

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM RİSKLİ YAPILAR VE KENTSEL DÖNÜŞÜM BİLİM DALI

**POLİPROPİLEN KATKILI, KATKISIZ LİFLİ
BETONARMENİN BURULMA GÖÇMESİNDE
BOYUT ETKİSİ**
Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
Onur DALGIÇ

İstanbul, 2025

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
DEPREM RİSKLİ YAPILAR VE KENTSEL DÖNÜŞÜM BİLİM DALI

**POLİPROPİLEN KATKILI, KATKISIZ LİFLİ
BETONARMENİN BURULMA GÖÇMESİNDE
BOYUT ETKİSİ**
Yüksek Lisans Tezi

Tezi Hazırlayan
Onur DALGIÇ

Öğrenci No
2220005013

ORCID No
0009-0005-2088-7723

Danışman
Prof. Dr. Sıddık ŞENER

İstanbul, 2025

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Polipropilen Katkılı, Katkısız Lifli Betonarmenin Burulma Göçmesinde Boyut Etkisi** ” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere uygun şekilde tarafım dan yazıldığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, yararlandığım eserlerin tamamının kaynaklarda gösterildiğini ve çalışmamın içinde kullanıldıkları her yerde bunlara atıf yapıldığını, patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını belirtir ve bunu onurumla doğrularım. 13.06.2025

Onur DALGIÇ

T.C.
İSTANBUL BEYKENT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
TEZLİ YÜKSEK LİSANS SINAV TUTANAĞI

13/06/2025

Enstitümüz *İnşaat Mühendisliği* Anabilim Dalı *Deprem Riskli Yapılar ve Kentsel Dönüşüm* Programı yüksek lisans öğrencilerinden 2220005013 numaralı **Onur DALGIÇ**'ın "İstanbul Beykent Üniversitesi Eğitim-Öğretim Yönetmeliği"nin ilgili maddesine göre hazırlayarak Enstitümüze teslim ettiği "**Polipropilen Katkılı, Katkısız Lifli Betonarmenin Burulma Göçmesinde Boyut Etkisi**" konulu tezini, Yönetim Kurulumuzun 20/05/2025 tarih ve 2025/22 sayılı toplantısında seçilen ve Taksim yerleşkesinde toplanan biz jüri üyeleri huzurunda, İstanbul Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 29. maddesinin 3. fıkrası gereğince aday tarafından savunulmuş ve sonuçta adayın tezi hakkında "**OYBİRLİĞİ**" ile "**KABUL**" kararı verilmiştir.

İşbu tutanak, 2 nüsha olarak hazırlanmış ve Enstitü Müdürlüğü'ne sunulmak üzere tarafımızdan düzenlenmiştir.

DANIŞMAN
Prof. Dr. Sı*** ŞE***
(İstanbul Beykent Üniversitesi)

ÜYE
Prof. Dr. Mu*** Hu*** ÖZ***
(İstanbul Beykent Üniversitesi)

ÜYE
Prof. Dr. Ab*** Ne*** GÜ***
(İstanbul Gelişim Üniversitesi)

Adı Soyadı : Onur DALGIÇ
Danışmanı : Prof. Dr. Sıddık ŞENER
Derecesi ve Tarihi : Yüksek Lisans (Tezli), 2025
Alanı : İnşaat Mühendisliği
Anahtar Kelimeler : Boyut Etkisi, Polipropilen, Betonarme

ÖZ

POLİPROPİLEN KATKILI, KATKISIZ LİFLİ BETONARMENİN BURULMA GÖÇMESİNDE BOYUT ETKİSİ

Bu çalışmada, lif katkılı ve katkısız betonarme kirişlerin burulma kırılmasında, farklı boyutlardaki beton numunelerde boyut etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Burulma kırılmasında boyut etkisinin analiz edilmesi için 25x25x125mm, 50x50x250 mm ve 100x100x500mm boyutlarındaki (1x4 oranında) numuneler kullanılmıştır. Yalın ve polipropilen donatılı kirişlerde burulma kırılmasını incelemek için, yük belirli noktalara uygulanmalıdır. Yükü çelik mesnetlerin yerleştirildiği bu belirli noktalara aktarmak için 600 mm uzunluğunda bir NPI 100x50x4.5 standart I kiriş kullanılmıştır. Bu belirli yerler, farklı boyutlu beton kirişlerin burulma kırılmasının bütün kirişlerde aynı olması için belirlenmiş olup, bu çelik mesnetler beton kirişin köşelerine, beton kirişlerin üstüne ve altına yerleştirilmiştir. Bu çelik mesnetlerin boyutları 10x10x5 mm, 20x20x10 mm ve 40x40x20 mm'dir.

Name and Surname : Onur DALGIÇ
Supervisor : Prof. Dr. Sıddık ŞENER
Degree and Date : Master's (Thesis), 2025
Alanı : Civil Engineering
Keywords : Size effect, polypropylene, reinforced concrete

ABSTRACT

THE EFFECT OF SIZE ON THE TORSIONAL DEFORMATION OF POLYPROPYLENE-REINFORCED AND UNREINFORCED FIBER-REINFORCED CONCRETE

This study investigates the size effect which is supposed to be observed in the strength of concrete specimens with different sizes, in torsional failure of plain and reinforced concrete beams. Specimens with dimensions of 25x25x125mm, 50x50x250 mm and 100x100x500mm were used to analyze the size effect in torsional failure. In order to investigate torsional failure in plain and polypropylene reinforced beams, the load should be applied at specific points. A standard of NPI 100x50x4.5 I beam with the length of 600 mm was used to transfer the load to these specific points where steel supports are placed. These specific locations were determined for having a real values of the torsional failure of concrete beams, these steel supports were placed at the corners of the concrete beam on top and under of the concrete beams. The dimensions of these steel structures are 10x10x5 mm, 20x20x10 mm and 40x40x20 mm.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No.

ÖZ

ABSTRACT

TABLolar LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ.....	v
SİMGELER	vi
SÖZLÜK	vii
GİRİŞ	1

1. MALZEME TANIMI VE ARAŞTIRMANIN GELİŞİMİ

1.1. Çalışmanın Önemi.....	2
1.2. Burulma Göçmesinin Araştırma Amaçları	3
1.3. Boyut Etkisinin Genel Tanımı.....	5
1.3.1. Boyut Etkisinin Temelleri	5
1.3.2. Betonda Boyut Etkisinin Nedenleri.....	6
1.4. Betonun Polipropilen Lif İle Güçlendirilmesi	7
1.4.1. Polipropilen Liflerin Özellikleri ve Çeşitleri.....	7
1.4.2. Lif Takviyeli Betonun Mekanik Davranışı.....	8
1.4.3. Dayanıklılık ve Uzun Vadeli Performans Üzerindeki Etkisi	8
1.5. Beton Elemanların Burulma Davranışı	9
1.5.1. Burulma Mekanizmasının Temelleri	9
1.5.2. Yalın Betonda Burulma Hasarı Mekanizmaları	10
1.5.3. Takviyenin Burulma Davranışı Üzerindeki Etkisi	11
1.6. Araştırma Yöntemine Genel Bakış.....	11
1.6.1. Deneysel Tasarım Düşüncesi	12

2. BOYUT ETKİSİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Boyut Etkisi Araştırmasının Tarihsel Gelişimi	13
2.1.1. Erken Ampirik Gözlemler	13
2.1.2. Boyut Etkisinin İstatistiksel Teorileri.....	14
2.1.3. Kırılma Mekanizması Yaklaşımları.....	14

2.1.4. Son Gelişmeler ve İyileştirmeler	17
2.2. Beton Yapılarda Boyut Etkilerine İlişkin Önceki Çalışmalar	18
2.2.1. Eğilme Yüklemesinde Boyut Etkileri	18
2.2.2. Kesme Yüklemesinde Boyut Etkileri	19
2.2.3. Burulma Yüklemesinde Boyut Etkileri	20
2.3. Lif Takviyesinin Beton Özellikleri Üzerindeki Etkileri.....	21
2.3.1. Taze Beton Özellikleri Üzerindeki Etki	21
2.3.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri Üzerindeki Etki.....	22
2.3.3. Lif Takviyesinin Kırılma Mekanizması Üzerindeki Etkileri.....	23
2.4. Lif Takviyeli Betonun Burulma Davranışı	23
3. BOYUT ETKİSİ	
3.1. Boyut Etkisinin Enerji İle Açıklanması	29
3.1.1. Type I (Bazant) Boyut Etkisi.....	35
3.1.2. Type II (Planas) Boyut Etkisi	36
3.2. Boyut Etkisinde Lineer Regresyon Kullanımı.....	37
4. DENEYİN YAPILIŞI	
4.1. Numune Tasarımı.....	38
4.2. Üretim Süreci.....	39
4.3. Test Düzenekleri.....	39
4.3.1. Burulma Yükleme Düzenekleri	39
4.3.2. Deneyde kullanılan araçlar	40
4.4. Yükleme Sırası.....	40
4.5. Boyut Etkisinin Uygulanması.....	40
4.5.1. Test Örnekleri ve Deneysel Yöntem	41
5. DENEY VERİLERİNİN ANALİZİ	
5.1. Lifsiz Beton	49
5.2. Lif Takviyeli Beton.....	52
SONUÇ.....	55
KAYNAKÇA	56

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Tablo 1. Numunelerin Geometrik Özellikleri	38
Tablo 2. Polipropilen Lif Özellikleri.....	38
Tablo 3. Lifsiz Beton İçin Standart Karışım	39
Tablo 4. Çeşitli Polipropilen Liflerin Özellikleri	45
Tablo 5. Test Sonuçları	47
Tablo 6. Lifsiz Beton Verileri	49
Tablo 7. Lifsiz Beton Analiz Sonuçları Tip II	49
Tablo 8. Lifsiz Beton Analiz Sonuçları Tip I.....	50
Tablo 9. Lifsiz Beton parametleri	51
Tablo 10. Lif Takviyeli Beton Verileri	52
Tablo 11. Lif Takviyeli Beton Analiz Sonuçları Tip II.....	52
Tablo 12. Lif Takviyeli Beton Analiz Sonuçları Tip I.....	53
Tablo 13. Polipropilen Lif Katkıllı Beton Parametreleri.....	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 1. Farklı Malzemelerin Kırılma Bölgeleri a) cam b) beton c) metal	16
Şekil 2. Olasılıksal Boyut Etkisi	25
Şekil 3. Boyut Etkisi Yasası Type II	26
Şekil 4. a) Gevrek b) Yarı Gevrek c) Sünek Malzemeler	27
Şekil 5. Boyut Etkisinin Enerji ile Açıklanması (h_0 - genişliği, a_0 Uzunluklu Çatlak Bandı İle Kırılmanın Oluşumu)	30
Şekil 6. Boyut Etkisi İfadesinin Grafik Gösterimi (Type I)	32
Şekil 7. Boyut Etkisi ifadesinin Grafik Gösterimi (Type II)	34
Şekil 8. Numunenin Yerleşimi	41
Şekil 9. Numune Boyutları	42
Şekil 10. Deney Sonrası Numunelerde Oluşan Çatlaklar	44
Şekil 11. Lifsiz beton için boyut etkisi Tip II	50
Şekil 12. Takviyesiz beton için boyut etkisi Tip I	51
Şekil 13. Lif Takviyeli Beton İçin Boyut Etkisi Tip II	53
Şekil 14. Lif Takviyeli Beton İçin Boyut Etkisi Tip I	54

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

	Sayfa No.
Fotoğraf 1. Deneyde Kullanılan MTS	43
Fotoğraf 2. Deneyde Kullanılan Polipropilen Lifler.....	45
Fotoğraf 3. Test sonrası numuneler	47



SİMGELER

A	: Çatlak uzunluğu
B	: Malzeme özelliğine bağlı sabit
C	: Lineer Regresyon Doğrusunun Düşey eksenini kestiği nokta
C_n	: Uygunluk katsayısı
C_f	: Çatlak önündeki yoğun çatlak bandının genişliği
C_0	: Ampirik sabit
d_a	: En büyük agrega boyutu
D	: Numune kesit boyutu
D_0	: Yapı biçimine bağlı sabit katsayı
E	: Elastisite Modülü
f_c	: Betonun basınç dayanımı
f_t	: Betonun çekme dayanımı
G_f	: Kırılma enerjisi
K_{IC}	: Gerilme şiddet çarpanı kritik değeri
I	: Eylemsizlik momenti
P	: Kırılma yükü
P_{cr}	: Kritik yük
W	: Enerji
β	: Gevreklik katsayısı
ε	: Birim şekil değiştirme
σ_N	: Göçme gerilme

SÖZLÜK

Burulma: Yapısal elemana veya bir nesneye uygulanan ve bir ucun diğer uca göre bükülmesine neden olan kuvvettir.

Dayanım : Betonun, sertleştikten sonra üzerine gelen yüklerin neden olabileceği şekil deformasyonlarına ve kırılmaya karşı gösterebildiği maksimum dirence beton basınç dayanımı denir.

Gevrek Malzeme: Şekil değiştirme bir müddet yapabilir daha sonra kırılan malzemedir.

Polipropilen Lif : Hafif, dayanıklı ve kimyasal dirence sahip bir termoplastiktir.

Sünek Malzeme : Şekil değiştirme yapabilen malzemedir. şekil değiştirme sonucu belli bir miktar veya tamamen eski haline döner.

Yalın Beton: Çelik veya lif donatı içermeyen çimento kum agrega ve su karışımıdır.



GİRİŞ

Bu kapsamlı çalışma, İstanbul Bilgi Üniversitesinin laboratuvarında 2018 yılında gerçekleştirdiği polipropilen lif katkılı, katkısız betonarmenin burulma göçmesinde boyut etkisi deneyinin sonuçlarının analizi üzerinedir. Lif katkısız ve polipropilen lif katkılı beton numunelerin burulma göçme mekanizminde gözlemlenen boyut etkisi bilgisini araştırır. Boyut etkisi, farklı boyutlardaki nominal olarak özdeş yapıların sabit mukavemet özelliklerini korumadığı ve geleneksel elastik ve plastik teorilerle çeliştiği deneysel olarak doğrulanmış bulguları içerir. Bu araştırma, özellikle boyut etkisinin, farklı boyutlardaki geometrik olarak benzer beton numuneler boyunca burulma yükleme koşulları altında nasıl ortaya çıktığını inceler.

Yalın beton ile polipropilen liflerle güçlendirilmiş beton (hacimsel olarak %1 ve %2 kesirlerde) arasındaki karşılaştırmalı analiz, göçme, yük taşıma kapasitesi, süneklik ve çatlak yayılmasında önemli farklılıklar ortaya koymuştur. Deneysel sonuçlar, Bažant'ın boyut etkisi yasasının uygulanması yoluyla analiz edilip numune boyutları ile nominal mukavemet arasında niceliksel ilişkiler bulunmuştur. Yükleme oranlarının dikkatli ölçümü (sırasıyla küçük, orta ve büyük numuneler için 0,084 kN/dak, 0,33 kN/dak ve 1,34 kN/dak) tüm numune boyutlarında karşılaştırılabilir göçme yükleri bulunmuştur.

Sonuçlar, geleneksel teorilerin geometrik olarak benzer yapılar için boyuttan bağımsız mukavemeti öngördüğünü gösterirken, gerçek deneysel veriler nominal mukavemet ile numune boyutları arasında önemli bir bağımlılık olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, polipropilen liflerin dahil edilmesi, yalın betonda tipik olarak gözlemlenen kırılgan kırılma modlarını önemli ölçüde değiştirerek, gelişmiş çatlama sonrası davranış, enerji emilim kapasitesi ve boyut etkisi ilişkileri bulunmuştur.

1. MALZEME TANIMI VE ARAŞTIRMANIN GELİŞİMİ

Bu araştırma, burulma yüklemesi altında malzeme katkısı, geometrik benzerlik ve yapısal davranış arasındaki karmaşık etkileşime dair bilgiler sunmaktadır. Farklı boyutlardaki beton yapıların tasarımı, analizi için önemli sonuçlar doğurmaktadır.

1.1. Çalışmanın Önemi

Beton, yıllık küresel üretimi 10 milyar tonu aşan, insanlığın en temel ve yaygın olarak kullanılan inşaat malzemelerinden biri olarak durmaktadır. Yaygınlığı, bileşen malzemelerinin (öncelikle kireçtaşı ve kilden üretilen çimento, su ve agregalar) göreceli bolluğundan ve çok yönlülüğünden, dayanıklılığından ve basınç dayanımı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Beton, dünya çapında inşaat uygulamalarında devrim yaratarak çağdaş medeniyeti tanımlayan modern altyapı sistemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır.

Yaygın uygulamasına rağmen beton, yapı mühendislerini zorlamaya devam eden birkaç doğal sınırlama sergiler. Bunların başında, basınç ve çekme dayanımı kapasiteleri arasında belirgin bir farklılık olarak ortaya çıkan yarı kırılğan yapısı gelir. Tipik olarak, betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %8-15'i arasında değişir ve mekanik davranışında temel bir asimetri yaratır. Bu özellik, bu malzeme eksikliklerini gidermek için güçlendirme de dahil olmak üzere tasarım yaklaşımlarını gerektirir.

Geleneksel betonarme mühendisliği, çekme zayıflığını gidermek için ağırlıklı olarak demir donatı ile güçlendirmeye odaklanır. Ancak, bu yaklaşım öncelikle makroskobik yapısal davranışı ele alırken, potansiyel olarak kritik mikroskobik ve mezoskopik göçme mekanizmalarını göz ardı eder. Lifle güçlendirilmiş betonun geliştirilmesi, malzeme matrisi boyunca yüksek çekme kapasiteli liflerin dağıtılmış bir şekilde dahil edilmesi yoluyla bu sınırlamaları ele almaya çalışan beton teknolojisinde bir evrimi temsil eder.

Çeşitli lif güçlendirme seçenekleri arasında, polipropilen lifler olumlu özellikleri nedeniyle önemli ilgi görmüştür. Alkali beton ortamında kimyasal içerik, karbon veya çelik lifler gibi alternatiflere kıyasla nispeten düşük maliyet ve çatlak kontrolüne ve çatlama sonrası süneklığe anlamlı katkılar sağlar. Genellikle 30-50 mm

uzunluğunda ve 0,30-0,35 mm çapında olan bu sentetik lifler, karıştırma sırasında beton matrisi boyunca dağılarak çatlak başlangıcını, yayılmasını ve göçme davranışlarını etkileyen üç boyutlu bir takviye ağı oluşturur.

Boyut etkisi olgusu, beton yapı mekaniğinde giderek daha fazla araştırma ilgisi toplayan bir diğer kritik hususu temsil eder. Elastik ve plastik malzeme modellerine dayanan geleneksel mühendislik teorileri, farklı boyutlardaki geometrik olarak benzer yapıların aynı nominal mukavemet değerlerine sahip olması gerektiğini öngörür. Ancak, deneysel kanıtlar tutarlı bir şekilde daha büyük beton yapıların daha küçük yapılardan daha düşük nominal gerilme seviyelerinde başarısız olduğunu göstermektedir. Bu tutarsızlık, beton gibi kırılğan ve yarı kırılğan malzemelerde özellikle belirgin hale gelir.

Bu boyuta bağlı davranış, özellikle modern inşaat eğilimleri giderek daha büyük yapısal elemanlara doğru yöneldikçe, yapısal tasarım ve güvenlik değerlendirmesi için önemli sonuçlar doğurur. Bu nedenle, boyut etkilerinin doğru tahmini ve nicelenmesi, laboratuvar test örneklerinden tam ölçekli mühendislik yapılarına kadar uzanan ölçeklerde yapısal güvenilirliği sağlamak için zorunlu hale gelir.

Bu iki araştırma alanının kesişimi lif takviye teknolojisi ve boyut etkisi kuramı özellikle burulma gibi karmaşık yükleme koşulları altında nispeten keşfedilmemiş olarak kalmaktadır. Bükülme ve dönmeden boyut etkileriyle ilgili önemli araştırmalar mevcut olsa da burulma yüklemesi, özel araştırmayı gerektirir. Sonuçların dağılımları ve göçmeler önemlidir. Polipropilen lif katkısının burulma yüklemesi altında boyuta bağlı davranışı nasıl etkilediğini anlamak, yapısal beton mühendisliğinde hem teorik anlayışa hem de pratik uygulamaya anlamlı bir katkı sunmaktadır.

1.2. Burulma Göçmesinin Araştırma Amaçları

Bu araştırmanın ele aldığı temel zorluk, geleneksel mukavemet tahmin teorileri ile farklı boyutlardaki beton yapılarda deneysel olarak gözlemlenen davranış arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanmaktadır. Elastik ve plastik malzeme modellerine dayalı klasik mühendislik yaklaşımları geometrik olarak benzer yapılar için boyuttan bağımsız nominal mukavemeti önerirken, deneysel kanıtlar özellikle beton gibi yarı

kırılgan malzemelerde önemli boyut bağımlılığını önemli bir şekilde göstermektedir. Hesaplar ile deney sonuçları arasındaki fark, üç boyutlu göçme durumlarının geliştiği ve geleneksel takviye yaklaşımlarının yetersiz kalabileceği burulma yüklemelerinde özellikle kritik hale gelir.

Ek olarak, polipropilen liflerin bir katkı elemanı olarak dahil edilmesi bu olguya daha fazla karmaşıklık getirir. Kapsamlı araştırmalar, çatlak kontrolü ve çatlama sonrası süneklik için lif takviyesinin yararlarını belgelemiş olsa da bu liflerin özellikle burulma yükleme koşulları altında farklı ölçek seviyelerinde boyuta bağlı davranışı nasıl etkilediğine dair bulgular sınırlıdır.

Bu araştırmanın amacı, aşağıdaki özel hedefler doğrultusunda bu birbiriyle ilişkili zorlukları araştırmaktır:

- Geometrik olarak benzer numunelerin üç farklı ölçek düzeyinde deneysel testleri yoluyla, katkısız (lifsiz) beton numunelerde numune boyutu ile nominal burulma dayanımı arasındaki ilişkiyi nicel olarak belirlemektir.
- Katkısız betonda, burulma yükü altında gözlenen boyut etkisi ilişkisini, çeşitli hacim oranlarında (%1 ve %2) polipropilen liflerin dahil edilmesinin nasıl değiştirdiğini değerlendirmektir.
- Farklı boyut ölçeklerindeki katkısız ve lif katkılı beton numunelerin hasar mekaniğini, çatlak yayılma desenlerini ve çatlama sonrası davranışlarını analiz etmektir.
- Bařant'ın boyut etkisi yasasının hem yalın hem de lif katkılı beton numunelerde farklı boyutlar arası burulma dayanımını tahmin etmek için uygulanabilirliğini değerlendirmektir.
- Burulma yüküne maruz kalan beton yapıların tasarım ve analizinde boyut etkilerinin hesaba katılmasına yönelik pratik öneriler geliştirmek ve polipropilen lif takviyesinin potansiyel faydalarına ilişkin özel rehberlik sağlamaktır.

Bu hedeflere ulaşmak için, bu araştırma, burulma yükleme koşulları altında malzeme bileşimi, geometrik ölçekleme ve yapısal tepki arasındaki etkileşime ilişkin kritik bilgi boşluklarını kapatmayı amaçlamaktadır. Bulgular, farklı boyutlar arasında

mukavemet tahminlerinin doğruluğunu artırmak için önemli çıkarımlar içermekte olup, potansiyel olarak daha verimli, ekonomik ve güvenilir beton yapısal tasarım yöntemlerine katkıda bulunmaktadır.

1.3. Boyut Etkisinin Genel Tanımı

Boyut etkisi, yapısal tasarım ve güvenlik değerlendirmesi için zorunludur. Özünde, boyut etkisi, geometrik olarak benzer yapıların nominal dayanım (mukavemetinin) boyutlara göre değiştiği deneysel olarak doğrulanmıştır. Var olan malzeme modellerine dayalı klasik mukavemet tahminleriyle çelişir.

1.3.1. Boyut Etkisinin Temelleri

Klasik elastik ve plastisite teorilerine göre, geometrik olarak benzer yapıların nominal mukavemeti (σ_N) boyutlarından (D) bağımsız kalmalıdır. Bu tahmin, kritik bir noktadaki gerilme malzemeye özgü bir eşik değerine ulaştığında göçme meydana geldiği temel varsayımından kaynaklanmaktadır. Bu düşünceye göre, geometrik olarak benzer yapılardaki özdeş gerilme dağılımları, mutlak boyuttan bağımsız olarak özdeş nominal gerilme seviyelerinde göçme meydana gelmiştir.

Buna karşılık, doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEFM), nominal mukavemetin yapının karakteristik boyutunun kare köküne ters orantılı olduğu önemli bir boyut etkisi öngörür ($\sigma_N \propto D^{-1/2}$). Bu tahmin, enerji salınım oranının kritik malzeme değerini aştığında çatlak yayılımının meydana geldiği enerji tabanlı hasar kriterlerinden ortaya çıkmaktadır.

Bu teorik çerçeveler arasındaki belirgin çelişki, Bažant'ın küçük ölçeklerde baskın olan dayanım kriterleri ile büyük ölçekli davranışı yöneten LEFM arasında geçişsel bir ilişki kuran boyut etkisi yasası aracılığıyla çözülür. Bu yasa matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (1.1)$$

Burada:

- σ_N nominal gerilme temsil eder
- σ_0 , mukavemetle ilgili bir malzeme sabitini ifade eder
- D yapının karakteristik boyutudur
- D_0 bir geçiş boyutu parametresidir

Bu bağıntıda, dayanım temelli kriterler ($D \ll D_0$ olduğunda) ile LEFM tahminleri ($D \gg D_0$ olduğunda) arasında sürekli bir geçiş sağlayarak, daha önce birbirinden farklı olan teorik yaklaşımları birleştirir.

1.3.2. Betonda Boyut Etkisinin Nedenleri

Beton yapılarda boyut etkilerinin ortaya çıkmasına, birbiriyle ilişkili birkaç gerekçe katkıda bulunur:

1. Enerji Salınım Mekanizması: Çatlak gelişimi için enerji gereklidir. Boyut etkisi enerji kriteri kullanır. Daha büyük yapılarda, yapı içerisinde depolanan ve çatlak oluşumu sırasında açığa çıkan enerji, çatlak yayılması için ilave bir itici güç sağlayarak, hasar için gereken nominal dayanımı azaltır.
2. İstatistiksel Boyut Etkisi: En zayıf halka teorisine göre, daha büyük hacimli malzemelerde, göçmeyi başlatan kritik kusurlarla karşılaşma olasılığı daha yüksektir. Bu da artan boyutla birlikte ortalama mukavemetin azalmasına neden olur.
3. Sınır Tabaka Etkisi: Yapısal boyutlara göre kırılma süreci bölgelerinin gelişimi, bu bölgelerin daha küçük numunelerde orantılı olarak daha büyük hacimler kaplaması nedeniyle ölçeğe bağlı bir davranış farklılığı yaratır. Sınır tabaka kalınlığı küçük, büyük numunelerde aynıdır.
4. Yapıların Elastik ve Plastik Olarak İki Farklı Biçimde Göçmesi: Küçük yapılar elastik büyük yapılar ise plastik göçmeye yatkındır.
5. Sayısal Çözümlerin Bağımsızlığı: Sonlu eleman yönteminde eleman boyutu küçük seçildikçe, göçme küçük çıkmaktadır. Bu imkansızdır.

Bu mekanizmaları anlamak, farklı yapısal uygulamalar ve yükleme koşulları boyunca boyuta bağlı davranışları hesaba katan doğru tahmin modelleri ve uygun tasarım yöntemleri geliştirmek için önemlidir.

1.4. Betonun Polipropilen Lif İle Güçlendirilmesi

Lif takviyesi, betonun mekanik özelliklerini, özellikle düşük çekme dayanımı ve kırılma kırılma özellikleri gibi doğal sınırlamalarını ele alarak iyileştirmeye yönelik temel bir yaklaşımı temsil eder. Çeşitli lif türleri arasında, polipropilen lifler, performans avantajları, maliyet etkinliği ve işleme uyumluluğunun elverişli dengesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

1.4.1. Polipropilen Liflerin Özellikleri ve Çeşitleri

Beton katkısında kullanılan polipropilen lifler genellikle üretim süreçlerine ve elde edilen özelliklere göre birkaç sınıfa ayrılır:

1. Monofilament Lifler: Bunlar, çapları 0,30-0,35 mm ve uzunlukları 30-50 mm arasında değişen bireysel liflerden oluşur. Çekme dayanımları tipik olarak 547-658 MPa arasında değişirken, elastiklik modülü 3,5-7,5 GPa arasındadır. Özgül yüzey alanları (yaklaşık 91 m²/kg) ve düşük yoğunlukları (0,9 kg/cm³), beton matrisi boyunca etkili dağılımlarına katkıda bulunur.
2. Fibrile Lifler: Bunlar, sürekli polipropilen filmlerin bölünmesiyle oluşturulan birbirine bağlı lif ağlarından oluşur. Dallanmış yapıları nedeniyle genellikle beton matrisiyle gelişmiş mekanik bağlanma sağlarlar.
3. Mikrofiberler: Bu daha küçük çaplı lifler (genellikle <0,1 mm) yapısal performansı artırmaktan ziyade öncelikle plastik büzülme çatlaklarını kontrol etmek için kullanılır.

Polipropilen liflerin kimyasal bileşimi, onları beton içindeki alkali ortama karşı oldukça dirençli hale getirerek bozulmadan uzun süreli dayanıklılık sağlar. Ek olarak, su yapılarında da su emilimini önler ve beton matrisindeki nem koşullarından bağımsız olarak tutarlı mekanik özellikleri korur.

1.4.2. Lif Takviyeli Betonun Mekanik Davranışı

Polipropilen liflerin betona dahil edilmesi, betonun mekanik davranışını çeşitli mekanizmalar aracılığıyla temelden değiştirir:

1. Çatlak Köprüleme: Potansiyel çatlak düzlemlerini kesen lifler, mekanik ankraj veya sürtünmeli çekme direnci yoluyla çatlak açılmasına karşı direnç sağlar ve çatlak yayılması için gereken enerjiyi artırır.
2. Gerilme Transferi: Çatlak bölgelerde, lifler çekme gerilmelerini çatlak yüzeyleri boyunca aktarır, böylece yapısal bütünlüğü ve yük taşıma kapasitesini, takviyesiz betonun tamamen ayrılacağı noktanın ötesinde korur.
3. Çoklu Çatlama: Lif takviyesi, birkaç büyük çatlak yerine çok sayıda küçük çatlak oluşumunu teşvik ederek deformasyonu dağıtır ve genel sünekliği artırır.
4. Enerji Emilimi: Çatlama sırasında lifin çekilmesi işlemi, enerji emilim kapasitesini önemli ölçüde artırarak, yalın betonun tipik olarak kırılma modunu, ani kırılma yerine kademeli mukavemet bozulmasıyla karakterize edilen daha sünek bir tepkiye dönüştürür.

Bu mekanizmalar toplu olarak çatlama sonrası davranışın iyileştirilmesine, darbe direncinin iyileştirilmesine ve çatlak genişliklerinin azaltılmasına katkıda bulunarak, katkısız betonun bazı temel sınırlamalarını ele alır.

1.4.3. Dayanıklılık ve Uzun Vadeli Performans Üzerindeki Etkisi

Polipropilen lif takviyesi, anında mekanik özellik iyileştirmelerinin ötesinde, betonun uzun vadeli dayanıklılığını çeşitli yollarla etkiler:

1. Geçirgenlik Azaltma: Çatlak genişliğinin gelişimini kontrol ederek, lif takviyesi beton geçirgenliğini azaltır. Lifler, korozyona katkıda bulunan klorürler ve karbondioksit gibi agresif maddelerin girişini sınırlar.
2. Donma-Çözülme Direnci: Lif ağı, beton matrisi içinde basınç çıkış noktaları oluşturarak, iç basınç gelişimini karşılayarak donma-çözülme döngülerine karşı direnci artırabilir.

3. Aşınma Direnci: Lif takviyesiyle beton matrisinin gelişmiş kohezyonu, genellikle yüzey aşınma direncini iyileştirir. Bu da kaldırımlar ve diğer aşınmaya duyarlı uygulamalar için faydalıdır.

4. Yangına Dayanıklılık: Yüksek sıcaklıklarda polipropilen lifler erir (yaklaşık 160°C'de) ve su buharının kaçmasına izin veren kanallar oluşturarak yangına maruz kalma sırasında bozulma riskini azaltır.

Bu dayanıklılığı artırıcı mekanizmaların anlaşılması, polipropilen lif takviyesinin beton performansına, anlık mekanik özellik iyileştirmelerinin ötesinde genel katkısının değerlendirilmesi için önemli bir bağlam sağlar.

1.5. Beton Elemanların Burulma Davranışı

Burulma yüklemesi, beton yapı elemanlarının deneyimlediği en karmaşık gerilme durumlarından birini temsil eder. Hem analiz hem de tasarım için benzersiz zorluklar yaratır. Saf eksenel veya eğilme yüklemesinin aksine, burulma, elemanın uzunlamasına eksenine 45 derecelik açılarla yönlendirilen birleşik çekme ve basınç gerilmeleriyle karakterize edilen üç boyutlu gerilme dağılımları üretir.

1.5.1. Burulma Mekanizmasının Temelleri

Prizmatik bir elemana uygulanan burulma momenti (T), kesit geometrisine bağlı olarak dağılımda değişiklik gösteren kesme gerilmeleri üretir. Beton yapıda tipik olan dairesel olmayan kesitler için, burulma davranışı kesitin çevresinde maksimum değerlere ve merkeze yakın minimum değerlere ulaşan düzensiz kesme gerilme dağılımlarıyla karakterize edilir.

Saint-Venant tarafından geliştirilen klasik elastik burulma teorisi, homojen, izotropik malzemelerdeki burulma davranışını anlamak için analitik bir temel sağlar. b ve h boyutlarına sahip dikdörtgen bir kesit için, burulma yüklemesi altındaki maksimum kesme gerilme ($\tau_{\max}$) şu şekilde yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$\tau_{\max} = T/(\alpha \cdot b \cdot h^2) \quad (1.2)$$

Burada:

- T uygulanan burulma momentini temsil eder
- α , b/h oranına bağılı bir şekil faktörüdür
- b daha küçük kesit boyutudur
- h daha büyük kesit boyutudur

Bir elemanın açısıl dönmesine karşı direnci ile gösterilen burulma rijitliği, burulma sabiti (J) ile malzemenin kayma modülünün (G) çarpımı ile karakterize edilir.

1.5.2. Yalın Betonda Burulma Hasarı Mekanizmaları

Burulma yüküne maruz kalan yalın beton, genellikle aşağıdaki ardışık mekanizmalar yoluyla hasara uğrar:

1. Mikro Çatlak Başlangıcı: İlk mikro çatlaklar, ana çekme gerilmesinin betonun çekme dayanımını aştığında, gerilme yoğunlaşmalarında (yığılmalarında) ve malzeme kusurlarının olduğu yerlerde başlar.
2. Eğimli Çatlak Oluşumu: Yükleme arttıkça, mikro çatlaklar, maksimum ana çekme gerilme yörüngelerine dik (uzunlamasına eksene yaklaşık 45 derece) yönelimli, görünerek eğimli çatlaklara birleşir.
3. Spiral Çatlak Yayılımı: Diyagonal çatlama deseni genellikle elemanın etrafında spiral bir biçime dönüşür ve burulma gerilmesi dağılımlarının üç boyutlu doğasını yansıtır.
4. Kırılgan Hasar: Burulma altındaki yalın beton genellikle kırılgan hasar özellikleri gösterir. Kritik çatlak geliştiğinde minimum çatlama sonrası direnç ve ani mukavemet kaybı görülür.

Bu hasar görünümü, beton yapılarıdaki burulma yükleme koşullarının sunduğu zorlukları vurgulayarak, eğilme veya eksenel yükleme durumlarından önemli ölçüde farklıdır.

1.5.3. Takviyenin Burulma Davranışı Üzerindeki Etkisi

Burulma direnci için geleneksel demir donatı takviyesi tipik olarak potansiyel çatlak düzlemlerini kesecek şekilde düzenlenmiş boyuna çubuklardan ve kapalı etriyelerden oluşur. Bu takviye yapılandırması, beton basınç desteklerinin uygulanan burulma momentine direnmek için çelik gerilme bağlarıyla birlikte çalıştığı uzay kafes analojisi aracılığıyla işlev görür.

Buna karşın, lif katkısı burulma direncini artırmak için temelde farklı bir yaklaşım sunar:

1. Dağıtılmış Donatı: Ayrık demir donatıların aksine, lifler beton hacminin tamamında üç boyutlu donatı sağlar ve çatlakların yönelimlerinden bağımsız olarak onları engelleme potansiyeline sahiptir.
2. Çatlak Kontrolü: Lifler, geleneksel takviyenin yaptığı gibi doğrudan önemli çatlama sonrası yükleri taşımak yerine, öncelikle çatlak başlangıcını ve yayılmasını kontrol ederek burulma davranışını olumlu etkiler.
3. Çatlama Sonrası Süneklik: Geleneksel takviyeler önemli ölçüde çatlama sonrası dayanıklılık sağlayabilirken, lif katkısı genellikle çatlama sonrası sünekliğe ve enerji emme kapasitesine daha önemli katkıda bulunur.
4. Tamamlayıcı Eylem: Optimum burulma performansı genellikle, geleneksel demir donatı takviyesinin (en yüksek mukavemet için) lif katkısıyla (çatlak kontrolü ve süneklik artışı için) birleştirilmesiyle elde edilir.

Bu ayrımların anlaşılması, polipropilen lif katkısının burulma davranışı ve boyut etkileri üzerindeki etkisine ilişkin deneysel sonuçların değerlendirilmesi için temel bağlamı sağlar.

1.6. Araştırma Yöntemine Genel Bakış

Bu araştırma hem katkısız hem de polipropilen lif katkılı beton numunelerin burulma hasarı durumunda boyut etkisi düşüncesi sistematik olarak araştırmak için tasarlanmış kapsamlı bir deneysel yöntem kullanır. Yaklaşım, numune boyutu, malzeme bileşimi ve burulma hasarı özellikleri arasında nicel ilişkiler kurmak için

dikkatli malzeme hazırlama, özel test yöntemleri ve titiz veri analizi tekniklerini birleştirir.

1.6.1. Deneysel Tasarım Düşüncesi

Deneysel program üç temel ilke etrafında yapılandırılmıştır:

1. Geometrik Benzerlik: Gerçek boyut etkilerini geometrik etkilerden ayırmak için tüm numuneler farklı ölçek seviyelerinde tutarlı oranlar korunmuştur; boyut oranları sabit tutulurken mutlak boyutlar değişmiştir.
2. Yükleme Benzerliği: Test yöntemleri, tüm numune boyutlarında karşılaştırılabilir gerilme durumları ve gerinme oranları sağlamak için dikkatlice kalibre edilmiştir. Deneyle ilgili çalışmaların gerçek boyut etkisi ilişkileri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.
3. Sistematiik Değişim: Hem numune boyutu hem de malzeme bileşimi (lif içeriği) deneysel tasarıma göre sistematiik olarak değiştirilmiştir. Böylece bireysel parametre etkileri ile olası etkilerinin izole edilmesi sağlanmıştır.

Bu yaklaşım, polipropilen lif katkısının burulma yükleme koşulları altında boyuta bağılı davranışı nasıl etkilediğini değerlendirilmesini sağlayarak, istatistiksel sağlamlıkla temel araştırma sorularını ele almaktadır.

2. BOYUT ETKİSİ ÜZERİNE LİTERATÜR TARAMASI

Betonda boyut etkisi, beton numunelerin boyutlarındaki değişikliklerin mekanik özellikleri (basınç dayanımı, çekme dayanımı, kırılma tokluğu vb.) üzerindeki etkisini ifade eder. Literatürde bu düşünce, Weibull istatistik teorisi, heterojen gerilme dağılımı ve mikro çatlak gelişimi gibi faktörlerle açıklanmaktadır. Daha büyük numunelerde zayıf halka etkisi ve iç gerilmelerin artması nedeniyle ortalama dayanımın düştüğü gözlemlenir. Bazı çalışmalar, boyut etkisini modellemek için boyutsuz parametreler veya sayısal analiz yöntemleri önermektedir. Ayrıca, lif takviyeli betonlarda ve yüksek dayanımlı betonlarda boyut etkisinin geleneksel betonlardan farklı davranabileceği belirtilmektedir. Bu konudaki araştırmalar, yapısal tasarımın güvenilirliği ve yönetmelik oluşturmak açısından önem taşımaktadır.

2.1. Boyut Etkisi Araştırmasının Tarihsel Gelişimi

Yapısal mekanikte boyut etkilerine yönelik araştırmalar, son yüzyılda önemli ölçüde evrim geçirerek deneysel gözlemlerden karmaşık teorik çerçevelere doğru ilerlemiştir. Bu bölüm de boyut etkisinin tarihsel gelişimini izleyerek, beton yapılarda boyuta bağlı davranışa ilişkin güncel anlayışı şekillendiren temel katkıları vurgulamaktadır.

2.1.1. Erken Ampirik Gözlemler

Boyut etkilerinin belgelenmiş en erken tanınması, Leonardo Da Vinci' nin halat mukavemeti ile ilgili gözlemlerine dayanır; uzun halatların, aynı kesite sahip kısa halatlardan daha zayıf görüldüğünü (koptuğunu) belirtmiştir. Modern malzeme biliminden yüzyıllar önce yapılan bu temel gözlem, daha sonra mühendislik tasarımı için kritik öneme sahip olacağı kanıtlanacak olan boyut değişimi ve mukavemet arasındaki karşı sezgisel ilişkiyi tanımlamıştır.

20. yüzyılın başlarında, boyut etkilerine dikkat, öncelikle beton kirişlerin deneysel incelemeleri yoluyla ortaya çıktı. Kani (1967) ve Walsh (1972) dahil araştırmacılar, artan kiriş derinliğiyle nominal kesme dayanımında sistematik azalmalar olduğunu belgelediler. Bu da geleneksel tasarım yaklaşımlarından gelen

tahminlerle çelişmiştir. Kapsamlı teorik açıklamalardan yoksun olsa da bu ampirik gözlemler, yapısal tasarımda boyut etkilerini hesaba katmanın pratik önemini ortaya koydu.

2.1.2. Boyut Etkisinin İstatistiksel Teorileri

Boyut etkilerini açıklamak için en erken teorik çerçevelerden biri, daha büyük numunelerdeki mukavemet azalmasını açıklamak için en zayıf halka kavramlarını uygulayan Weibull'un (1939) istatistiksel teorisi aracılığıyla ortaya çıktı. Bu yaklaşım, malzeme mukavemetinin istatistiksel bir dağılım izlediğini ve daha büyük hacimlerin göçmeyi başlatan kritik kusurlarla karşılaşma olasılığının daha yüksek olduğunu varsaydı.

Şekil parametresi m olan Weibull istatistiklerini takip eden bir malzeme için yapı boyutu ile nominal dayanım arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_N \propto D^{(-1/m)} \quad (2.1)$$

Burada D karakteristik boyutu temsil ederken, m , betonun heterojenliğine ve kusur dağılımına bağlı olarak genellikle 5 ile 50 arasında değişir.

İstatistiksel teoriler, boyuta bağlı davranışın bazı yönlerini başarıyla açıklasa da, kırılma süreçleri sırasında oluşan gerilme yeniden dağılımlarının ve enerji salınımının etkisini hesaba katmada başarısız olurlar. Bu da uygulanabilirliklerini beton gibi yarı kırılğan malzemeler yerine tamamen kırılğan (gevrek) malzemelerle sınırlar.

2.1.3. Kırılma Mekanikliği Yaklaşımları

Griffith'in (1921) çatlak mekanikliğinin geliştirilmesiyle önemli bir teorik ilerleme sağlanmıştır. Bu, tamamen gerilmeye dayalı göçme kriterleri yerine çatlak yayılımı için enerjiye dayalı kriterler oluşturmuştur. Bu yaklaşım daha sonra boyut etkilerini anlamak için temel olduğunu kanıtlamıştır. Çünkü boyuta bağlı davranışın altında yatan enerji salınım süreçleriyle doğrudan ilişkili kavramları tanımlamıştır.

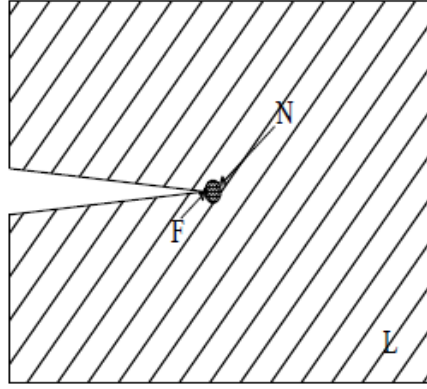
Doğrusal (Lineer) elastik kırılma mekaniğinin (LEFM) beton yapılara uygulanması, araştırmacıların kritik gerilme yoğunluğu faktörleri (K_{IC}) ve gerilme-uzama enerjisi salınım oranları (G_{IC}) gibi parametreler aracılığıyla betonun kırılma özelliklerini karakterize etmeye çalışmasıyla 1960'larda ciddi bir şekilde başlamıştır. Ancak, LEFM'nin doğrudan uygulanması, betonun yarı kırılğan yapısı ve tipik laboratuvar numune boyutlarına kıyasla nispeten büyük kırılma süreci bölgelerinin varlığı nedeniyle sorunlu olduğu kanıtlanmıştır.

Farklı malzemelerde çatlak tepesinde de farklı bölgeler oluşmaktadır. Şekil 1' de verildiği gibi betonda boyut etkisinin en büyük gerekçelerinden biri kırılma bölgesinin (F) büyüklüğüdür.

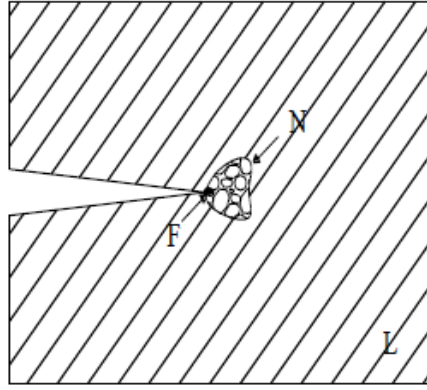
Genelde iki tip lineer olmayan kırılma mekaniği vardır;

- 1) Sünek (metaller)
- 2) Sünek olmayan (beton, seramik)

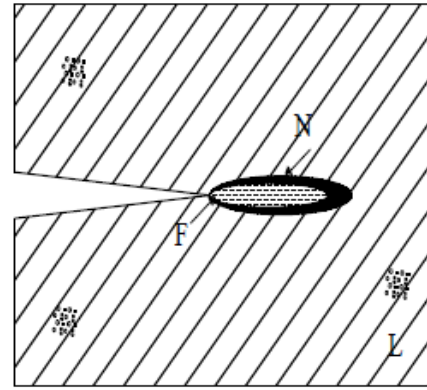
Şekil 1. 'de lineer elastik kırılma mekaniğinde (cam) – Şekil 1.a) lineer olmayan bölge çok küçük olup, tüm yapı hemen hemen elastiktir. Sünek kırılmada (Şekil 1. b,c), lineer olmayan bölgenin çoğu plastiktir. Kırılma işlem bölgesi F , lineer olmayan kısmın N , küçük bir kısmıdır. Sünek olmayan betonun kırılmasının (Şekil 1.c) aksine, kırılma bölgesi F , büyük olup lineer olmayan bölgenin N , hemen hemen tamamını kapsar.



a)



b)



c)

Şekil 1. Farklı Malzemelerin Kırılma Bölgeleri a) cam b) beton c) metal

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Kırılma mekaniği düşük tokluk ve yüksek gevreklikte kırılma davranışını inceler. Kırılma mekaniği anlaşıldıkça yüksek kırılma tokluğu ve sünmeye sahip yeni çimento malzemeleri gelişir. Önce yüksek basınç dayanımlı betonda düşük sünme ve

tokluk davranışı araştırılacaktır. Sonra kırılma mekaniği ile düzeltilmiş kırılma ve sünmeye sahip yeni malzeme gelişimi araştırılacaktır.

Kırılma tokluğu azaldıkça, doğal gevreklik ve basınç dayanımı artar. Bu kırılma bölgesinin azalmasındandır. Kırılma tokluğu ve doğal sünmedeki artış, basınç dayanımındaki artış ile sağlanmaz. Kırılma bölgesi boyutunda değişiklik ya da küçük dağınılı çatlakların yoğunlaşıp büyük çatlak oluşumunu önlemek ile sağlanır. Beton ve çimento endüstrisinde ise amaç basınç dayanımını arttırmaktır.

Araştırmalarda, basınç dayanımı arttırmak için toplam boşluğu azaltır ve/veya boşluk boyut dağılımı optimize edilir. Bunun için çeşitli teknikler kullanılır.

- Çimento hamurunu 350 MPa yüksek basınç altında sıkıştırılarak suya atıp, çimento danelerini birleştirmek için titreşimli sıkıştırma gibi mekanik işlem.
- Karışımın işlenebilirliğini bozmadan çimento danelerini dağıtan ve kullanılan suyu azaltan katkıları kullanılır (Helton 1978).
- Karışımın gözenekleri, reçine, sülfür gibi katı parçalar ile doldurulur.

Bazı diğer özellikler de düzeltilerek çok yüksek basınç dayanımları elde edilir. Böylece elektrik direnci normal çimento karışımına göre birkaç kat artarak, klor difüzyon hızı azalır. Çekme dayanımı ve kırılma tokluğu fazla etkilenmez.

Burada, dayanıklılık, elektrik dirençli ve düşük gözenekli (1 vol%) çimento hamuru düşünülebilir. Ayrıca düşük gözenekli malzemenin, çok küçük çekme dayanımı ve kırılma tokluğu olabilir. Aynı malzemeye çelik lif ya da polipropilen ilavesi ile f_t ve G_f kırılma enerjisinin çok artabileceği görülecektir. G_f kırılma enerjisi lifli betonda kırılma mekaniği kullanarak hesabı verilecektir.

2.1.4. Son Gelişmeler ve İyileştirmeler

Son yıllarda boyut etkisi teorilerinde önemli gelişmeler görülmüştür. Bunlar arasında şunlar yer alıyor:

1. Sınır Etkisi Modelleri: Hu ve Wittmann (2000) da dahil olmak üzere araştırmacılar, özellikle ince yapısal elemanlar için geçerli olan, kırılma süreci bölgesi gelişiminde sınırların etkisini hesaba katan modeller geliştirmiştir.

2. Çoklu Kırılma Ölçekleme Yasaları: Carpinteri ve meslektaşlarının (1995) çalışmaları, belirli geometrik elemanlar için geleneksel boyut etkisi bağıntılarının bazı sınırlamalarını ele alan çoklu kırılma kavramlarına dayalı ölçekleme yaklaşımlarını ortaya koymuştur.

3. Hesaplamalı Uygulamalar: Kohezif çatlak modelleri, hasar mekaniği yaklaşımları ve genişletilmiş sonlu elemanlar yöntemleri de dahil olmak üzere gelişmiş sayısal teknikler, karmaşık yapısal geometrilerde boyuta bağlı kırılma süreçlerinin ayrıntılı verilmesine olanak sağlamıştır.

4. Deneysel Doğrulama: Giderek daha kapsamlı hale gelen deneysel teknikler, daha geniş boyut aralıkları ve yükleme koşulları boyunca doğrulama sağlayarak, boyut etkisi teorilerinin çeşitli yapısal uygulamalarda uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Devam eden bu gelişmeler, özellikle eğilme ve kesme yükleme koşullarına kıyasla daha az ilgi gören burulma gibi karmaşık yükleme durumlarında uygulamaları açısından boyut etkilerine ilişkin bilgilenmeyi arttırmaktadır.

2.2. Beton Yapılarda Boyut Etkilerine İlişkin Önceki Çalışmalar

Beton yapılarda çeşitli yükleme koşulları boyunca boyut etkilerini karakterize etmek için kapsamlı deneysel araştırmalar yürütülmüştür. Bu bölüm, özellikle burulma yükleme koşullarıyla ilgili araştırmalara vurgu yaparak, boyuta bağlı davranışın temel anlayışını oluşturan temel çalışmaları gözden geçirmektedir.

2.2.1. Eğilme Yüklemesinde Boyut Etkileri

Eğilme yüklemesi, beton yapılarda boyut etkileri açısından en kapsamlı çalışılmış yükleme koşulunu temsil eder. Bažant ve Pfeiffer (1987) tarafından yapılan öncü çalışma, 1:16 boyut aralıklarını kapsayan üç noktalı eğilme numunelerini inceleyerek, boyut etkisi yasasından teorik tahminlerle uyumlu, net boyuta bağlı nominal mukavemet bağıntıları göstermiştir.

Gettu ve diğerleri (1998) tarafından yapılan sonraki araştırma, bu incelemeleri yüksek dayanımlı betona genişletti. Bu malzemelerin geliştirilmiş mekanik özelliklerine rağmen boyut etkilerinin devam ettiğini doğrulamıştır. Sonuçları, boyut

etkisi parametrelerinin (D_0) beton bileşimine ve dayanım özelliklerine bağlılık göstermesiyle, dayanım kriterleri ve LEFM tahminleri arasında geçiş davranışı göstermiştir.

Hoover ve Bažant (2014) tarafından yapılan daha yakın tarihli araştırmalar, boyut aralıklarını benzeri görülmemiş seviyelere (1:128) taşıyarak, son derece büyük ölçeklerde asimptotik davranışın değerlendirilmesini mümkün kılmıştır. Bu çalışmalar, LEFM tarafından tahmin edilen boyut etkilerine (σ_N) doğru yakınsama ile ilgili teorik tahminlerin kritik doğrulamasını sağlamıştır. Yeterince büyük numunelerde lineer elastik kırılma mekaniği geçerli olup yapı boyutu ile ters orantılıdır $D^{-1/2}$.

2.2.2. Kesme Yüklemesinde Boyut Etkileri

Kesme yükleme koşulları, yapısal tasarımdaki pratik önemleri ve deneysel araştırmalarda gözlemlenen belirgin boyut etkileri nedeniyle önemli ilgi görmüştür. Kani'nin erken dönem çalışmaları (1967), kiriş derinliği arttıkça kesme kapasitesinde önemli azalmalar olduğunu, kiriş derinliği 300 mm'den 1200 mm'ye çıktıkça nominal kesme dayanımının yaklaşık %50 oranında azaldığını göstermiştir.

Collins ve Kuchma (1999) tarafından yapılan kapsamlı araştırmalar, 110 mm ile 1000 mm arasında değişen kiriş derinliklerindeki kesmedeki boyut etkilerini inceleyerek, geleneksel tasarım yaklaşımlarının daha büyük elemanlardaki kesme kapasitesini önemli ölçüde fazla tahmin ettiğini ortaya koymuştur. Bulguları, bu boyuta bağlı etkileri hesaba katmak için çeşitli yapısal kodlarda değiştirilmiş tasarım hükümlerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Yu ve Bažant (2011) tarafından yapılan araştırma, etriyesiz ince yüksek dayanımlı beton kirişlerdeki kesme hasarını incelemiş ve beton dayanımı arttıkça boyut etkilerinin giderek daha belirgin hale geldiğini göstermiştir. Bu bulgu, özellikle geleneksel güvenlik faktörlerinin büyük ölçekli uygulamalar için yetersiz kalabileceği yüksek performanslı malzemeler için boyut etkilerinin dikkate alınmasının önemini vurgulamıştır.

2.2.3. Burulma Yüklemesinde Boyut Etkileri

Burulma yüklemesi, spandrel kirişler, kavisli elemanlar ve eksantrik olarak yüklenen kolonlar gibi yapısal elemanlardaki pratik önemine rağmen, eğilme ve kesme yükleme koşullarına kıyasla daha az ilgi görmüştür. Hsu (1968) tarafından yapılan erken araştırmalar, numune boyutu ve nominal mukavemet arasında niceliksel ilişkiler kurmadan, burulma yüklemesinde boyut etkilerinin önemini belirlemiştir.

Burulma yüklemesindeki boyut etkilerinin en kapsamlı araştırmaları, numune boyutu ile burulma kapasitesi arasında temel ilişkiler kuran Bažant ve Şener tarafından yürütülmüştür. 1987 tarihli "Beton Kirişlerin Burulma Hasarında Boyut Etkisi" adlı çalışmaları, artan numune boyutuyla nominal burulma dayanımında önemli azalmalar olduğunu göstererek, boyut etkisi kavramlarının bu yükleme koşuluna uygulanabilirliğini doğrulamıştır.

1988'de yayınlanan sonraki çalışma "Yalın ve Donatılı Beton Kirişlerin Burulma göçmesinde Boyut Etkisi Testleri" adlı çalışmadır. Bu araştırmaları hem katkısız hem de lif katkılı numuneleri kapsayacak şekilde genişletmiştir. Geleneksel katkının boyuta bağlı davranışı değiştirdiğini ancak ortadan kaldırmadığını ortaya koymuştur. Bulguları, lifli numunelerde bile nominal mukavemetin artan boyutla birlikte azaldığını, ancak lifsiz numunelere göre daha az belirgin bir oranda olduğunu göstermiştir.

Bažant ve arkadaşları (1989) tarafından yapılan ek araştırmalar, burulma hasarının kırılma mekaniği yönlerini daha fazla inceleyerek, boyut etkisi parametreleri ile kırılma enerjisi ve karakteristik uzunluk gibi temel malzeme özellikleri arasında bağlantılar kurmuştur. Bu çalışma, boyuta bağlı burulma davranışının altında yatan mekanizmaları anlamak için önemli teorik temeller sağlamıştır.

Abusiaf ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan daha yakın tarihli araştırmalar, bu araştırmayı yüksek dayanımlı beton uygulamalarına genişletmiştir. Geliştirilmiş malzeme özelliklerinin boyut etkisi parametrelerini değiştirdiğini ancak burulma yüklemesi altında boyuta bağlı davranışı açıkça göstermiştir.

2.3. Lif Takviyesinin Beton Özellikleri Üzerindeki Etkileri

Lif takviyesi, betonun mekanik özelliklerini geliştirme ve göçme karakteristiklerini değiştirme yöntemi olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölüm, lif takviyesinin, özellikle polipropilen liflerin, burulma performansı ve boyut etkileriyle ilgili beton davranışını nasıl etkilediğine ilişkin temel bulguları gözden geçirmektedir.

2.3.1. Taze Beton Özellikleri Üzerindeki Etki

Polipropilen liflerin dahil edilmesi taze beton özelliklerini önemli şekilde etkiler:

1. İşlenebilirliğin Azalması: Mindess ve Vondran (1988) tarafından yapılan araştırma, polipropilen lif eklemenin tipik olarak çökme ölçümlerini %0,5-1,0 hacim kesirlerinde %25-50 oranında azalttığını, daha yüksek lif içeriklerinde ise daha önemli azalmalar olduğunu göstermiştir. Bu işlenebilirliğin azalması, liflerin yüksek özgül yüzey alanından ve karıştırma sırasında oluşan mekanik kilitlemeden kaynaklanmaktadır.

2. Terleme Azaltma : Bayasi ve Zeng (1993) tarafından yapılan çalışmalar, polipropilen liflerin, takviye edilmemiş karışımlara kıyasla süzülme oranlarını %40-65 oranında azalttığını ve etkinliğin lif hacmi ve özgül yüzey alanı ile arttığını ortaya koymuştur. Bu azalma, liflerin taze beton içindeki su göçünü engelleyen üç boyutlu bir ağ oluşturmasıyla meydana gelir.

3. Ayırışma Direnci: Soroushian ve Bayasi (1991) tarafından yapılan araştırmalar, lif katkılı karışımlarda, özellikle dik yerleştirme eğimleri veya yüksek akışkanlıkta beton çözümleri içeren uygulamalar için yararlı olan, gelişmiş ayrılma direncini göstermiştir.

4. Hava İçeriği Etkileri (Air Content Effects): Kobayashi ve Cho (1981) tarafından yapılan araştırma, polipropilen liflerinin tipik olarak sıkışmayı artırdığını bulmuştur.

2.3.2. Sertleştirilmiş Beton Özellikleri Üzerindeki Etki

Polipropilen lif takviyesi, sertleştirilmiş betonun mekanik davranışını ve dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde değiştirir:

1. Çekme Dayanımı Arttırma: Banthia ve Gupta (2006) tarafından yapılan çalışmalar, %1 hacim kesirindeki polipropilen liflerin, lif geometrisi ve matris bileşimine bağlı olarak, bölünmüş çekme dayanımını %15-25 oranında artırdığını göstermiştir. Lifler, mikro çatlakları köprüleyerek, bunların kritik makro çatlaklara birleşmesini geciktirir.

2. Eğilme Tokluğu: Song ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan araştırma, ASTM C1018 parametrelerini kullanarak tokluk iyileştirmeleri olduğu ve %1,5 lif içeriği için çatlak sonrası enerji emiliminde 3-5 kat artış göstermiştir. Kalan mukavemet faktörü (R30,30), lif takviyeli numunelerde %0'dan (yalın beton) %45-60'a çıkmıştır.

3. Darbe Direnci: Sukontasukkul (2004) tarafından yapılan ağırlık düşürme testleri, polipropilen liflerin darbe direncini %300-400 oranında artırdığını, tek bir felaket kırılmasından çoklu çatlamlarla ilerleyen göçmeye geçiş yaptığını ortaya koymuştur.

4. Dayanıklılık İyileştirmeleri:

- Geçirgenlik: Alam ve arkadaşları (2012), çatlak genişliğinin kontrol altına alınması nedeniyle su geçirgenliğinde %40-60 oranında azalma olduğunu bildirmiştir.
- Aşınma Direnci: Nili ve Afroughsabet (2010) tarafından yapılan hızlandırılmış aşınma testleri, ASTM C944 testleri altında kütle kaybında %35'lik bir azalma olduğunu göstermiştir.
- Donma-Çözülme Dayanıklılığı: Qian ve Stroeven (2000) tarafından yapılan ASTM C666 testi, %0,9 lif içeriğinde ölçeklenme hasarında %50 azalma olduğunu göstermiştir.

2.3.3. Lif Takviyesinin Kırılma Mekanikği Üzerindeki Etkileri

Lif takviyesi ile kırılma mekanikği arasındaki etkileşim karmaşık boyuta bağılı olguları ortaya çıkarır:

1. Kırılma İşlem Bölgesi (FPZ) Modifikasyonu: Kim ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan dijital görüntü korelasyon çalışmaları, polipropilen liflerin FPZ uzunluğunu %30-50 oranında artırdığını ve makro çatlak oluşumundan önce enerji dağılımını iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

2. Çatlak Durdurma Mekanizması: Zhang ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan yüksek hızlı kamera gözlemleri, liflerin çatlak yayılma hızını 300-500 m/s'den (katkısız beton), 50-100 m/s'ye düşürdüğünü ve böylece göçme dinamiklerini temelden değiştirdiğini göstermiştir.

3. Boyut Etkisinin Azaltılması: Dönmez ve Bažant (2019) tarafından yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, %2 polipropilen liflerin eğilme numunelerinde boyut etkisi büyüklüğünü (Denk. 1.1'deki D_0) %40-60 oranında azalttığını ve bunun daha sünek göçme modlarına geçişi gösterdiğini öne sürmüştür.

2.4. Lif Takviyeli Betonun Burulma Davranışı

1. Eğilme ve basınç davranışı üzerine kapsamlı araştırmalar mevcut olsa da, burulma göçmesi üzerine yapılan çalışmalar sınırlı kalmaktadır:

2. Burulma Mukavemeti Artışı: Campione ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan deneysel çalışmada, %1 lif içeriği için son burulma momentinde %20-35 artış bildirilmiştir. Polipropilen lifler %12-18 oranında olmasına karşın önemli iyileştirmeler göstermiştir.

3. Göçme Modu Geçişi: Juarez ve arkadaşları (2017) tarafından yapılan araştırma, burulma altındaki lif katkılı kirişlerde üç farklı göçme biçimi belgelemiştir:

- Aşama I: Küçük matris çatlamaıyla elastik davranış
- Aşama II: Lif köprülemeli dağıtılmış mikro çatlaklar
- Aşama III: Lif çekilmesiyle lokalize makro çatlaklar

4. Boyut Etkisi Etkileşimi: Lee ve Lee (2019) tarafından farklı boyutlu burulma numuneleri üzerinde yapılan sınırlı çalışmalar (1:4 ölçek aralığı), lif takviyesinin boyut etkisi duyarlılığını %30-40 oranında azalttığını öne sürmüştür. Ancak sonuçlar yüksek değişkenlik ($\pm\%15$) göstermiştir.

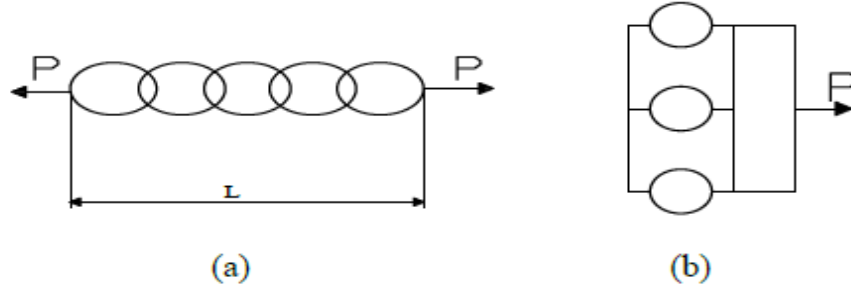


3. BOYUT ETKİSİ

- Farklı boyutlardaki geometrik benzer elemanların taşıma kapasitelerinde boyut etkisi gözlemlenmektedir.

- Olasılıksal boyut etkisi: Weibull tarafından 1938 yılında ortaya konan teorik yaklaşımdır.

Weibull teorisi, zincir uzunluğu arttıkça zayıf bir halka bulunma ihtimalinin yükseldiğini öne sürmektedir. Bu durumda, zincir uzadıkça kopma dayanımının düşeceği öngörülmektedir (Şek. 2.a). Teoride yapı, birbirine bağlı halkalar nedeniyle seri bağlı olarak modellenmiştir. Buna karşılık, Donell Modeli (1950) yapıyı paralel bağlı sistem olarak ele almaktadır (Şek. 2.b). Ancak gerçek yapı davranışı, hem seri hem paralel bağlantı özellikleri gösteren karmaşık bir nitelik taşımaktadır. Weibull teorisinin (seri bağlı model) beton yapılar için uygun olmadığı değerlendirilmektedir.



Şekil 2. Olasılıksal Boyut Etkisi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

a) Weibull zincir teorisi, b) Donell paralel bağ teorisi

- Maksimum yük sonrasında gözlemlenen yer değiştirmelerde de boyut etkisi belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır.

Boyut etkisi temel olarak iki farklı şekilde incelenebilir. İlk tür, sonlu elemanlar analizinde farklı boyut parametrelerinin kullanımından kaynaklanan farklılıklardır. İkinci tür ise yapısal boyut etkisi olarak adlandırılan ve bu çalışmanın temel inceleme konusunu oluşturan etkidir. Boyut etkisi, geometrik olarak benzer ancak farklı boyutlardaki yapıların P göçme yükleri (maksimum yük) karşılaştırılarak tanımlanmaktadır. Burada σ_N , nominal göçme gerilmesi olarak ifade edilmektedir.

İki boyutlu sistemlerde (örneğin levhalar için) $\sigma_N = C_N P/bD$. Üç boyutlu sistemlerde (örneğin silindirik yapılar için) $\sigma_N = C_N Pb/D^2$

Bu denklemlerde:

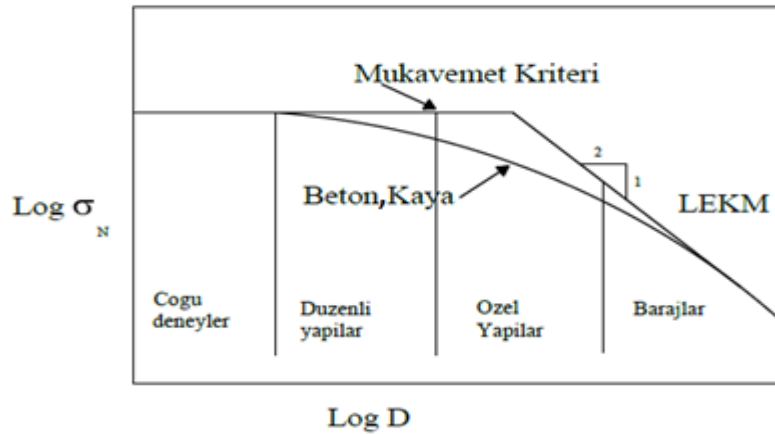
b = İki boyutlu yapı elemanının kalınlığını,

D = Yapının karakteristik boyutunu temsil etmektedir.

σ_N' nin bağıl değerinin hesaplanması yeterli olduğundan, D boyutu kiriş yüksekliği veya kesit kenar uzunluğu gibi parametreler alınabilir. C_N ise uygunluk koşullarını sağlamak amacıyla kullanılan boyutsuz bir katsayıdır.

Beton yapıların davranışı, boyut etkisinin belirgin olduğu lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ile boyut etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu taşıma gücü teorileri arasında bir konumdadır. Plastik limit analizinde (taşıma gücü) veya elastik analizde (emniyet gerilmeleri yöntemi), gerilme temelli herhangi bir teoriye göre σ_N göçme gerilmesi yapı boyutundan bağımsızdır. Bu nedenle eğilme, kesme ve burulma etkileri, elastik veya plastik teoriye dayanan formüllerle belirlenebilmektedir.

Beton elemanlarda göçme mekanizması, tek bir noktada başlayarak çatlak önünde sonlu bir kırılma bölgesi oluşması şeklinde gelişir. Bu durum, göçmenin ilerleyici bir karakterde olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) göçme, çatlak ucundaki lokal bölgede meydana gelmekte ve elemanın diğer bölgelerinin elastik davranışını sürdürdüğü kabul edilmektedir.



Şekil 3. Boyut Etkisi Yasası Type II

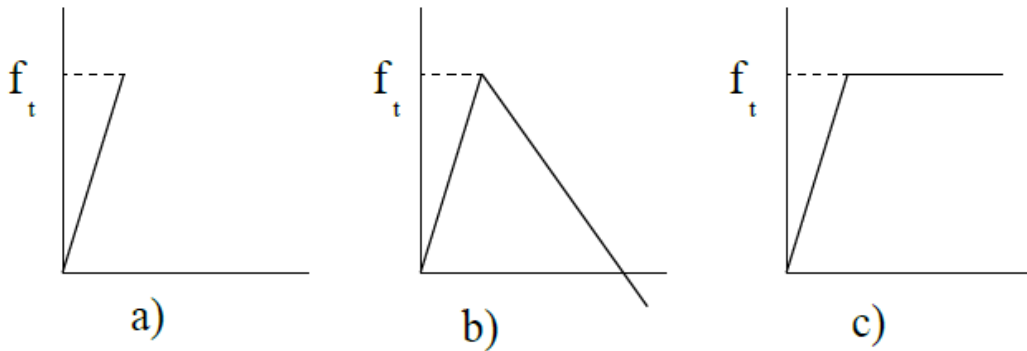
Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tasarım süreçlerinde boyut etkisinin yeterince dikkate alınmaması, kırılma mekaniği alanında çalışan araştırmacılar tarafından sıklıkla vurgulanan bir sorundur. Geometrik olarak benzer ancak farklı boyutlardaki yapı elemanlarının taşıma kapasitelerinden hesaplanan σ_N nominal dayanım değerleri karşılaştırıldığında, bu değerlerin sabit kalması durumunda boyut etkisinin olmadığı sonucuna varılır. Öte yandan, σ_N değerlerinin yapı boyutlarına bağlı olarak değişim göstermesi, belirgin bir boyut etkisinin varlığına işaret etmektedir.

Geleneksel yapısal analiz yöntemlerinden olan Emniyet Gerilmeleri Yöntemi (elastik analiz) ve Taşıma Gücü Teorisi (plastik limit analiz), yapı boyutundan bağımsız sonuçlar üretmektedir. Bu nedenle, söz konusu yöntemler boyut etkisini dikkate almayan yaklaşımlar olarak kabul edilmektedir. Her iki teorik çerçevede de, göçme kriterlerinin belirlenmesinde yapısal ölçeğin bir parametre olarak yer almaması karakteristik bir özelliktir.

$\log \sigma_N - \log D$ grafiğinde, elastik ve plastik göçme kriterleri yatay bir doğru ile temsil edilmektedir (Şekil 3). Bu gösterim, söz konusu kriterlerin boyut etkisi göstermediğinin matematiksel kanıtı niteliğindedir (Bažant, 1984). Buna karşılık, lineer elastik kırılma mekaniği teorisinin $-1/2$ eğimli karakteristik davranışı, belirgin bir boyut etkisini ortaya koymaktadır.

Deneysel veriler, beton yapıların davranışının bu iki uç teorik yaklaşım arasında konumlandığını göstermektedir (Bažant & Pfeiffer, 1987).



Şekil 4. a) Gevrek b) Yarı Gevrek c) Sünek Malzemeler

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Beton yapıların göçme davranışı, maksimum yük kapasitesine ulaşmadan önce belirgin çatlak oluşumu ve çatlama bölgesinin genişlemesi şeklinde gerçekleşir. Kırılma mekaniğinin temel prensipleri 20. yüzyıl ortalarında ortaya konmuş olmasına rağmen, günümüz tasarım yaklaşımları bu teoriye tam olarak dayanmamaktadır. Bunun temel nedeni, kırılma mekaniğinin nispeten yeni bir disiplin olması ve başlangıçta yalnızca cam gibi homojen gevrek malzemeler (Şek. 4.a) veya beton, kaya ve deniz buzu gibi yarı gevrek malzemeler (Şek. 4.b) için uygulanabilir olmasıdır.

Beton için kırılma teorilerinin uygulanması ilk olarak Kaplan tarafından önerilmiş olmasına karşın başarılı sonuçlar alınamamıştır. Beton yapılarda kırılma sürecinde, çatlak önü bölgesindeki agrega taneleri ve boşlukların oluşturduğu gerilme köprüsü etkisi ile çatlak dağılımı sonucu ortaya çıkan yumuşama davranışı dikkate alınmalıdır. Buna karşılık, donatı çeliği gibi sünek malzemeler elasto-plastik göçme karakteristiği sergiler (Şek. 4.c).

Son on yılda betona uygulanan kırılma mekaniği yaklaşımları önemli gelişmeler kaydetmiştir. Beton yapı tasarımı tarihinde iki önemli devrim yaşanmıştır: Birinci Devrim (1900-1930): Betonun çekme gerilmelerine dayanmadığı varsayımına dayanan Emniyet Gerilmeleri Yöntemi.

İkinci Devrim (1940-1970): Plastik limit analizine dayanan Taşıma Gücü Yöntemi

Kırılma mekaniğinin beton yapıların tasarımında kullanılmasına üçüncü devrim olarak bakılmaktadır. Kırılma mekaniğinin beton tasarımında kullanılması önemli yararlar sağlayacaktır. Öyle ki farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak olası olacaktır. Böylece yapısal güvenlik ve ekonomi artar. Bununla yeni beton malzemesi ve yeni tasarımlar gerçekleşecektir. Özellikle yüksek dayanımlı betonlar, lifli beton yapılar, çok büyük boyutlu beton yapılar, ön gerilmeli yapılar, beton barajlar, nükleer reaktör hücreleri gibi güvenliğin çok yüksek olduğu ve hasarları büyük felaketlere neden olabilecek yapılar için kırılma mekaniğine göre tasarım çok önemlidir. Hawkins betonarme yapı tasarım hesabında kırılma mekaniği kullanmadığı için 1984 yılına kadar Amerikan betonarme yapı yönetmeliğinin (ACI 318) 29 kez düzeltildiğini ya da değiştirildiğini belirtmiştir.

Boyut etkisinin dayandığı kırılma mekaniği yapıda göçmenin yayılmasını göz önüne alan mukavemete dayanan enerji kriteri kullanan, göçme teorisi olarak tanımlanabilir.

3.1. Boyut Etkisinin Enerji İle Açıklanması

Enerjinin korunumu ilkeleri çerçevesinde, kırılma mekaniği prensipleri boyut etkisinin anlaşılmasında temel oluşturmaktadır. Bu teorik ilişki, Şek. 5' te görselleştirilen üniform gerilme dağılımlı panel modeli üzerinden analiz edilebilir. İncelenen modelde, panelin sol kenarında yer alan lokal bölgenin mekanik performansının diğer bölgelere göre daha düşük seviyede olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayım, çatlak bantlarının oluşum sürecinin söz konusu zayıf bölgeden başlayarak sağa doğru ilerleyeceğini göstermektedir.

Beton gibi kırılkan ve heterojen malzemelerde, çatlak ilerleme mekanizmasının doğru şekilde modellenebilmesi için çatlak önü bölgesindeki mikroçatlak dağılımının dikkate alınması kritik önem taşımaktadır. Deneysel veriler, bu bölgenin geometrik boyutlarının yapısal ölçekle doğrudan ilişkili olmadığını, bunun yerine malzemenin karakteristik özelliği olan maksimum agrega tane boyutuyla bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

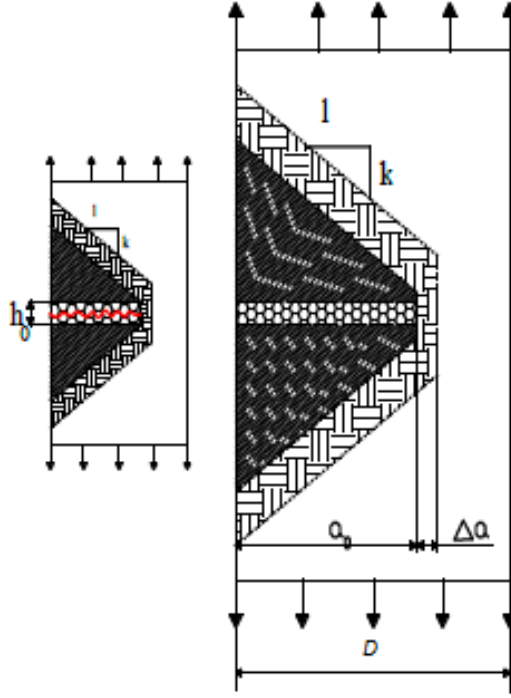
Temel hipotezler şu şekilde özetlenebilir:

1. Çatlak Bandı Genişliği (h_0): Aynı beton karışımıyla üretilen geometrik benzer yapı elemanlarında, kırılma öncesi oluşan çatlak bandı genişliğinin yapı boyutundan bağımsız ve sabit değerde kaldığı gözlemlenmiştir.

2. Çatlak Uzunluğu (a_0): Maksimum yük altında belirlenen karakteristik çatlak uzunluğunun, yapının belirleyici boyutu (D) ile lineer bir orantı içinde olduğu (a/D oranı) hem nümerik analizler hem de deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Bu enerji temelli yaklaşım, özellikle farklı ölçeklerdeki yapısal davranışların karşılaştırılmasında, kırılkan malzeme mekaniğinin temel prensiplerinin anlaşılmasında, yapısal tasarım parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir teorik altyapı sunmaktadır. Betonarme sistemlerde gözlemlenen bu mekanizma, geleneksel

taşıma gücü teorilerinin ötesinde bir analiz perspektifi gerektirmektedir.



Şekil 5. Boyut Etkisinin Enerji ile Açıklanması (h_0 - genişliği, a_0 Uzunluklu Çatlak Bandı İle Kırılmanın Oluşumu).

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 5'te gösterilen taralı alan, betonun deformasyonu sırasında depolanan elastik enerjinin ($\sigma^2/2E$) açığa çıkış sürecini temsil etmektedir. E betonun Young Modülü.

a_0 başlangıç çatlak uzunluğunun Δa kadar artması durumunda, açığa çıkan ek uzama enerjisi ($\sigma^2/2E$), Δa genişliğindeki sık taralı alan şeridi ile temsil edilir. Bu şerit, orijinal taralı bölgeden daha büyük bir enerji salınımına karşılık gelir. Çatlak ilerledikçe, enerji dissipasyonu artar ve bu durum kırılma mekaniği açısından kritik önem taşır.

$$\Delta a = h_0 \Delta a + 2ka \Delta a$$

Şekil 5'te görülen eğim, yapı geometrisine bağlı ampirik bir sabit olarak tanımlanmaktadır. Boyut etkisi analizlerinde önemsiz bir parametre olan k değeri, hem

sonlu eleman yöntemleri hem de deneysel çalışmalar sonucunda $\pi/2$ olarak belirlenmiştir.

Yapıda depolanan potansiyel enerji (W), eleman kalınlığı (b) ve malzemenin karakteristik kırılma enerjisi (G_f) arasındaki enerji dengesi, boyut etkisinin temelini oluşturmaktadır. Çatlak bandının birim uzunluğu başına gereken enerji, büyük yapılarda Δa çatlak uzaması sonucu malzemenin temel özelliği olan G_f kırılma enerjisine eşit olmaktadır. Bu durumda, nominal gerilme (σ_N) değeri, enerjinin açığa çıktığı hacimsel bölge arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Büyük ölçekli yapılarda çatlak ilerlemesi için gerekli enerji miktarının artması, σ_N değerlerinin düşmesine neden olmaktadır. Bu mekanizma, enerji dissipasyonu ile yapısal davranış arasındaki temel ilişkiyi ortaya koymakta ve boyut etkisinin fiziksel kökenini açıklamaktadır.

Bu nedenle, σ_N 'nin yapı boyutuna bağlı olarak değişim göstermesi, belirgin bir boyut etkisinin varlığını kanıtlamaktadır.

Dış yüklemeler altında, Şekil 5'te görülen taralı şerit bölgesinden açığa çıkan enerji, bu boyut etkisi mekanizmasının temelini oluşturmaktadır.

$$\Delta W = b(h_0 \Delta a + 2ka \Delta a) \sigma_N^2 / 2E \quad (3.1)$$

Levhada yutulan enerji,

$$\Delta W = G_f b \Delta a \quad (3.2)$$

$$\sigma_N^2 = [h_0 + 2k(a/D)D] = 2EG_f \quad (3.3)$$

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_0 + 2k(\frac{a}{D})D} \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

$$D_0 = \frac{h_0 D}{2ka} \quad \text{ile gösterirsek} \quad (3.5)$$

Pay ve Payda f_t malzeme çekme dayanımı ile çarpıldığında,

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f}{h_0 + 2k\left(\frac{D}{D_0}\right)} \right]^{1/2} \frac{f_t}{f_t} \quad (3.6)$$

elde edilir. Sonuçta

$$\sigma_N = \left[\frac{2EG_f f_t^2}{h_0 f_t^2 + 2k\left(\frac{D}{D_0}\right)} \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

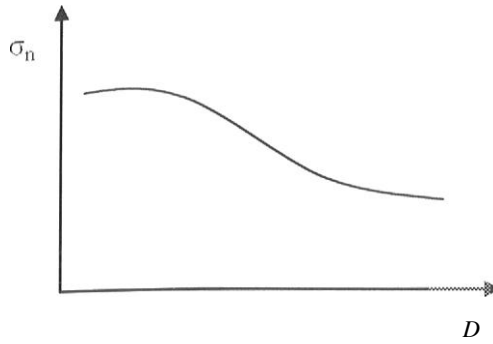
bulunur.

Bazant'ın önerdiği boyut etkisi yasası iki tiptir.

a) Type.I. Çatlaksız elemanlar için geçerli denklem

$$\sigma_N = f_r^\infty \left(1 + \frac{D_b}{D} \right) \quad (3.8)$$

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



Şekil 6. Boyut Etkisi İfadesinin Grafik Gösterimi (Type I)

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

b) Type II Çatlaklı elemanlarda boyut etkisi

$$\sigma_N = B f_t (1 + \beta)^{-1/2}, \quad B = 2E G_f / h_0 f_t^2)^{1/2}, \quad \beta = D/D_0 \quad (3.9)$$

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:

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

Bu çalışmada, geometrik yapılar ve malzeme özellikleri için $r \cong 1$ değerinin geçerli olduğu tespit edildiğinden, analizlerde Denklem (3.9) kullanılmıştır. Söz konusu denklem yaklaşık bir çözüm sunmakla birlikte, 1:20 oranına kadar olan boyut değişimleri için yeterli doğrulukta sonuçlar vermektedir. Daha geniş ölçekli değişimlerde ise daha karmaşık formülasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Denklem (3.9)'un türetilmesinde aşağıdaki temel varsayımlar kullanılmıştır:

1. Göçme sırasında çatlak ucu bölgesinde açığa çıkan enerji miktarı, çatlak ilerleme uzunluğu ile doğrudan ilişkilidir.
2. Enerji salınımı, maksimum agrega tane boyutunun birkaç katı büyüklüğündeki çatlak bant genişliğine bağlı olarak değişim göstermektedir.
3. Geometrik olarak benzer farklı ölçeklerdeki yapı elemanlarında oluşan kırılma yüzeyleri, birbirleriyle geometrik benzerlik göstermektedir.
4. Yapısal göçme mekanizması, çatlak oluşumuyla değil, çatlaklı bölgenin tüm kesiti kapsayacak şekilde yayılım göstermesiyle meydana gelmektedir.

Bazant'ın boyut etkisi teorisinde öngörülen ve Denklem (3.9)'da formüle edilen ilişkiye göre, yapı karakteristik boyutu (D) kritik bir eşik değerin (D_0) altında kaldığında ($D \ll D_0$), $\beta = D/D_0$ boyut oranı birim değere kıyasla ihmal edilebilir düzeyde küçük kalmaktadır. Bu durum, söz konusu parametrenin mühendislik hesaplamalarında dikkate alınmasına gerek olmadığını göstermektedir.

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

Eğer yapı çok büyük ise (D/D_0) bir değeri β değeri yanında çok küçüktür,

$$\sigma_N = B f_t \beta^{-1/2} \text{ olur.}$$

Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği temsil edilmektedir ya da her iki tarafın Logaritması alındığında $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, Şekil 7'de logaritmik eksen takımında, eğimli -1/2 olan doğru ile göstermektedir (Şekil 7).

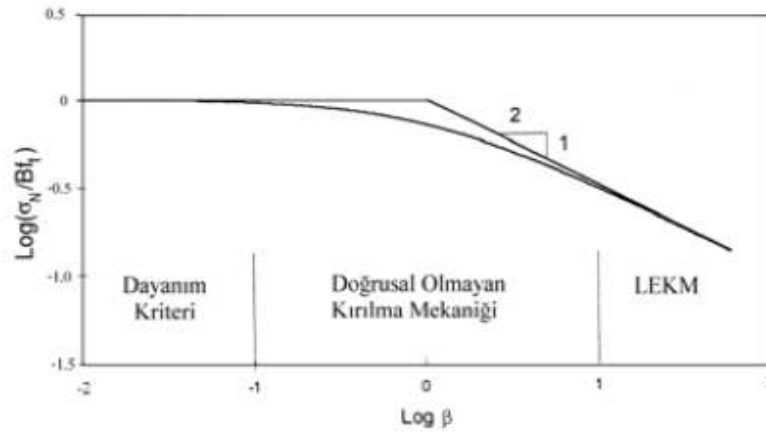
Asimtonun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$Bf_i = Bf_i \beta^{-1/2} \quad (3.10)$$

$\beta^{-1/2} = 1$, buradan $\beta = 1$, $D = D_0$ bulunur.

β gevreklik sayısıdır.

Burada belirtilen gevreklik kavramı, Gustafsson ve Hillerborg ile Carpinteri tarafından tanımlanan gevreklik sayısından farklılık göstermektedir. Söz konusu araştırmacıların tanımladığı gevreklik sayısı, yapının boyutunun, çatlak ucunda oluşan plastik bölgenin çapına oranı şeklindedir. Buna karşın, (3.9) numaralı denklem yalnızca aynı beton sınıfı ve aynı maksimum agrega boyutuna sahip yapılar için doğrudan geçerlidir. Agrega boyutunda küçük farklılıkların bulunması durumunda bu denklem yaklaşık olarak kullanılabilir; ancak agrega özelliklerinde belirgin farklılıklar söz konusu olduğunda, (3.9) denklemine uygun düzeltme terimlerinin eklenmesi gerekmektedir.



Şekil 7. Boyut Etkisi ifadesinin Grafik Gösterimi (Type II)

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

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

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

Uygulamada; (Bkz. Şekil 7)

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

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

$\beta > 10$ ise LEKM geçerlidir.

$\beta < 0,1$ için Şekil 7' deki yatay asimtot lineer olmayan eğriden %4,7 oranında sapar.

$\beta < 10$ için eğimli asimtot (LEKM) lineer olmayan bölge için β 'nin değişim aralığı $1/255 \beta < 25$ arasında olmalıdır. $\beta \ll 1$ ya da $\beta \gg 1$ lineer olmayan kırılma mekaniği gereksizdir.

Beton çekme dayanımı genelde,

$$f_t = 0,35 \sqrt{f_c} \quad (3.11)$$

alınabilir.

f_c - beton basınç dayanımıdır. Boyut etkisi denkleminin üstünlüğü lineer regresyon için düzenlenebilir olmasıdır. Bu düzenlemeler yapılırsa deney sonuçları;

$$Y = AX + C \quad (3.12)$$

biçiminde bir doğru ile temsil edilebilir.

3.1.1. Type I (Bazant) Boyut Etkisi

Type I boyut etkisi çatlaksız (çentiksiz) numuneler için geçerlidir. (3.8)

denklemleri düzenlendiğinde, $f_r^\infty = \sigma_0$ değişken dönüşümü yapılır ise

$$\frac{1}{\sigma_N} = \frac{1}{\sigma_0} + \frac{1}{\sigma_0} \frac{D}{D_0} \quad (3.13)$$

(3.11) de bağıntıda,

$$Y=l/\sigma_N,$$

$$X=D,$$

$$C=l/\sigma_0,$$

$$A = C / D_0 \quad (3.14)$$

$\sigma_N = \frac{3P_u L}{2bD^2}$, göçme yüklerinden elde edilir. D_0 ve σ_N lineer regrasyondan elde edilerek boyut etkisi bağıntısı elde edilmiş olur.

3.1.2. Type II (Planas) Boyut Etkisi

Çatlaklı (çentikli) numuneler için geçerlidir. Type II boyut etkisi denklemi (3.9) düzenlenirse:

$$\frac{\sqrt{1+\beta}}{B} = \frac{f_t}{\sigma_N} \quad (3.15)$$

Her iki tarafın karesi alınır,

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N}\right)^2 = \frac{1 + \frac{D}{D_0}}{B^2} \quad (3.16)$$

Kesir dağıtılarak,

$$\left(\frac{f_t}{\sigma_N}\right)^2 = \frac{1}{B^2} + \frac{1}{B^2} \frac{D}{D_0} \quad (3.17)$$

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

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

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

$$X=D,$$

$$A=C/D_0 \quad \text{elde edilir.} \quad (3.18)$$

Bu dönüşüm sayesinde, X ve Y eksenleri üzerinde elde edilen veriler doğrultusunda bir doğru denklemi oluşturulabilir. Ancak deneysel veriler genellikle tam bir doğrultu yerine belirli bir saçılım gösterdiğinden, doğrusal regresyon analizi uygulanarak A eğim katsayısı ile C sabiti (doğrunun Y eksenini kestiği nokta) belirlenir. Elde edilen bu parametreler, (3.9) numaralı denklemde yer alan B ve D_0 sabitlerinin hesaplanmasında kullanılır. Böylece, ilgili sistem için boyut etkisi yasası ortaya konmuş olur.

3.2. Boyut Etkisinde Lineer Regresyon Kullanımı

Boyut etkisinin bağımlı değişken üzerindeki istatistiksel etkisini analiz edebilmek amacıyla doğrusal regresyon yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal regresyon, bir bağımlı değişken ile bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi nicel olarak incelemeye olanak sağlayan bir analiz tekniğidir. Kurulan model aracılığıyla, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkileri katsayılar yoluyla yorumlanmakta; bu katsayılar ilişkinin yönünü ve şiddetini ortaya koymaktadır. Modelin geçerliliği ve istatistiksel anlamlılığı ise ilgili test sonuçları doğrultusunda değerlendirilmiştir. (Gujarati ve Porter, 2009).

4. DENEYİN YAPILIŞI

İstanbul Bilgi Üniversitesinin laboratuvarında 2018 yılında gerçekleştirdiği deneyinde kullanılan numune, malzeme ve test düzeneği özellikleri şu şekildedir.

4.1. Numune Tasarımı

Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3' de görülmektedir.

Tablo 1. Numunelerin Geometrik Özellikleri

Boyutlar	Küçük	Orta	Büyük	Ölçek Faktörü
Enine kesit	25×25 mm	50×50 mm	100×100 mm	1:2:4
Boy	125 mm	250 mm	500 mm	1:2:4
Açıklık	100 mm	200 mm	400 mm	1:2:4

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 2. Polipropilen Lif Özellikleri

Malzeme özelliği	Değer
Tip	Monofilament
Uzunluk	30-50 mm
Çap	0,30-0,35 mm
Çekme Dayanımı	547-658 MPa
Modül	3,5-7,5 GPa
Dozaj	%0, %1, %2 hacimce

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Beton karışımı içeriği:

- Çimento: CEM I 42.5R
- İnce kum: 0-5 mm kırılmış kum
- Kaba kum: 5-10 mm çakıl
- Su-Çimento Oranı: 0.45
- Süper akışkanlaştırıcı: Polikarboksilat bazlı

Tablo 3. Lifsiz Beton İçin Standart Karışım

Bileşen	Kütle Oranı
Çimento	1
Kum	1.54
Çakıl	2,58
su	0,45

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Lif takviyeli karışımlarda aynı oranlar korunmuştur.

4.2. Üretim Süreci

1. Kalıp Hazırlığı:
 - Çelik kalıplar numuneler dökülmeden önce makina yağı ile yağlanmıştır.
 - Boyutsal tolerans $\pm 0,5$ mm olarak korunmuştur.
2. Karıştırma İşlemi:
 - Beton harcı hazırlandıktan sonra lifler eklenmiştir.
 - Toplam 8-10 dakika arası karıştırılmıştır
3. Kırleme Rejimi:
 - 24 saat nemli çuval bezi altında saklanmıştır.
 - $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de su kırı altında 28 gün saklanmıştır.

4.3. Test Düzenegi

Deneyde kullanılan test düzenegi ve ekipmanların özellikleri şu şekildedir.

4.3.1. Burulma Yükleme Düzenegi

Özel olarak tasarlanmış ekipmanlar:

- NPI 100×50×4.5 I-kiriş yük transferi için kullanılmıştır.
- 50 kN kapasiteli hidrolik load-cell (yük hücresi) kullanılmıştır.
- Yarım küresel reaksiyon bilyaları

4.3.2. Deneyde kullanılan araçlar

- Yük Hücresi: 50 kN kapasite, $\pm 0.1\%$ doğruluk
- LVDT'ler: ± 5 mm aralık, 0,001 mm çözünürlük
- Gerilme Ölçerler: 120 Ω , 2 mm gösterge uzunluğu
- 3D DIC Sistemi: 5 MP kamera, 30 fps

4.4. Yükleme Sırası

Yükleme Hızları:

- Küçük numunelerde: 0,084 kN/dak
- Orta numunelerde: 0,33 kN/dak
- Büyük numunelerde: 1,34 kN/dak

Veri Toplama:

- 10 Hz'de sürekli kayıt
- Tetikleme eşiği: Beklenen göçme yükünün %0,5'i

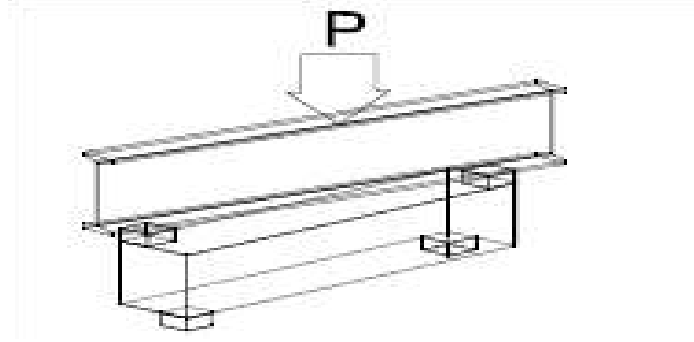
Göçme Sonrası Analiz :

- Çatlak desen dokümantasyonu
- Lif çekme uzunluğu ölçümü
- Göçme yüklerinde boyut etkisi analizi

4.5. Boyut Etkisinin Uygulanması

Boyut etkisi düzeltilmesi, Bazant'ın yarı-ampirik boyut etkisi yasasına göre bu formülle yaklaşık olarak tanımlanabilir. Bu yasaya göre, güç formülü aşağıdaki gibi boyuta bağlı bir çarpanla Denk. 4.1.' de verilmiştir.

$$\sigma_N = \sigma_0 \left(1 + \frac{D}{D_0}\right)^{-1/2} \quad (4.1)$$



Şekil 8. Numunenin Yerleşimi

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

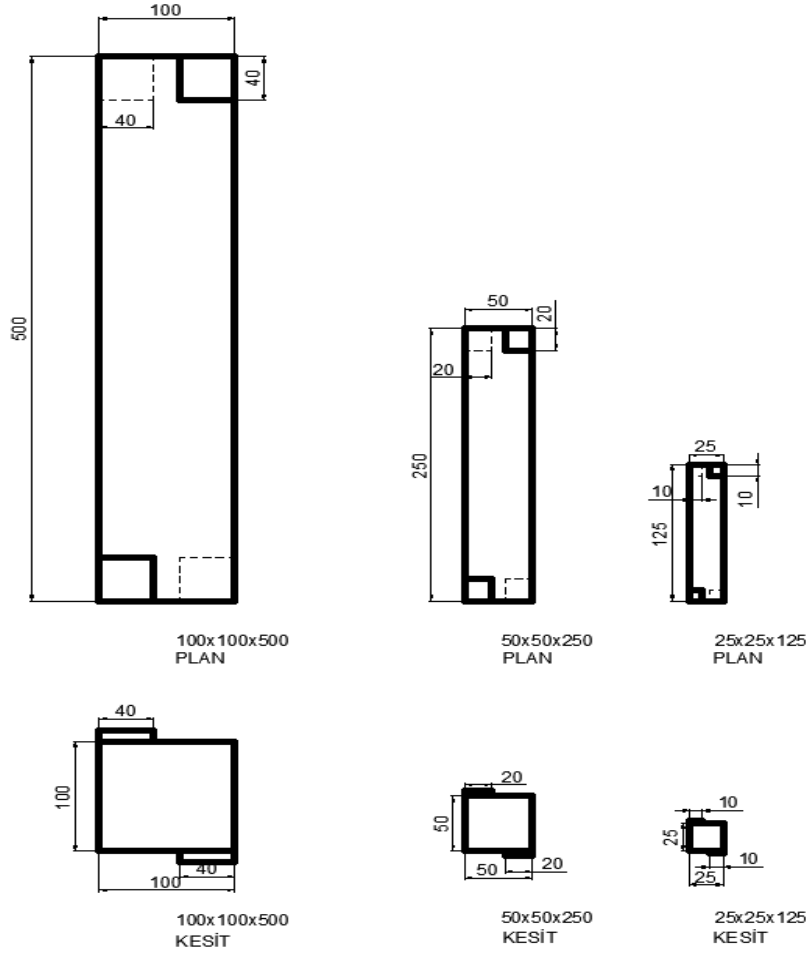
Burada D_0 ve σ_0 değerleri yapının şekline ve yükleme türüne bağlı olan iki ampirik sabittir. Yapının karakteristik boyutu D , üç boyutlu benzerlik için dört nokta kirişlerin yüksekliği olarak alınmıştır. D , kirişin yüksekliği, genişliği veya uzunluklarından biri olarak alınabilir. Boyut etkisi, bir yapının nominal dayanımının boyuta bağımlılığı olarak anlaşılmaktadır. Bir tasarım formülünün olası bir biçimi olarak önerilen formül (Denk. 4.1)'de, σ_N , (Denk. 4.2) ile verilen kirişin uç lifindeki maksimum (nihai) yükteki nominal gerilmenin değeridir.

$$\sigma_N = \frac{M}{S}, M = P_u(b-a)/2, S = 1.35b^3/3 \quad (4.2)$$

4.5.1. Test Örnekleri ve Deneysel Yöntem

Çalışmamızda beton kirişlerin maksimum burulma yükleri ölçülmüştür. Hem lifsiz hem de polipropilen takviyeli beton kirişlerde boyut etkisini incelemek için 18 farklı beton prizma kullanıldı. Bu kare prizmaların boyutları (Şekil 9); 100x100x500 mm, 50x50x250 mm, 25x25x125 mm'dir. Lif katkısız ve polipropilen takviyeli kirişlerde burulma göçmesini araştırmak için yük belirli noktalara uygulanmalıdır. 600 mm uzunluğunda bir NPI 100x50x4.5 I-Kiriş standardı, yükü bu belirli noktalara aktarmak için kullanıldı.

Bu özel konumlar, beton kirişlerin burulma göçmesiyle ilgili gerçek değerlere sahip olması ve kirişlerin üst ve alt kısımlarına ve beton kirişin köşelerine yerleştirilmesiyle belirlenmiştir. Bu çelik yapıların ebatları 10x10x5 mm, 20x20x10 mm ve 40x40x20 mm'dir.



Şekil 9. Numune Boyutları

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Beton karışımı hazırlanıp kirişler İstanbul Bilgi Üniversitesi laboratuvarında dökülüp kür havuzunda 160 gün bekletilip kırılmıştır.(2018)

Beton kirişler, tüm kirişler için 50 kN yük kapasiteli load-cell kullanılarak MTS'de test edilmiştir. MTS Test, uzun ve büyüyen bir endüstri liderleri ve birinci sınıf markalar listesine hizmet etmektedir. Bu araştırmacılar, geliştiriciler ve üreticiler, teknoloji, uygulama bilgisi ve test uzmanlığının bir kombinasyonu için MTS'ye güvenmektedir. Bu testler, metalleri, kompozitleri, kayayı, betonu, ahşabı, köpüğü, plastiği ve diğer birçok yaygın malzemeyi karakterize etmek için kullanılan temel bir test türüdür. Statik sıkıştırma testleri, göçmeye kadar artan bir sıkıştırma yükü uygular veya belirli bir yük altında belirli bir süre tutar. Dinamik yükleme testleri, iki (itme-çekme) yük koşulu arasında geçiş yapmayı içerir. Numunenin yapısına bağlı olarak,

basınç testleri malzemenin nihai akma dayanımını, hizmet ömrünü veya diğer kritik performans özelliklerini belirlemeye yardımcı olabilir (MTS,).

Yükleme hızı bütün numunelerde göçmeye aynı zamanda (≈ 3 dak.) ulaşacak biçimde farklı seçilmiştir. En büyük numuneler (100x500) için 1,34 kN/dk, orta boy numuneler (50x250) için 0,33 kN/dk, en küçük numuneler (25x125) için 0,084 kN/dk seçilmiştir. Ayrıca bir deneyin uygulanması esnasında hata oluşmuştuğu için ilgili veriler kullanılmamıştır.

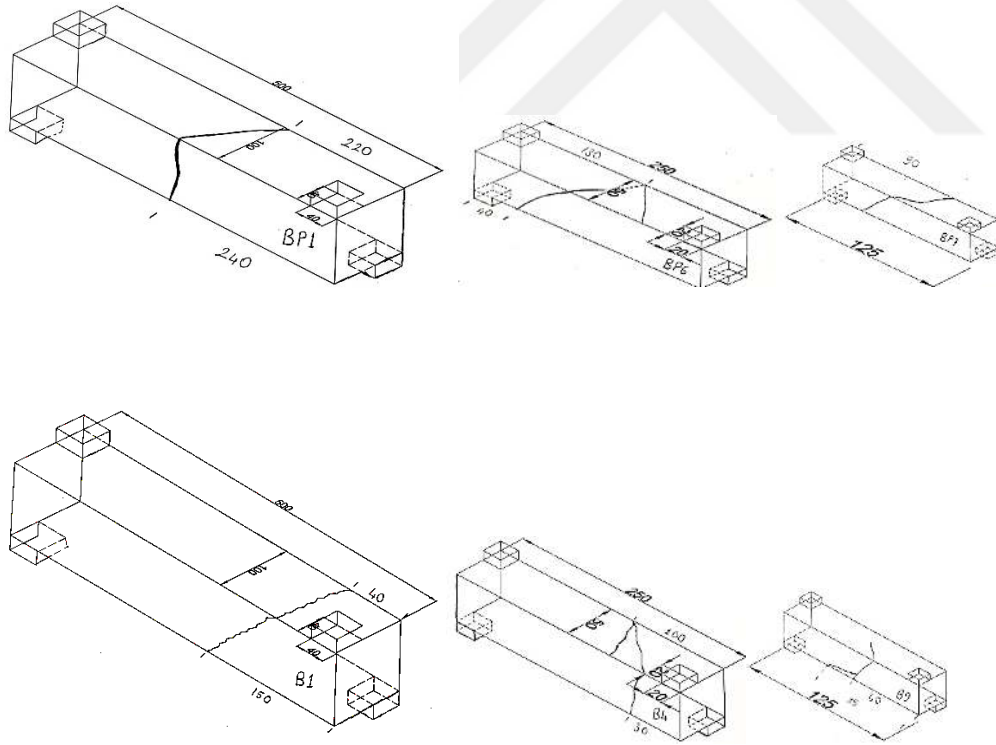


Fotoğraf 1. Deneyde Kullanılan MTS

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Beton, düşük çekme dayanımı ve çekme gerilme kapasitesine sahip kırılgan bir malzemedir. Betondaki bu zayıflıklar, yüksek teknik özelliklere sahip farklı malzemelerden yapılmış lifler kullanılarak giderilebilir ve bu çalışmada betona hacimce %1 ve %2 oranında polipropilen lifler eklenmiştir. Polipropilen lif takviyeli betonun taze ve iyileştirilmiş özellikleri incelenmiştir. Betonun karışım tasarımı sırasında agrega boyutunun betonun basınç dayanımını etkileyen faktörlerden biri olduğu gözlemlenmiştir, kullanılan agrega boyutları ince agrega olarak kabul edilen 5 mm ve altı, iri agrega olarak kabul edilen 10 mm'dir. En büyük agrega boyutu $d_{max}=10$ mm. dir.

Sertleşmiş betonda, polipropilen lifler çatlak durdurucu görevi görür. Herhangi bir ikincil takviye gibi, lifler betonu bir arada tutarak çatlakların yayılmasını durdurma eğilimindedir. Böylece çatlaklar daha geniş yayılamaz veya daha uzun büyüyemez. Ancak, polipropilen lifler beton boyunca dağıtıldığından, çatlakların agrega-macun arayüzünde başladığı yere yakın bir yerde etkilidirler.



Şekil 10. Deney Sonrası Numunelerde Oluşan Çatlaklar

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



Fotoğraf 2. Deneyde Kullanılan Polipropilen Lifler

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Polipropilen lifin özellikleri Tablo 4. de verilmiştir.

Tablo 4. Çeşitli Polipropilen Liflerin Özellikleri

Lif tipi	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastikite Modülü (GPa)	Özgül Yüzey (m ² /kg)	Yoğunluk (kg/cm ³)
monofilament	30-50	0.30-0.35	547-658	3.5-7.5	91	0.9

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Çatlaklar, beton yapıları geçirgen elemanlara dönüştürdükleri ve dolayısıyla yüksek korozyon riski taşıdıkları için önemli bir rol oynarlar. Çatlaklar sadece betonun kalitesini düşürmekle ve estetik olarak kabul edilemez hale getirmekle kalmaz, aynı zamanda yapıları hizmet dışı bırakır. Bu çatlaklar belirli bir genişliği aşmazsa ne yapıya ne de hizmet verebilirliğine zarar vermezler. Bu nedenle, çatlak genişliğini azaltmak önemlidir ve bu, betona polipropilen lifler eklenerek başarılabilir.

Kullanılan polipropilenin uzunluğu daha küçük numunelere kıyasla daha uzundu, bu nedenle boşluklar kaldığı ve mukavemeti azalttığı için sonuçların olumlu yansımaları beklendiği kadar yüksek olmamıştır.

Bu nedenle çimento beton matrisine lif eklenmesi bu çatlakları kapatır ve daha fazla açılmasını engeller. Kirişte daha fazla sapma elde etmek için lifleri çekip çıkarmak veya kırmak için ek kuvvetler ve enerjiler gerekir. Bu işlem, betonun bütünlüğünü korumasının yanı sıra, çatlamanın ötesinde yapısal elemanın yük taşıma kapasitesini iyileştirir. Bu iyileştirme, yük sapma eğrisinde uzun bir tepe sonrası alçalan bölüm oluşturur. Betondaki takviye çelik çubukları, uzun sürekli lifler gibi davrandıkları için aynı yararlı etkiye sahiptir. Ancak kısa kesikli lifler, beton boyunca düzgün bir şekilde karıştırılıp dağıtılma avantajına sahiptir. 1:1.54:2.58 karışım oranı, 1'in çimento, 1.54'ün 4.76 mm boyutunda ince agrega ve 2.58'in maksimum 10mm boyutunda iri agrega olduğu bir karışım oranıdır. Betonun karıştırılması için gerekli su-çimento oranı 0.45 olarak alınmıştır.

Döküm başlamadan önce tüm kalıplar temizlenir ve betonun kalıba yapışmasını azaltmak için iç yüzeye ince bir yağ tabakası uygulanır. Buharlaşmayı ve su kaybını önlemek için beton kalıplar hemen çoğunlukla geçirimsiz plastiklerle kaplanır. Bu ilk kürleme genellikle 24 saat sürer ve ardından kalıplar çıkarılabilir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra numuneler tüm yüzeylerini kaplayan suyla dolu bir depolama tankına yerleştirilir, depolama tankındaki sıcaklık test standartlarına göre düzenlenir.

Bu deneyde Tip I boyut etkileri çalışması araştırılmıştır.

Tepe yüke ulaşmak için 3 dakika seçilmiştir.

σ_N = nominal gerilme

D = karakteristik boyut

σ_0 =sabit, malzemeye ilgili= $\sqrt{(2EG_f)/h_f}$

D_0 =sabit, çatlakla ilgili= $h_f/(2ka_0/D)$

Doğrusal regresyondan sonra, doğru denklemini elde edebiliriz

$$Y=AX+C$$

Bu regresyondan

$$C=1/\sigma_0^2$$

$$A=1/(\sigma_0^2 D_0)=C/D_0$$

Tablo 5. Test Sonuçları

Örnek	P_u (kN)	t (s)	G	Göçme Biçimi
B1	24.00	50	0.05	Sağ mesnette kırılma
B2	21.40	189	0.01	Sol mesnette kırılma
B3	19.30	181	0.01	Ortada göçme gevrek
B4	7.00	630	0.002	Sağ ortada gevrek
B5	5.13	150	0.006	Sol ortada gevrek
B6	4.99	181	0.006	Sağ mesnette gevrek
B7	FAIL	###	###	###
B8	0.95	553	0.003	Sağ mesnette sünek
B9	1.40	414	0.003	Ortada göçme sünek
BP1	17.10	180	0.01	Ortada göçme sünek
BP2	15.30	162	0.01	Sol mesnette kırılma
BP3	19.70	205	0.01	Sol mesnette sünek
BP4	5.18	155	0.006	Ortada göçme sünek
BP5	5.10	200	0.006	Ortada göçme sünek
BP6	4.38	162	0.006	Ortada göçme sünek
BP7	1.75	162	0.003	Ortada göçme sünek
BP8	1.56	149	0.003	Sol mesnette sünek
BP9	1.41	122	0.003	Ortada sünek göçme

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

**Fotoğraf 3. Test sonrası numuneler**

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5. DENEY VERİLERİNİN ANALİZİ

Deney sonuçları analiz edilirken toplam X ,

$$\Sigma = \sum_{k=1}^n I^k = n = I^2 \quad (5.1)$$

$$\Sigma_x = \sum_{k=1}^n X_k \quad (5.2)$$

X lerin karelerinin toplamı,

$$\Sigma_{xx} = \sum_{k=1}^n (X_k)^2 \quad (5.3)$$

toplam Y ,

$$\Sigma_y = \sum_{k=1}^n Y_k \quad (5.4)$$

X ve Y değerlerinin çarpımlarının toplamı,

$$\Sigma_{xy} = \sum_{k=1}^n X_k Y_k \quad (5.5)$$

kullanılarak,

$$\Delta = \Sigma \Sigma_{xx} - \Sigma_x^2 \quad (5.6)$$

$$A = \frac{\Sigma \Sigma_{xy} - \Sigma_x \Sigma_y}{\Delta} \quad (5.7)$$

$$C = \frac{\Sigma_{xx} \Sigma_y - \Sigma_x \Sigma_{xy}}{\Delta} \quad (5.8)$$

değerleri bulunmuştur.

Lineer I' de kırılma enerjisi eğimle ters orantılı küçük numuneler için, Lineer II' de kırılma enerjisi kesim noktası ile ters orantılı, büyük numuneler için iyi.

LEKM' de $C_f = 0$, $C=0$, Lineer I' de orjinden geçer,

LEKM' de $C_f=0$, $A'=0$, Lineer II' de regrasyon orjinden geçer.

$$\text{Lineer I } D_0 = C/A \quad (5.9)$$

$$\text{Lineer II } D_0 = A'/C' \quad (5.10)$$

5.1. Lifsiz Beton

Deneyde kullanılan lif katkısız betonun deney sonuç verileri Tablo 6. de verilmiştir.

Tablo 6. Lifsiz Beton Verileri

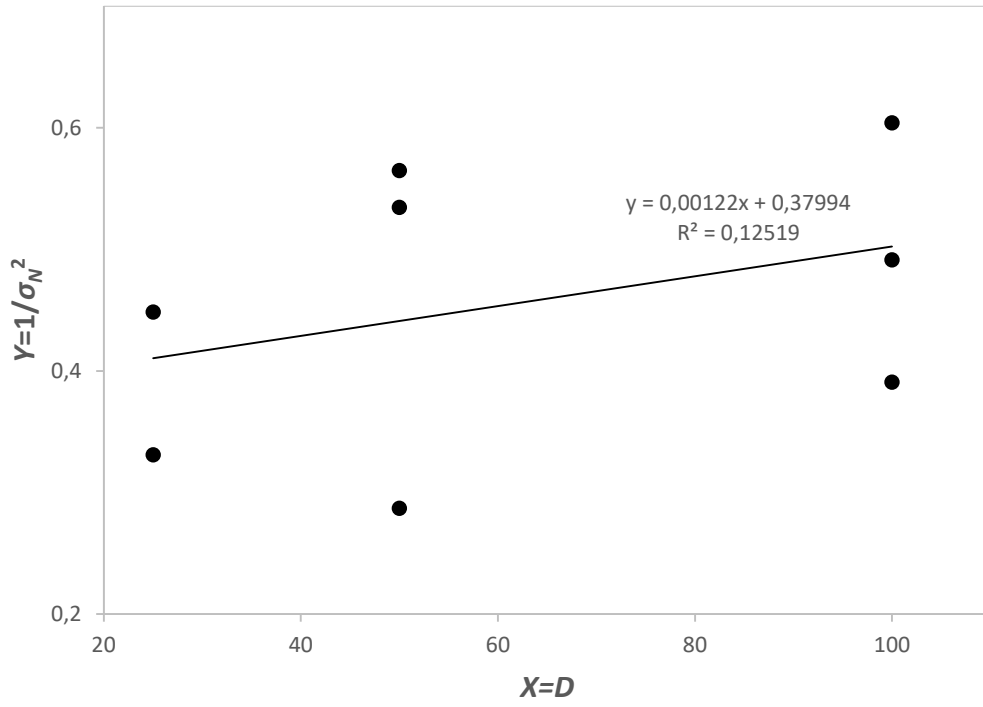
	$X=D$	σ_N	$Y=1/\sigma_N^2$	$X'=1/D$	$Y'=1/(\sigma^2*D)$
1	100	1,600	0,391	0,01	0,004
2	100	1,427	0,491	0,01	0,005
3	100	1,287	0,604	0,01	0,006
4	50	1,867	0,287	0,02	0,006
5	50	1,368	0,534	0,02	0,011
6	50	1,331	0,565	0,02	0,011
7	FAİL	FAİL	FAİL	FAİL	FAİL
8	25	1,739	0,331	0,04	0,013
9	25	1,493	0,448	0,04	0,018

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 7. Lifsiz Beton Analiz Sonuçları Tip II

Σ_x	500
Σ_{xy}	237,383
Σ_y	3,651
Σ_{xx}	38750
Δ	60000
A	1,224
C	0,380
D_0	310,505752
$\sigma_0=1/\sqrt{C}$	1,622
$G_f/k_0^2=1/AE$	0,033
$C_g= C/2A$	155,253

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



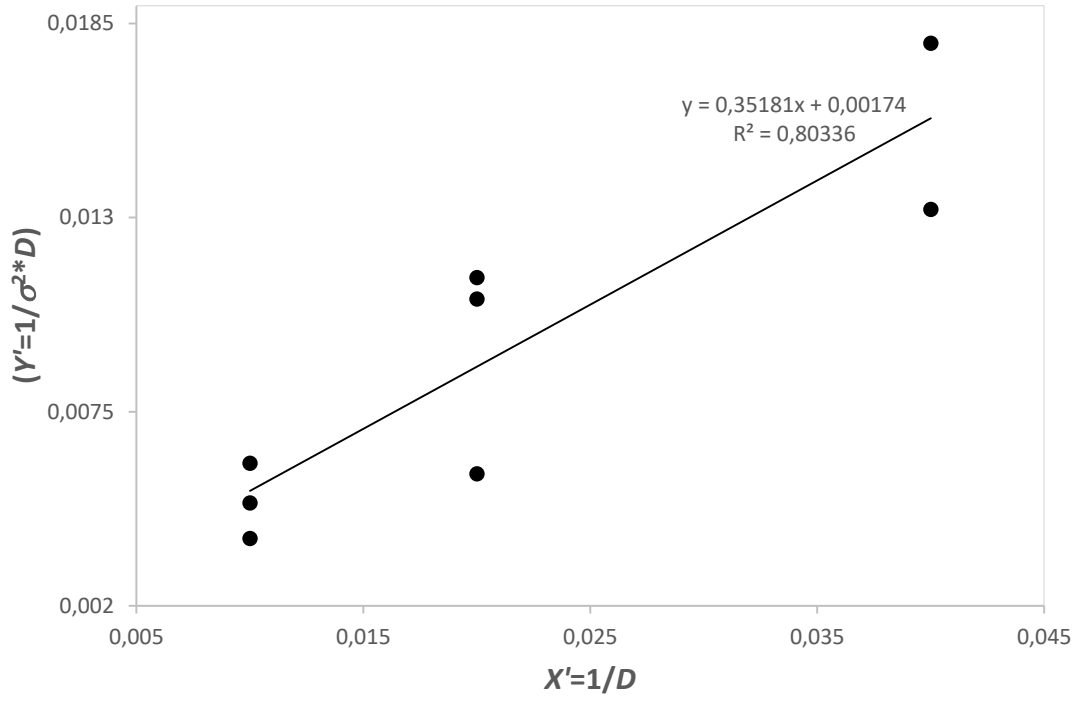
Şekil 11. Lifsiz beton için boyut etkisi Tip II

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 8. Lifsiz Beton Analiz Sonuçları Tip I

$\Sigma x'$	0,17
$\Sigma x'y'$	0,002
$\Sigma y'$	0,074
$\Sigma x'^2$	0,0047
Δ	0,0087
A	0,352
C	1,743
D_0	201,854
$\sigma_0=1/\sqrt{C}$	23,953
$G/k_0^2=1/AE$	0,0001137
$C_g= C/2A$	0,00247704

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



Şekil 12. Takviyesiz beton için boyut etkisi Tip I

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 9. Lifsiz Beton parametreleri

Lifsiz Beton			
Parametre	Birim	Tip I	Tip II
$K_{IC}/k_0=M$	$MPam^{1/2}$	0,904	0,757
$E/k_0^2 G_f = M^2$	$(MPa)^2 m$	0,817	0,574
$(2k_0^{21}/k_0)C_g = N=D_0$	mm	311	202

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

5.2. Lif Takviyeli Beton

Deneyde kullanılan lif katkılı betonun deney sonuç verileri Tablo 10. de verilmiştir.

Tablo 10. Lif Takviyeli Beton Verileri

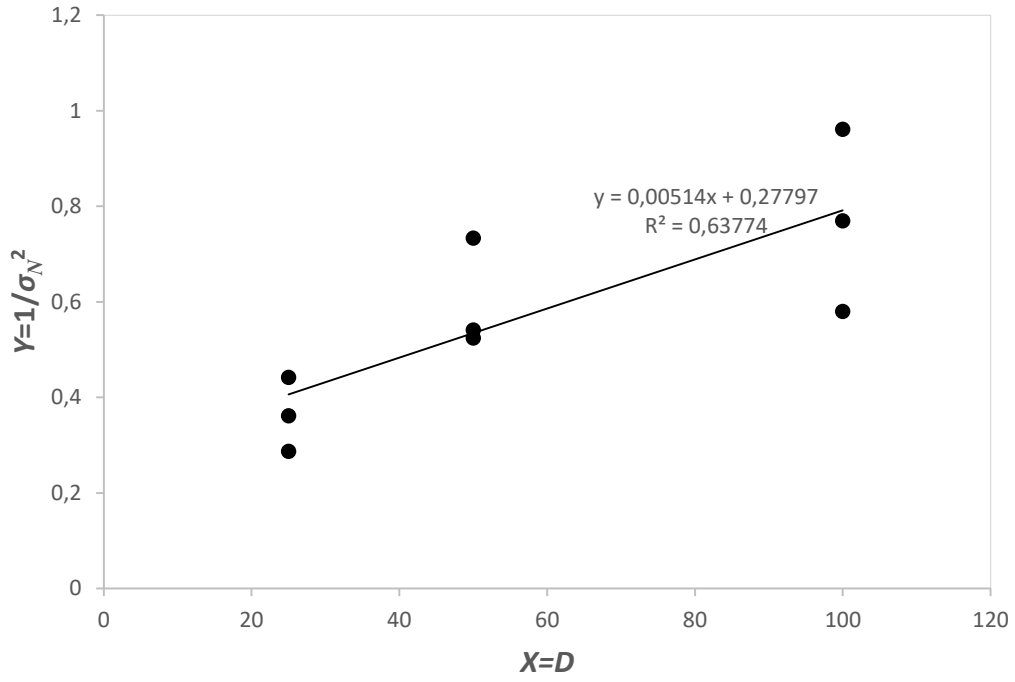
	$X=D$	σ_N	$Y=1/\sigma_N^2$	$X'=1/D$	$Y'=1/(\sigma^2*D)$
1	100	1,14	0,769	0,01	0,008
2	100	1,02	0,961	0,01	0,010
3	100	1,313	0,580	0,01	0,006
4	50	1,381	0,524	0,02	0,010
5	50	1,36	0,541	0,02	0,011
6	50	1,168	0,733	0,02	0,015
7	25	1,867	0,287	0,04	0,011
8	25	1,664	0,361	0,04	0,014
9	25	1,504	0,442	0,04	0,018

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 11. Lif Takviyeli Beton Analiz Sonuçları Tip II

Σ_x	525
Σ_{xy}	348,18
Σ_y	5,198
Σ_{xx}	39375
Δ	78750
A	5,13650
C	0,27797
D_0	54,12
$\sigma_0=1/\sqrt{C}$	1,897
$G_f/k_0^2=1/AE$	0,00778741
$C_g= C/2A$	27,058

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



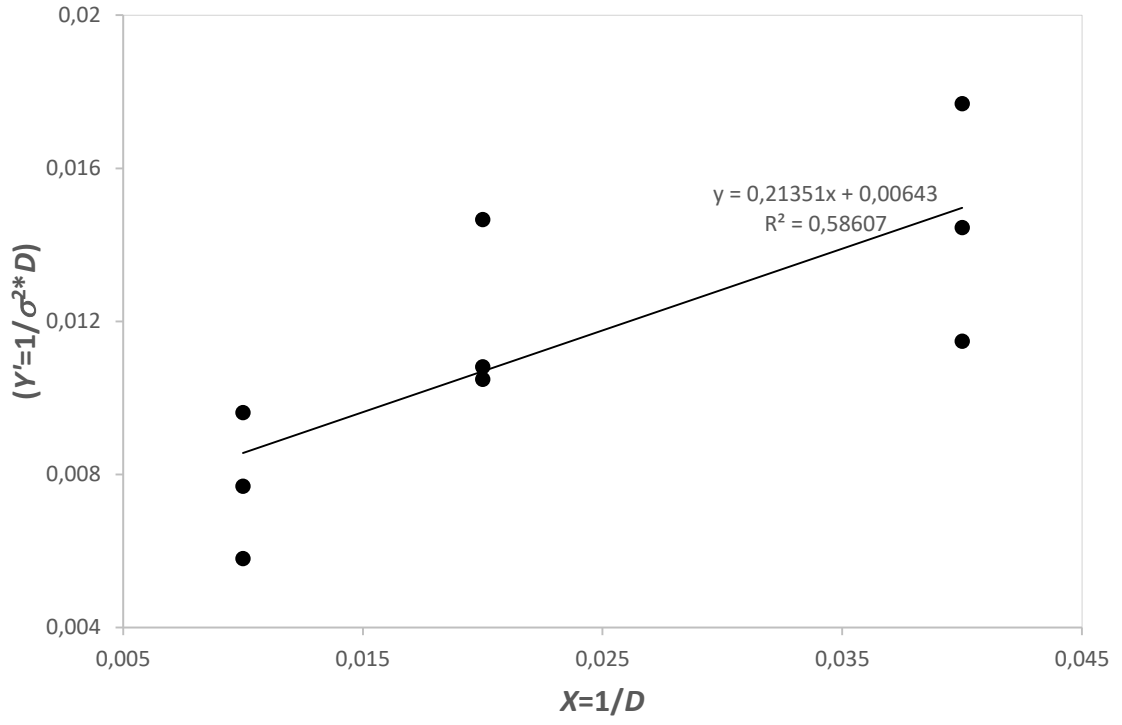
Şekil 13. Lif Takviyeli Beton İçin Boyut Etkisi Tip II

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 12. Lif Takviyeli Beton Analiz Sonuçları Tip I

$\Sigma x'$	0,21
$\Sigma x'y'$	0,00269
$\Sigma y'$	0,103
$\Sigma x'^2$	0,0063
Δ	0,0126
A	0,214
C	6,426
D_0	33,228
$\sigma_0=1/\sqrt{C}$	12,475
$G_f/k_0^2=1/AE$	0,00019
$C_g= C/2A$	0,015

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.



Şekil 14. Lif Takviyeli Beton İçin Boyut Etkisi Tip I

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

Tablo 13. Polipropilen Lif Katkılı Beton Parametreleri

Polipropilen katkılı beton			
Parametre	Birim	Tip I	Tip II
$K_{IC}/k_0=M$	$MPam^{1/2}$	0,441	0,394
$E/k_0^2G_f=M^2$	$(MPa)^2m$	0,195	0,156
$(2k_0^2/k_0)C_g=N=D_0$	mm	54	33

Kaynak: Yazar tarafından oluşturulmuştur.

SONUÇ

Beton, düşük çekme dayanımı ve çekme gerilme kapasitesine sahip kırılgan bir malzemedir. Betondaki bu zayıflıklar, yüksek teknik özelliklere sahip farklı malzemelerden yapılmış lifler kullanılarak giderilebilir. Bu çalışmada betona hacimce %1 ve %2 oranında polipropilen lifler eklenmiştir. Lif oranları arttıkça, betonun mukavemet özelliklerinin de arttığını gözlenmiştir. Aynı şekilde, betonun kılcal su emme ve aşınma direnci özellikleri de polipropilen lifler tarafından olumlu yönde etkilenmiştir.

Rastgele olmayan çekme mukavemete (f_t) sahip bir malzemeden yapılmış elastik veya plastik davranışa göre, geometrik olarak benzer yapılar düşünüldüğünde bir yapının nominal mukavemeti (σ_N), yapı boyutundan (D) bağımsızdır. Bu özellikten herhangi bir sapmaya boyut etkisi denir. Yapısal boyut etkisi, aynı geometrik yapıya sahip aynı malzemeden yapılmış yapıları ilgilendirir (ZDENEK P. BAZANT, 1988).

Modern hesaplamalı modeller elastik ve plastik teorisi sınırlamalarına sahip değildir. Herhangi bir boyut için yapısal mukavemeti doğru bir şekilde tahmin ederler. Yeni malzeme modelleri geliştiren bilim insanları, sonuçların boyut etkisi yasalarıyla uyumlu olduğundan emin olurlar. Olağanüstü büyük yapılar tasarlayan mühendisler, hesaplamaların boyut etkisi içermediğini göz önünde bulundurmıştır.

Test sonuçları, yapısal boyut etkisi durumlarının teorisinin aksine, numunelerin boyutları azalırken hem lifsiz hem de polipropilen lif takviyeli betonda plastik geçmenin meydana geldiği görülmüştür. Bunun aksine büyük numuneler elastik geçmiştir.

Yapılan analizlerde bulunan Tip I (Bazant) ve Tip II (Planas) parametrelerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

KAYNAKÇA

- Abusiaf, H. F., Barr, B. I. G. ve Şener, S. (1997). Application of the torsional damage tests in high strength concrete [Bildiri sunumu]. *Fourth International Conference on Civil Engineering*, Tahran, İran, 355-362.
- Bazant, Z. P. ve Le, J. L. (2022). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC Press.
- Bazant, Z. P. ve Şener, S. (1987). Size effect in torsional failure of concrete beams. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 113(10), 2125-2136.
- Bazant, Z. P., Şener, S. ve Prat, C. P. (1988). Size effect tests of torsional failure of plain and reinforced concrete beams. *Materials and Structures*, 21, 425-430.
- Bazant, Z. P., Şener, S. ve Prat, C. P. (1989). Fracture mechanics size effect and ultimate load of beams under torsion. V. C. Li ve Z. P. Bazant (Ed.), *Fracture mechanics: Applications to concrete* (s. 171-178). American Concrete Institute.
- Bazant, Z. P. ve Şener, S. (1986). *Size effect in torsional failure of longitudinally reinforced concrete beams* (Rapor No. 86-9/428s). Center for Concrete and Geomaterials, Northwestern University.
- Griffith, A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 221, 163-198.
- İnan, G. (2022). Interfacial transition zone modeling in FRC. *Construction and Building Materials*, 342, 127876.
- Lee, J. (2023). Torsional size effect in PPFRFC: A micromechanical approach. *Cement and Concrete Research*, 165.
- Nguyen, T. H. (2023). Multi-scale analysis of torsional failure in FRC. *Engineering Fracture Mechanics*, 285.
- Parrott, L. J. (2021). *Curing concrete: Principles and practice*. CRC Press.

- Şener, S., Belgin, Ç., Aydın, İ. ve Selçuk, E. (1995, Ağustos). Burulma altında boyuna donatılı ve donatısız betonarme kirişlerde boyut etkisi [Bildiri sunumu]. *1. Sistem Mühendisliği ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 56-64.
- Şener, S., Peker, M. A. ve Şener, K. C. (2017, Eylül). Betonun dolaylı çekme deneylerinde boyut etkisi [Bildiri sunumu]. *XX. Ulusal Mekanik Kongresi*, Bursa, Türkiye, 824-831. ISBN: 978-97555614915
- Şener, S., Şener, K. C., Avcı, Y. ve Dalgıç, O. (2024, Ocak). Size effect of torsional failure in plain and polypropylene reinforced concrete [Bildiri sunumu]. *8. Uluslararası Ayasofya Multidisipliner Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, İstanbul, Türkiye.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2020). TS EN 206-1: Beton - Performans, imalat ve uygunluk.

TOPLUMSAL KATKI

Yapılarda dayanıklılık toplum güvenliği açısından önemlidir. Yapıların burulma göçmesine karşı dayanıklılığını anlamaya yönelik katkıları ile, toplumsal yaşamın güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından önemli etkiler sunmaktadır. Polipropilen lif katkılı betonların burulma yükleri altındaki davranışlarının sistematik olarak incelenmesi, özellikle deprem gibi doğal afetlerin sık yaşandığı bölgelerde yapıların güvenliğini artırmaya yönelik ileri düzey çözümler sunmaktadır. Bu doğrultuda ortaya çıkan bilgi birikimi, afet riski altındaki yerleşim alanlarında daha dayanıklı yapı sistemlerinin tasarlanmasına ve insan hayatını doğrudan koruyan mühendislik uygulamalarına katkı sağlar.

Ayrıca bu tez çalışması, boyut etkisi gibi beton yapılar için kritik bir olgunun, teorik modellerle deneysel veriler ışığında değerlendirilmesine olanak vererek, yapı mühendisliği literatürüne nitelikli katkılarda bulunmaktadır. Bu katkılar, inşaat sektörü, malzeme üreticileri ve mühendislik tasarımı yapan uzmanlar için de yol gösterici niteliğe sahiptir.

Sonuç olarak bu tez, dayanıklı ve güvenli yapıların geliştirilmesine dolaylı katkısı yanında, akademik bilgi üretiminin topluma olan etkisini somutlaştıran önemli bir araştırma niteliği taşımaktadır.