

**KARBON NANOTÜP KATKILI BETONDA
KARIŞIK MODDA ARCAN YÜKLEMESİNDE
BOYUT ETKİSİ**

Veysel Baran BODUROĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2014
ANKARA**

Veysel Baran BODUROĞLU tarafından hazırlanan "KARBON NANO TÜP KATKILI BETONDA KARIŞIK MODDA ARCAN YÜKLEMESİNDE BOYUT ETKİSİ" adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Sıddık ŞENER

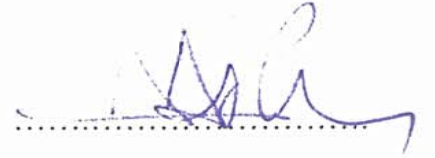
Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. A. Samet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.



Prof. Dr. Sıddık ŞENER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.



Yrd. Doç. Orhan DOĞAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, K.Ü.

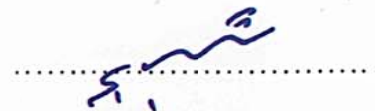


Tez Savunma Tarihi: 17/02/2014

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildiririm.

Veysel Baran BODUROĞLU

**KARBON NANOTÜP KATKILI BETONDA
KARIŞIK MODDA ARCAN YÜKLEMESİNDE
BOYUT ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Veysel Baran BODUROĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Şubat 2014

ÖZET

DeneySEL bu çalışmanın amacı, çok duvarlı nano karbon tüp katkısının beton dayanımına etkisinin anlaşılmasıdır. Karışımın homojen olabilmesi için ultrasonik karıştırıcı kullanılmış ve çentikli dikdörtgen numunelerin çekme performansını tespit için modifiye arcan deney aleti kullanılmıştır. Çekme deneyinde 36 adet nanolu, 36 adet nanosuz olmak üzere farklı açılarda ve derinlikte, çentikli toplam 72 adet prizmatik numune hazırlandı. Basınç deneyinde dayanımını ve boyut etkisini araştırmak için farklı boyutlarda 54 adet nanolu ve nanosuz silindir numune hazırlandı. Nanolu karışımlarda homojen olabilmesi için sürfaktan kullanılmıştır. Nano karbonun beton dayanımına olumlu katkısı ile homojen bir karışım için gerekli olan sürfaktanın olumsuz etkisinden dolayı nanonun beton dayanımına katkısı beklenen düzeyde olmamıştır. Ancak nano katkılı numunelerde boyut etkisi katkısız numunelere oranla daha düşük olmuştur.

Bilim Kodu : 911.1.082
Anahtar Kelimeler : Arcan test, Boyut etkisi, Karbon nanotüplü beton
Sayfa Adedi : 111
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Sıddık ŞENER

**SIZE EFFECT FOR CONCRETE WITH ADDITION OF CARBON
NANOTUBE IN MIXED MODE ARCAN LOADING**

(M. Sc. Thesis)

Veysel Baran BODUROĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2014

ABSTRACT

The aim of this experimental study is understanding the effect of addition of multiwalled carbon nanotubes on the concrete strength. The ultrasonic mixer was used to obtain a homogeneous mixture and the modified arcan test apparatus was used for establishing the tensile performance of the notched rectangular specimens. In the tensile tests totally 72 prismatic specimens that including 36 nano additive and 36 without nano additive specimens with different angles and depths were prepared. In the compression test for investigating the strength and size effect 54 nano additive and no nano additive cylinder specimens were prepared. In the mixtures consisting nano material for providing more homogeneous mixtures, the surfactant material was used. Although the positive effects of carbon nano tubes on the concrete strength because of the negative effects of the surfactant that necessary to obtain homogeneous mixture, the concrete strength of the specimens with carbon nano tubes was not like expected. But, the size effect for the specimens with carbon nano tube addition was lower when it is compared with the specimens without carbon nano tube addition.

Science Code : 911.1.082
Key Words : Arcan test, Size effect, Concrete with carbon nanotubes
Page Number : 111
Supervisor : Prof. Dr. Sıddık ŞENER

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın başladığı günden itibaren benimle bilgi ve tecrübelerini paylaşan, beni yönlendiren, projenin tamamlanması için önemli yardımlarını esirgemeyen tez danışman hocam Sayın Prof. Dr. Sıddık ŞENER' e en içten saygılarımı sunar ve gönülden teşekkür ederim.

Tez çalışmamın hem deneysel kısmında hem de araştırma kısmında bilgi ve tecrübelerini paylaşan ve benden yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Araş. Gör. Yasin ÇAĞLAR' a gönülden teşekkürlerimi sunarım.

11M374 nolu Tübitak projesinde aldığımız destek için çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışma aşamasının tamamlanmasına laboratuvardaki pratik çözümleriyle büyük katkı sağlayan hocam Sayın Uzman Faruk OGÜN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Beni her zaman destekleyen ve yanımda olan, benden yardımlarını esirgemeyen çok değerli aileme emek ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmakta olduğum Dumanoğlu Müh. Müş. San. Tic. Ltd. Şti'ye katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, lisans ve yüksek lisans hayatımda desteğini benden eksik etmeyip her zaman bana yardımcı olan Burçak ULUSOY' a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xv
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KIRILMA MEKANIĞI ve BOYUT ETKİSİ	7
2.1. Kırılma Mekanizması	7
2.2. Kırılma Sınıflandırılması.....	7
2.3. Kırılma Mekaniği	8
2.4. Boyut Etkisi	12
2.4.1. Type I boyut etkisi	15
2.4.2. Type II boyut etkisi.....	16
3. MALZEME	20
3.1. Karbon Nano Tüpler.....	20
3.1.1. Karbon nano tüplerin tarihçesi.....	20
3.1.2. Karbon nano tüplerin çeşitleri	21

3.1.3 Karbon nano tüpleri elde etme yöntemleri	24
3.1.4. Karbon nano tüplerin yapısal özellikleri.....	27
	Sayfa
3.1.5. Karbon nano tüplerin mekanik özellikleri	28
3.2. Sürfaktan	30
3.3. Akışkanlaştırıcı.....	32
4. DENEY ELEMANLARI	33
4.1. Çekme Prizmaları	34
4.2. Prizmalara çentik açma.....	41
4.3. Basınç Silindirleri.....	45
4.4. Basınç Silindirlerine Başlık Yapılması	46
5. DENEY ALETİ.....	49
5.1. Arcan Deney Aleti	49
5.1.1. Arcan deney düzeneğinin gelişimi.....	49
5.1.2. Arcan deney düzeneğinin kullanımı	50
5.1.3. Geliştirilmiş arcan aleti.....	52
5.2. Ultrasonik Homojenizatör (Karıştırıcı)	55
5.3. Beton Test Presi.....	56
6. DENEY SONUÇLARI	57
6.1. Çekme Prizmalarının Sonuçları.....	57
6.1.1. Yük-yer değiştirme eğrileri.....	57
6.1.2. Aynı çentik boyunda göçme yükleri.....	68
6.1.3. Çekme prizmalarında boyut etkisi	71
6.2. Basınç Silindirlerinin Sonuçları	77

6.2.1. Basınç silindirlerinde boyut etkisi	80
7. GÖÇMEDE ÇATLAK DAĞILIMLARI	85
	Sayfa
7.1. Prizmalarda Çatlak Dağılımları	85
7.1.1. Nanosuz prizmalarda çatlak dağılımları	85
7.1.2. Nanolu prizmalarda çatlak dağılımları	90
7.2. Basınç Silindirlerinde Kırılma Biçimleri	94
7.2.1. Nanosuz silindirlerinde göçme biçimleri	94
7.2.2. Nanolu silindirlerinde göçme biçimleri	96
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR	100
EKLER	104
Ek-1. Çekme Prizmalarında Boyut Etkisi	105
Ek-2. Basınç Silindirlerinde Boyut Etkisi	108
ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Tek katmanlı nanotüplerin özellikleri	21
Çizelge 3.2. Çok katmanlı nanotüplerin özellikleri	23
Çizelge 3.3. Glenium 51 teknik özellikleri	32
Çizelge 4.1. Grupların arcan testi aparatına yerleştirilme açıları	33
Çizelge 4.2. Bir grup numune için kullanılan malzeme hacimleri	35
Çizelge 4.3. Her bir grup için karışıma konulan malzeme miktarları ve oranları.....	36
Çizelge 4.4. Numunelere açılan çentik miktarları	41
Çizelge 4.5. Çekme prizması sayıları	43
Çizelge 4.6. Basınç silindiri sayıları	45
Çizelge 4.7. Deney elemanları hazırlanış tarihleri	48
Çizelge 5.1. Çekme test cihazı özellikleri	53
Çizelge 6.1. Çekme prizmaları deney sonuçları	57
Çizelge 6.2. Çekme prizmalarında gerilme değerleri	72
Çizelge 6.3. Basınç silindirleri deney sonuçları	77
Çizelge 6.4. Basınç silindirlerinin en büyük yük ve dayanım değerleri	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları.....	9
Şekil 2.2. Griffith çatlak formu, çatlak ucu ve çentik ucu gerilme yığılmaları (Alyamaç,2004).....	10
Şekil 2.3. Kırılma modları (Kumar ve Barai, 2010)	12
Şekil 2.4. Boyut etkisinin enerji ile açıklanması (ho - genişliği, ao – uzunluklu çatlak bandı ile kırılmanın oluşumu)	13
Şekil 2.5. Boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi (Type I)	15
Şekil 2.6. Boyut etkisi ifadesinin grafik gösterimi (Type II)	18
Şekil 3.1. Tek katmanlı karbon nanotüplerin katlanış şekillerine göre çeşitleri	22
Şekil 3.2. TEM mikroskobunda SWNT Görüntüsü	22
Şekil 3.3. Tek Katmanlı ve çok katmanlı nanotüpler	23
Şekil 3.4. TEM mikroskobunda MWNT görüntüsü	23
Şekil 3.5. Ark buharlaşma düzeneğinin şematik gösterimi (M. A. J. Veld)	25
Şekil 3.6. Nano tüpün giriş vektörü, ch'nin bağlı olduğu parametreler	27
Şekil 3.7. Bazı genel yüksek-dayanımlı malzemelerin çekme dayanımı	29
Şekil 3.8. İnce taneli malzemeyle (a): sürfaktansız, (b): sürfaktanlı karışım	31
Şekil 4.1. Çekme prizması numune geometrisi ve boyutları	34
Şekil 4.2. Çekme prizması boyutları ve çentik boyları	35
Şekil 4.3. Elek analizinin şematik olarak gösterimi	36
Şekil 4.4. Numune boyutları ve çentik miktarı	41
Şekil 4.5. Basınç silindir boyutları; (a): küçük, (b): orta boy, (c): büyük	45

Şekil 5.1. Arcan deney aparatı (arcan et al, 1978) 49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Şematik olarak arcan deney düzeneği)	51
Şekil 5.3. Şematik olarak çekme, düzlem gerilme ve kesme durumları).....	51
Şekil 6.1. 66 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ eğrileri.....	59
Şekil 6.2. 66 Günlük nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ eğrileri	59
Şekil 6.3. 66 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri.....	60
Şekil 6.4. 66 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	60
Şekil 6.5. 66 Günlük nanolu %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	61
Şekil 6.6. 66 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	61
Şekil 6.7. 61 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	62
Şekil 6.8. 61 Günlük Nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ eğrileri	62
Şekil 6.9. 61 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri.....	63
Şekil 6.10. 61 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	63
Şekil 6.11. 61 Günlük nanolu %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	64
Şekil 6.12. 61 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	64
Şekil 6.13. 52 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri.....	65
Şekil 6.14. 52 Günlük nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	65
Şekil 6.15. 52 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri.....	66
Şekil 6.16. 52 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	66
Şekil 6.17. 52 Günlük nanolu %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri.....	67
Şekil 6.18. 52 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri	67
Şekil 6.19. 66 Günlük % 25 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafığı.....	68

Şekil 6.20. 66 Günlük % 32 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	68
Şekil 6.21. 66 Günlük % 64 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	69
Şekil	Sayfa
Şekil 6.22. 61 Günlük % 25 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	69
Şekil 6.23. 61 Günlük % 32 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	69
Şekil 6.24. 61 Günlük % 64 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	70
Şekil 6.25. 52 Günlük %25 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	70
Şekil 6.26. 52 Günlük %32 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	71
Şekil 6.27. 52 Günlük %64 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği.....	71
Şekil 6.28. Birinci dökümde değişik çentik boylarında gerilme değerleri.....	74
Şekil 6.29. İkinci dökümde değişik çentik boylarında gerilme değerleri	74
Şekil 6.30. Üçüncü dökümde değişik çentik boylarında gerilme değerler	75
Şekil 6.31. 66 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması	75
Şekil 6.32. 61 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması	76
Şekil 6.33. 52 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması	76
Şekil 6.34. Birinci dökümde silindir çapına karşılık gerilme değerleri	80
Şekil 6.35. Birinci dökümde silindir çapına karşılık ortalama gerilme değerleri	81
Şekil 6.36. İkinci dökümde silindir çapına karşılık gerilme değerleri	81
Şekil 6.37. İkinci dökümde silindir çapına karşılık ortalama gerilme değerleri	82
Şekil 6.38. Üçüncü dökümde silindir çapına karşılık gerilme değerleri	82
Şekil 6.39. Üçüncü dökümde silindir çapına karşılık gerilme değerleri	83
Şekil 6.40. Birinci döküm numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması	83
Şekil 6.41. İkinci döküm numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması	84
Şekil 6.42. Üçüncü döküm numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması	84

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Kullanılan nano malzeme (CNT).....	37
Resim 4.2. Beton karıştırıcısı ile karışımın hazırlanması	37
Resim 4.3. Çekmeye maruz nano malzeme içermeyen prizmalar için kullanılan ahşap kalıp.....	38
Resim 4.4. Çekmeye maruz nano malzeme katkılı prizmalar için kullanılan ahşap kalıp.....	39
Resim 4.5. Sarsma tablası yardımıyla vibrasyon (sıkıştırma) işlemi	39
Resim 4.6. Kür havuzu.....	40
Resim 4.7. Çentik açılması için numunelerin işaretlenerek hazırlanması	42
Resim 4.8. Çentik açılması işlemi.....	42
Resim 4.9. Arcan deney düzeneğine numunelerin yerleştirilmesi.....	44
Resim 4.10. Deney sırasında bilgisayar yardımıyla yük - yer değiştirme grafiklerinin elde edilmesi.....	44
Resim 4.11. Basınca maruz silindirler için kullanılan çelik kalıplar	46
Resim 4.12. Basınç silindirleri	46
Resim 4.13. Silindir başlık yapımı için kullanılan alet	47
Resim 4.14. Temsili silindir başlık yapımı örneği	47
Resim 5.1. Modifiye arcan test aparatı bölümleri	52
Resim 5.2. Arcan testi deney düzeneği	53
Resim 5.3. Kullanılan arcan deney aparatı.....	54
Resim 5.4. Ultrasonik karıştırıcı	55
Resim 5.5. Ultrasonik karıştırıcının kullanımı	55

Resim 5.6. Beton test presi.....	56
Resim	Sayfa
Resim 6.1. Basınç silindirleri.....	77
Resim 7.1. 0 ⁰ olan 66 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	85
Resim 7.2. 0 ⁰ olan 66 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı.....	86
Resim 7.3. 0 ⁰ olan 66 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	86
Resim 7.4. 15 ⁰ olan 61 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	87
Resim 7.5. 15 ⁰ olan 61 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı.....	87
Resim 7.6. 15 ⁰ olan 61 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	88
Resim 7.7. 90 ⁰ olan 52 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	88
Resim 7.8. 90 ⁰ olan 52 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı.....	89
Resim 7.9. 90 ⁰ olan 52 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	89
Resim 7.10. 0 ⁰ olan 66 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	90
Resim 7.11. 0 ⁰ olan 66 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı.....	90
Resim 7.12. 0 ⁰ olan 66 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	91
Resim 7.13. 15 ⁰ olan 61 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	91
Resim 7.14. 15 ⁰ olan 61 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı.....	92
Resim 7.15. 15 ⁰ olan 61 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	92
Resim 7.16. 90 ⁰ olan 52 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı.....	93
Resim 7.17. 90 ⁰ olan 52 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı	93
Resim 7.18. 90 ⁰ olan 52 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı.....	94
Resim 7.19. Nanosuz büyük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları	94
Resim 7.20. Nanosuz orta boy basınç silindirlerinde kırılma hatları.....	95

Resim 7.21. Nanosuz küçük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları	95
Resim 7.22. Nanolu büyük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları	96
Resim	Sayfa
Resim 7.23. Nanolu orta boy basınç silindirlerinde kırılma hatları	96
Resim 7.24. Nanolu küçük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları.....	97



SİMGELER VE KISALTMALAR

Tez çalışmasında kullanılmış olan simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Eliptik boşluk boyu
b	Eliptik boşluk eni
σ_m	Eliptik boşluk çevresindeki maksimum gerilme
σ	Sonsuz levhaya uygulanan gerilme, Kırılma gerilmesi
K_t	Gerilme yığılma faktörü
γ	Yüzey enerjisi
E	Elastisite modülü
a	Çatlak boyunun yarısı
σ_f	Kırılmaya sebep olan gerilme miktarı
G	Kırılma işi
h_o	Çatlak bandının genişliği
a_o	Çatlak uzunluğu
D	Yapı boyutu
k	Eğim olup yapı biçimine bağlı ampirik sabit
Δa	Ek uzama enerjisi
W	Yapıda depolanan potansiyel enerji
G_f	Kırılma enerjisi
σ_N	Numunelerin Gerilmeleri
Db, fr^∞	Lineer regrasyon sonucu bulunan malzeme sonuçları
B	Malzeme dayanımına bağlı sabit
f_t	Betonun çekme dayanımı
d_a	En büyük dane çapı
β	Gevreklik sayısı
f_c	Beton basınç dayanımı

Ch Nano tüpün kiriŒ vektörü

Simgeler Açıklama

â1, â2 Hegzagonal örgüde birim vektörler

l Numune yüksekliği

t Numune kalınlığı

V Hacim

x çentik boyu

d Silindir numune apı

φ Deney açısı

α çentik oranı (*a/D*)

P₀ Nanosuz elemandaki kırılma yükü

P_{c0} Nanolu elemandaki kırılma yükü

Kısaltmalar Açıklama

CNT Karbon nanotüp

LEKM Lineer Elastik Kırılma Mekaniięi

MWNT ok Katmanlı Nanotüpler

NL Nanolu

NS Nanosuz

SURF Sürfaktan

SWNT Tek Katmanlı Nanotüpler

1. GİRİŞ

Beton, günümüzün en çok kullanılan yapı malzemesidir. Nano teknoloji ise birçok değişik amaçlı akıllı malzemelerin üretilmesini sağlayan bir daldır. Nano teknoloji son yıllarda beton dayanımının yükseltilmesi çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır ve çeşitli nano mikro malzemelerin kullanımıyla dayanım yükseltilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca, bu çalışmalar nano ölçekteki özelliklerin irdelenmesini sağlayabilmek için atomik kütle mikroskobu gibi nano görüntüleme tekniklerinin kullanılmasıyla malzemelerin daha gelişmiş performansa sahip olması sağlanmaktadır.

Beton, yeterli dayanım ve dayanıklılık sergilemesi özellikleri nedeniyle en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ulaşılmak istenen dayanım değerine geleneksel beton ile ulaşılamadığı durumlar beton dayanımının değişik tekniklerle yükseltilmesi çalışmalarını meydana getirmiştir.

Dayanımın yükseltilmesi amacıyla kullanılan nano malzemeler, kırılma anında yutulan enerji miktarını artırarak daha yüksek dayanım ve daha fazla kırılma enerjisi yutulmasını sağlayarak daha sünek bir davranış sergilenmesini sağlar.

Günümüzde kullanımda olan yönetmeliğimiz TS500 plastik limit analizine dayanmakta olup boyut etkisi prensiplerini içermemektedir. Malzeme davranışı, gerilme ve uzama cinsinden tam olarak ifade edilememektedir. Kullanmakta olduğumuz yönetmelikler, betonun birçok bileşenden oluşan yarı gevrek bir malzeme olması nedeniyle karmaşık bir boyut etkisi sergilemesi sebebiyle hem erken hem de ileriki yaşlarda yeterli ve etkin performansı karşılamaktan çok uzaktır. Beton davranışını sadece plastik ya da sadece elastik teoriye göre açıklamak çok yanlış olmamakla birlikte eksiktir. Tam ve gerçeğe en yakın yaklaşım için betonun davranışı kırılma mekaniğine dayanmalıdır.

Kırılma enerjisi ve malzemeyi temsil edebilen karakteristik bir değişken malzemenin matematik modeli için kullanılmalıdır. Betonun çatlak içeren ve homojen olmayan

bir malzeme olması kırılma mekaniği hesaplarındaki değişkenlerin bulunmasını zorlaştırmaktadır.

Bu çalışma, beton yapılar için güvenli ve etkili bir kullanımını sağlamak için değerli bir çalışmadır. Boyut etkisi, kırılma mekaniğinin en önemli uygulama alanlarından biridir. Boyut etkisi aynı zamanda, kırılma mekaniğini kanıtlayabilen ve kırılma şekillerini kolay bir şekilde deneysel olarak inceleyebilen bir uygulama dalıdır. Yapı malzemeleri için boyut etkisini anlamak gereklidir.

Benzer geometrik yapıdaki farklı yapılar karşılaştırıldığında, kırılma anındaki gerilme değerinin elemanın karakteristik boyutu ile azaldığı gözlenir. Yakın zamana kadar bu Weibull tipi teorilerle açıklanmaktaydı ve güvenlik katsayıları kullanılmaktaydı. Boyut etkisinin, olasılıksal davranışın bir sonucu olduğu düşünülmüştü. Gerçekte en büyük yük değerine ulaşılmadan önce çatlaklar büyümektedir. Beton dayanımı, boyut etkisini çok az etkilemektedir. Büyük yapı daha fazla şekil değiştirme enerjisi yutabilir.

Eğilme oluşan kırılmalarda da boyut etkisi görülmüştür. Malzemenin kırılma özellikleri, beton elemanlarda boyut etkisinin beklenmesi gerektiğini gösteren tek neden değildir. Son yıllardaki araştırmalara göre bir elemanın yük-yer değiştirme eğrisi, en büyük yük sonrası, eleman boyutu ile farklı yumuşama (artan yer değiştirmelerle yüklerin azalması) gösterir. Yapı analizindeki boyut etkisinin, fizikte karşılığı olan ölçek yasasının anlaşılması ile birçok fiziki olayın doğru analiz edilmesi gereklidir. Bu durum beton yapılar için de geçerlidir. Büyük ve küçük elemanlar arasındaki ölçek kanununun farklılığı görecelik ve kuantum mekaniği teorilerin gelişmesinin sonucudur.

Bağlayıcı malzemelerin kullanımı tarihsel olarak çok eski zamanlara kadar uzansa da günümüzde üretilen çimento ve hazır beton özellikleri, standartları ve deney yöntemleri ile yeni denebilecek yapı malzemeleridir. Araştırmacılar ve uygulayıcılar şimdiye kadar betonu ve beton bileşenlerini mikro, mezo ve makro ölçekte incelemiştir. Belki de bu nedenle bazı temel sorulara henüz net cevaplar

bulunamamıştır. Günümüzde birçok alanda olduğu gibi nano teknoloji hem beton hem de beton bileşenleri alanında uygulanmaya başlanmış ve belirli bir aşama kaydedilmiştir. Nano mekanik yaklaşımlarla betonların ve çimentolu kompozitlerin modellenmesi de yapılmaktadır. Bu kapsamda kırılma mekaniği düşüncesi, nano mekanik yaklaşımlarla değerlendirilebilmektedir.

Karbon tüpler de, karbon nano fiberler gibi devrimsel nitelikte kompozitler üretmek için kullanılmaktadır. Karbon nano tüplerin kullanımında en büyük problemi bu malzemenin topaklaşmadan kompozit içinde yayılmasını sağlayabilmektir. Bunu gerçekleştirmek oldukça zor bir süreçtir. Normal bir beton karışımı gibi tüm bileşenlerin karıştırılarak, karbon nano tüplü bir karışım üretilmesi olanaksızdır. Uygun karışmamış bir nano tüplü çimentolu kompozit, yeterli işlenebilirliğe sahip olamamakla birlikte yeterli dayanıma da sahip değildir. Uygun karışımı sağlayabilmek için farklı yöntemler önerilmektedir. Karbon nano tüplerin çimento esaslı malzemeler içinde dağıtılması büyük bir problemdir. Uygun bir şekilde dağıtılamaması durumunda aderans özellikleri kötüleşmekte, bu da karışımın davranışını olumsuz etkilemektedir. Bu malzemenin uygun ve homojen bir şekilde çimentolu malzeme içinde dağılmasını sağlamak için çeşitli yöntemler geliştirilmektedir.

Nano tüpler çatlak oluşumunu ve yayılmasını engelleyici yönde yarar sağlarken çimento hamuru-agrega arayüzünün kalitesini artırır. Sonuçta, çok daha dayanıklı ve enerji yutma kapasitesi yüksek karbon nanotüplü karışımlar elde edilebilir. Tek katmanlı karbon nanotüplerle yapılan bir çalışmada, karbon nanotüplerin C-S-H jeli için çekirdeklenme noktası oluşturduğu ve C-S-H'ların nanotüpler üzerinde de olduğu gözlemlenmiştir. Neticede tek katmanlı karbon nanotüplere sağlam bir şekilde bağlanmış, yoğun C-S-H jeli elde edilmiştir. Benzer durum çok katmanlı nanotüplerle de elde edilmiştir.

Yüksek dayanımlı çimentolu harç karışımlarında takviye malzemesi olarak karbon nano tüpler daha eski fiber elemanlara göre birçok avantaj sunmaktadır. İlk olarak, konvansiyonel fiber elemanlara göre önemli derecede daha büyük dayanım ve rijitlik

sergilerler. İkinci olarak, yüksek boy-en oranları sayesinde nano çatlakları engellerler ve çatlak yayılımı için daha büyük enerjiye gereksinim duyarlar. Son olarak, karbon nano tüpler karışımda aynı oranda dağılmış olduğundan oluşabilecek yerel kırılma modlarını engellerler ve büyük oranda dayanım kazanımı sağlarlar.

Beton yapıların güvenliği açısından betonun çatlaması büyük bir problemdir. Betonun çekme dayanımının basınç dayanımına kıyasla oldukça düşük olması, çeşitli şekillerde çekme dayanımının yükseltilmesini çok önemli kılmaktadır. Ancak, karbon nano tüp içeren çimento karışımı üzerinde yapılan deneysel çalışmalar betonun kırılma özelliklerini tam olarak yansıtamamaktadır. Bu çalışmada kullanılan numuneler, karbon nano tüplü harçla döküldü. Bu yüzden, bu çalışma karbon nano tüplü betonun kırılma davranışını incelemek açısından çok önemlidir.

Daha önce yapılan çimento içerikli malzeme çalışmaları çoğunlukla yüksek basınç dayanımı sergileyen yüksek performanslı çimento karışımları üzerine odaklanmıştır. Kendiliğinden oluşan yüksek büzülme gerilmelerinin oluşturduğu hacim değişimlerinin sonucu olarak erken mikro çatlaklara duyarlı gözükmesi ve düşük çekme gerilmesi nedeniyle bu tarz karışımlar gevrek kırılmaya uğramıştır. Bunun üstesinden gelinmesi adına, mikro düzeyde karbon nano tüp içeren harç kullanılması önerilmiştir.

Bu çalışma karbon nano tüplü harçların mekanik özelliklerini araştıran ilk çalışma olmak gibi bir öneme sahiptir. Numuneler özgün deney düzeninde karbon nano tüplerin etkilerini incelemek için çekme (Mod I), kayma (Mod II) ve karışık mod yüklerine maruz bırakıldı. Çalışmanın kazanımı olarak, beton yapıların depreme karşı dayanma gücünün artması için karbon nano tüplere ihtiyaç duyulduğu anlaşıldı.

Makar ve arkadaşları yüksek çözünürlüklü elektronik mikroskop ve Wickers sertlik ölçümlerini kullanarak karbon nano tüplerin çimentonun dayanıma etkisini araştırmış ve sonuç olarak karbon nano tüplerin hidrasyonun ilk aşamalarında etkili olabileceğini göstermiştir. Li ve arkadaşları çimento içindeki bağlayıcıları güçlendirmek için çok katmanlı karbon nano tüplerle karboksilasyon üzerine

çalışmış ve bu sayede % 25 burulma dayanımı ve % 19 basınç dayanımı artışı elde etmiştir. Saez de Ibarra ve arkadaşları hem tek katmanlı (Single Walled Carbon Nano Tubes=SWCNT) hem de çok katmanlı (Multi Walled Carbon Nano Tubes=MWCNT) karbon nano tüp katkılı numunelerde atomik güç mikroskobu (AFM) yardımıyla rijitlik ölçümleri yapmıştır. Cwirzen ve arkadaşları çok katmanlı karbon nano tüplerle farklı konsantrasyonlardaki çimento numunelerinin mekanik özelliklerini araştırmıştır.

Betonun kırılma mekaniğinin önemli bir uygulaması olan boyut etkisi günümüzde dünyada birçok araştırmacı tarafından deneysel ve analitik çalışmalarla zenginleştirilmektedir. Boyut etkisi üzerinde özellikle Amerika'da Northwestern Üniversitesi'nde Prof. Bazant yoğun araştırmalar yapmaktadır. Avrupa'da ise İngiltere'de Prof. Barr, İtalya'da Prof. Carpinteri, Almanya'da Prof. Reinhard, İsviçre'de Prof. Wittmann çalışmaktadır. Japonya'da ise Prof. Mihashi uluslararası çalışmalar yapmaktadır. Konunun önemi dolayısı ile 1987'de başlayan Betonun Kırılma Mekaniği Konferansları bir iki yılda yinelenmektedir.

Bugüne kadar yapılmış boyut etkisi çalışmaları şöyle özetlenebilir: Ön gerilmeli beton kirişlerin kesme göçmesinde boyut etkisi, betonarme kirişlerin kesme göçmesinde boyut etkisi, agrega boyutunun değişimi ile boyut etkisinin incelenmesi, diyagonal kesme göçmesinde boyut etkisi, donatısız boruların kiriş ve çembersel göçmesi, kirişlerin burulma göçmesinde boyut etkisinin analitik incelenmesi, döşemelerin deneysel zımbalama göçmesi, boyuna donatı ve donatısız kirişlerin deneysel olarak burulma göçmesi, çekip çıkarma deneylerinde boyut etkisi, etriyesiz betonarme kirişlerin diyagonal kesme göçmesi, Brezilya yarma deneylerinde boyut etkisi, yüksek mukavemetli, çentikli beton kirişlerde boyut etkisi, beton silindirlerin çift zımbalama deneylerinde boyut etkisi, boyut etkisi üzerine yapılmış analitik ve deneysel çalışmalardır. Kırılma mekaniğinin betonarme yapı tasarımında kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Bu konudaki çalışmalarla paralel Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde deneysel ve analitik çalışmalar yapılmaktadır. Bu konudaki çalışmalarından bazıları;

direkt çekme altında aderans ekinde boyut etkisinin araştırılması, aderans ekinde dolayı yükleme altında boyut etkisinin araştırılması, sargılı donatıların aderans ekinde boyut etkisi, dolaylı yükleme altında aderans ekinde sargılı ve sargısız 2 ve 3 boyutlu elemanlarda boyut etkisinin araştırılması, direkt ve indirekt yüklemelerde sabit moment ve kesme bölgelerinde aderans eki deneyleri (spiralli ve spiralsiz), Burulma altında betonarme kirişlerde boyut etkisinin araştırılması, yüksek dayanımlı silindirlerde boyut etkisi, eksenel yüklü betonarme kolonlarda boyut etkisi.

Kırılma mekaniğinin homojen gevrek malzemelere uygulanması bu yüzyılın başlarında 1913'de Ingils, ile başlamış sonra 1921'de Griffith ile devam etmiştir. Betona uygulanması ise 1960'da Prof.Kaplan (Cape Town), tarafından ilk kez başlatılmıştır.

Bu çalışma beton harcına nano malzeme katmanın, betonun dayanımına etkisini araştırmak amacıyla yapılmış olup 72 adet çekme prizması ve 54 adet basınç silindiri olmak üzere 126 adet numune içermektedir. Çekme prizmaları 3 farklı dökümle üretildiğinden 3 ana gruptan (66 günlük, 61 günlük, 52 günlük) oluşmaktadır. Her 3 gruba da CNT'nin yanı sıra belli oranda Sürfactant (Surf.) eklenmiştir. İlk grup 0° lik, ikinci grup 15° lik ve üçüncü grup 90° lik çekme açısıyla deneye tabi tutulmuştur. Her ana grup 24 adet numune içermekte olup bunların 12'si nano malzeme içermekte ve 12'si içermemektedir. Bunun yanı sıra her 12'li takımında 4 adet numuneye yüksekliğinin %25'i kadar, 4 adet numuneye yüksekliğinin %32'si kadar ve son 4 adet numuneye de yüksekliğinin %64'ü kadar çentik açılmıştır. Ayrıca 3 karışımdan da basınç silindirleri elde edilmiştir. Her karışım 18 adet basınç silindiri numunesi içermektedir. Bunların 9'u nano malzeme içermekte 9'u ise içermemektedir. Basınç silindirlerinde boyut etkisini de araştırmak için bu 9 numuneden oluşan grupların her birinde 3 adet büyük boy, 3 adet orta boy ve 3 adet küçük boy silindir mevcuttur.

2. KIRILMA MEKANİĞİ ve BOYUT ETKİSİ

2.1. Kırılma Mekanizması

Gerilme altında malzemelerin parçalara ayrılmasına kırılma denir. Kırılmanın türü malzemeden malzemeye değişiklik gösterir. Kırılmanın türü gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma mekanizması birinci adımda kırılma, ikinci adımda çatlak gelişimi olmak üzere başlıca iki adımda ele alınır.

2.2. Kırılma Sınıflandırılması

Kırılmaya neden olan yüklemenin ve kırılma öncesi malzemelerin durumuna göre:

- Gevrek,
- Sünek,
- Sünme,
- Yorulma olmak üzere dört farklı şekilde gerçekleşir.

Gevrek kırılma hiçbir plastik deformasyon bırakmadan ya da çok az bir plastik deformasyon bırakarak malzemenin kırılmasıyla meydana gelir. Genellikle camlar, seramikler ve bazı metaller gevrek kırılırlar. Çoğunlukla gevrek kırılan malzemelerde, yalnız kırık yüzeyi civarında çok az miktarda plastik deformasyon meydana gelir.

Sünek kırılma, kırılma öncesi malzemede plastik deformasyonun oluşmasıyla meydana gelir. Sünek kırılmayı oluşturmak için plastik deformasyon gereklidir bu nedenle sünek kırılmanın meydana gelebilmesi için cisimde belirli bir miktarda plastik deformasyonun da meydana gelmesi gerekmektedir. Yani sünek kırılmanın meydana gelmesi için, malzemede plastik deformasyonu sağlayacak seviyede gerilme uygulanmalıdır.

Sünme kırılması, yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme veya sabit yük altında malzemelerin kalıcı deformasyonu sonucu meydana gelir. Sünme kırılması malzemede plastik deformasyon sonucunda oluştuğundan sünek kırılmaya benzemektedir. Ancak; sünme kırılması, düşük sıcaklıklarda meydana gelen sünek kırılmadan farklıdır.

Yorulma kırılması, malzemelerin elastik limit veya çekme dayanımı altındaki sürekli yükler altında kaldıklarında zamanla kırılmasıdır. Plastik deformasyon meydana gelmeden de yorulma kırılması olabilir. Yorulma kırılması sünek kırılmaya benzemektedir. Ancak; yorulma kırılmasında çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklılık göstermektedir. Her bir yükleme periyodunda çatlak ancak belirli bir miktar ilerlemektedir.

2.3. Kırılma Mekaniği

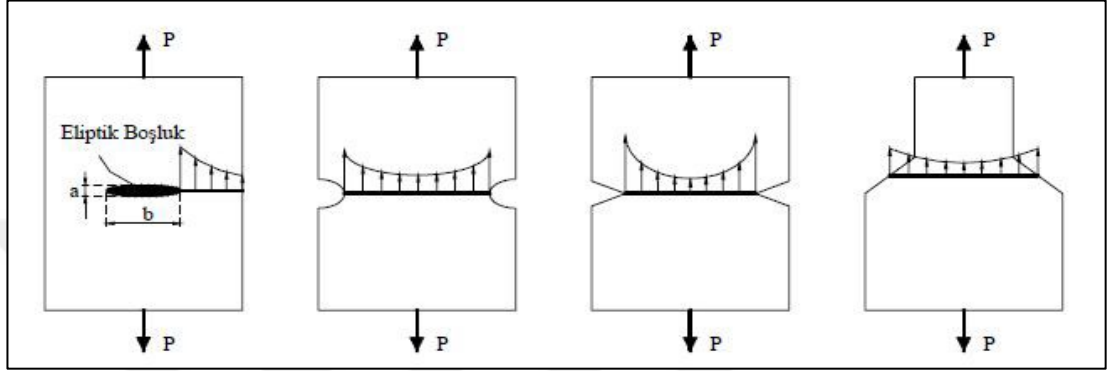
Kırılma mekaniğinin temel konuları çatlakların ne durumda ve ne zaman büyüyeceği, ne yönde ilerleyeceği ve kritik boyutlara ulaşacağıdır. Kırılma mekaniği esasen şu temel soruların cevaplarını araştırır:

- Çatlak büyüyecek mi?
- Bir çatlak ilerletmek için gerekli minimum enerji nedir?
- Kritik çatlak uzunluğu nedir?
- Çatlak, kritik uzunluğa ne kadar zaman sonra ulaşır?
- Çatlak kararsız bir şekilde ve hızlı mı, yoksa kararlı ve yavaş mı ilerleyecek?
- Çatlak yavaş ve kararlı bir şekilde ilerleyecekse, hangi hızda ilerleyecek?

Kırılma mekaniğinin gelişim süreci Coloumb ile başlar ve zamanla diğer araştırmacıların da ilgisini çeker.

1913 yılında Inglis beklenmedik kusurlar gözlemlenen donanma gemileri üzerinde yaptığı çalışmasıyla sonsuz levhada daha çok oval durumdaki dairesel boşluk çevresinde gözlemlenen gerilmeler için çözüm yaklaşımını daha da geliştirmiştir

[Sauma, 2000]. Inglis dış sınırlarından yüklenmiş çatlakın süreksizmiş gibi modellendiği küçük eksenli büyük eksenden daha az yaparak üzerinde gerilme singularitesinin bulunduğu sonsuz lineer elastik levha üzerindeki oval boşlukla ilgili gerilme analizi üzerine öncü bir çalışma yayınladı [Kumar ve Barai, 2010].



Şekil 2.1. Basit çekme durumunda çentikli kısımlarda oluşan gerilme yığılmaları [Yayla, 2007].

a : eliptik boşluk boyu

b : eliptik boşluk eni

σ_m : eliptik boşluk çevresindeki maksimum gerilme

σ : sonsuz levhaya uygulanan gerilme

K_t : Gerilme yığılma faktörü olmak üzere;

σ gerilmesi altındaki sonsuz bir levhanın sahip olduğu eliptik boşluk etrafındaki maksimum gerilme,

$$\sigma_m = K_t \sigma \quad (2.1)$$

$$K_t = 1 + 2 \cdot (a/b) \quad (2.2)$$

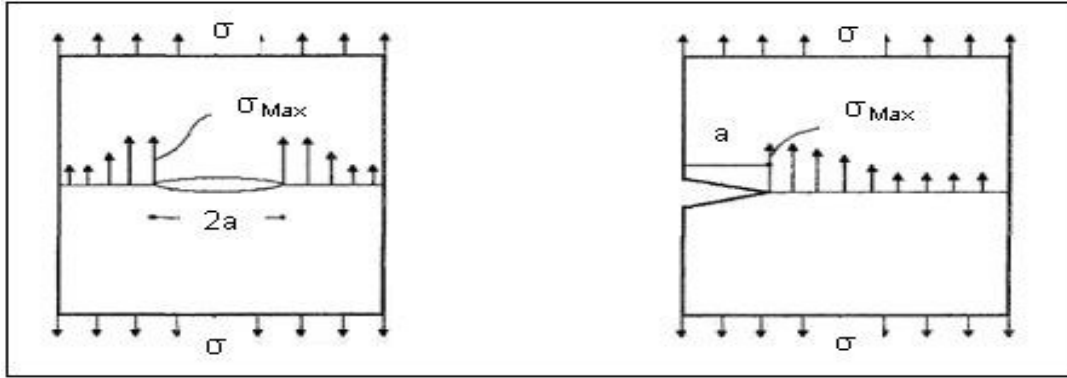
(2.1) ve (2.2) de belirtilen formüllerle ifade etmiştir [Alyamaç, 2008].

Griffith tarafından kabul edilen yeni yaklaşıma kadar bu alanda gerçek bir ilerleme meydana gelmemiştir [Kumar ve Barai, 2010]. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk

başarılı analizi 1920 yılında Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir [Özdemir, 2006].

Griffith, Inglis'in teorisini daha da geliştirmiş ve LEKM' nin temellerini atmıştır. Griffith cam lifler üzerinde yapmış olduğu deneylerde, teorik mukavemetin, elastisite modülünün %10'u ($E/10$) civarında olduğunu ve malzemenin gerçek mukavemeti ile arasındaki bu uçurumun bünyesindeki kusurlardan kaynaklandığını tespit etmiştir [Griffith, 1920].

Bu Griffith'in temel klasik lineer elastik kırılma mekaniği veya daha genel elastik kırılma mekaniği (Lineerlik gerekli olmayan elastik kırılma mekaniği) olarak kullanılmış bir kusur enerji kriteri önermesine olanak sağladı [Bazant ve Planas, 1998]. Griffith çalışmalarını Şekil 2.2.'de belirtilen çatlak formu üzerinde yürüterek (2.3) eşitliğini elde etmiştir.



Şekil 2.2. Griffith çatlak formu, çatlak ucu ve çentik ucu gerilme yığılmaları [Alyamaç, 2004].

(2.3)

$$\sigma_f = \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

σ : Kırılma gerilmesi

γ : Yüzey enerjisi

E : Elastisite modülü

a : Çatlak boyununun yarısı

Griffith denkleminde göre, kırılmaya sebep olan gerilme miktarı “ σ_f ”, mevcut çatlak boyutu ile ters orantılıdır. Griffith denkleminde yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre “ G ” kullanılır. Bu durumda denklem (2.4) teki gibi olur.

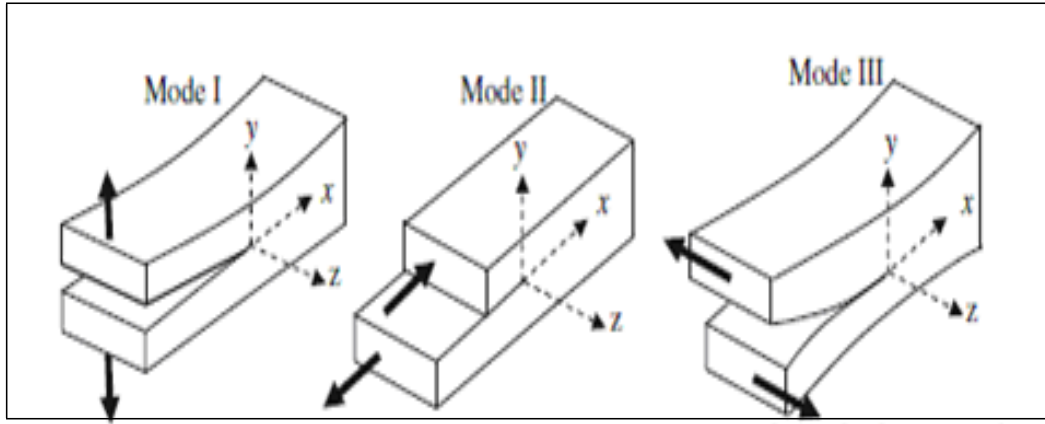
$$\sigma_f = \left(\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

Burada $G_c = 2 \gamma$ olup, kırılma için gerekli toplam işi gösterir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür; gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur, ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli enerjidir [Özdemir, 2006].

1950’lerin ortalarında Irwin kırılma mekaniğinde yeni bir dönem başlatmıştır [Irwin, 1957]. Seramik liflerle yapmış olduğu çalışmalarda teorik mukavemetin $E/10$ civarında olmadığını görmüş ve teoriyi metalleri de kapsayacak şekilde genişletmiştir. Sonra sırasıyla açılma (çekme), kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen mod I, mod II, mod III, yükleme durumları genel kırılma modlarını (Şekil 2.3.) ve bunların kombinasyonundan oluşan karışık modun kanunlarını ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanını ortaya koymuştur [J.G.M. Van Mier, 2000].

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \tau \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \tau \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (2.5)$$

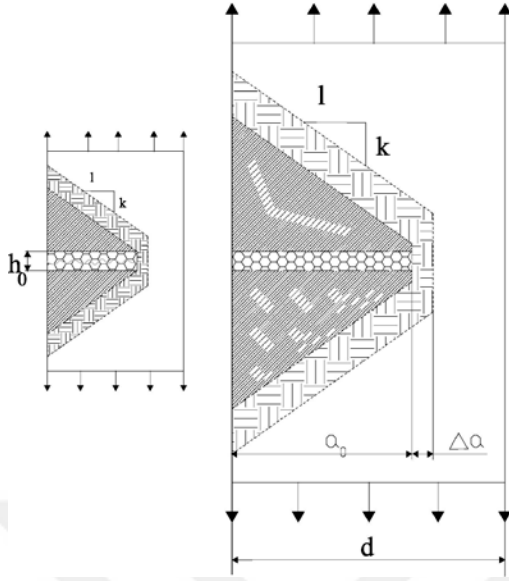
Denklem (2.5)’ te belirtilen σ malzemeye uygulanan çekme gerilmesini, τ kayma gerilmesini, a yarı çatlak boyunu ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Kırılma Modları [Kumar ve Barai, 2010].

2.4. Boyut Etkisi

Kırılma mekaniğinin enerji ile açığa çıkması yüzünden, boyut etkisi olan ilişki Şekil 2.4.'te gösterilen üniforma gerilmeli panel düşünülerek açıklanabilir. Şekil 2.4.'te sol kenardaki küçük bölgenin dayanımının levhanın diğer kısmından daha az olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla çatlak bandının oluşumu soldan sağa doğru olacaktır. Beton gibi gevrek homojen malzeme için çatlak önünde dağılmış olan çatlakların göz önüne alınması önemlidir. Bu bölgenin boyutu yapı boyutu ile orantılı değil, maksimum agrega boyutu ile ilişkilidir. En basit yaklaşım, kırılma önündeki çatlak bandının h_o genişliği, yapı boyutundan bağımsız ve yaklaşık sabit varsayılmıştır (aynı betondan yapılmış benzer yapılar karşılaştırıldığı zaman). Benzer olarak maksimum yükte a_o çatlak uzunluğu, yapı boyutu D ile orantılıdır (a/D) (Eleman analizlerinde ve betonarme yapıların gevrek göçme deneylerinin çoğunda görülmüştür).



Şekil 2.4. Boyut Etkisinin Enerji ile Açıklanması (h_0 - genişliği, a_0 - uzunluklu çatlak bandı ile kırılmanın oluşumu).

Şekil 2.4.'deki taralı alandan $\sigma^2/2E$ uzama enerjisinin açığa çıkması ile düşünülebilir.

E - betonun Young Modülü.

a_0 uzunluklu çatlak Δa uzarsa, ek uzama enerjisi Δa yatay genişlikli sık taralı alan şeridi daha büyüktür.

$$\Delta a = h_0 \Delta a + 2ka \Delta a, \quad (2.6)$$

k = Şekil 2.4.'te eğim olup yapı biçimine bağlı ampirik sabittir (boyut etkisinde önemli olmayan k değeri, sonlu eleman analizlerinde ve deney sonuçlarından $\pi/2$ bulunmuştur).

W - yapıda depolanan potansiyel enerji; b - kalınlık; G_f - kırılma enerjisidir (Boyut J/m^2). Çatlak bandının birim uzunluğu veya çatlak oluşturan gerekli enerji, büyük yapılarda Δa çatlak uzaması sonucu, (malzeme özeliği olan G_f kırılma enerjisine eşittir) büyük yapı için σ_N değeri, hacmin aynı kalacağı daha büyük bölgede açığa çıkan toplam enerjisinden az olmalıdır. Büyük yapılarda birim çatlak gelişmesi için

daha büyük enerji için gerektiğinden σ_N küçülecektir.

Dolayısıyla σ_N yapı boyutundan etkilendiğinden boyut etkisinin varlığı görülmektedir.

Dış yüklemeler sonucunda levhadaki taralı şeritten açığa çıkan enerji (Şek 2.4.)

$$\Delta W = b(h_o \Delta a + 2k \Delta a) \sigma_N^2 / 2E \quad (2.7)$$

Levhada yutulan enerji,

$$\Delta W = G_f b \Delta a \quad (2.8)$$

Dış etkiler (2.7) ile levhanın yuttuğu enerji (2.8) eşitliğinden,

$$\sigma_N^2 = \left[h_o + 2k \left(\frac{a}{D} \right) D \right] = 2EG_f \quad (2.9)$$

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_o + 2k \left(\frac{a}{D} \right) D} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

$$D_0 = \frac{h_o D}{2ka} \quad \text{ile gösterirsek} \quad (2.11)$$

Pay ve payda f_t ile çarpıldığında,

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_o \left(1 + \frac{D}{D_0} \right)} \right]^{1/2} \frac{f_t}{f_t} \quad (2.12)$$

elde edilir. Sonuçta;

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f f_t^2}{h_o f_t^2 \left(1 + \frac{D}{D_0} \right)} \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

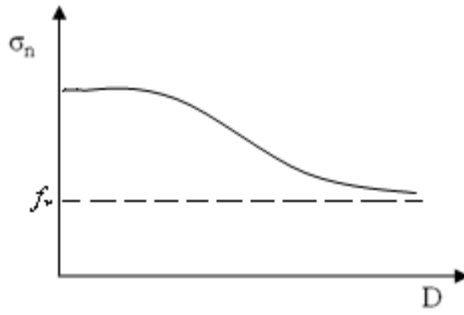
Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasası iki tiptir.

2.4.1. Type I boyut etkisi

Type I. Çatlaksız elemanlar için geçerli denklem

$$\sigma_N = f_r^\infty \left(1 + \frac{D_b}{D} \right) \quad (2.14)$$

Burada f_r^∞ ve D_b lineer regresyon sonucu bulunan malzeme sonuçlarıdır.



Şekil 2.5. Boyut Etkisi İfadesinin Grafik Gösterimi (Type I)

Çatlaksız (çentiksiz) numuneler için geçerli olan (2.14) denklemini düzenlendiğinde, değişken dönüşümü yapılır ise,

$$\frac{1}{\sigma_N} = \frac{1}{\sigma_0} + \frac{1}{\sigma_0} \frac{D_b}{D} \quad (2.15)$$

(2.18) de bağıntıda,

$$Y = 1/\sigma_N, X = D, C = 1/\sigma_0, A = C/D_b \quad (2.16)$$

$$\sigma_N = \frac{3P_u L}{2bD^2}, \text{ göçme yüklerinden elde edilir.}$$

D_b ve σ_N lineer regresyondan elde edilerek boyut etkisi bağıntısı elde edilmiş olur.

2.4.2. Type II boyut etkisi

Type II. Çatlaklı elemanlarda boyut etkisi

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{1/2} \quad (2.17)$$

$$B = (2E G_f / h_o f_t^2)^{1/2} \quad (2.18)$$

$$\beta = D / D_o \quad (2.19)$$

B – malzeme dayanımına bağlı sabit

D – yapı biçimine bağlı boyutsuz sabittir

f_t – betonun çekme dayanımı, B 'yi boyutsuz yapabilmek için kullanılmıştır.

Daha genel boyut etkisi yasası:

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta_r)^{1/2r}, \quad r - \text{geometriye bağlıdır.}$$

Bütün geometri ve malzemeler için $r \cong 1$ bulunduğundan bu çalışmada (2.17) denklemi kullanılmıştır. Denklem yaklaşık bir ifadedir, fakat boyut değişiminin $1:20'$ ye kadar aralığı için yeterlidir. Daha büyük boyut değişimi için karmaşık formüller gereklidir. (2.17) denkleminin elde edilmesinde aşağıdaki varsayımlardan yararlanmıştır.

1. Göçme anında çatlak önünde açığa çıkan enerji çatlak uzunluğuna bağlıdır.
2. Açığa çıkan enerji aynı zamanda en büyük agrega boyutu d_a 'nın bir kaç katı olan çatlak bandının genişliğine bağlıdır
3. Farklı boyutlu geometrik olarak benzer yapılarda oluşan kırılma yüzeyleri de geometrik olarak benzerdir.
4. Yapı göçmesi çatlak başlangıcı ile değil, çatlamaş bölgenin tüm yapıyı kaplaması ile olur.

Bazant'ın önerdiği ve boyut etkisi ifadesinde (Denk.2.17) yapı çok küçük $D \ll D_o$ ise $\beta = d/D_o$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir.

$\sigma_N = B f_t$ olur ki göçme gerilmesi plastik limit analizi ya da emniyet gerilmeleri yöntemi ile temsil edilmektedir.

Eğer yapı çok büyük ise ($D \gg D_o$) bir değeri β değeri yanında çok küçüktür, $\sigma_N = B f_t \beta^{1/2}$ olur.

Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği temsil edilmektedir ya da her iki tarafın Logaritması alındığında $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, eğimli (-1/2) olan doğru ile göstermektedir (Şekil 2.6).

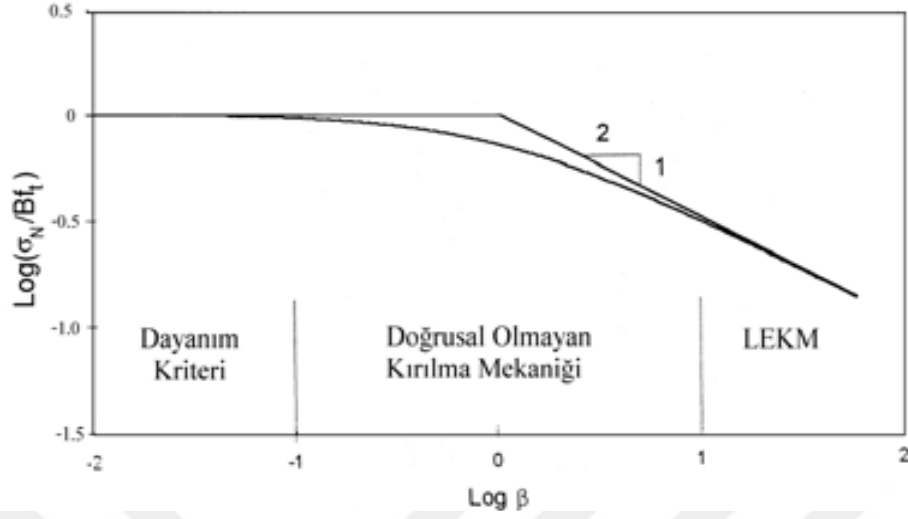
Asimtonun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$B f_t = B f_t \beta^{1/2} \quad (2.20)$$

$\beta^{1/2} = 1$, buradan $\beta = 1$, $D = D_o$ bulunur.

β gevreklik sayısıdır.

Buradaki gevreklik Gustafsson ve Hillerborg ile Carpinteri gevreklik sayısı (yapı boyutunun çatlak tepesinde oluşan plastik bölge çapına oranı) tanımlarından farklıdır. (2.15) denklemi sadece aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutu içeren yapılarda uygulanabilir. Agreganın küçük farklılıklar göstermesi durumunda bu yasa yaklaşık olarak uygulanabilir. Agreganın büyük farklılık göstermesi durumunda 2.17 denkleminde düzeltme terimleri kullanılmalıdır.



Şekil 2.6. Boyut Etkisi İfadesinin Grafik Gösterimi (Type II)

$\text{Log } \beta \gg 1$ ise LEKM uygulanır.

$\text{Log } \beta \ll 1$ ise plastic limit analizi uygulanır.

Uygulamada; (Bkz. Şekil 2.6)

$\beta < 0,1$ ise plastic limit analiz

$0,1 < \beta < 10$ ise lineer olmayan kırılma mekaniğı

$\beta > 10$ ise LEKM geçerlidir.

$\beta < 0,1$ için Şekil 2.6' daki yatay asimtot lineer olmayan eğriden %4,7 oranında sapar. $\beta < 10$ için eğimli asimtot (LEKM) lineer olmayan bölge için β 'nin değışim aralığı $1/25 \leq \beta < 25$ arasında olmalıdır. $\beta \ll 1$ ya da $\beta \gg 1$ lineer olmayan kırılma mekaniğı gereksizdir.

Beton çekme dayanımı genelde,

$$f_t = 0,35\sqrt{f_c} \quad (2.21)$$

alınabilir.

f_c – beton basınç dayanımıdır. Boyut etkisi denkleminin üstünlüğü lineer regresyon için düzenlenebilir olmasıdır.

Çatlaklı (çentikli) numuneler için geçerli olan Type II boyut etkisi denklemi (2.17) düzenlenirse:

$$\frac{\sqrt{1+\beta}}{B} = \frac{f_t}{\sigma_N} \quad (2.22)$$

her iki tarafın karesi alınırsa,

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N}\right)^2 = \frac{1 + \frac{D}{D_0}}{B^2} \quad (2.23)$$

Parantez açılarak,

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N}\right)^2 = \frac{1}{B^2} + \frac{1}{B^2} \frac{D}{D_0} \quad (2.24)$$

Yukarıdaki denklem $Y=AX+C$ şeklinde temsil edilebilir.

$$Y = (f_t / \sigma_N)^2,$$

$$C = 1/B^2,$$

$$X = D,$$

$$A = C/D_0 \quad \text{elde edilir.}$$

Bu dönüşüm ile X, Y eksen takımında doğru denklemi elde edilir. Gerçekte sonuçlar dağılım göstereceğinden lineer korelasyon ile A doğru eğimi, C doğrusunun Y eksenini kestiği nokta bulunur. Bunlardan yararlanarak (2.15) denklemi için gerekli olacak B ve D_0 sabitleri bulunarak boyut etkisi yasası elde edilmiş olur.

3. MALZEME

3.1. Karbon Nano Tüpler

Karbon nanotüpler, nanoteknolojinin uygulama aşamasında önemli bir yol katedilmiş alt dallarından biridir. Kendilerine özgü yapıları ve üstün özelliklerinden dolayı nanotüpler, bilim adamları ve araştırmacıların oldukça üzerlerinde durduğu nano yapılarıdır. Nanotüpler üzerinde yapılan araştırmalar, nanotüplerin sentezlenmeleri, oluşum mekanizmaları, yapıları, özelliklerini etkileyen unsurlar üzerinde yoğunlaşırken, bu araştırmalardan sağlanan verilerle birlikte özellikleri geliştirilmiş ve kontrol edilebilen, ucuz ve seri üretilebilen nanotüpler ve birçok alanda kullanılmak istenmektedir. Karbon nanotüplerin üretimi günümüzde pahalıya mal olmakta; fakat gün geçtikçe daha seri sentezlenmesiyle ilgili çalışmalar ve firmalar çoğalmakta ve maliyet de düşmektedir.

3.1.1. Karbon nano tüplerin tarihçesi

1985 yılında, Richard Smalley'in bulduğu, karbon atomlarının 60'lı gruplar halinde birbirlerine bağlanmasıyla oluşan "buckyball"lar (küresel molekül) kütlesine birkaç kobalt veya nikel atomu eklendiğinde şekil değiştirerek, kimyasal olarak kararlı ve duvar kalınlığı bir nanometre boyutundaki "nanotüp" şekline dönüşür. Nanotüpler ilk olarak 1991 yılında ortaya çıkmıştır. Grafen düzlemi dediğimiz örülü yapının bir silindir şekline sarılması ve uçlarının küresel bir silindir kapağı şeklinde kapatılmasıyla oluşturulur.

Koltuk tipi nanotüp, zikzak yapan nanotüp ve her iki tür nanotüpten farklı yapıya sahip chiral tip nanotüp olmak üzere üç şekilde oluşum gösterirler. Ayrıca mukavemet artışı amacıyla birden fazla sarım üst üste yapılarak çok duvarlı nanotüp yapılar da elde edilebilir.

Çok hafif olması, yüksek elastiklik modülüne sahip olması ve bilinen en dayanıklı fiber olması ihtimalleri, Karbon Nano Tüplerin en önemli özelliklerindedir.

Nano tüpler ilk olarak 1200 °C fırında karbonun lazer-buharlaştırılmasıyla elde edilmiştir. Daha sonra, tek katmanlı nano tüp Montpellier Üniversitesinden Catherine Journet, Patrick Bernier ve çalışma arkadaşlarının karbon ark-buharlaştırma yöntemiyle iyonlaşmış karbon plazması çalışmaları sonucunda elde edilmiştir. Tek katmanlı karbon nanotüpler ancak katalizör ile büyütülebilmektedirler. Çok katmanlı karbon nano tüplerin büyütülmesi için ise katalizör gerekmemektedir.

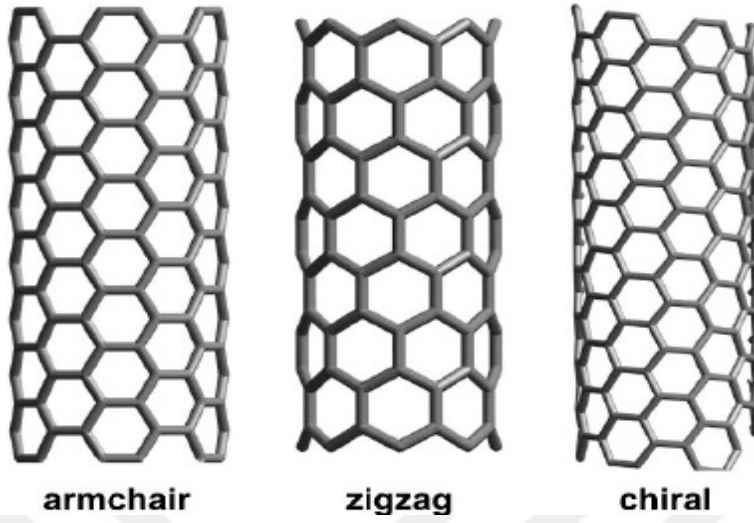
3.1.2. Karbon nano tüplerin çeşitleri

Tek Katmanlı Nanotüpler (SWNT)

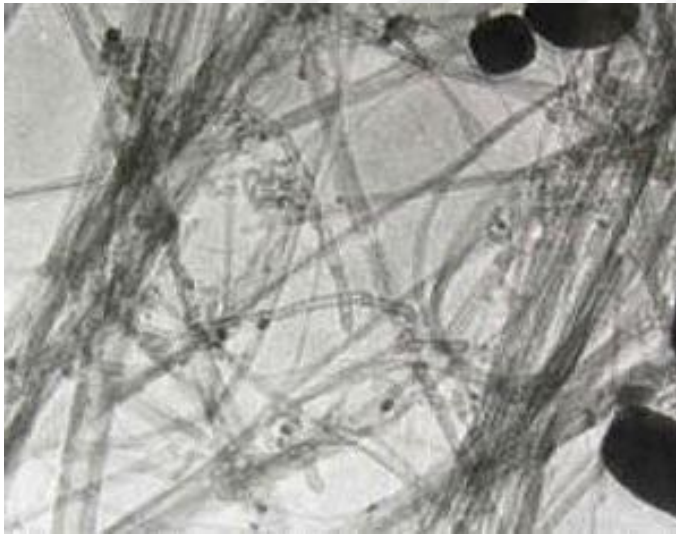
Karbon nanotüp silindir şeklindeki bir karbon allotropudur, sırf karbon atomu içerir. Karbon nanotüpleri kıvrılmış grafin yüzeyi gibi düşünebiliriz. Beyaz kağıdı grafin olarak düşünürsek, boylamasına kıvrıp elde ettiğimiz silindir karbon nanotüptür. Uçları açık ya da kapalı olabilir. Bir karbon nanotüp yaklaşık olarak 0.4 nm çapında ve 100 nm kadar bir uzunluktadır. Bir tek grafin yüzeyini kıvrarak ise tek katmanlı nanotüp (SWNT) elde edilir. SWNT'lerin çapı genellikle bir nanometredir ve iki ucu da kapalıdır.

Çizelge 3.1. Tek Katmanlı nanotüplerin özellikleri

SWNT Dışçapı	1-2 nm
SWNT İççapı	0,8 -1,6 nm
SWNT Ash	< 1,5 wt %
SWNT Saflığı	> 90 wt %
Ek MWNT İçeriği	> 5 wt %
Amorf Karbon İçeriği	< 3 wt %
SWNT Uzunluğu	5-30 µm
SWNT Spesifik Yüzey Alanı	407 m ² /g
SWNT Elektriksel İletkenliği	10 ⁻² S/cm



Şekil 3.1. Tek katmanlı karbon nanotüplerin katlanış şekillerine göre çeşitleri;



Şekil 3.2. TEM mikroskobunda SWNT Görüntüsü

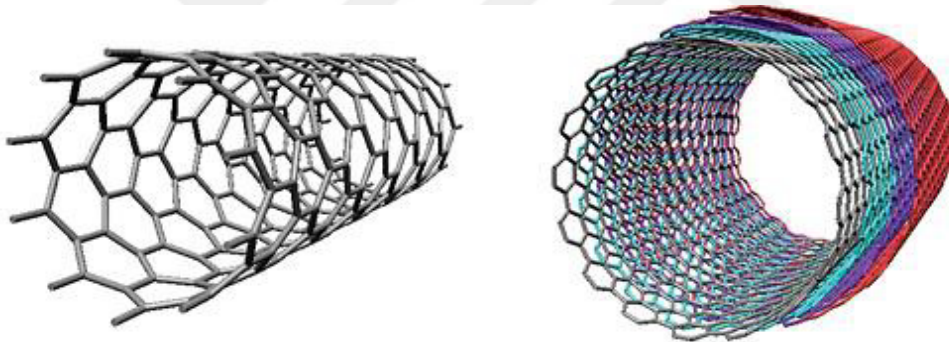
Çok Katmanlı Nanotüpler (MWNT)

Üst üste bir kaç grafin konulup katlanırsa iç içe geçmiş karbon nanotüpler elde edilir. Bu tip nanotüplere çok katmanlı nanotüpler (MWNT) denir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWNT) her iki katmanı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0,34 nm kadardır. Bal peteği dizilişi ile oluşan hegzagonal yapıları levhaların sarmal formlarında, iç içe geçmiş silindirik tüp yüzeylerinde yer alan atomların

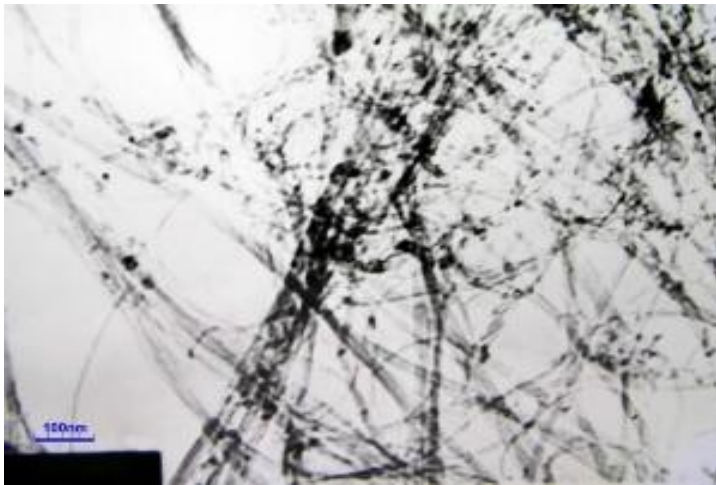
yapılandırma durumlarına göre bu tüplerin elektriksel özellikleri yarı iletken veya metalik niteliklerde olabilir.

Çizelge 3.2. Çok katmanlı nanotüplerin özellikleri

MWNT Dışçapı	<8 nm
MWNT İççapı	2 -5 nm
MWNT Ash	< 1.5 wt %
MWNT Saflığı	> 95 wt %
MWNT Uzunluğu	10-30 μm
MWNT Spesifik Yüzey Alanı	500 m^2/g
MWNT Elektriksel İletkenliği	10^{-2} S/cm



Şekil. 3.3 Tek Katmanlı ve çok katmanlı nanotüpler



Şekil 3.4. TEM mikroskobunda MWNT Görüntüsü

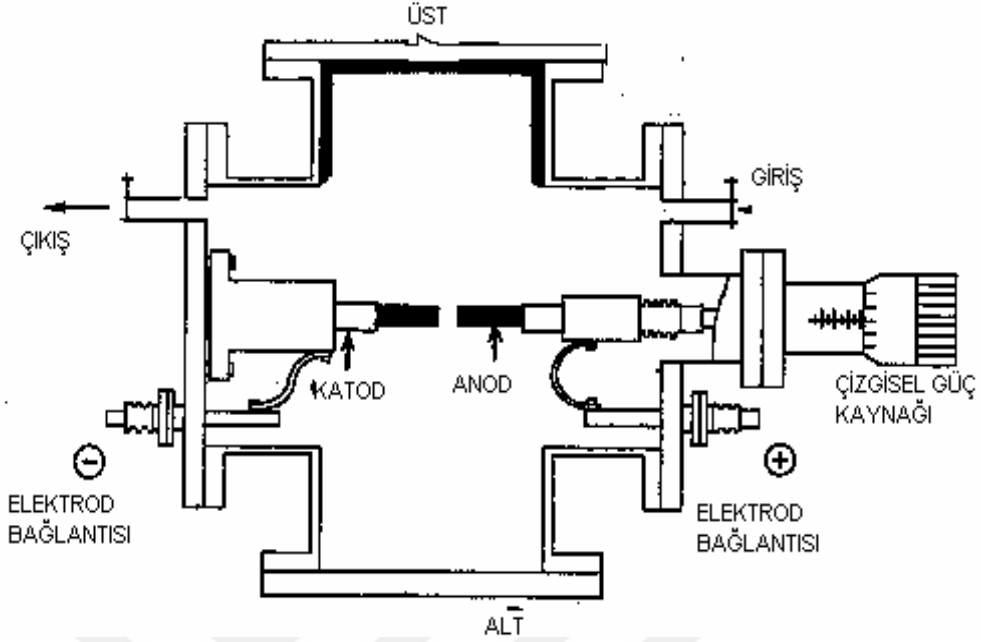
3.1.3. Karbon nano tüpleri elde etme yöntemleri

Fransa'daki Montpellier Üniversitesinden bir grup araştırmacı ise özdeş dirençli tek katmanlı nano tüp oluşturabilecek karbon ark buharlaştırma metodunu geliştirdi. Diğer birçok araştırma grubu da günümüzde bu iki yöntemden türetilmiş yöntemlerle tek katmanlı nano tüpler üretmektedir. Görüyoruz ki; karbon nano tüpleri elde etmenin birçok yolu bulunmaktadır fakat bunlardan en önemlileri ark buharlaştırma ve lazer buharlaştırma yöntemleridir.

Ark Buharlaştırma Yöntemi

Nano tüp sentezi için birçok ark-buharlaştırma reaktörü kullanılmış ancak görüntüleme odası için en ideal olanı helyum kaynağına bağlı paslanmaz bir çelik vakum odası olmuştur. Kratschmer – Hoffman deneylerinde kullanılan cam kubbe oda ideal değildir. Çünkü buharlaşma sırasında çubukların ayrılmasına kolayca izin vermez. Oda hem bir difüzyon pompalı bir vakum hattına, hem de bir helyum kaynağına bağlıdır.

Bu yöntem, helyum ve argon atmosferinde yüksek saflıkta iki grafit çubuktan oluşan iki elektrotun arasına elektrik akımı uygulamaya dayandırılır. Genellikle 50-100 Å arasında olan akım, çubukların çapına, aralarındaki uzaklığa ve gaz basıncına göre değişir ve gerilimi sabitlenmiş DC bir güç kaynağı kullanılmaktadır. Fakat gerilim, basınç sabitlenince uygulanır.



Şekil 3.5. Ark buharlaşma düzeneğinin şematik gösterimi

Deneyin başında akım geçmemesi için elektrotlar birbirinden ayrı tutulmalıdır. Hareket ettirilebilen anot, arklanma olayı gerçekleştirilinceye kadar katoda yaklaştırılır. Sabit bir ark elde edildiğinde, çubuklar arası uzaklık 1mm ya da daha az tutulmalıdır. Anot 6 mm çapında ve uzun, katot ise çok daha kısa ve 9 mm çapındadır. 5000°C’de grafitler buharlaşır ve anottan buharlaşan karbonun bir kısmı, katotta silindirik olarak tekrar buharlaşır. Bu silindirik tortunun merkezinde nano tüpler ve nano parçacıklar bulunur. Odadaki helyum basıncı arttıkça, nano tüp sayısında önemli bir artış oluşur.

Kobalt-Nikel katalizörü nano tüplerin oluşumunda kullanılır. Çok katmanlı nano tüpleri büyütmek için katalizör gerekmezken, tek katmanlı nano tüpler ancak katalizör ile büyütülebilir. Anotta grafit kullanıldığında karbon atomları arklanma sırasında oluşmakta ve katoda gitmekte; nano tüp ve fulleren isi oluşturmaktadır.

Ark-buharlaşma sonucunda katotta oluşan tortu şekil ve içerik bakımından, kullanılan koşullara bağlıdır. Zayıf soğutma katman halinde tortuya neden olur. Bu tip tortularda nano tüpler rastgele yerleşmiş olarak bulunur. Elektrotların iyi

soğutulması durumunda daha silindirik ve homojen tortu oluşur. Bu tip tortularda erimiş malzemedan bir dış kabuk ve içte daha yumuşak lifli, içinde nano tüpler ve nano parçacıklar bulunan çekirdek bulunur. Bunlar dış kabuğu açarak dışarı çıkarılabilir. Nano tüplerin kalitesini anlamak için karbona, birkaç nano tüpten oluşan yetersiz bir örnekle fiziksel bir test yapılabilir.

Lazer buharlaştırma yöntemi

Bu yöntemde, birbirini izleyen iki adet lazer pulsu kullanılmaktadır. Lazer depolanması sırasında kobalt ve nikel tozlarından oluşan grafit çubuklar kullanılmaktadır. Bu işlem esnasında, 1200 °C’de argon akışında Co ve Ni tozlarının yarı yarıya karışımlarından oluşan grafit çubuklarından elde edilen ürünler, fullerenleri temizlemek için 1000°C’de ısıtılma işlemine tabii tutulurlar. Hareketsiz lazer pulsu, ikinci bir puls, hedefi buharlaştırmak için izler. İşlem esnasında, birbirini izleyen bu iki lazer pulsu kullanmak, karbon kiri birikintisini azaltmaktadır. İkinci lazer pulsu, ilkinde oluşan daha büyük parçacıkları durdurur ve onları büyüyen nano tüp yapısına ekler.

Bu şekilde üretilen malzeme, çapı 10-20 nm’den 100 µm’ye varan ip demetleri halinde görülmektedir. Her ip SWNT (Single-Wall Nano Tube) tek duvarlı nano tüp yapılarını oluşturmaya katkıda bulunur.

Mekanik öğütme

Mekanik öğütme ve ardışık tavlama karbon nano tüp üretimi için basit yöntemler olduğundan endüstriyel üretim için de ucuz yöntemler olarak düşünülebilir. Mekanik öğütme işlemi oda sıcaklığında 150 saate kadar sürmektedir. Öğütmenin ardından, elde edilen toz, 1400°C’de 6 saatlik nitrojen veya argon gazı akışı altında tavllanır. Bu oluşumun mekanizması bilinmemekle birlikte mekanik öğütmenin nano tüp çekirdeğini oluşturduğu tavlama işleminin nano tüp büyümesini hızlandırdığı düşünülmektedir. Tek duvarlı nano tüpler bu yöntemle hazırlanamadığı halde çok

Yukarıdaki Şekil 3.6'da görüldüğü gibi nano tüpün giriş vektörü C_h , \hat{a}_1 ve \hat{a}_2 hegzagonal örgüde birim vektörler olmak üzere nano tüpün giriş vektörü C_h ;

$$C_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$$

Başka bir önemli parametre ise giriş açısıdır; C_h ile \hat{a}_1 arasındaki açı. Grafit levha nano tüpün silindirik kısmını oluşturmak üzere rulo yapıldığında, giriş vektörlerinin sonları çakışır. Böylelikle giriş vektörü, nano tüpün dairesel kesitinin çevresini oluşturur. m ve n 'in değişik değerleri farklı nano tüp yapılarına sebep olur. Armchair nano tüpü $n=m$ ve giriş açısı 30° olduğunda, Zigzag ise $n=0$ ya da $m=0$ ve giriş açısı 0° olduğunda oluşur. Giriş açıları 0° ile 30° arasında değişen nano tüpler ise Chiral nano tüp olarak adlandırılır.

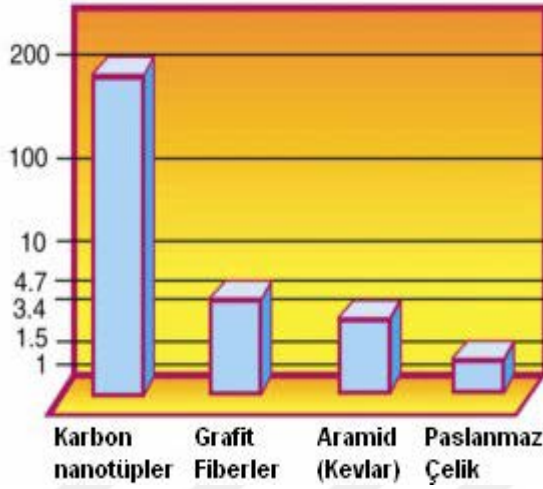
Nano tüplerin çaplarının ve giriş açılarının ölçümü tünelleme taramalı mikroskopu ve geçirmeli elektron mikroskopu ile yapılmaktadır. Yine de çapı ve θ açısını ölçerken aynı anda örneğin direnç gibi fiziksel bir özelliğide ölçebilmek halen büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Çünkü nano tüplerin boyutları çok küçük ve karbon atomları sürekli bir ısısal hareket halindedirler. Ayrıca mikroskoptan gönderilen elektron demeti nano tüplere zarar verebilirler. Her nano tüp birim hücresi 2'şer atom içeren altıgenlerden oluştuğuna göre, nano tüp birim hücresi birçok karbon atomu içerir. Nano tüp birim hücresi altıgenden N kere büyük ise, ters uzayda birim hücre altıgenden $1/N$ oranında küçüktür.

3.1.5. Karbon nano tüplerin mekanik özellikleri

Karbon nano tüpler sırasıyla gerilme, sağlamlık ve esneklik katsayısı terimlerinde keşfedilen en sert ve en kuvvetli materyaller olması beklenmektedir. Karbon fiberlerinin aksine, tek katmanlı nano tüpler dikkate değer oranda esnektir. Boşluklu yapısı sayesinde basınç altında bulduklarında burkulma, eğilme gerilmesi eğilimi gösterirler. Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilir. Dahası araştırmacılar nano tüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir.

North Caroline Üniversitesinden Jerzy Bernhole ve meslektaşlarının hesaplarına göre bir nano tüp kırılmadan yüksek oranda uzayabiliyor.

Sonuç olarak nano tüpler sadece karbon fiberlerinin avantajlarına sahip olmayıp, aynı zamanda çok daha esnek ve basınç altında kırılmaya dayanıklıdır.



Şekil 3.7. Bazı genel yüksek-dayanımlı malzemelerin çekme dayanımı

Grafit ve karbon fiberlerine benzer olarak, nano tüplerin çok sağlam ve yüksek elastikiyet modülüne sahip oldukları düşünülmektedir.

Burkulabilir, düzleştirilebilir, küçük daireler şeklinde kıvrılabilir. Ya da başka çeşitli esnetmeler sonucunda kırılmadan kalabilir. Dahası Bernhole ve meslektaşları, nano tüp üzerindeki etki çekildiği zaman eski orijinal şeklini aldığını gözlemlemişlerdir. Baskı altında kolayca kırılan karbon fiberlerinin aksine, karbon nano tüpler etki uygulandığında elastikiyeti sağlayan tek benzer yapıyı oluştururlar. Sonuç olarak nano tüpler sadece karbon fiberlerinin avantajlarına sahip olmayıp, aynı zamanda çok daha esnek ve basınç altında kırılmaya dayanıklıdır.

Düz ip şeklindeki nano tüpleri halka nano tüplere çevirmek için bir yöntem bulunmuştur; bu halkalar birçok katman olarak, tek-katmanlı nano tüplerden oluşmakta ve 0,7 mikron çapa sahiptirler. Halka haline getirme, proteinlerde ve diğer

biyomoleküllerde gözlenmiş ve sarım içi temel kuvvetin hidrojen bağından kaynaklandığı düşünülmekteydi. Karbon nano tüpler ise yeni bir özellik göstererek halka olayında sadece Van der Waals kuvvetlerinin etkili olduğunu kanıtlamıştır. Metal elektrotlara yerleştirilen halkalar, yeni elektrik iletim olayının incelenmesini sağlar. Halka oluşturmak için kullanılan nano tüpler son derece küçüktür; çapları sadece 1,4nm'dir. Bu nano tüpler düşük sıcaklıklarda tek boyutlu iletkenlerdir, kuantumsal etkileşim tüpler arasındaki elektriksel iletimi yönetirler.

Nano tüpler daha pek çok mekanik ve fiziksel özellikler göstermektedir. Bunlara örnek olarak, nano tüplerin çok sağlam olması ve yüksek elastikiyet göstermesi, plastiğin nano tüplerle katılandırılmasıyla iletken elde edilmesi özellikleri verilebilir. Keşfedilen özellikleri ile ileri teknoloji malzemeleri arasında önemli bir yer alan nano tüplerin, daha pek çok ilginç fiziksel özellikler göstermesi beklenmektedir. Bu konudaki deneysel çalışmalar gün geçtikçe artan bir şekilde devam etmektedir.

3.2. Sürfaktan

Dilimize sürfaktan olarak geçmiş olan ve kelime anlamı olarak İngilizcede “yüzey” anlamına gelen “surface” kelimesinden türemiş olan bu kelimenin aslı “surfactant” olup; anlaşılacağı üzere yüzeye tutunan, yüzeyde bulunan, yüzeyi kaplayan, saran gibi anlamlar taşımaktadır. Su içerisinde kendi kendine oto-organize olabilen yüzey aktif maddeler suyu seven (hidrofilik) ve suyu sevmeyen (hidrofobik) bölümlerden oluşmaktadır. Bu maddeler, suda veya sulu bir çözeltide çözüldükleri zaman, yüzey gerilimini etkileyen (genellikle azaltan) herhangi bir bileşiktir.

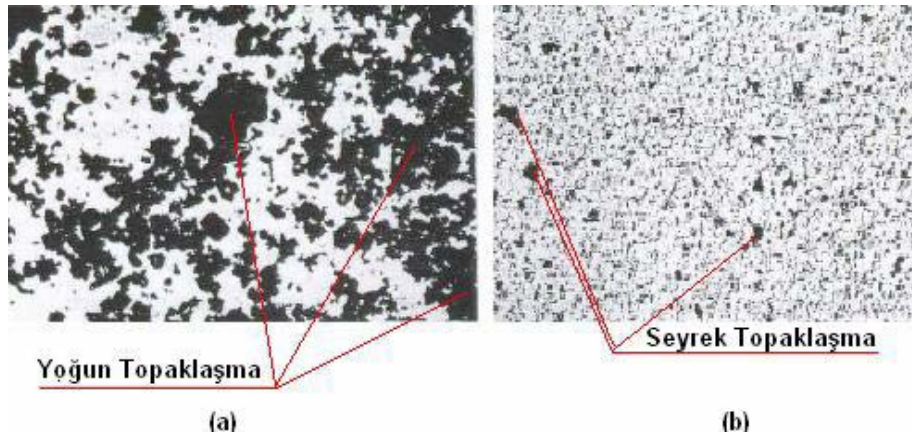
Pek çok maddede hidrofobik kısım, 8-12 karbondan oluşan, düz veya çok az dallanmış bir hidrokarbondur. $C_{12}H_{25}$ —, C_9H_{19} . C_6H_4 — örneğinde olduğu gibi, belirli bazı bileşiklerde karbon atomlarının bir kısmının yerini, bir benzen halkası alabilir. Hidrofilik fonksiyonel grup çok değişik olabilir. — CSO_3^- veya SO_3^- örneklerinde olduğu gibi anyonik, — $N(CH_3)^+$ veya $C_5H_5N^+$ — örneğinde olduğu gibi katyonik, — $N(CH_3)(CH_2)_2COO^-$ örneğinde olduğu gibi anyonik ve katyonik,

—N(CH₃)O örneğinde olduğu gibi semipolar veya —(OCH₂CH₂)_nOH örneğinde olduğu gibi iyonik olmayan bir yapıda olabilmektedir. Doğrudan beton üretiminden ziyade genellikle temizlik malzemelerinde ve hijyenik ürünlerde kullanılırlar.

Betonda katkı maddesi olarak kullanıldığında;

1. Suyun yüzey gerilimini düşürerek ıslatma gücünü arttırlar. Böylece daha az suyla daha çok malzeme ıslatılmış olur. Özellikle küçük taneli ve topaklaşma ihtimali yüksek malzemeleri ıslatmada kullanmakta fayda sağlar.
2. Çimento partiküllerinin topaklaşmasını (flokülleşmesini) engelleyerek homojen bir dağılım (dispersiyon) sağlarlar. Özellikle nano malzeme gibi karışıma homojen dağılması için çeşitli yöntemlerle karıştırılan yapılarda kullanılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.
3. Çimento partiküllerini hidrofil hale dönüştürürler.

Çimento partiküllerinin topaklaşmasını ne ölçüde engellediğini gösteren karşılaştırma Şekil 3.8' de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. İnce Taneli Malzemeyle (a): Sürfaktansız, (b): Sürfaktanlı Karışım

Aşırı kullanımının çeşitli yan etkileri vardır. Bunlar şu şekildedir:

1. Aşırı dozda kullanımları terleme-kusmaya yol açabilir.
2. Hızlı çökme kaybı görülebilir.

3. Priz geciktirme, priz almama veya priz hızlandırma görülebilir.

3.3. Akışkanlaştırıcı

Numunelerde su çimento oranını azaltabilmek için Glenium 51 isimli akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcının Teknik özellikleri Çizelge 3.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Glenium 51 teknik özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082 - 1,142 kg/litre
Klor içeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-	< 3

+20°C'de, %50 bağıl nem koşullarında elde edilmiştir.

4. DENEY ELEMANLARI

Nano malzeme katkılı beton numunelerde basınç ve çekme gerilmelerinin deneylerle araştırılması aynı zamanda boyut etkisinde katkısını araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışmada numuneler, eldeki var olan sınırlı sayıda kalıp kullanıldığından 3 farklı günde dökülmüştür. Her farklı döküm gününde 12'si nanosuz, 12'si nanolu toplam 24 prizmaya ek olarak çekme prizmalarının basınç dayanımını bulmak için, 9'u nanolu, 9'u nanosuz 18 silindir dökülmüştür.

Bu çalışmada kırılma mekaniği prensiplerinin ve boyut etkisinin çekme kuvveti veya basınç kuvveti altındaki çok katmanlı karbon nanotüp katkılı beton numuneler üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, prizma deney elemanları çekme kuvveti altında arcan testine tabi tutulurken, silindir deney elemanları basınç kuvveti altında basınç testine tabi tutulmuştur.

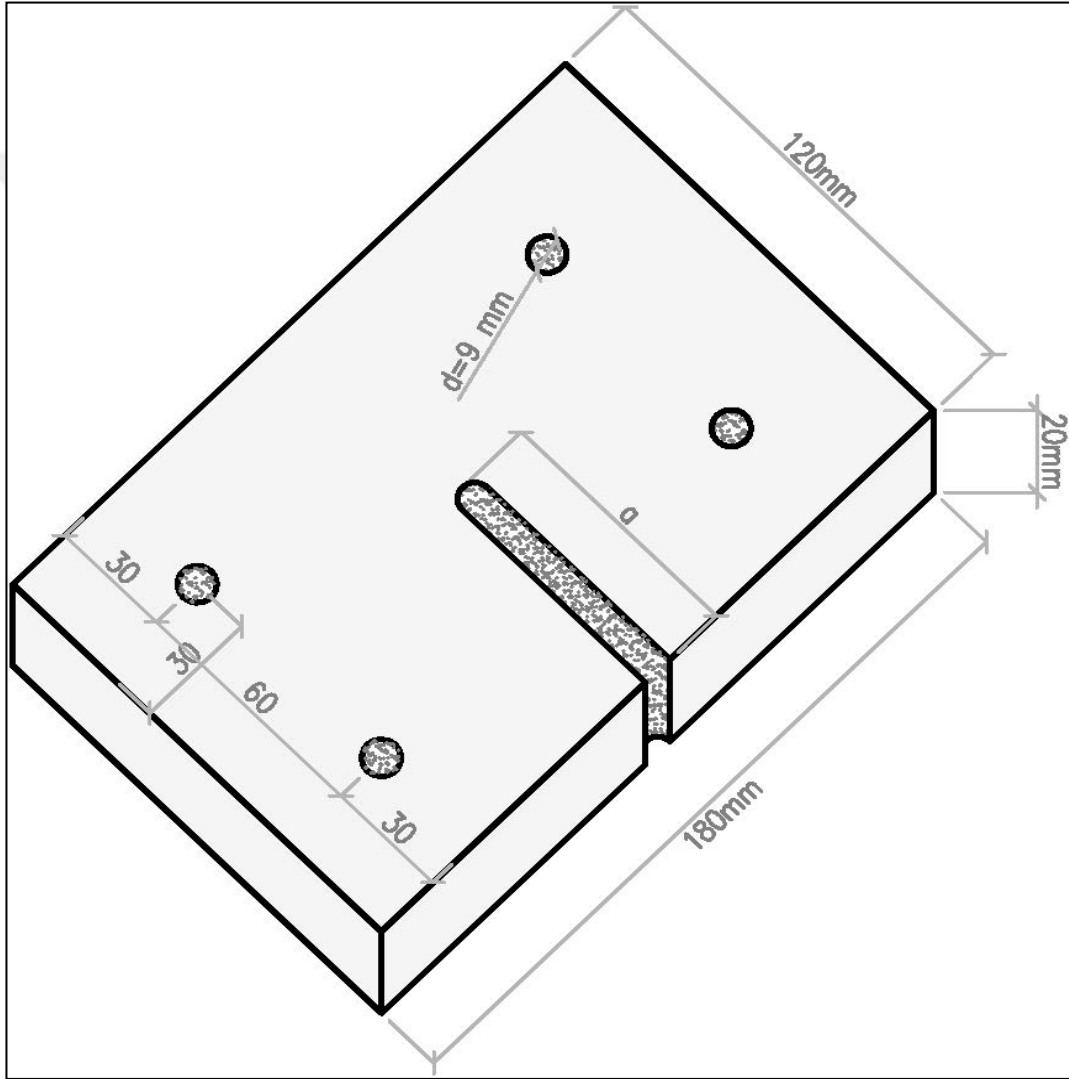
Deney numuneleri eşit numune sayısına sahip 3 temel grup halinde dökülmüştür. Bu grupların isimleri sırasıyla 4. Grup (1.Döküm / 66 Günlük), 5. Grup (2.Döküm / 61 Günlük) ve 6. Grup (3. Döküm / 52 Günlük) tür. Çekmeye maruz bırakılan prizma deney numuneleri açısından bu üç grubu birbirinden ayıran temel parametre Arcan testi deney aparatına yerleştirilme açısı olup gruplara ait açılar Çizelge 4.1 'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Grupların Arcan Testi Aparatına Yerleştirilme Açıları

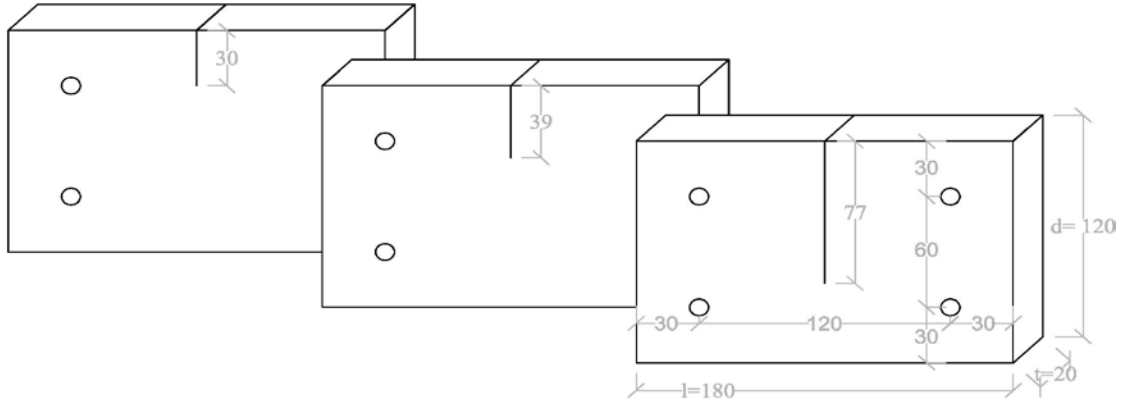
66 Günlük Grup için $\phi=0^0$
61 Günlük Grup için $\phi=15^0$
52 Günlük Grup için $\phi=90^0$

4.1. Çekme Prizmaları

Çekme prizmaları 180mmx120mmx20mm boyutlarında olup 120mm'lik boyutunda Şekil 4.1 ve 4.2'de görüldüğü gibi hepsi çentikli olup çentik oranı $\alpha=a/d=0,25, 0,32,$ ve 0,64 olmak üzere 3 farklı boyda çentik (a) açılmıştır.



Şekil 4.1. Çekme prizması numune geometrisi ve boyutları



Şekil 4.2. Çekme prizması boyutları ve çentik boyları

Deney numuneleri eşit numune sayısına sahip 3 temel grup halinde dökülmüştür. Bir grup deney numunesi için kullanılmış olan malzeme hacimleri Çizelge 4.2’ deki gibi hesaplanmıştır. 3 grup deney numunesinde de aynı malzeme hacimleri kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Bir grup numune için kullanılan malzeme hacimleri

	Malzeme Tipi	l	d	t	$V(\text{mm}^3)$	Adet	$\sum V$ (10^3mm^3)
		(mm)	(mm)	(mm)			
Çekme Elemanı	Nanosuz	180	120	20	432×10^3	12	5184,0
	Nanolu	180	120	20	432×10^3	12	5184,0
Basınç Elemanı	Nanosuz	-	75	150	$662,7 \times 10^3$	3	1988,0
		-	37,5	75	$82,8 \times 10^3$	3	248,ü4
		-	18,75	37,5	$10,4 \times 10^3$	3	31,1
	Nanolu	-	75	150	$662,7 \times 10^3$	3	1988,0
		-	37,5	75	$82,8 \times 10^3$	3	248,4
		-	18,75	37,5	$10,4 \times 10^3$	3	31,1
%25 Artım	Nanosuz	$9315 \times 10^3 \text{mm}^3$					
	Nanolu	$9315 \times 10^3 \text{mm}^3$					

Bir grup döküm için kullanılan malzeme miktarları oranlarıyla birlikte Çizelge 4.3’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Her bir grup için karışıma konulan malzeme miktarları ve oranları

KARIŞIMA KONULAN MALZEME MİKTARLARI VE ORANLARI							
Cinsi	Çimento	Kum	Çakıl	Su	Akışkanlaş.	CNT	SURF
Oranı	1	2,81	1,81	0,5	0,03	0.005	$\frac{SURFF}{CNT} = 1,5$
Nanosuz Mik. (gr)	2554	7177	4623	1277,1	76,76	-	-
Nanolu Mik. (gr)	2552	7171	4619	1276,4	76,46	12,76	19,14

Belirlenmiş olan malzeme miktarları 0,1 gr hassaslığında ölçüm yapabilen elektronik tartı ile belirlenmiştir.

Karışımında kullanılacak kum ve çakıl miktarları belirlendikten sonra, kullanılacak dane çapında malzeme elde edebilmek için elek analizi yapıldı. 6mm'den geçip 2mm'den geçemeyen malzemeler çakıl grubuna dahil edilirken, 2mm'den geçen malzemeler kum grubuna katılmıştır. Karışıma katılma oranları çakıl için 1,81 iken kum için 2,81'dir.

Bu çalışma şematik olarak Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Elek analizinin şematik olarak gösterimi

Nano malzeme katkılı beton karışımına eklenen nano malzeme Resim 4.1’de gösterilmiştir.



Resim 4.1. Kullanılan nano malzeme (CNT)

Öncelikli olarak sırasıyla çakıl, kum, çimento olmak üzere tane çapı büyük malzemeden küçük malzemeye doğru Resim 4.2’ de gösterilen şekilde beton karıştırıcısının (mikserin) içerisinde kapalı olarak karıştırıldı. Kuru malzeme karıştırıldıktan sonra yavaş yavaş su ve akışkanlaştırıcı (Glenium 51) eklenerek karıştırma işlemine devam edildi. Karışım esnasında oluşabilecek malzeme kayıpları dikkate alınarak agrega miktarı %25 artırılarak karışıma eklenmiştir.



Resim 4.2. Beton karıştırıcısı ile karışımın hazırlanması

Nano malzeme katkılı numunelerde harç karışımı yapılmadan önce karışıma eklenecek su ile nano malzeme karıştırılmıştır. Deneyle başlanmadan yapılan malzeme miktarı hesaplarında düşünölmüş olan Nano Malzeme (CNT) miktarı %25 arttırılmıştır. Nano malzemenin tam homojen karışımını sağlamak için karışım ultrasonik karıştırıcı ile sağlanmaya çalışılmıştır. Bu işlem yaklaşık 15 dakika sürmüştür. Karışım tamamlanınca harcın oldukça su içerdiği görölmüştür. Fakat, nano malzeme suyun bir kısmını çekeceğinden su miktarının uygun olduğu karar verilmiştir.

Çekmeye maruz bırakılan prizmalar için Resim 4.3 ve Resim 4.4' de gösterilen ahşap kalıplar kullanıldı. Her biri 12 prizma alan iki ayrı ahşap kalıp, biri nano malzeme içeren numuneler için diğeri ise düz beton numuneler için kullanıldı. Prizma numunelerde Arcan deney düzeneğine yerleştirebilmek için 4 köşesine 4 adet 9 mm çapında boşluklar ince demir çubuklar kullanılarak bırakıldı.



Resim 4.3. Çekmeye maruz nano malzeme içermeyen prizmalar için kullanılan ahşap kalıp



Resim 4.4. Çekmeye maruz nano malzeme katkılı prizmalar için kullanılan ahşap kalıp

Önceden yağlanan kalıplara hazırlanan karışım kademeli olarak sıkıştırılarak yerleştirildi. Aralarda boşluk kalmaması için Resim 4.5’ de gösterildiği gibi sarsma tablası yardımıyla vibrasyon işleminde tam sıkışma sağlamak için elle baskı uygulandı.



Resim 4.5. Sarsma tablası yardımıyla vibrasyon (sıkıştırma) işlemi

Numunelerin kalıba yerleştirilmesinin ve bir ya da iki gün sonra kalıpların sökülmesinin ardından çekme prizmaları ve basınç silindirleri prizini alması için en az 28 gün beklemek üzere Resim 4.6'da gösterildiği gibi kür havuzuna yerleştirildi.



Resim 4.6. Kür havuzu

4.2. Prizmalara çentik açma

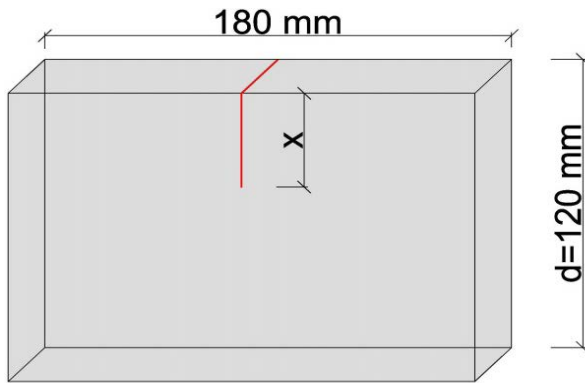
Kür havuzundan alınan çekme prizmalarına çentik açılmıştır.

Her grup için prizmalara açılan çentik boyları ve numuneye ait bilgiler Çizelge 4.4’ de verilmiştir. Numune boyutları ve çentik miktarı şematik gösterimi Resim 5.24’de mevcuttur.

Çekme prizmalarına açılan çentikler her 4 numune için bir değer olup numune boyuna göre değerleri aşağıda gösterilmiştir.

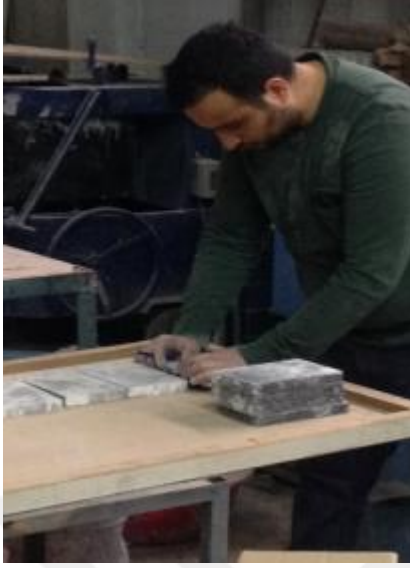
Çizelge 4.4. Numunelere açılan çentik miktarları

	Malzeme Tipi	α	d	x	Adet
		(%)	(mm)	(mm)	
Çekme Prizması	Nanosuz	0,25	120	30,0	4
	Nanolu	0,25	120	30,0	4
	Nanosuz	0,32	120	38,4	4
	Nanolu	0,32	120	38,4	4
	Nanosuz	0,64	120	76,8	4
	Nanolu	0,64	120	76,8	4



Şekil 4.4. Numune boyutları ve çentik miktarı

Çentik açılması işlemi için öncelikle çekme prizmalarının üzerine çentik boyları Resim 4.7’ de görüldüğü gibi işaretlenmiştir. Daha sonra, çentikler işaretlenen kısımlardan kesim makinası yardımıyla çentikler Resim 4.8’ de gösterildiği gibi açılmıştır.



Resim 4.7. Çentik Açılması için Numunelerin İşaretlenerek Hazırlanması



Resim 4.8. Çentik açılması işlemi

Toplamda her grupta 12 adet düz 12 adet nanolu çekme prizması bulunmaktadır. 3 farklı gruba sahip olduğumuzdan dolayı 72 adet prizmayla bu deneyin yapılması amaçlanmıştır. Kayıpların olacağı göz önünde bulundurularak fazladan 1 döküm daha yapılmıştır. Ancak buna rağmen çeşitli sebeplerden dolayı (kalıptan çıkarırken kırılma, çentik açarken kırılma, deney esnasında kırılma vb) 17 adet numune kaybedilmiştir. Deneyi tamamlanabilmiş 55 adet çekme prizması elemanı bulunmaktadır.

Deneyle tamamlanıp sonuçları alınabilen çekme prizması numune sayısı Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Çekme Prizması Sayıları

	Malzeme Tipi	α	d	x	Adet
		(%)	(mm)	(mm)	
66 Günlük	Nanosuz	0,25	120	30,0	3
	Nanolu	0,25	120	30,0	3
	Nanosuz	0,32	120	38,4	3
	Nanolu	0,32	120	38,4	3
	Nanosuz	0,64	120	76,8	3
	Nanolu	0,64	120	76,8	1
61 Günlük	Nanosuz	0,25	120	30,0	3
	Nanolu	0,25	120	30,0	3
	Nanosuz	0,32	120	38,4	3
	Nanolu	0,32	120	38,4	3
	Nanosuz	0,64	120	76,8	3
	Nanolu	0,64	120	76,8	1
52 Günlük	Nanosuz	0,25	120	30,0	4
	Nanolu	0,25	120	30,0	4
	Nanosuz	0,32	120	38,4	4
	Nanolu	0,32	120	38,4	4
	Nanosuz	0,64	120	76,8	4
	Nanolu	0,64	120	76,8	3

Çentikleri açılan çekme prizmaları, grupların açıları göz önüne alınarak Arcan deney düzeneğine yerleştirildi. Numuneler düzeneğe üzerlerindeki 9 mm çapındaki 4 adet delik yardımıyla Resim 4. 9'da gösterildiği gibi yerleştirildi. Bu sayede numuneler, deney düzeneğinde açıları doğrultusunda çekme kuvvetine maruz bırakıldı. Resim 4.10'da gösterildiği gibi deney düzeneğinin bağlı olduğu bilgisayar yardımıyla anlık olarak yük – yer değiştirme grafikleri elde edildi.



Resim 4.9. Arcan deney düzeneğine numunelerin yerleştirilmesi



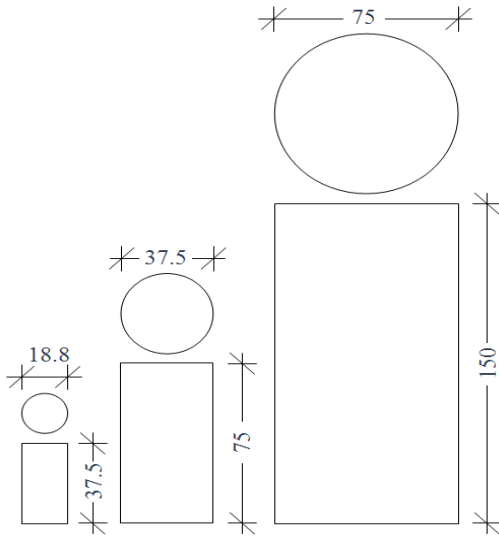
Resim 4.10. Deney sırasında bilgisayar yardımıyla yük - yer değiştirme grafiklerinin elde edilmesi

Numunelerin çekme kuvveti altında kırılması yaklaşık 5 dakika zaman almıştır.

Her bir numunenin deney sistemine açısına uygun yerleştirilmesi işlemi de düşünüldüğünde deneylerin tamamlanması 2 gün sürmüştür.

4.3. Basınç Silindirleri

Basınç silindirleri ise Şekil 4,5’de görüldüğü gibi 18,75 mm, 37,50 mm ve 75,00 mm çaplarında ve sırasıyla 37,50 mm, 75,00 mm ve 150,00 mm yüksekliklerindedir.



Şekil 4.5. Basınç silindir boyutları; (a): Küçük, (b): Orta Boy, (c): Büyük

Basınca maruz bırakılan silindirler için Resim 4.11’ de gösterilen çelik kalıplar kullanıldı.

Bu çelik kalıplar 6’sı çapı 75 mm’ lik numuneler için büyük boy, 6’sı çapı 37,5 mm’ lik numuneler için orta boy ve 6’sı çapı 18,8 mm’ lik numuneler için küçük boy çelik kalıp olmak üzere 18 adet çelik kalıptan oluşmaktadır.

Resim 4.12’de sırasıyla 52, 61 ve 66 günlük numuneler gösterilmiştir.



Resim 4.11. Basınca maruz silindirler için kullanılan çelik kalıplar



Resim 4.12. Basınç silindirleri

4.4. Basınç Silindirlerine Başlık Yapılması

Basınç silindirleri kür havuzundan alındıktan sonra, başlarına kükürt-grafit başlık yapıldı. Bu başlığın yapılma amacı, döküm esnasında ya da kalıp sökülmesi esnasında oluşan düzgün olmayan yüzeylerin düzeltilmesiydi. Bu sayede basınç testi sırasında verilen yükün düzgün ve eşit dağılması sağlandı.

Resim 4.13’de gösterilen alet yardımıyla eritilmiş kükürt ve grafit üzerine silindir numune yerleştirilmiştir.



Resim 4.13. Silindir başlık yapımı için kullanılan alet

Resim 4.14’de örnek gösterildiği şekilde silindirlere başlıklar yapılmıştır.



Resim 4.14. Temsili silindir başlık yapımı örneği

Deneyleri tamamlandıktan sonra alınabilen basınç silindiri numune sayısı sayısı Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Basınç silindiri sayıları

Grup No:	d = 75 mm		d = 37,5 mm		d = 18,75 mm	
	Nanosuz	Nanolu	Nanosuz	Nanolu	Nanosuz	Nanolu
66 Günlük	3	5	3	3	3	2
61 Günlük	3	4	3	3	3	3
52 Günlük	3	4	3	3	3	3
YEDEK	3	5	-	-	2	3

Numunelerin döküm, kalıptan sökülme, kür havuzundan alınma, çekme prizmaları için çentik açılma ve deney tarihleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

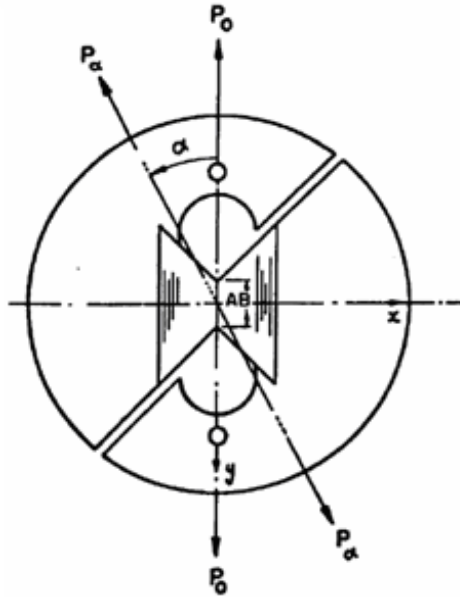
Çizelge 4.7. Deney elemanları hazırlanış tarihleri

GRUP	Döküm Tarihi	Kalıptan Sökülme Tarihi	Kür Havuzundan Alınma Tarihi	Çentik Açılma Tarihi	Deney Tarihi
66 Günlük	31.10.2013	03.11.2013	09.01.2014	09.01.2014	09.01.2014
61 Günlük	05.11.2013	08.11.2013	09.01.2014	09.01.2014	09.01.2014
52 Günlük	14.11.2013	17.11.2013	09.01.2014	09.01.2014	10.01.2014

5. DENEY ALETİ

5.1. Arcan Deney Aleti

1978 yılında ismini almış olduğu Arcan ve arkadaşları tarafından geliştirilen Arcan deneyi izotropik malzemelerde olduğu gibi anizotropik malzemelerin de mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlayan bir metottür. Şekil 5.1’de gösterilen kelebek biçimli özel tasarımı sayesinde üniform düzlemsel gerilme koşulları altında anizotropik malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.1. Arcan deney aparatı (Arcan ve arkadaşları, 1978)

Açı 0 olduğunda ($\alpha = 0$) yalın kesme adı verilen özel bir durum oluşturur. Açı (+/-) 45 derece durumunda eş basınç eğrileri meydana gelir.

5.1.1. Arcan deney düzeneğinin gelişimi

Bu metot Volishin ve Arcan tarafından 1980 yılında fiberle güçlendirilmiş tek eksenli malzemelerin kırılma zarfını belirlemek için kullanılmıştır. 1982 yılında ise, Jurf ve Pipes tarafından grafit epoksili kompozit malzemelerin tabaka içi (interlaminar) kırılma karakteristiklerini belirlemek için kullanıldı.

Voloshin ve Arcan 1980'de alüminyum aparatın yarısından her bir numuneyi yapıştırmıştır. Yapıştırma işlemini deneyden en az 12 saat önce kürlenmesi gereken epoksi (adhesif) ile yapmıştır.

Her bir deneyden sonra, kırılan numuneler atılmalı ve alüminyum aparat yeni deneyde kullanım için temizlenmelidir. Bundan dolayı, birbirini izleyen bir dizi deneyi yapmak çok zaman almaktadır.

Yen ve arkadaşları tarafından Arcan aparatı 1988 yılında modifiye edilmiştir. Yen ve arkadaşlarının amacı çok vakit alan epoksi (adhesif) kullanımından kurtulmaktır. Modifiye Arcan aparatı iki çift paslanmaz çelik parçadan oluşmaktadır, her bir parça orijinal Arcan aparatının yarısına eşittir. Numunenin her bir kısmında kalınlıkların yarısı kadar kalınlığa sahip trapezoidal şekilde kesiciler vardır. Her bir kısımdaki kesicilerde 3 adet delik açılmıştır; bu delikler iki parçanın civatalarla sıkıştırılmasına izin vermesi için açılmıştır. Araştırmacılar tarafından, Modifiye Arcan kayma testinden elde edilen alüminyum, organik cam ve termoplastik kompozitin kayma dayanımı parametrelerinin diğer güvenilir test metotlarından alınan referans değerlerle mükemmel uyum gösterdiğini gözlemlenmiştir.

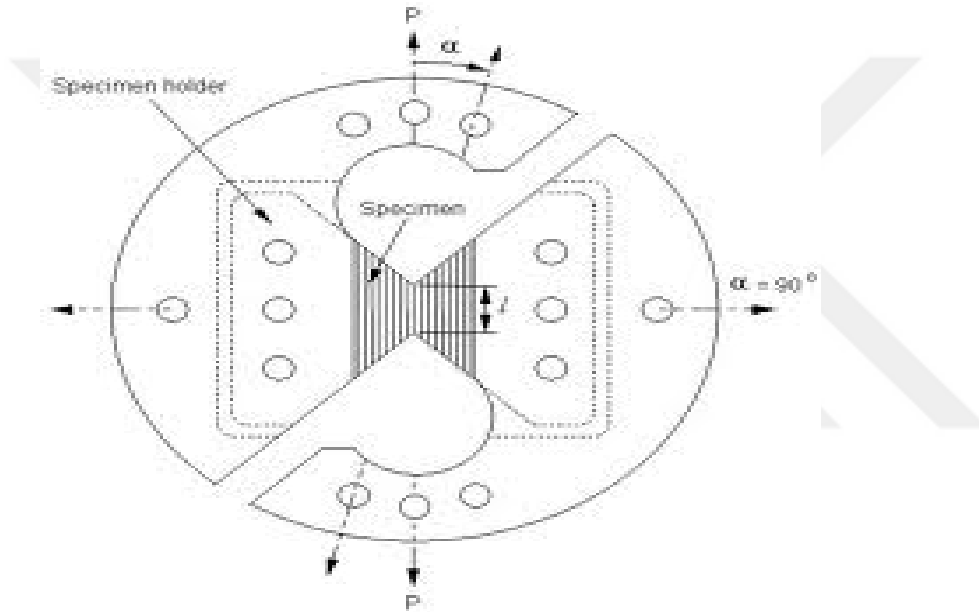
Arcan ve arkadaşları tarafından geliştirilen metotta numunenin deney cihazına kurulması epoksi (adhesif) yardımıyla olduğu için saatler sürmekteydi. Bu zamanını azaltmak için Liu ve arkadaşları tarafından 1996 yılında mekanik hızlandırıcılar kullanılarak cihaz yeniden dizayn edilmiştir. Bu modifiye Arcan aparatı kayma dayanımının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

5.1.2. Arcan deney düzeneğinin kullanımı

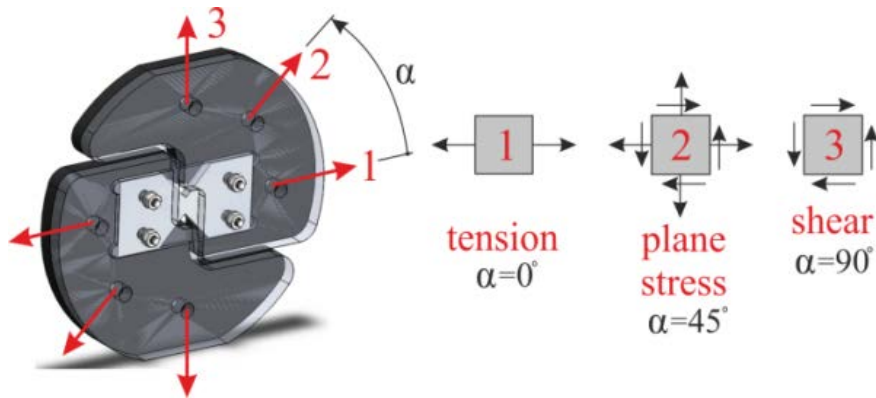
Deney numunesine Arcan deneyinde uygulanan yükler çekme yükleridir. Arcan testinde her bir aparatın yarısı numunenin kritik kesitine göre asimetrik durmalıdır. Düşey doğrultuda uygulanan yüklerin yatay doğrultuda hareket etmesini sınırlayan ek ankrajlar gerekmemektedir. Arcan testi sonucunda belirlenen malzeme

davranışlarının standart çekme numuneleri üzerinde uygulanan testlerle benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Arcan deneyleri yalın halde ve karma haldeki (sırasıyla çekme ve kayma) numune davranışlarını belirlemek üzere oluşturulmuştur. Suttun tarafından oluşturulan ve Şekil 5.2’ de görülen kelebek biçimli profil çelik metal tabakalı malzeme içerisinde çatlakın gelişimini belirlemek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 5.2. Şematik olarak arcan deney düzeneği

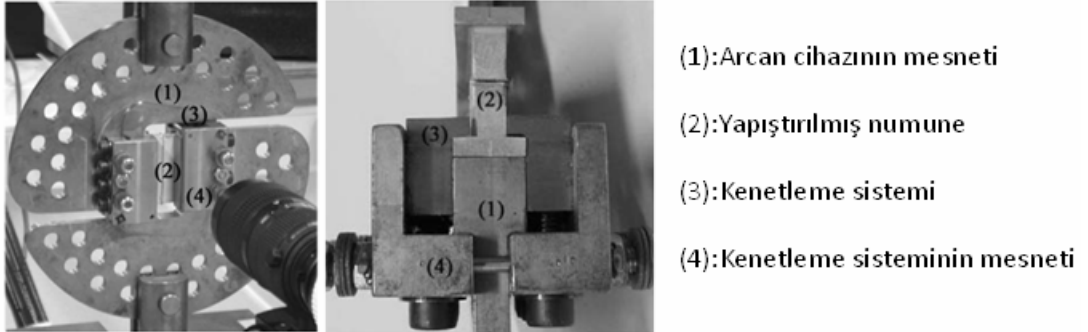


Şekil 5.3. Şematik olarak çekme, düzlem gerilme ve kesme durumları

Numunelerin tek eksenli çekme basıncı koşullarına maruz bırakıldığı standart yöntem genel mekanik özelliklerin belirlenmesi için en çok tercih edilen yöntemdir. Numunenin minimum kesit alanı ve numuneye uygulanan global yükten Arcan numunesindeki gerilme düzeyi hesaplanmaktadır.

5.1.3. Geliştirilmiş arcan aleti

Kayma gerilmelerinin yanı sıra çekme ve basınca da izin veren Modifiye Arcan Testi; kırılma anına kadar adhesiflerin davranışlarının belirlenmesine izin veren deneysel bir metodoloji oluşturabilmek amacıyla dizayn edilmiştir. Adhesiflerin düğüm noktalarına yakın yerlerde kılıf kullanılması, kenar noktalar nedeniyle oluşan etkiyi azaltarak desteklenmesini sağlar ve bu nedenle kenarlara yakın noktalarda bulunan düğüm noktalarının geometrisi oldukça büyük önem taşıyan bir parametre haline alır.



Resim 5.1. Modifiye arcan test aparatı bölümleri

Temiz kenar terimi olarak adlandırılan düğüm noktası geometrisi, kütleme işleminden önce aşırı adhesifin elle silinerek uzaklaştırılması ile oluşur. Bu işlem bir miktar değişiklik oluşturabilir fakat kenarları olmayan asıl adhesiflerin geometrisinin gerilmelere çok az bir etkisi olduğunu bilinmektedir. Bu düzenek radyal çekme – kayma yüklerinin analiz edilmesi için düğüm noktalarının nonlineer davranışına izin vermektedir.

Arcan testi deney düzeneği Resim 5.5’de gösterilmiştir.



Resim 5.2. Arcan deneyinin yapıldığı çekme çerçevesi

Bu çalışmada numuneler kelebek şeklinde değil dikdörtgen prizma şeklindedir. Kullanılan deney düzeneği; modifiye edilmiş olup, iki parça halinde bulunan Arcan düzeneği, çekme yüklemesi yapan ve özellikleri Çizelge 5.1e verilmiş olan çekme test cihazına bağlanmıştır.

Çizelge 5.1. Çekme test cihazı özellikleri

Adı	Shimadzu AG-X Serisi
Kapasitesi	100kN
Yükleme Hızı (Çekmede)	0,1mm/sn ~800mm/sn
Ağırlığı	525kg
Boyutları: WxDxH	945mmx725mmx2104mm
Çalışma koşulları	5~40 °C ve %20~%80 nem
Tolerans Miktarı	% 0,1 yada 0,01mm' den küçük olanı
Deney Yüklemesi	Şekil Değiştirme Kontrollü

Resim 5.3’de de görüldüğü gibi Arcan testi çekme prizması numuneleri dikdörtgen prizması şeklinde olup Arcan aparatına ikisi alt yarıda ikisi üst yarıda olmak üzere dört noktadan numune üzerinde açılan delikler vasıtasıyla yerleştirilmiştir.



Resim 5.3. Kullanılan arcan deney aparatı ($\alpha=0^\circ$)

5.2. Ultrasonik Homojenizatör (Karıştırıcı)

Ultrasonik likit karıştırıcıları titreşim yoluyla sıvı içinde bulunan partikülleri atomize ederek dağıtılmasında, karıştırılmasında ve temizlenmesinde kullanıldığı gibi kimyevi reaksiyonların hızlandırılmasında kullanılır.

Nano malzemenin tam homojen karışımını sağlamak için Resim 5.4'de gösterilen ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Resim 5.5'de gösterildiği üzere tam karışım ultrasonik karıştırıcı ile sağlanmaya çalışılmıştır.



Resim 5.4. Ultrasonik karıştırıcı



Resim 5.5. Ultrasonik karıştırıcının kullanımı

5.3. Beton Test Presi

Beton Test Presi, kapalı devre hidrolik pompası vasıtasıyla tek bir tuşa basarak deneye başlamakta üst oynar başlık ile beton numunesi arasındaki boşluk hızla kapanmakta ve beton numunesinin ön gerilmesi alındıktan sonra otomatik olarak kırma hızına geçmektedir. Sistem numunenin kırılmasıyla eş zamanlı olarak tepe değerini (pik noktası) tutmakta ve otomatik olarak pistonu gelen hidrolik basıncı keserek presi boşaltmaktadır.

300 mm çaplı alt tabla ve üst küresel oynar başlık arasındaki mesafe 320 mm ile 40 mm arasında boya sahip numuneleri kırabilecek açıklıktadır. Standartlara uygun sertlikte (minimum 57 ile 62 HRC arası) ara mesafe parçaları ile alt tablanın yüksekliği ayarlanabilmektedir. Presin yükleme bölümü tel örgü koruyuculudur.

Pres hem otomatik hem de mekanik olarak çalıştırılabilmektedir. Presin yükleme hızı mekanik olarak girilmekte ve sistem otomatik olarak kırılacak beton numunelerinin kesit alanını hesaplamakta, buna göre de yükleme hızını seçmektedir. Uygulanan yük $Nt/cm^2/sn$ biriminde kontrol ve takip edilebilmektedir.



Resim 5.6. Beton test presi

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Çekme Prizmalarının Sonuçları

Deney düzeneğinde numuneler sırasıyla büyük çentikli numunelerden başlanarak küçük çentikli numuneye doğru kırılmıştır. Bir numunenin kırılma süreci yaklaşık 5 dakika sürdüğünden ve sistemin kurulması da zaman aldığından çekme deneyleri 2 günde tamamlanabilmektedir.

6.1.1. Yük-yer değiştirme eğrileri

Çekme prizmalarının deney sonuçlarının tamamının özetlendiği tablo Çizelge 6.1'de verilmiştir.

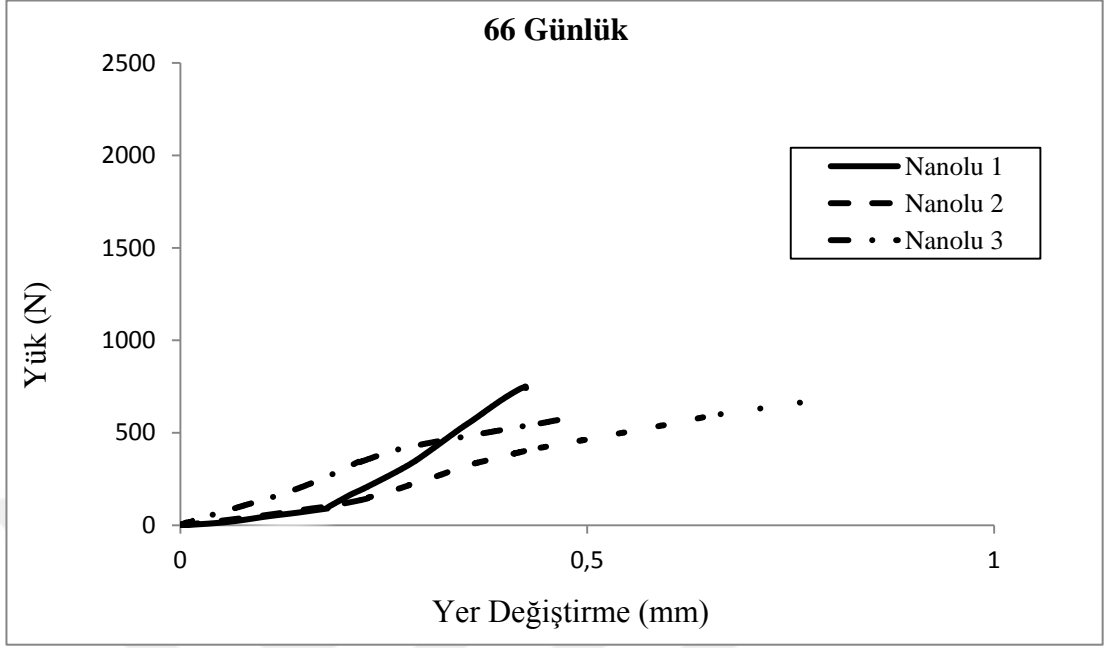
Çizelge 6.1. Çekme prizmaları deney sonuçları

İsim	ϕ (°)	$\alpha=a/D$	Yaş (Gün)	P_0 (kN)	P_{c0} (kN)	Alan (mm ²)	σ_n (MPa)	σ_{cn} (MPa)	t_n (sn)	t_{cn} (sn)	Surf/ CNT
P1	0	0,25	66	1,92	0,75	1800	1,06	0,42	246,40	101,50	1,5
P2	0	0,25	66	2,00	0,66	1800	1,11	0,37	253,40	116,87	1,5
P3	0	0,25	66	2,21	0,57	1800	1,23	0,32	286,30	142,50	1,5
P4	0	0,25	66	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P5	0	0,32	66	1,67	1,08	1632	1,02	0,66	99,95	417,70	1,5
P6	0	0,32	66	1,34	1,15	1632	0,82	0,71	229,60	584,60	1,5
P7	0	0,32	66	0,76	0,97	1632	0,47	0,59	81,60	408,30	1,5
P8	0	0,32	66	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P9	0	0,64	66	0,35	0,15	864	0,41	0,18	99,96	52,20	1,5
P10	0	0,64	66	0,51	---	864	0,59	---	99,93	---	1,5
P11	0	0,64	66	0,45	---	864	0,52	---	99,96	---	1,5
P12	0	0,64	66	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P1	15	0,25	61	2,07	0,93	1800	1,11	0,50	292,10	141,70	1,5
P2	15	0,25	61	1,81	0,37	1800	0,97	0,20	231,70	41,40	1,5
P3	15	0,25	61	1,89	0,58	1800	1,01	0,31	236,70	55,30	1,5

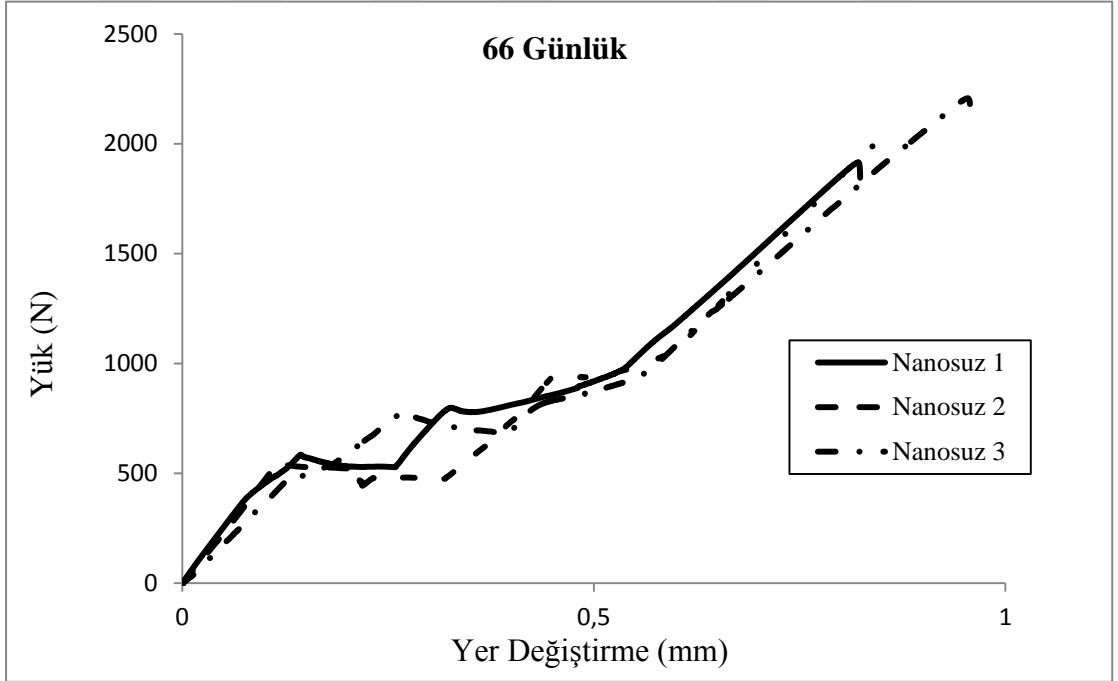
Çizelge 6.1. (Devam)Çekme prizmaları deney sonuçları

P4	15	0,25	61	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P5	15	0,32	61	1,37	0,77	1632	0,81	0,45	360,80	119,00	1,5
P6	15	0,32	61	1,70	0,89	1632	1,01	0,53	397,40	104,40	1,5
P7	15	0,32	61	1,54	0,64	1632	0,91	0,38	225,40	59,00	1,5
P8	15	0,32	61	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P9	15	0,64	61	0,38	0,23	864	0,43	0,26	199,60	114,10	1,5
P10	15	0,64	61	0,41	---	864	0,46	---	100,70	---	1,5
P11	15	0,64	61	0,41	---	864	0,46	---	120,50	---	1,5
P12	15	0,64	61	---	---	---	---	---	---	---	1,5
P1	90	0,25	52	1,49	0,87	1800	0,83	0,48	288,60	126,40	1,5
P2	90	0,25	52	1,56	1,21	1800	0,86	0,67	238,80	179,10	1,5
P3	90	0,25	52	1,79	1,44	1800	0,99	0,80	289,90	297,60	1,5
P4	90	0,25	52	2,00	1,52	1800	1,11	0,84	229,30	205,50	1,5
P5	90	0,32	52	1,37	1,03	1632	0,84	0,63	330,60	166,70	1,5
P6	90	0,32	52	1,60	1,26	1632	0,98	0,77	261,30	200,00	1,5
P7	90	0,32	52	1,39	0,91	1632	0,85	0,56	214,00	172,00	1,5
P8	90	0,32	52	1,47	1,25	1632	0,90	0,77	217,60	242,60	1,5
P9	90	0,64	52	0,96	0,45	864	1,11	0,52	410,20	84,60	1,5
P10	90	0,64	52	0,75	0,52	864	0,87	0,60	182,00	90,20	1,5
P11	90	0,64	52	0,91	0,67	864	1,06	0,77	198,90	129,50	1,5
P12	90	0,64	52	0,91	---	864	1,05	---	210,10	---	1,5

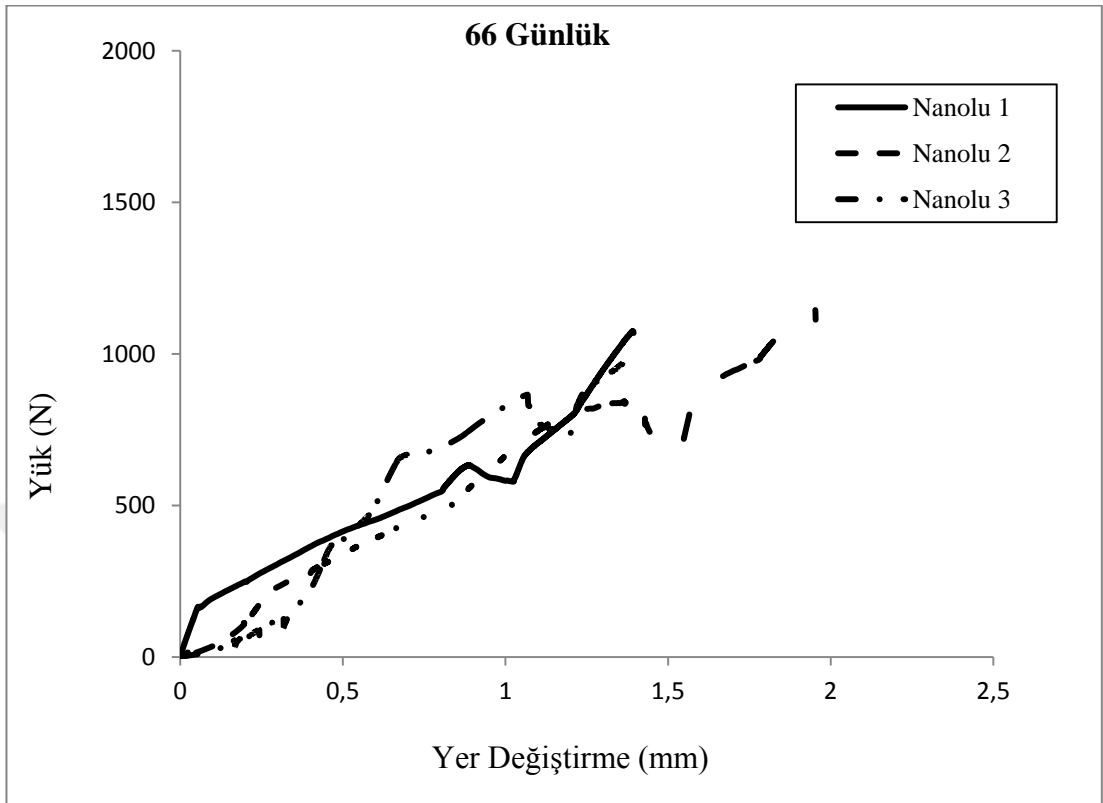
Çekme prizmalarına ait yük-yer değiştirme grafikleri, her döküm için aynı çentik boyundaki numunelerin eğrilerinin tek grafikte gösterildiği şekilde aşağıda Şek.6.1 - Şek.6.18’de verilmiştir.



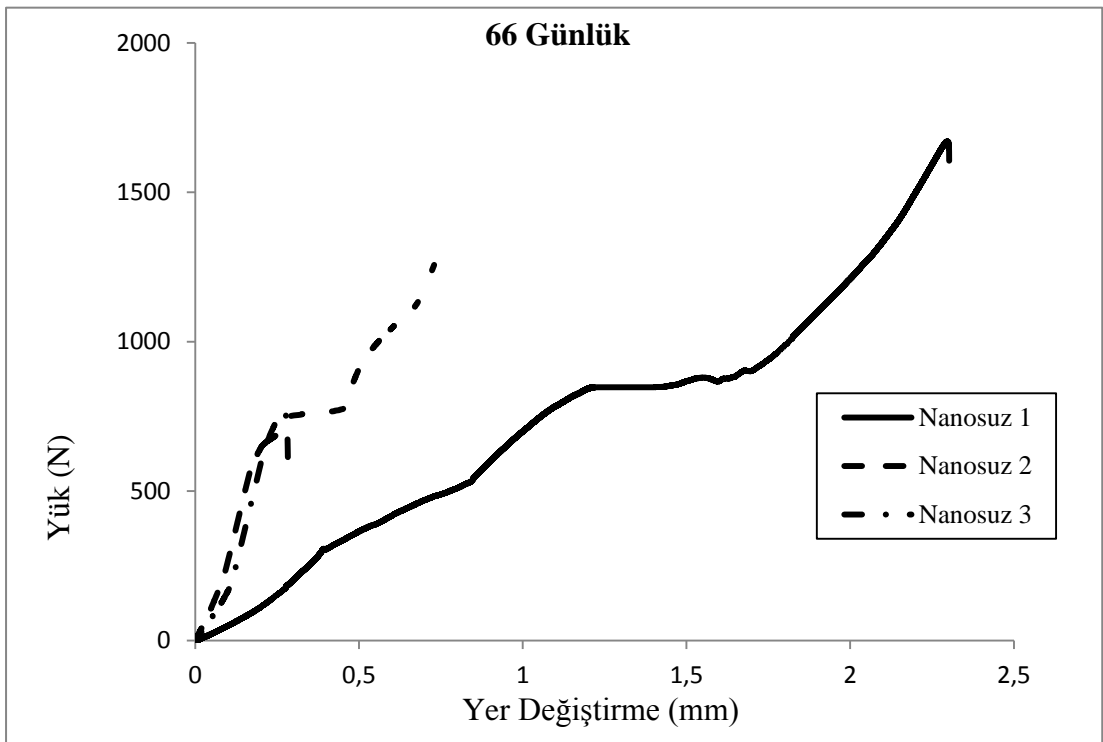
Şekil 6.1. 66 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



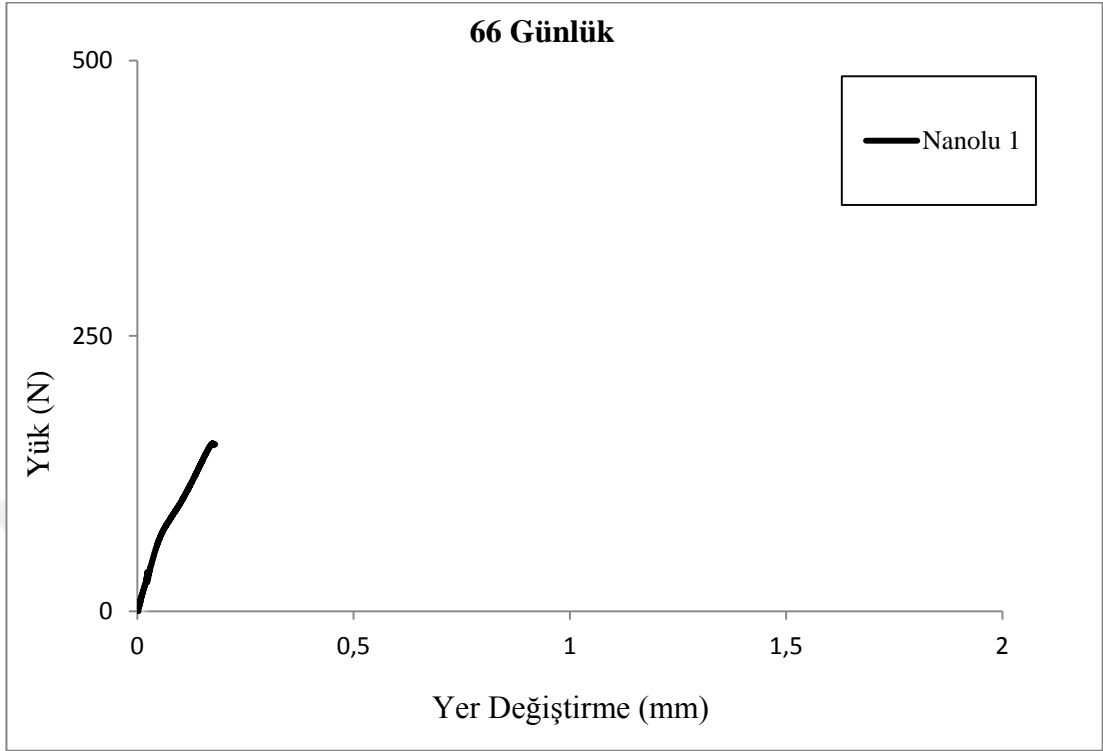
Şekil 6.2. 66 Günlük nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



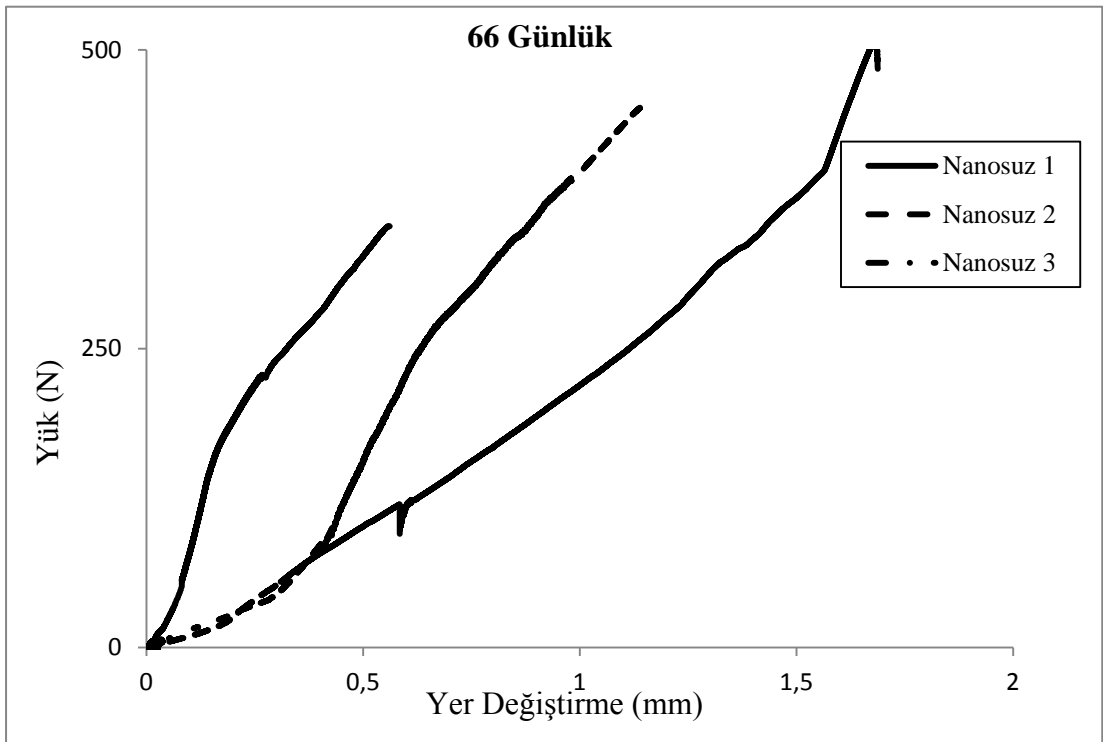
Şekil 6.3. 66 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



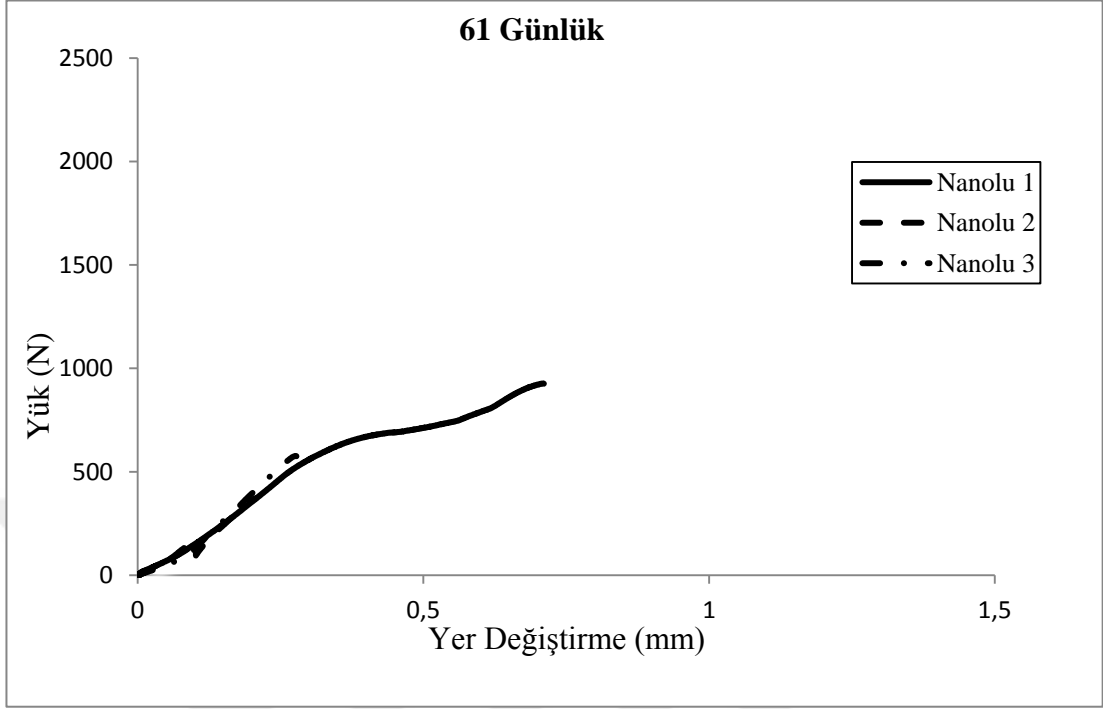
Şekil 6.4. 66 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



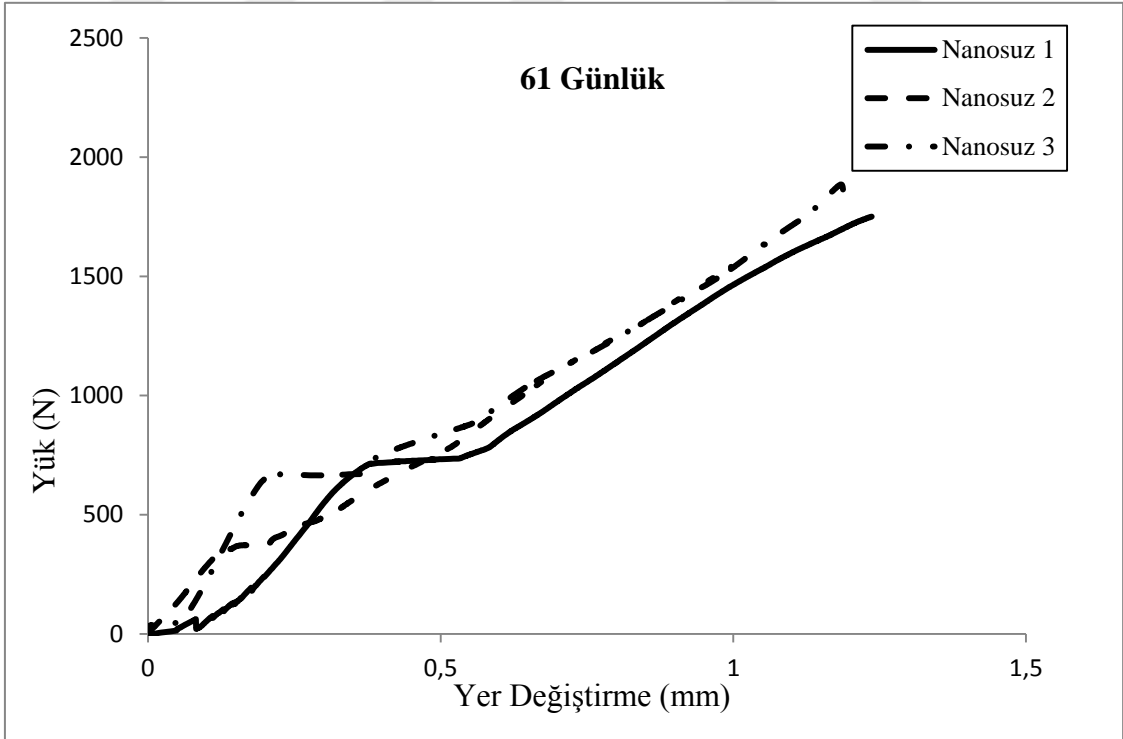
Şekil 6.5. 66 Günlük nanolu %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



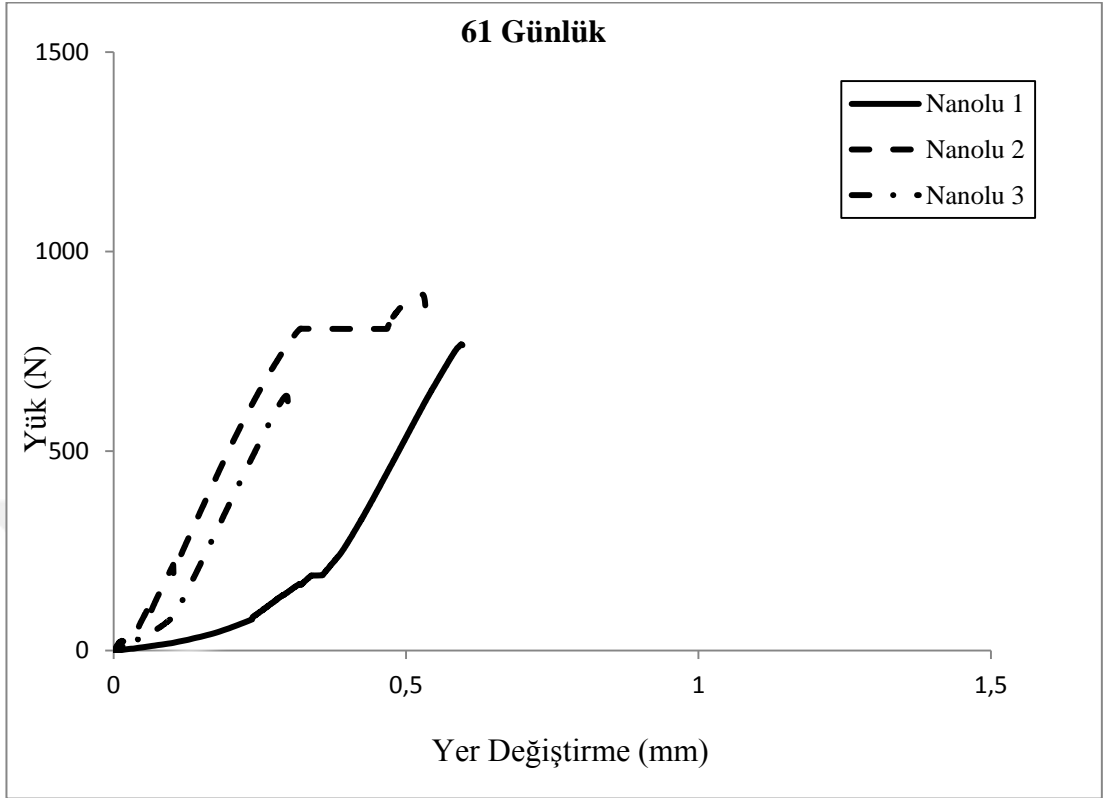
Şekil 6.6. 66 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



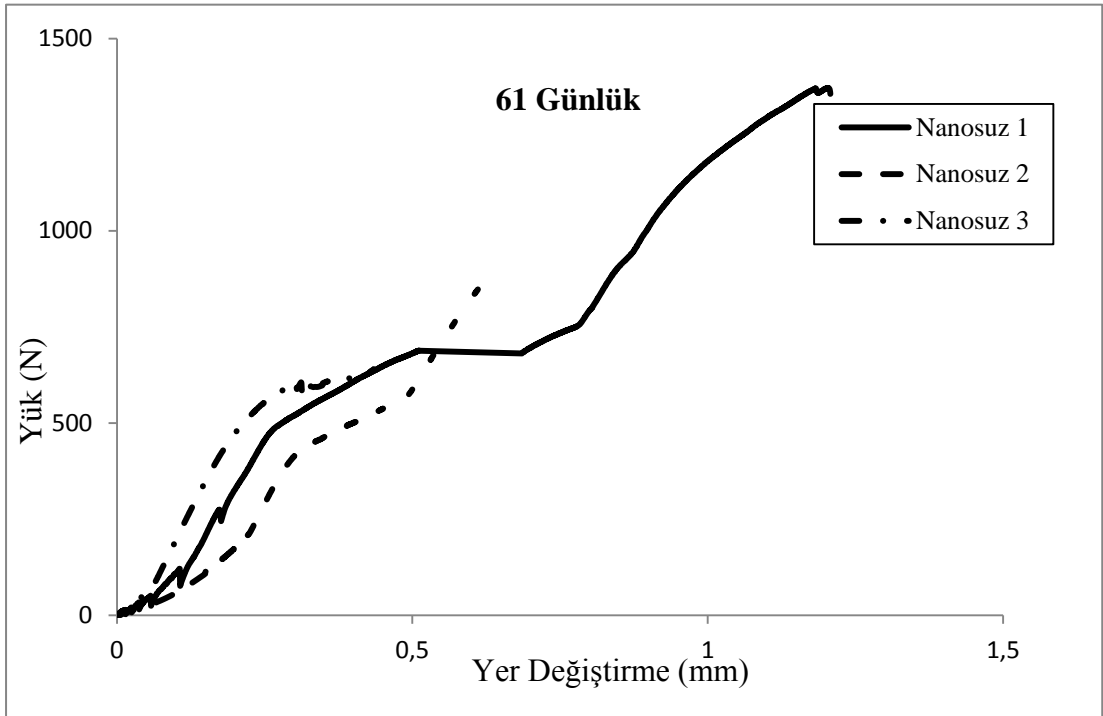
Şekil 6.7. 61 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



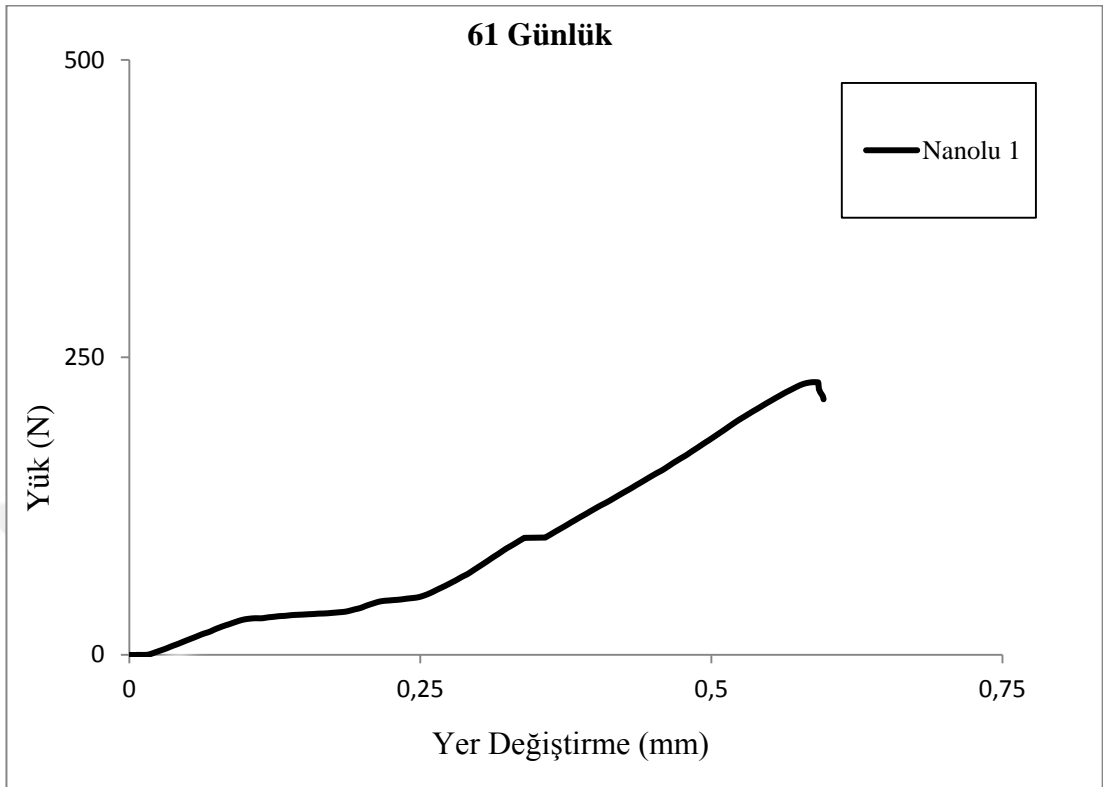
Şekil 6.8. 61 Günlük nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



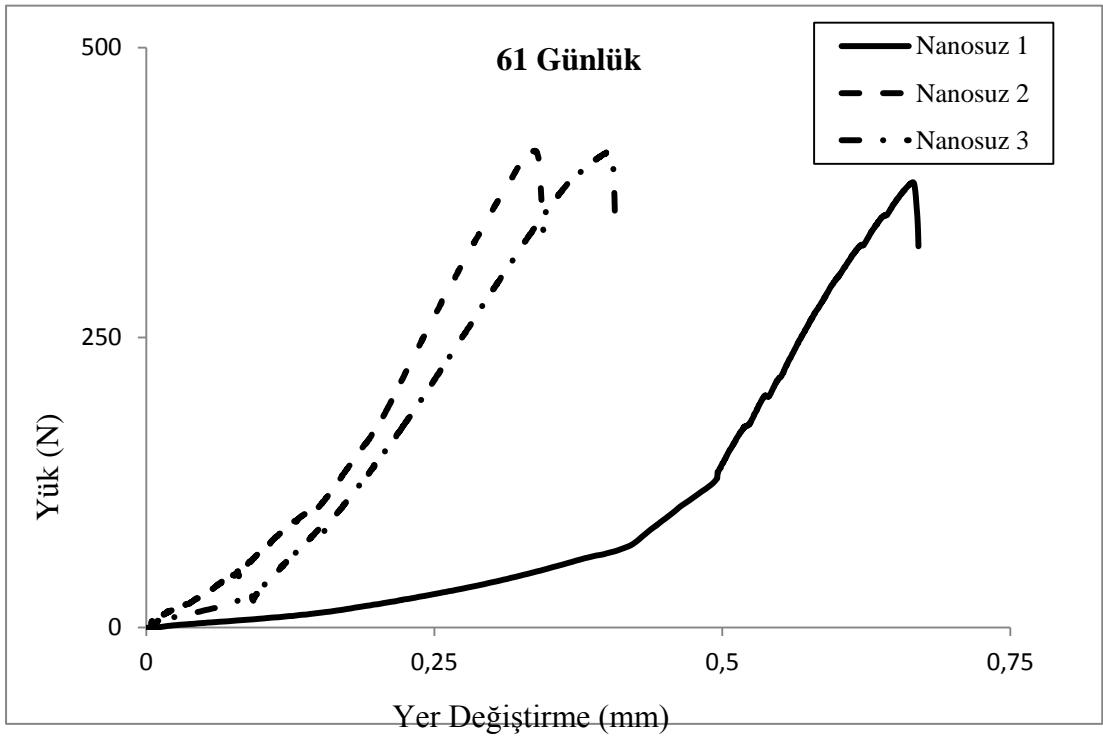
Şekil 6.9. 61 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. Eğrileri



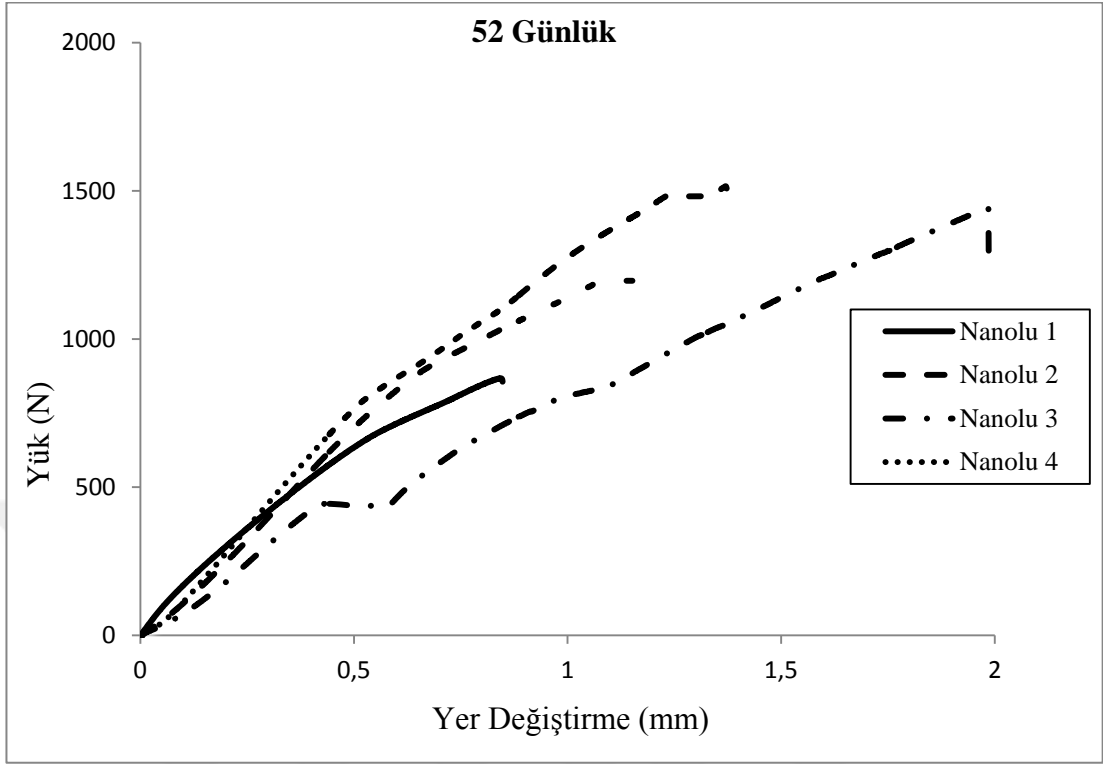
Şekil 6.10. 61 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



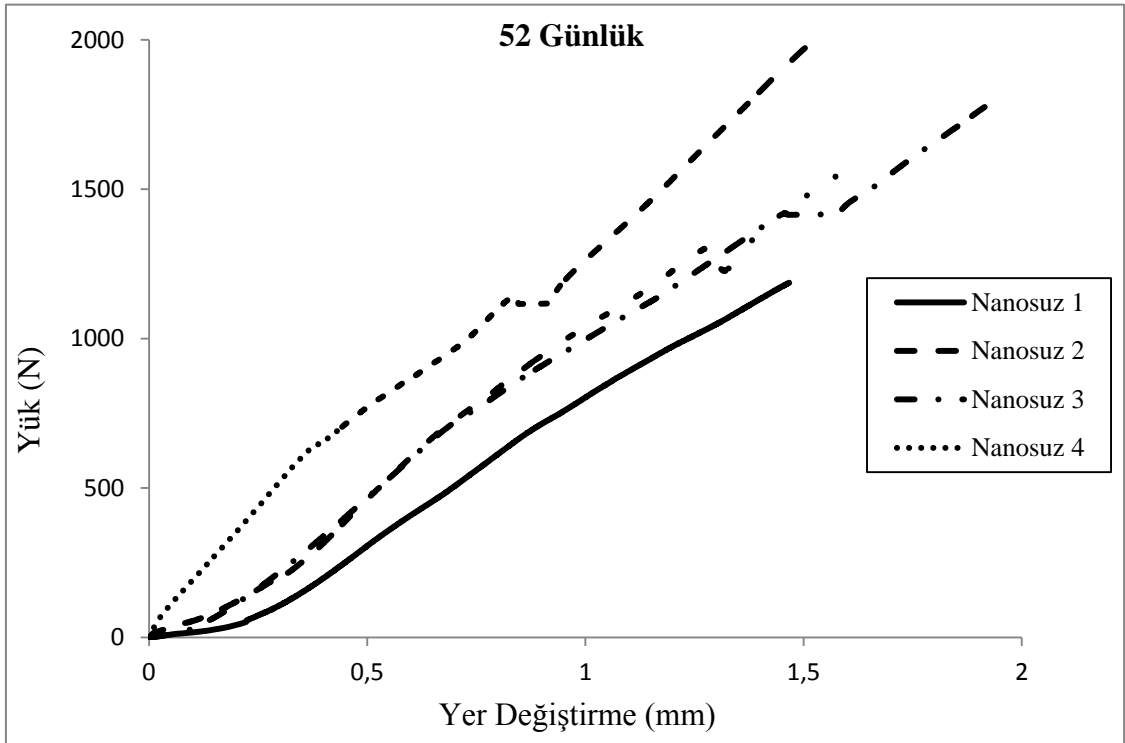
Şekil 6.11. 61 Günlük nanolu %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



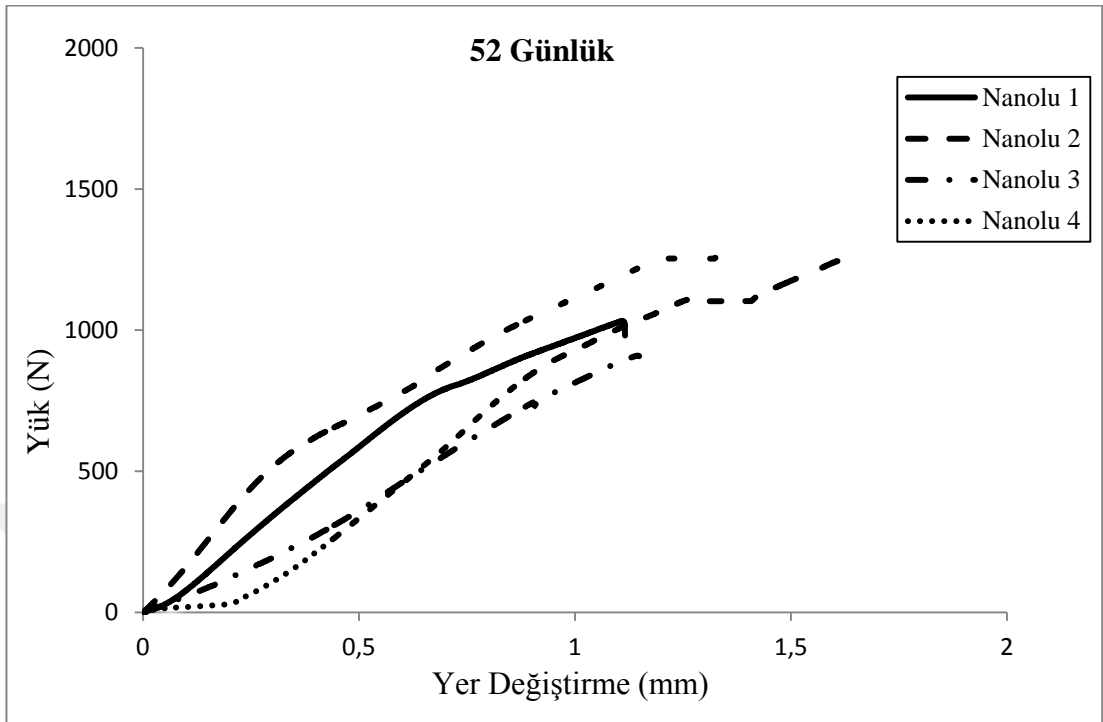
Şekil 6.12. 61 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



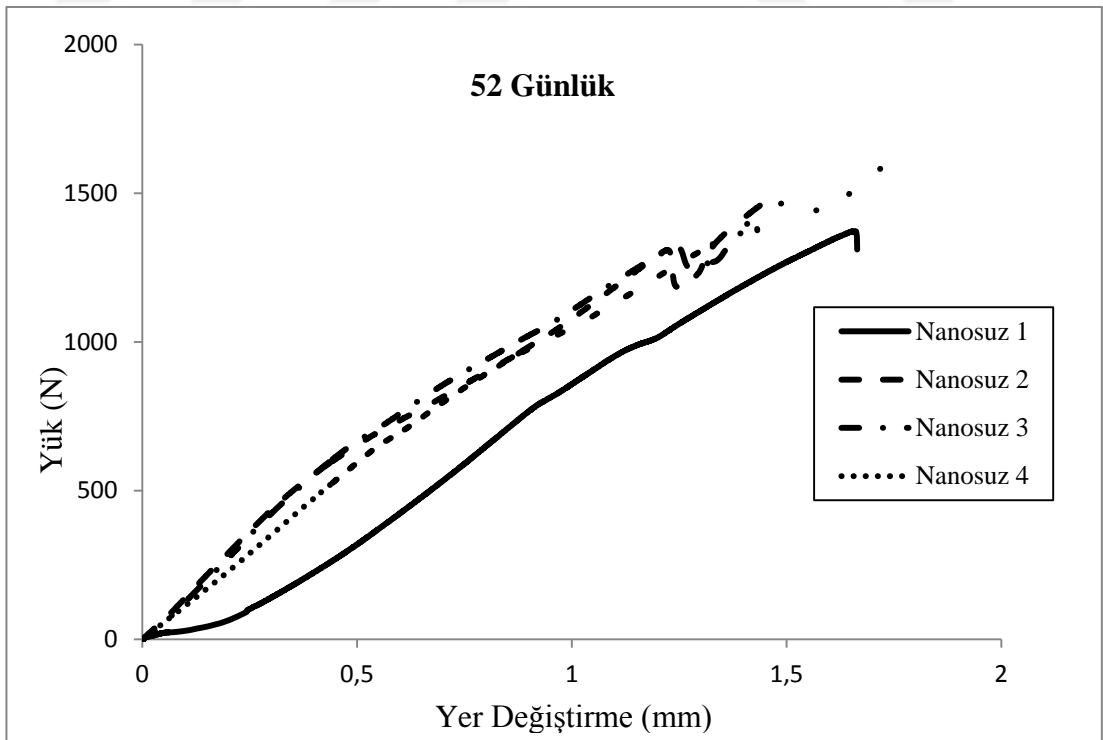
Şekil 6.13. 52 Günlük nanolu %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



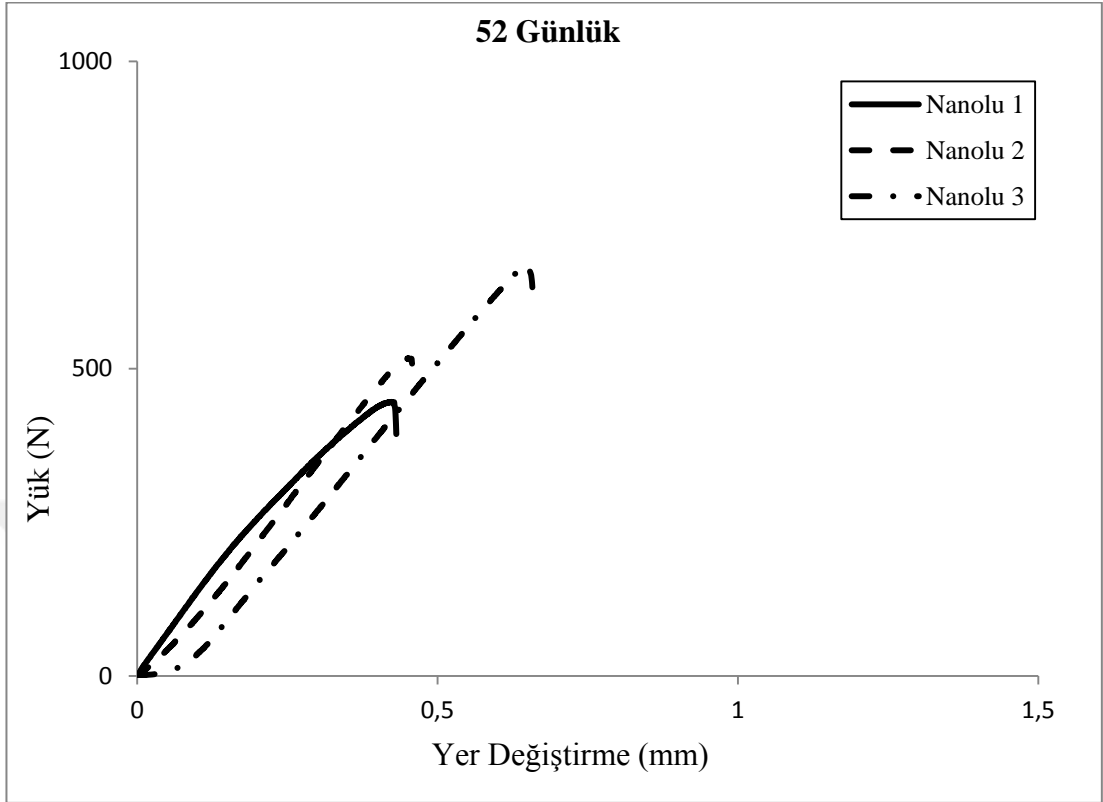
Şekil 6.14. 52 Günlük nanosuz %25 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



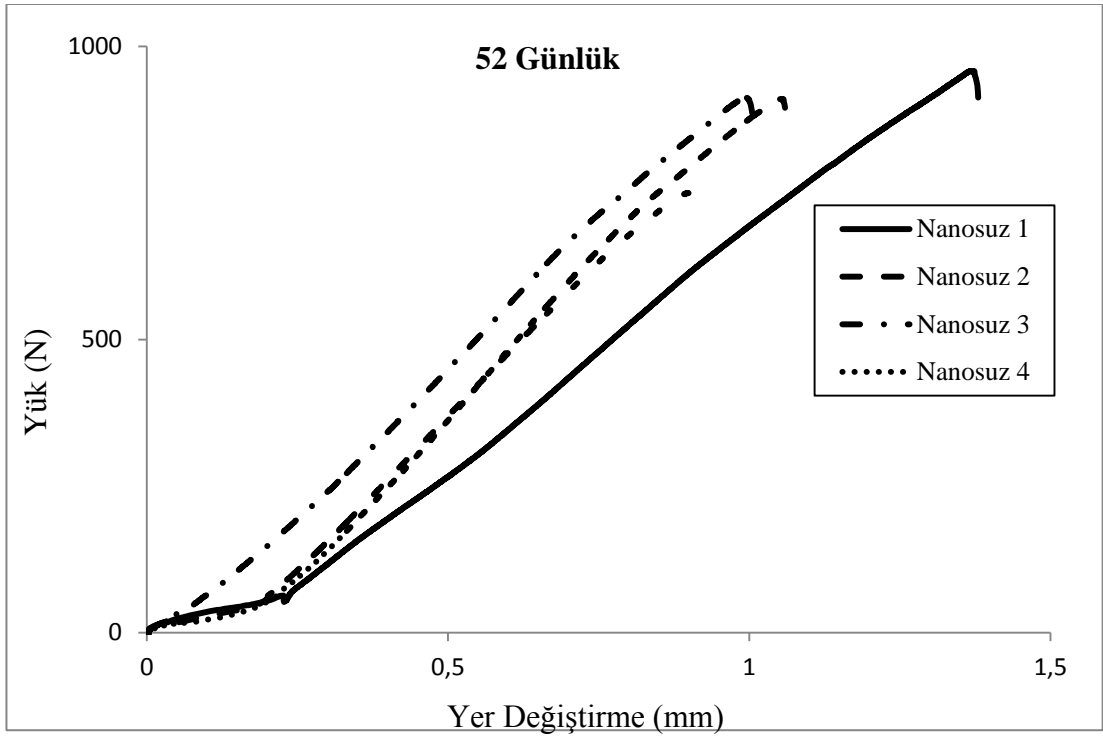
Şekil 6.15. 52 Günlük nanolu %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



Şekil 6.16. 52 Günlük nanosuz %32 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri



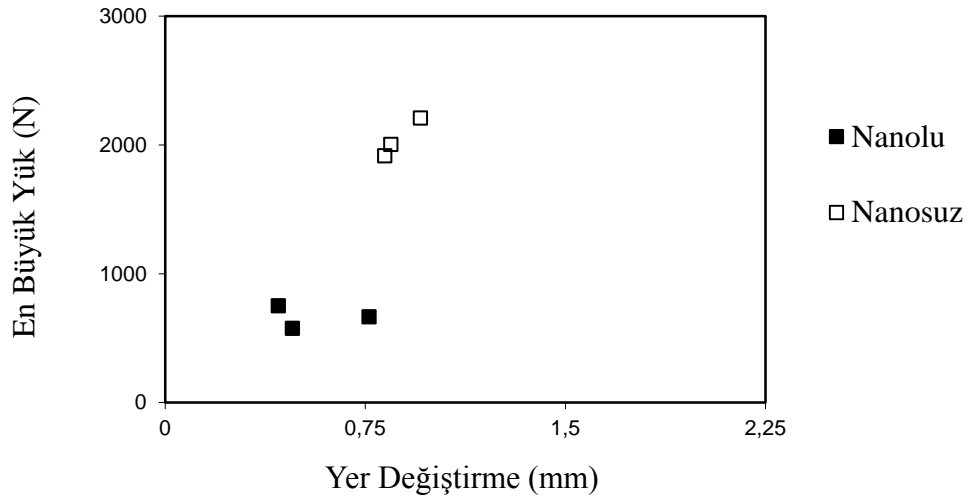
Şekil 6.17. 52 Günlük Nanolu %64 Çentikli Numunelerde Yük-Yer Değ. Eğrileri



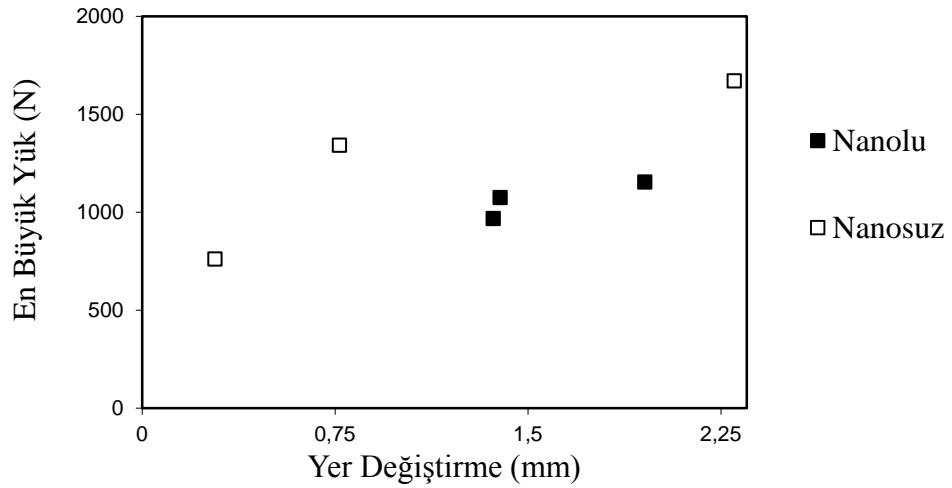
Şekil 6.18. 52 Günlük nanosuz %64 çentikli numunelerde yük-yer değ. eğrileri

6.1.2. Aynı çentik boyunda göçme yükleri

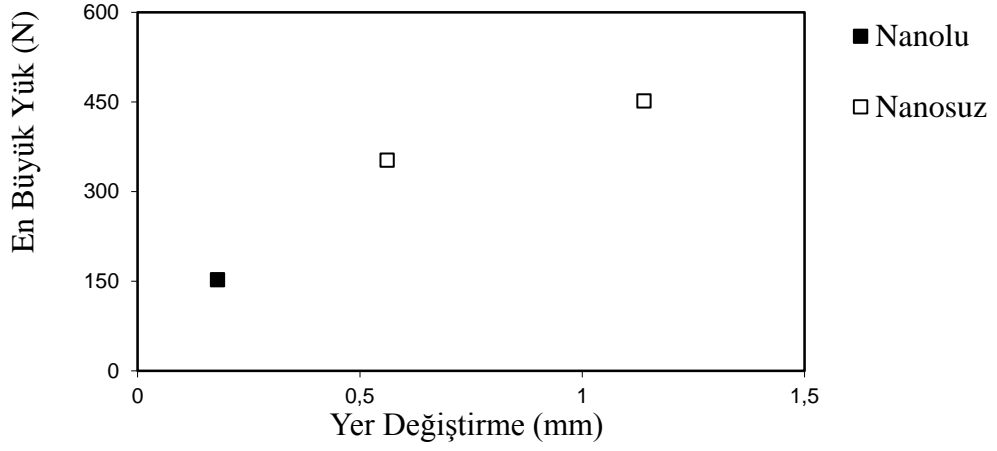
Her döküm grubu için, aynı çentik boyuna sahip numunelerin yük (N) - yer değiştirme (mm) grafikleri Şekil 6.19...Şekil 6.27'de gösterilmiştir.



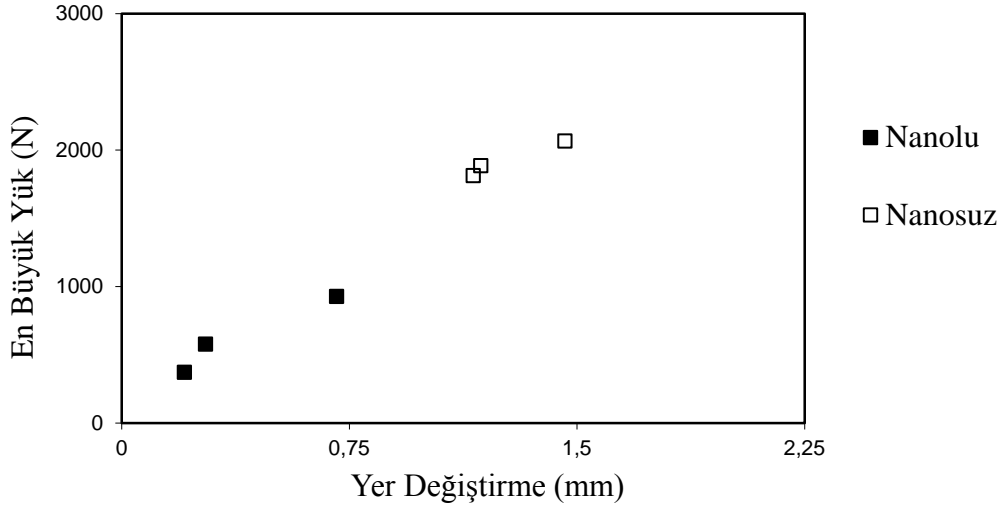
Şekil 6.19. 66 Günlük % 25 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



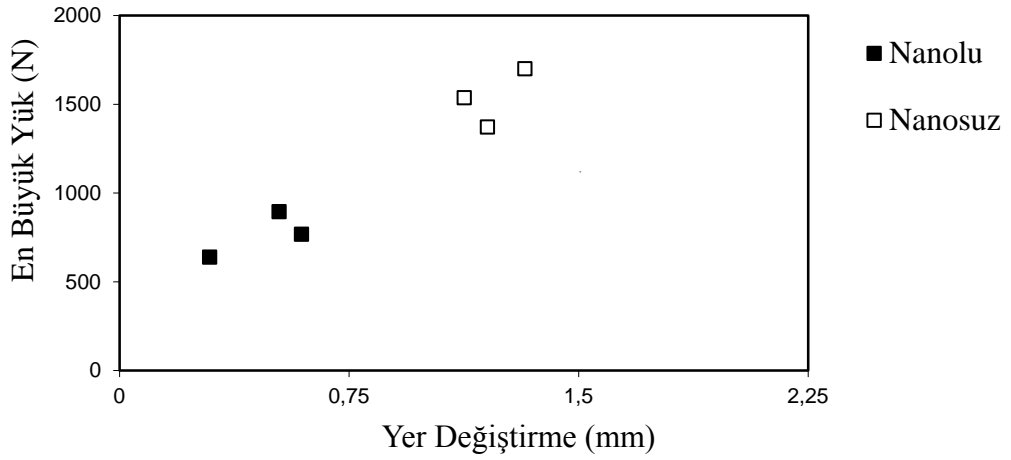
Şekil 6.20. 66 Günlük % 32 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



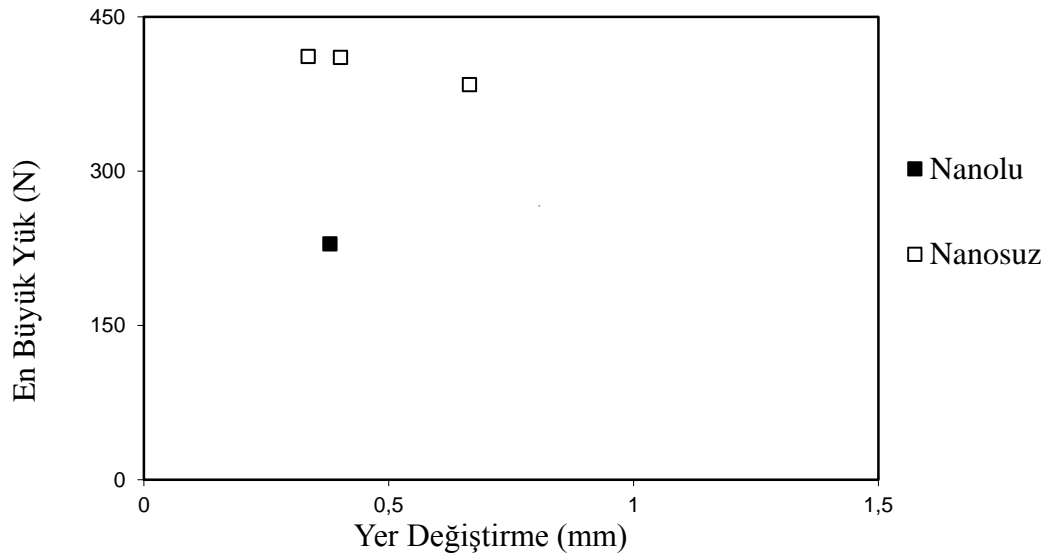
Şekil 6.21. 66 Günlük % 64 entik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



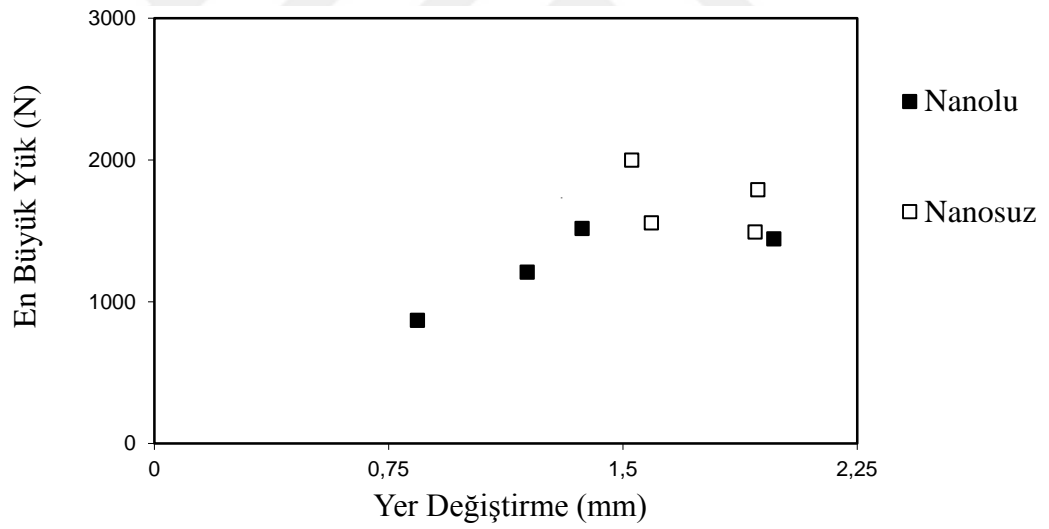
Şekil 6.22. 61 Günlük % 25 entik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



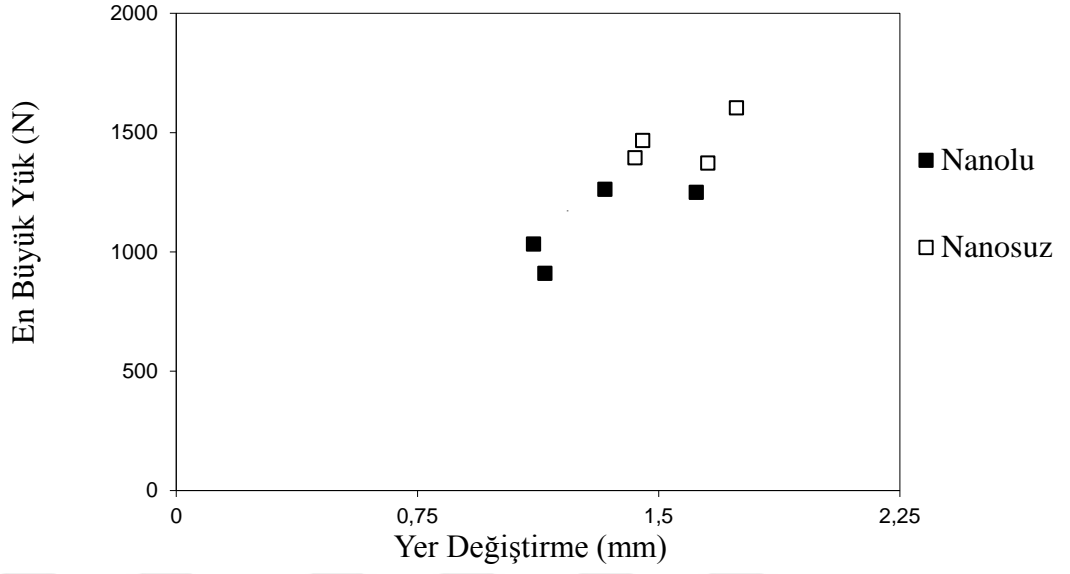
Şekil 6.23. 61 Günlük % 32 entik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



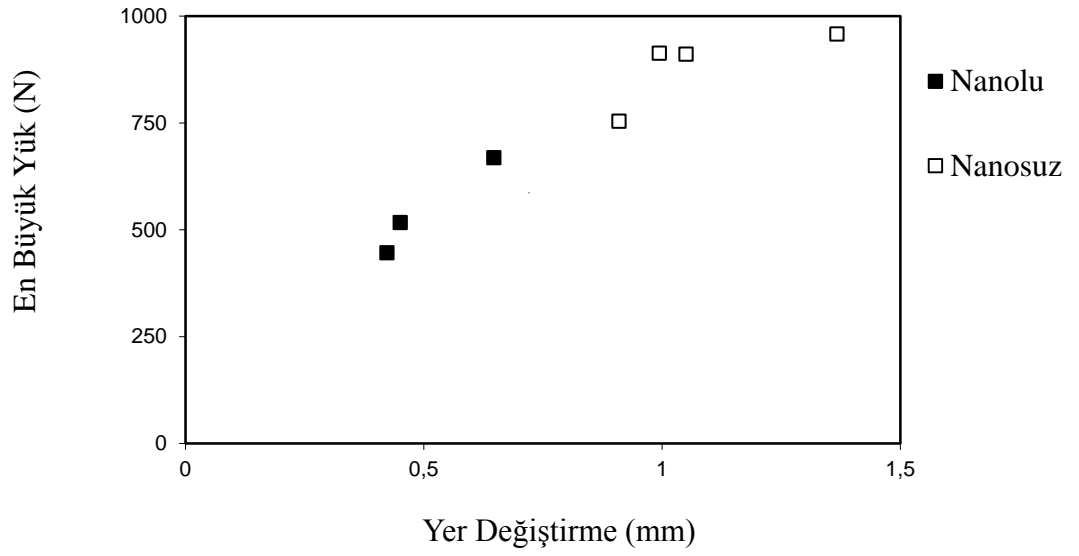
Şekil 6.24. 61 Günlük % 64 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 6.25. 52 Günlük %25 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 6.26. 52 Günlük %32 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 6.27. 52 Günlük %64 çentik boyunda yük-yer değiştirme grafiği

6.1.3. Çekme prizmalarında boyut etkisi

Çekme deneylerinde prizmalarda oluşan en büyük çekme gerilmesi değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

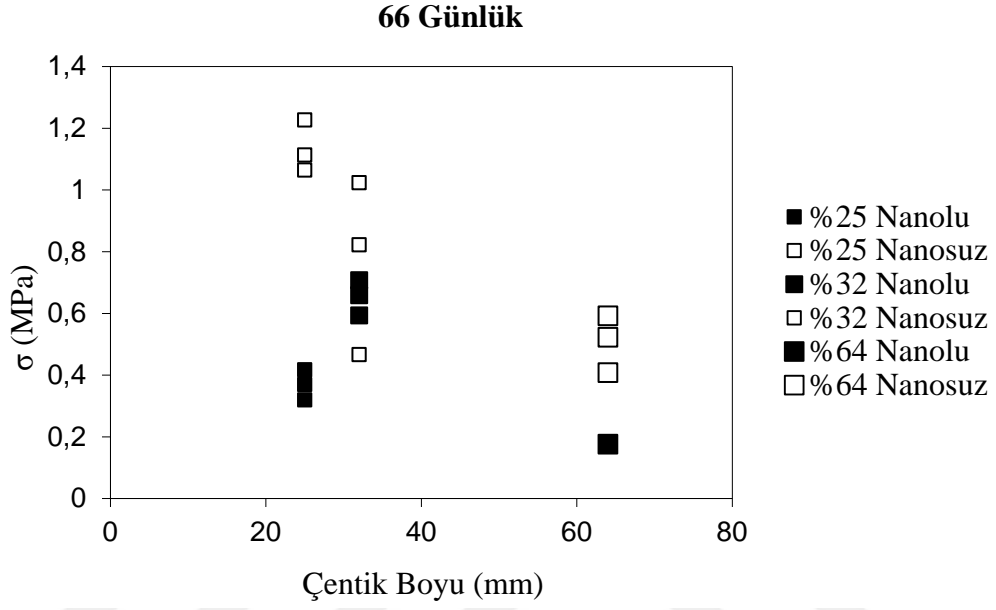
Çizelge 6.2. Çekme prizmalarında gerilme değerleri

NUMUNE ADI	ELEMAN TİPİ	YÜK (N)	ÇENTİK ORANI (mm)	ALAN (mm ²)	GERİLME (N/mm ²)
P1	NL	750,2397	25	1800	0,4168
P2	NL	664,8064	25	1800	0,36934
P3	NL	574,9385	25	1800	0,31941
P4	NL	-	25	-	-
P5	NS	1915,55	25	1800	1,064194
P6	NS	2003,257	25	1800	1,112921
P7	NS	2207,835	25	1800	1,226575
P8	NS	-	25	-	-
P9	NL	1075,125	32	1632	0,658778
P10	NL	1154,407	32	1632	0,707357
P11	NL	968,2338	32	1632	0,593281
P12	NL	-	32	-	-
P13	NS	1670,122	32	1632	1,023359
P14	NS	1341,756	32	1632	0,822154
P15	NS	761,0798	32	1632	0,466348
P16	NS	-	32	-	-
P17	NL	152,4607	64	864	0,176459
P18	NL	-	64	-	-
P19	NL	-	64	-	-
P20	NL	-	64	-	-
P21	NS	352,4621	64	864	0,407942
P22	NS	511,5191	64	864	0,592036
P23	NS	451,5648	64	864	0,522644
P24	NS	-	64	-	-
P25	NL	926,4946	25	1800	0,514719
P26	NL	371,1382	25	1800	0,206188
P27	NL	576,6551	25	1800	0,320364
P28	NL	-	25	-	-
P29	NS	2065,818	25	1800	1,147677
P30	NS	1812,395	25	1800	1,006886
P31	NS	1885,319	25	1800	1,047399
P32	NS	-	25	-	-
P33	NL	767,6284	32	1632	0,470361

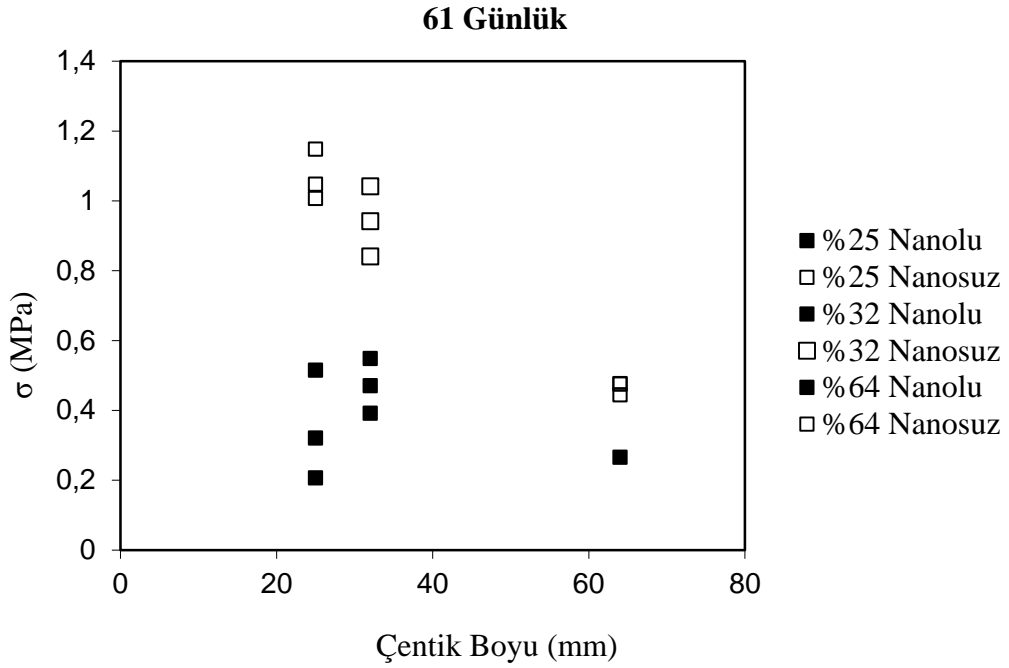
Çizelge 6.2. (Devam) Çekme prizmalarında gerilme değerleri

P34	NL	894,5306	32	1632	0,548119
P35	NL	638,6757	32	1632	0,391345
P36	NL	-	32	-	-
P37	NS	1371,829	32	1632	0,840581
P38	NS	1699,495	32	1632	1,041357
P39	NS	1536,798	32	1632	0,941665
P40	NS	-	32	-	-
P41	NL	229,1362	64	864	0,265204
P42	NL	-	64	-	-
P43	NL	-	64	-	-
P44	NL	-	64	-	-
P45	NS	383,9493	64	864	0,444386
P46	NS	411,3356	64	864	0,476083
P47	NS	410,3979	64	864	0,474998
P48	NS	-	64	-	-
P49	NL	867,4781	25	1800	0,481932
P50	NL	1208,13	25	1800	0,671183
P51	NL	1442,957	25	1800	0,801643
P52	NL	1515,595	25	1800	0,841997
P53	NS	1491,054	25	1800	0,828363
P54	NS	1556,238	25	1800	0,864577
P55	NS	1788,998	25	1800	0,993888
P56	NS	1998,568	25	1800	1,110316
P57	NL	1032,702	32	1632	0,632783
P58	NL	1261,854	32	1632	0,773195
P59	NL	909,551	32	1632	0,557323
P60	NL	1249,488	32	1632	0,765618
P61	NS	1372,147	32	1632	0,840776
P62	NS	1603,349	32	1632	0,982444
P63	NS	1394,002	32	1632	0,854168
P64	NS	1466,449	32	1632	0,898559
P65	NL	445,9858	64	864	0,516187
P66	NL	516,7961	64	864	0,598144
P67	NL	668,3032	64	864	0,773499
P68	NL	-	64	-	-
P69	NS	958,1248	64	864	1,108941
P70	NS	753,816	64	864	0,872472
P71	NS	912,9207	64	864	1,056621
P72	NS	910,9338	64	864	1,054322

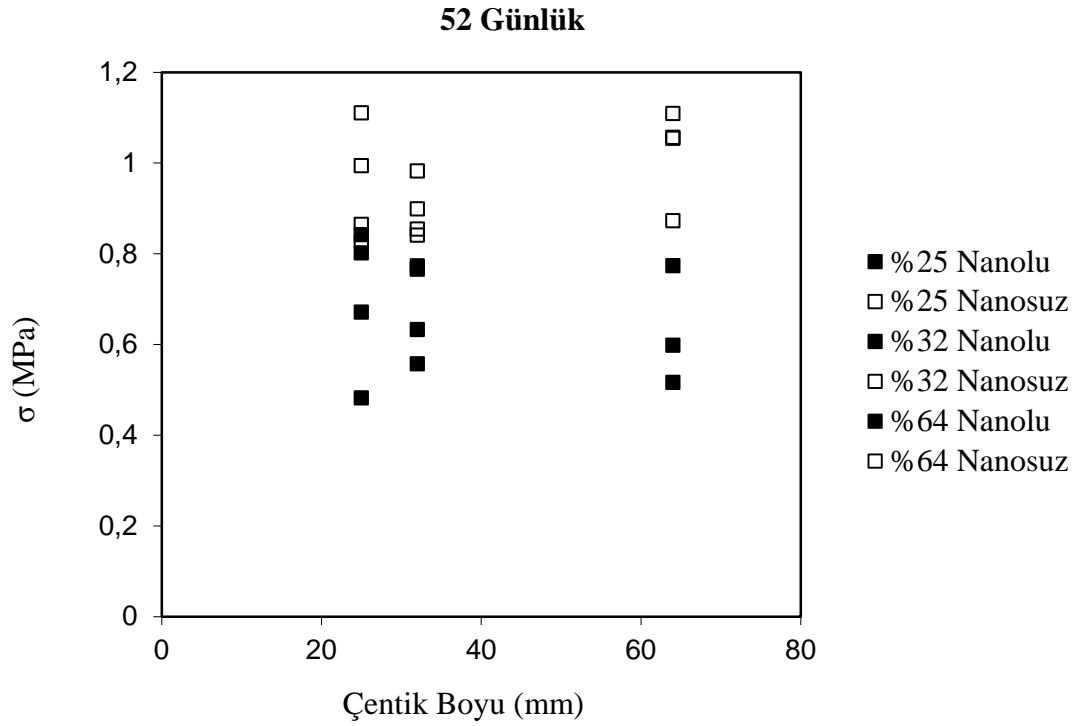
Her üç döküm için ayrı ayrı çentik boylarına göre çekme gerilmesi değişimlerini gösteren çentik boyu-çekme gerilmesi grafikleri Şekil 6.28, Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



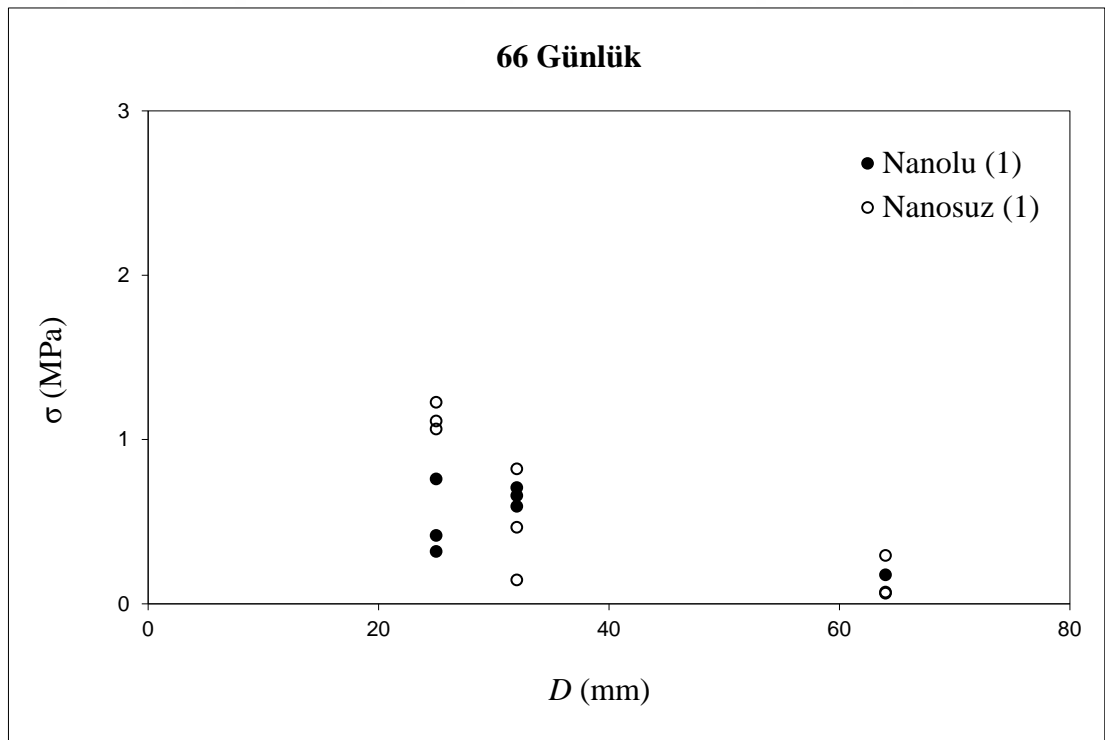
Şekil 6.28. 66 Günlük değişik çentik boylarında gerilme değerleri



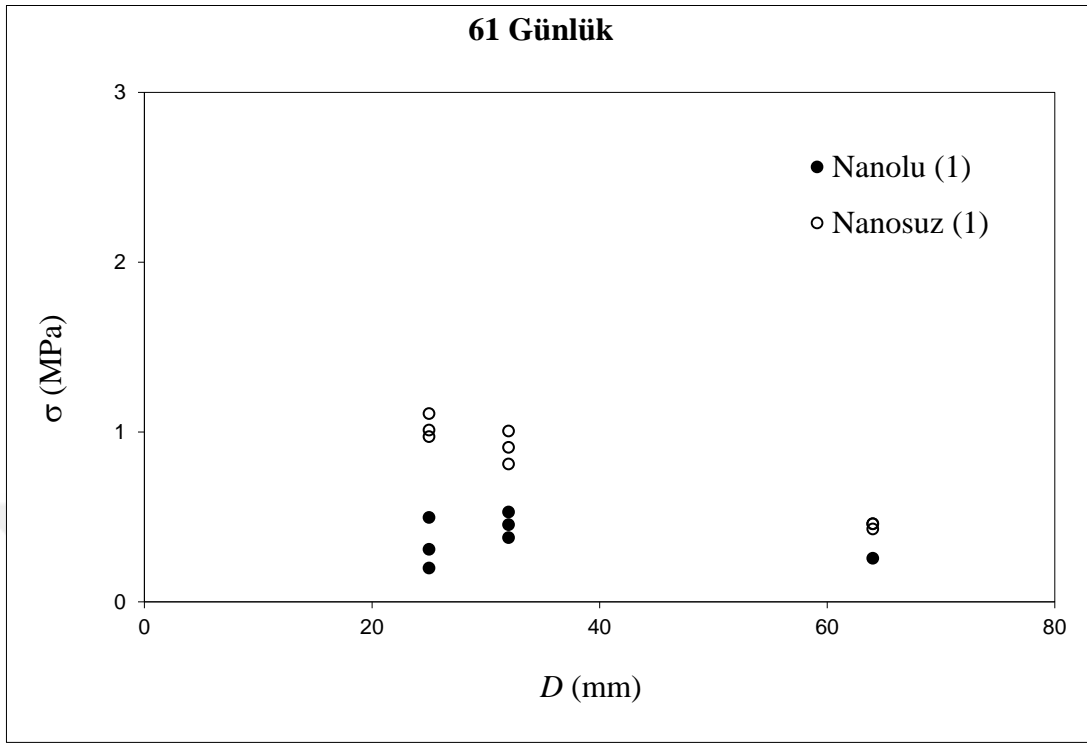
Şekil 6.29. 61 Günlük değişik çentik boylarında gerilme değerleri



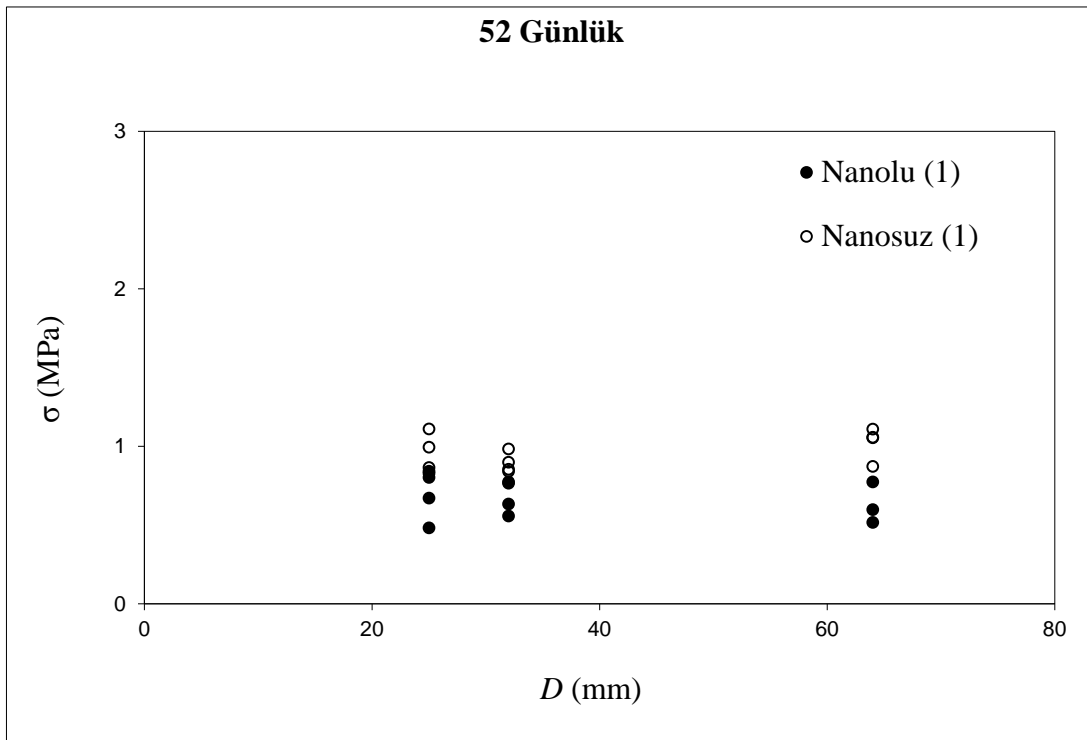
Şekil 6.30. 52 Günlük değişik çentik boylarında gerilme değerleri



Şekil 6.31. 66 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 6.32. 61 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 6.33. 52 Günlük prizmalarda regresyon grafiklerinin karşılaştırılması

6.2. Basınç Silindirlerinin Sonuçları

Üç boy basınç silindirinin her biri dayanımlarını belirlemek için basınç deneyine tabi tutulmuştur. Farklı boyutlu basınç silindiri numuneleri Resim 6.1’de verilmiştir.



Resim 6.1: Basınç silindirleri

Basınç silindirleri deney sonuçları Çizelge 6.3’ de verildiği gibidir.

Çizelge 6.3. Basınç silindirleri deney sonuçları

İsm	l (mm)	d (mm)	Yaş (gün)	P_0 (kN)	P_{c0} (kN)
C1	150	75	66	130,13	90,09
C2	150	75	66	143,7	86,02
C3	150	75	66	150,32	87,83
C3a	150	75	66	-	88,96
C3b	150	75	66	-	94,45
C4	75	37.5	66	19,37	17,56
C5	75	37.5	66	18,89	17,76
C6	75	37.5	66	23,41	22,76
C7	37.5	18.8	66	5,16	5,16
C8	37.5	18.8	66	5,32	3,71
C9	37.5	18.8	66	6,29	-
C1	150	75	61	118,35	51,5
C2	150	75	61	94,13	47,47
C3	150	75	61	95,9	52,47
C3a	150	75	61	-	52,15

Çizelge 6.3. (Devam) Basınç silindirleri deney sonuçları

C4	75	37,5	61	26,48	14,37
C5	75	37,5	61	22,28	9,2
C6	75	37,5	61	23,08	12,91
C7	37,5	18,8	61	6,45	3,22
C8	37,5	18,8	61	5	5
C9	37,5	18,8	61	3,55	4,03
C1	150	75	52	136,59	65,71
C2	150	75	52	150,96	60,38
C3	150	75	52	125,78	74,27
C3a	150	75	52	-	83,31
C4	75	37,5	52	25,99	24,86
C5	75	37,5	52	19,21	17,43
C6	75	37,5	52	24,86	18,24
C7	37,5	18,8	52	4,52	3,55
C8	37,5	18,8	52	5	4,35
C9	37,5	18,8	52	4,35	6,45

Tüm basınç silindirlerinin en büyük yük değerleri, dayanım değerleri ve ayrıca ortalama dayanım değerleri ise Çiz.6.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.4. Basınç silindirlerinin en büyük yük ve dayanım değerleri

Numune Adı	Numune Tipi	En Büyük Yük (kN)	Dayanım (MPa)	Ort. Dayanım (MPa)
C 1	Küçük Boy Nanolu	5,16	18,69	16,06
C 2	Küçük Boy Nanolu	3,71	13,44	
C 3	Orta Boy Nanolu	17,56	15,90	17,53
C 4	Orta Boy Nanolu	17,76	16,08	
C 5	Orta Boy Nanolu	22,76	20,61	
C 6	Büyük Boy Nanolu	90,09	20,39	20,25
C 7	Büyük Boy Nanolu	86,02	19,47	
C 8	Büyük Boy Nanolu	87,83	19,88	
C 9	Büyük Boy Nanolu	88,96	20,14	
C 10	Büyük Boy Nanolu	94,45	21,38	
C 11	Küçük Boy Nanosuz	5,16	18,69	20,25

Çizelge 6.4.(Devam) Basınç silindirlerinin en büyük yük ve dayanım değerleri

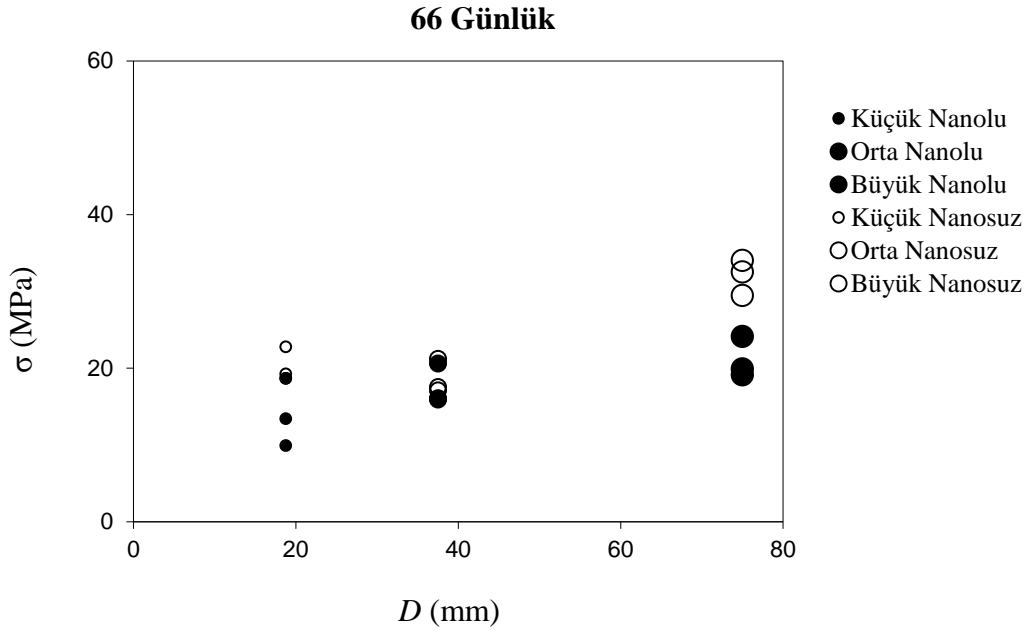
C 12	Küçük Boy Nanosuz	5,32	19,27	
C 13	Küçük Boy Nanosuz	6,29	22,78	
C 14	Orta Boy Nanosuz	19,37	17,54	18,61
C 15	Orta Boy Nanosuz	18,89	17,10	
C 16	Orta Boy Nanosuz	23,41	21,20	
C 17	Büyük Boy Nanosuz	130,13	29,46	32,00
C 18	Büyük Boy Nanosuz	143,70	32,53	
C 19	Büyük Boy Nanosuz	150,32	34,03	
C 20	Küçük Boy Nanolu	3,22	11,66	14,79
C 21	Küçük Boy Nanolu	5,00	18,11	
C 22	Küçük Boy Nanolu	4,03	14,60	
C 23	Orta Boy Nanolu	14,37	13,01	11,01
C 24	Orta Boy Nanolu	9,20	8,33	
C 25	Orta Boy Nanolu	12,91	11,69	
C 26	Büyük Boy Nanolu	51,50	11,66	11,52
C 27	Büyük Boy Nanolu	47,47	10,75	
C 28	Büyük Boy Nanolu	52,47	11,88	
C 29	Büyük Boy Nanolu	52,15	11,80	
C 30	Küçük Boy Nanosuz	6,45	23,36	18,11
C 31	Küçük Boy Nanosuz	5,00	18,11	
C 32	Küçük Boy Nanosuz	3,55	12,86	
C 33	Orta Boy Nanosuz	26,48	23,98	21,68
C 34	Orta Boy Nanosuz	22,28	20,17	
C 35	Orta Boy Nanosuz	23,08	20,90	
C 36	Büyük Boy Nanosuz	118,35	26,79	23,27
C 37	Büyük Boy Nanosuz	94,13	21,31	
C 38	Büyük Boy Nanosuz	95,90	21,71	
C 39	Küçük Boy Nanolu	3,55	12,86	17,32
C 40	Küçük Boy Nanolu	4,35	15,75	
C 41	Küçük Boy Nanolu	6,45	23,36	
C 42	Orta Boy Nanolu	24,86	22,51	18,27
C 43	Orta Boy Nanolu	17,43	15,78	
C 44	Orta Boy Nanolu	18,24	16,51	
C 45	Büyük Boy Nanolu	65,71	14,87	16,05

Çizelge 6.4.(Devam) Basınç silindirlerinin en büyük yük ve dayanım değerleri

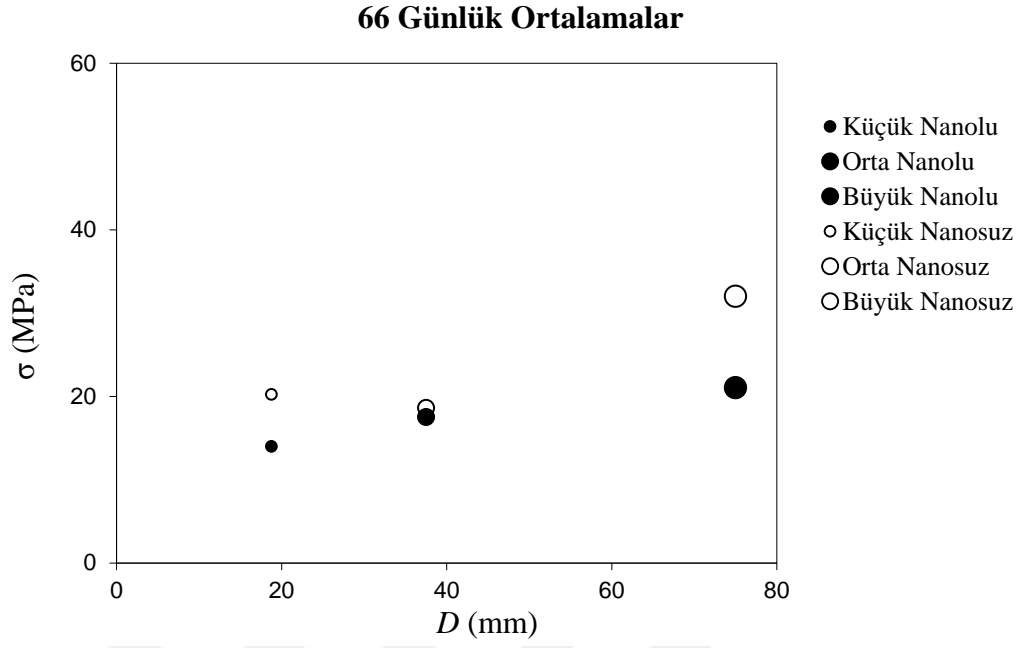
C 46	Büyük Boy Nanolu	60,38	13,67	
C 47	Büyük Boy Nanolu	74,27	16,81	
C 48	Büyük Boy Nanolu	83,31	18,86	
C 49	Küçük Boy Nanosuz	4,52	16,37	16,74
C 50	Küçük Boy Nanosuz	5,00	18,11	
C 51	Küçük Boy Nanosuz	4,35	15,75	
C 52	Orta Boy Nanosuz	25,99	23,53	21,14
C 53	Orta Boy Nanosuz	19,21	17,39	
C 54	Orta Boy Nanosuz	24,86	22,51	
C 55	Büyük Boy Nanosuz	136,59	30,92	31,19
C 56	Büyük Boy Nanosuz	150,96	34,17	
C 57	Büyük Boy Nanosuz	125,78	28,47	

6.2.1. Basınç silindirlerinde boyut etkisi

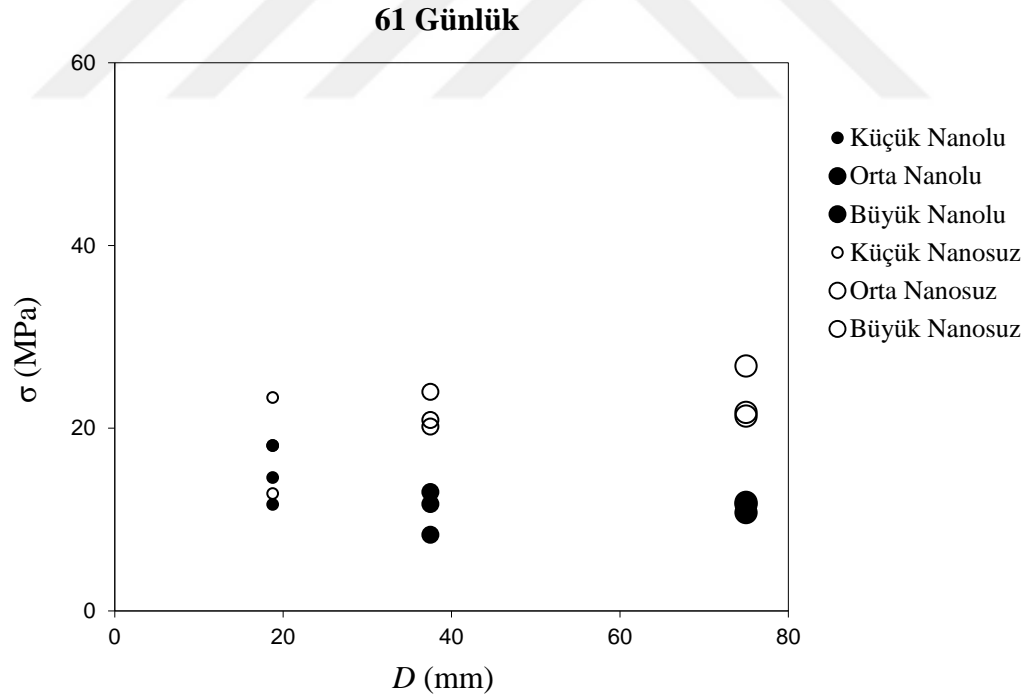
Basınç silindirlerine ait silindir çapı – gerilme değerleri grafikleri Şekil 6.34~Şekil 6.39'da gösterilmiştir.



Şekil 6.34. 66 Günlük silindir çapına karşılık gerilme değerleri

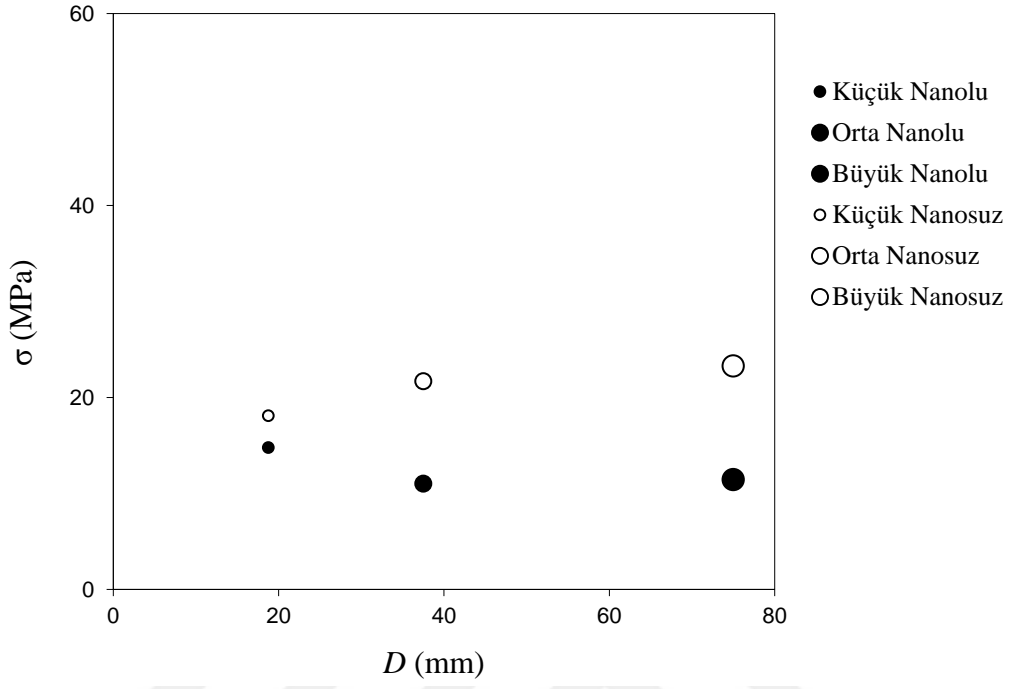


Şekil 6.35. 66 Günlük silindir çapına karşılık ortalama gerilme değerleri



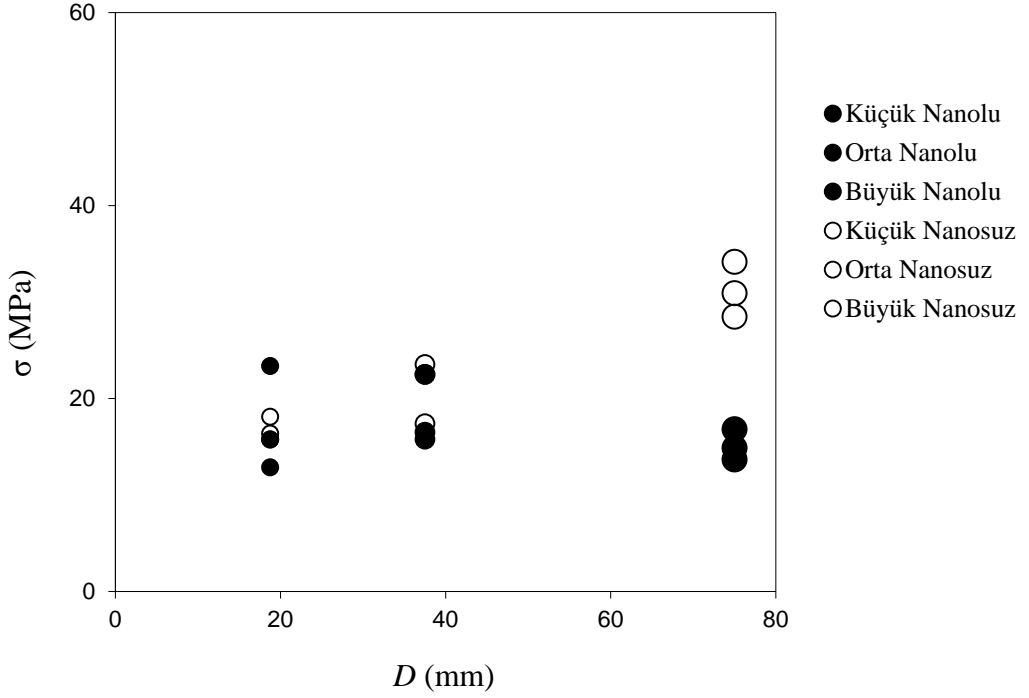
Şekil 6.36. 61 Günlük silindir çapına karşılık gerilme değerleri

61 Günlük Ortalamalar

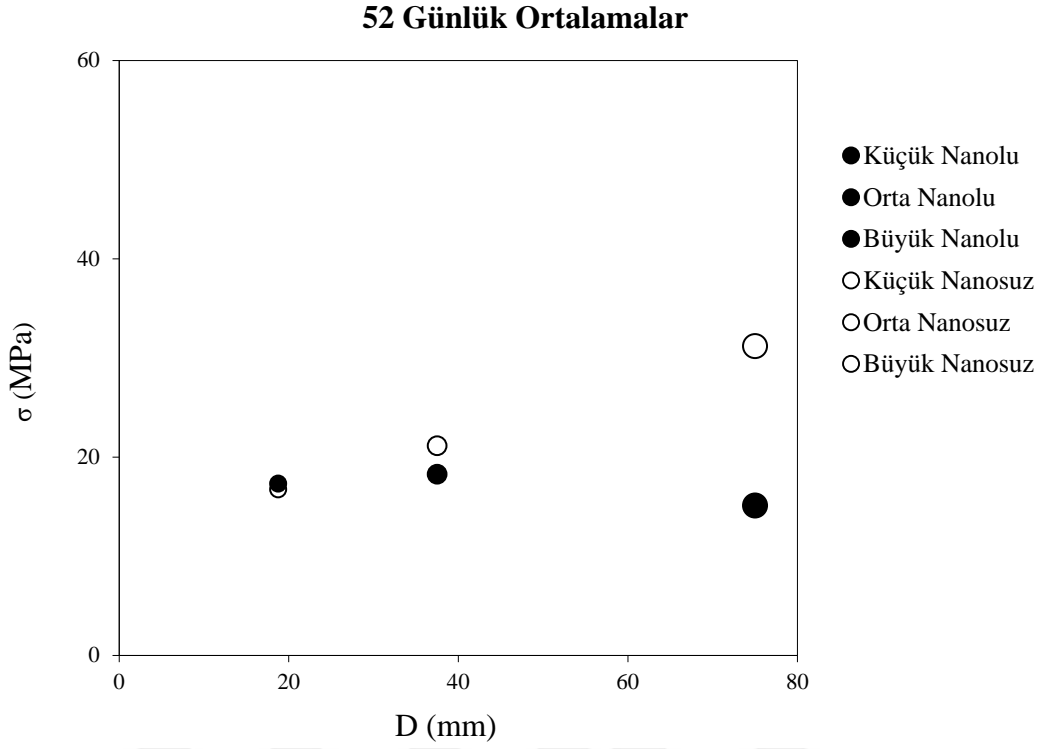


Şekil 6.37. 61 Günlük silindir çapına karşılık ortalama gerilme değerleri

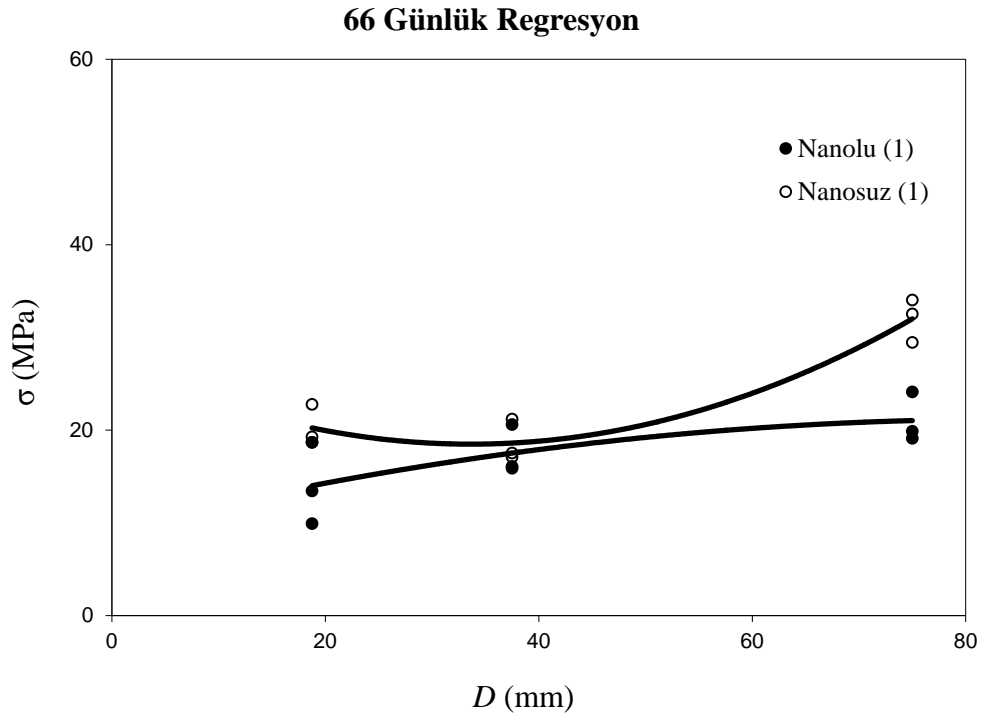
52 Günlük



Şekil 6.38. 52 Günlük silindir çapına karşılık gerilme değerleri

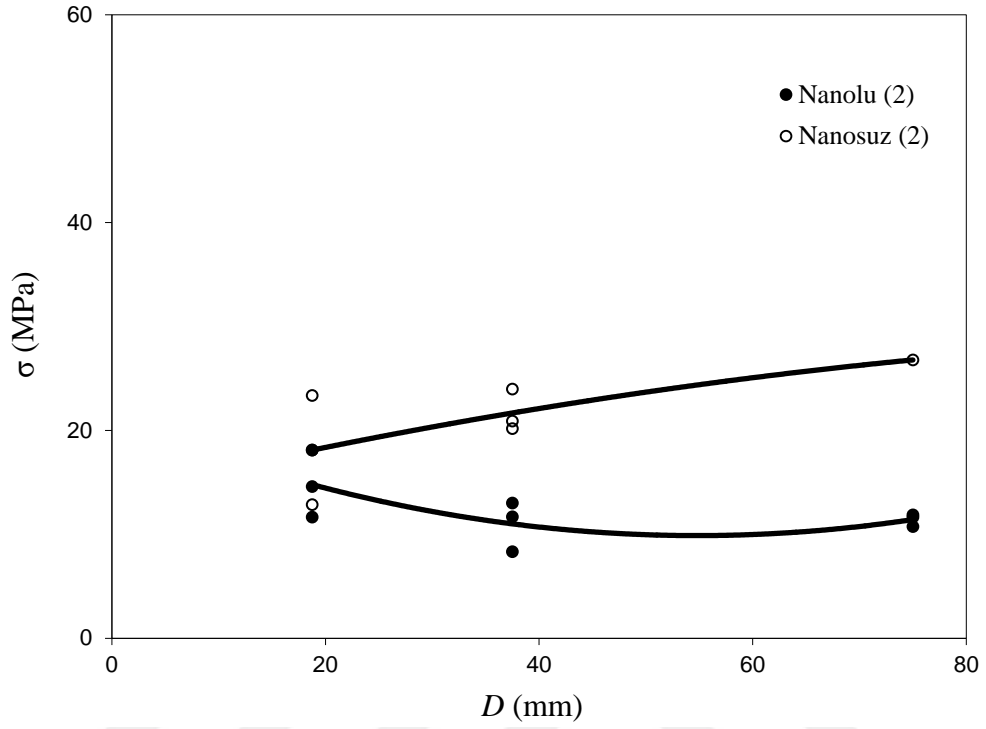


Şekil 6.39. 52 Günlük silindir çapına karşılık gerilme değerleri



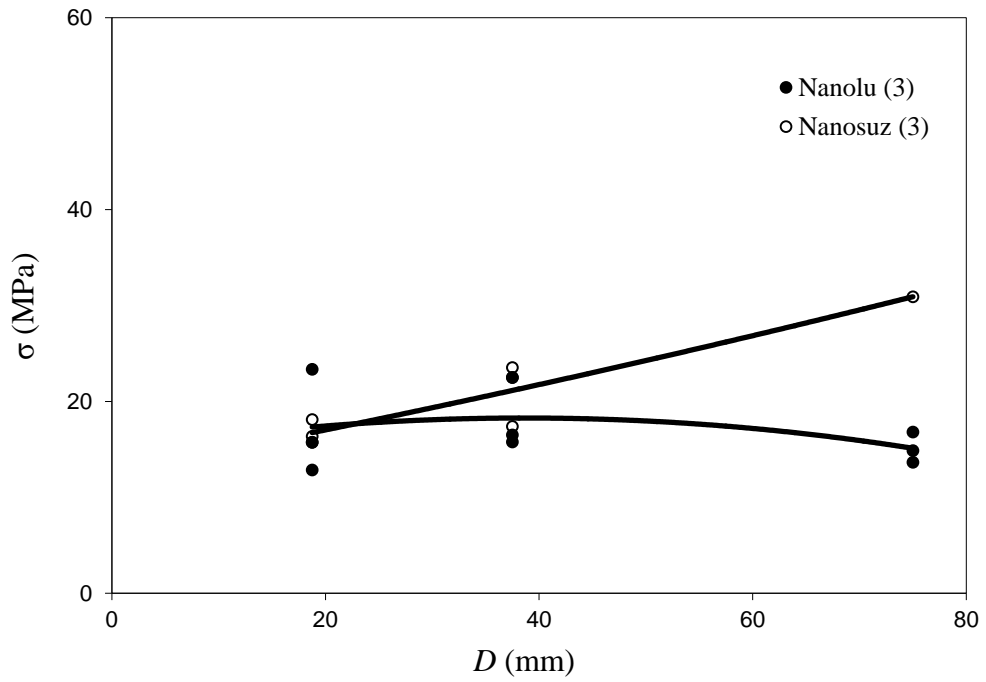
Şekil 6.40. 66 Günlük numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması

61 Günlük Regresyon

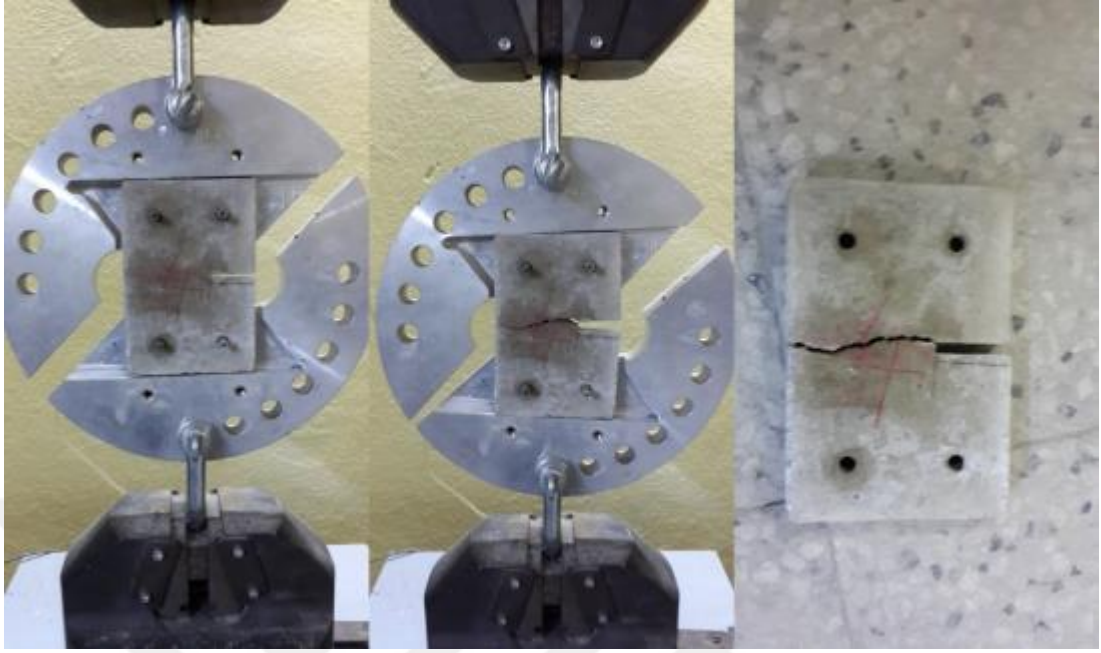


Şekil 6.41. 61 Günlük numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması

52 Günlük Regresyon



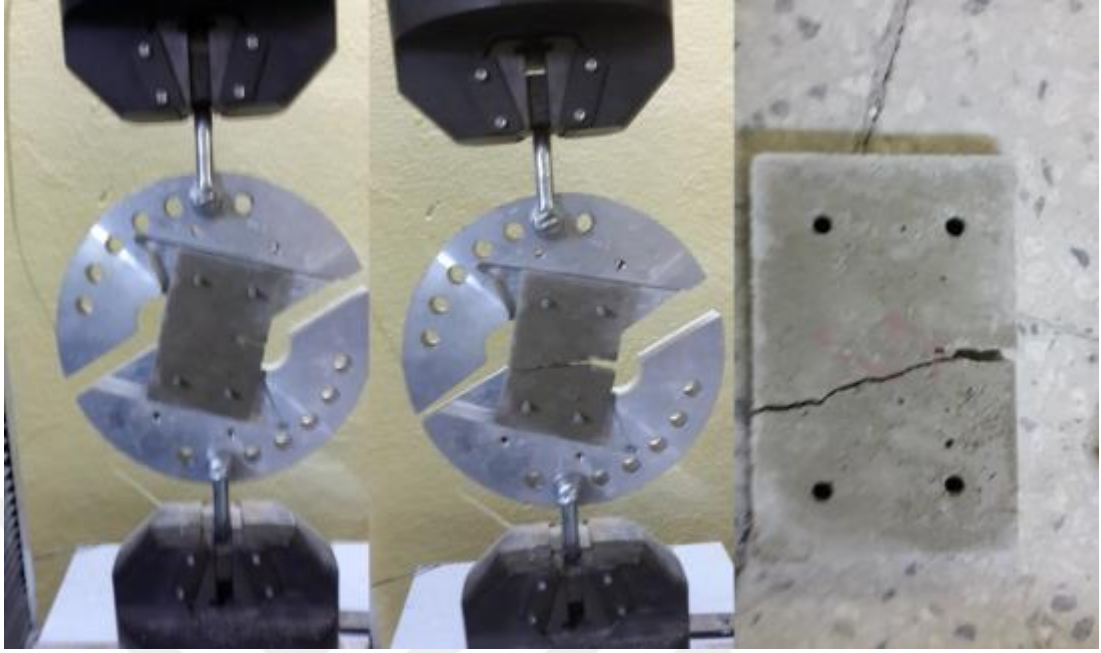
Şekil 6.42. 52 Günlük numunelerde regresyon grafiklerinin karşılaştırması



Resim 7.2. 0° olan 66 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı



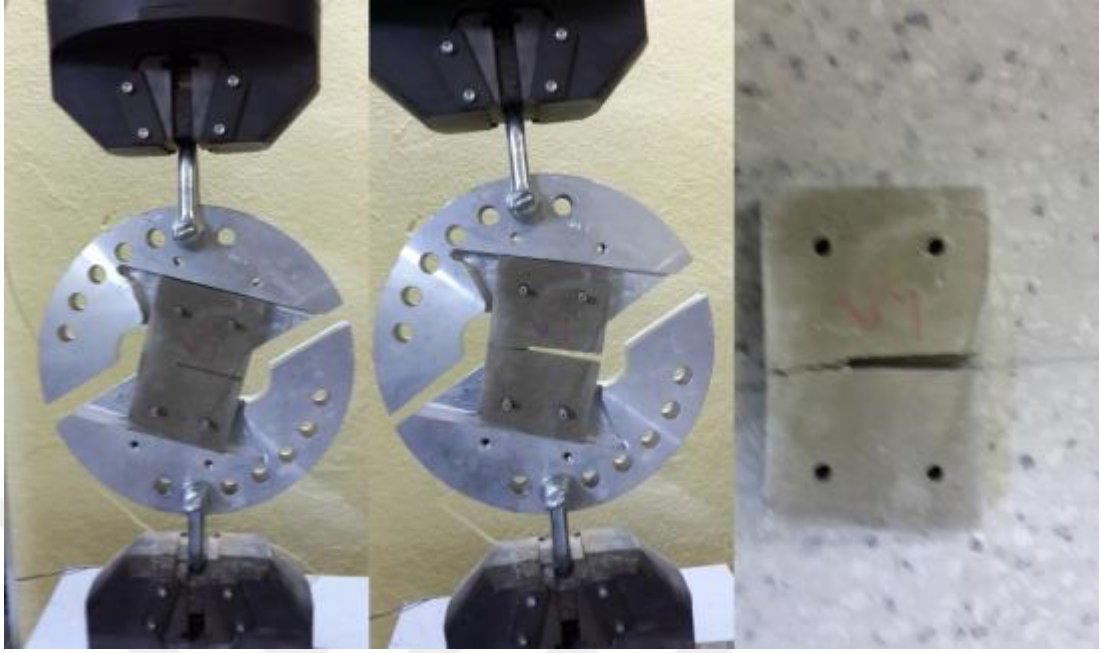
Resim 7.3. 0° olan 66 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı



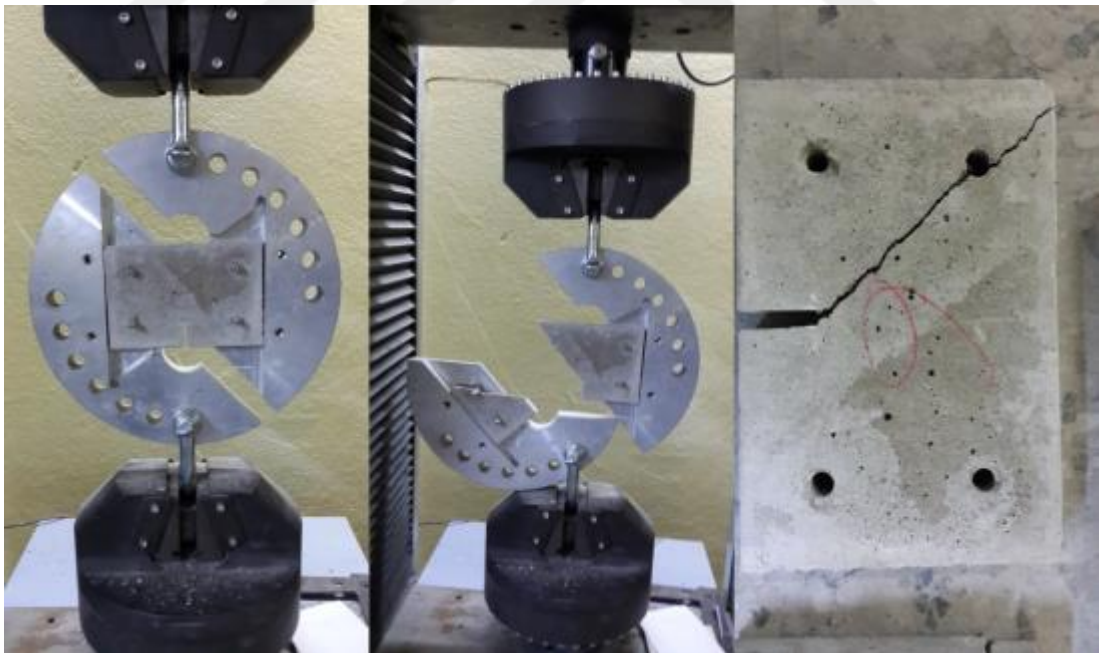
Resim 7.4. 15⁰ olan 61 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı



Resim 7.5. 15⁰ olan 61 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı

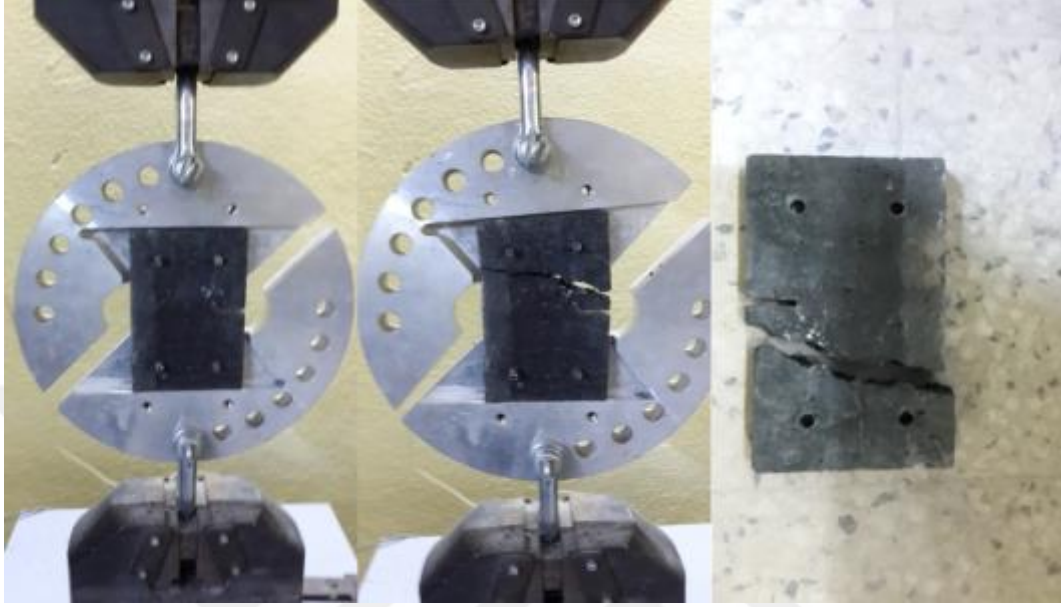


Resim 7.6. 15° olan 61 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı



Resim 7.7. 90° olan 52 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı

7.1.2. Nanolu prizmalarda çatlak dağılımları



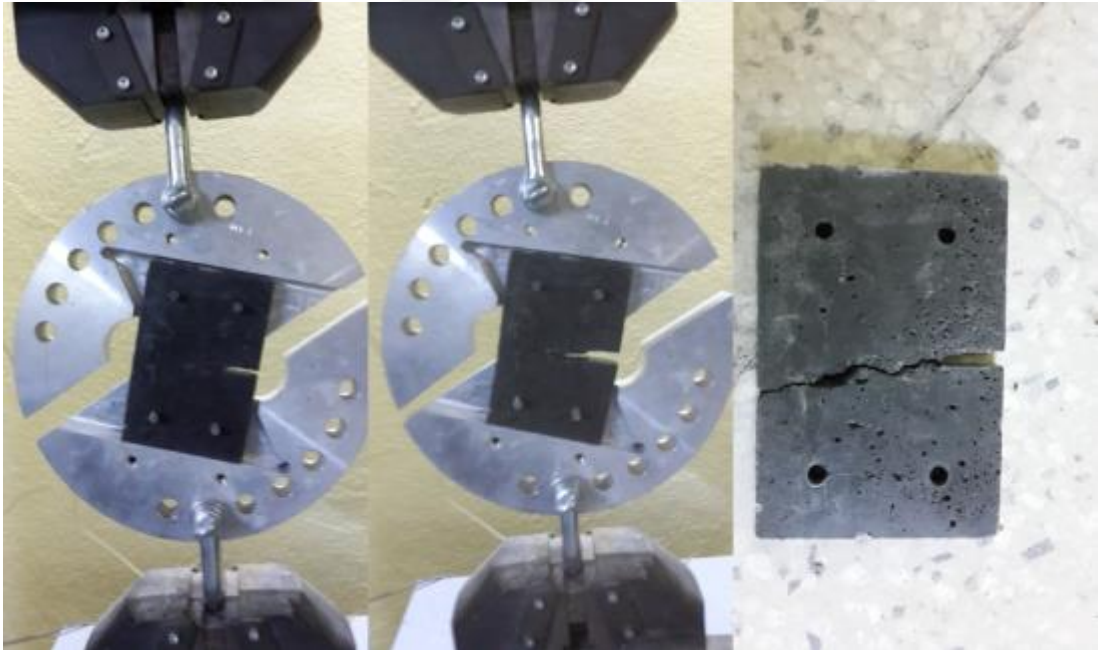
Resim 7.10. 0° olan 66 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı



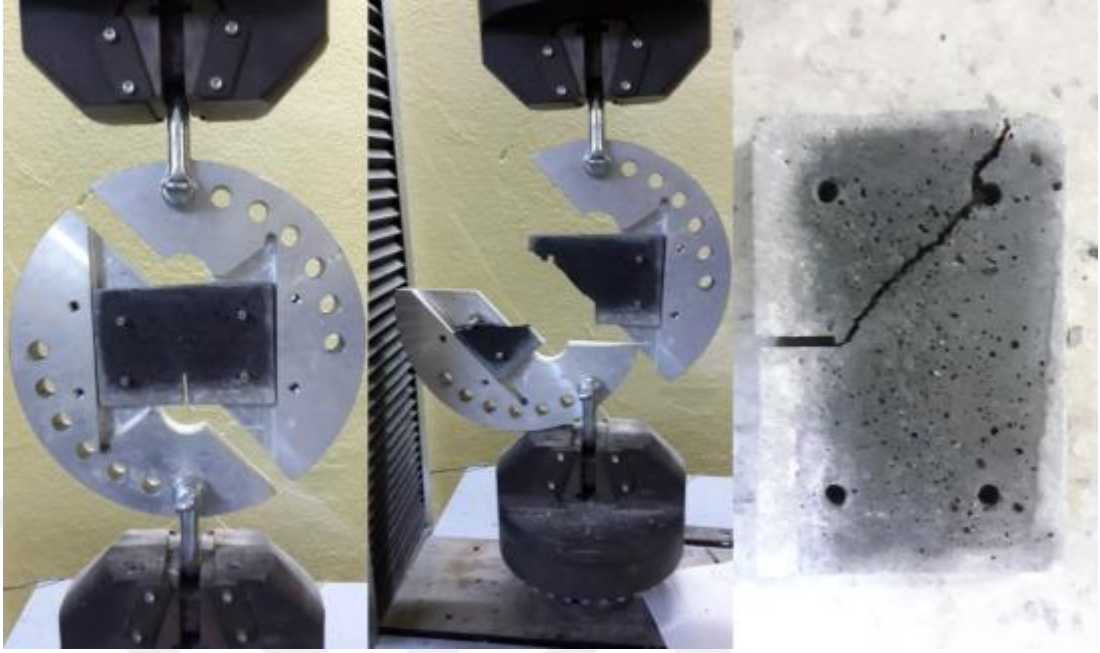
Resim 7.11. 0° olan 66 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı



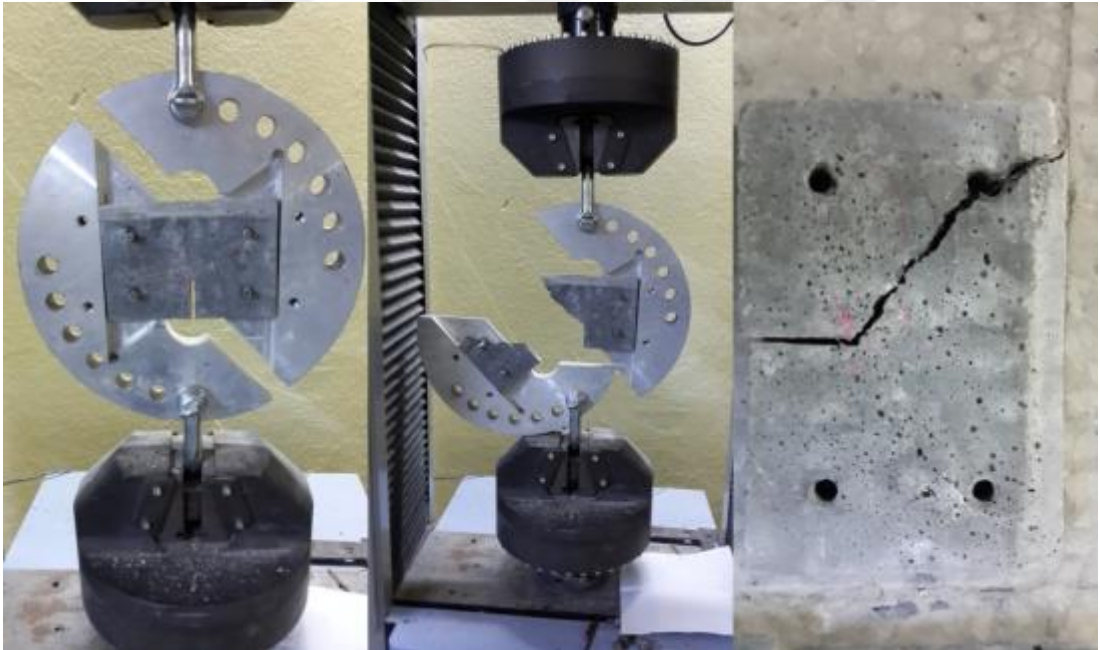
Resim 7.12. 0° olan 66 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı



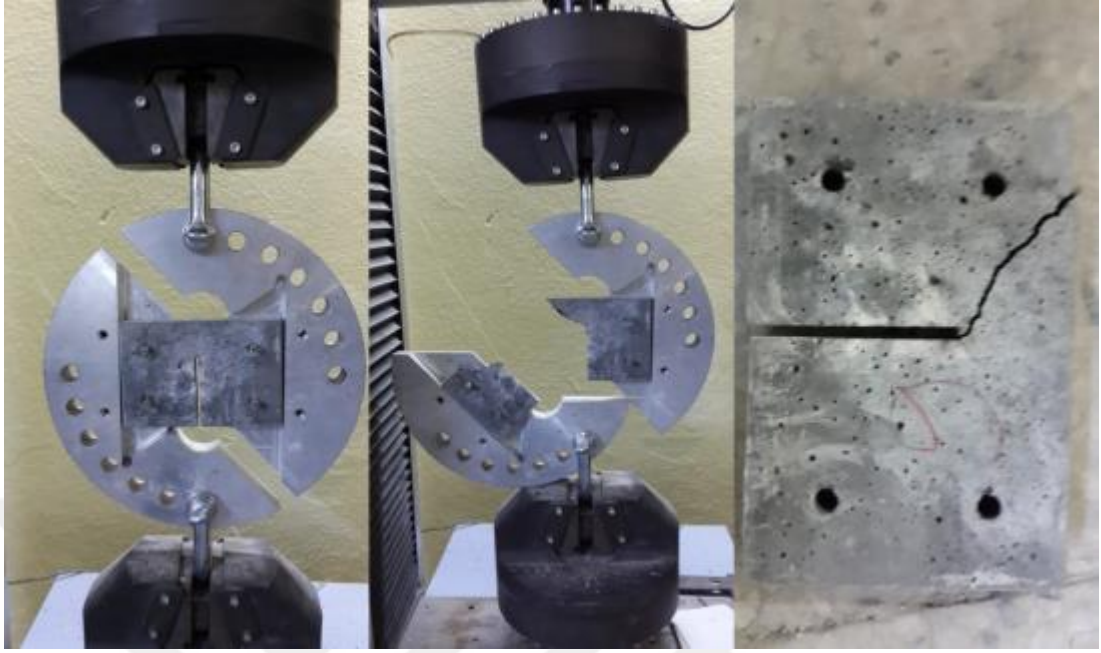
Resim 7.13. 15° olan 61 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı



Resim 7.16. 90^0 olan 52 Günlük %25 çentikli numunede kırılma hattı



Resim 7.17. 90^0 olan 52 Günlük %32 çentikli numunede kırılma hattı



Resim 7.18. 90⁰ olan 52 Günlük %64 çentikli numunede kırılma hattı

7.2. Basınç Silindirlerinde Kırılma Biçimleri

7.2.1. Nanosuz silindirlerinde göçme biçimleri



Resim 7.19. Nanosuz büyük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları



Resim 7.20. Nanosuz orta boy basınç silindirlerinde kırılma hatları

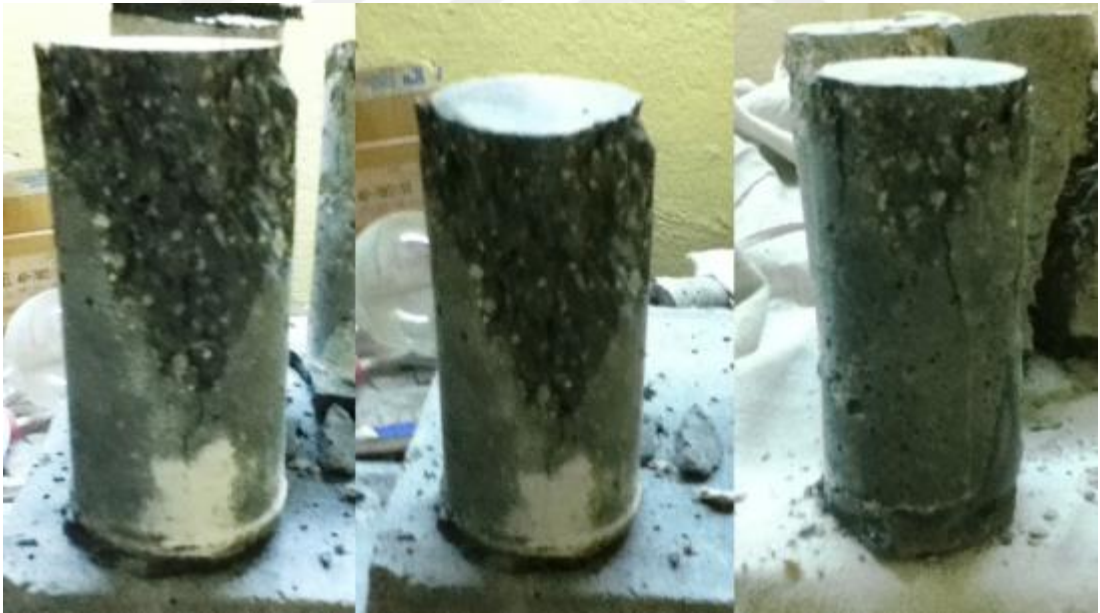


Resim 7.21. Nanosuz küçük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları

7.2.2. Nanolu silindirlerinde göçme biçimleri



Resim 7.22. Nanolu büyük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları



Resim 7.23. Nanolu orta boy basınç silindirlerinde kırılma hatları



Resim 7.24. Nanolu küçük boy basınç silindirlerinde kırılma hatları

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Karbon nano tüplerin betonun dayanımına etkisinin araştırılmasının amaçlandığı bu çalışmada, 36 adet Nanolu ve 36 adet Nanosuz olmak üzere 72 adet, değişik boylarda çentik açılmış dikdörtgen prizmalarla ve 27 adet Nanolu, 27 adet Nanosuz olmak üzere toplam 54 adet 3 farklı büyüklükte basınç silindiri numuneler test edilmiştir.

Deney numunelerinden çekme prizmaları Arcan deney düzeneğinde çekmeye tabi tutulmuştur.

İncelemelerde 72 adet nano karbon katkılı ve katkısız farklı çentik boylarındaki dikdörtgen prizmaların dayanımları karşılaştırılmış.

54 adet nano karbon katkılı ve katkısız farklı boyutlardaki silindir numunelerin dayanım değişiminin boyut etkisi teorileri açısından değerlendirilmesi araştırılmıştır.

Deney sonuçlarından elde edilen yorumlar ve buna bağlı olarak yapılan öneriler aşağıdaki gibidir:

- Nano malzeme katkılı karışım, Nanosuz karışıma göre çok su emdiğinden, Nanosuz numunelerde daha fazla karışım suyu gerekmektedir. Nanolu ve nanosuz karışımlarda aynı su çimento oranları kullanmak yerine nano malzemeyi ıslatacak kadar su miktarı çıkarıldıktan sonra kalan miktar için aynı oranın kullanılması denenebilir.
- Deney numunelerinden çekme prizmalarının Arcan deney düzeneğine takılması üzerlerinde bırakılan 4 adet delik vasıtasıyla yapıldığından milimetrik hata boyutlarında kalmaya dikkat edilmelidir. Milimetrik hata boyutlarında kalmak için ahşap kalıp yerine çelik kalıp kullanımı tercih edilebilir.
- Nano malzemeyi harç karışımına karıştırmadan önce ayrı olarak su ile ıslatmak sayesinde homojene daha yakın bir karışım elde edilmiştir. Ancak, karbon nano tüplerin çok daha homojen dağılmasını sağlamak için kullanılan sürfaktan malzemesi, beton dayanımının beklenenden düşük olmasına neden olmuştur. Bu nedenle karışımı daha homojen yapmak için sürfaktan yerine daha farklı malzemeler veya metotlar denenmelidir.

- Arcan deneyine yerleştirebilmek için numunelerin üzerlerinde açılan delikler daha küçük çentik boylarında istenilen kırılma hattının elde edilmesine engel olmuştur. Daha küçük çentik boyları için düzeneğe yerleştirme için kullanılan delikler yerine başka mesnetleme şekilleri denenmelidir.
- Çekme prizmaları için erken yaş dayanımları nano malzeme katkılı numunelerde daha fazla iken zaman geçtikçe nano malzeme katkısız numuneler de aynı dayanıma ulaşmakta ve hatta nanolu numune dayanımlarını aşmaktadırlar.
- Boyut etkisi açısından incelendiğinde çekme prizmalarında nano malzeme katkısız numunelerde nano malzeme katkılı numunelere kıyasla boyut etkisi daha fazla gözlemlenmektedir.
- Basınç silindirleri numunelerinde, nano malzeme katkılı numunelerde Nanosuz numunelere göre beton dayanımının arttığı görülmüştür. Deney sonucunda alınan grafik ve tablolarda bu görüşle örtüşmeyen bazı sonuçlar vardır ancak bunlar laboratuvar şartlarından ve deney düzeneğinin hazırlanmasından kaynaklanan hatalardan dolayıdır.
- Yük yer değiştirme grafiklerinde görülebileceği gibi hem çekme hem de basınç elemanlarında bazı numunelerde diğerlerine kıyasla çok yüksek veya çok düşük sonuçlar alınmıştır. Deneyde aynı ekipmanların kullanılması ve bu sıçramanın deney sistemine düzgün dağılması göz önünde bulundurularak, bunun sonuçları etkilemeyeceği varsayılmıştır.
- Tüm bunların dışında Karbon nano tüplerin kullanıldığı anda ve ileride ortaya çıkabilecek kanserojen etkileri derinlemesine araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. TS500, "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara (2000).
2. Bazant Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal", *J. Engng. Mech. ASCE*, 110: 518-535 (1984).
3. Bazant Z.P., and Cao Z., "Size Effect in Shear Failure of Prestressed Concrete Beams", *ACI Journal, Proceedings*, 83 (2): 260-268 (1986).
4. Bazant Z.P., and Kim J.K., "Size Effect in Shear Failure of Reinforced Concrete Beams", *ACI Journal, Proceedings*, 81 (5): 456-468 (1984), and Discussion, 82 (4): 579-583 (1985).
5. Bazant Z.P., and Kim J.K., Sener S., Discussion of paper 12, *ACI Journal*, 82 (4): 579-583 (1985).
6. Bazant Z.P., and Sun H.H., "Size Effect Shear Failure; Effect of aggregate Size and Strirrups." *ACI Materials Journal*, 84 (4): 259-272 (1987).
7. Bazant Z.P., Cao Z., "Size Effect in Brittle Failure of Unreinforced Pipes", *ACI Journal, Proceedings*, 83 (3): 369-373 (1986).
8. Bazant Z.P., and Şener S. "Size Effect in Torsional Failure of Concrete beams", *J. Stuct. Eng. Proc. ASCE*, 113: 2125-2136 (1987).
9. Bazant Z.P., Şener S.,and Prat P., "Size Effect Tests of Torsional Failure of Plain and Reinforced Concrete Beams", *Rilem and Materials and Structures*, 21: 425-430 (1988).
10. Bazant Z.P., and Şener S., "Size Effect in Pull-out Tests", *ACI Materials Journal*, 85 (5): 347-351 (1988).
11. Bazant Z.P., and Kazemi M.T., "Size Effect on Diogonal Shear Failure of Concrete Beams Without Strippus", *ACI Structural Journal*, 88 (3): 268-276 (1991).
12. Bazant Z.P.,Kazemi M.T., Hasegawa T., and Mazars J., "Size Effect in Brazilian Split-Cylinder Tests; Measurements and Fracture Analysis", *ACI Materials Journal*, 88 (3): 325-332 (1991).
13. Bazant Z.P.,and Scheil W.F., "Fatigue Fracture og High-Strength Concrete and Size Effect", *ACI Materials Journal*, 90(5): 472-478 (1992).
14. Belgin, Ç., Şener, S., "Size Effect on Failure of Overreinforced Concrete Beams" *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 2308-2319 (2008).

15. Nilson A.H., Winter G., "Design of Concrete Structures", *Edn. McGraw-Hill*, New York, (1986).
16. Özbora, A.A., Tarhan, M., Engin, Y., "Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü", *Türkiye Hazır Beton*, 304-312.
17. Pekmezci, B.Y., Atahan H.N., "Kimyasal ve Nano Katkılar: Betonda Kullanımı ve Beton Performansına Etkileri", *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, 239-263.
18. Metaxa, Z.S., Konsta-Gdoutos, M.S., Shah S.P., "Carbon Nanofiber Cementitious Composites: Effect of Debulking Procedure on Dispersion and Reinforcing Efficiency", *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, (2012).
19. Manzur, T., Yazdani, N., "Importance of Flow Values In Quality Evaluation of Surface Treated Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Cementitious Mix", *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, (2012)
20. Stynoski, P., Mondal, P., Marsh, C., "Novel Processes to Improve CNT Utility in Cement", *4th International Symposium on Nanotechnology in Construction*, (2012).
21. Makar, J.M., Chan, G.W., "Growth of cement hydration products on single walled carbon nanotubes", *J. Am. Ceram. Soc.*, No.92: 1303–1310, (2009).
22. Konsta-Gdoutos, M.S., Metaxa, Z.S., Shah S.P., "Multi-scale Mechanical and Fracture Characteristics and Early-Age Strain Capacity of high Performance Carbon Nanotube/Cement Nanocomposites," *Cement&Concrete Composites*, 32, 110-115,, (2010).
23. Marti P., "Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders", *ACI Materials Journal*, 86: 597-601 (1989).
24. Hawkins, N.M., "The Role for Fracture Mechanics in Coventional Reinforced Concrete Design", *NATO workshop of Fract. Mech., Sept. Northwestern Univ., Evanston*, III. (1989).
25. Şener, S., "Betonarme Donatıların Aderans Ekinde Boyut Etkisi", *İMO XI Teknik Kongre*, İstanbul, 117-128 (1991).
26. Şener, S., "Size Effect in Bond Splices Tests", *FIP'92 Symposium. Budapesht, Hungary*, 357-362 (1992).
27. Şener S., "Sargılı Donatıların Aderans Ekinde Boyut Etkisi", *İMO XII.Teknik Kongresi, Ankara*, 481-494 (1993).

28. Şener, S., Timur, İ., “Size Effect in Bond Splices Tests Under the Indirect Loading”, *Advances in Civil Engineering First Technical Congress, Gazimagusa, North Cyprus*, 728-735 (1993).
29. Şener, S., “Concrete Structures Design based on Fracture Mechanics”, *The Third Inter Kerensky Conference on Global Trends in Structural Engineering, Singapore*, 563-567 (1994).
30. Şener, S., Aydın, İ., “Beton Kirişlerin Tasarımında Kırılma Mekaniğinin Kullanılması”, *IX Ulusal Mekanik Kongresi Ürgüp*, 878-879 (1995).
31. Şener, S., “Yüksek Dayanımlı Betonda Kırılma Mekaniği” *İTÜ Prof. Turgan Sabis Sempozyumu*, İstanbul, 209-219 (1995).
32. Şener, S., Belgin, Ç., Akyıldız, A., Okkalı, S., “Size Effect in Axially Loaded Reinforced Concrete Columns,” *Concrete Technology for Developing Countries Fourth International Conference, Eastern Mediterranean University*, North Cyprus, 640-646 (1996).
33. Şener, S., Belgin, Ç., “Narin Beton Kolonlarda Boyut Etkisi Deneyleri”, *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler*, 147-155 (1997).
34. Şener, S., Belgin, Ç., Öztürk A., “Betonarme Kolonlarda Yapım Kusurlarının Deneysel Bulunması”, *10. Ulusal Mekanik Kongresi*, 85-86 (1997).
35. Hadi, A., Şener, S., Barr, B., “Size Effect Tests for Plain and Reinforced Concrete Columns”, *Report, University of Wales, Cardiff*, (1996).
36. Kaplan, M.F., “Crack Propagation and the Fracture of Concrete”, *A.C.I. J.*, 58:11 (1961).
37. Yetim, A., “Karbon Nano Tüpler”, *Yüksek lisans, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2-8,10-12 (2011)
38. Erik, M., “BN Nano Tüplerin Kimyasal Buhar Depolama Yöntemi ile Sentezlenmesi”, *Yüksek Lisans, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 3-28 (2010)
39. Karakaş, F., “Normal Beton Büyük Boy Karot Numuneleri Serilerinde Boyut Etkisinin Araştırılması”, *Yüksek Lisans, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, 35-55 (2012)
40. Koç, M.B., “Nano Tüpler”, *Bitirme tezi, Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği*, Ankara, 1,4,10-14,17(2003)

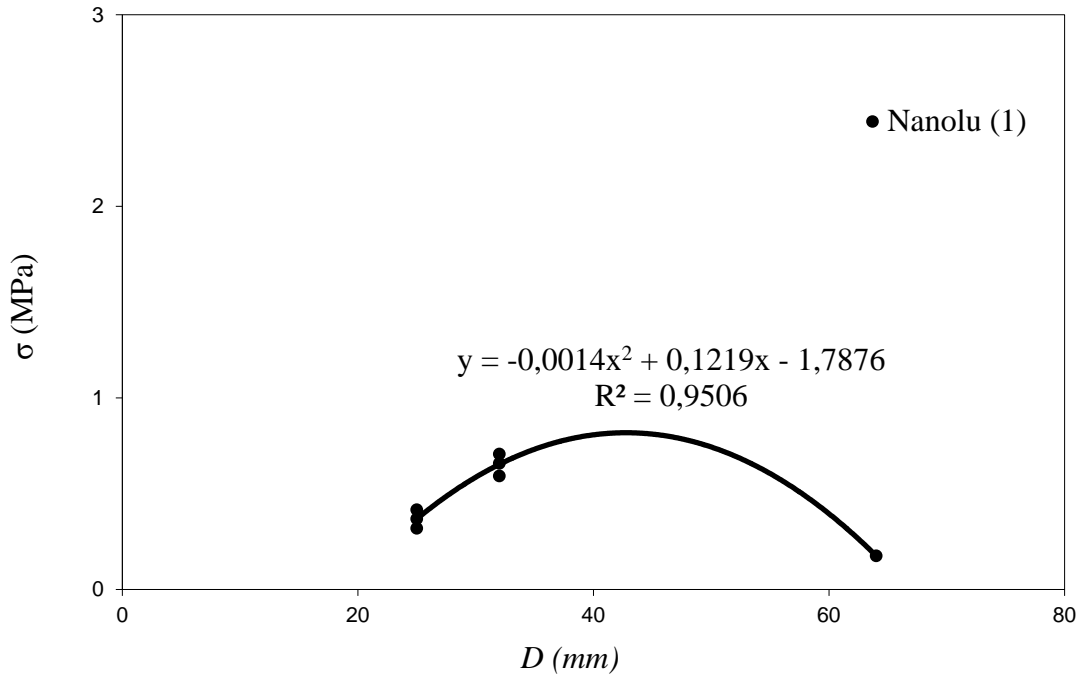
41. Pekmezci, B.Y., Atahan H.N., “Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri”, *Doktora, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi*, İstanbul, 245-261 (2012)
42. Yazıcı, H., “Yapı Malzemeleri “, *Beton Katkıları*, İzmir, 32-34 (2004)
43. Liu, J.Y., Ross, R.J., Rammer, D.R., “Improved Arcan Shear Test for Wood”, *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, 85-90, (1996).



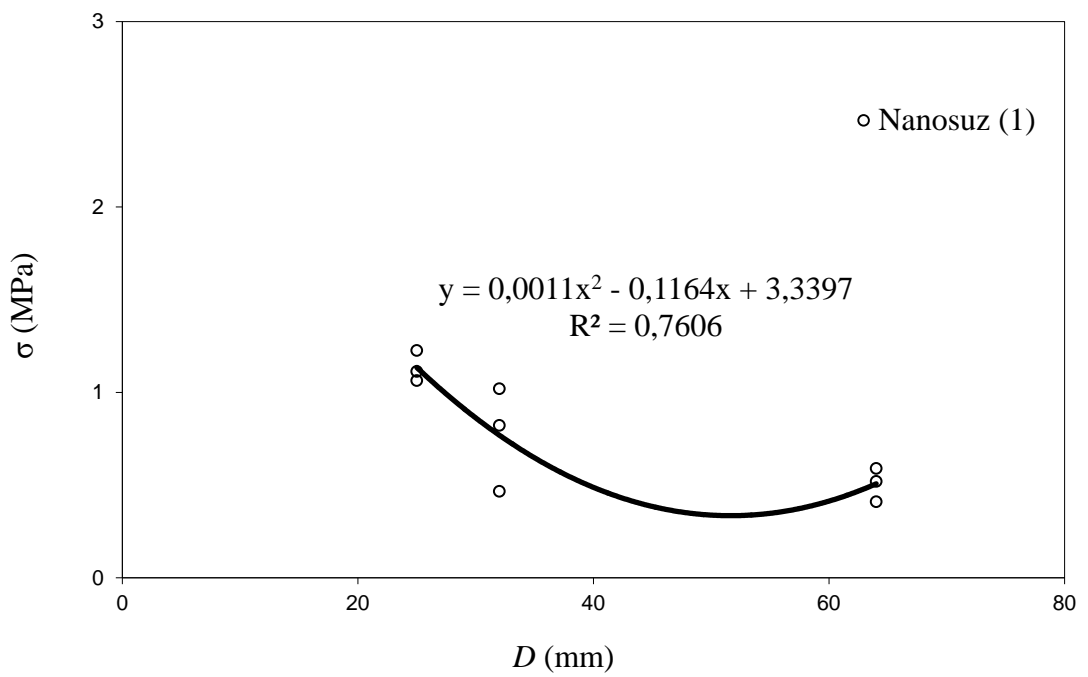


EKLER

Ek-1. Çekme Prizmalarında Boyut Etkisi

66 Günlük Regresyon

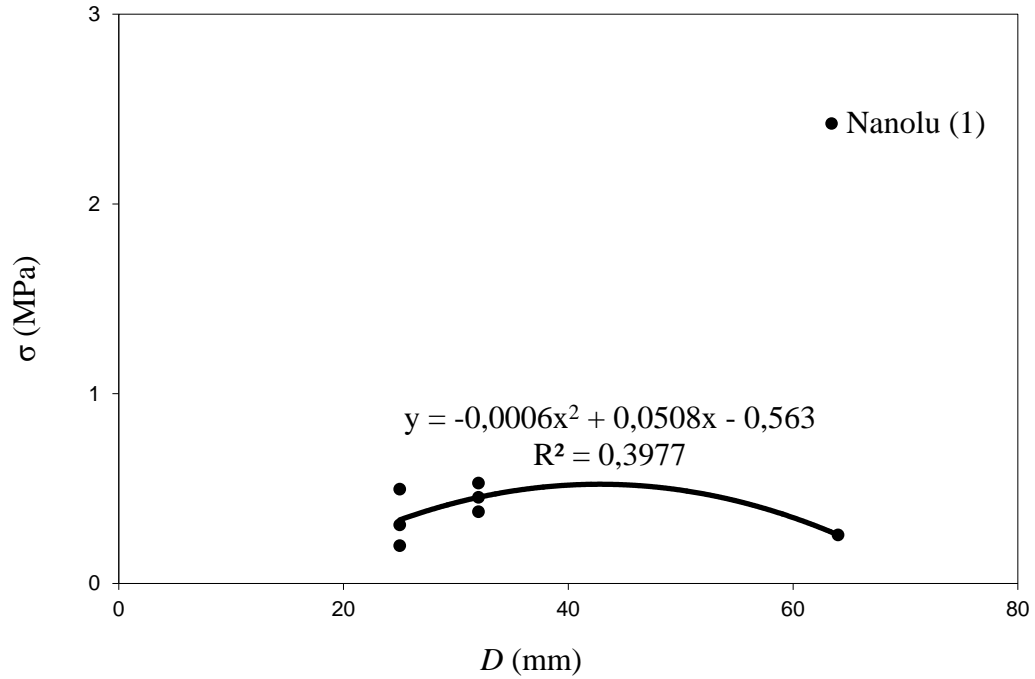
Şekil 1.1. 66 Günlük, Nanolu Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

66 Günlük Regresyon

Şekil 1.2. 66 Günlük, Nanosuz Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

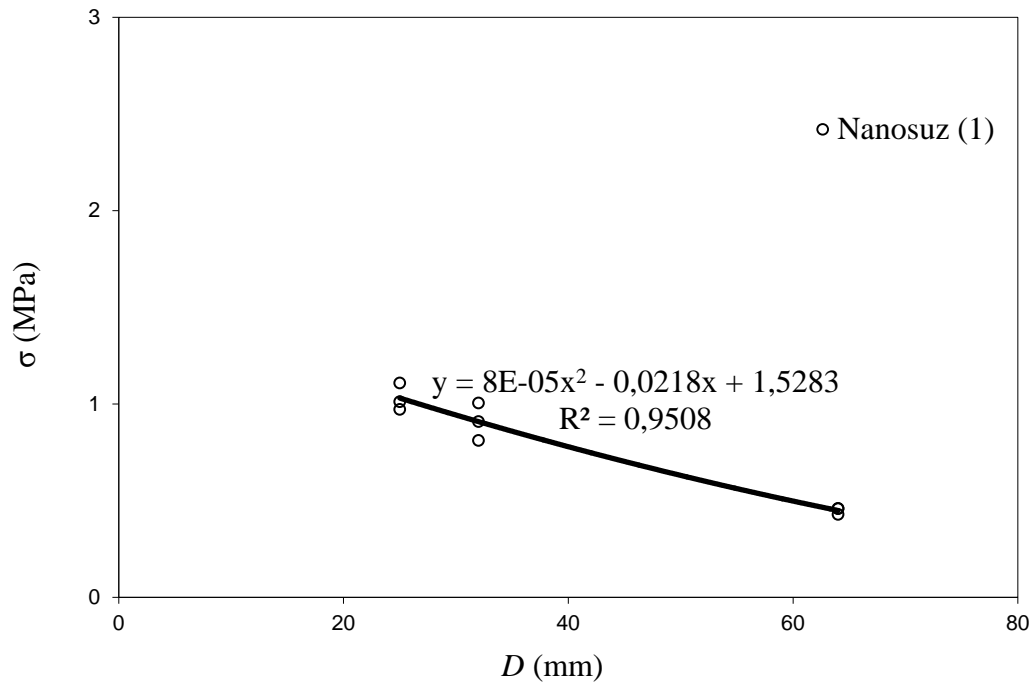
Ek-1. (Devamı) Çekme Prizmalarında Boyut Etkisi

61 Günlük Regresyon



Şekil 1.3. 61 Günlük Nanolu Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

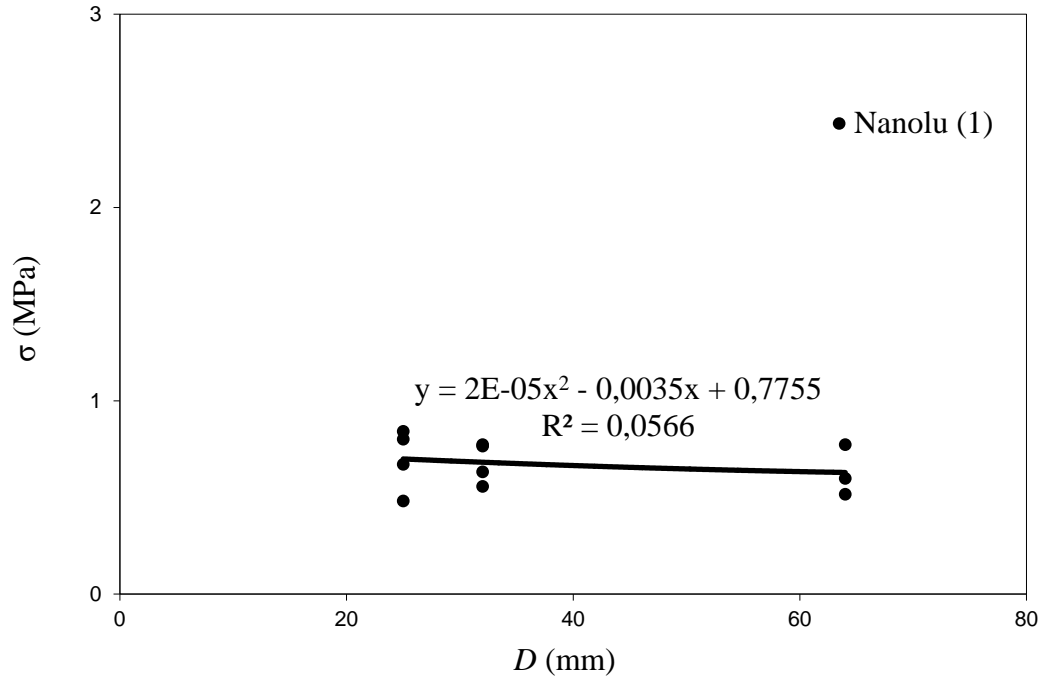
61 Günlük Regresyon



Şekil 1.4. 61 Günlük Nanosuz Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

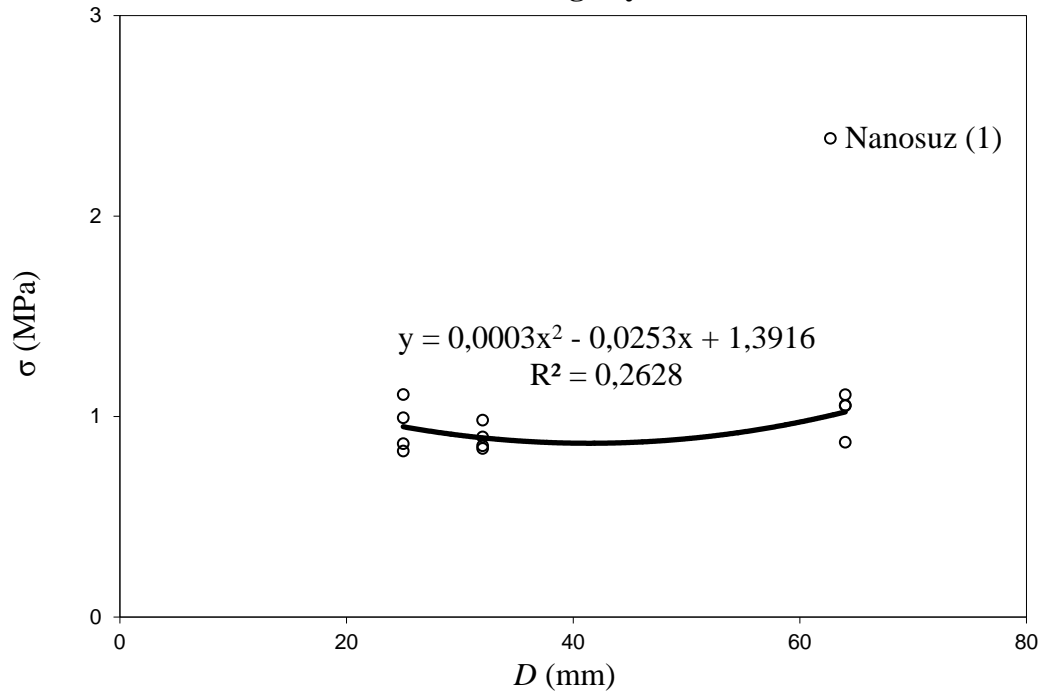
Ek-1. (Devamı) Çekme Prizmalarında Boyut Etkisi

52 Günlük Regresyon



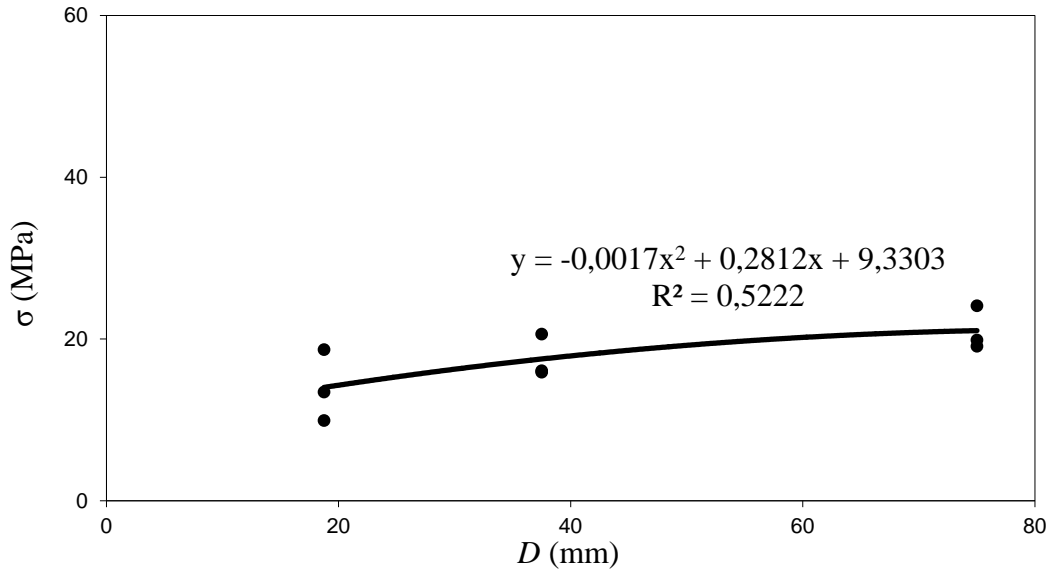
Şekil 1.5. 52 Günlük Nanolu Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

52 Günlük Regresyon

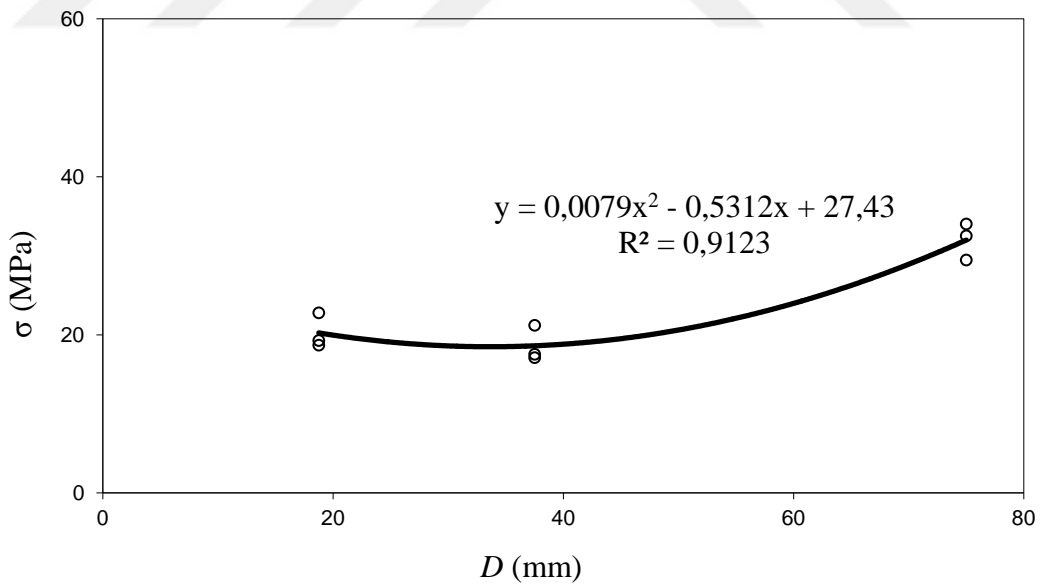


Şekil 1.6. 52 Günlük Nanosuz Prizmalarda Regresyon Grafik ve Denklemleri

Ek-2. Basınç Silindirlerinde Boyut Etkisi

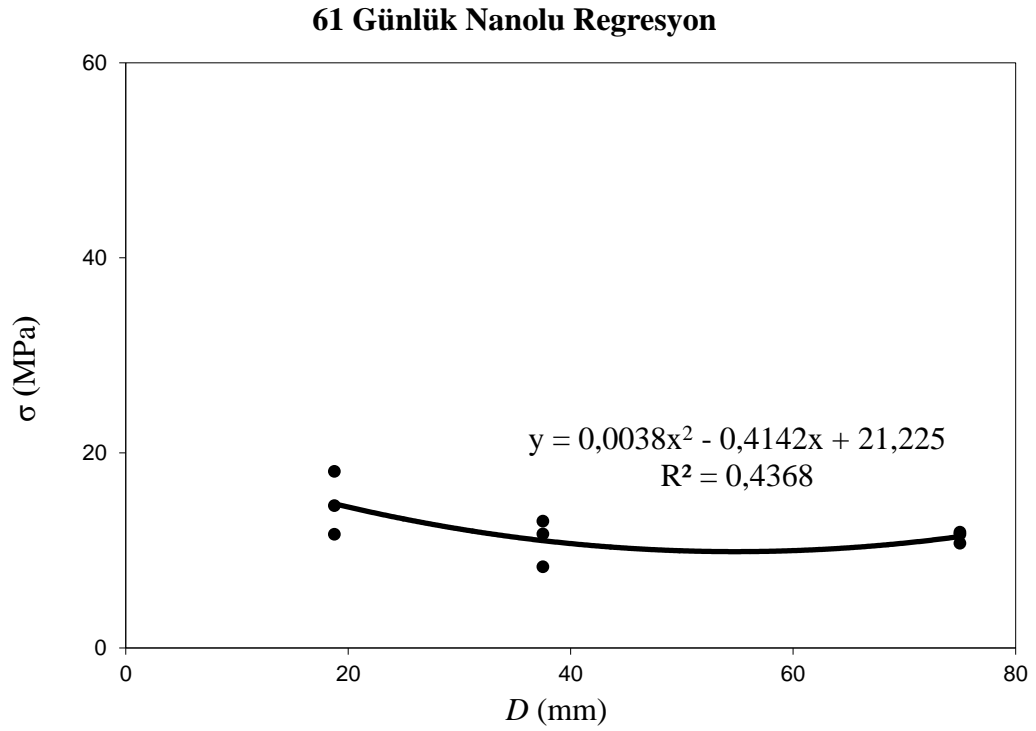
66 Günlük Nanolu Regresyon

Şekil 1.1. 66 Günlük, Nanolu Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

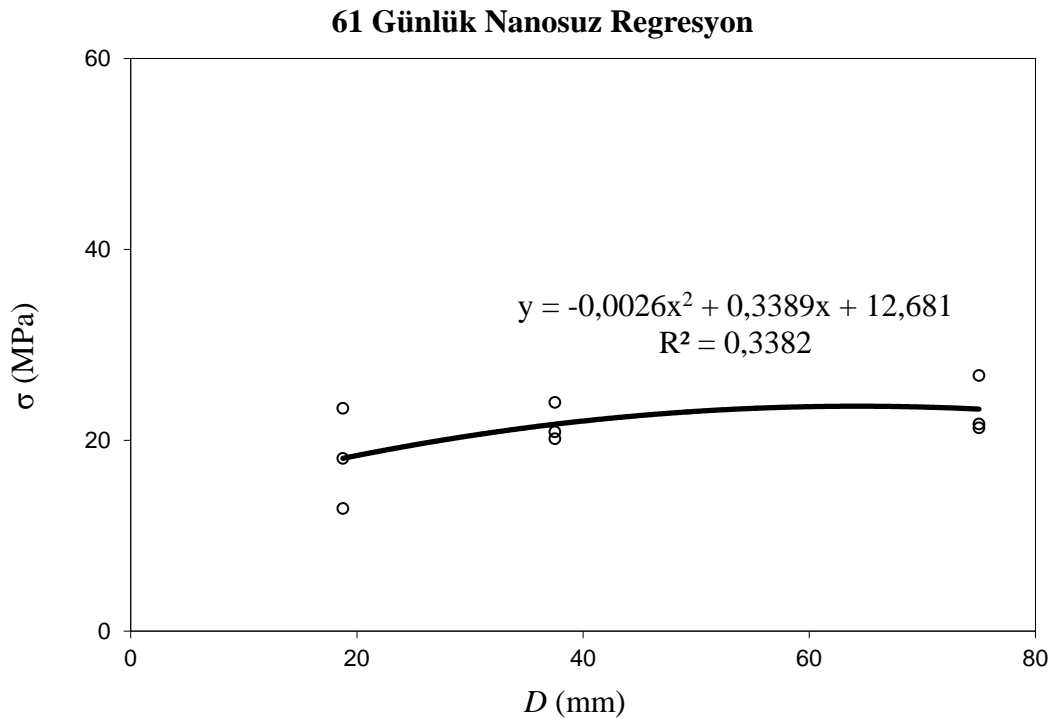
66 Günlük Nanosuz Regresyon

Şekil 1.2. 66 Günlük, Nanosuz Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

Ek-2. (Devamı) Basınç Silindirlerinde Boyut Etkisi

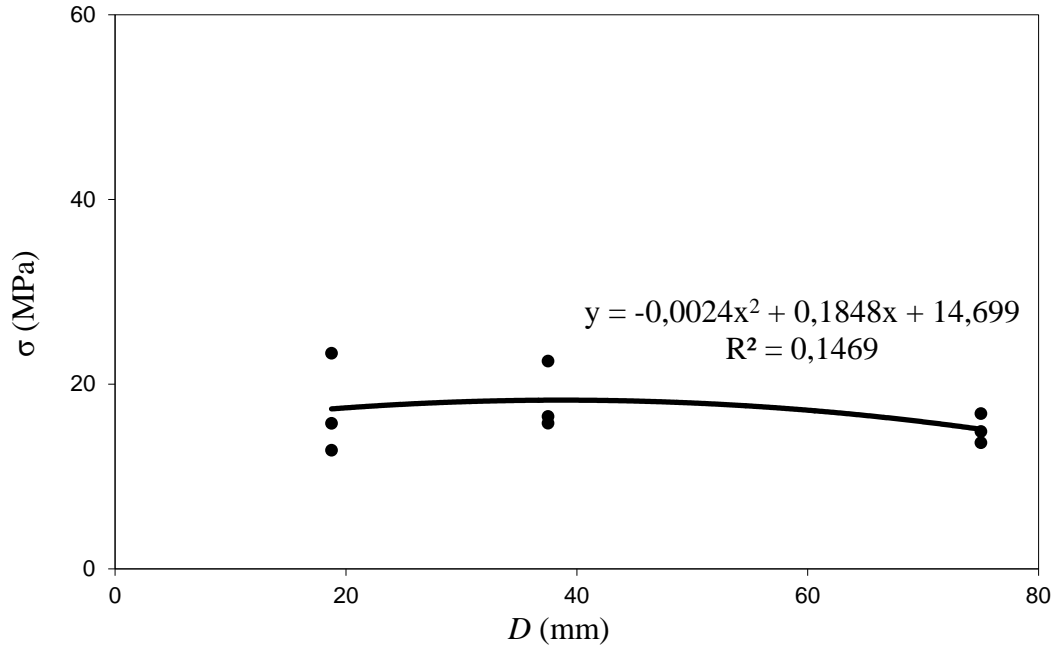


Şekil 1.3. 61 Günlük, Nanolu Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

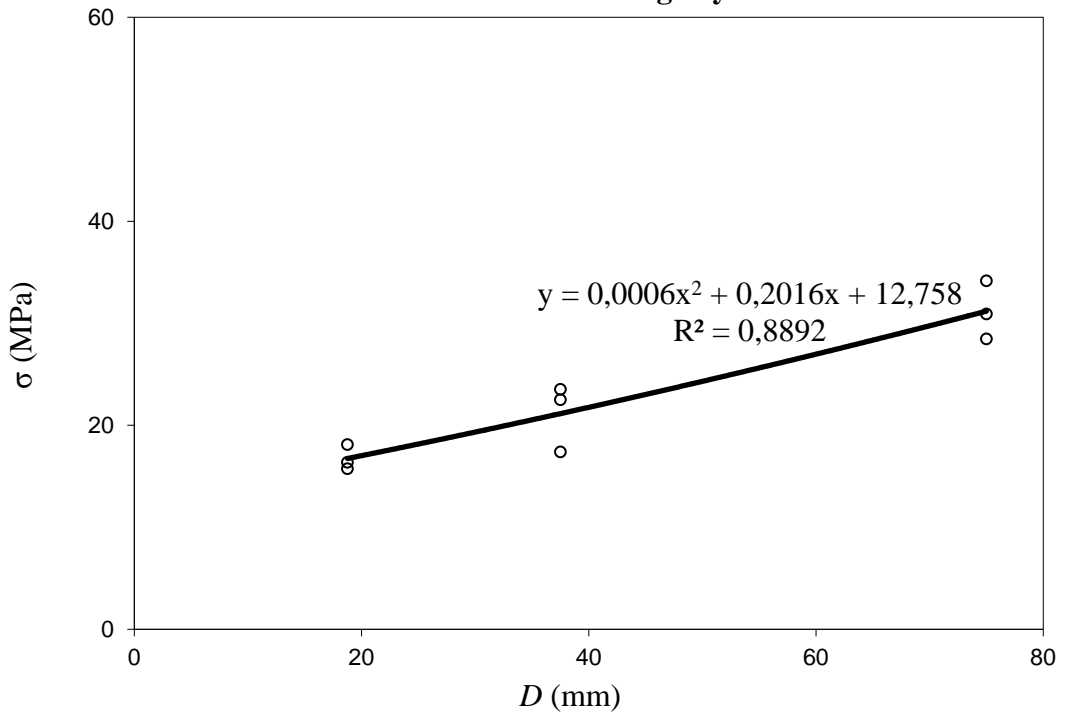


Şekil 1.4. 61 Günlük, Nanosuz Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

Ek-2. (Devamı) Basınç Silindirlerinde Boyut Etkisi

52 Günlük Nanolu Regresyon

Şekil 1.5. 52 Günlük, Nanolu Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

52 Günlük Nanosuz Regresyon

Şekil 1.6. 52 Günlük, Nanosuz Silindirlerde Regresyon Grafik ve Denklemi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BODUROĞLU, Veysel Baran
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 16.09.1988, SİVEREK
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (533) 667 34 63
Elektronik posta : vboduroglu@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2011
Orta Öğretim	Çağrıbey Anadolu Lisesi	2006
İlk Öğretim	Kavaklıdere İlköğretim Okulu	2002

Yabancı Dil

İngilizce