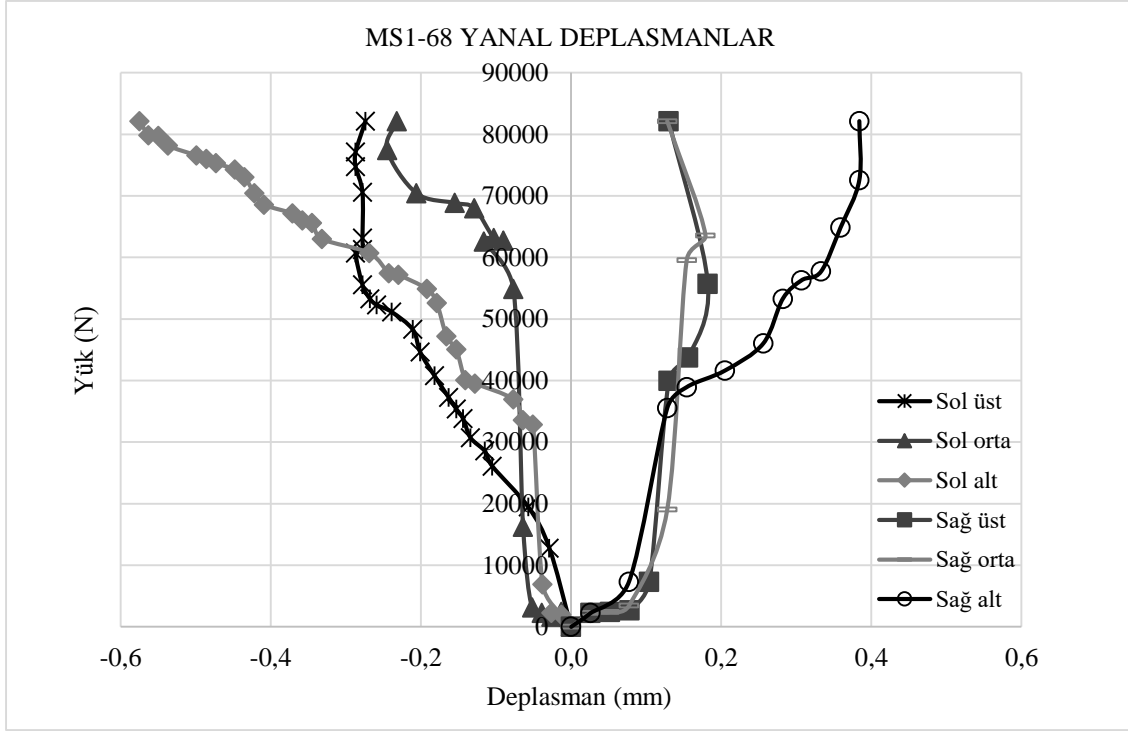


Resim 7.6. MS1-68 numunesinde çatlak yörüngesi

MS1-68 numunesi 82143 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,925 mm deplasman yapmıştır. İlk çatlak yaklaşık 39000 N civarlarında meydana gelmiştir. MS1-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de gösterilmiştir.



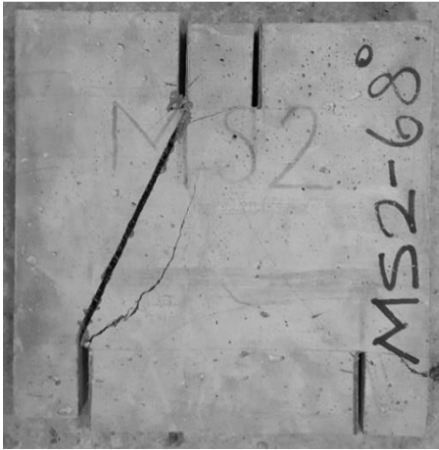
Şekil 7.10. MS1-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği



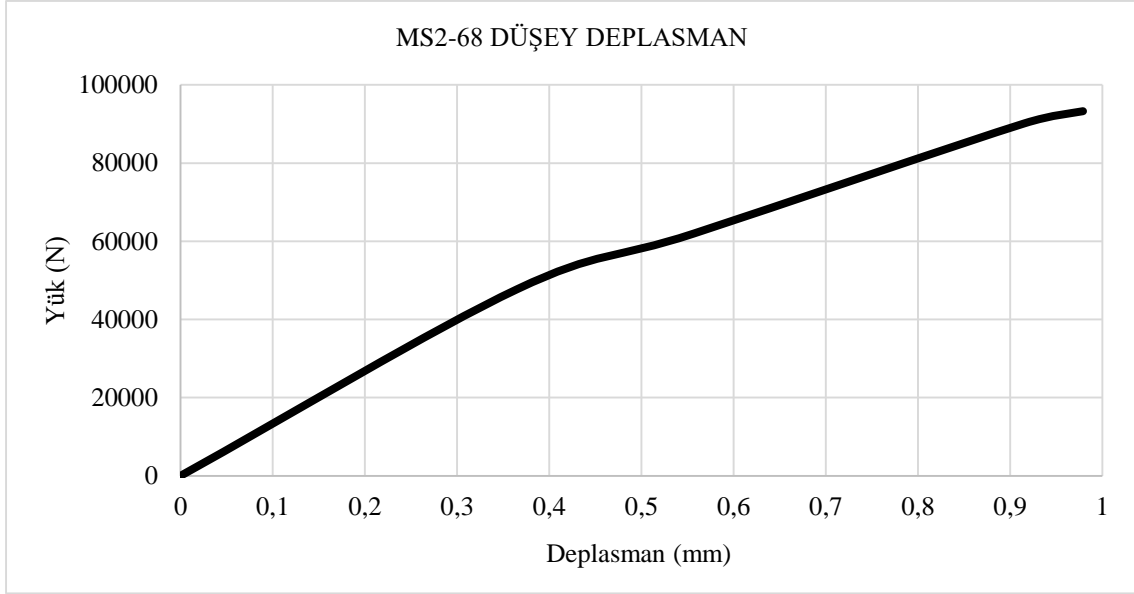
Şekil 7.11. MS1-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.6. MS2-68 numunesi

Bu numune %2 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 68° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MS2-68 numunesinde yine çatlaklar sol kesitte meydana gelmiştir. Mesnetlerdeki yatay kuvvetler sol çentikten ilk gelişen eğik çatlağın ilerlemesini önlemiştir. İlk önce eğilme çatlağı oluşmuş ancak kesme dayanımının aşılmasından dolayı betonda göçme kesme kırılmasından gerçekleşmiştir (Resim 7.7).

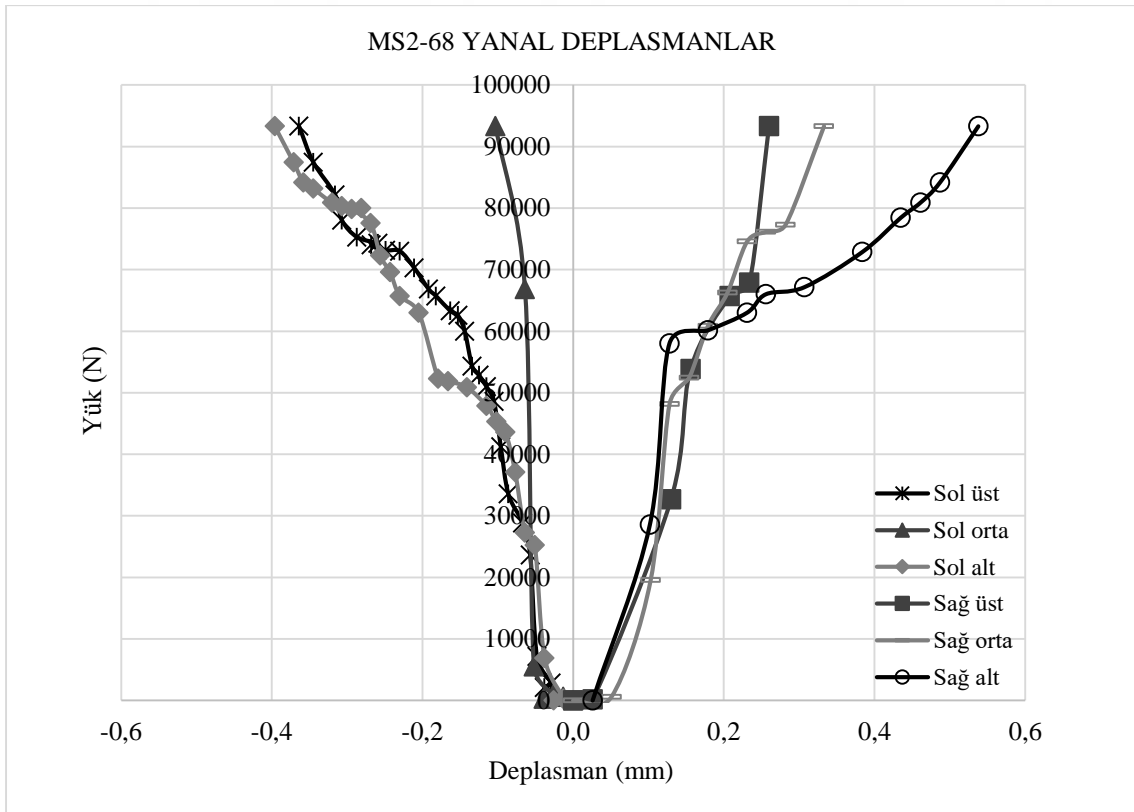


Resim 7.7. MS2-68 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.12. MS2-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS2-68 numunesi 93286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,979 mm deplasman yapmıştır. MS2-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.12 ve Şekil 7.13'de gösterilmiştir.



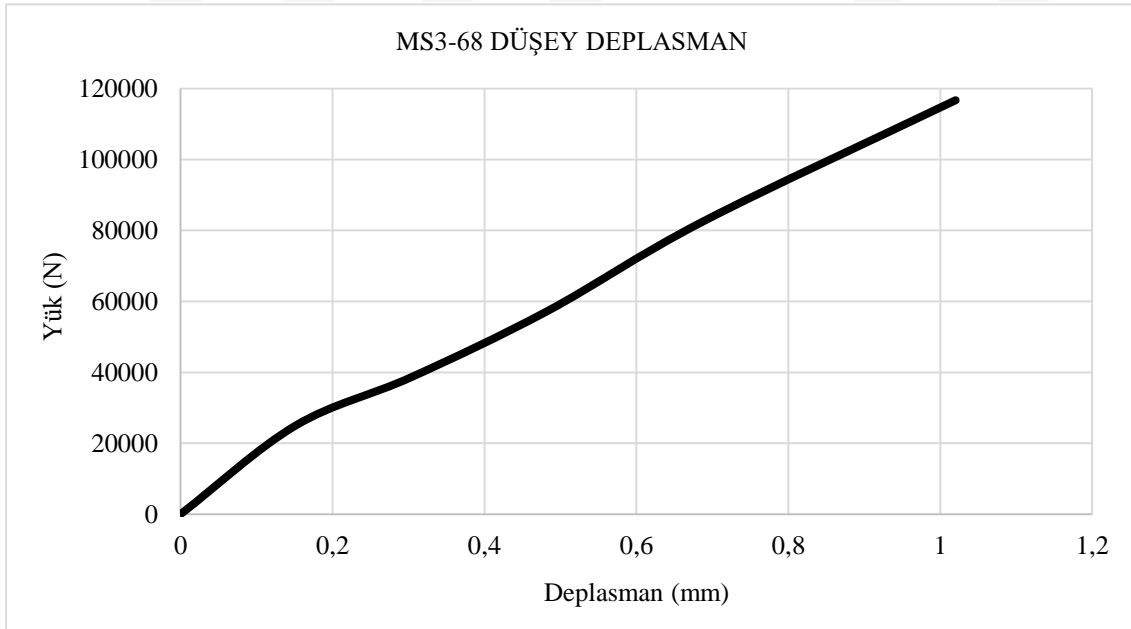
Şekil 7.13. MS2-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.7. MS3-68 numunesi

Bu numune %3 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 68° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Sol alt çentikte çok belirsiz bir çatlak başlamış olup mesnetlerdeki yatay kuvvetler tarafından durdurulmuştur. MS3-68 numunesinde kesme kırılması yine sol çentikler arasında ani bir şekilde gelişen kırılmayla gerçekleşmiştir.



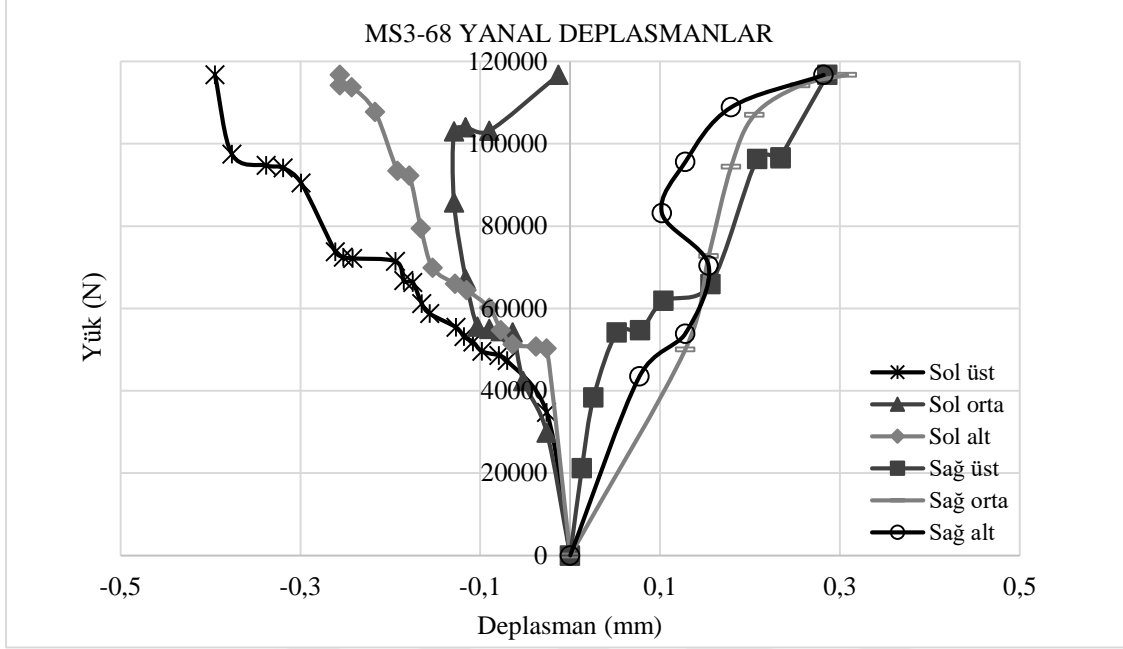
Resim 7.8. MS3-68 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.14. MS3-68 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS3-68 numunesi 116717 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,02 mm deplasman yapmıştır. MS3-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.14 ve Şekil

7.15’de gösterilmiştir. Numunedeki önemli zorlamalar yaklaşık 70000 N civarından sonra gerçekleşmiştir.



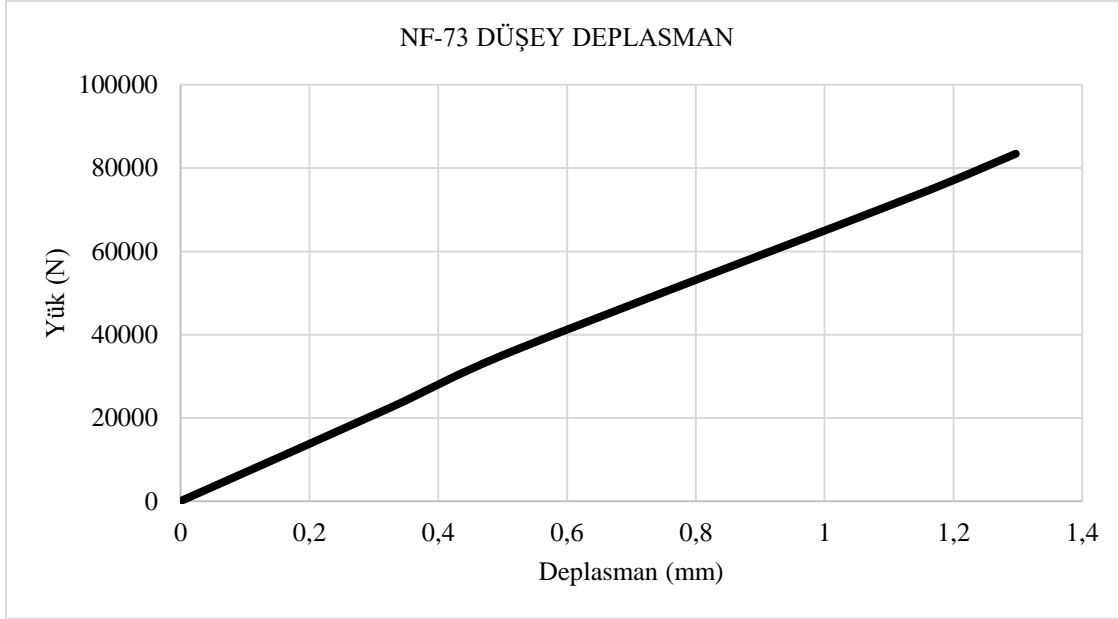
Şekil 7.15. MS3-68 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.8. NF-73 numunesi

Bu numune herhangi bir lif içermemekte ve 73° kesme açısına sahiptir. Kesme deneyi sonucunda numune sol çentikten gelişen eğilme çatlakları ile birlikte sol mesnetten etkileyen yüke ve üstteki statik kuvvetin uygulandığı yöne doğru uzanarak Resim 7.9’daki gibi parçalanmış bir kırılma göstermiştir. Beton yüksek dayanımlı ve lif takviyesiz olduğundan dolayı oldukça gevrek bir davranış izlemiştir.

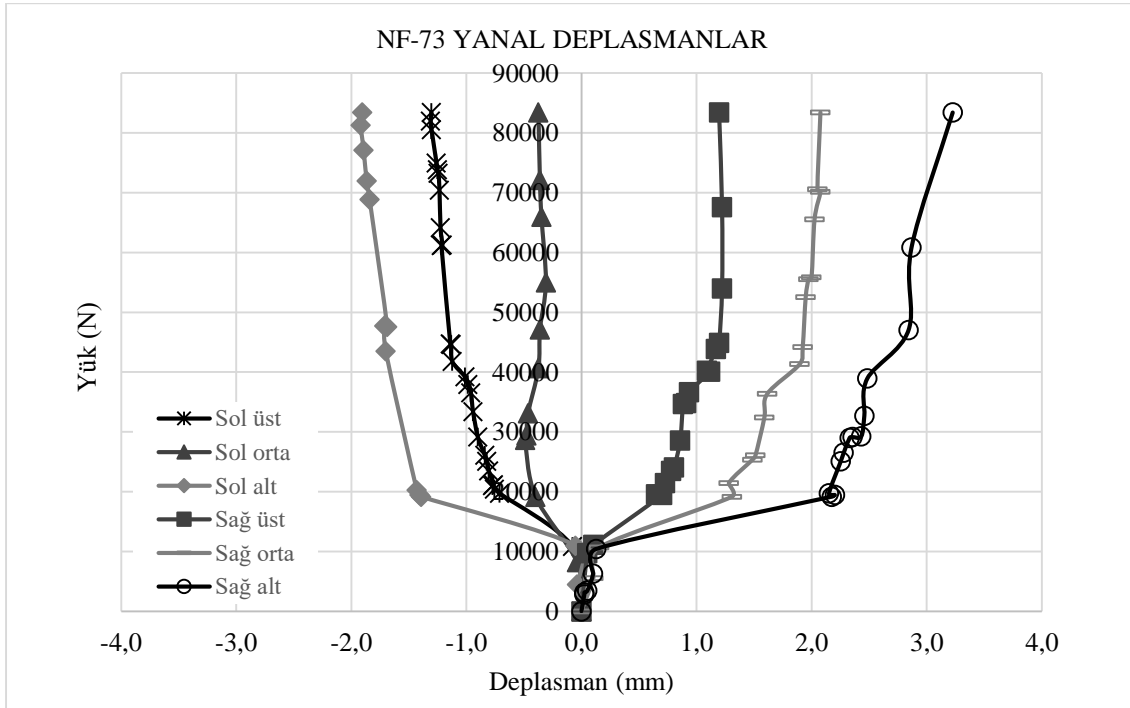


Resim 7.9. NF-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.16. NF-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

NF-73 numunesi 83429 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,297 mm deplasman yapmıştır. NF-68 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.16 ve Şekil 7.17'de gösterilmiştir. Yaklaşık 10000 N seviyelerde önemli yanıl deplasmanlar yapmaya başlamış olup artan yükte birlikte açılma da artmıştır.



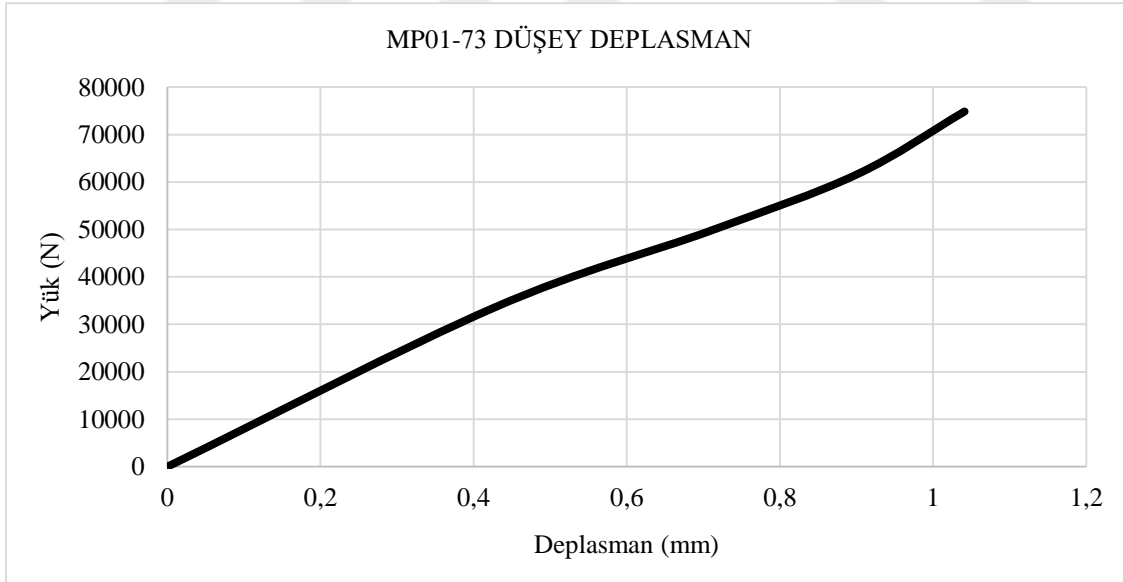
Şekil 7.17. NF-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.9. MP01-73 numunesi

Bu numune %0,1 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda ilk çatlak eğilme çatlakları olup sol kesitte şekillenmiştir. Numuneyi kıran kesme çatlakları ise Resim 7.10'deki gibi sol alt mesnetten başlayıp üstte yükün uygulandığı noktaya doğru uzanmıştır.

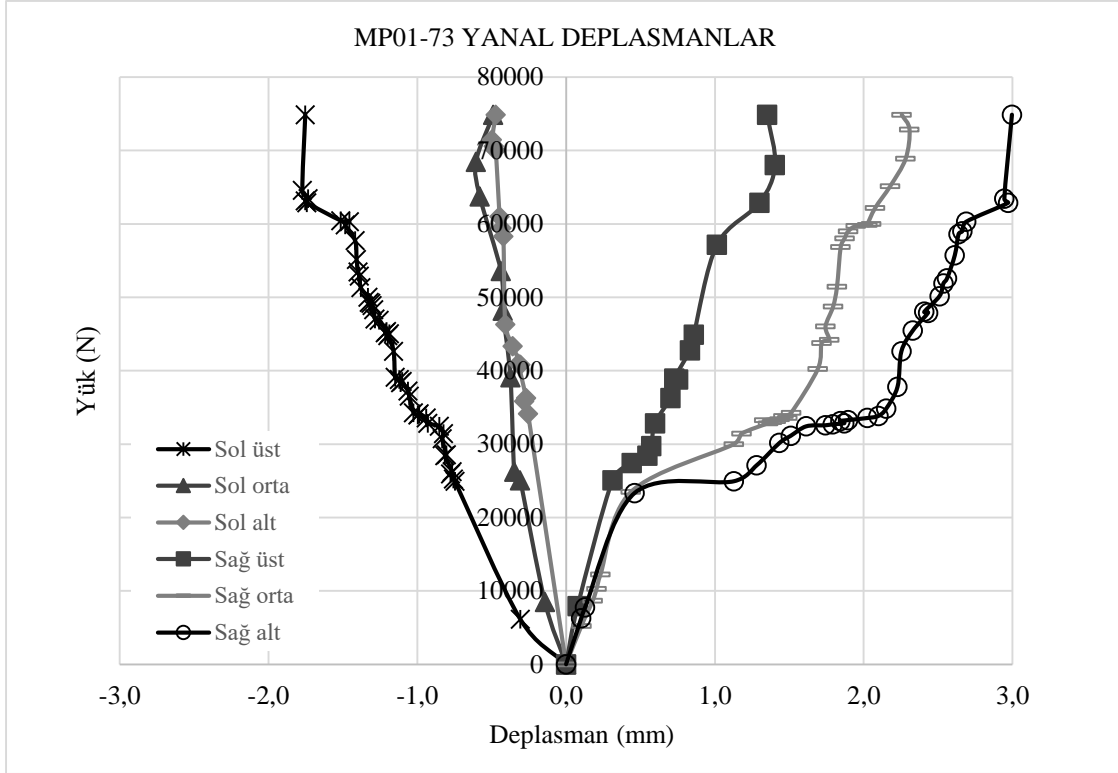


Resim 7.10. MP01-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.18. MP01-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP01-73 numunesi 74857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,041 mm deplasman yapmıştır. MP01-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da gösterilmiştir.



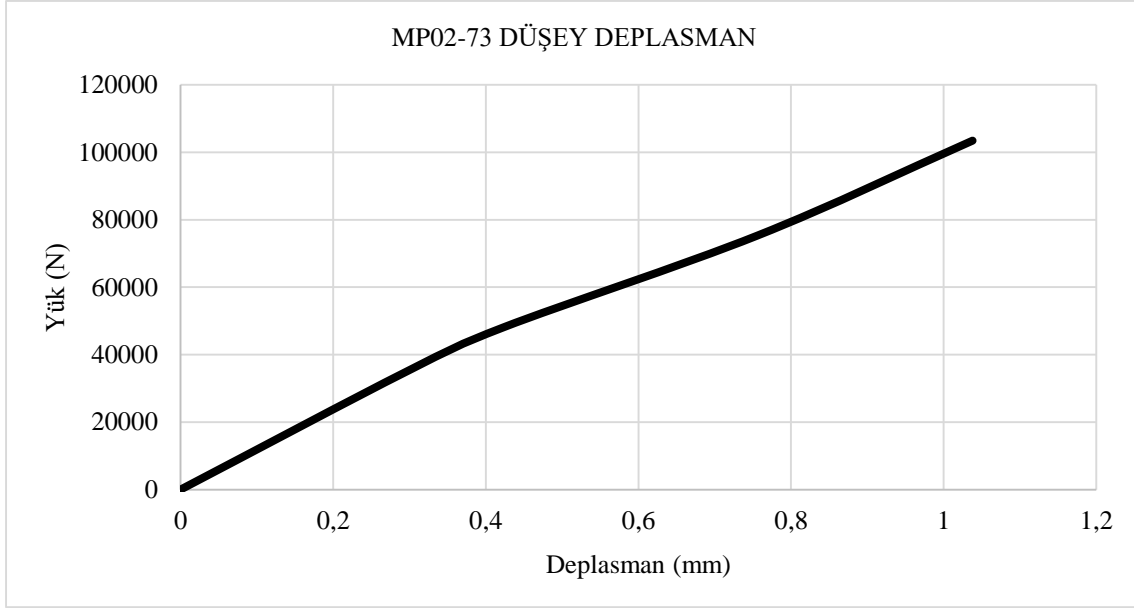
Şekil 7.19. MP01-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.10. MP02-73 numunesi

Bu numune %0,2 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlaklar sol kesitte şekillenmiştir. Kırılma zıt yönlü kuvvetlere arasında oluşmuştur. İlk çatlak eğilme çatlaklığı olup sol kesitte şekillenmiştir. Numuneyi kıran kesme çatlaklığı ise Resim 7.11'deki gibi sol alt mesnetten başlayıp üstte yükün uygulandığı noktaya doğru uzanmıştır.

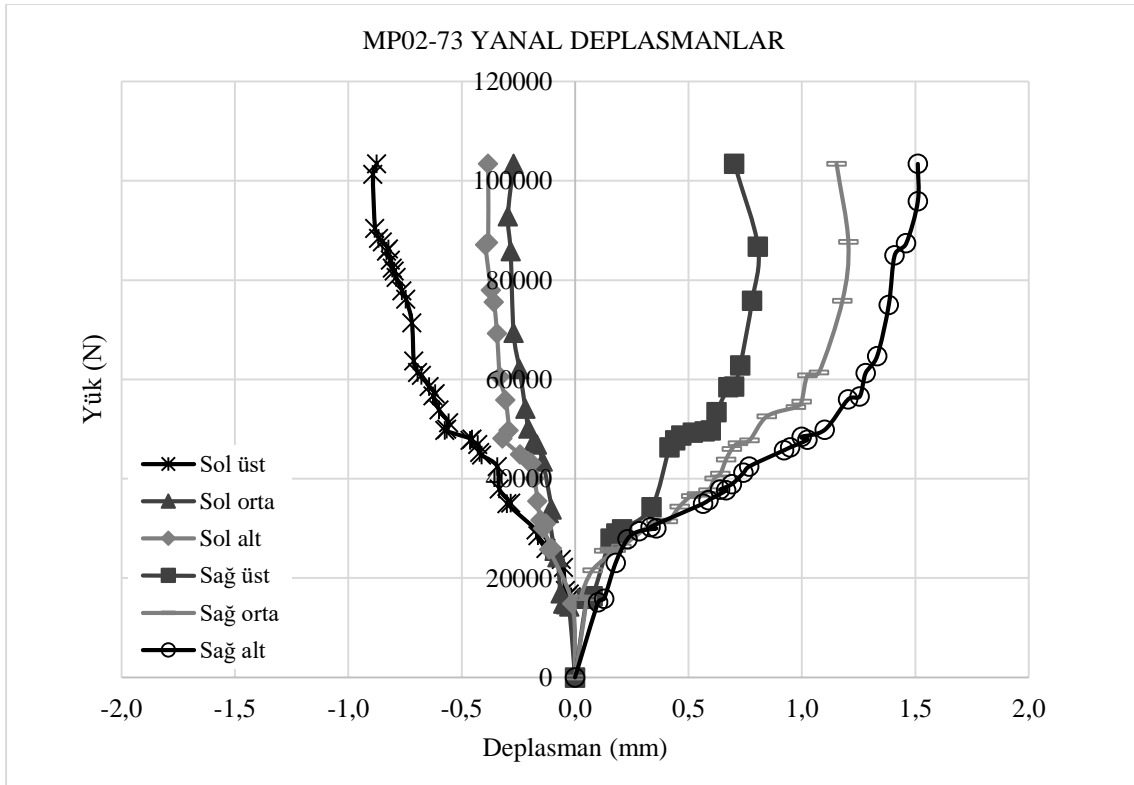


Resim 7.11. MP02-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.20. MP02-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP02-73 numunesi 103429 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,038 mm deplasman yapmıştır. MP02-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'da gösterilmiştir.



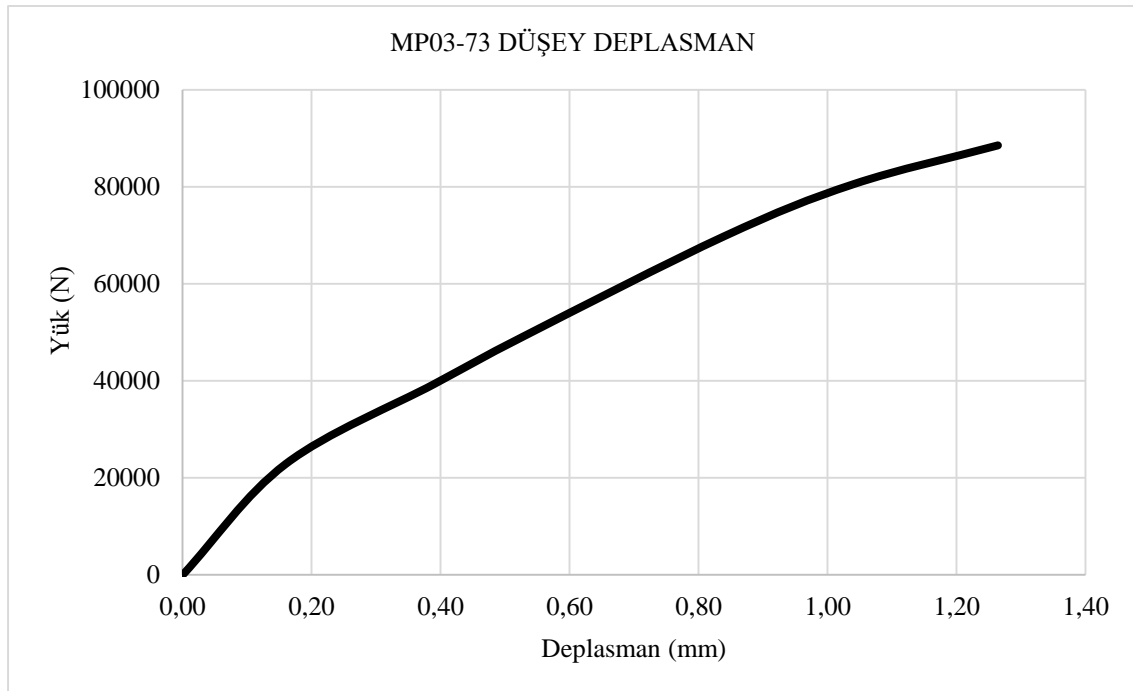
Şekil 7.21. MP02-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.11. MP03-73 numunesi

Bu numune %0,3 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda en çok zorlanan kesit sağ taraf olmuştur. MP03-73 numunesinde çatlaklar Resim 7.12'deki gibi sağ çentikler arasında ve zıt yönlü kuvvetlere doğru gelişmiştir. Çentiklerden başlayan çatlaklar mesnetlerdeki yatay kuvvetler tarafından tam olarak önlenemediği için bu çatlaklar ilerlemiş ve deney elemanında mod I-II kırılmaları gerçekleşmiştir.

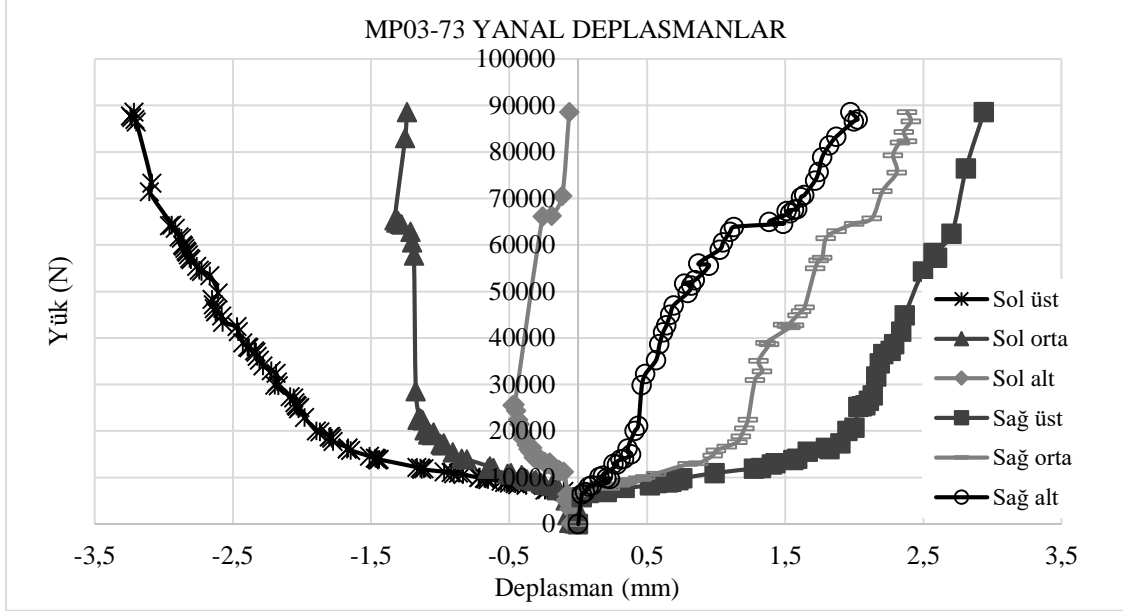


Resim 7.12. MP03-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.22. MP03-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP03-73 numunesi 88571 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,26 mm deplasman yapmıştır. MP03-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.22 ve Şekil 7.23'de gösterilmiştir. Deney elemanı kırılmadan önce büyük yanal deplasmanlar yapmıştır.



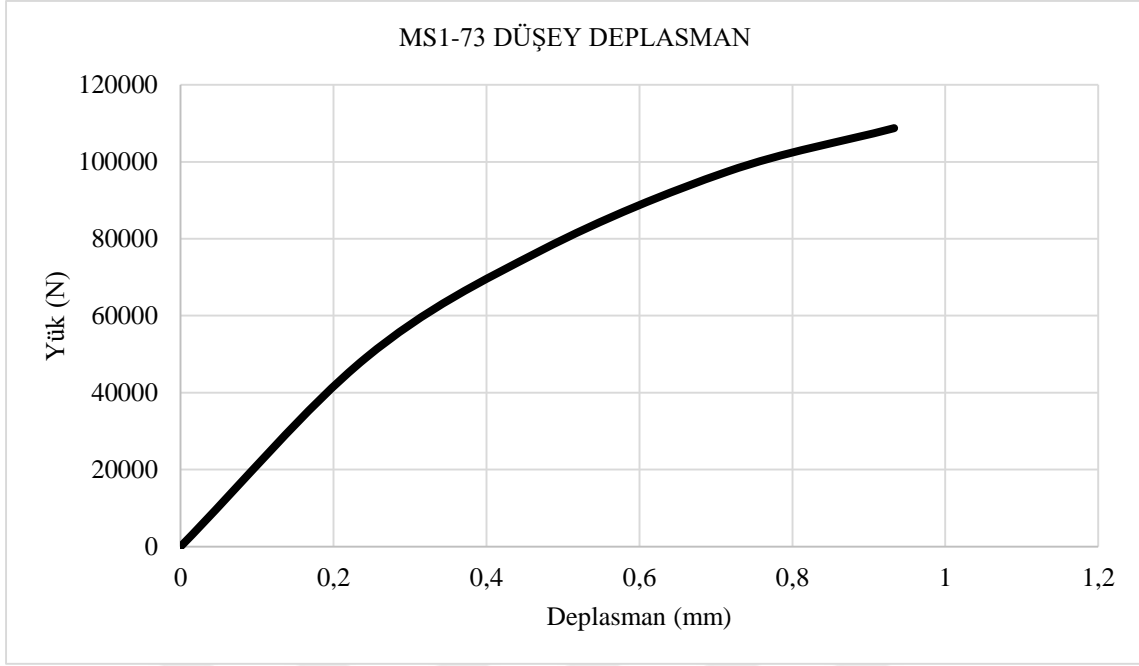
Şekil 7.23. MP03-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.12. MS1-73 numunesi

Bu numune %1 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MS1-73 numunesinde çatlaklar sol kesitte meydana gelmiştir (Resim 7.13). Mesnetlerdeki yatay kuvvetler sol çentikten ilk gelişen eğik çatlağın ilerlemesini önlemiştir. İlk önce eğilme çatlağı oluşmuş ancak kesme dayanımının aşılmasından dolayı betonda göçme, kesme kırılmasıyla gerçekleşmiştir.

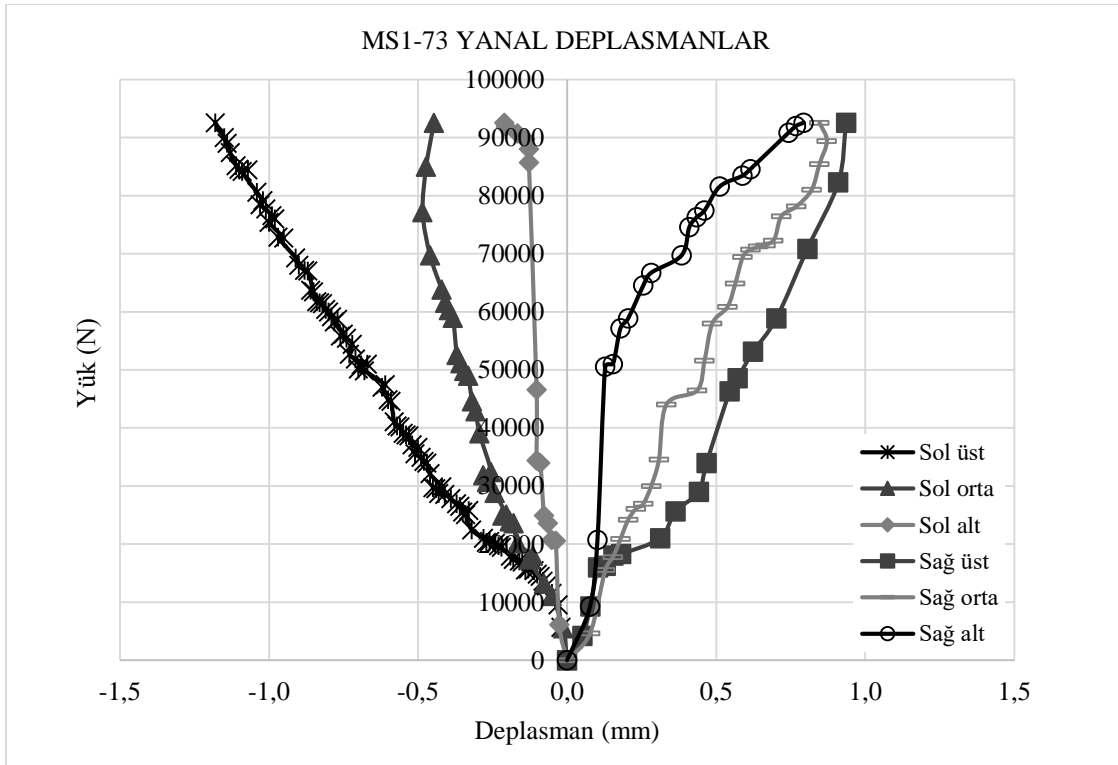


Resim 7.13. MS1-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.24. MS1-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS1-73 numunesi 108714 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,933 mm deplasman yapmıştır. MS1-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.24 ve Şekil 7.25’de gösterilmiştir.



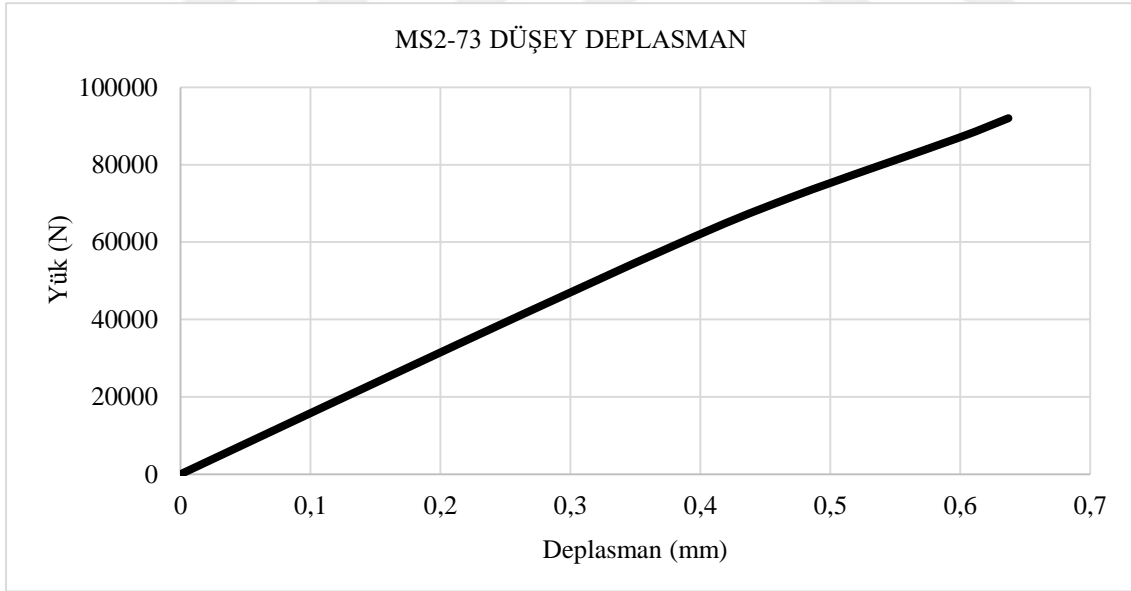
Şekil 7.25. MS1-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.13. MS2-73 numunesi

Bu numune %2 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda sol taraf kesme kırılmasına zorlanırken üst çentikler arasından yükün uygulandığı yönde ezilme meydana gelmiş ve deney elemanı stabilitesini kaybetmiştir (Resim 7.14).

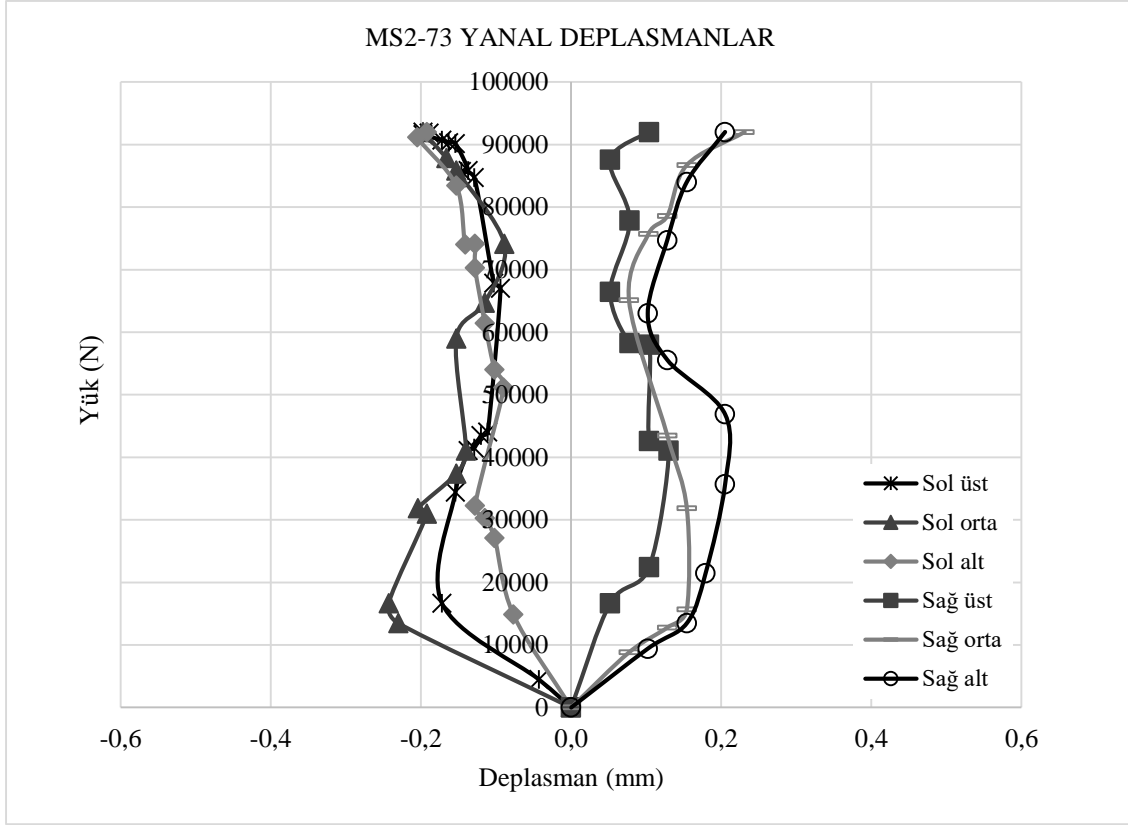


Resim 7.14. MS2-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.26. MS2-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS2-73 numunesi 92000 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,637 mm deplasman yapmıştır. MS2-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.26 ve Şekil 7.27'de gösterilmiştir.



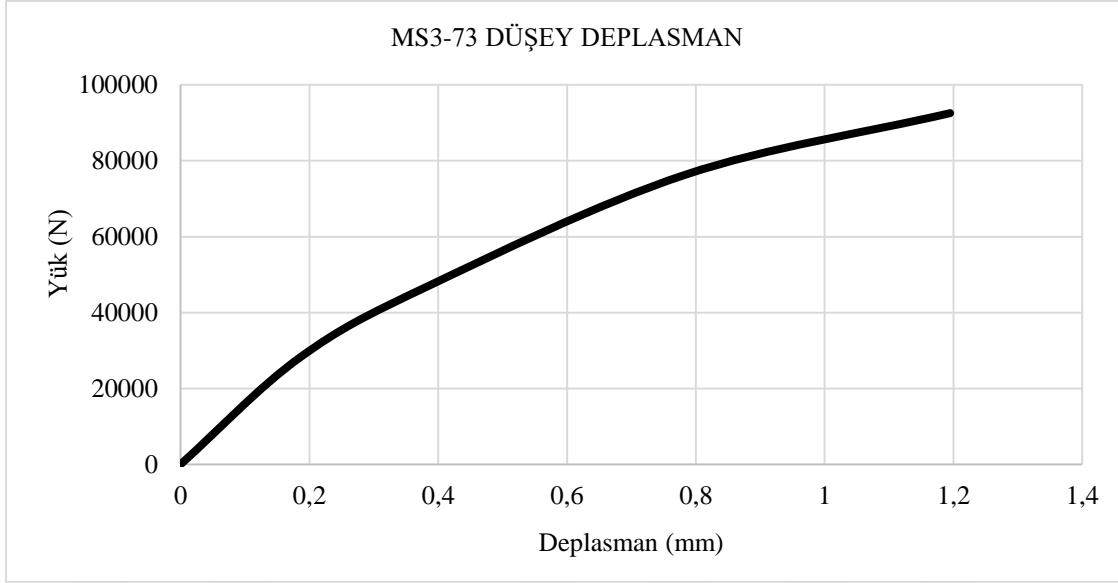
Şekil 7.27. MS2-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.14. MS3-73 numunesi

Bu numune %3 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 73° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MS3-73 numunesinde kesme kırılması yine sol çentikler arasında ani bir şekilde gelişen kesme kırılmasıyla gerçekleşmiştir (Resim 7.15). Yani sadece mod II (kayma modu) gözlemlenmiştir.

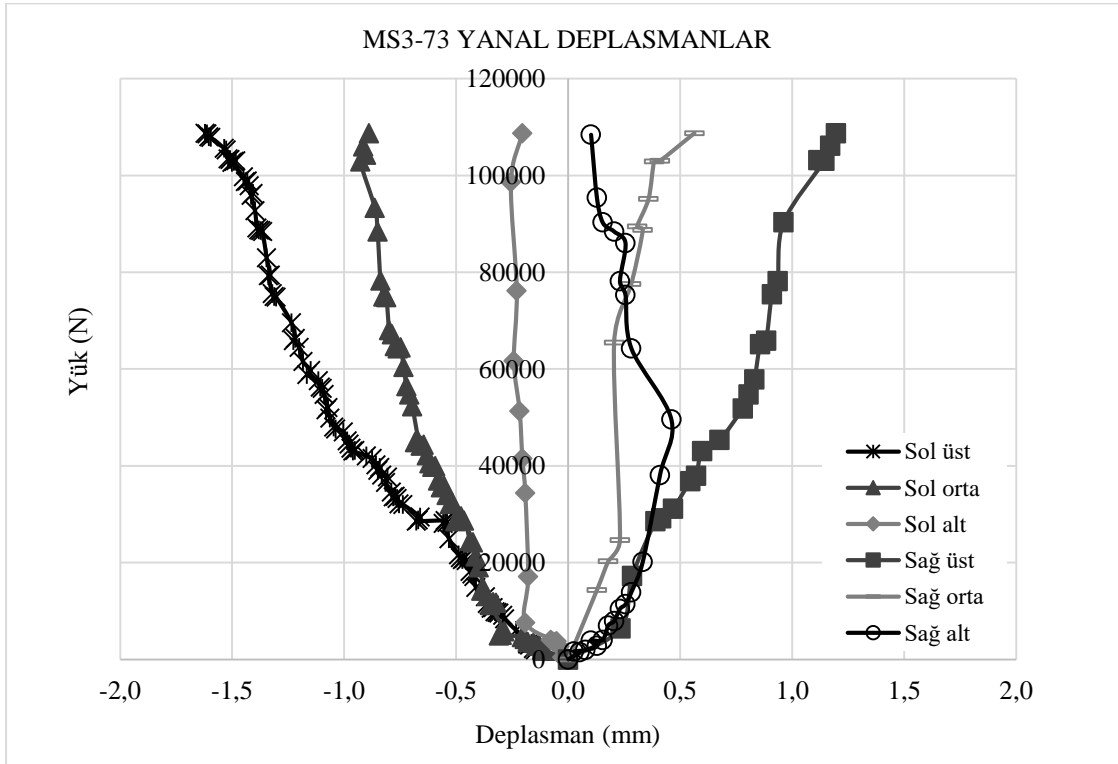


Resim 7.15. MS3-73 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.28. MS3-73 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS3-73 numunesi 92571 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,195 mm deplasman yapmıştır. MS3-73 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.28 ve Şekil 7.29'da gösterilmiştir. Yaklaşık olarak 25000 N değerinden sonra çatlak ilerlemesi hızlı bir hal almıştır.



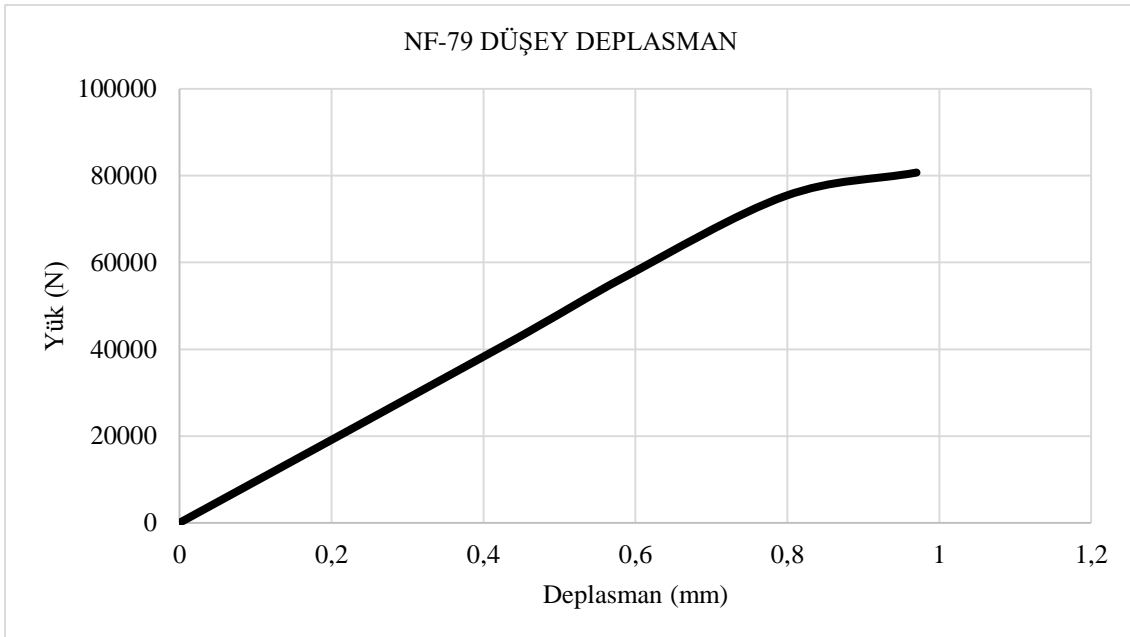
Şekil 7.29. MS3-73 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.15. NF-79 numunesi

Bu numune herhangi bir lif içeriğine sahip olmayıp 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda lifsiz olmasından dolayı gevrek bir kırılma göstermiştir. Deney sonucunda ilk çatlak eğilme çatlakları olup sol kesitte şekillenmiştir. Numuneyi kıran kesme çatlakları Resim 7.16'daki gibi sol alt mesnetten başlayıp üstte yükün uygulandığı noktaya doğru uzanmıştır. Beton yüksek dayanımlı ve lif takviyesiz olduğundan oldukça gevreklerdir.

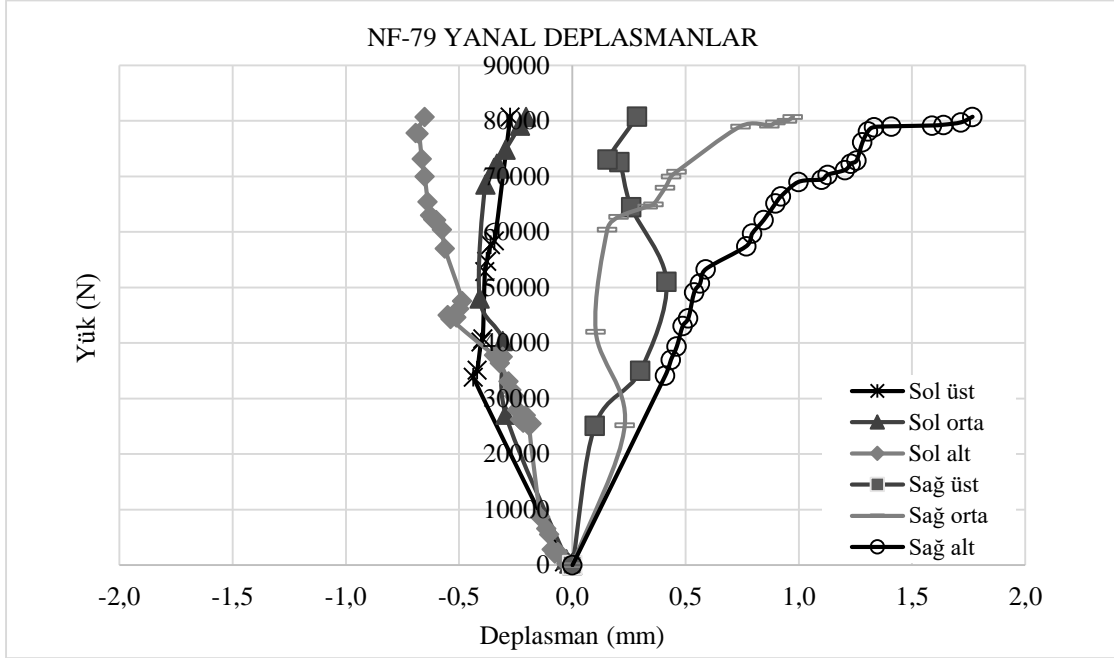


Resim 7.16. NF-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.30. NF-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

NF-79 numunesi 80714 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,97 mm deplasman yapmıştır. NF-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.30 ve Şekil 7.31'de gösterilmiştir.



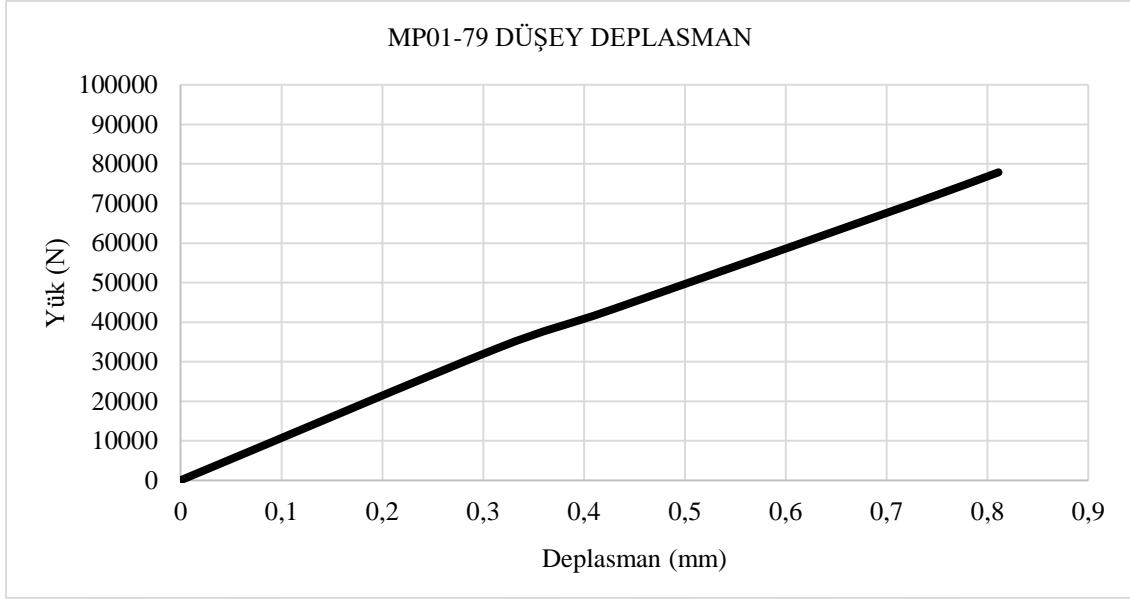
Şekil 7.31. NF-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.16. MP01-79 numunesi

Bu numune %0,1 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda sol alt çentikten eğilme çatlakları başlamış olup kırılma sol çentiklerde zıt yönü kuvvetlere yönelerek gerçekleşmiştir (Resim 7.17).

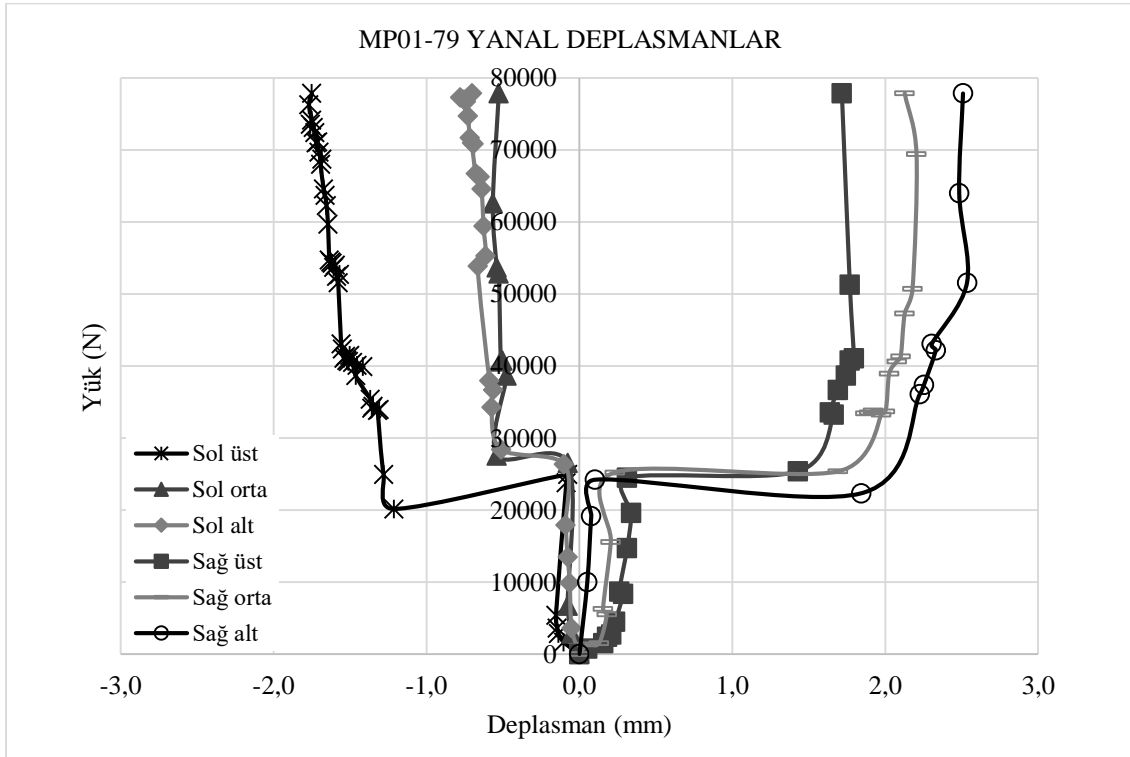


Resim 7.17. MP01-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.32. MP01-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP01-79 numunesi 77857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,811 mm deplasman yapmıştır. MP01-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.32 ve Şekil 7.33'de gösterilmiştir. Deney elemanı yaklaşık 26000 N değerinden sonra büyük yatay deplasmanlar yaparak kırılmıştır.



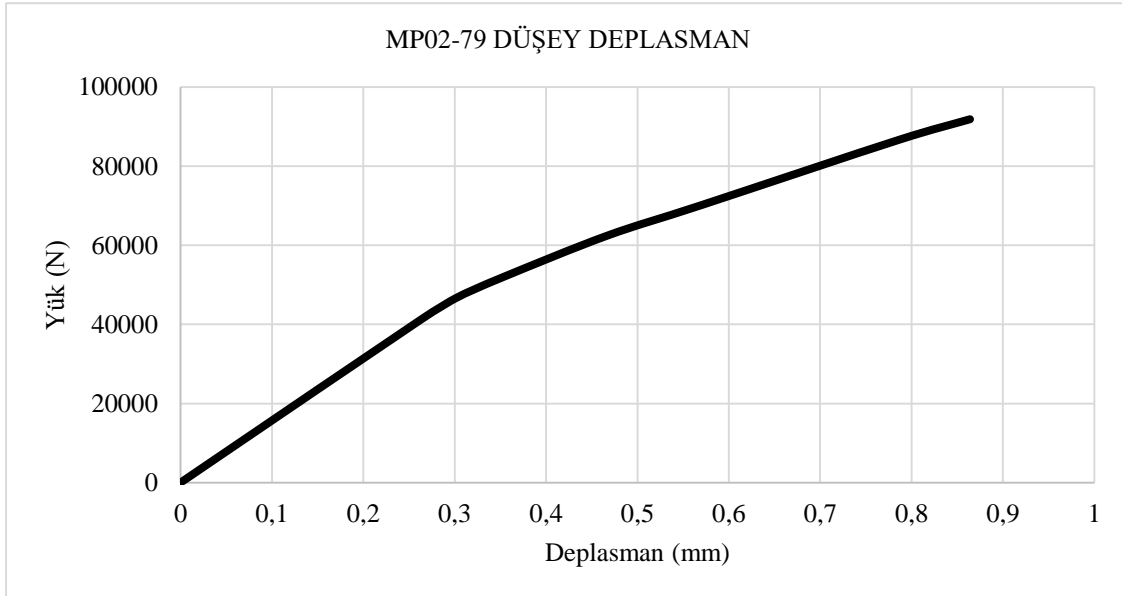
Şekil 7.33. MP01-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.17. MP02-79 numunesi

Bu numune %0,2 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda sağ çentikte eğilme çatlak oluşmuş ancak bu çatlak mesnetlerdeki yatay engellemeden dolayı ilerleyememiş ve kırılma sol tarafta zıt yönlü kuvvetlere yönelerek kesme kırılması olarak gerçekleşmiştir (Resim 7.18). Deney elemanında hem mod I hem mod II kırılması gözlemlenmiştir.



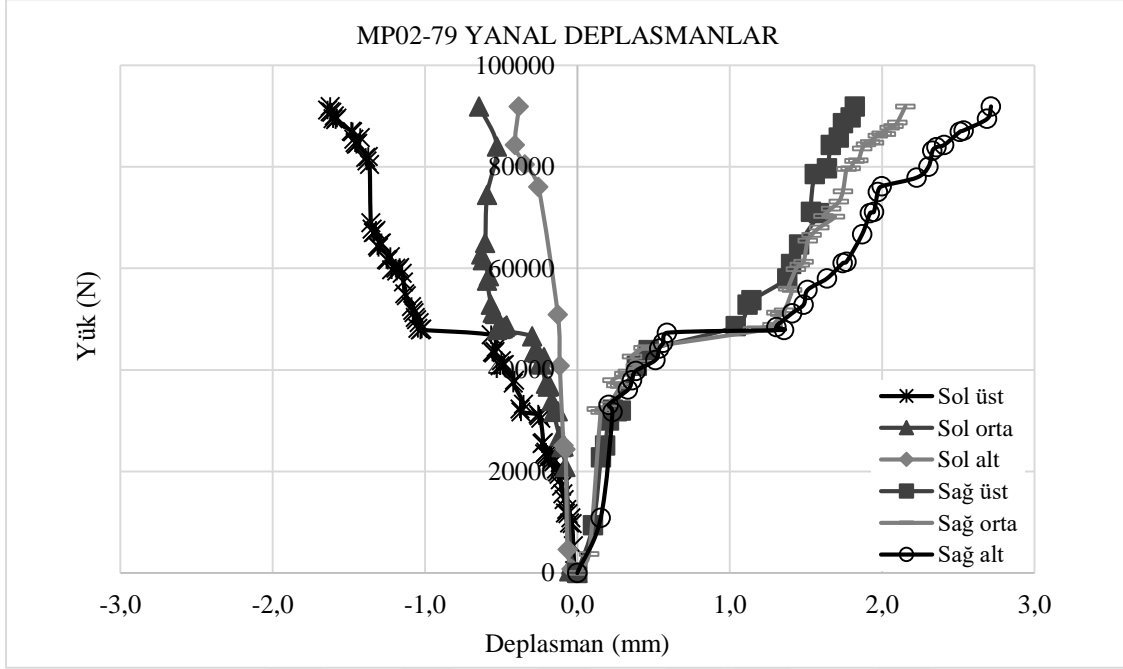
Resim 7.18. MP02-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.34. MP02-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP02-79 numunesi 91857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,864 mm deplasman yapmıştır. MP02-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.34 ve Şekil

7.35'de gösterilmiştir. Deney elemanı yaklaşık 45000 N değerinden sonra büyük yatay deplasmanlar yaparak kırılmıştır.



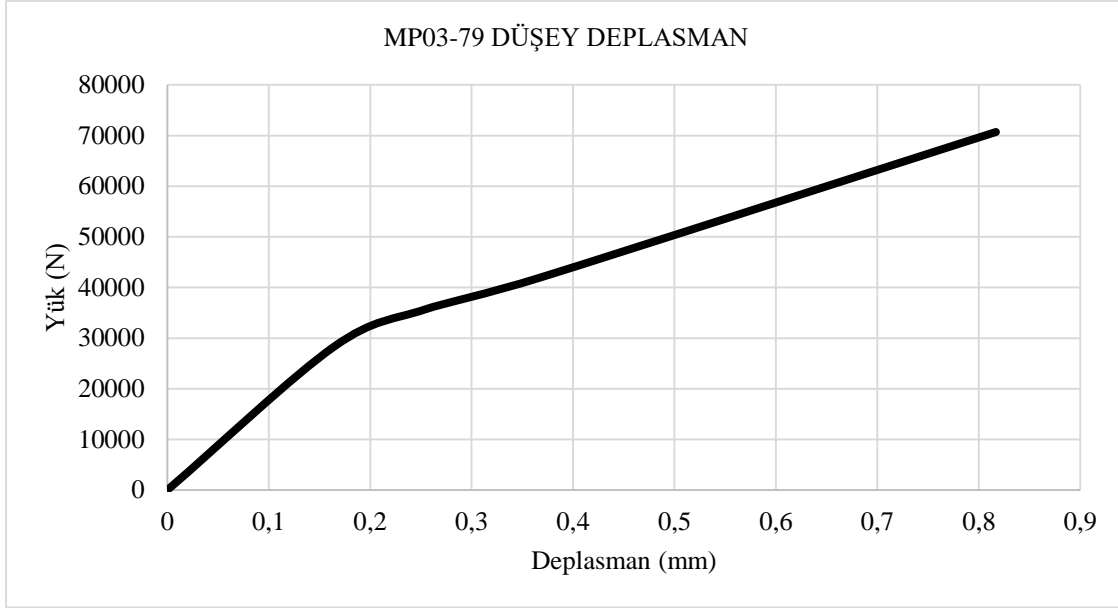
Şekil 7.35. MP02-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.18. MP03-79 numunesi

Bu numune %0,3 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MP03-79 numunesinde çatlaklar Resim 7.19'daki gibi sol üst çentikten ve sol alt çentikten eğrisel olarak başlamış ve zıt yönlü kuvvetlere doğru gelişmiştir. Çentiklerden başlayan çatlaklar mesnetlerdeki yatay kuvvetler tarafından tam olarak önlenemediği için bu çatlaklar ilerlemiştir.

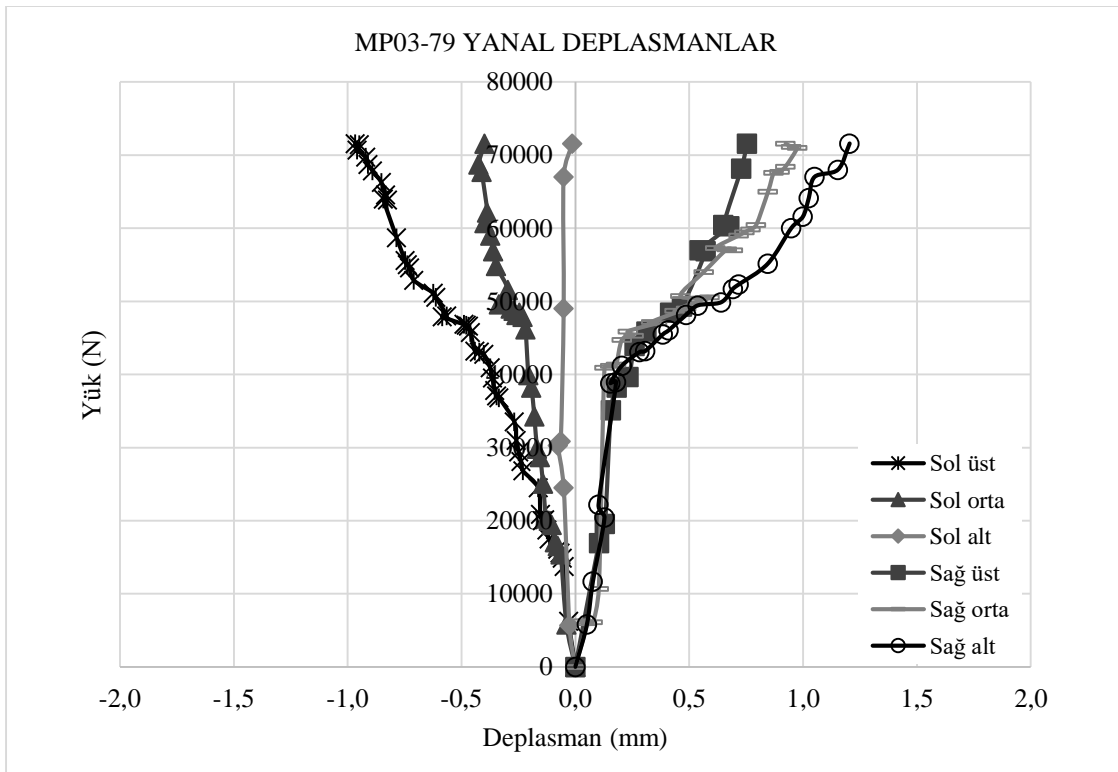


Resim 7.19. MP03-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.36. MP03-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP03-79 numunesi 70714 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,817 mm deplasman yapmıştır. MP03-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de gösterilmiştir.



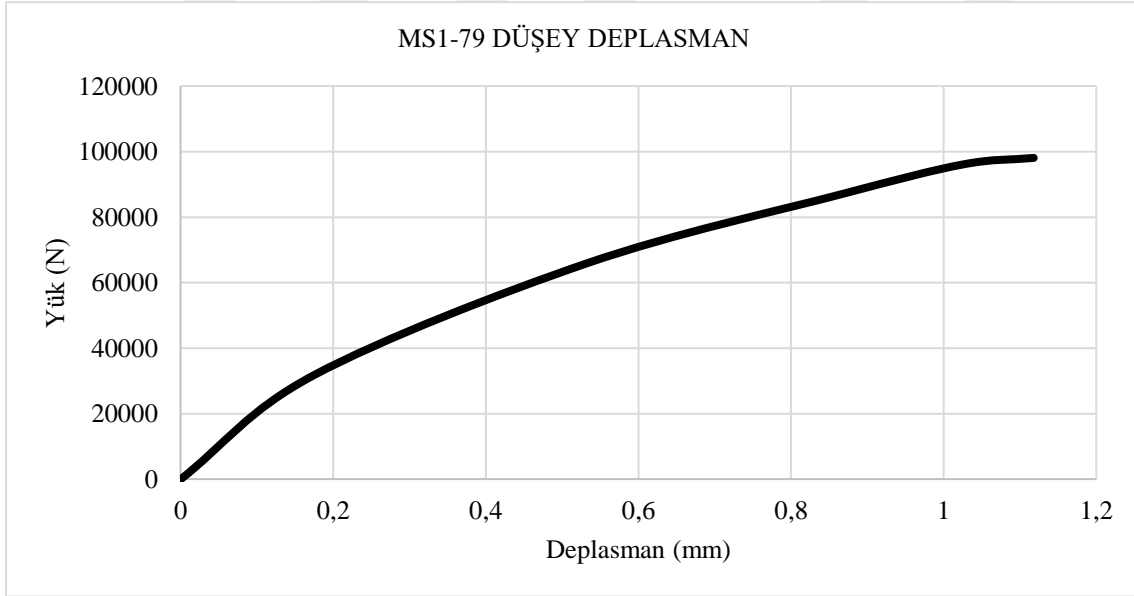
Şekil 7.37. MP03-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.19. MS1-79 numunesi

Bu numune %1 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlaklar sol kesitte şekillenmiştir. İlk önce eğilme çatlakları başlamış ancak göçme, kesme kırılmasıyla sonlanmıştır. Hem mod I hem mod II kırılması gerçekleşmiştir (Resim 7.20).

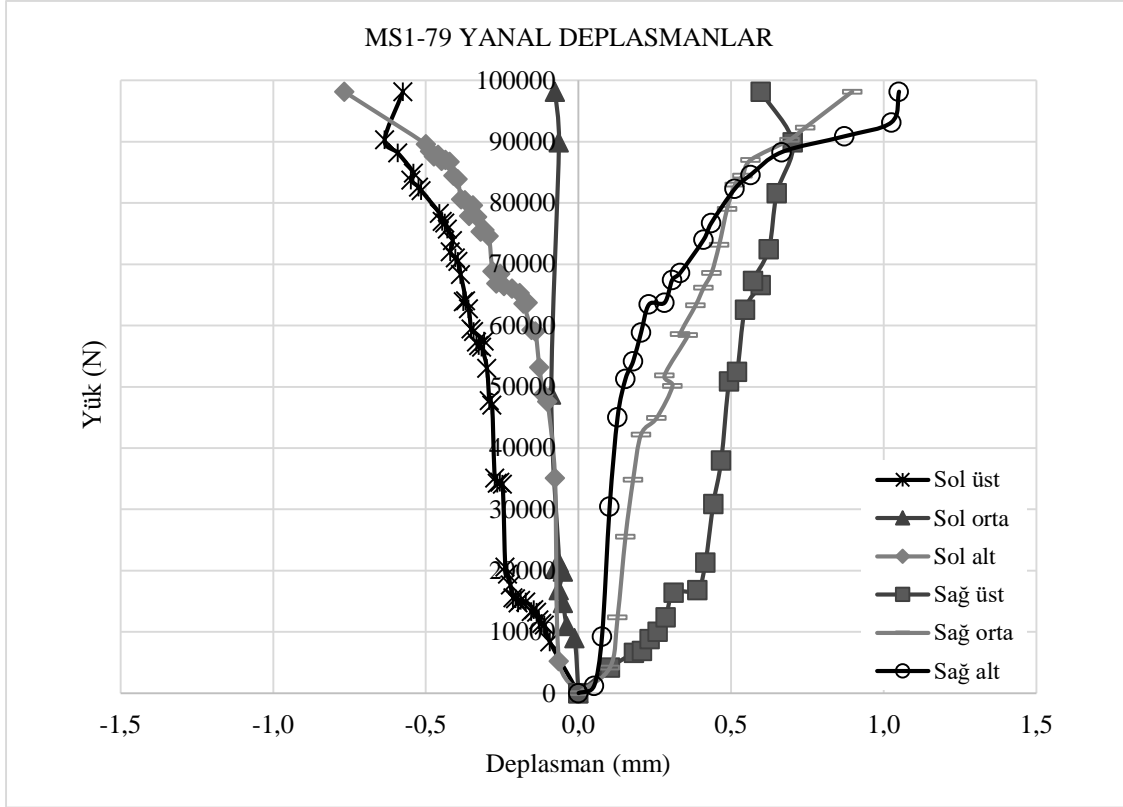


Resim 7.20. MS1-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.38. MS1-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS1-79 numunesi 98143 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,118 mm deplasman yapmıştır. MS1-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.38 ve Şekil 7.39'da gösterilmiştir.



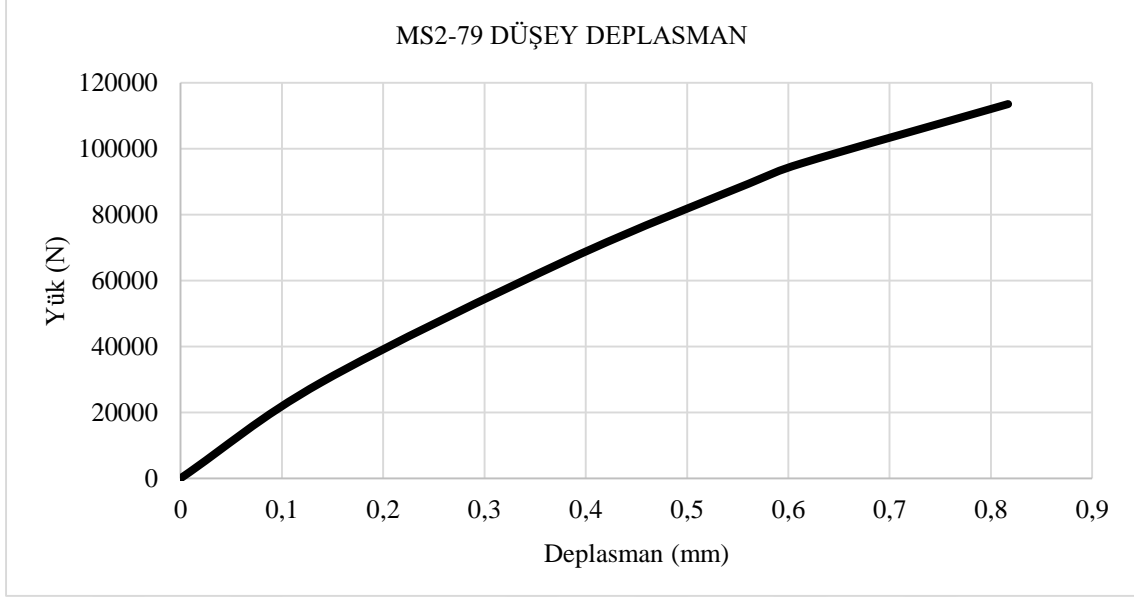
Şekil 7.39. MS1-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.20. MS2-79 numunesi

Bu numune %2 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. İlk olarak sol alt çentikten ince bir eğilme çatlak başlanmış ancak MS2-79 numunesi yine sol çentikler arasında ani bir şekilde gelişen kesme kırılmasıyla gerçekleşmiştir (Resim 7.21).

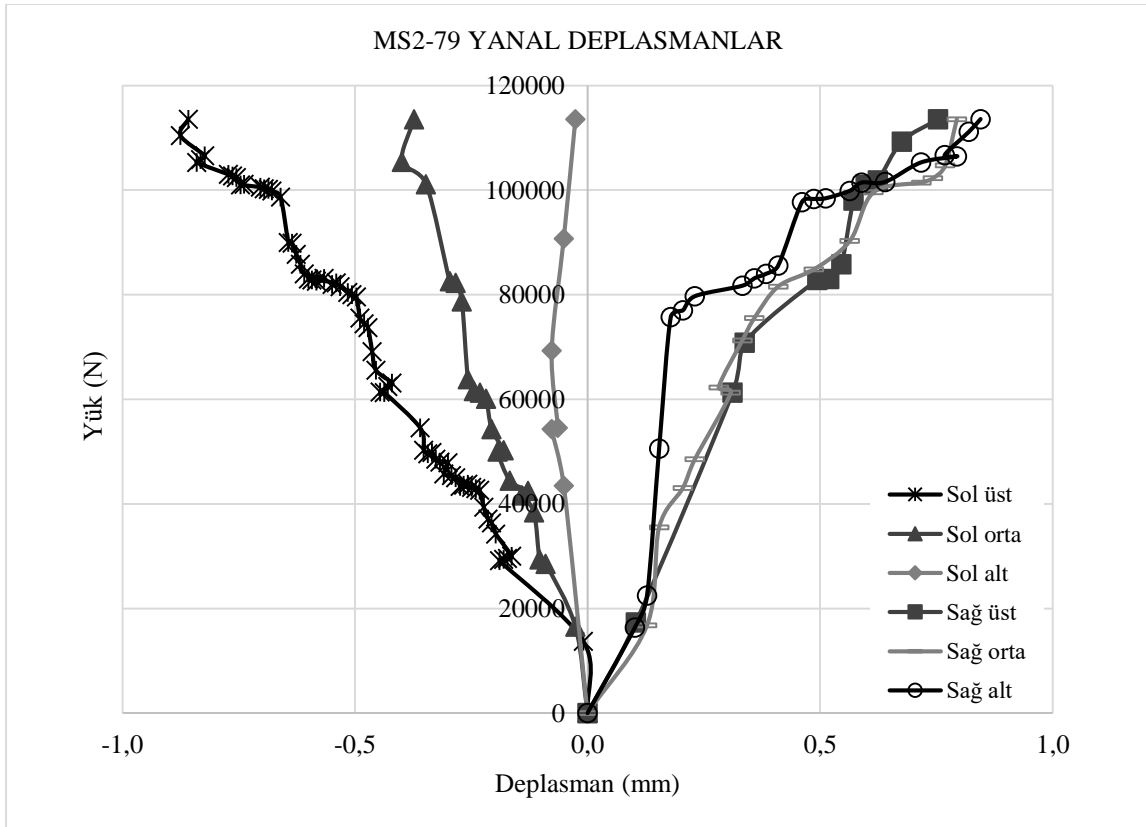


Resim 7.21. MS2-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.40. MS2-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS2-79 numunesi 113571 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,817 mm deplasman yapmıştır. MS2-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.40 ve Şekil 7.41'de gösterilmiştir.



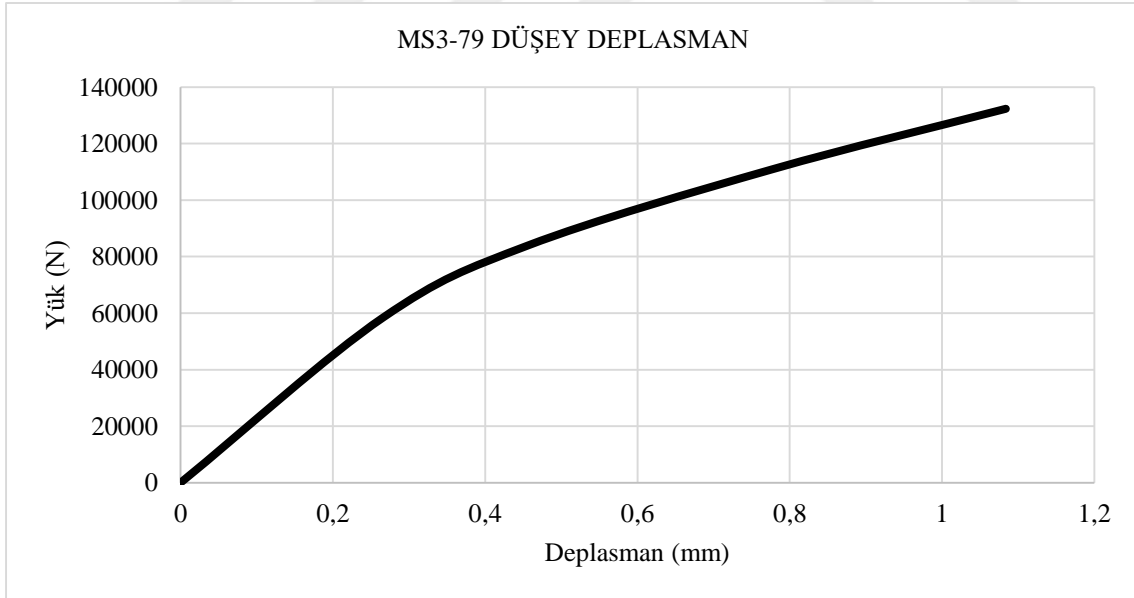
Şekil 7.41. MS2-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.21. MS3-79 numunesi

Bu numune %3 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 79° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda sol alt çentikten eğilme çatlakları gelişirken sağ alt çentikte kesme çatlakları oluşmuş, ancak deney sırasında MS3-79 numunesinin stabilitesini kaybetmesi ile betonda ezilme meydana gelmiştir (Resim 7.22).

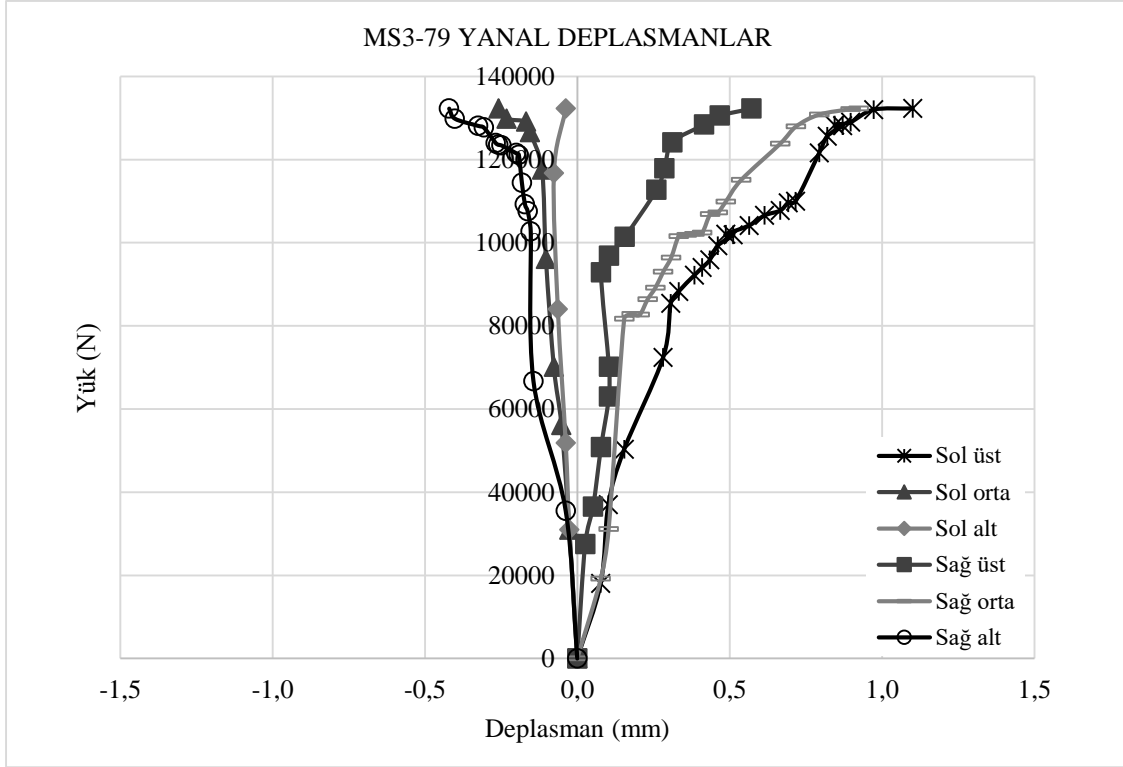


Resim 7.22. MS3-79 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.42. MS3-79 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS3-79 numunesi 132286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,084 mm deplasman yapmıştır. MS3-79 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'de gösterilmiştir.



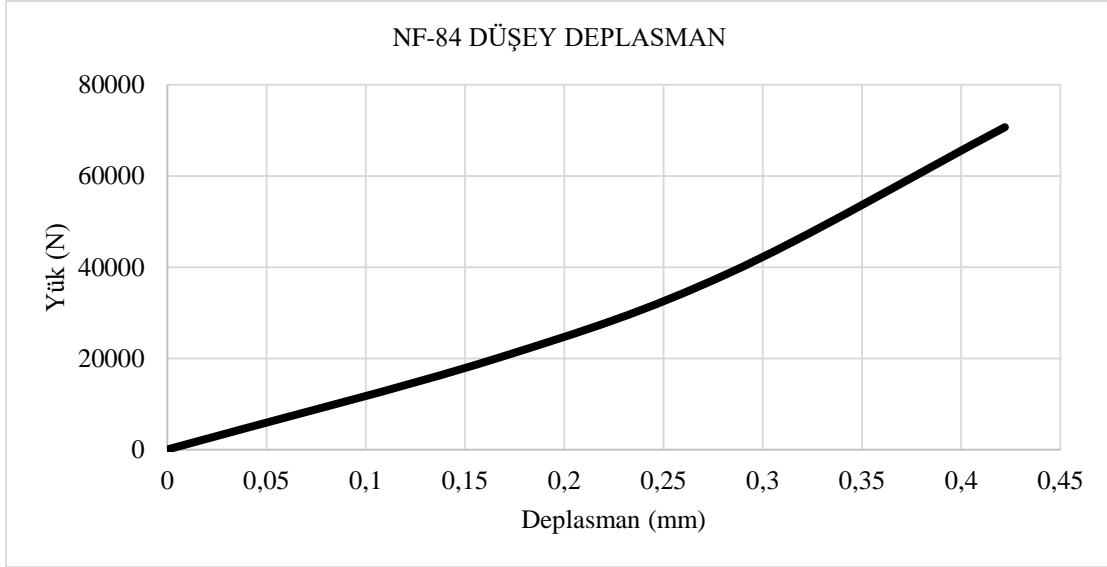
Şekil 7.43. MS3-79 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.22. NF-84 numunesi

Bu numune herhangi bir lif içeriğine sahip olmayıp 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda deney elamanı liffsiz olmasından dolayı gevrek bir kırılma göstermiştir. Kırılma, sağ üst çentikte eğrisel olarak meydana gelen çatlak ve aynı zamanda yatay engellemeden dolayı zıt yönlü kuvvetlere doğru şekillenen çatlak sonucunda meydana gelmiştir (Resim 7.23.)

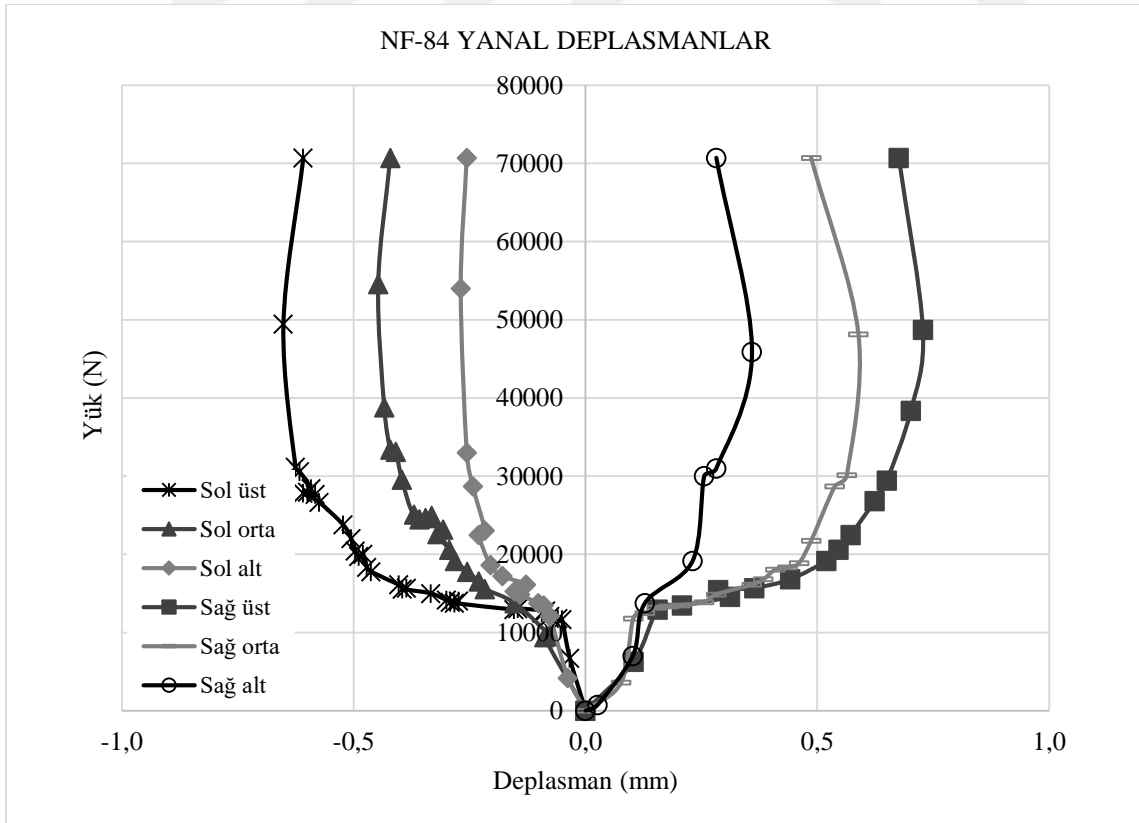


Resim 7.23. NF-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.44. NF-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

NF-84 numunesi 70714 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,422 mm deplasman yapmıştır. NF-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.44 ve Şekil 7.45’de gösterilmiştir.



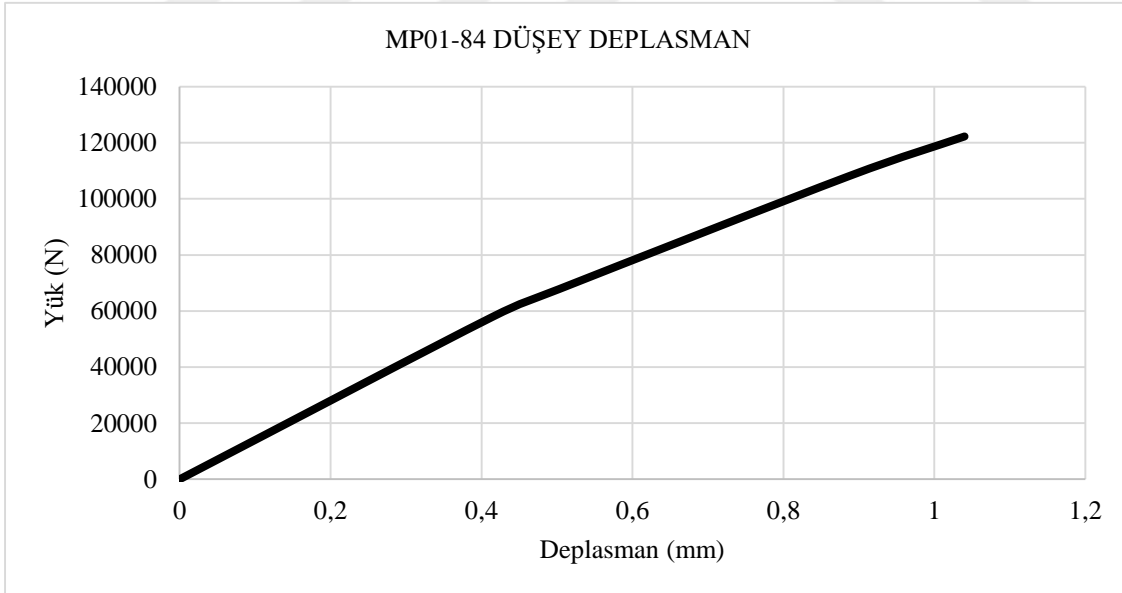
Şekil 7.45. NF-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.23. MP01-84 numunesi

Bu numune %0,1 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlaklar sağ tarafta şekillenmiştir. Kırılma zıt yönlü kuvvetlere arasında oluşmuştur. İlk çatlak eğilme çatlakları olup sağ alt çentikten başlamıştır. Kırılmaya neden olan kesme çatlakları Resim 7.24’de gösterilmektedir.

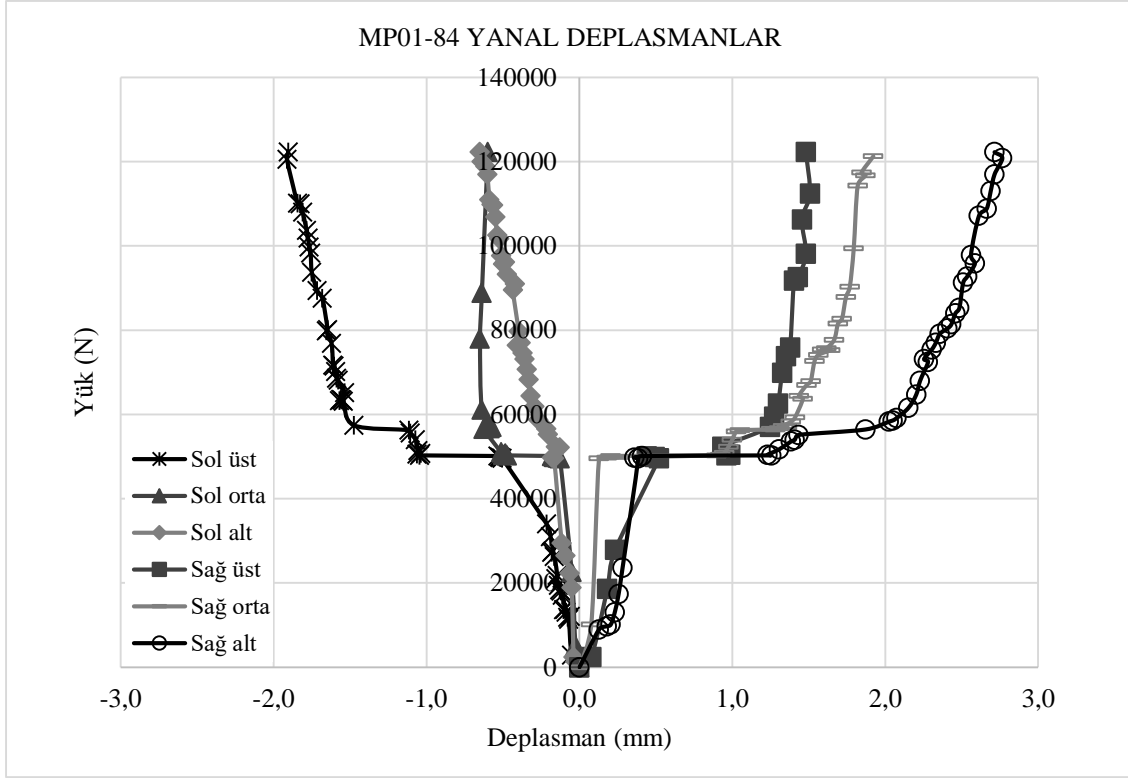


Resim 7.24. MP01-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.46. MP01-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP01-84 numunesi 122286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,04 mm deplasman yapmıştır. MP01-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.46 ve Şekil 7.47’de gösterilmiştir.



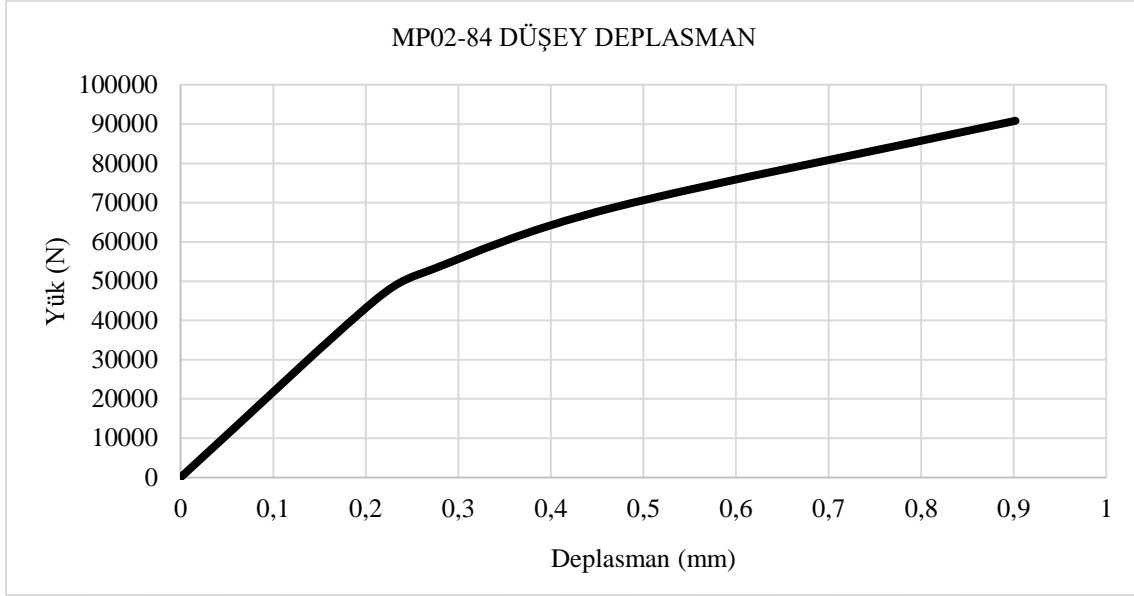
Şekil 7.47. MP01-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.24. MP02-84 numunesi

Bu numune %0,2 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda hem sağ hem sol çentiklerde eğilme çatlakları oluşmuş ancak kesme dayanımının aşılması ile kırılma sağ çentiklerde meydana gelmiştir. Deney elemanında hem mod I hem mod II kırılmaları gözlemlenmiştir (Resim 7.25).

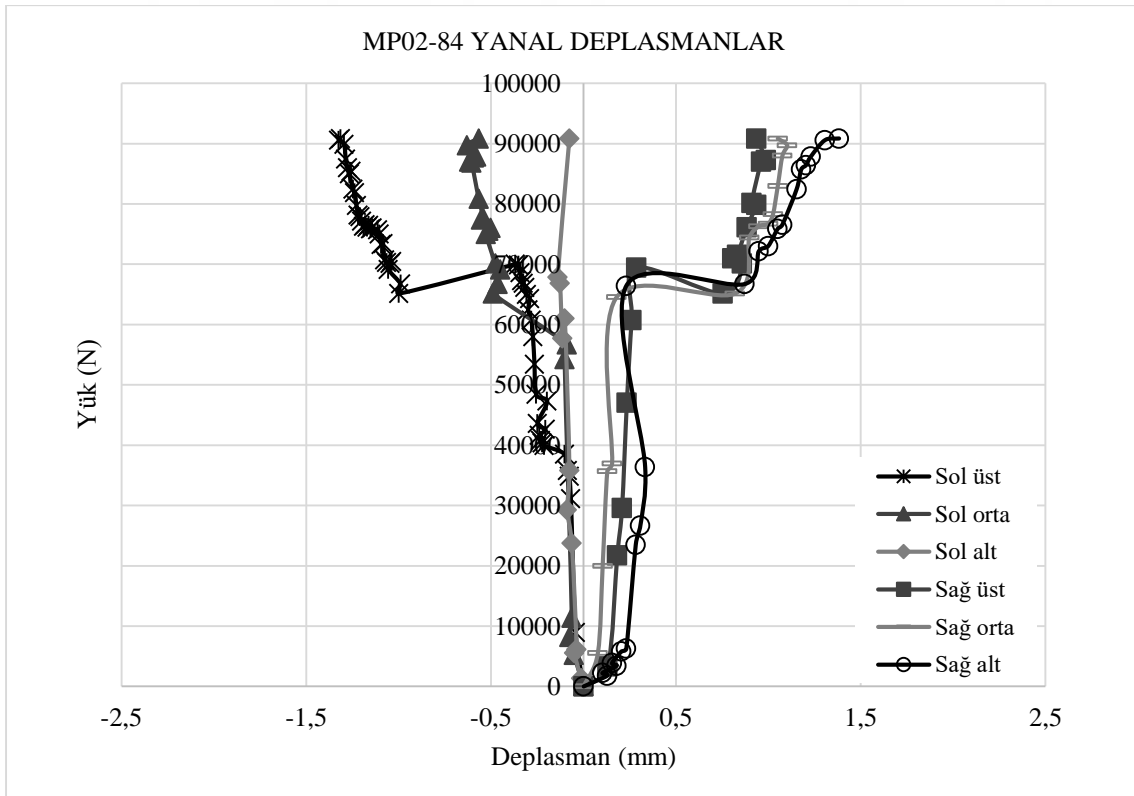


Resim 7.25. MP02-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.48. MP02-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP02-84 numunesi 90857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,902 mm deplasman yapmıştır. MP02-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.48 ve Şekil 7.49'da gösterilmiştir.



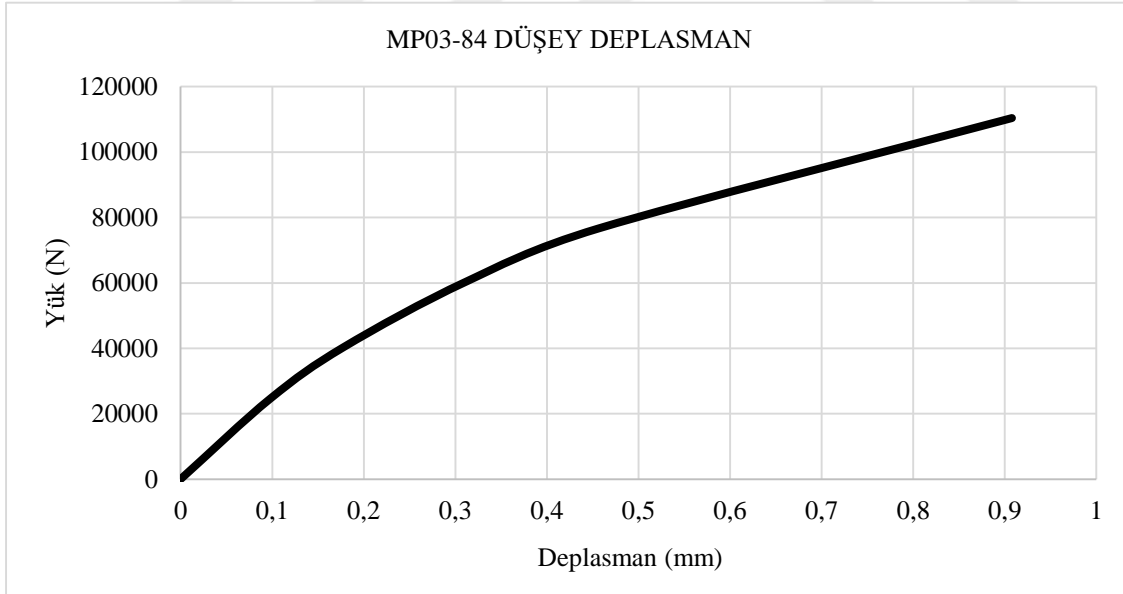
Şekil 7.49. MP02-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.25. MP03-84 numunesi

Bu numune %0,3 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda sol çentikte eğilme çatlakları başlamış olup kırılma sağ çentiklerde kesme dayanımının aşılmasıyla gerçekleşmiştir (Resim 7.26).

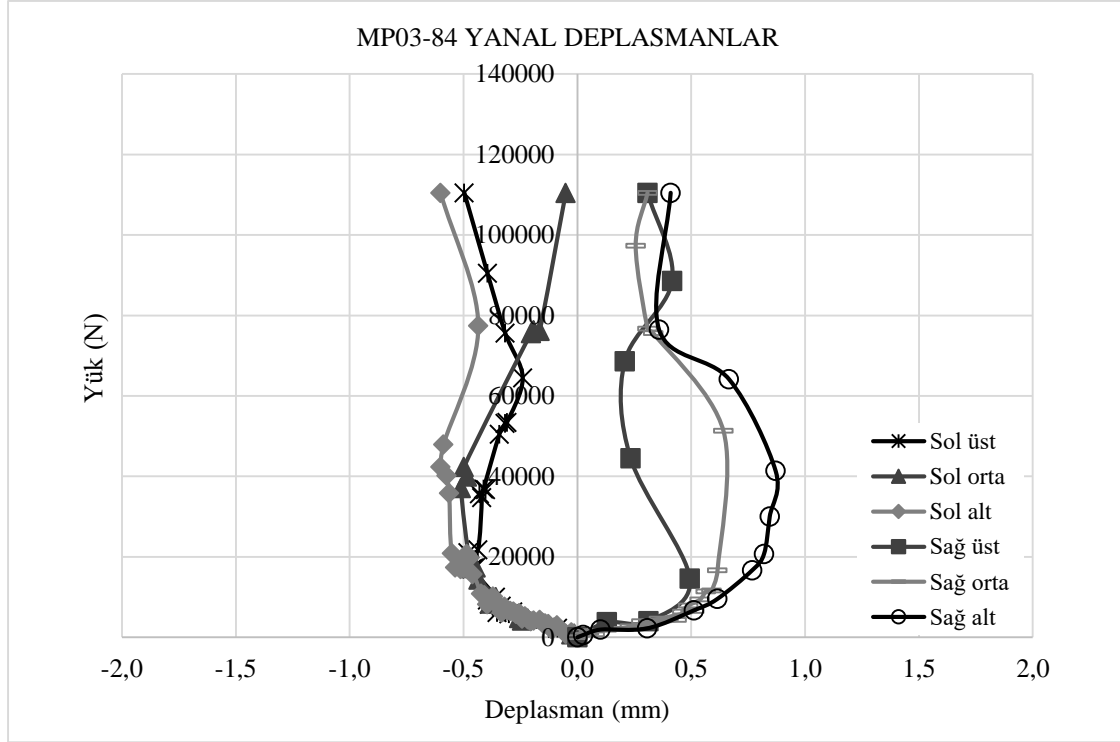


Resim 7.26. MP03-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.50. MP03-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP03-84 numunesi 110429 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,908 mm deplasman yapmıştır. MP03-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.50 ve Şekil 7.51'de gösterilmiştir.



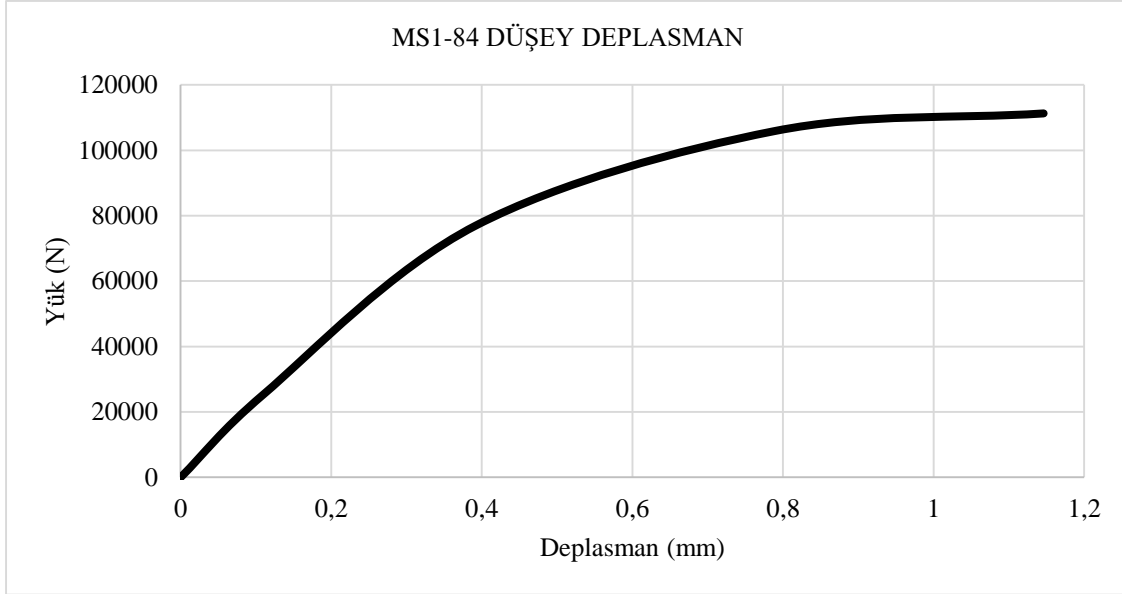
Şekil 7.51. MP03-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.26. MS1-84 numunesi

Bu numune %1 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. MS1-84 numunesinde çatlaklar Resim 7.27'deki gibi sol çentikler arasında ve zıt yönlü kuvvetlere doğru gelişmiştir. Çentiklerden başlayan çatlaklar mesnetlerdeki yatay kuvvetler tarafından tam olarak önlenemediği için bu çatlaklar ilerlemiş ve deney elemanında mod I-II kırılmaları gerçekleşmiştir.

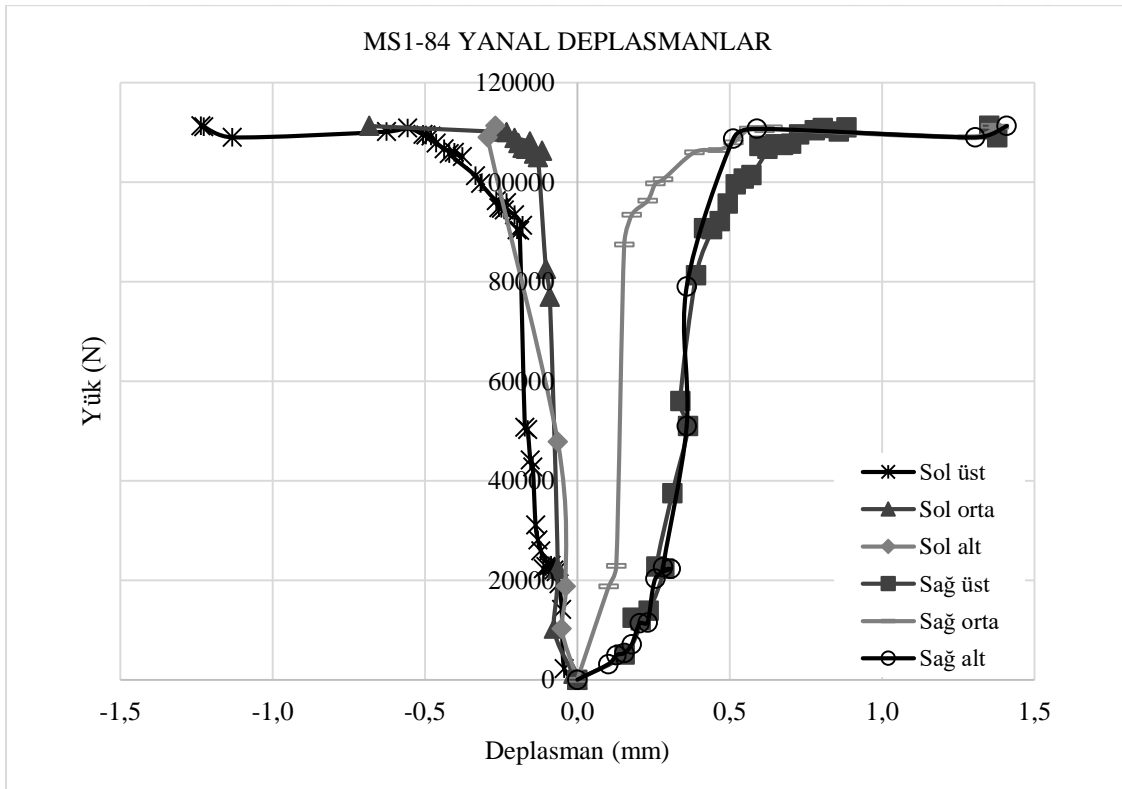


Resim 7.27. MS1-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.52. MS1-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS1-84 numunesi 111286 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,146 mm deplasman yapmıştır. MS1-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.52 ve Şekil 7.53'de gösterilmiştir.



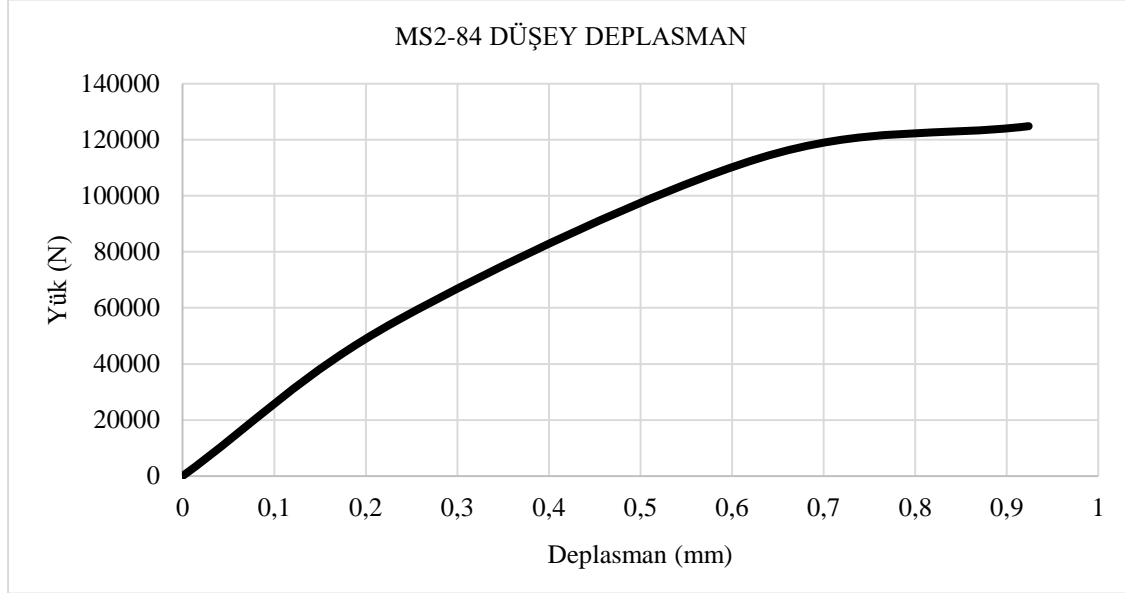
Şekil 7.53. MS1-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.27. MS2-84 numunesi

Bu numune %2 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda ilk önce sol alt çentikte eğilme çatlakları başlamış ancak kırılma sağ tarafta ani olarak zıt yönlü kuvvetlere arasında oluşmuştur. Hem mod I hem mod II durumları gerçekleşmiştir (Resim 7.28)

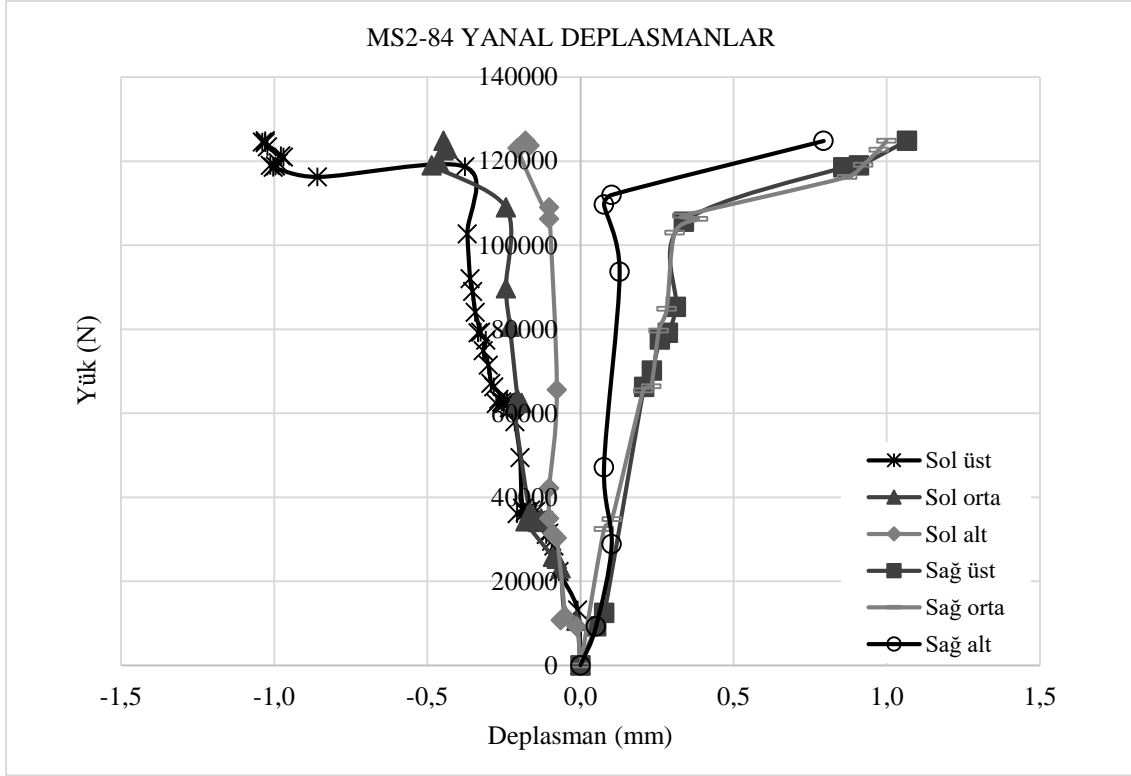


Resim 7.28. MS2-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.54. MS2-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS2-84 numunesi 124857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,924 mm deplasman yapmıştır. MS2-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.54 ve Şekil 7.55'de gösterilmiştir.



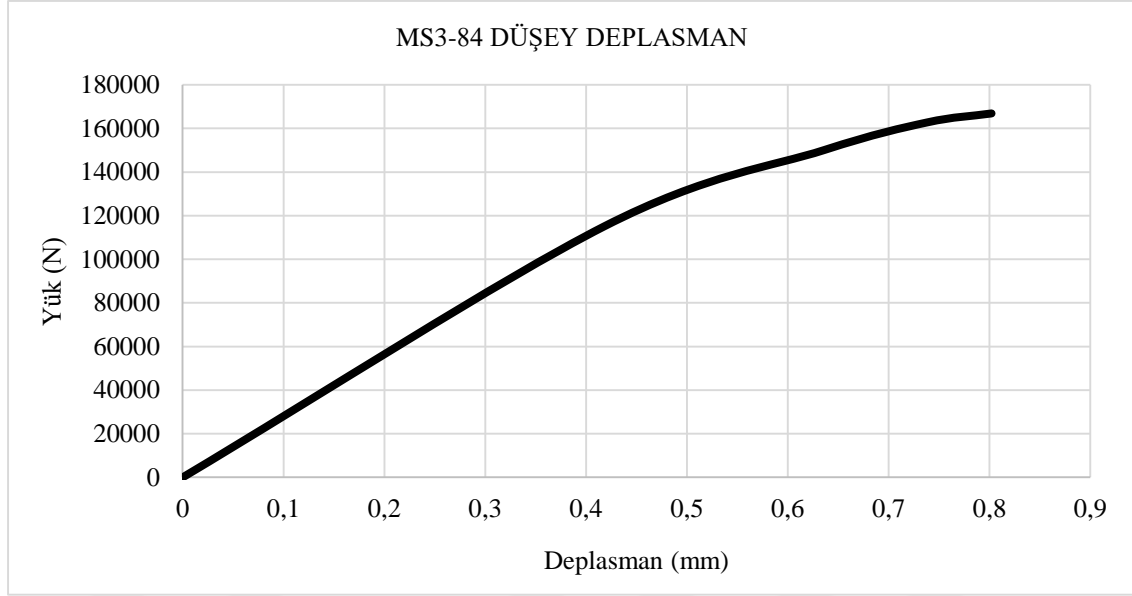
Şekil 7.55. MS2-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.28. MS3-84 numunesi

Bu numune %3 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 84° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda her iki yöndeki çentik ucunda kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Ancak çatlak ilerlemesi sağ kesitte meydana gelmiş ve mod II kırılması kesme dayanımının aşılmasıyla sağ çentikler arasında gerçekleşmiştir (Resim 7.29)

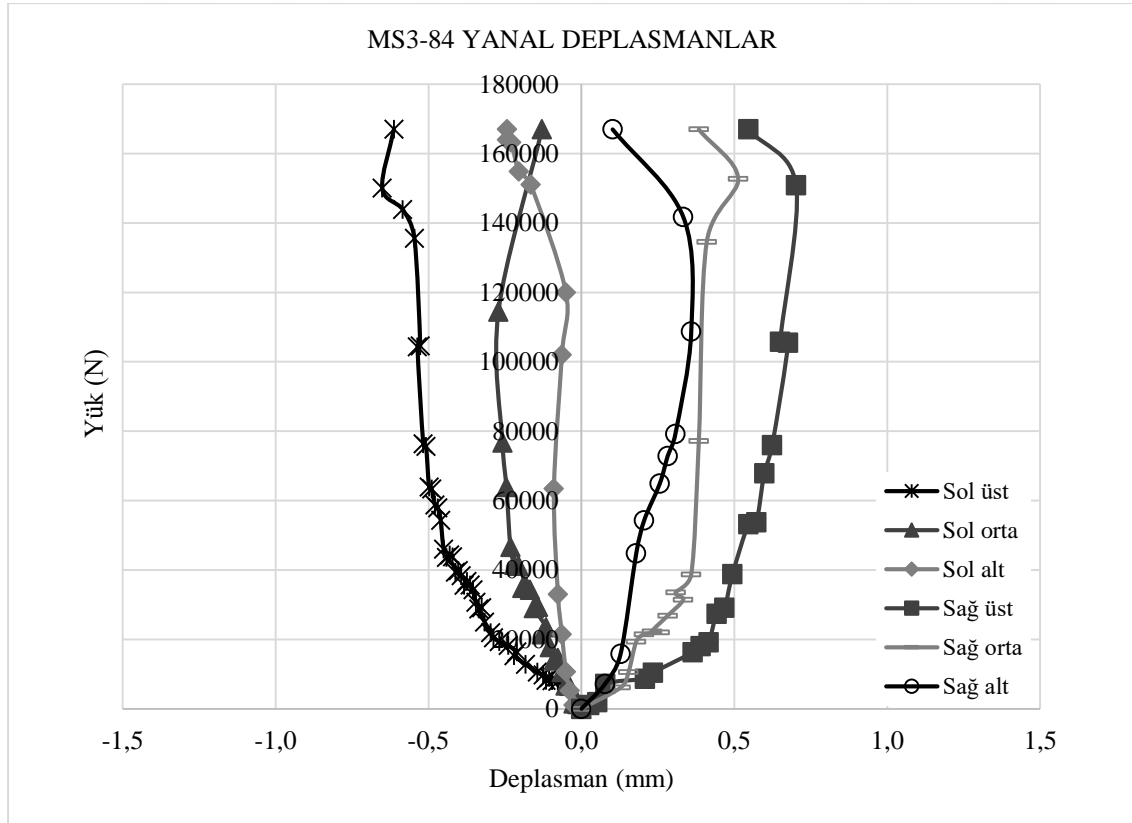


Resim 7.29. MS3-84 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.56. MS3-84 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS3-84 numunesi 166952 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,802 mm deplasman yapmıştır. MS3-84 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'de gösterilmiştir.



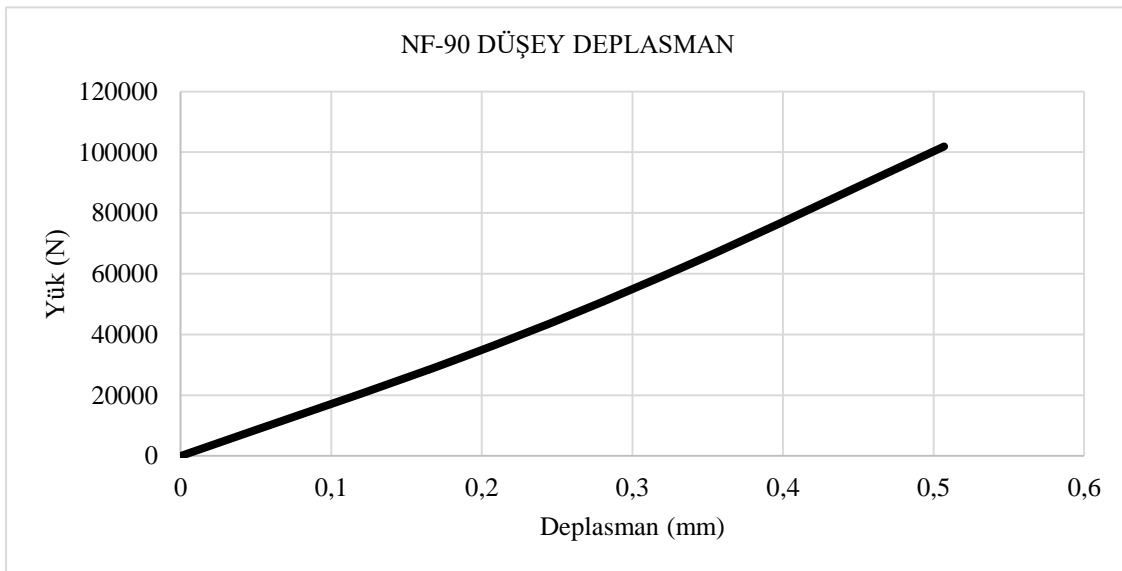
Şekil 7.57. MS3-84 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.29. NF-90 numunesi

Bu numune herhangi bir lif içeriğine sahip olmayıp 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlak ilerlemesi çok hızlı devam etmiş ve oldukça gevrek bir kırılmaya sebebiyet vererek numuneyi birden fazla parçaya ayırmıştır. Kırılma sol kesitte gerçekleşmiş olup hem mod I hem mod II kırılmaları gerçekleşmiştir (Resim 7.30).

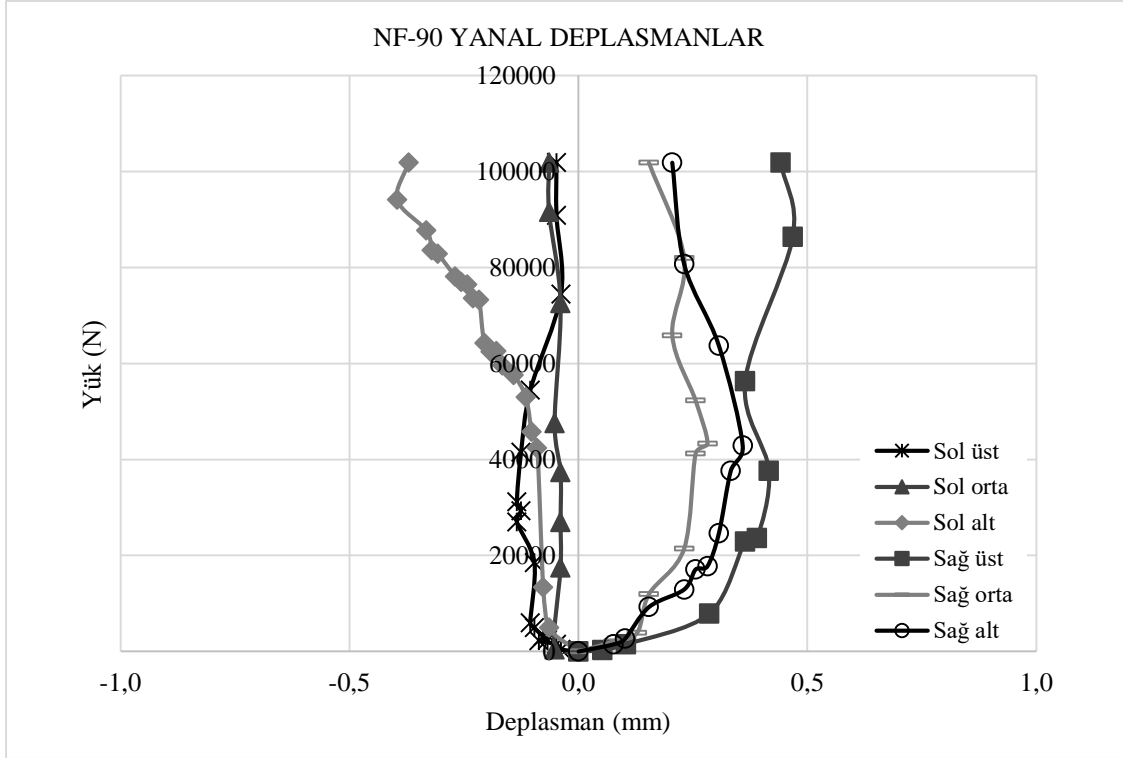


Resim 7.30. NF-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.58. NF-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

NF-90 numunesi 101857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,507 mm deplasman yapmıştır. NF-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.58 ve Şekil 7.59'da gösterilmiştir.



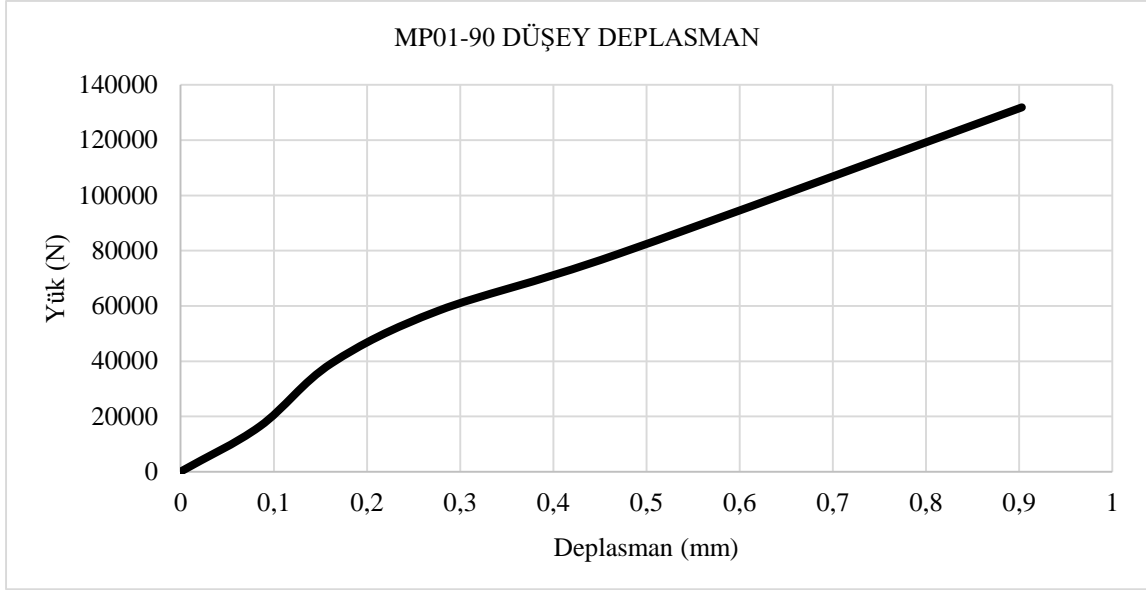
Şekil 7.59. NF-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.30. MP01-90 numunesi

Bu numune %0,1 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlaklar sağ kesitte şekillenmiştir. İlk olarak sol alt çentiklerden eğrisel çatlaklar başlamış ancak mesnetlerdeki yatay kuvvetler bu eğrisel çatlakların ilerlemesini engellemiştir. Kırılma zıt yönlü kuvvetlere doğru eğilim göstererek düz bir çatlakla gerçekleşmiştir (Resim 7.31).

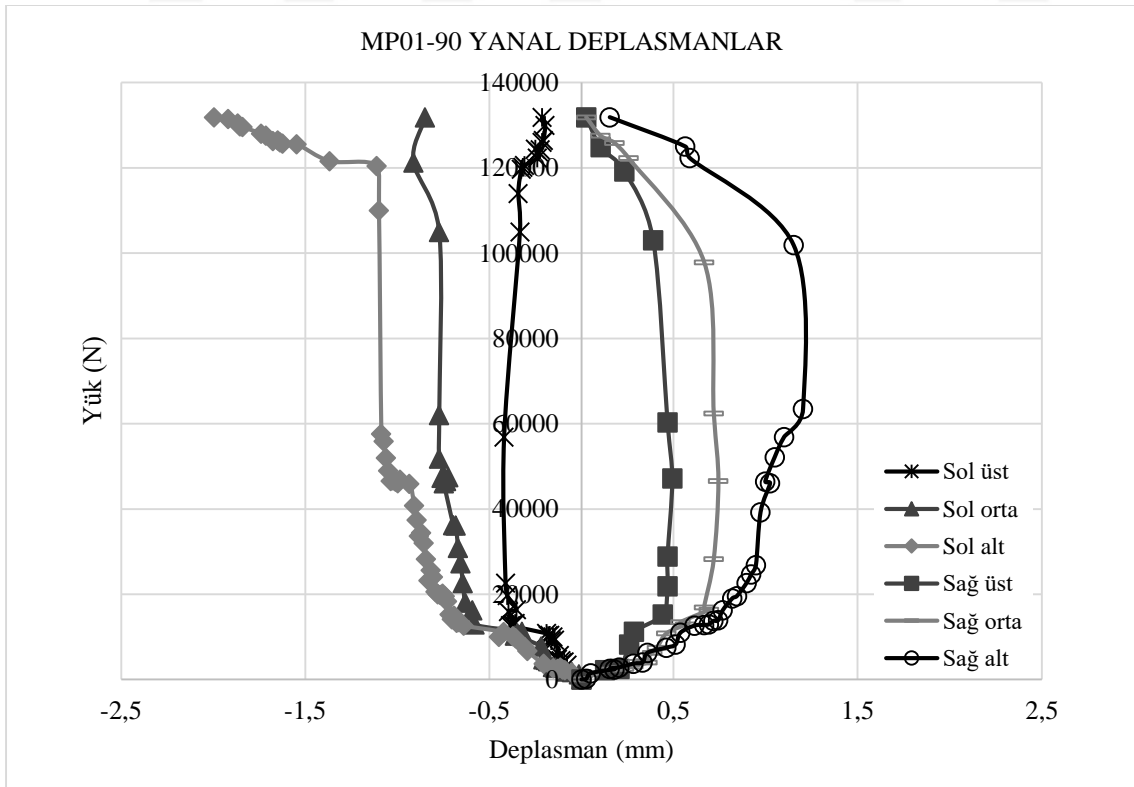


Resim 7.31. MP01-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.60. MP01-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP01-90 numunesi 131857 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,903 mm deplasman yapmıştır. MP01-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.60 ve Şekil 7.61'de gösterilmiştir.



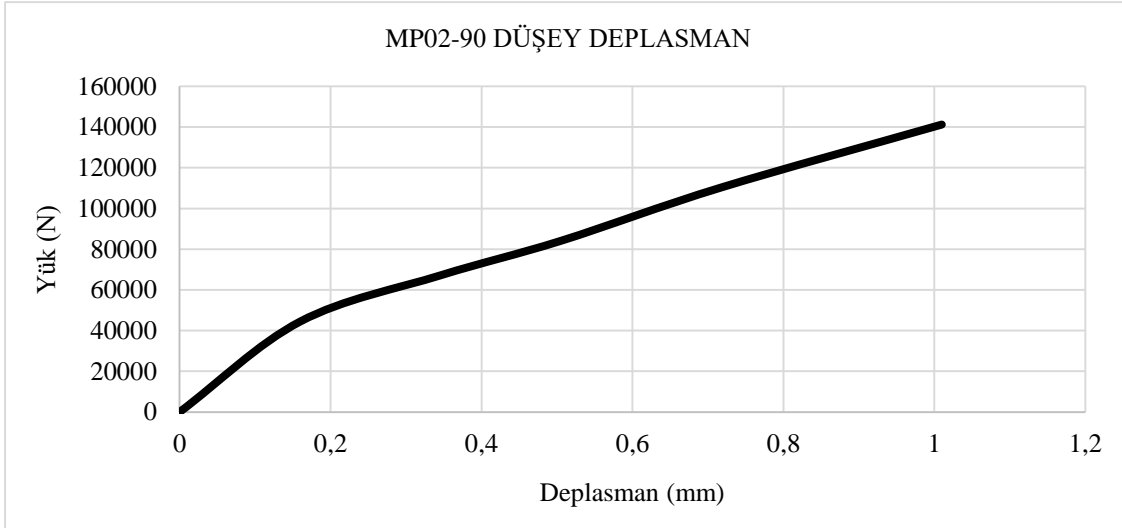
Şekil 7.61. MP01-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.31. MP02-90 numunesi

Bu numune %0,2 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda çatlaklar sağ kesitte şekillenmiştir. İlk olarak sağ alt çentikten eğrisel bir çatlak başlamış ancak mesnetlerdeki yatay kuvvetler ilerlemesini engellemiştir. Kırılma zıt yönlü kuvvetlere eğilim gösteren düz çatlakla gerçekleşmiştir. Deney elemanında mod I-II kırılmaları gözlemlenmiştir (Resim 7.32).

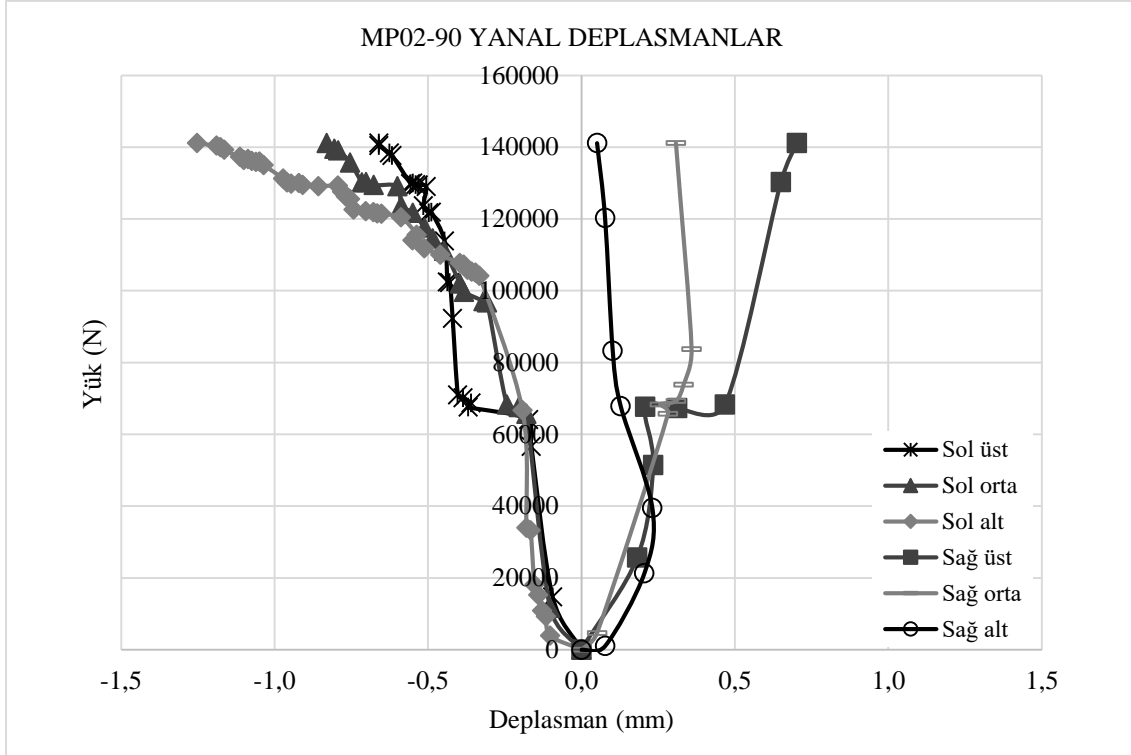


Resim 7.32. MP02-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.62. MP02-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP02-90 numunesi 141143 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,01 mm deplasman yapmıştır. MP02-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.62 ve Şekil 7.63'de gösterilmiştir.



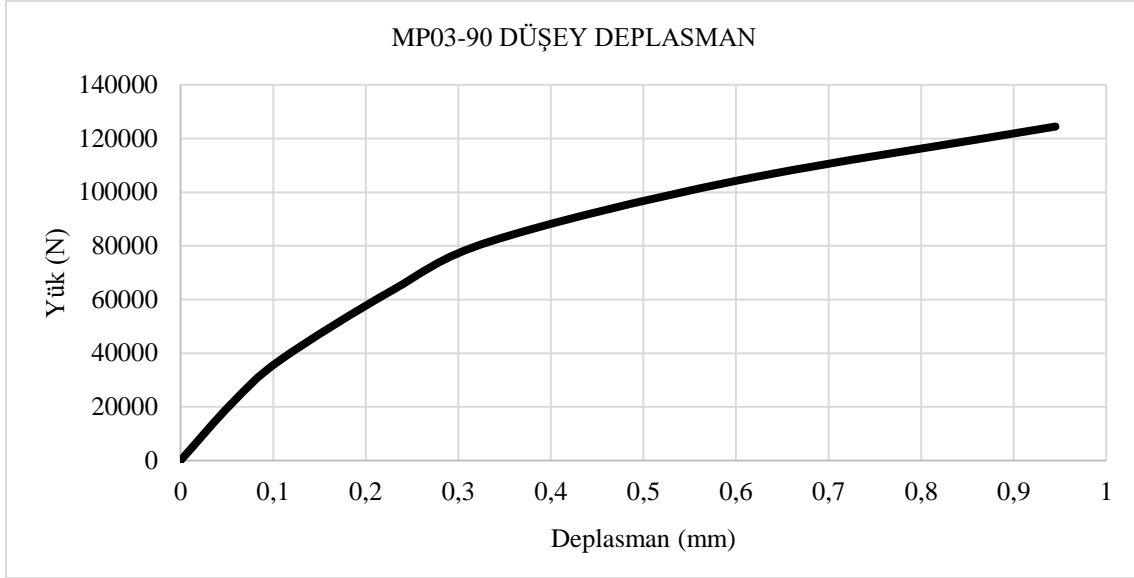
Şekil 7.63. MP02-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.32. MP03-90 numunesi

Bu numune %0,3 mikro polimer lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda MP03-90 numunesinde eğilme çatlakları oluşmadan her iki alt çentikte de kesme çatlaklarının oluşmasıyla kesme dayanımı aşılmıştır ve kırılma sağ çentikler arasında gerçekleşmiştir (Resim 7.33).

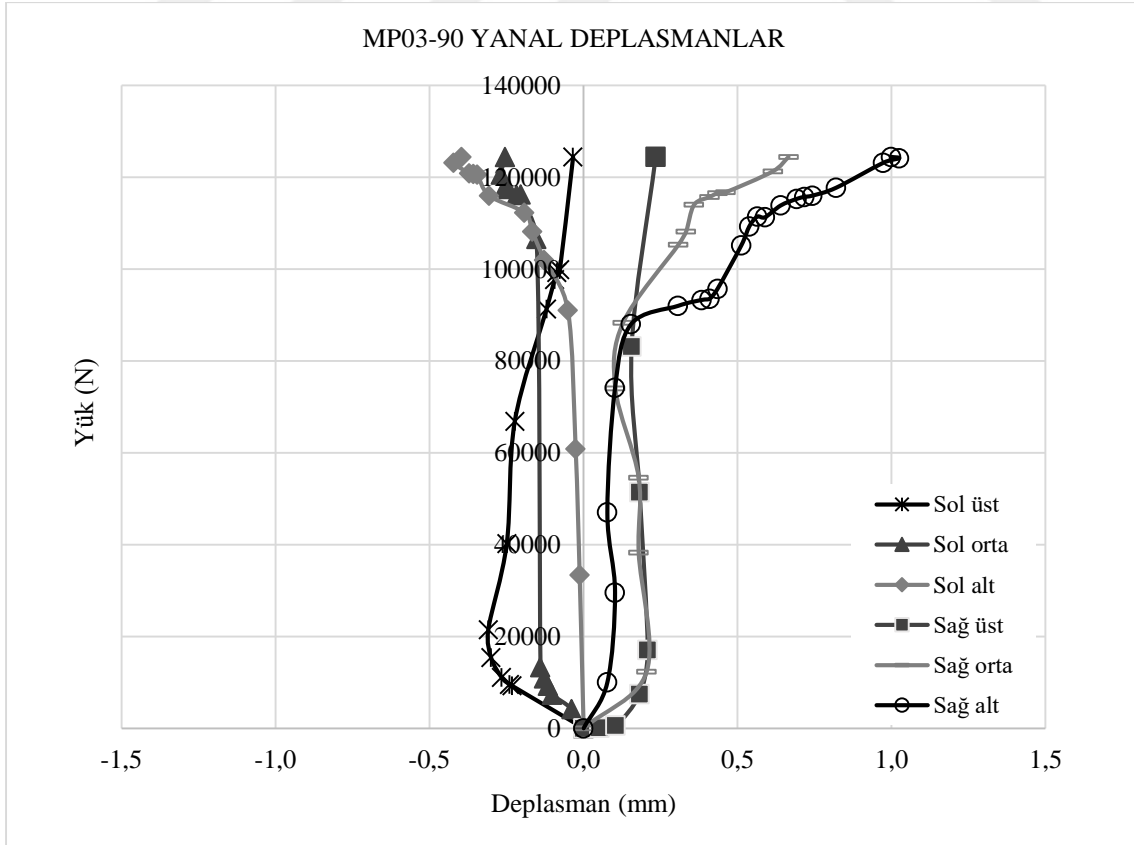


Resim 7.33. MP03-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.64. MP03-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MP03-90 numunesi 124429 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,945 mm deplasman yapmıştır. MP03-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.64 ve Şekil 7.65'de gösterilmiştir.



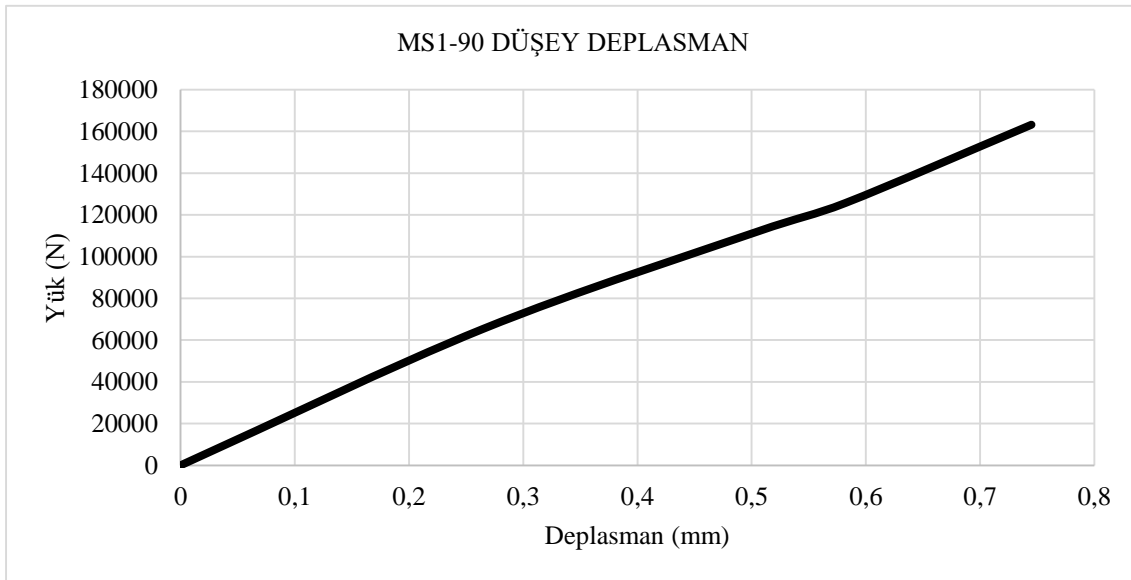
Şekil 7.65. MP03-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.33. MS1-90 numunesi

Bu numune %1 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda alt çentiklerin her ikisinden de eğrisel birer çatlak başlamış ancak mesnetlerdeki yatay kuvvetten dolayı ilerlemeleri devam etmemiştir. Kesme kırılması sol tarafta zıt yönlü kuvvetler arasında meydana gelmiştir. Mod I-II kırılmaları gözlemlenmiştir (Resim 7.34).

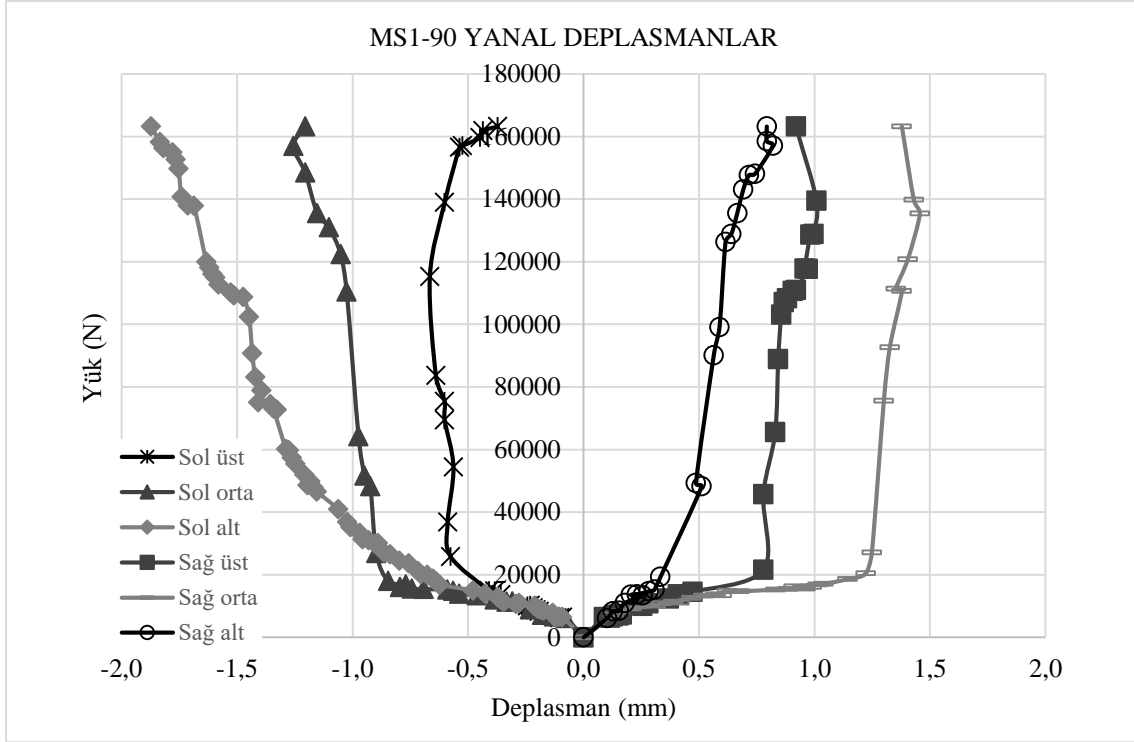


Resim 7.34. MS1-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.66. MS1-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS1-90 numunesi 163248 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,745 mm deplasman yapmıştır. MS1-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.66 ve Şekil 7.67'de gösterilmiştir.



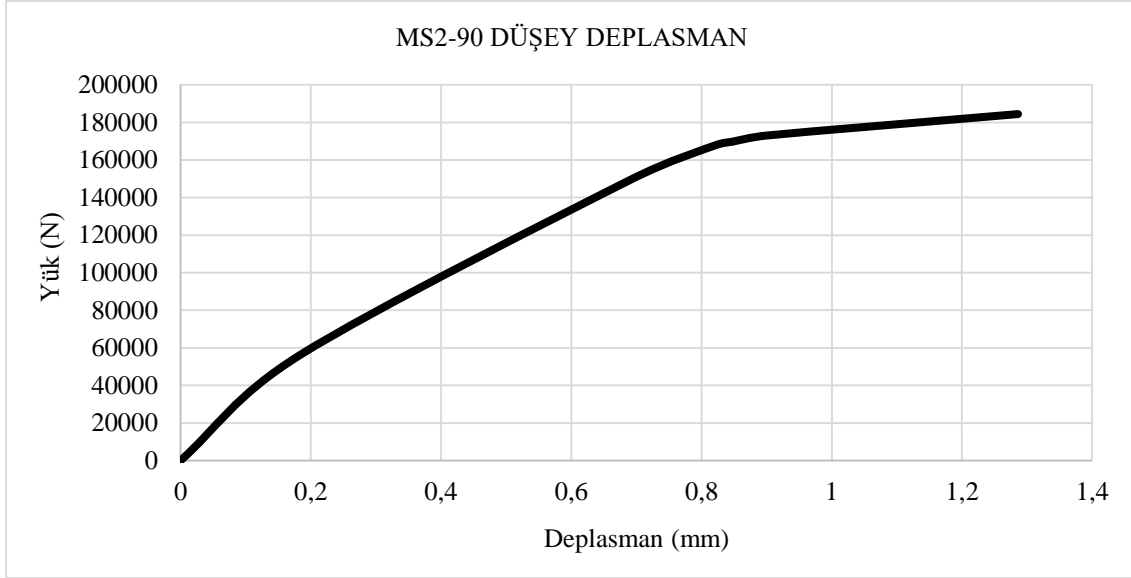
Şekil 7.67. MS1-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.34. MS2-90 numunesi

Bu numune %2 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda alt çentiklerin her ikisinden de eğrisel birer çatlak başlamış ancak mesnetlerdeki yatay kuvvetten dolayı ilerlemeleri devam etmemiştir. Kesme kırılması sağ tarafta zıt yönlü kuvvetler arasında meydana gelmiştir (Resim 7.35).

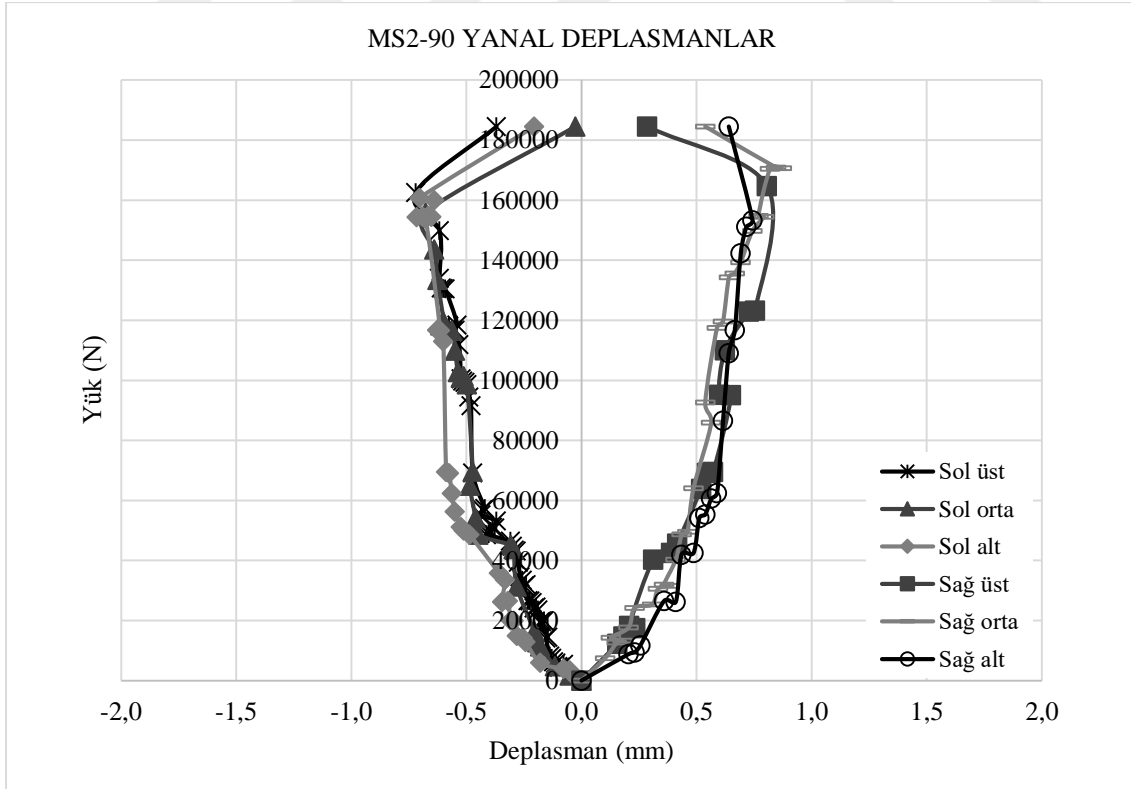


Resim 7.35. MS2-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.68. MS2-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS2-90 numunesi 184473 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 1,286 mm deplasman yapmıştır. MS2-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.68 ve Şekil 7.69'da gösterilmiştir.



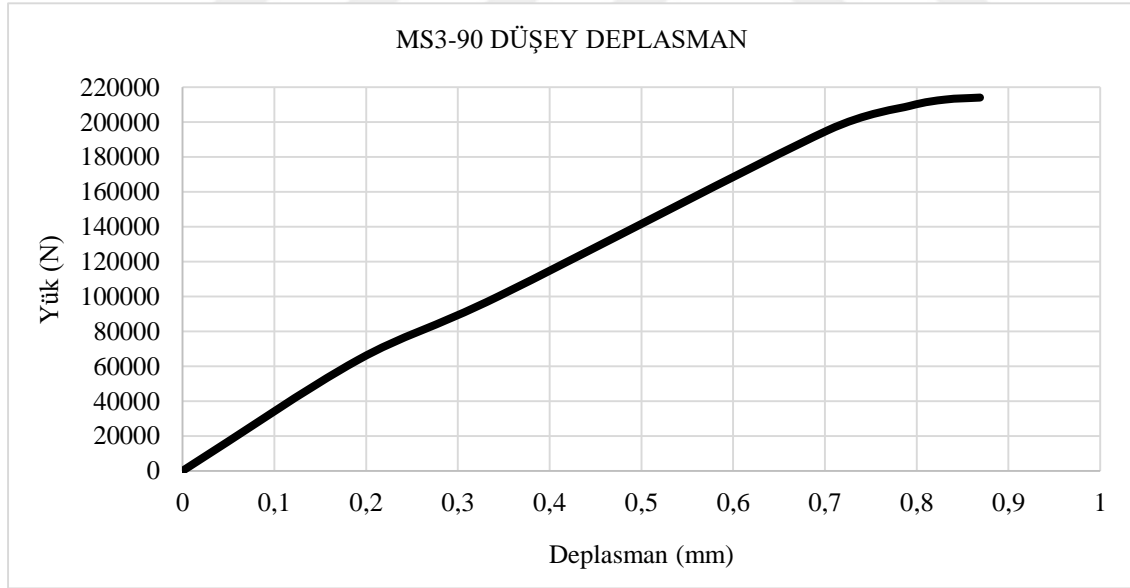
Şekil 7.69. MS2-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

7.2.35. MS3-90 numunesi

Bu numune %3 mikro çelik lif içeriğine sahip olup 90° kesme açısında kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda alt çentiklerin her ikisinde de kesme çatlakları görülmüş ancak kesme kırılması sağ alt çentik ve sağ üst çentik arasında meydana gelmiştir (Resim 7.36).

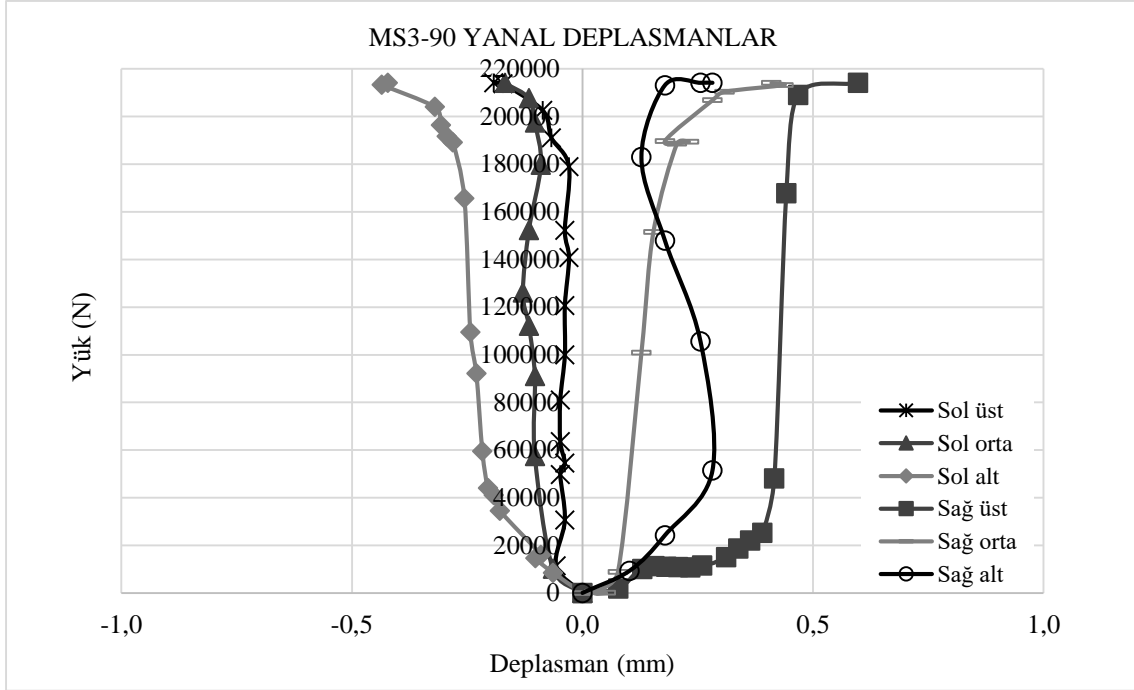


Resim 7.36. MS3-90 numunesinde çatlak yörüngesi



Şekil 7.70. MS3-90 numunesine ait düşeyde yük-deplasman grafiği

MS3-90 numunesi 214103 N maksimum yükte kırılmış olup düşeyde 0,869 mm deplasman yapmıştır. MS3-90 kodlu deney elemanına ait yük-deplasman grafikleri Şekil 7.70 ve Şekil 7.71'de gösterilmiştir.

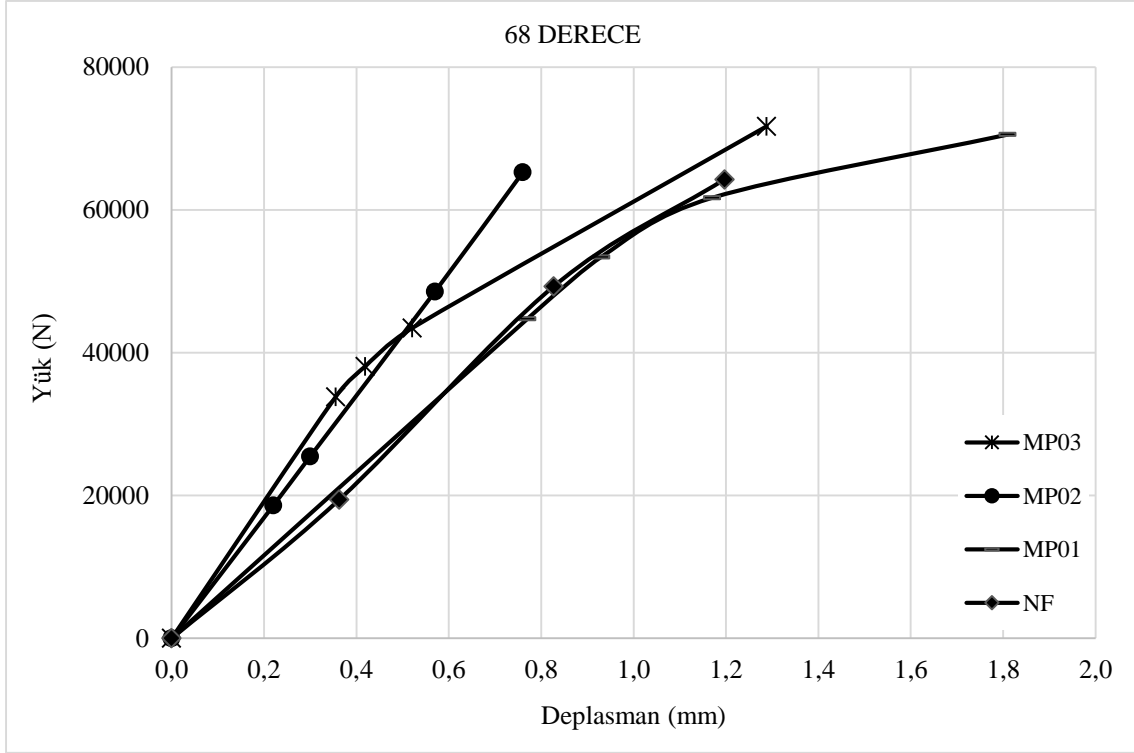


Şekil 7.71. MS3-90 numunesine ait yatayda yük-deplasman grafikleri

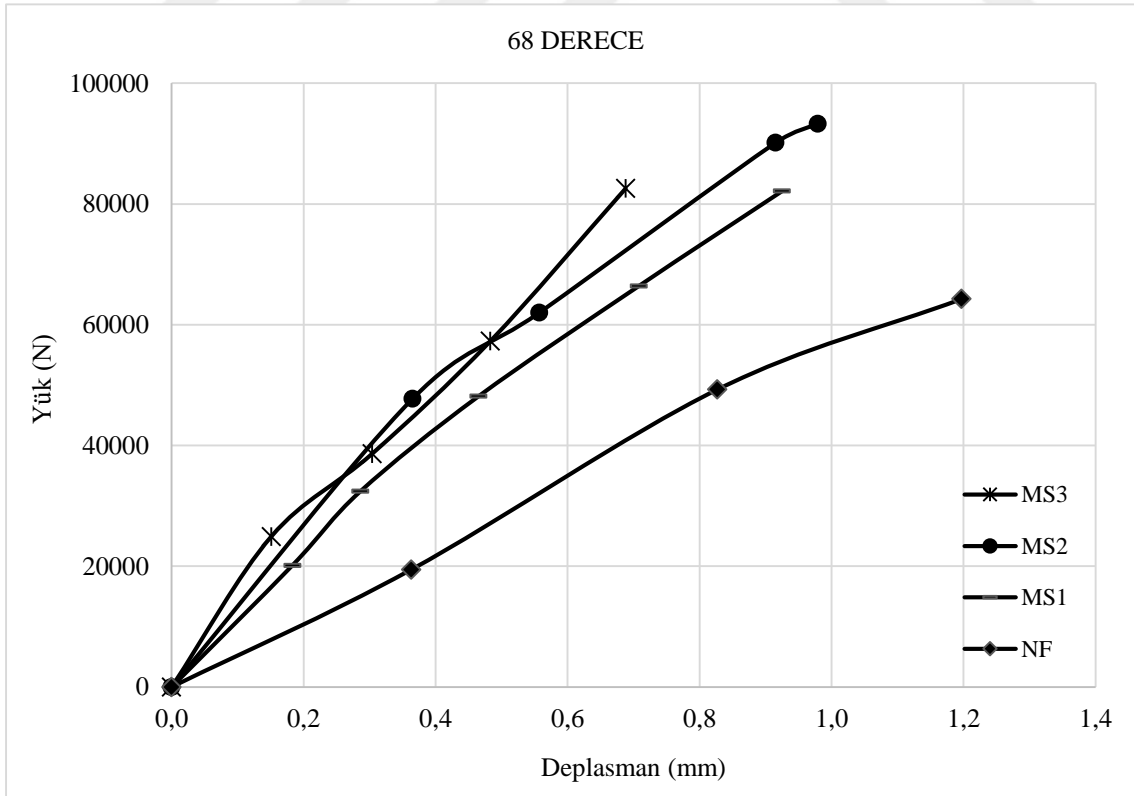
7.3. Lif Oranlarına Göre Düşeyde Yük-Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırılması

7.3.1. 68° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma

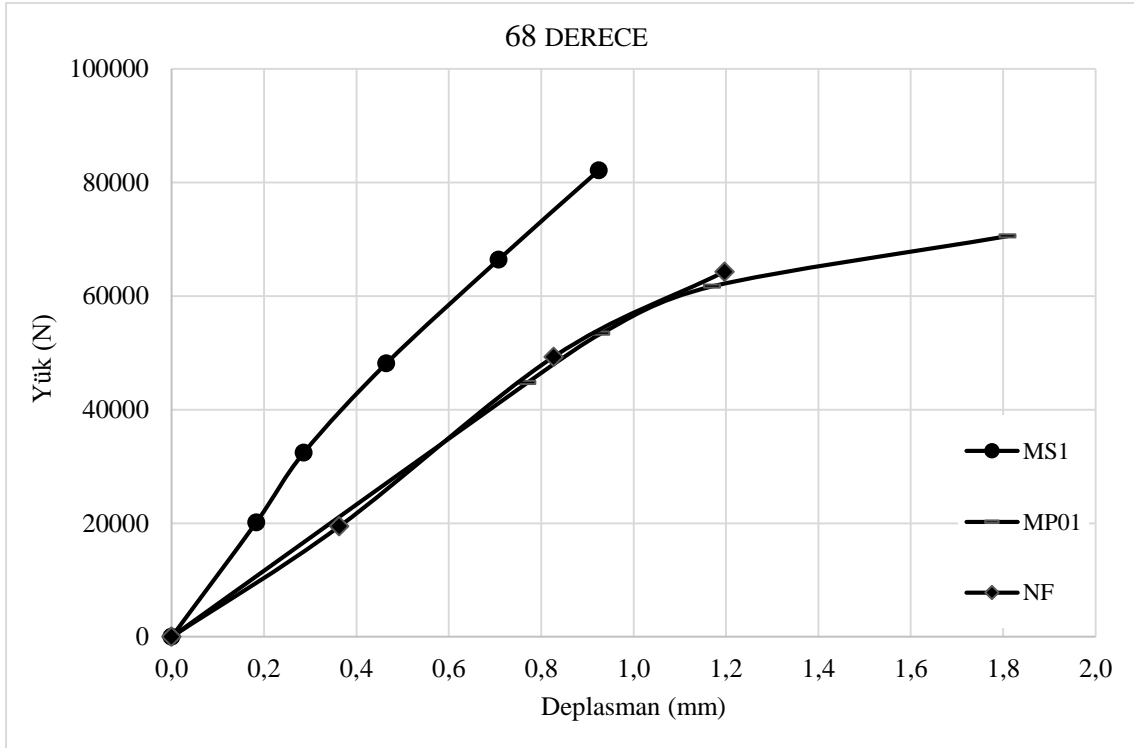
Mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.72’de, mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.73’de, %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.74’de, %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.75’de ve %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 7.76’da verilmiştir. 68° kesme açısıyla kırılan deney elemanlarında her bir lif oranındaki artışla beraber rijitlik de artış göstermiştir. Özellikle %1, %2, %3 mikro çelik lif oranlarına sahip deney elemanları %0,1; %0,2; %0,3 mikro polimer lif oranına sahip deney elemanlarına göre daha fazla bir rijitlik göstermişlerdir. Bununla beraber %0,1 mikro polimer lif içeren numunelerdeki rijitlik artışı çok belirgin olmayıp lif içermeyen referans numunesininkine oldukça yakındır. Aynı zamanda mikro çelik lif içeren numuneler mikro polimer lif içeren numunelere ve referans numunesine göre daha yüksek kesme kuvvetiyle kırılmışlardır.



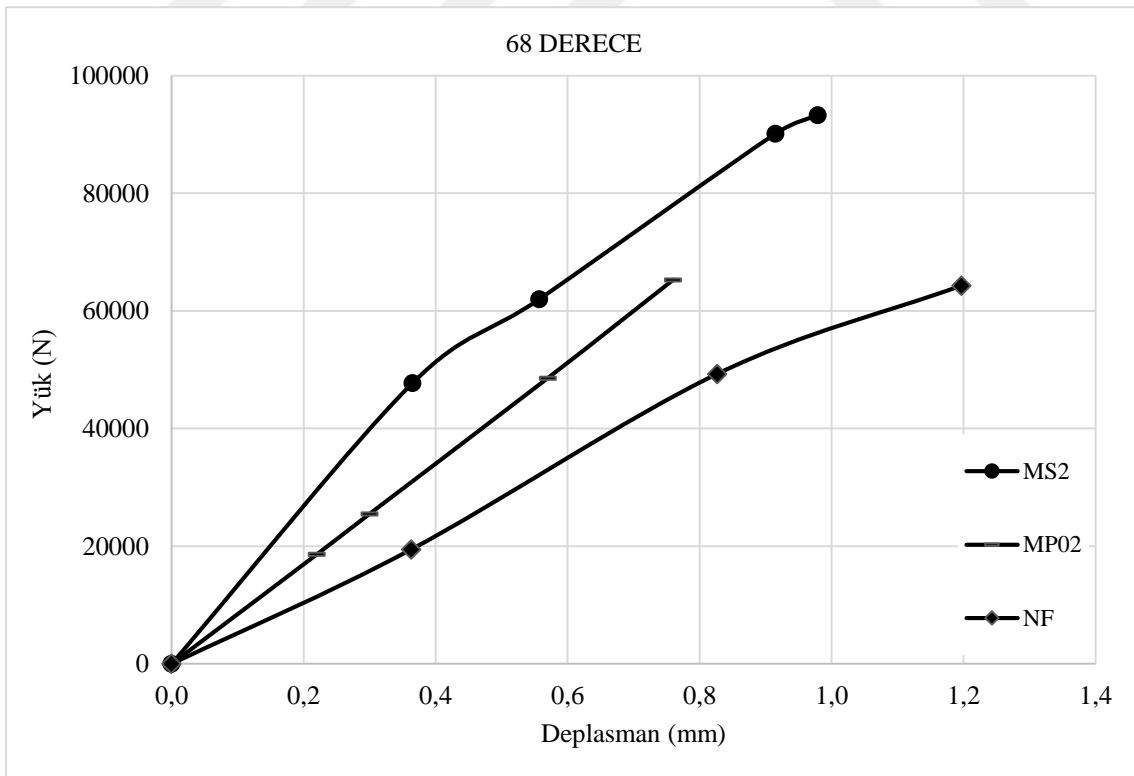
Şekil 7.72. 68° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



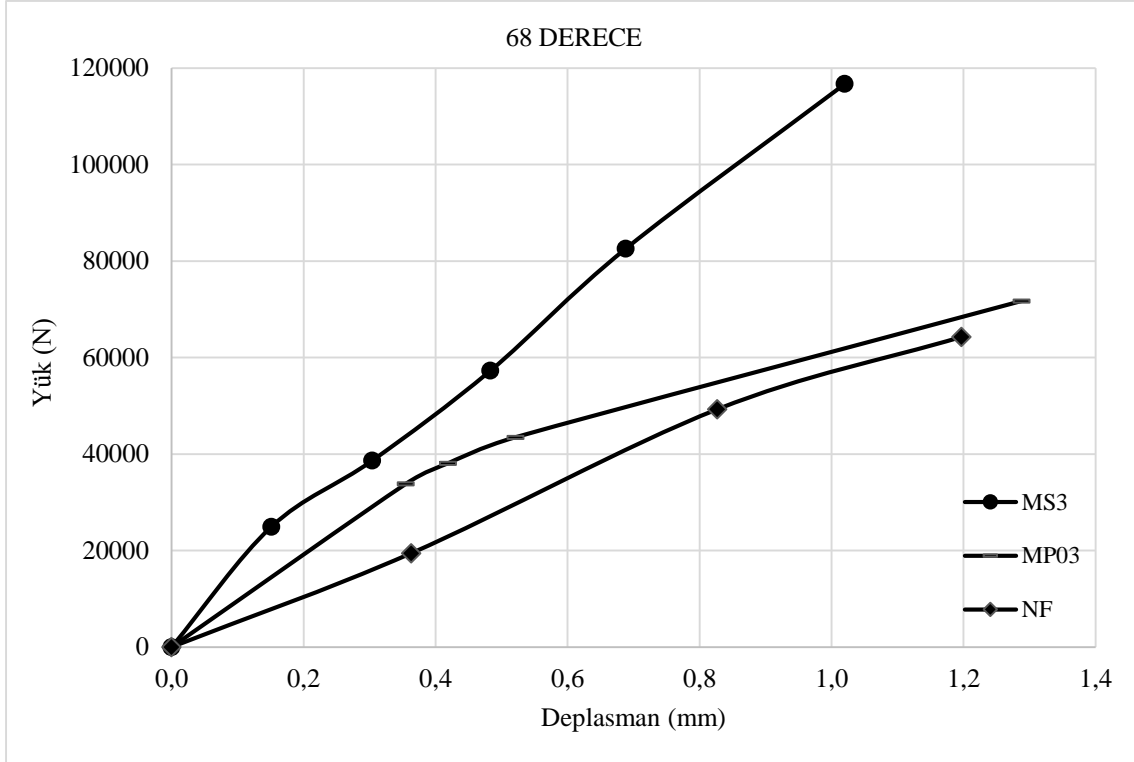
Şekil 7.73. 68° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.74. 68° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

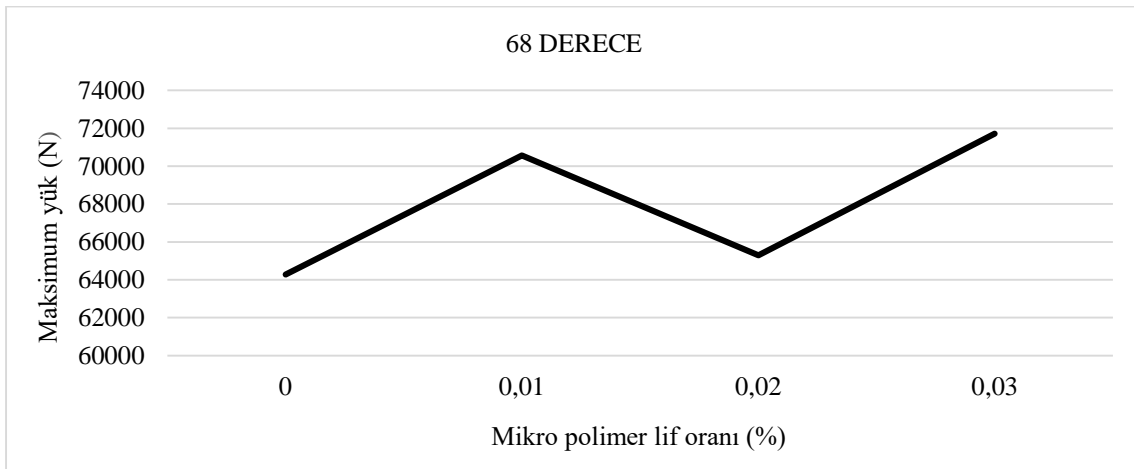


Şekil 7.75. 68° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

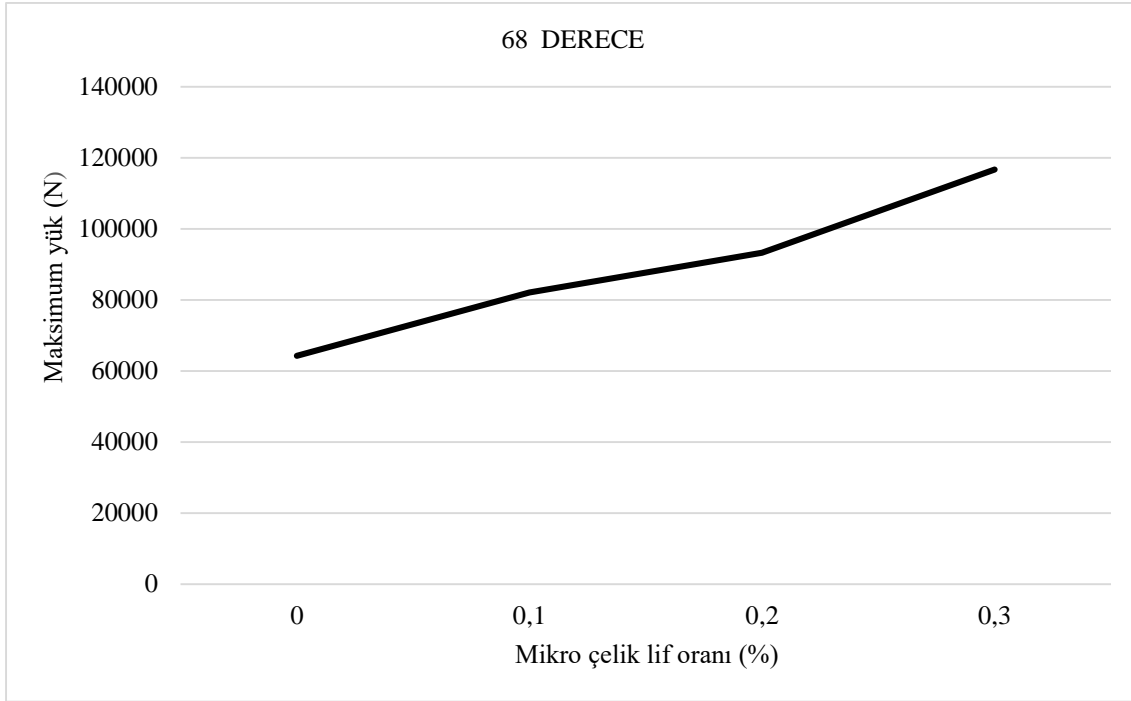


Şekil 7.76. 68° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.77'de ve mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.78'de gösterilmiştir. Mikro çelik lif içeren numunelerde lif oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti artarken mikro polimer lifli betonlar için aynı paralel artış söz konusu değildir.



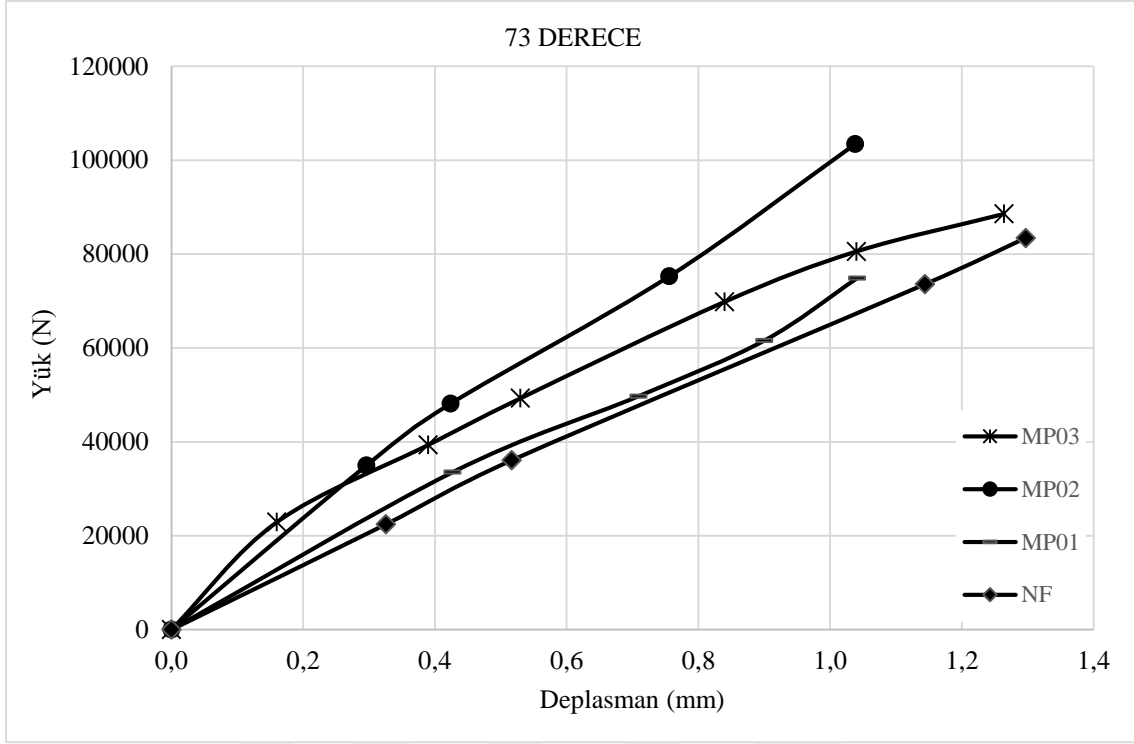
Şekil 7.77. 68° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



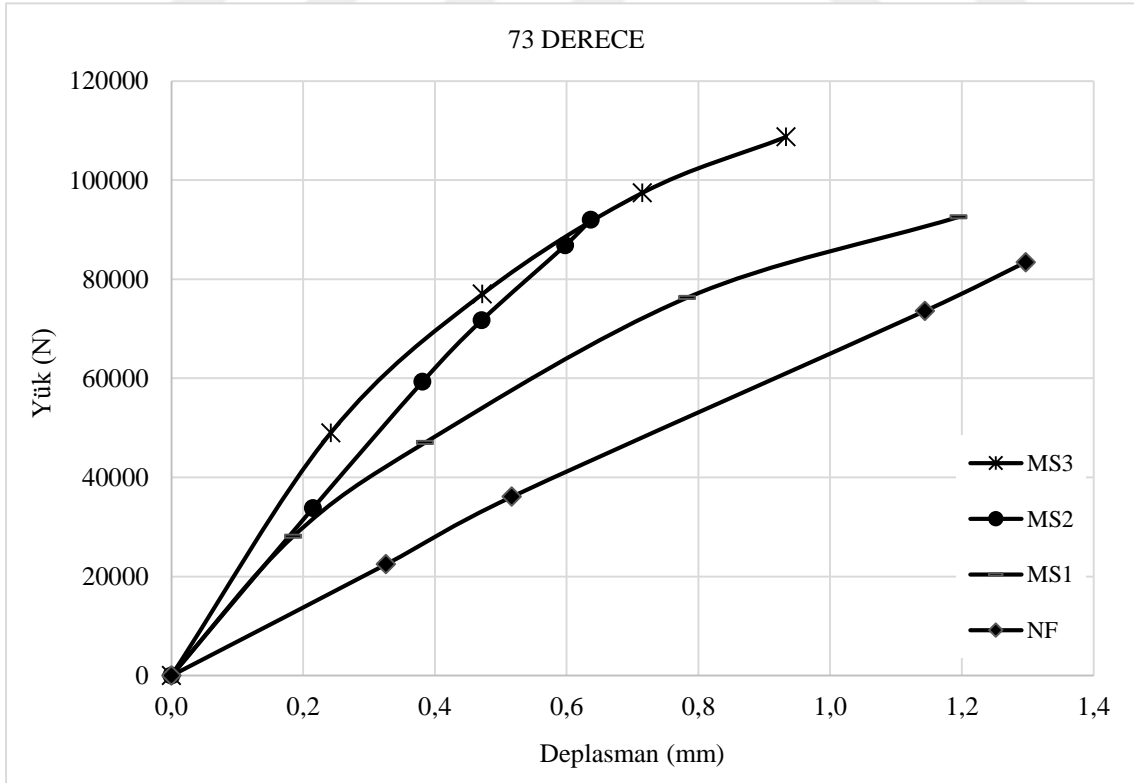
Şekil 7.78. 68° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

7.3.2. 73° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma

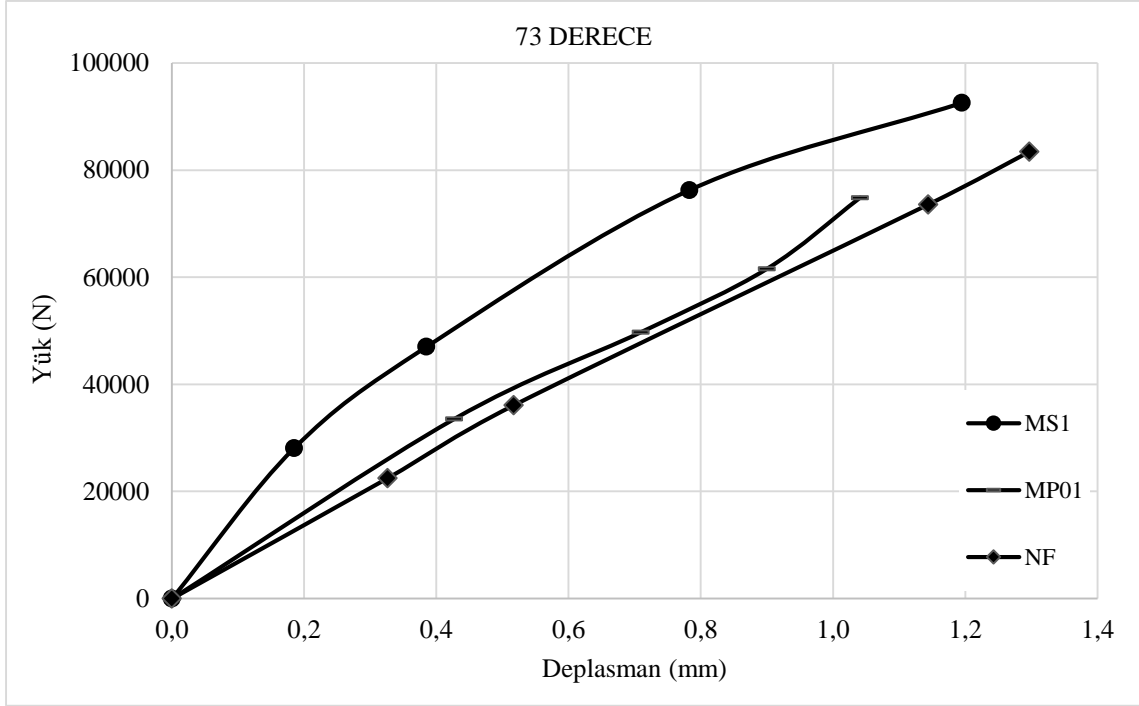
Mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.79'da, mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.80'de, %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.81'de, %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.82'de ve %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 7.83'de verilmiştir. 73° kesme açısıyla kırılan deney elemanlarında her bir lif oranındaki artışla beraber rijitlik de artış göstermiştir. Özellikle %1, %2, %3 mikro çelik lif oranlarına sahip deney elemanları %0,1; %0,2; %0,3 mikro polimer lif oranına sahip deney elemanlarına göre daha fazla bir rijitlik göstermişlerdir. Bununla beraber %0,1 mikro polimer lif içeren numunelerdeki rijitlik artışı çok belirgin olmayıp lif içermeyen referans numunesinin rijitliğine oldukça yakındır. Aynı zamanda mikro çelik lif içeren numuneler mikro polimer lif içeren numunelere ve referans numunesine göre genelde daha yüksek kesme kuvvetiyle kırılmışlardır.



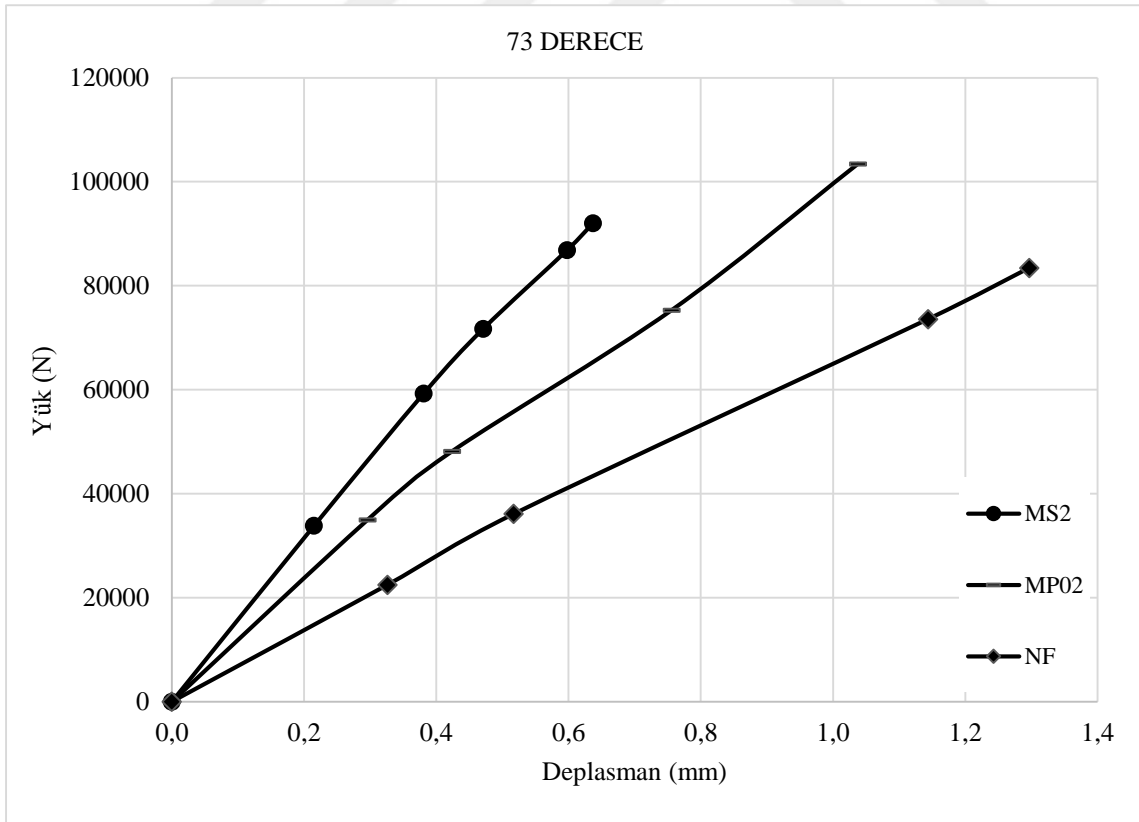
Şekil 7.79. 73° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



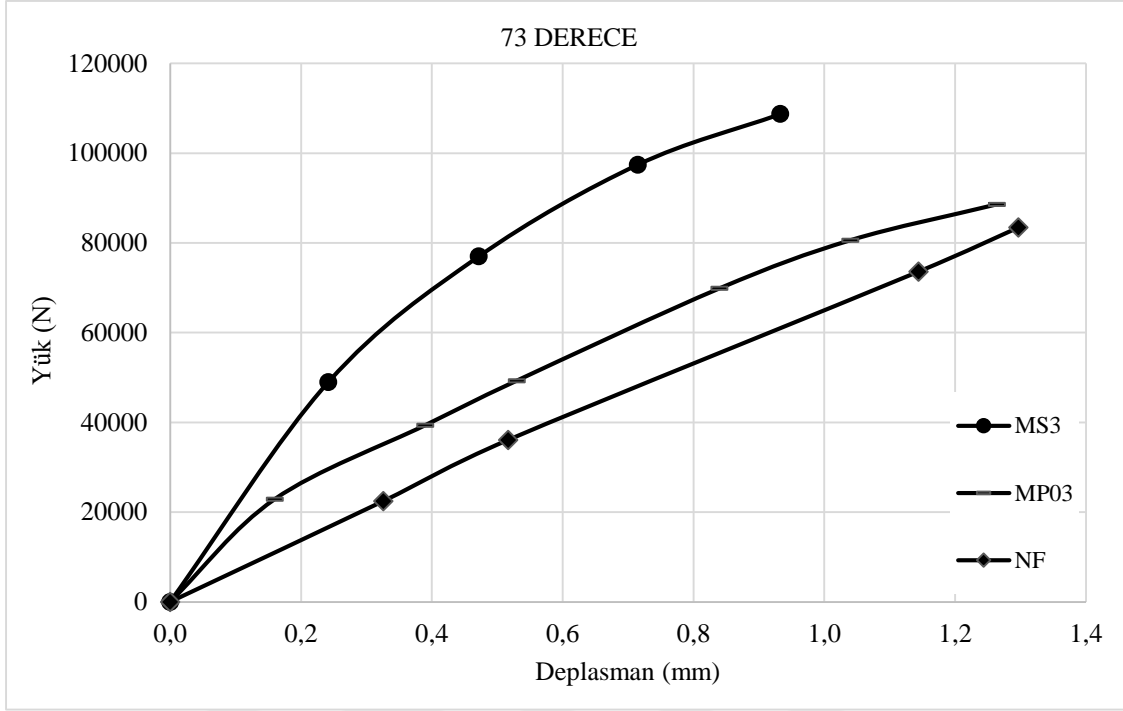
Şekil 7.80. 73° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.81. 73° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

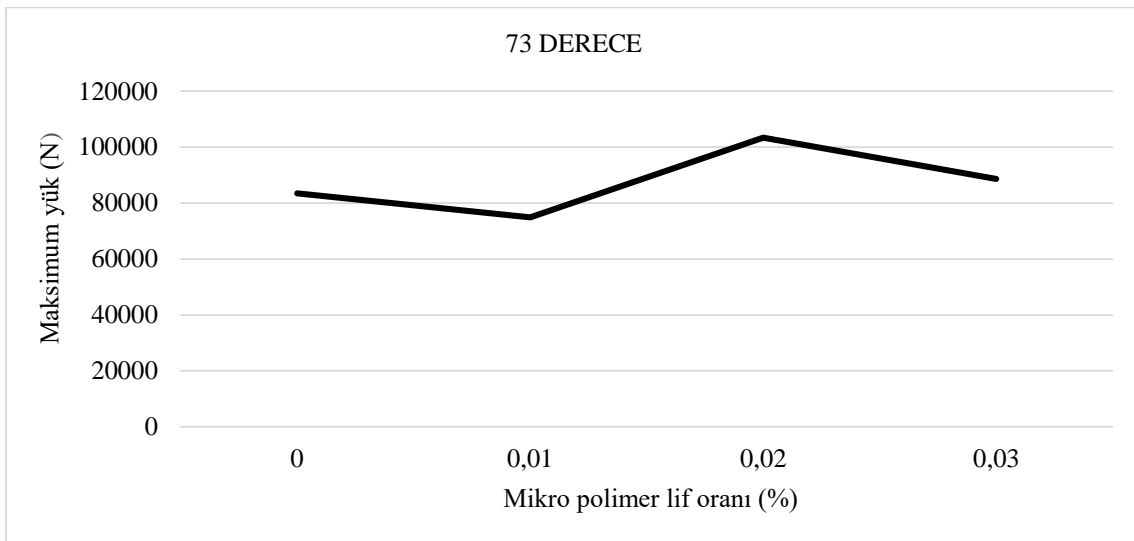


Şekil 7.82. 73° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.83. 73° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.84'de ve mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.85'de gösterilmiştir. Mikro çelik lif içeren numunelerde lif oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti artarken mikro polimer lifli betonlar için aynı artış söz konusu değildir.



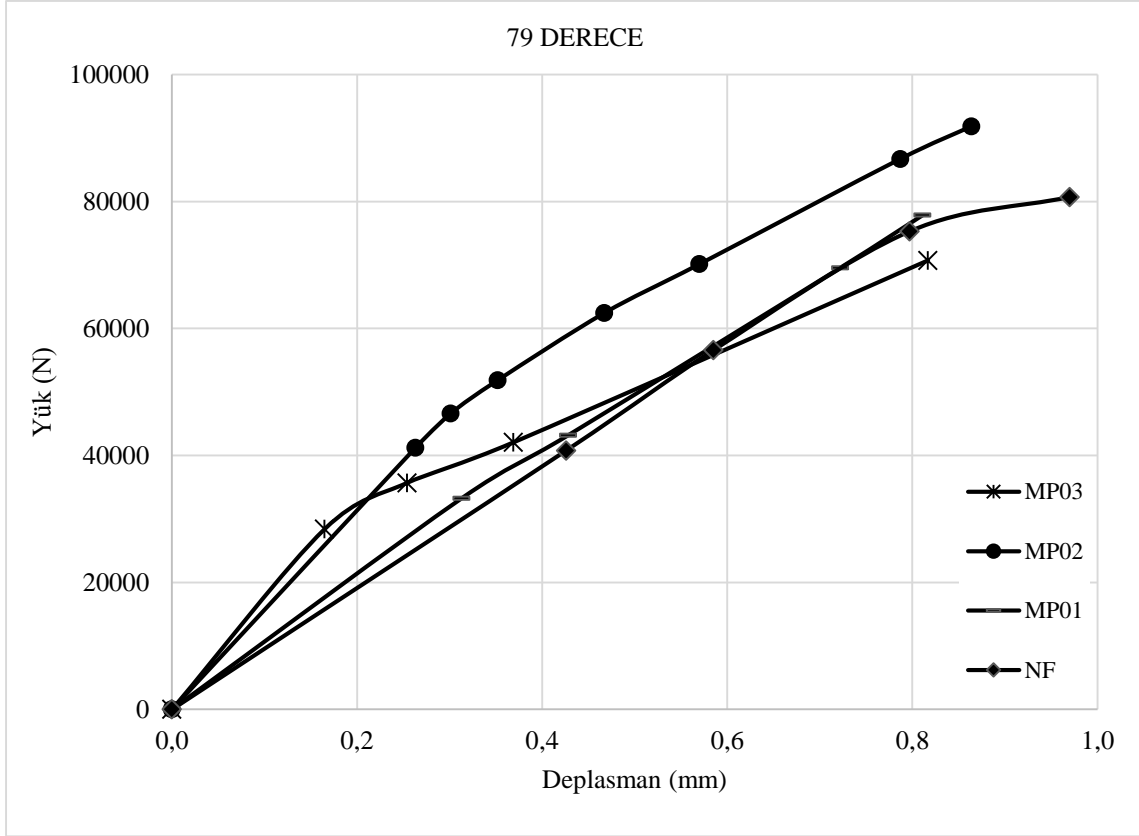
Şekil 7.84. 73° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



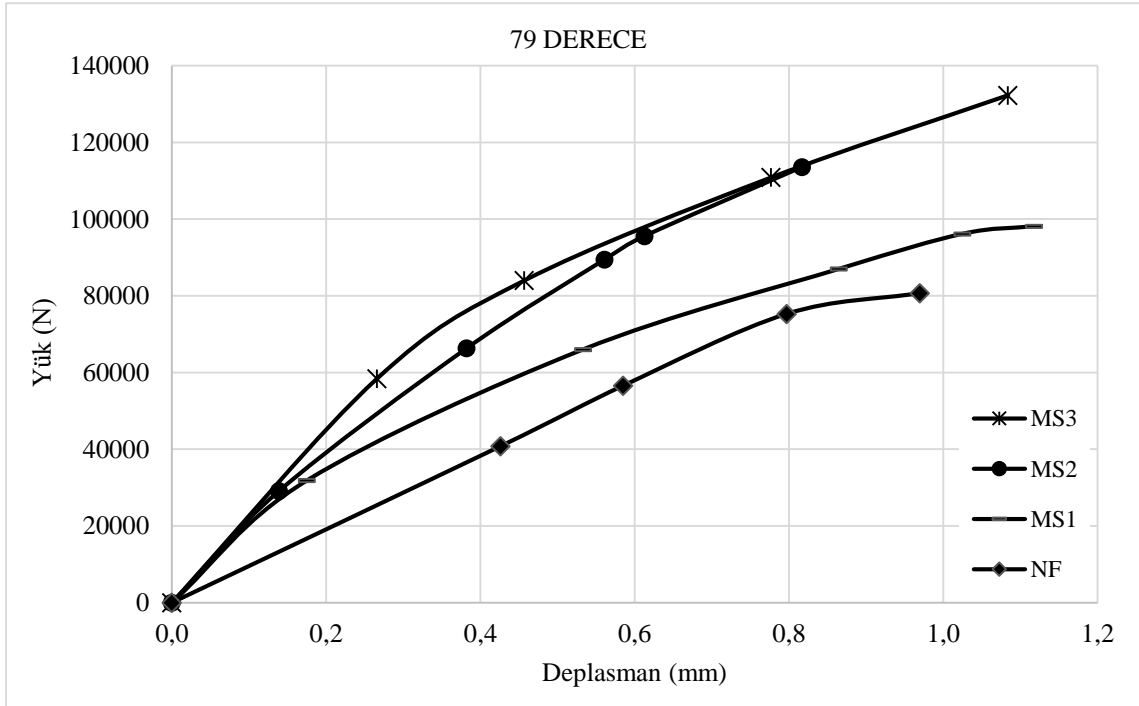
Şekil 7.85. 73° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

7.3.3. 79° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma

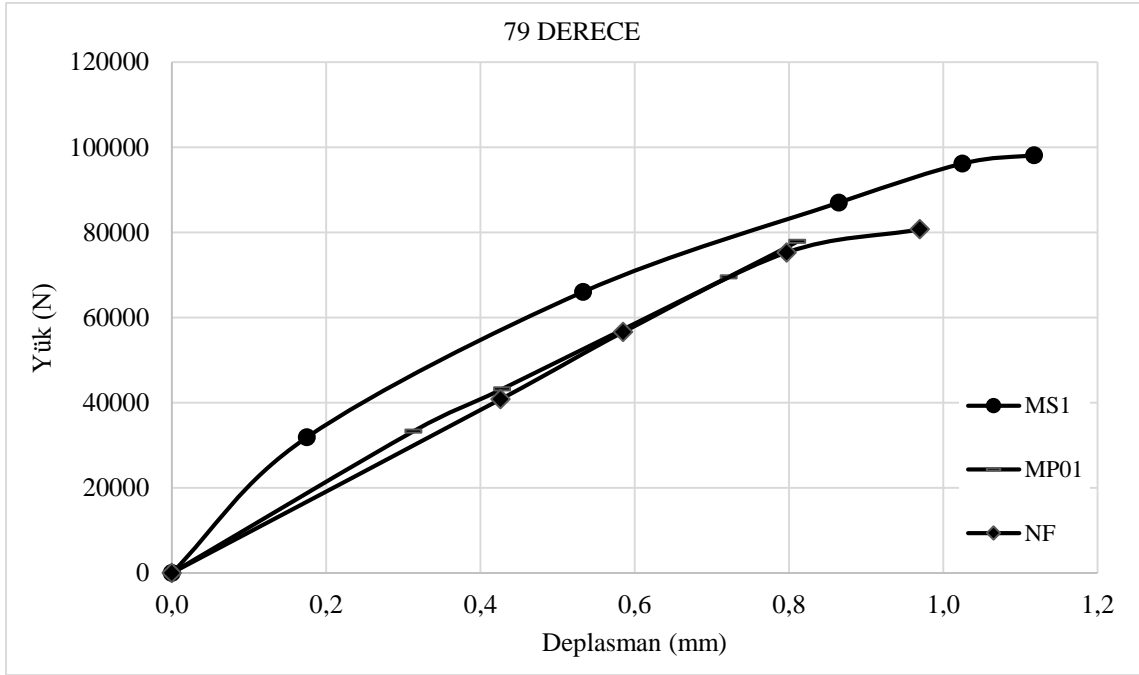
Mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.86'da, mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.87'de, %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.88'de, %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.89'da ve %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 7.90'da verilmiştir. 79° kesme açısıyla kırılan deney elemanlarında her bir lif oranındaki artışla beraber rijitlik de artış göstermiştir. Özellikle %1, %2, %3 mikro çelik lif oranlarına sahip deney elemanları %0,1; %0,2; %0,3 mikro polimer lif oranına sahip deney elemanlarına göre daha fazla bir rijitlik göstermişlerdir. Bununla beraber %0,1 mikro polimer lif içeren numunelerdeki rijitlik artışı çok belirgin olmayıp lif içermeyen referans numunesinin rijitliğine oldukça yakındır. Aynı zamanda mikro çelik lif içeren numuneler mikro polimer lif içeren numunelere ve referans numunesine göre daha yüksek kesme kuvvetiyle kırılmışlardır.



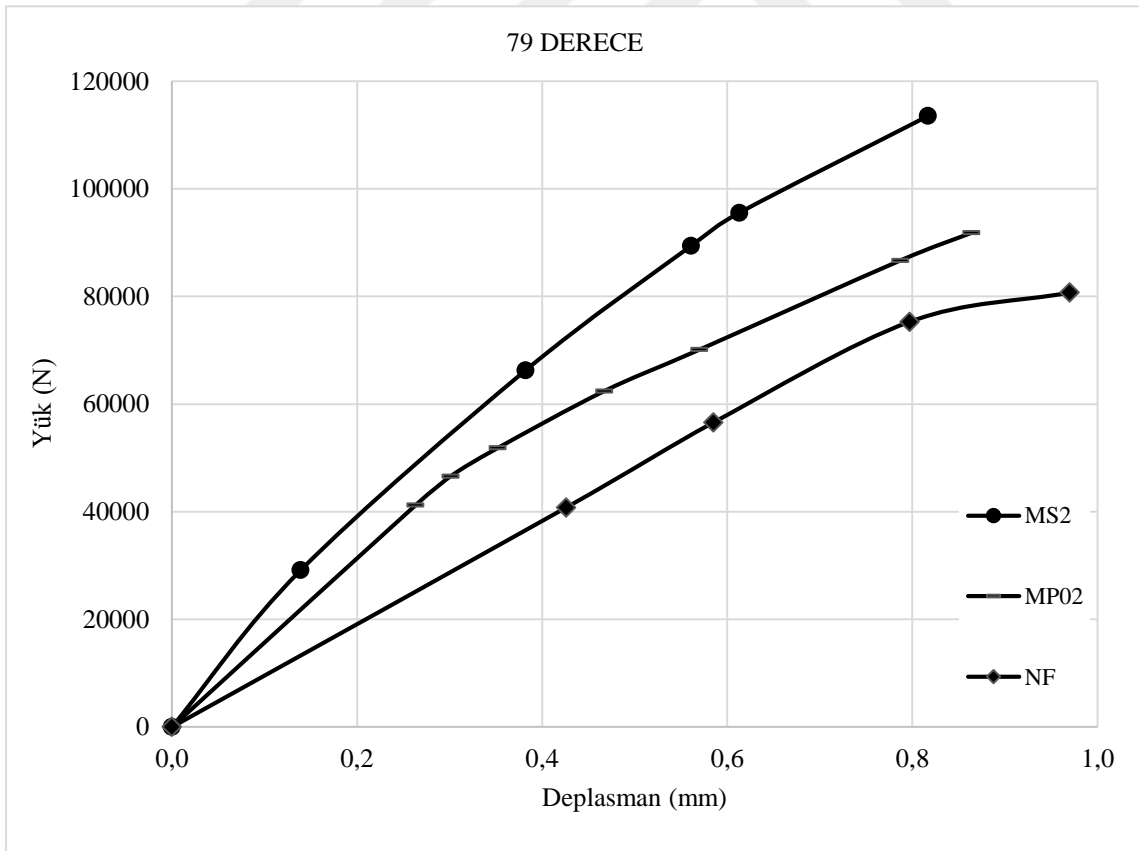
Şekil 7.86. 79° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



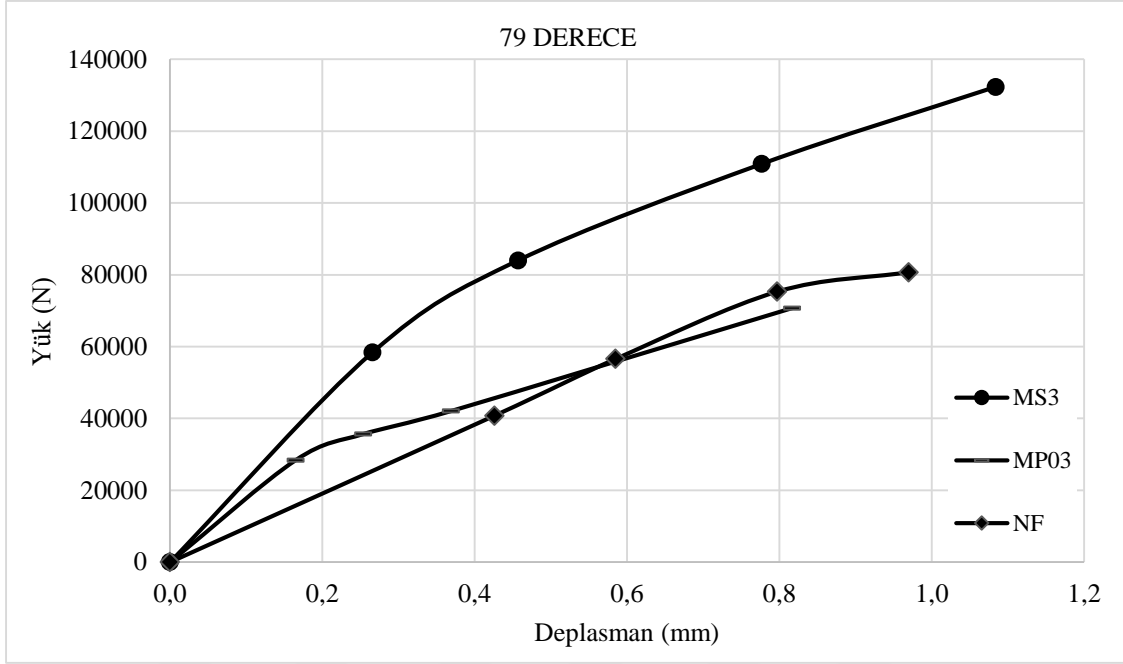
Şekil 7.87. 79° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.88. 79° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

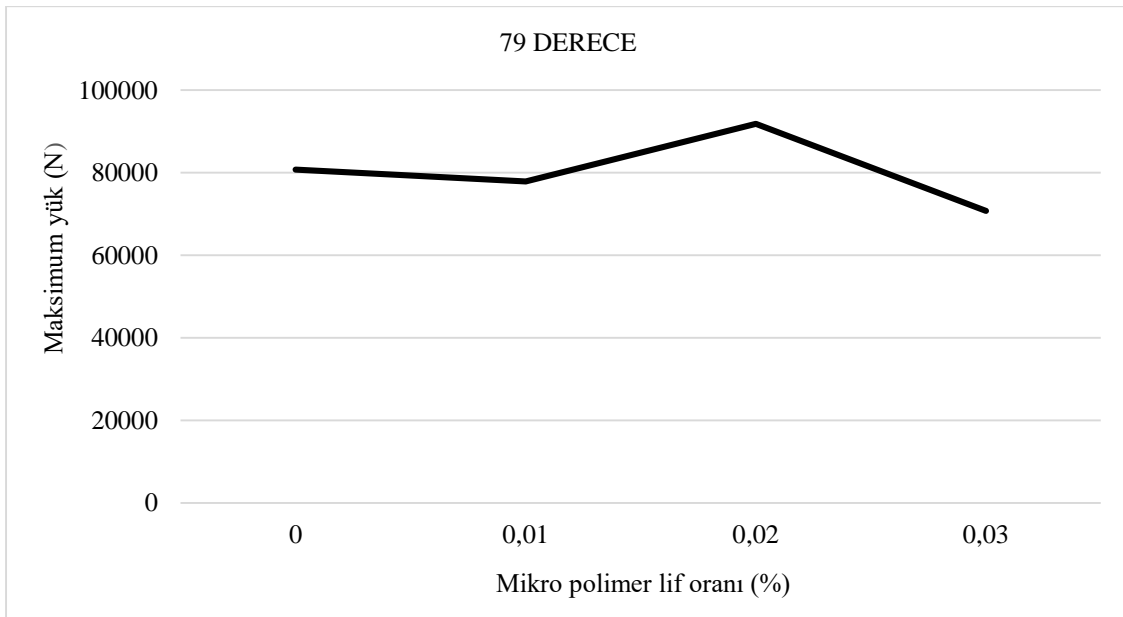


Şekil 7.89. 79° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.90. 79° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.91'de ve mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.92'de gösterilmiştir. Mikro çelik lif içeren numunelerde lif oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti artarken mikro polimer lifli betonlar için aynı artış söz konusu değildir.



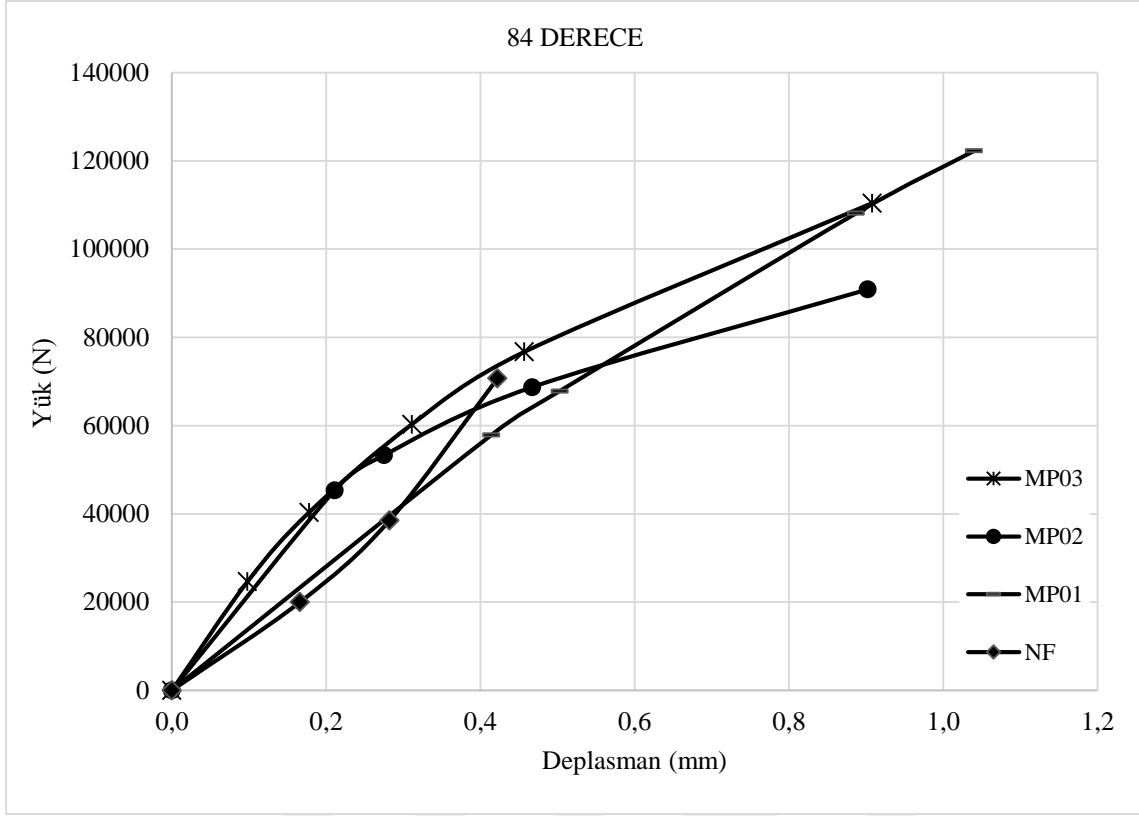
Şekil 7.91. 79° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



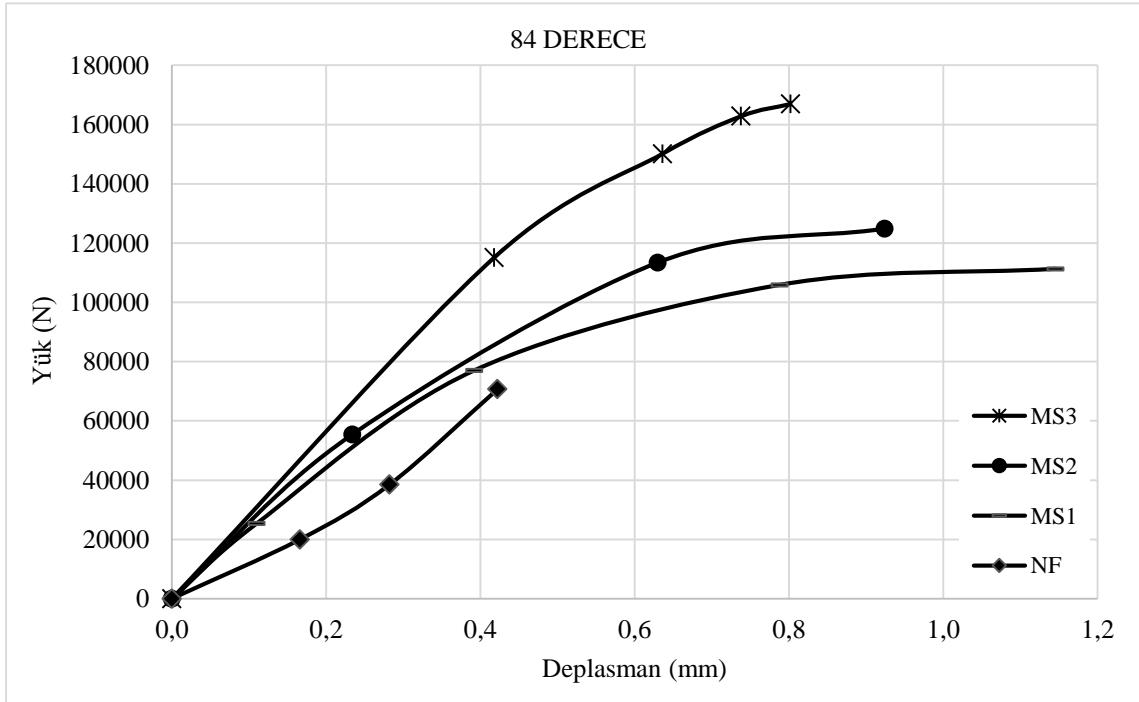
Şekil 7.92. 79° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

7.3.4. 84° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma

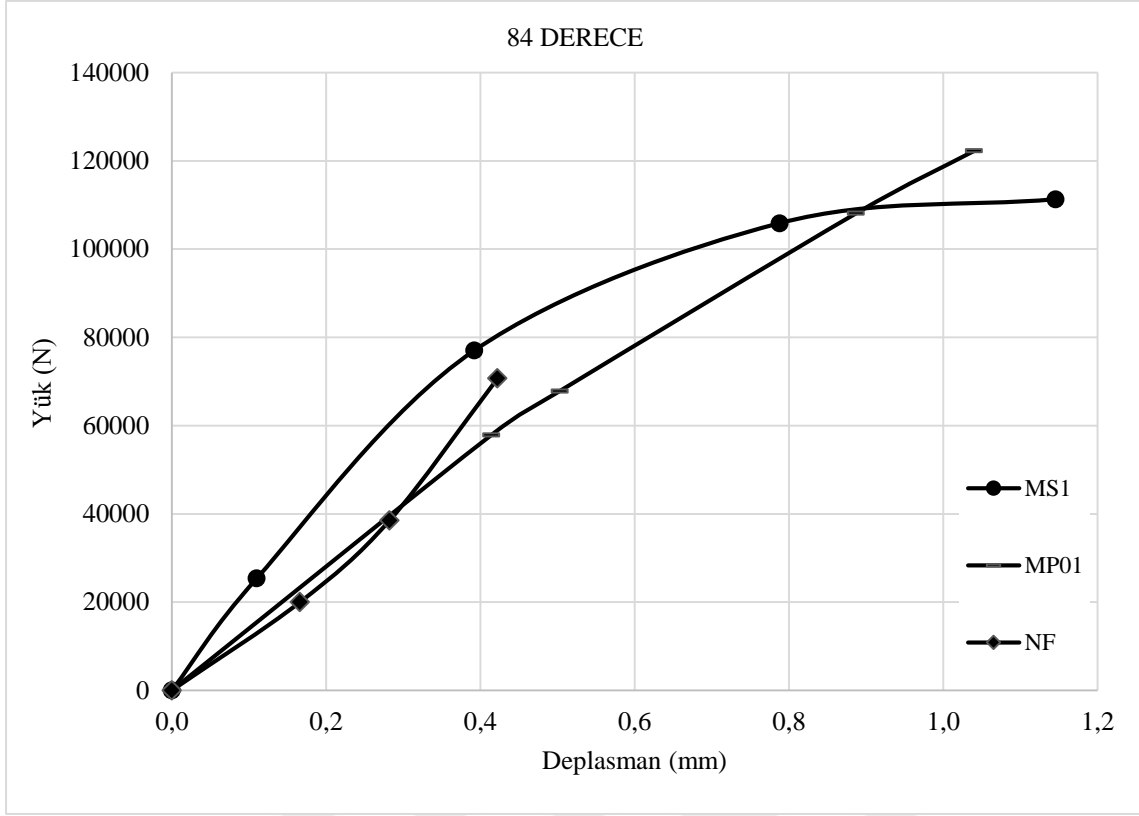
Mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.93'de, mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.94'de, %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.95'de, %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.96'da ve %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 7.97'de verilmiştir. 84° kesme açısıyla kırılan deney elemanlarında her bir lif oranındaki artışla beraber rijitlik de artış göstermiştir. Özellikle %1, %2, %3 mikro çelik lif oranlarına sahip deney elemanları %0,1; %0,2; %0,3 mikro polimer lif oranına sahip deney elemanlarına göre daha fazla bir rijitlik göstermişlerdir. Bununla beraber %0,1 mikro polimer lif içeren numunelerdeki rijitlik artışı çok belirgin olmayıp lif içermeyen referans numunesinin rijitliğine oldukça yakındır. Aynı zamanda mikro çelik lif içeren numuneler mikro polimer lif içeren numunelere ve referans numunesine göre genelde daha yüksek kesme kuvvetiyle kırılmışlardır.



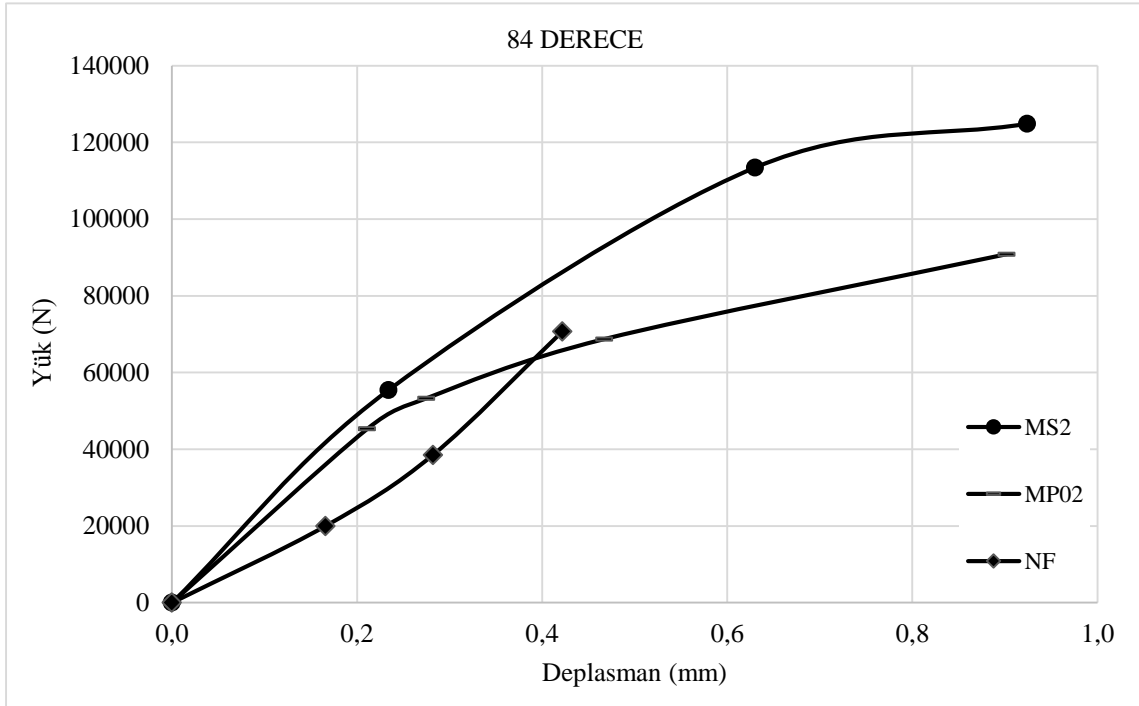
Şekil 7.93. 84° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



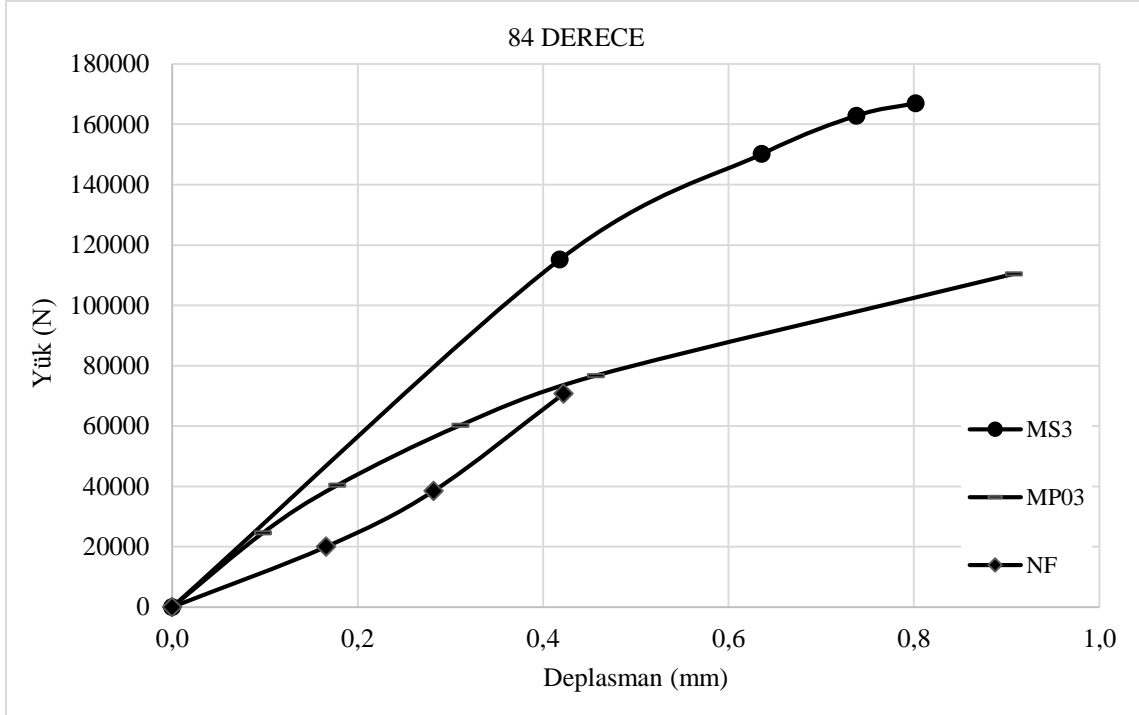
Şekil 7.94. 84° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.95. 84° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

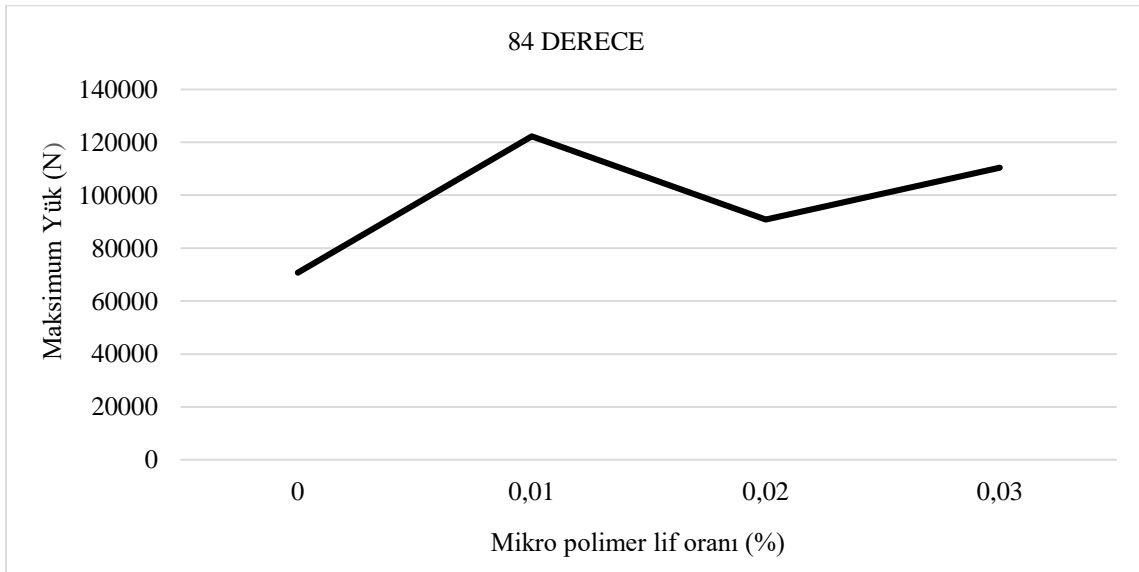


Şekil 7.96. 84° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

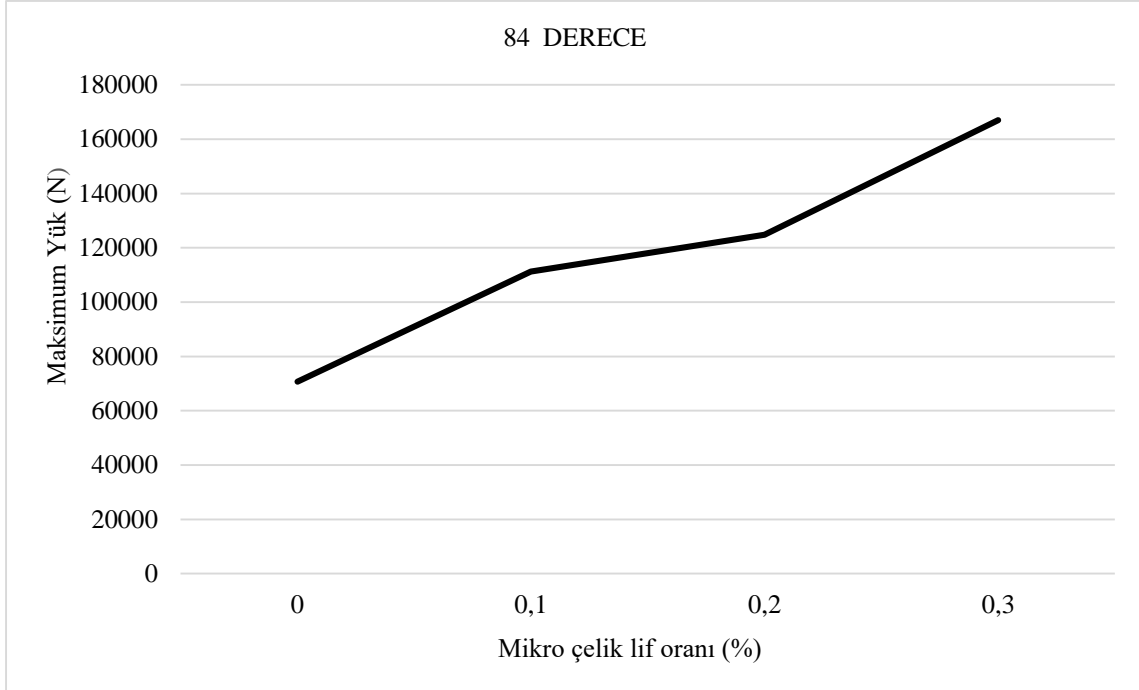


Şekil 7.97. 84° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.98’de ve mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.99’da gösterilmiştir. Mikro çelik lif içeren numunelerde lif oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti artarken mikro polimer lifli betonlar için aynı artış söz konusu değildir.



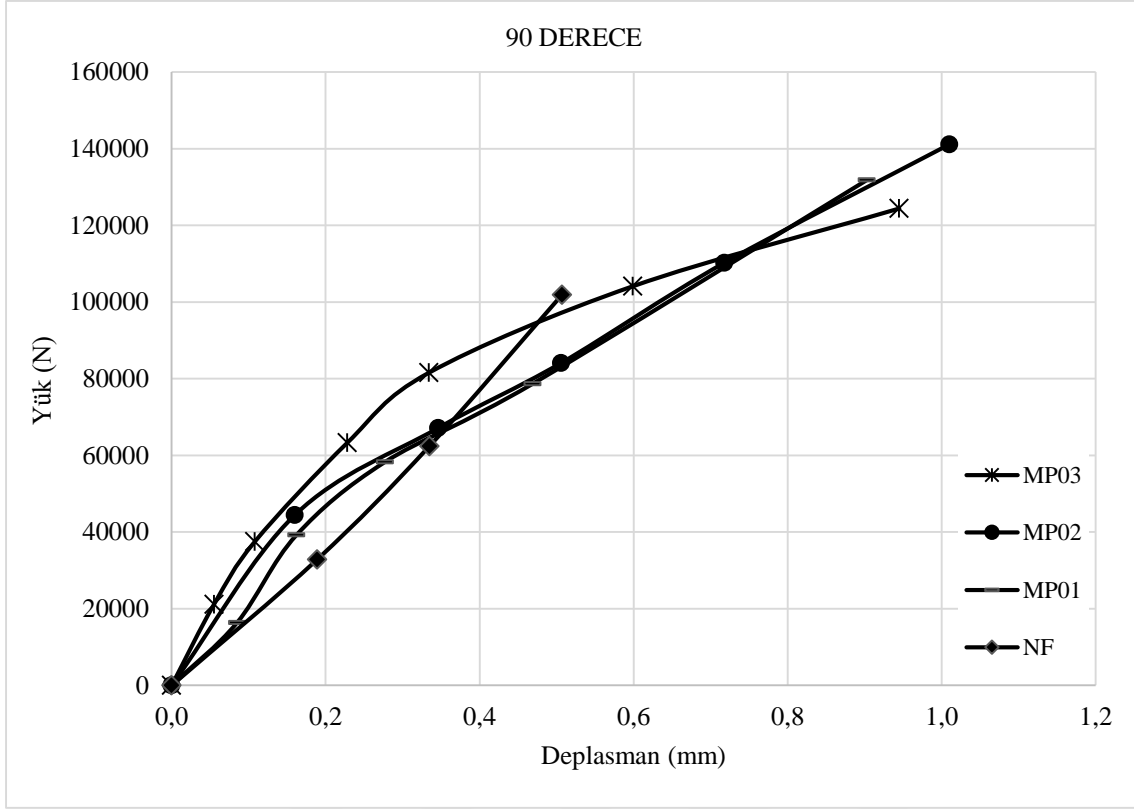
Şekil 7.98. 84° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



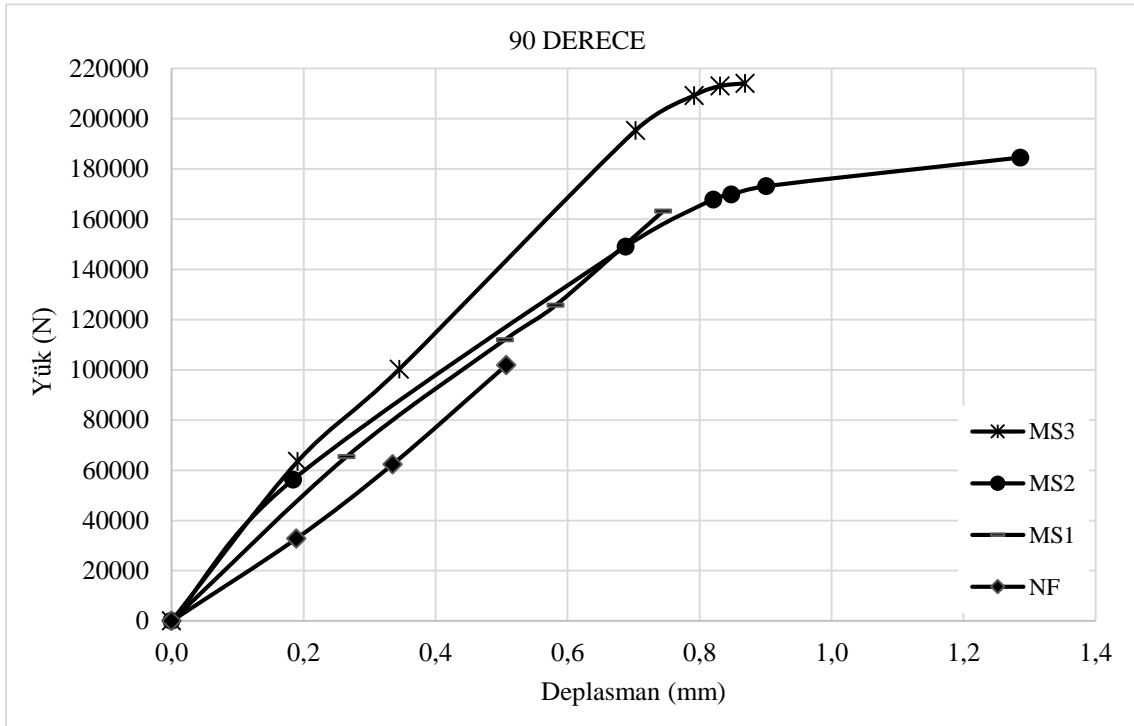
Şekil 7.99. 84° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

7.3.5. 90° kesme açısıyla kırılan deney elemanları için karşılaştırma

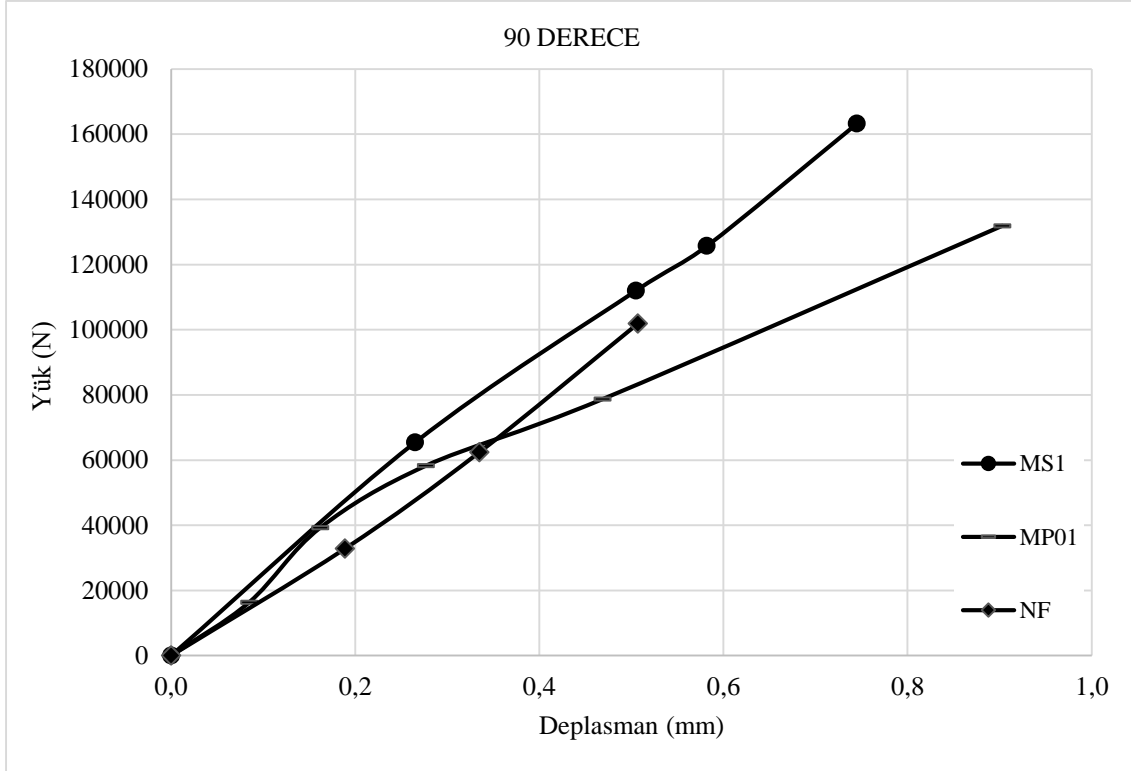
Mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.100'de, mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.101'de, %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.102'de, %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması Şekil 7.103'de ve %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeren deney elemanlarının düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması ise Şekil 7.104'de verilmiştir. 90° kesme açısıyla kırılan deney elemanlarında her bir lif oranındaki artışla beraber rijitlik de artış göstermiştir. Özellikle %1, %2, %3 mikro çelik lif oranlarına sahip deney elemanları %0,1; %0,2; %0,3 mikro polimer lif oranına sahip deney elemanlarına göre daha fazla bir rijitlik göstermişlerdir. Bununla beraber %0,1 mikro polimer lif içeren numunelerdeki rijitlik artışı çok belirgin olmayıp lif içermeyen referans numunesinin rijitliğine oldukça yakındır. Aynı zamanda mikro çelik lif içeren numuneler mikro polimer lif içeren numunelere ve referans numunesine göre daha yüksek kesme kuvvetiyle kırılmışlardır.



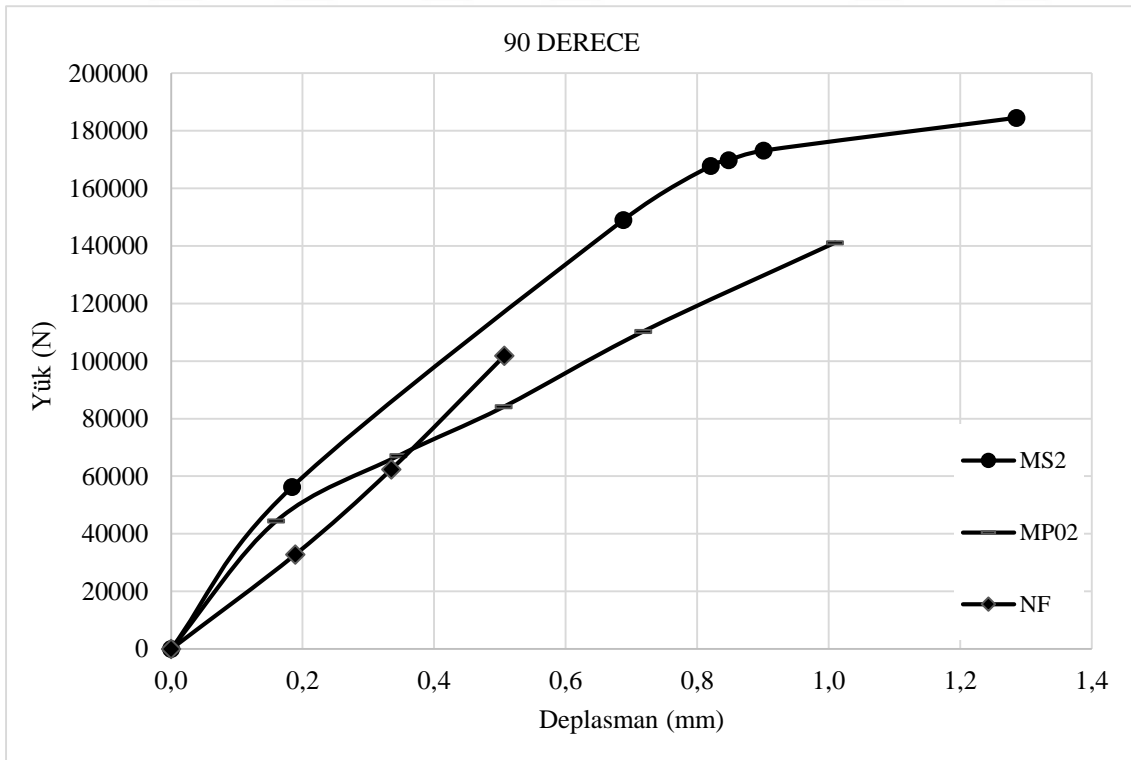
Şekil 7.100. 90° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



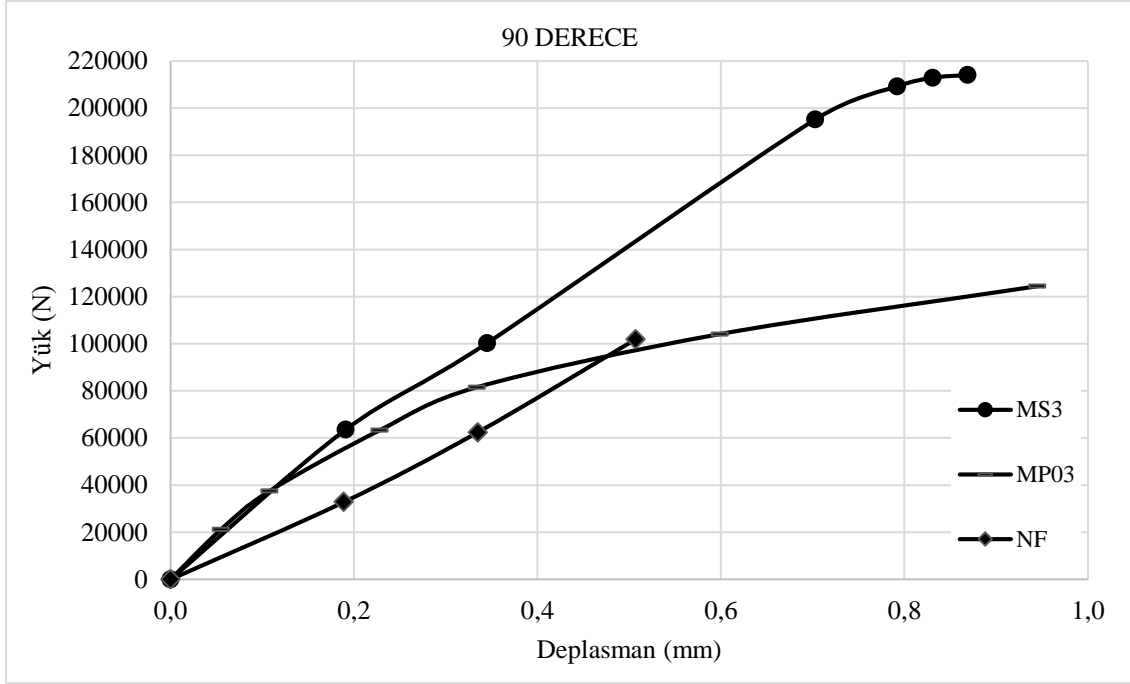
Şekil 7.101. 90° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranlarına göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 7.102. 90° ile kırılan numuneler için %1 mikro çelik ve %0,1 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

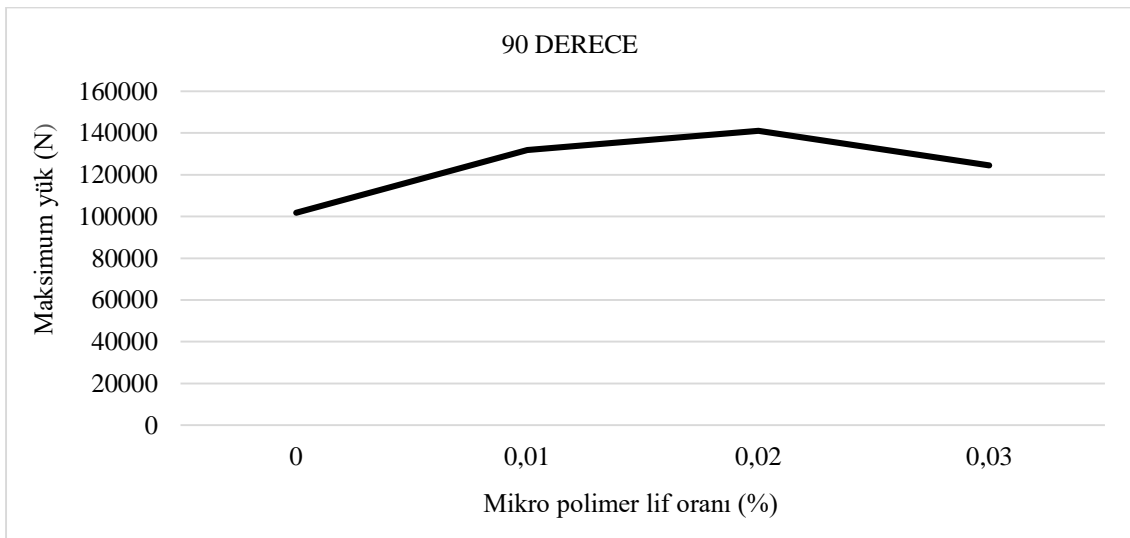


Şekil 7.103. 90° ile kırılan numuneler için %2 mikro çelik ve %0,2 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

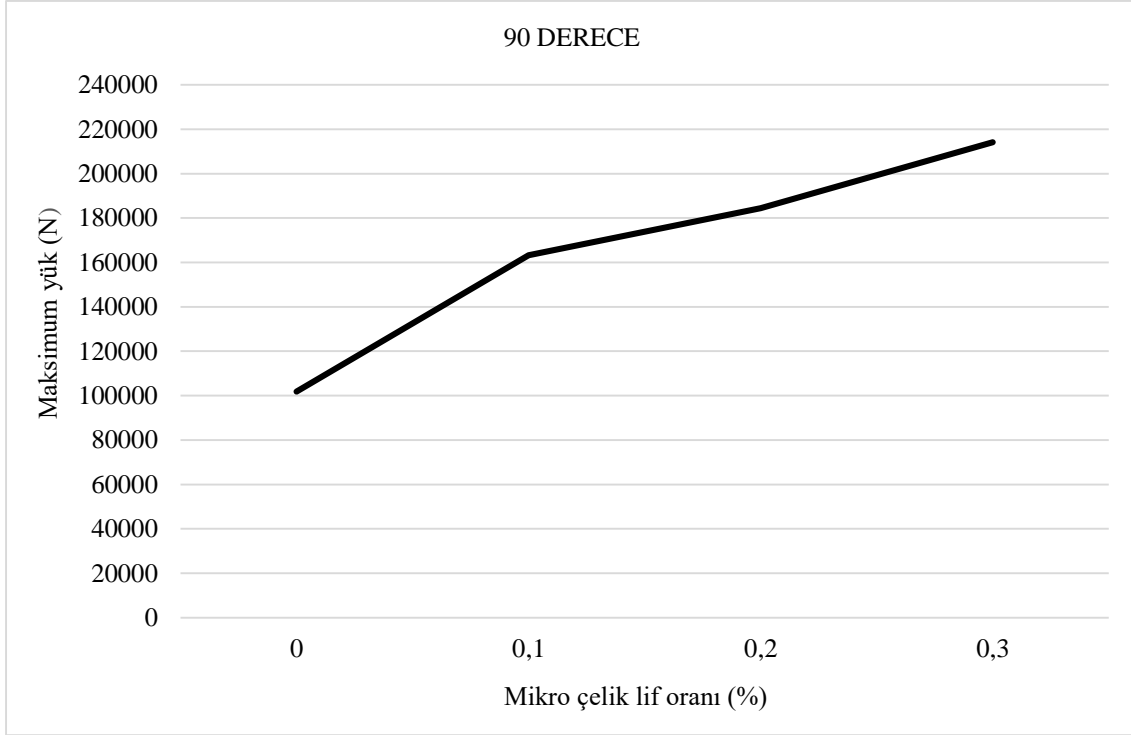


Şekil 7.104. 90° ile kırılan numuneler için %3 mikro çelik ve %0,3 mikro polimer lif içeriğine göre düşeyde yük-deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.105'de ve mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması Şekil 7.106'da gösterilmiştir. Mikro çelik lif içeren numunelerde lif oranı arttıkça maksimum kesme kuvveti artarken mikro polimer lifli betonlar için aynı artış söz konusu değildir.



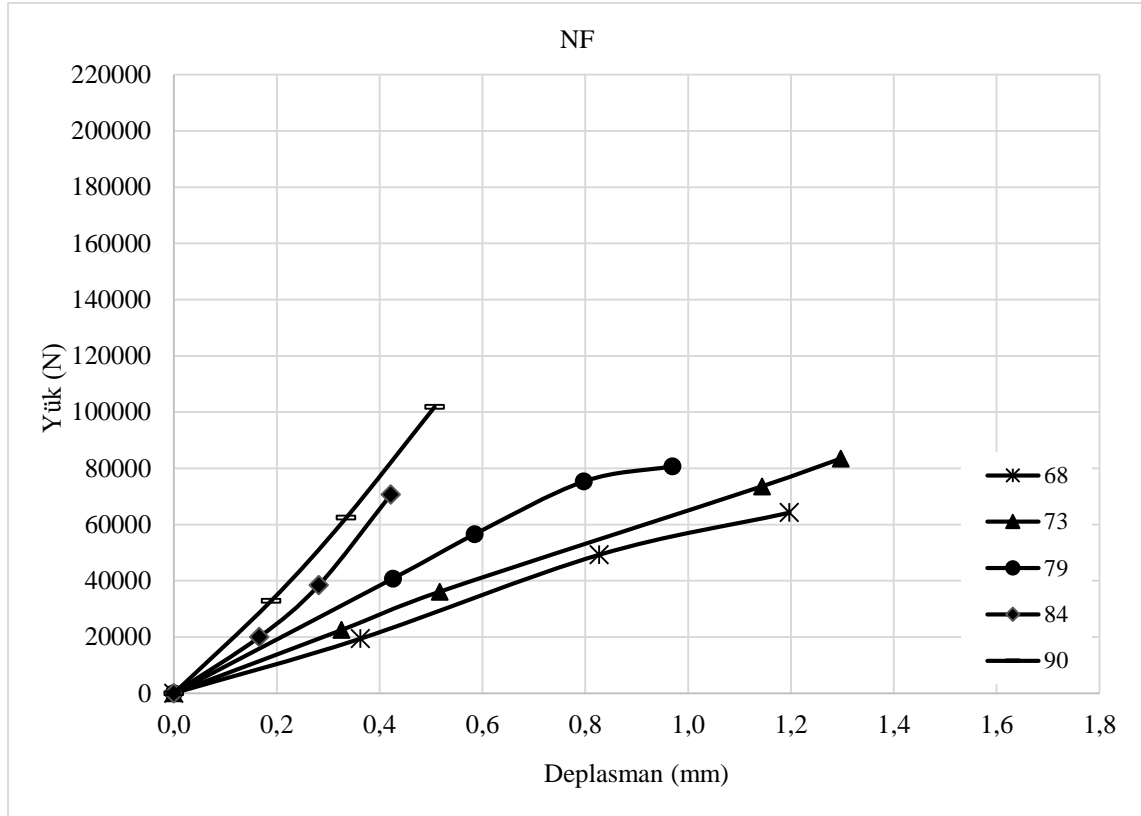
Şekil 7.105. 90° ile kırılan numuneler için mikro polimer lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



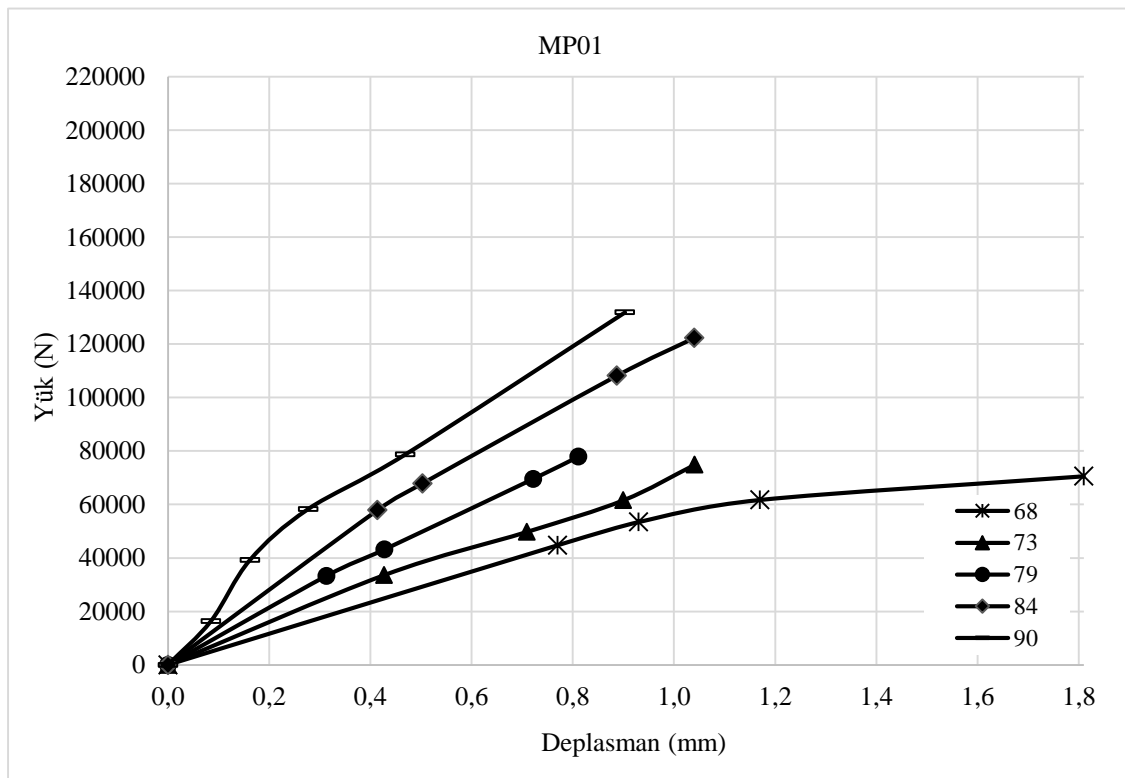
Şekil 7.106. 90° ile kırılan numuneler için mikro çelik lif oranına göre maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

7.4. Deney Elemanlarının Düşeyde Yük-Deplasman Grafiklerinin Kesme Açıklarına Göre Karşılaştırılması

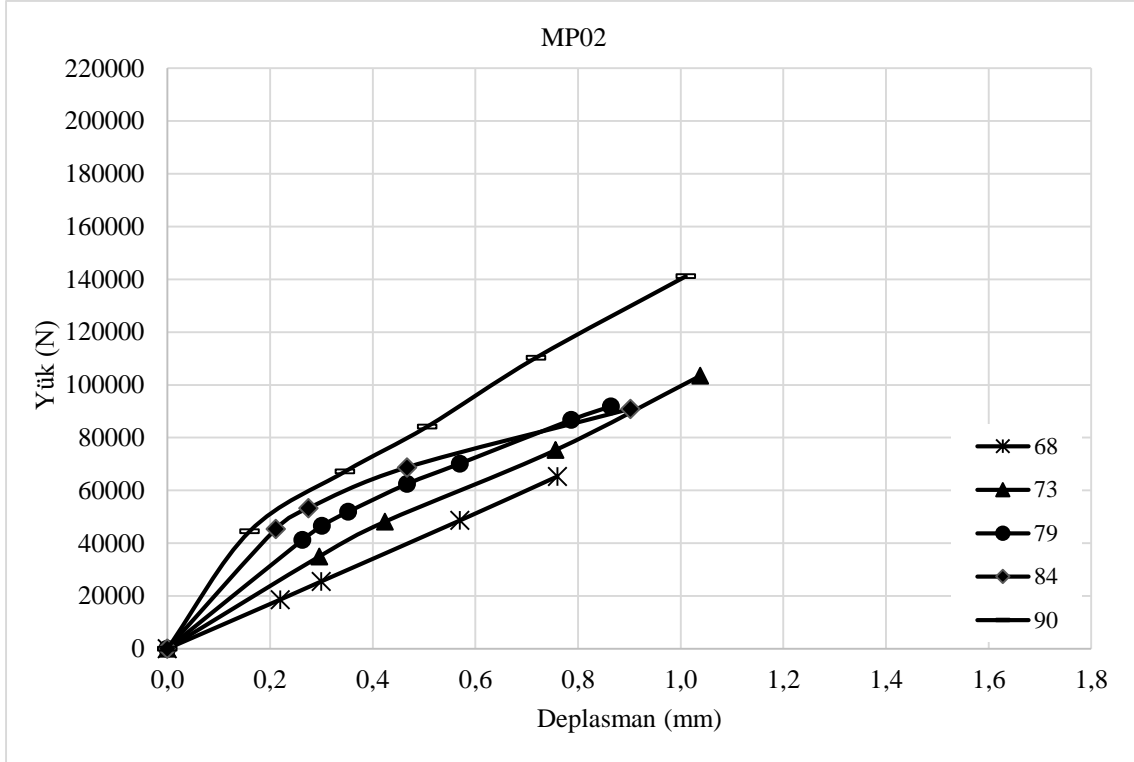
Deney elemanlarının kesme açılarına göre karşılaştırılması lifsiz numuneler için Şekil 7.107’de, %0,1 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.108’de, %0,2 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.109’da, %0,3 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.110’da, % 1 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.111’de, %2 mikro çelik lifli numuneler için 7.112’de ve %3 mikro çelik lifli numuneler için ise Şekil 7.113’de gösterilmiştir. Kesme açısı büyüdükçe numunelerde rijitlik artmıştır. Bununla beraber farklı lif oranlardaki numunelerin çoğunda kesme açısı büyüdükçe maksimum kesme kuvvetleri de büyümüştür. Ancak %0,2 mikro polimer lifli, %0,3 mikro polimer lifli ve %3 mikro çelik lifli numunelerde sınır açıların aralarındaki bazı açı değerlerinde aynı artış görülmemiştir. Buna rağmen her bir lif oranı için, bütün numuneler kendi aralarında 68° kesme açısında minimum kesme kuvvetine, 90° kesme açısında maksimum kesme kuvvetine sahiptirler. Aynı zamanda genel olarak kırılmadan önce mikro polimer lifli numuneler mikro çelik lifli numunelere göre daha düşük kesme kuvvetlerinde daha büyük deplasmanlar yapmıştır.



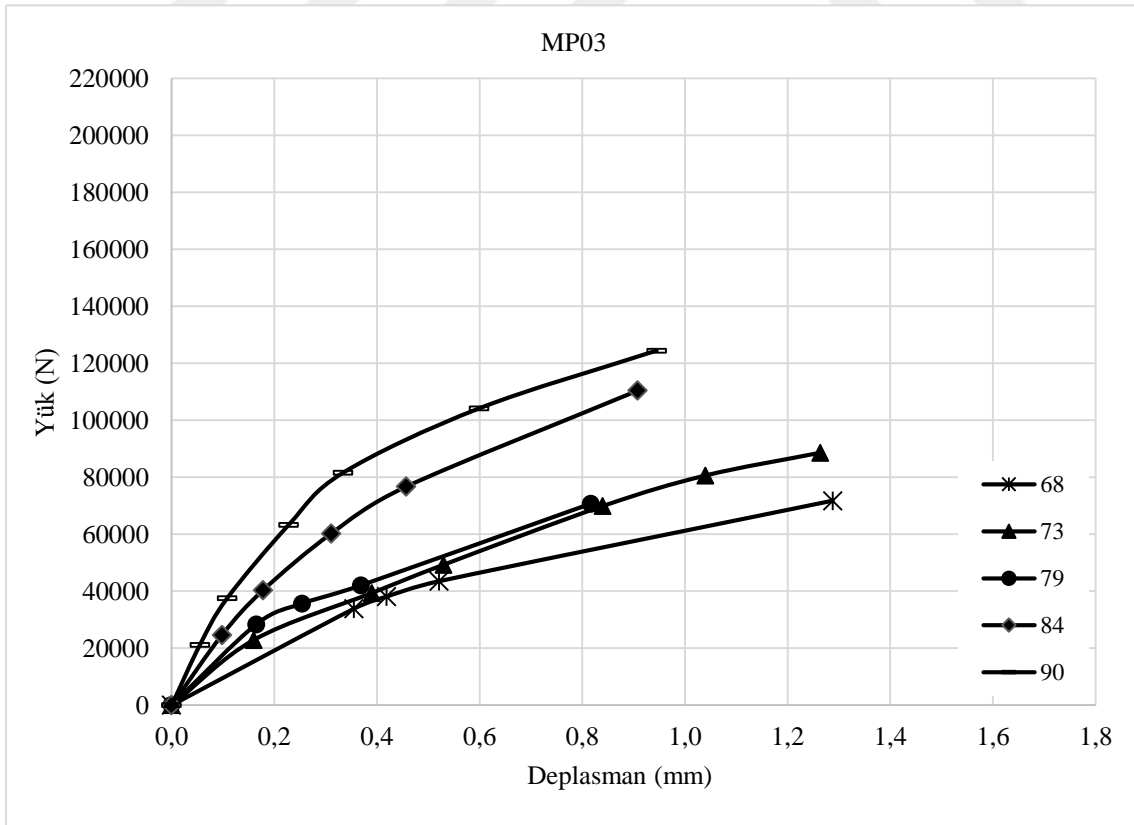
Şekil 7.107. Lifsiz deney elemanlarının karşılaştırılması



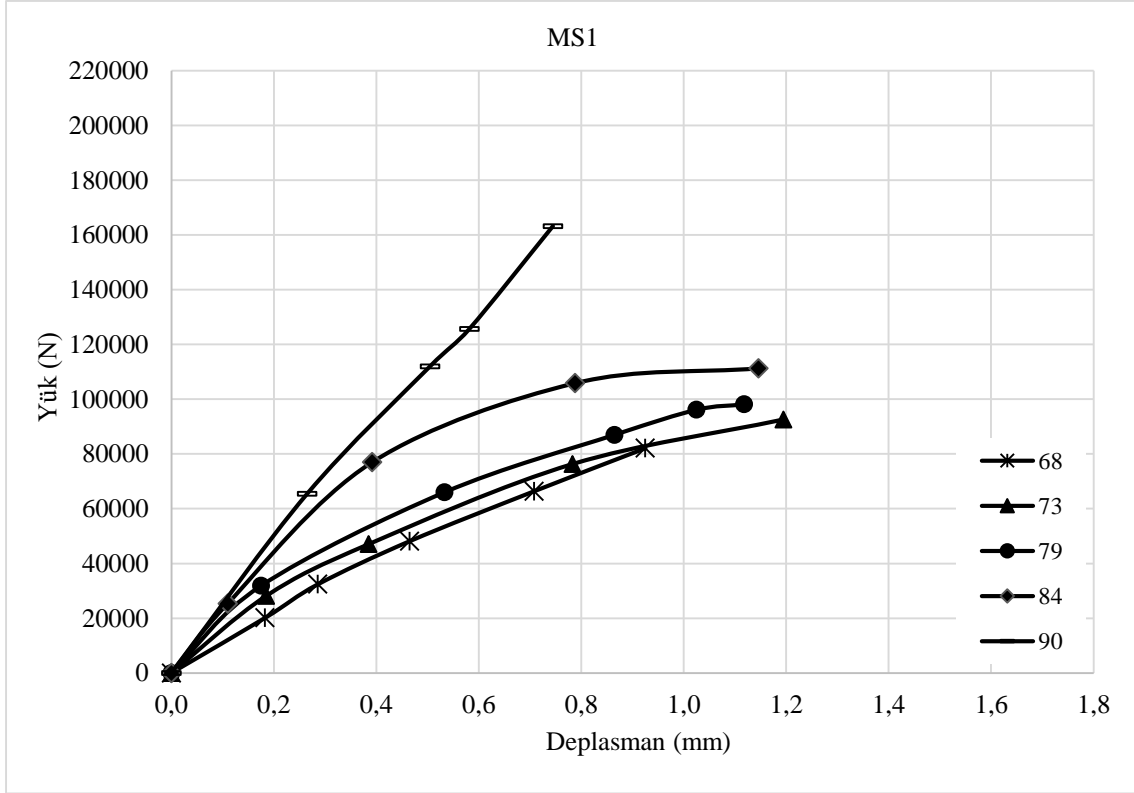
Şekil 7.108. Mikro polimer lif oranı %0,1 olan deney elemanlarının karşılaştırılması



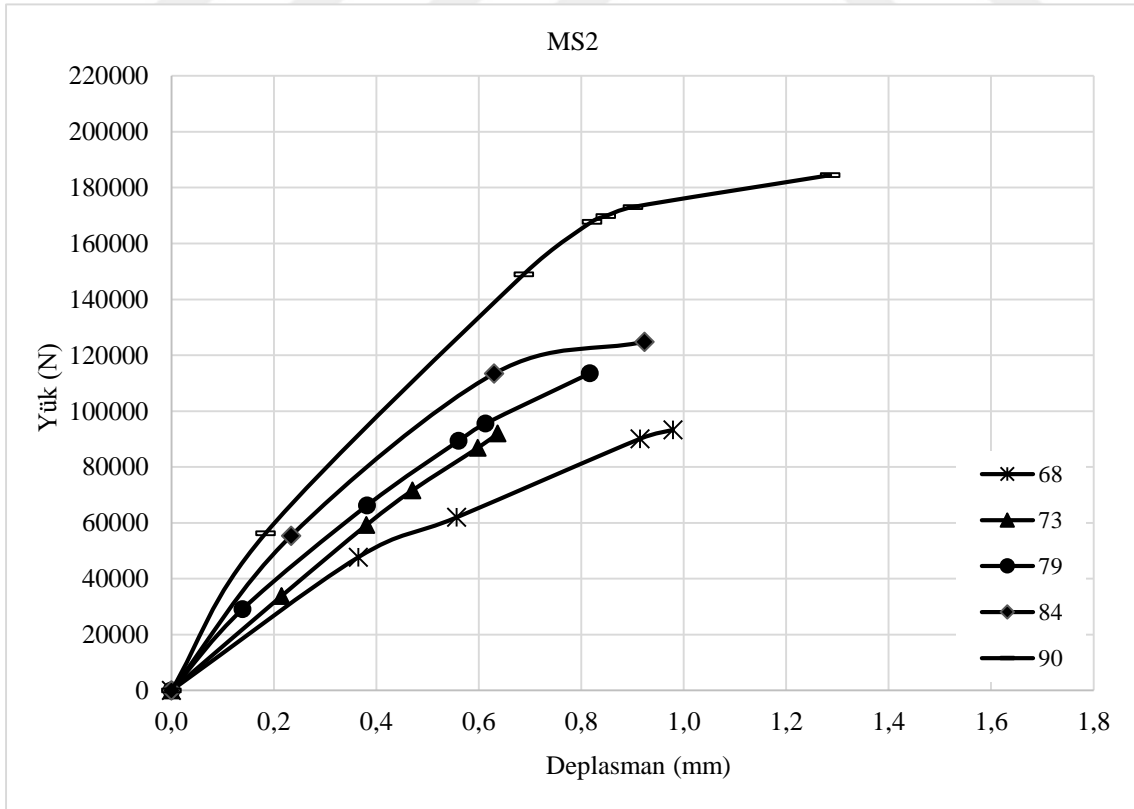
Şekil 7.109. Mikro polimer lif oranı %0,2 olan deney elemanlarının karşılaştırılması



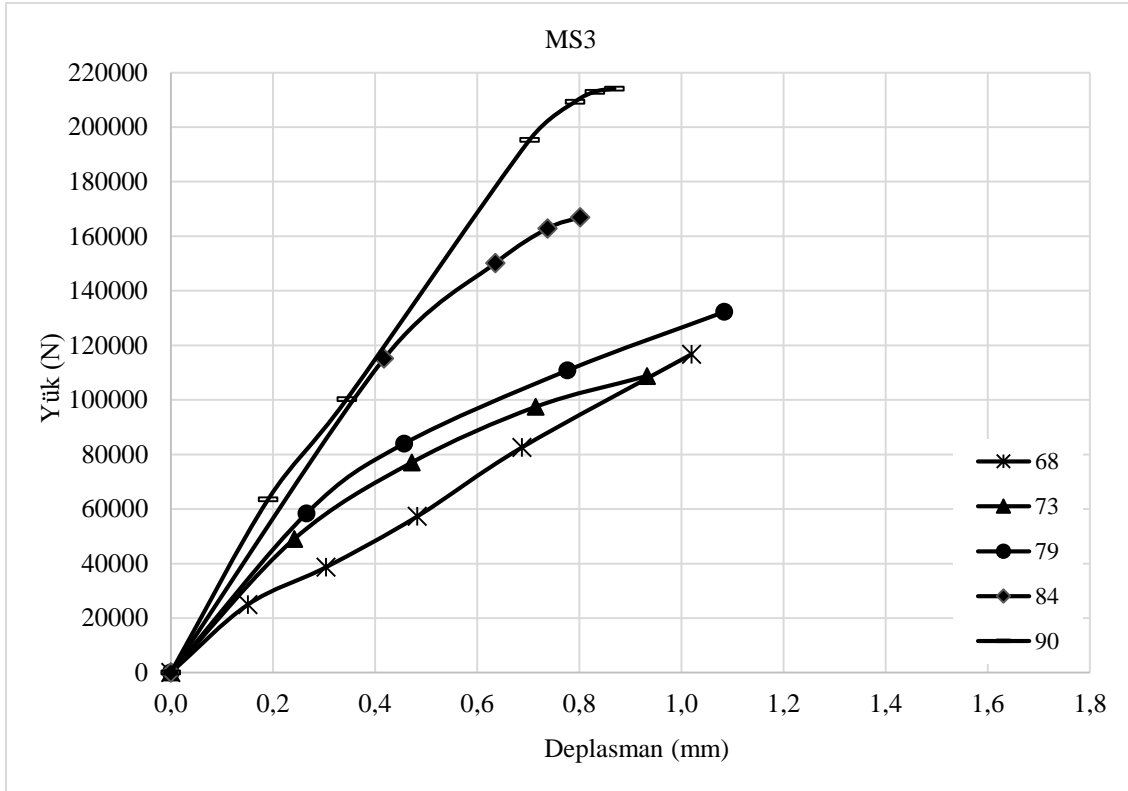
Şekil 7.110. Mikro polimer lif oranı %0,3 olan deney elemanlarının karşılaştırılması



Şekil 7.111. Mikro çelik lif oranı %1 olan deney elemanlarının karşılaştırılması



Şekil 7.112. Mikro çelik lif oranı %2 olan deney elemanlarının karşılaştırılması



Şekil 7.113. Mikro çelik lif oranı %3 olan deney elemanlarının karşılaştırılması

7.5. Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Farklı Kesme Gerilmesi Yaklaşımlarına Göre Karşılaştırılması

Deney sonuçları ACI 318M-11 [99] ve TS 500 [100] standardına göre ve bazı araştırmacıların kesme gerilmesiyle ilgili öne sürdüğü yaklaşımlarla karşılaştırılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Aşağıda bahsedilen eşitliklerin birimleri boyutlar için *milimetre*, kuvvetler için *N*, gerilemeler ve dayanımlar için ise *N/mm²* olarak verilmiştir.

ACI 318M-11' e [99] göre eksenel basınç durumunda *V* kesme kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$V = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7.1)$$

Burada N_u etkiyen eksenel basınç kuvvetini, A_g brüt beton alanını, f'_c betonun küp basınç dayanımını, d faydalı yüksekliği ve λ betonun mekanik özelliklerini yansıtan modifikasyon faktörünü ifade etmektedir. Deneyde kesme testi için hazırlanan beton numuneler hafif beton

olmayıp normal beton oluşu için λ değeri 1,0 olarak alınmıştır.

TS 500' e [100] göre ise aksenal basınç durumunda V_{cr} kesitin kesmede çatlama dayanımı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_wd(1 + \gamma_e \frac{N_d}{A_c}) \quad (7.2)$$

$$f_{ctk} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \quad (7.3)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{\gamma_{mc}} \quad (7.4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde f_{ctd} beton tasarım aksenal çekme dayanımını, f_{ctk} beton karakteristik aksenal çekme dayanımını, f_{ck} beton karakteristik basınç dayanımını A_c gövde kesiti beton alanını ve N_d tasarım aksenal kuvvetini göstermektedir. Beton için malzeme katsayısı $\gamma_{mc} = 1,5$ olarak ve çatlama dayanımına aksenal kuvvet etkisini yansıtan katsayı $\gamma_e = 0,07$ olarak belirtilmiştir.

Sharma [101] lifli beton kirişler üzerine yaptığı çalışmasında v_u kesme dayanımını şu şekilde ifade etmiştir.

$$v_u = kf'_t \left(\frac{d}{a}\right)^{0,25} \quad (7.5)$$

Eş. 7.5'de $k = 2/3$ olarak önerilmiş olup f'_t betonun yarmada çekme dayanımını ve a/d kesme açıklığı-kesme derinliği oranını ifade etmektedir. Eğer f'_t değeri bilinmiyorsa Eş.7.6 geçerli olmaktadır.

$$f'_t = 0,79\sqrt{f'_s} \quad (7.6)$$

Narayanan and Darwish [102] kesme kırılmasıyla ilgili lifli betonlar üzerine yaptıkları çalışmada şu ampirik formülü kullanmışlardır.

$$v_u = e \left(0,24f'_t + 80\rho \frac{d}{a}\right) + v_b \quad (7.7)$$

$$f'_t = \frac{f'_c}{20-\sqrt{F}} + 0,7 + \sqrt{F} \quad (7.8)$$

$$F = V_f \frac{L_f}{D_f} d_f \quad (7.9)$$

$$v_b = 0,41\tau_0 F \quad (7.10)$$

Yukarıdaki eşitliklerde e kemer etkisi faktörünü göstermektedir. Bu değer $a/d > 2,8$ olduğunda 1,0 değerini alırken $a/d \leq 2,8$ olduğunda ise $2,8d/a$ değerine eşit olmaktadır. Aynı zamanda F lif faktörünü, ρ eğilme donatısı oranını, L_f lif uzunluğunu, D_f lif çapını ve V_f lifin betona hacimsel olarak oranını ifade etmektedir. Ayrıca d_f aderans faktörünü göstermekte olup düz lifler için 0,50; kıvrımlı lifler için 0,75 ve dişli lifler için 1,0 olarak kabul edilmektedir. Ek olarak τ_0 değeri de lif matrisinin ortalama ara yüzey dayanımını göstermekte olup $4,15 \text{ N/mm}^2$ olarak alınmaktadır [103].

Khuntia ve diğerleri [104] kesme kırılması ile ilgili yaptıkları çalışmalarında şu formülü önermişlerdir.

$$v_u = (0,167e + 0,25F)\sqrt{f'_c} \quad (7.11)$$

Yukarıdaki eşitlikte e kemer etkisi faktörü $2,5d/a$ değerine eşit olmaktadır. F lif faktörü Eş 7.9'daki gibi tanımlanmaktadır.

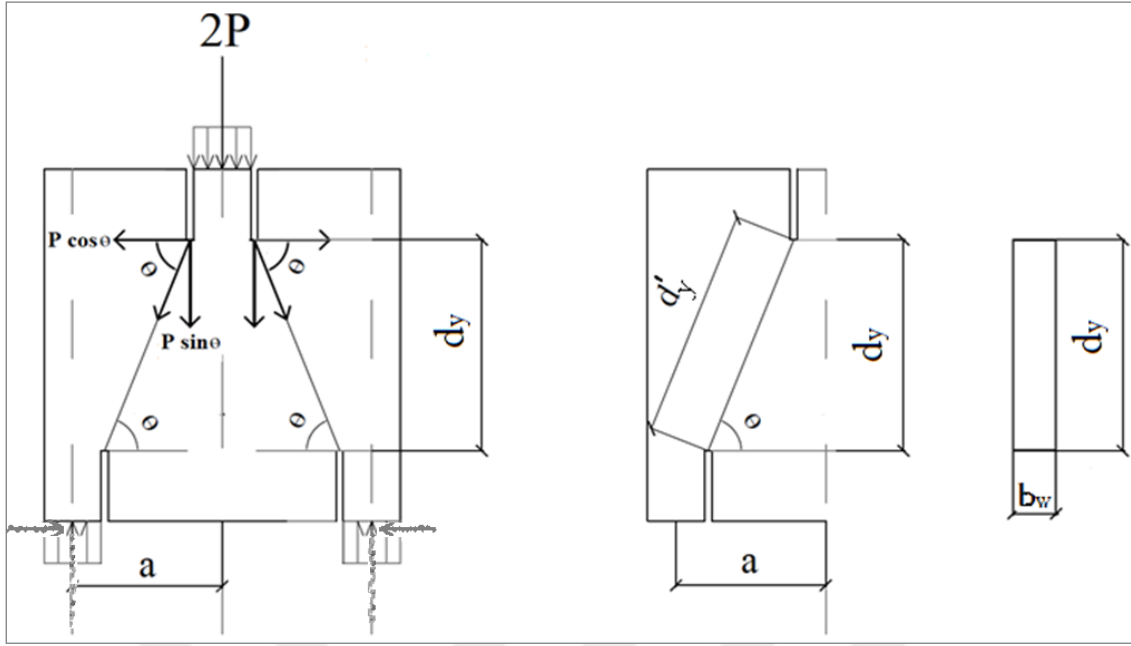
Khanlou ve diğerleri [105] ise lifli betonlar üzerine yaptıkları bir çalışmada v_u kesme dayanımını şu şekilde ifade etmişlerdir.

$$v_u = 0,75\sqrt{f'_s} + 4V_f^{0,9} \quad (7.12)$$

Burada f'_s beton silindir dayanımını ve V_f hacimsel lif oranını yüzde olarak göstermektedir.

7.6. Sonuçların Farklı Yaklaşımlara Uyarlanması

Deneyleerde kullanılan numunelere etkiyen kuvvetler ve kesme yüzeyini gösteren çizimler Şekil 7. 114'de gösterilmiştir.



Şekil 7.114. Deney elemanına etkiyen kuvvetler ve kesme yüzeyi

$$d'_y = \frac{d_y}{\sin \theta} \quad (7.13)$$

$$v_u = \frac{P}{b_w d'_y} \quad (7.14)$$

Şekil 7.114'de; θ kesme açısını, a kesme açıklığını, d_y kesme kuvvetinin etkidiği numune yüksekliğini, d'_y kesme yüksekliğini ve b_w numune derinliğini göstermektedir. Aynı zamanda Eş. 7.14' deki v_u değeri de kesme dayanımını ifade etmektedir. Açılara göre değişen kesme açıklığı, yüksekliği ve numune derinliği de Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Açılara göre değişen kesme açıklığı, yüksekliği ve numune derinliği

θ (°)	a (mm)	d_y (mm)	d'_y (mm)	b_w (mm)
68	105	150	161,8	30
73	97,5	150	156,9	30
79	95	150	152,7	30
84	87,5	150	150,9	30
90	85	150	150	30

TS EN 206'ya [106] göre; betonun 95 MPa küp dayanımından daha yüksek değerlerde, betonun küp dayanımı silindir dayanımından yaklaşık olarak %15 daha fazladır. Bu çalışmada elde edilen beton küp dayanımları 95 MPa'dan fazla olduğu için literatürdeki diğer bazı çalışmalarla karşılaştırılabilir yapılabilmek adına betonun küp dayanımını, silindir dayanım değerine çevirmede betonun küp dayanımının silindir dayanımından yaklaşık olarak %15 daha fazla olduğu kabul edilerek hesap yapılmıştır.

Çalışmada lif oranları beton ağırlığınca belirlendiği için formül için gereken hacimce lif oranları kullanılan liflerin fiziksel özellikleri dikkate alınarak yaklaşık olarak hacimce hesap yapılmıştır. Kullanılan mikro çelik lifler hacimce yaklaşık %0,33; %0,66 ve %0,99; kullanılan mikro polimer lifler ise hacimce yaklaşık %0,22; %0,44 ve %0,66 olarak hesaplanmıştır.

Yukarıda bahsedilen farklı yaklaşımlara göre hesaplanan kesme dayanım değerleri N/mm^2 olarak lifsiz numuneler için Çizelge 7.3'te, %0,1 mikro polimer lifli numuneler için Çizelge 7.4'de, %0,2 mikro polimer lifli numuneler için Çizelge 7.5'de, %0,3 mikro polimer lifli numuneler için Çizelge 7.6'da, %1 mikro çelik lifli numuneler için Çizelge 7.7'de, %2 mikro çelik lifli numuneler için Çizelge 7.8'de ve %3 mikro çelik lifli numuneler için Çizelge 7.9'da verilmiştir.

Çizelge 7.3. Lifsiz numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm^2)

NF					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,09	2,11	1,99	1,88	1,78
TS 500	2,77	1,87	1,77	1,68	1,59
Sharma	5,72	5,79	5,79	5,89	5,92
Narayanan ve Darwish	6,39	6,67	6,67	7,15	7,32
Khuntia ve diğerleri	0,12	2,71	2,72	2,53	2,47
Khanlou ve diğerleri	7,32	7,32	7,32	7,32	7,32
Deney	6,62	8,86	8,81	7,81	11,32

Çizelge 7.4. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MP01					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,13	2,08	1,99	1,97	1,79
TS 500	2,90	1,85	1,77	1,75	1,59
Sharma	5,75	5,81	5,81	5,92	5,95
Narayanan ve Darwish	7,57	7,88	7,88	8,42	8,60
Khuntia ve diğerleri	1,04	3,64	3,64	3,46	3,40
Khanlou ve diğerleri	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37
Deney	7,27	7,95	8,50	13,40	14,65

Çizelge 7.5. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MP02					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,18	2,27	2,10	1,99	1,85
TS 500	2,90	2,02	1,87	1,77	1,65
Sharma	5,95	6,02	6,02	6,12	6,16
Narayanan ve Darwish	8,72	9,06	9,06	9,65	9,85
Khuntia ve diğerleri	2,02	4,72	4,72	4,53	4,47
Khanlou ve diğerleri	9,52	9,52	9,52	9,52	9,52
Deney	6,72	10,99	10,02	10,03	15,68

Çizelge 7.6. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MP03					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,14	2,14	1,97	1,95	1,78
TS 500	2,92	1,90	1,76	1,74	1,59
Sharma	5,75	5,81	5,81	5,91	5,94
Narayanan ve Darwish	8,95	9,28	9,28	9,85	10,05
Khuntia ve diğerleri	2,87	5,47	5,47	5,28	5,23
Khanlou ve diğerleri	10,09	10,09	10,09	10,09	10,09
Deney	7,39	9,41	7,81	12,20	13,83

Çizelge 7.7. %1 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MS1					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,26	2,22	2,11	2,01	1,84
TS 500	3,21	1,97	1,88	1,79	1,64
Sharma	5,93	5,99	5,99	6,09	6,13
Narayanan ve Darwish	7,52	7,84	7,83	8,39	8,58
Khuntia ve diğerleri	0,61	3,29	3,30	3,11	3,05
Khanlou ve diğerleri	9,05	9,05	9,05	9,05	9,05
Deney	8,46	9,83	10,71	12,29	18,14

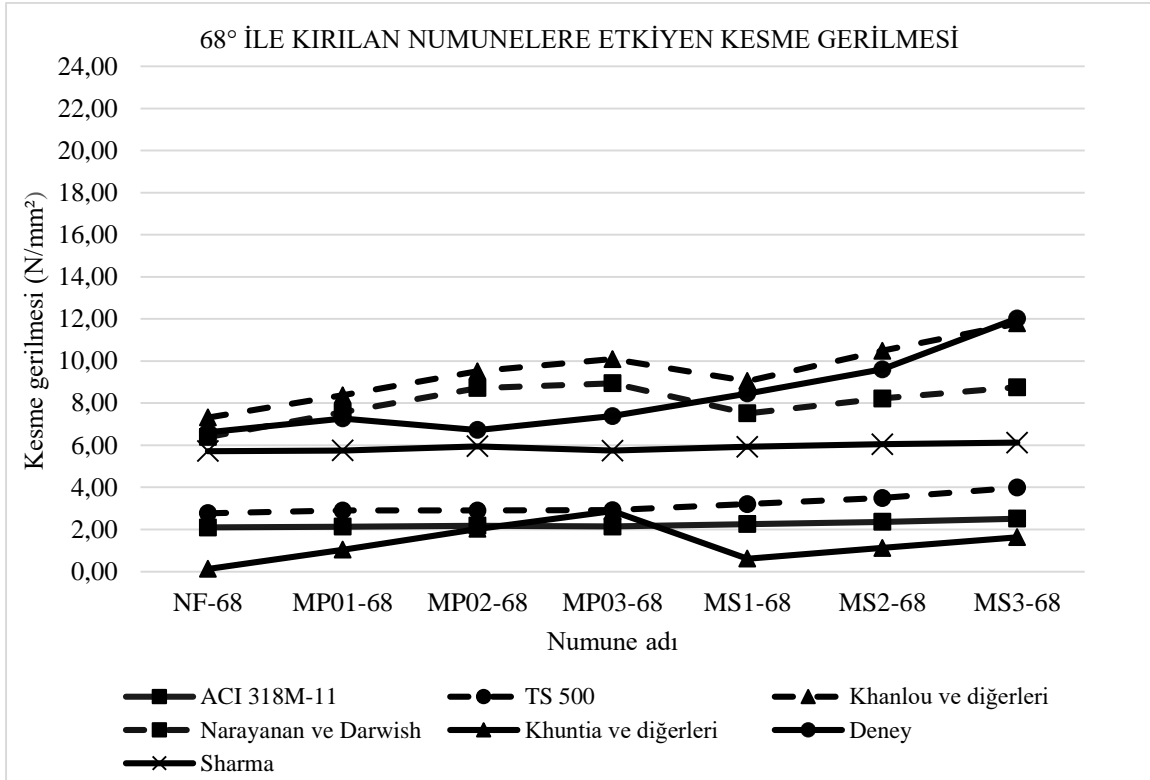
Çizelge 7.8. %2 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MS2					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,36	2,26	2,19	2,07	1,88
TS 500	3,49	2,01	1,95	1,85	1,68
Sharma	6,05	6,12	6,12	6,22	6,26
Narayanan ve Darwish	8,22	8,56	8,56	9,14	9,35
Khuntia ve diğerleri	1,12	3,86	3,86	3,67	3,61
Khanlou ve diğerleri	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49
Deney	9,61	9,77	12,39	13,79	20,50

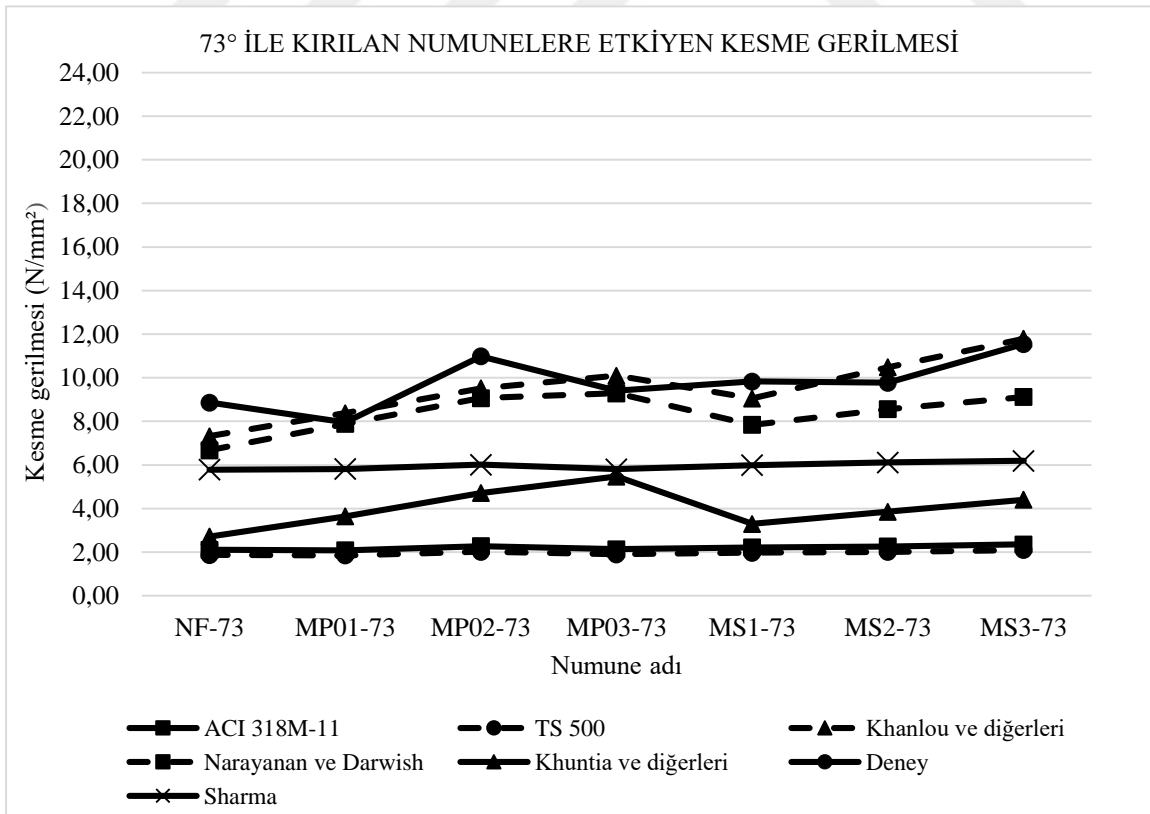
Çizelge 7.9. %3 mikro çelik lifli numunelerin farklı yaklaşımlara göre kesme dayanımları (N/mm²)

MS3					
Farklı Yaklaşımlar	68°	73°	79°	84°	90°
ACI 318M-11	2,51	2,36	2,27	2,16	1,90
TS 500	3,99	2,10	2,02	1,93	1,70
Sharma	6,12	6,19	6,19	6,30	6,33
Narayanan ve Darwish	8,76	9,12	9,11	9,72	9,93
Khuntia ve diğerleri	1,63	4,40	4,40	4,21	4,15
Khanlou ve diğerleri	11,79	11,79	11,79	11,79	11,79
Deney	12,02	11,55	14,43	13,40	23,79

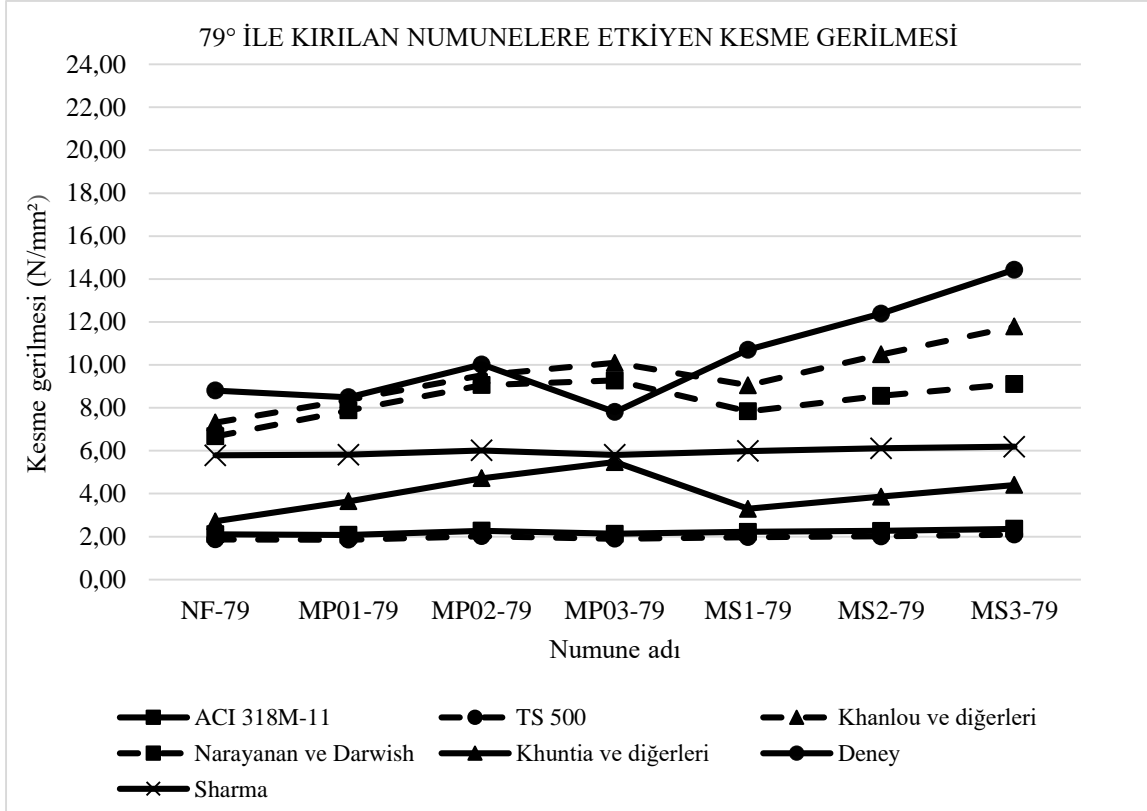
Farklı yaklaşımlara göre hesaplanan kesme dayanımlarının açılara göre karşılaştırılması 68° için Şekil 7.115’de, 73° için Şekil 7.116’da, 79° için Şekil 7.117’de, 84° için Şekil 7.118’de ve 90° için de Şekil 7.119’da gösterilmiştir.



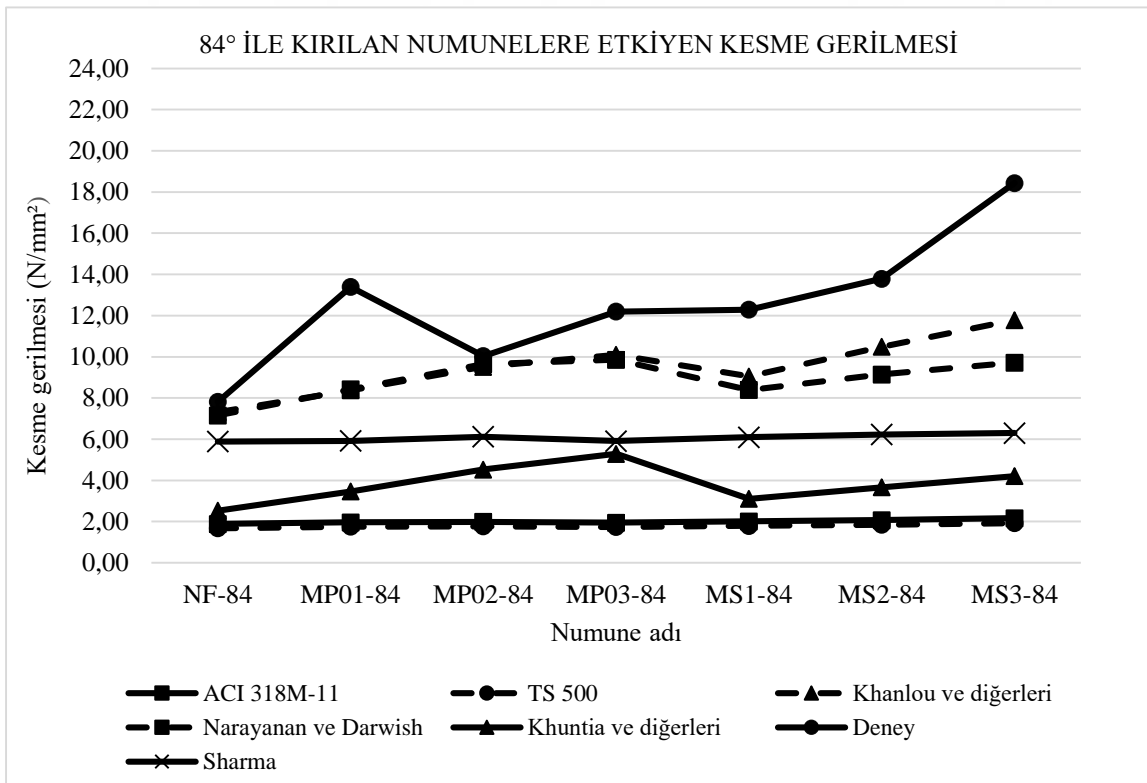
Şekil 7.115. 68° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması



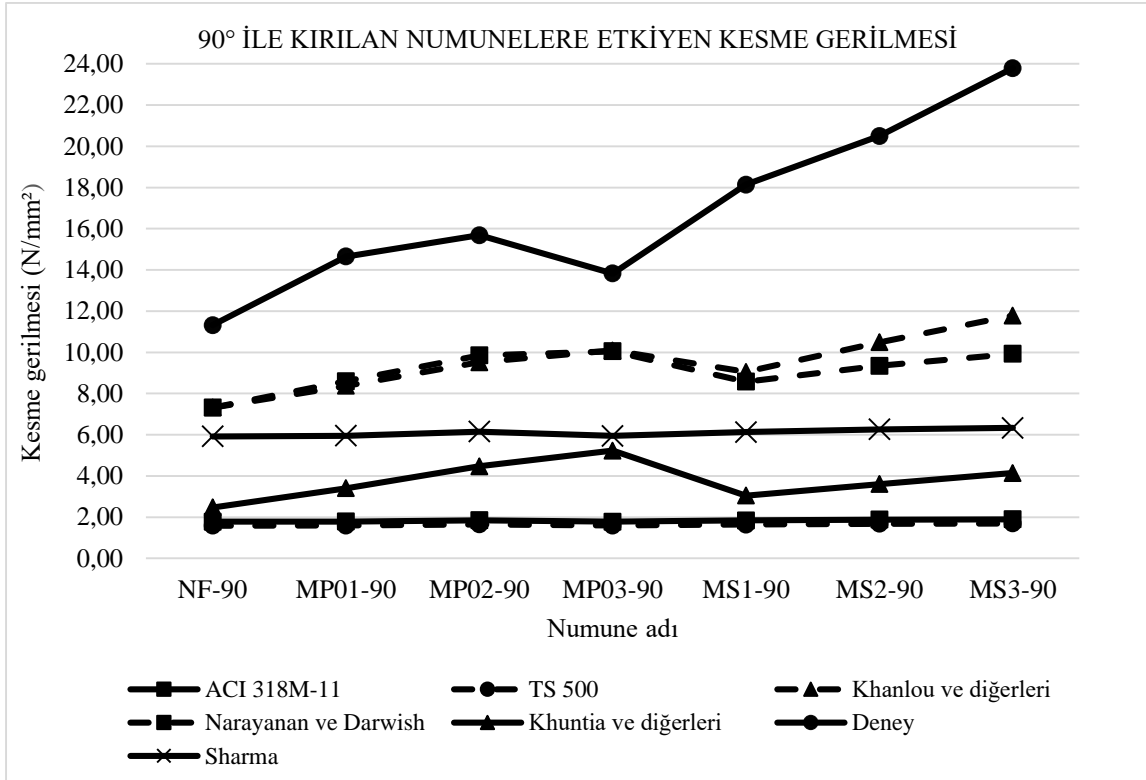
Şekil 7.116. 73° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 7.117. 79° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması



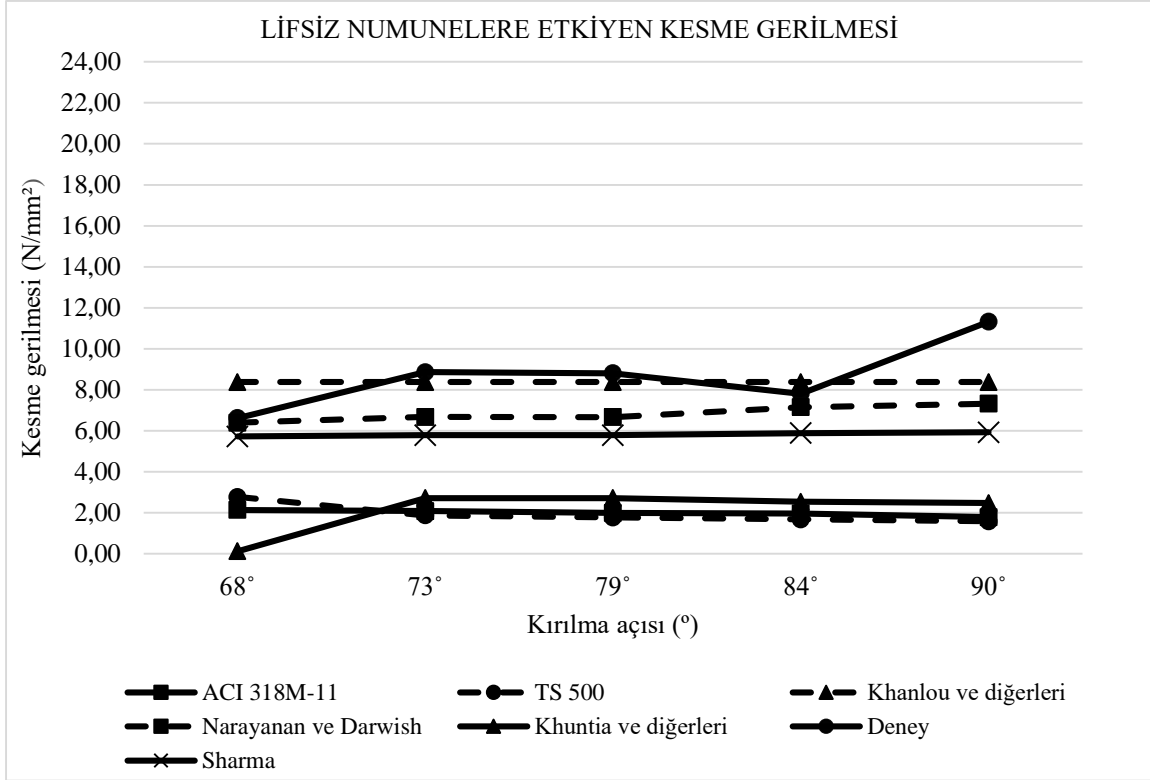
Şekil 7.118. 84° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması



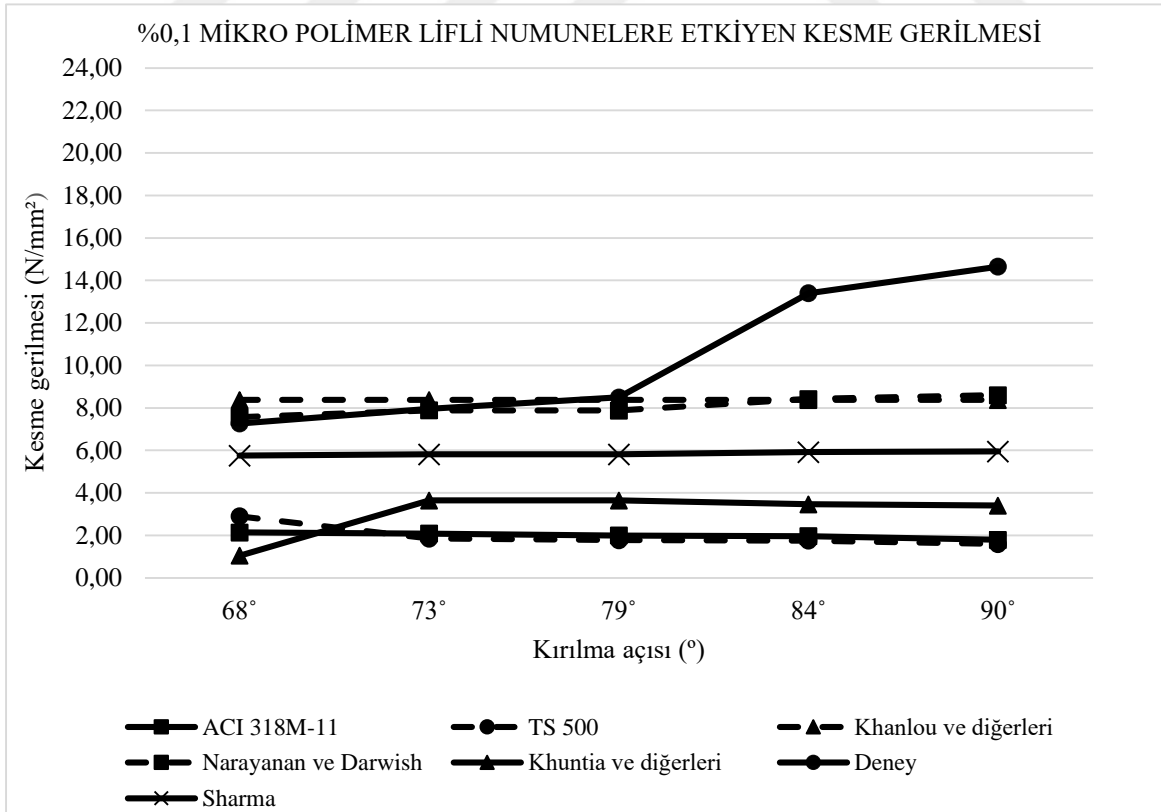
Şekil 7.119. 90° kesme açısı ile kırılan numunelerin kesme dayanımlarının karşılaştırılması

Yukarıdaki karşılaştırmalar neticesinde aynı kesme açısında kırılan numuneler için kesme açısı 68° olduğunda literatürdeki yaklaşımlarla benzer davranış sergilediği ancak kesme açısının büyümesiyle numunelerin bu benzerlikten uzaklaştığı görülmektedir. Özellikle 90° kesme açısıyla kırılan numuneler literatürdeki yaklaşımlardan oldukça farklı ve daha yüksek kesme dayanımlarında kırılma göstermiştir. Ayrıca deney sonuçları ACI 318M-11 ve TS 500 standartlarının oldukça üstünde kalmıştır.

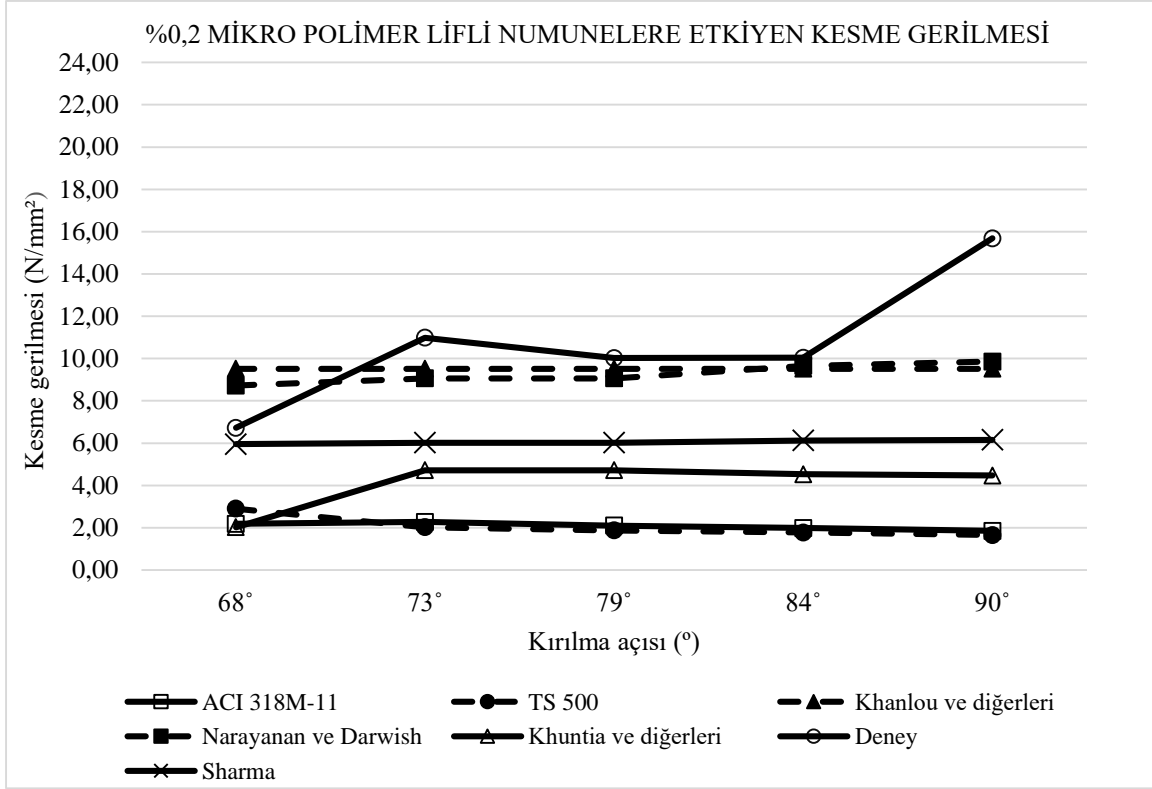
Farklı yaklaşımlara göre hesaplanan kesme dayanımlarının numunelerdeki lif oranlarına göre karşılaştırılması lifsiz numuneler için Şekil 7.120’de, %0,1 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.121’de, %0,2 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.122’de, %0,3 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.123’de, %1 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.124’de, %2 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.125’de ve %3 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.126’da verilmiştir.



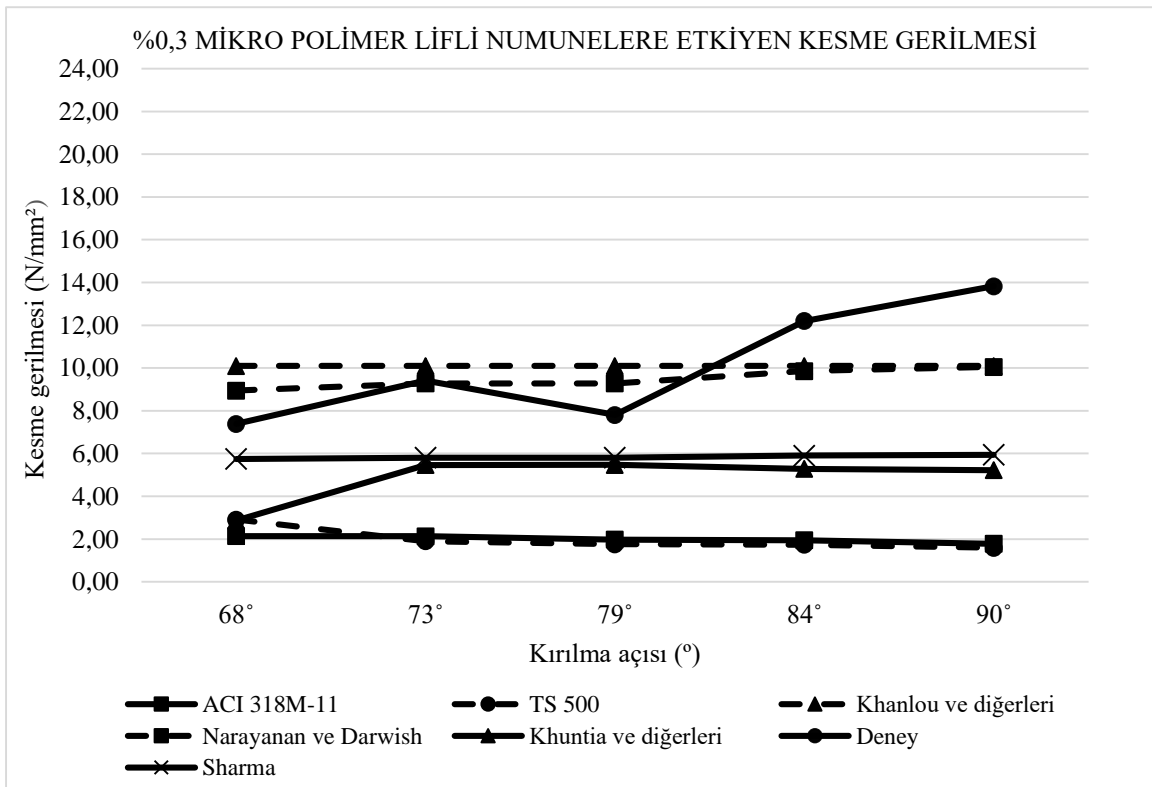
Şekil 7.120. Lifsiz numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



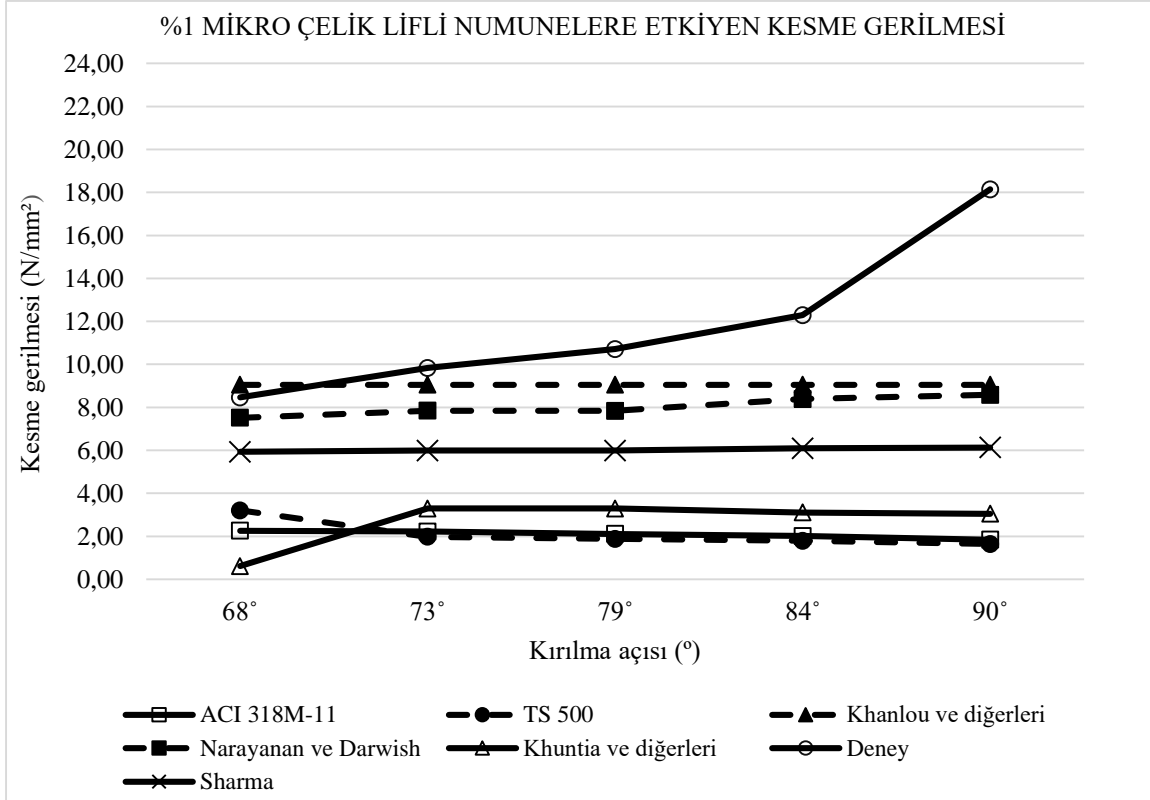
Şekil 7.121. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



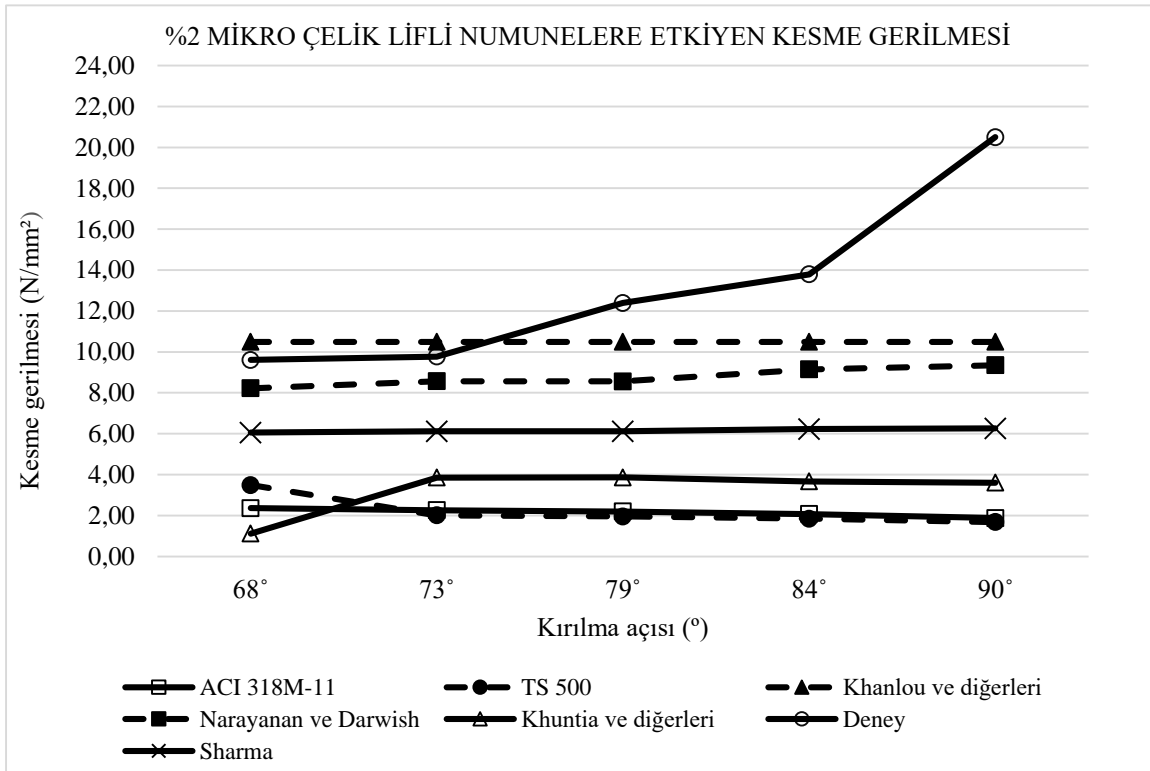
Şekil 7.122. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



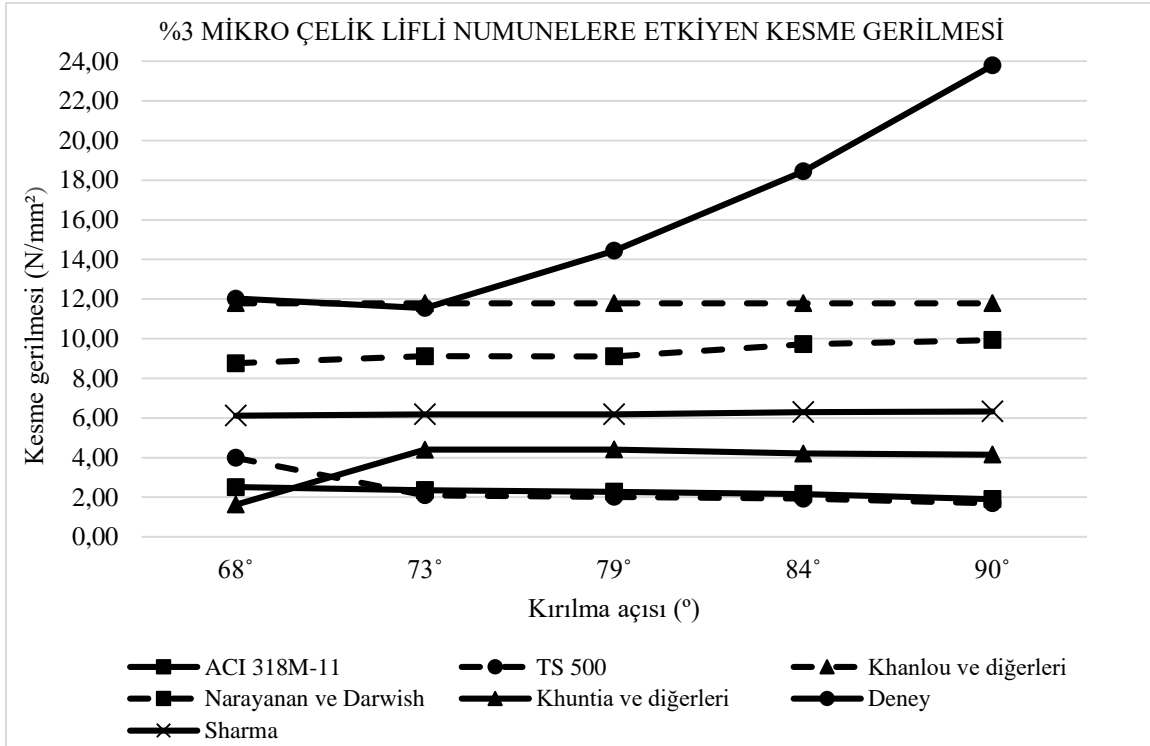
Şekil 7.123. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



Şekil 7.124. %1 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



Şekil 7.125. %2 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması



Şekil 7.126. %3 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının kırılma açısına göre karşılaştırılması

Deney sonucundan elde edilen kesme gerilmeleri farklı yaklaşımlara göre değerlendirildiğinde ise elde edilen sonuçlar aynı lif oranındaki numuneler için açının büyümesiyle literatürdeki yaklaşımlardan uzaklaşmaktadır.

7.7. Kesme Dayanımını Veren Eşitliğin Tasarlanması

Literatürde yüksek performanslı betonların kesme dayanımıyla ilgili eksiklikler bulunmaktadır. Betonda kullanılan liflerin oranı ve çekme gerilmelerine karşı dayanımı kesme kırılması açısından önemlidir. Ayrıca betona gelen kesme kuvvetinin betonda nereden kırılmaya sebep olacağı hangi açıda kırılma gerçekleştireceği bilinmemektedir. Ancak kırılma açısı betonda önem arz etmektedir.

Elde edilen deney sonuçları kullanılarak ACI 318M-11’de aksenal basınç durumunda kesme kuvvetini veren eşitlik üzerinden yüksek performanslı betonlar için lifin çekme dayanımını, lif hacmini ve kesme açısını da veren yeni bir eşitlik tasarlanmış olup Eş. 7.15 ve Eş. 7.16’da gösterilmiştir.

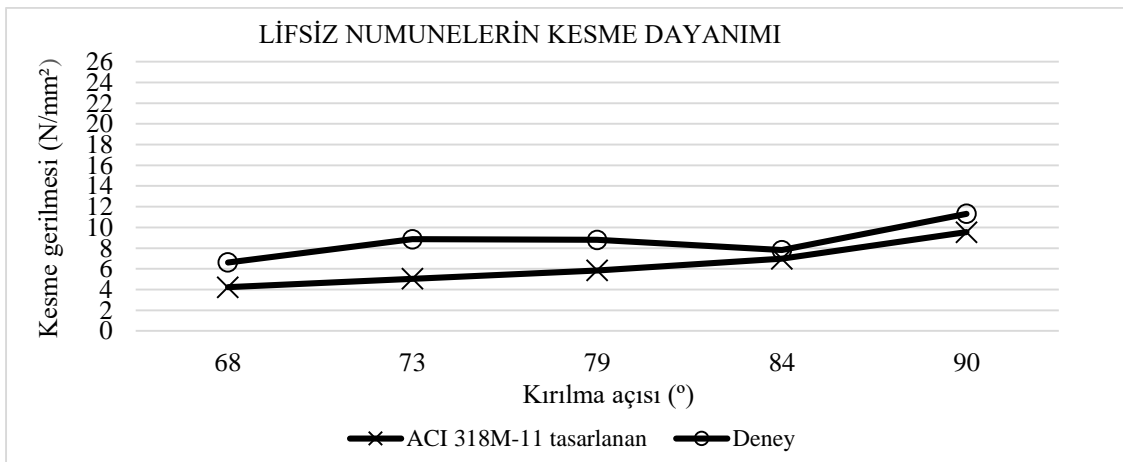
Aşağıda bahsedilen eşitliklerin birimleri boyutlar için *milimetre*, kuvvetler için N , gerilemeler ve dayanımlar için ise N/mm^2 olarak verilmiştir.

$$V = \left[0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} + 2,2 \left(\left(\sqrt[4]{f_{ft}} V_f \right) + \frac{2d}{a} \right) (\sin \theta - \sqrt{\cos \theta}) \right] b_w d \quad (7.15)$$

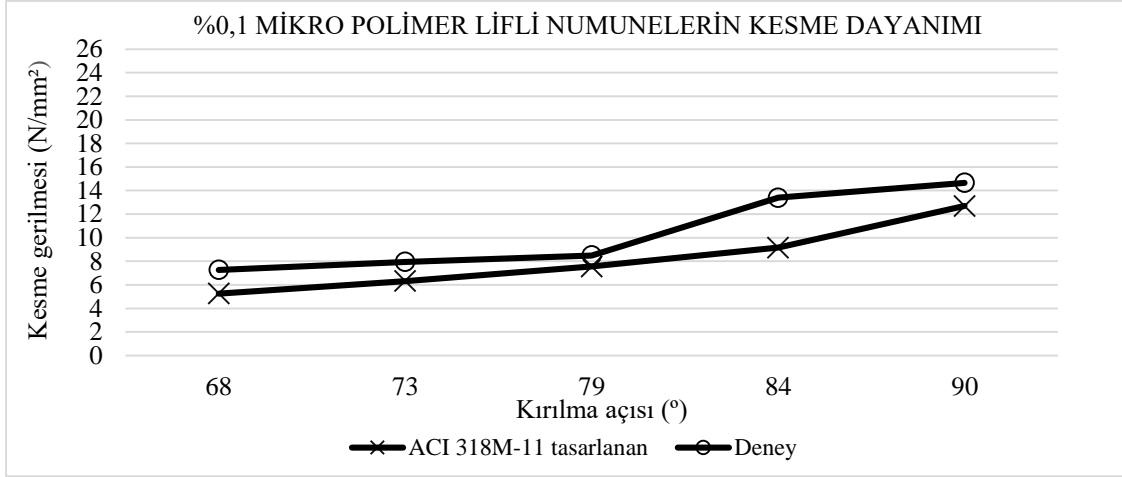
$$v_u = 0,17 \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \lambda \sqrt{f'_c} + 2,2 \left(\left(\sqrt[4]{f_{ft}} V_f \right) + \frac{2d}{a} \right) (\sin \theta - \sqrt{\cos \theta}) \quad (7.16)$$

Burada V kesme kuvvetini, v_u kesme dayanımını, N_u etkiyen eksenel basınç kuvvetini, A_g brüt beton alanını, f'_c betonun küp basınç dayanımını, f_{ft} betonda kullanılan liflerin çekme dayanımını, V_f lifin betona hacimsel olarak oranını, $\frac{a}{d}$ kesme açıklığı-kesme derinliği oranını, b_w numune derinliğini, d numune boyut yüksekliğini, θ kesme açısını ve λ betonun mekanik özelliklerini yansıtan modifikasyon faktörünü ifade etmektedir. Deneyde kesme testi için hazırlanan beton numuneler hafif beton olmayıp normal beton oluşu için λ değeri 1,0 olarak alınmıştır.

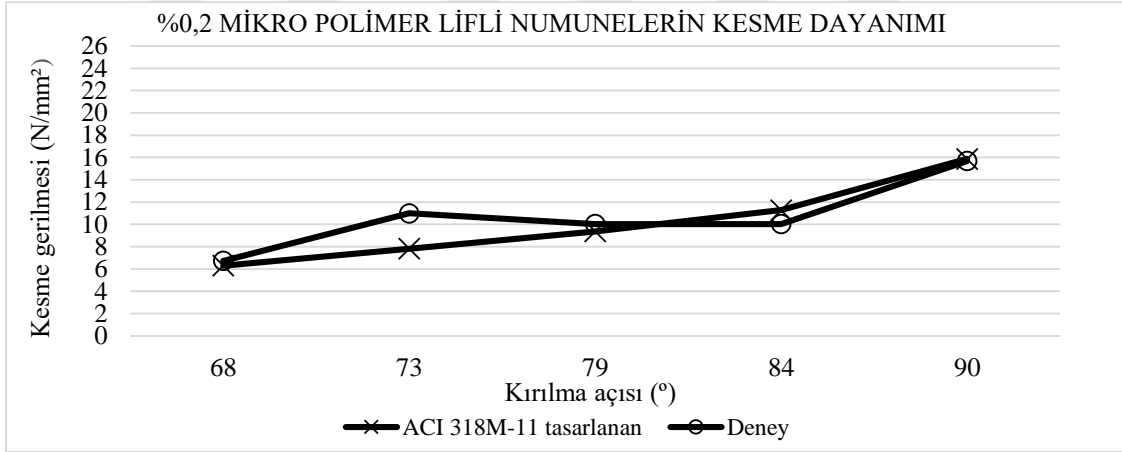
Tasarlanan eşitliğe göre elde edilen kesme dayanımlarının deneylerden elde edilen kesme dayanımlarına göre karşılaştırılması lifsiz numuneler için Şekil 7.127'de, %0,1 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.128'de, %0,2 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.129'da, %0,3 mikro polimer lifli numuneler için Şekil 7.130'da, %1 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.131'de, %2 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.132'de ve %3 mikro çelik lifli numuneler için Şekil 7.133'de verilmiştir.



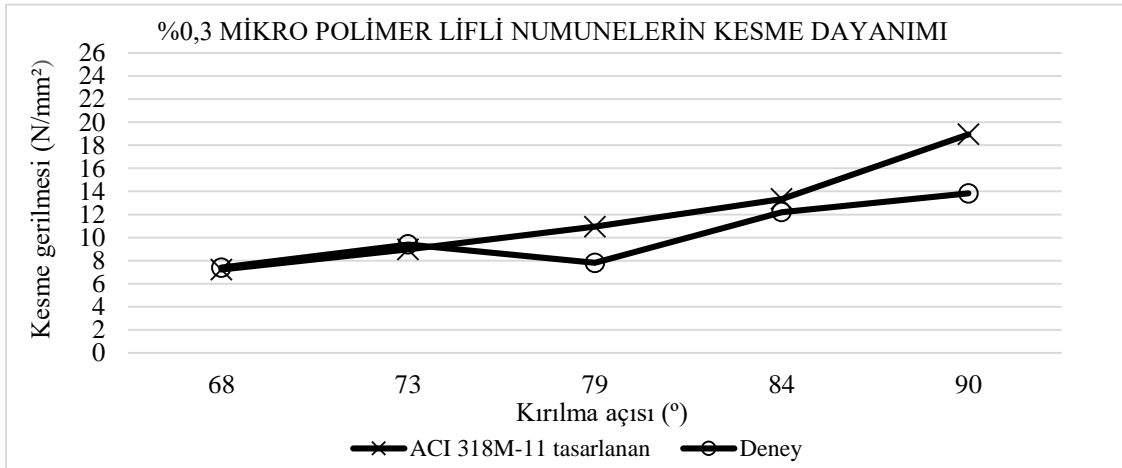
Şekil 7.127. Lif içermeyen numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



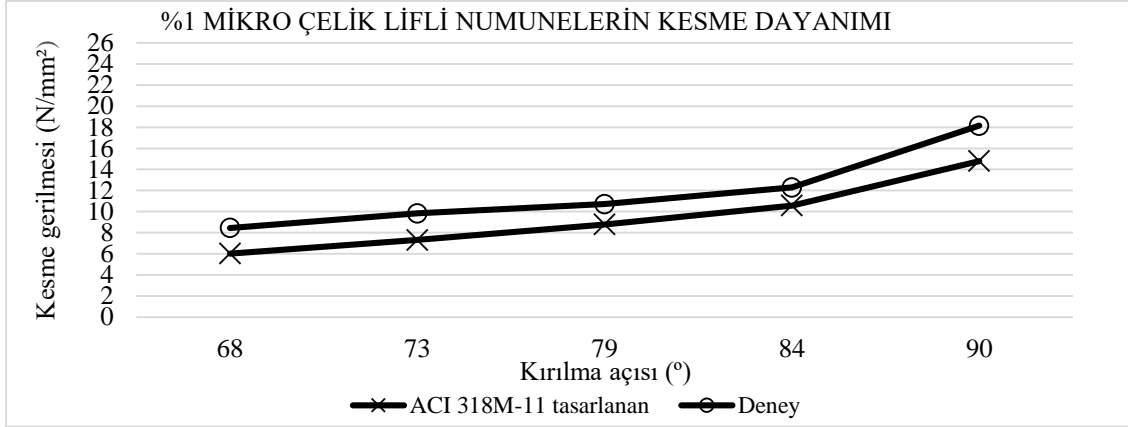
Şekil 7.128. %0,1 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



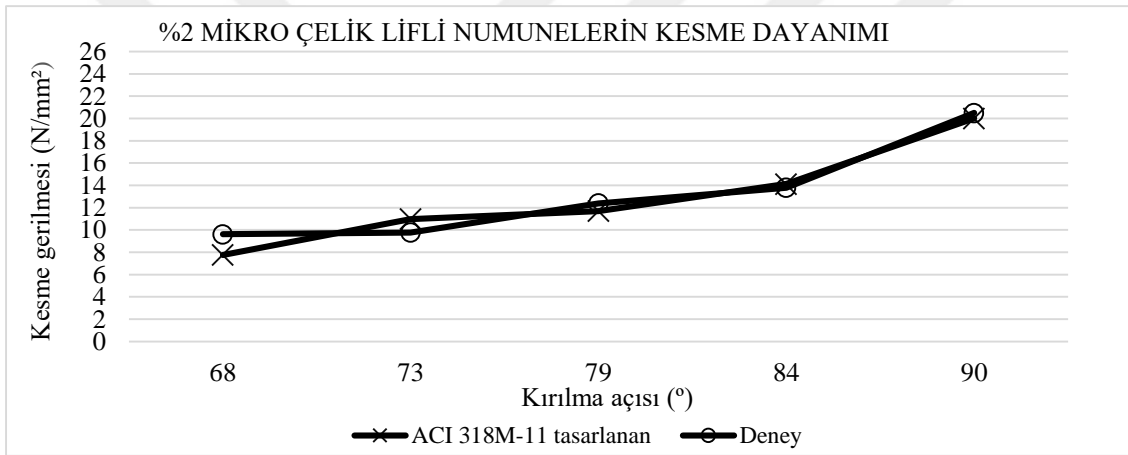
Şekil 7.129. %0,2 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



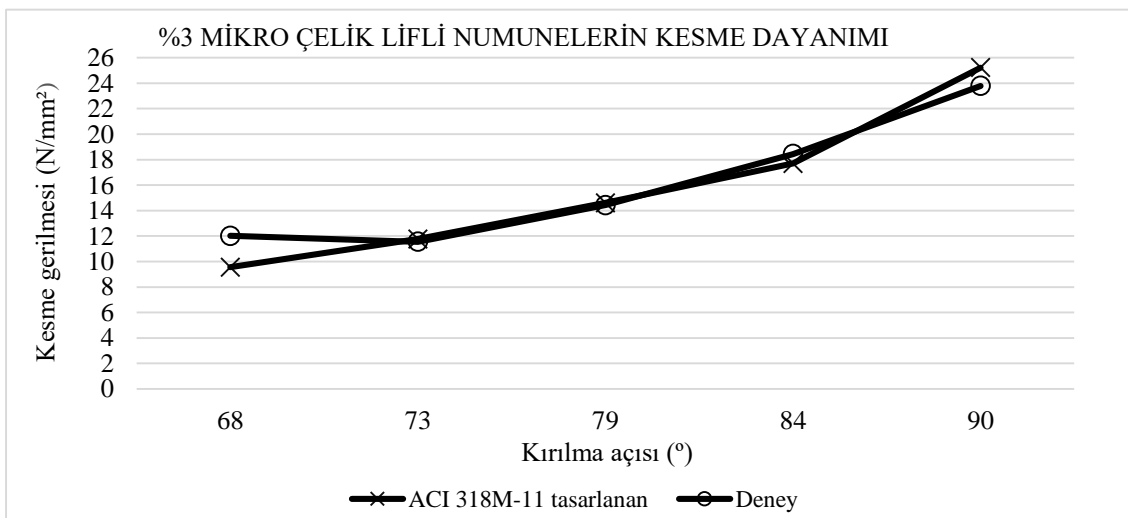
Şekil 7.130. %0,3 mikro polimer lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 7.131. %1 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 7.132. %2 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması



Şekil 7.133. %3 mikro çelik lifli numunelerin kesme dayanımlarının tasarlanan eşitliğe ve deney sonuçlarına göre karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek performanslı betonlarda 3 farklı oranda 2 çeşit lif kullanılarak 5 farklı açıda kesme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda düşeyde ve yatayda olmak üzere 7 adet yük-deplasman grafiği elde edilmiştir. Daha sonra deney elemanlarının kırılma yörüngeleri ve elde edilen yük deplasman grafikleri incelenmiş olup birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda deneyden elde edilen kesme dayanımları ACI 318M-11, TS 500 standartları ve literatürdeki bazı yaklaşımlara göre değerlendirilmiş olup ACI 318M-11’de eksenel basınç durumunda verilen kesme kuvveti eşitliği geliştirilerek yeni bir eşitlik tasarlanmıştır.

Deneylelerden elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Liflerin basınç dayanımlarına katkısı incelendiğinde mikro polimer liflerin beton basınç dayanımına çok belirgin bir etki göstermediği fark edilmiştir. Bunun sebebi mikro polimer lif bileşeninde bulunan polipropilen malzemesinin elastisite modülünün düşük olmasına bağlanabilmektedir. Mikro çelik lifler ise kullanıldıkları oranlara paralel olarak beton basınç dayanımında belirgin bir artış sağlamıştır.
- Mikro çelik lifli numunelerde aynı açı değeri için lif oranı arttıkça genel olarak kesme dayanımı da artmıştır. Mikro çelik lif takviyeli numunelerin karşılayabildiği maksimum kesme kuvvetleri referans numunelerine göre incelendiğinde; 68° kesme açısına sahip deney elemanları için %1, %2 ve %3 mikro çelik lif içeren numunelerde sırasıyla yaklaşık olarak %27, %45 ve %82 oranında bir artış; 90° kesme açısına sahip deney elemanları için ise yine sırasıyla yaklaşık olarak %60, %81 ve %110 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 73°, 79° ve 84° kesme açılarına sahip deney elemanlarının karşılayabileceği maksimum kesme kuvvetlerinde de referans numunesine göre yine artış söz konusudur.
- Mikro polimer lifli numunelerde aynı açı değeri için lif oranı arttıkça kesme dayanımı her zaman artmamıştır. Mikro polimer lif takviyeli numunelerin karşılayabildiği maksimum kesme kuvvetleri referans numunelerine göre incelendiğinde; 68° kesme açısına sahip deney elemanları için %0,1; %0,2 ve %0,3 mikro polimer lif içeren numunelerde sırasıyla yaklaşık olarak %10, %2 ve %12 oranında bir artış; 90° kesme açısına sahip deney elemanları için ise yine sırasıyla yaklaşık olarak %29, %39 ve %22 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 84° kesme açılarına sahip numunelerde de deney elemanlarının karşılayabileceği maksimum kesme kuvvetlerinde lif oranına göre belli bir

artış görülürken 73° ve 79° kesme açılarına sahip deney elemanlarının karşılayabileceği maksimum kesme kuvvetlerinde referans numunelerine göre sürekli bir artış söz konusu değildir.

- Mikro çelik lifli bütün numuneler aynı açı değerleri içerisinde mikro polimer lifli numunelere göre daha yüksek kesme kuvvetlerinde kırılmıştır. Mikro polimer lifli betonlar aynı açı değerleri için kendi aralarında lif oranlarına göre çok fazla değişim göstermemiş, birbirine yakın değerlerde kesme dayanımı sergilemişlerdir. Bu durum mikro polimer lifli betonların beton içerisinde tam olarak homojen dağılamamasından topaklanma yapmasına ve mikro polimer lif olarak kullanılan Forta Fi malzemesinin içerisindeki polipropilen ve aramid malzemelerinden aramidin çekme dayanımı yüksek iken polipropilenin çekme dayanımının düşük olmasından kaynaklı çekme gerilmesi yetersizliği olarak açıklanabilmektedir. Dolayısıyla yüksek performanslı betonlarda lif oranına göre kesme açısının etkisinin araştırılmasında mikro polimer liflerin çok etkili olmayacağı anlaşılmıştır.
- Aynı lif çeşidi ve aynı lif oranındaki numuneler için genel olarak kesme açısı büyüdükçe numunenin karşılayabileceği maksimum kesme kuvveti de büyümektedir. 90° kesme açısına sahip deney elemanlarına gelen maksimum kesme kuvvetleri 68° kesme açısına gelen maksimum kesme kuvvetlerine göre incelendiğinde referans numunelerinde yaklaşık olarak %58 oranında bir artış; %0,1; %0,2 ve %0,3 mikro polimer lifli numunelerde sırasıyla yaklaşık olarak %87, %116 ve %74 oranında bir artış; %1, %2 ve %3 mikro çelik lifli numunelerde ise sırasıyla yaklaşık olarak %99, %98 ve %83 oranında bir artış meydana gelmiştir.
- %3 mikro çelik lifli numuneler bütün açı değerleri içinde en yüksek kesme dayanımını göstermiş olup bu lif oranında referans numunesine göre 68° kesme açısı için yaklaşık olarak %82 oranında bir artış, 90° kesme açısı için ise yaklaşık olarak %110 oranında bir artış görülmüştür.
- Lifler yüksek dayanımdan kaynaklanan gevreklik problemi için iyi bir çözüm olmuş ve betonun sünekliğini artırmışlardır.
- Mikro polimer lifli numuneler kırılmadan önce mikro çelik lifli numunelere göre daha fazla deplasman yaparak kırılma gösterirken mikro çelik lifli numuneler de mikro polimer lifli numunelere göre daha iyi bir rijitlik sergilemişlerdir.

- Lifsiz referans numunelerinde çatlak ani ve kararsız bir şekilde ilerlerken lifli betonlarda çatlak hem daha yavaş hem daha kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Lifler gerilmeleri birbirine aktararak patlamalı ve ani kırılmayı engellemiştir.
- Karşılıklı çentikler arasındaki açı büyüdükçe aynı lif oranındaki numuneler için rijitlik artmış, aynı zamanda kesme çatlaklarının dallanması daha dar bir alanda gerçekleşmiştir.
- Karşılıklı çentikler arasındaki açı küçüldükçe mesnet kuvveti ile uygulanan statik yük arasındaki yatay mesafe büyümüş, kesme kırılması zıt kuvvetlere doğru şekillenme eğilimi göstermiştir. Aynı zamanda açı küçüldükçe betonda meydana gelen kırılmada kesme etkisi azalarak mod I etkisi artmıştır.
- Mesnetlerdeki dönme engellenmek istenildiğinden mesnetlerde oluşan yatay kuvvetler alt çentiklerden gelişen çatlakların ilerlemesini önlemeye yönelik davranış sergilemiştir.
- Aynı lif çeşidi ve lif oranına sahip numuneler için kesme açısı 68° olduğunda numunelerin literatürdeki yaklaşımlarla benzer davranış sergilediği ancak kesme açısının büyümesiyle bu benzerlikten uzaklaşıldığı görülmektedir. Özellikle 90° kesme açısıyla kırılan numuneler literatürdeki yaklaşımlardan oldukça farklı ve daha yüksek kesme dayanımlarında kırılma göstermiştir. Bu durum, pratikte kesme kırılması açısının 90° olmadığından ve kırılmanın daha küçük açılarda meydana gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu farklılık mod II kırılmasında açının önemini ortaya koymaktadır.
- Deneysel sonuçları ACI 318M-11 ve TS 500 standartlarının oldukça üstünde kalmıştır. Bu durum mevcut yönetmelik ve standartlarda, yüksek performanslı betonların mekanik özelliklerini de dikkate alan yeni düzenlemelerin yapılması gerektiğini göstermektedir.
- ACI 318M-11'de aksenal basınç durumunda kesme kuvvetini veren eşitliğin geliştirilmesiyle tasarlanan yeni eşitlik; yüksek performanslı betonların kesme dayanımı hesabında kesme açısının, betonda kullanılan lifin çekme dayanımının ve lif hacminin önemini ortaya koymaktadır.
- Bu çalışmada deneyler sırasında mesnetlerde açılma ve numunelerde oturma problemleri yaşanmıştır. Bundan dolayı çalışma daha stabil şartlarda daha hassas bir şekilde tekrarlanarak daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. Koç, V. ve Birinci, F. (2012). Lifli betonda boyut etkisi tokluk ve kırılma enerjisi. *SDU International Technologic Science*, 4, 24-40.
2. Arrea, M. and Ingraffea, A. R. (1982). Mixed-mode crack propagation in mortar and concrete; Department of Structural Engineering, Cornell University, *Report 81-13*. Ithaca, New York.
3. Bazant, Z. P. and Pfeiffer, P. A. (1986). Shear fracture tests of concrete. *Materials and Structures*, 19, 111–121.
4. Reinhardt, H. W., Cornelissen, H. A. W., Hordijk, D. A. (1989). Mixed mode fracture tests on concrete. In S.P. Shah and S.E. Swartz (Eds.). *Fracture of concrete and rock*. New York, Springer, 117-130.
5. Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., 1-204.
6. Aitcin, P. C. (2000). Cement of yesterday and today concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
7. Taşdemir, M. A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi*, 1(2), 125-144.
8. Jansen, D. C., Shah, S. P. and Rossow, E. (1995). Stress-strain results of concrete from circumferential strain feedback control testing, *ACI Materials Journal*, 92, 419-428.
9. Kocataşkın, F. (1991). *Yüksek dayanımlı betonun bileşimi*, 2. Ulusal Beton Kongresi, Kardeşler Matbaası, (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası), 211-226.
10. Sarı, D. S. (2008) *Normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına lif içeriğinin ve dayanımının etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 4-5.
11. Strategic Highway Research Program (1991). High performance concretes, a state of the art report; National research council. *SHRP-C/FR-91-103*, Washington.
12. Akman M.S. (2001). *Yüksek performanslı betonların teknolojisi, özellikleri, sorunları, geleceği*. Türkiye İnşaat Mühendisleri XVI. Teknik Kongresi, Özel Oturum Konuşmaları, Ankara.
13. Abbas, S., Nehdi, M. L. and Saleem, M. A. (2016). Ultra-high performance concrete: Mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10(3), 271–295.
14. Schmidt, M. and Fehling, E. (2005). Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe. *Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, 51–78.

15. Richard, P. and Chezyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 1501-1511.
16. Richard, P. and Chezyrezy, M. (1994). Reactive powder concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *ACI Materials Journal*, 144, 507-518.
17. Şimşek O. (2012). *Beton ve Beton Teknolojisi* (Dördüncü Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 29-87.
18. Yeğınobalı, A. (2009). *Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı* (Altıncı Baskı). Ankara: Fersa Matbaacılık, 9-47.
19. Topçu, İ. B., Canbaz, M. ve Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 9(1), 59-63.
20. Yılmaz A. D. (2003). Yeni Kuşak Hiper Akışkankanlaştırıcı Beton Katkıları. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 125-129.
21. Kaya, H. (2010). *Yüksek fırın cürufu katkılı betonda su/çimento oranının etkinlik katsayısına ve kırılma parametrelerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 12-34.
22. Shah S.P. and Balaguru P. N. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*. (First edition). New York: McGraw-Hill, 530.
23. Ekıncioğlu, Ö. (2003). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı – bir optimum tasarım*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-19.
24. Qian, C., Stroven, P., Dalhuisen, D. H. and Moczko, A. (2000). Fracture properties and acoustic emission response of hybrid polypropylene-steel fibre reinforced concrete. *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concrete*, Lyon, France, 491-500.
25. Betterman, L. R., Ouyang, C. and Shah, S. P. (1995). Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61.
26. Özalp, F. (2006). *Ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 18-24.
27. Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, N. ve Yerlikaya, M. (2004). *Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler*. Beton 2004 Kongresi Bildiriler, İstanbul, 24-57.
28. Craig, R. J. (1984). Structural application of reinforced fibrous concrete. *Concrete International*, 6(12), 28-32.
29. ACI Committee 544. (2002). State of the art report on fiber reinforced concrete; *ACI 544.1R-96, ACI Structural Journal*, 1-66.
30. Arslan, A. ve Aydın, A. C. (1999). *Lifli betonların darbe etkisi altındaki genel özellikleri*, Çelik Tel Donatılı Beton Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul, 44-53.

31. Goldfein, S. (1965). Fibrous reinforcement for portlant cement. *Modern Plastic*. 42(8), 156-160.
32. Arslan, A. (1993). Çelik lifli betonların özellikleri ve kullanım potansiyeli. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 369, 29-33.
33. Arslan, A. ve Ulucan, Z. Ç. (1997). Çelik liflerin erken yaştaki betonarme kirişlerin göçmesine etkisi. *Teknik Dergi*, 8, 1505-1515.
34. Köksal, F. (2004). *Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 12-19.
35. Aral, M. (2006). *Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 28-38.
36. Kurt, G. (2006). *Lif içeriği ve su/çimento oranının fibrobetonun mekanik davranışına etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-27.
37. Chawla K. K. (1998). *Fibrous materials*. New York: Cambridge University Press, 293.
38. Boğazkesen, K. K. (2011). *PVA lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-18.
39. Yıldırım, H., Sertbaş, B. ve Berbergil, V. (2007). *Kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen ve çelik lif kullanılmasının işlenebilirliğe etkisi*. 7.Ulusal Beton Kongresi, 65-75.
40. Walraven J. (1999). The evolution of concrete. *Structural Concrete*, 1, 3-11.
41. Yavuz, G. (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 6, 1001-1015.
42. ACI Committee 440 (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars; American Concrete Institute. *ACI 440.1R-06*, Farmington Hills, 1-44.
43. Aran, A. (1981). Kırılma mekaniğine giriş seminer notları. *Tübitak Marmara Araştırma Merkezi*, Gebze, 1-28.
44. Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics: fundamentals and applications* (Third edition). New York: CRC Press, 25-171.
45. Yayla, P. (2007). *Kırılma Mekaniği*. Türkiye: Çağlayan Kitapevi, 1-72.
46. English, C. E. (1913). Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Transaction of the Institute of Naval Architects*, 55, 219-241.

47. Griffith, A. A. (1920). The Phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 221, 163-198.
48. Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364.
49. Barenblatt, G. I. (1959). On equilibrium cracks forming during brittle fracture. *Prikladnaya Matematikai Mekhanika*, 23, 434-444.
50. Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100-104.
51. Wells, A. A. (1961, January). Unstable crack propagation in metals, cleavage and fast fracture. *Proceedings of the Crack Propagation Symposium*, Cranfield, UK.
52. Rice, J. R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386.
53. Hillerborg, A., Modéer, M. E. and Petersson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6, 773-781.
54. Bazant, Z. P. (1984). Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 110, 518-535.
55. Ceriolo, L. and Di Tomasso, A. (1998). *Fracture mechanics of brittle materials: a historical point of view*. Paper presented at the Second International Symposium in Civil Engineering, Budapest.
56. İnce, R. (1994). *Çimento bazlı malzemelerin kırılmasında (non-lineer kırılma mekaniği) boyut tesirinin yapay sinir ağları ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 31-61.
57. Lawn, B.R. and Wilshaw, T.R. (1975). *Fracture of brittle solids* (Second edition). New York: Cambridge University Press, 1-80.
58. Irwin, G.R.(1958). *Fracture*, Handbach der Physik, Berlin: Springer-Verlag, 6, 551-590.
59. Kanninen M. F. and Popelar C. H. (1985). *Advanced fracture mechanics*. (First edition). New York: Oxford University Press, 584.
60. Bilby, B. A., Cottrell, A. H. and Swinden, K. H. (1963). The spread of plastic yield from a notch. *Proceeding of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Science*, 272, 304-314.
61. Carpinteri, A. (1981). Experimental determination of fracture toughness parameters K_{Ic} and J_{Ic} for aggregative materials. In D. François (Ed.), *Advances in Fracture Research*. Paper presented at The Proceeding of the 5th International Conference On Fracture, Cannes, France, 1491-1498.

62. Kraft, J. M., Sullivan, A. M. and Boyle, R. W. (1961). *Effect of dimensions of fast fracture instability of notched sheets*. Proceedings of Cranfield Crack Propagation of Cranfield Crack Propagation Symposium, 1, 8-28.
63. Shah S. P., Swartz, S. E. and Ouyang, C. (1995). *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 33-346.
64. Akkaya, Y., Bayramov, F. and Taşdemir, M. A. (2003). Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 70-75.
65. Neville, A. M. (1959). Some aspects of the strength of concrete. *Civil Engineering and Public Works Review*, 54(639), 1153-1156.
66. Weibull, W. (1938). A statistical theory of strength of materials. *The Royal Swedish Academy of Engineering Sciences*, 151, 1-45.
67. Kaplan, M. F. (1961). Crack propagation and the fracture of concrete. *Journal Proceedings*, 58, 591-610.
68. Glucklich, J. (1968). Diagrammatic stress-strain of concrete in compression. *Cement and Concrete Association*, 176-189.
69. Bazant, Z. P. and Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Material and Structure*, 16, 155-177.
70. Jenq, Y. and Shah, S. P. (1985). Two parameter fracture model for concrete. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 111(10), 1227-1241.
71. Carpinteri A. (1992). *Application of fracture mechanics to reinforced concrete*. Northern Ireland: The Universities Press (Belfast) Ltd., 1-605.
72. Naus, D. J. and Lott, J. L. (1969). Fracture toughness of portland cement concrete. *Journal of ACI*, 66, 481-489.
73. Mindess, S., Lawrence, J. and Kesler, C. F. (1977). The J integral as a fracture criterion for fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 7, 731-742.
74. Barr, B. and Bear, T. (1977). Fracture toughness. *Concrete*, 11, 30-32.
75. Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T. (1990). Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete. *International Journal of Fracture*, 44, 111-131.
76. RILEM Technical Committee 50-FCM (1985). Draft recommendation: determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bent test on notched beams. *Materials and Structures*, 106, 285-290.
77. Van Mier, J. G. M. (2000). *Fracture processes of concrete*. New York: CRC Press, 55-154.

78. Reinhardt, H. W., Ozbolt, J., Xu, S. and Dinku, A. (1997). Shear of structural concrete members and pure mode II testing. *Advanced Cement Based Materials*, 5, 75-85.
79. Mattock, A. H. and Hawkins, N. M. (1972). Shear transfer in reinforced concrete-recent research. *PCI Journal*, 17(2), 55-75.
80. Iosipescu, N. (1967). New accurate procedure for single shear testing of metals. *Journal of Materials*, 2(3), 537-566.
81. Tada, H., Paris, P. C. and Irwin, G. R. (1985). *The stress analysis of cracks handbook* (Second edition). St. Louis: Paris Productions, 40-292.
82. Davies, J. (1995). Study of shear fracture in mortar specimens. *Cement and Concrete Research*, 25(5), 1031-1042.
83. Luong M. P. (1990). Tensile and shear strengths of concrete and rock. *Engineering Fracture Mechanics*, 35, 127-135.
84. Richard, H. A. (1981). A new compact shear specimen. *International Journal of Fracture*, 17(5), R105-R107.
85. Banks-Sills, L. and Arcan, M. (1983). An edge-cracked Mode II fracture specimen - A photoelastic-numerical procedure is used to demonstrate the efficacy of a newly proposed pure-shear fracture specimen. *Experimental Mechanics*, 23(3), 257-261.
86. Izumi, M., Mihashi, H. and Numura, N. (1986). *In fracture toughness and fracture energy of concrete*. In F. H. Wittmann (Ed.), Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 347-354.
87. Irobo, M. and Pen, S. Y. (1992). Fracture mechanics of concrete structures. In Z. P. Bazant (Eds.), *Mixed-mode and mode II fracture in of concrete*. London and New York: Elsevier Science Publishers, 719-726.
88. Jia, Z., Castro-Montero, A. and Shah, S. P. (1996). Observation of mixed mode fracture with center notched disk specimens. *Cement and Concrete Research*, 26, 125-137.
89. Jenq, Y. S. and Shah, S. P. (1988). Mixed-mode fracture of concrete. *International Journal of Fracture*, 38, 123-142.
90. Ingraffea, A. R. and Panthaki, M. J. (1986). *Analysis of shear fracture tests of concrete beams, in finite element analysis of reinforced concrete structures*. In C. Meyer and H. Okamura (Eds.), American Society of Civil Engineers, New York, 151.
91. Swartz, S. E., Lu, L. W., Tang, L. D. and Refai, T. M. E. (1988). Mode II fracture parameter estimates for concrete from beam specimens. *Experimental Mechanics*, 28(2), 146-153.
92. Swartz, S. E. and Taha, N. M. (1990). Mixed mode crack propagation and fracture in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 35, 137.

93. Schlangen, E. and Van Mier, J. G. M. (1990). *A FE-spported investigation of mixed mode fracture in concrete*. Proceedings of the 9th International Conference on Experimental Mechanics, Copenhagen, Denmark, 1403-1412.
94. Barr, B., Hasso, A. and Khalifa, S. (1987). *A study of mode II (shear) fracture on notched beams, cylinders and cores*. In S. P. Shah and S. E. Swartz (Eds.), Proceedings of the SEM-RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, Hauston, TX, 370-382.
95. Barr, B. and Hughes, T. G. (1989). *A Comparative Study of Three Proposed Geometries Used to Investigate the Fracture Behaviour of Materials under Mixed Mode Loading*. Proceedings of the 1989 SEM Spring Conference on Experimental Mechanic, Cambridge, 59-65.
96. Arslan, A., Hughes, T. G., and Barr, B. I. G. (1990). Fracture behaviour and design of materials and structures. In D. Firrao (Ed.), *Mixed mode fracture in compact shear specimens*. United Kingdom: EMAS Publication, 676-681.
97. Arslan, A., Hughes, T. G. and Barr, B. I. G. (1991). In fracture processes in concrete, rock and ceramics. In J. G. M. Van Mier, J. G. Rots and A. Bakker (Eds.), *Mixed mode fracture-including torsion in a new compact test specimen geometry*. London: Chapman and Hall 737-746.
98. Kaloush, K. E., Biligiri, K. P., Zeiada, W. A., Rodezno, M. C., and Reed, J. X. (2010). Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(4), 1-12.
99. ACI Committee 318 (2011). *Building code requirements for structural concrete and Commentary*. ACI 318M-11, Farmington Hills: American Concrete Institue, 161-165.
100. TS 500, (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 29-31.
101. Sharma, A. K. (1986). Shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*, 83(4), 624-628.
102. Narayanan, R. and Darwish, I. Y. S. (1987). Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 84(3), 216-227.
103. Swamy, R. N., Mangat, P. S., and Rao, C. V. S. K. (1974). The mechanics of fiber reinforcement of cement matrices. *ACI Special Publication*, 44, 1-28.
104. Khuntia M., Stojadinovic B. and Goel S. C. (1999). Shear strength of normal and high strength fiber reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 96(2), 282-289.
105. Khanlou, A., MacRae, G. A., Scott, A. N., Hicks, S. J. and Clifton, G. C. (2012). *Shear performance of steel fibre-reinforced concrete*. Australasian Structural Engineering Conference, Perth, Australia, 8.
106. TS EN 206-1, (2002). Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 13-14.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MÜTEVELLİ ÖZKAN,
İffet Gamze

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 26.08.1988, Kastamonu

Medeni hali : Evli

Telefon : 0 (366) 212 66 90

e-mail : gmutevelli@kastamonu.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi / İnşaat Müh.	2011
Lise	Mustafa Kaya Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	Kastamonu Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2015	Oyrak İnşaat Oto. Tur. San. Tic. Ltd. Şti.	İnşaat Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Arslan, A. and Mütevelli Özkan, İ.G. (2017). *A study on effect of micro fiber ratios on shear fracture of high performance concrete*. 2nd International Conference on Civil and Environmental Engineering, Nevşehir, Turkey, 3660-3673.
- Arslan, A. ve Mütevelli Özkan, İ.G. (2017). *Yüksek performanslı betonlarda kesme kırılması davranışı*. 6. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı, Trabzon, Türkiye, 83-84.

3. Kaplan, G., Yılmazoğlu, M. U., Memiş, S., Mütevellî Özkan, İ. G. ve Yaprak, H. (2017). *Akışkanlaştırıcı özellikleri ve çimento sıcaklığının harç özelliklerine etkileri*. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, Türkiye, 167-184.
4. Memiş, S., Kaplan G., Yılmazoğlu, M. U., Mütevellî Özkan, İ. G. ve Yaprak, H. (2017). *Orman endüstri atık külleri ve yüksek oranda su azaltıcı katkıların kendiliğinden yerleşen harçlar üzerindeki etkileri*. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, Türkiye, 491-506.
5. Memiş, S., Kaplan, G., Yılmazoğlu, M. U., Yaprak, H. ve Mütevellî, İ. G. (2017). *Farklı sıcaklık ve sürelerde kalsine edilmiş killerin kireç harcına etkisi*. 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, Türkiye, 133-142.
6. Mütevellî Özkan, İ. G., Yılmazoğlu M. U., Kaplan, G., Memiş, S. and Yaprak H. (2017). *Behaviors of mortar samples with waste brick and ceramic under freeze-thaw effect*. 3rd International Sustainable Buildings Symposium, Dubai.
7. Memiş S., Kaplan G., Yaprak H., Yılmazoğlu M. U. and Mütevellî İ. G. (2016). *Investigation of thermo mechanical properties at plaster included waste ceramics and bricks*. The 8th Mac in Prague 2016, Prague, 12.
8. Memiş S., Mütevellî İ. G. and Yılmazoğlu, M. U. (2016). Statistical evaluation of plant mixed concrete produced in sinop province. *E-Journal of New World Sciences Academy*, 11(4), 83-92.
9. Yılmazoğlu M. U., Memiş, S. ve Mütevellî, İ. G. (2016). Kastamonu ilinde kullanılan betonların nicel analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 756-764.
10. Yılmazoğlu M. U., Memiş, S. ve Mütevellî, İ. G. (2015). *Kastamonu ilinde kullanılan betonların nicel analizi*. Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu, Düzce, Türkiye.

Hobiler

Yağlı boya yapma, müzik dinleme, seyahat etme

DİZİN

A

Aramid lifler · 14

B

Betonda kesme çatlakları · 37
Boyut etkisi parametreleri · viii,
35

C

Çatlak Açılma Deplasmanı · 17,
24
Çatlak bant modeli · xv, 34
Çatlak yörüngeleri. İv, xvi, 2, 44

D

Deney Düzeneği · ix, 60

E

Elastisite modülü · xxvi, 8
Elasto-Plastik Kırılma Mekanikliği ·
xxix, 17, 23

F

Fiktif çatlak modeli · viii, 33

G

Gerilme yığılmaları · 18

İ

İki parametrelili model · viii, 34

J

J integrali · viii, xv, 17, 25, 26

K

Kesme açısının etkisi · 2
Kırılma tokluğu · 1, 21
Kohezif çatlak · 31

L

Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği
· viii, 19

M

Mikro çelik lif · xx, xxi, xxii,
120, 124, 128, 132, 136, 140,
141, 159
Mikro polimer lif · xx, xxi,
xxii, 157, 139, 138, 136, 133,
132, 129, 128, 125, 124, 121,
120, 157
Mod I · xvi, 42, 70
Mod II · iv, ix, 38, 39

P

Polipropilen lifler · 13

R

R eğrisi · viii, 26, 27
Referans numunesi · 58, 63
RILEM · ix, xiii, xvi, 36, 45, 164,
167, 169

S

silis dumanı · 5, 8, 9, 54, 57
süneklik ve tokluk · 1,6

V

Veri toplayıcı · x, xxiv, 61

Y

YDB · xiii, xxix, 5, 6, 8
YPB · xxix, 6, 7
Yük hücresi · ix, xxiv, 60

Z

zıt yönlü kuvvetlere · 71, 78, 80,
89, 90, 96, 98, 102, 104, 108,
110



GAZİ GELECEKTİR..