

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



ÇENTİKLİ KİRİŞ SİLİNDİR VE KÜP BETON NUMUNELERDE BOYUT ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Samet ÖZTÜRK

Danışman

Doç. Dr. Varol KOÇ

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Samet ÖZTÜRK tarafından, **Doç. Dr. Varol KOÇ** danışmanlığında hazırlanan “**ÇENTİKLİ KİRİŞ SİLİNDİR VE KÜP BETON NUMUNELERDE BOYUT ETKİSİ**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 8.9.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Doç. Dr. Varol KOÇ Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç. Dr. Sertaç TUHTA Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Furkan GÜNDAY Giresun Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

29 / 09 / 2023
Samet ÖZTÜRK

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : ÇENTİKLİ KİRİŞ SİLİNDİR VE KÜP BETON NUMUNELERDE BOYUT ETKİSİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 29 / 09 /2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 17

Tek kaynak oranı : % 4 çıkmıştır.

29 / 09 / 2023
Doç. Dr. Varol KOÇ

ÖZET

ÇENTİKLİ KIRIŞ SİLİNDİR VE KÜP BETON NUMUNELERDE BOYUT ETKİSİ

Samet ÖZTÜRK

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Temmuz/2023

Danışman: Unvanı Doç. Dr. Varol KOÇ

Kırılma mekaniği, malzemelerdeki çatlakların yayılmasının incelenmesiyle ilgili mekanik alanıdır. Bir çatlak üzerindeki itici kuvveti hesaplamak için analitik katı mekaniği yöntemlerini ve malzemenin kırılmaya karşı direncini karakterize etmek için deneysel katı mekaniği yöntemlerini kullanır. Geometrik olarak birbirlerine benzeyen yapıların göçme gerilmesiyle boyut arasındaki ilişki ters orantılıdır. Elemanların boyut arttıkça gerilme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmanın amacı, eksenel basınç yükü altında farklı boyutlardaki kırış, silindir ve küp beton numunelerde kırılma yüklerinin deneysel olarak elde edilmesi ve elde edilen değerlerle boyut etkisi hakkında yorumlama yapılmasıdır. Bunun için yapılan deneysel çalışmada farklı boyutlardaki kırış, silindir ve küplerden oluşan çeşitli beton deney numuneleri kullanılmıştır. Farklı boyutlardaki kırış, silindir ve küp numunelerle yapılan deneylerden bulunan sonuçlarla boyut etkisinin varlığı açıkça görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Kırılma mekaniği, boyut etkisi, basınç dayanımı, beton deneyleri

ABSTRACT

DIMENSION IN NOTCHED BEAM CYLINDER AND CUBE CONCRETE SAMPLES EFFECT

Samet ÖZTÜRK

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Master, July/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Varol KOÇ

Fracture mechanics is the field of mechanics concerned with the study of the propagation of cracks in materials. It uses analytical solid mechanics methods to calculate the driving force on a crack and experimental solid mechanics methods to characterize the material's resistance to fracture. The relationship between the tensile stress and dimension of geometrically similar structures is in the opposite direction. It is observed that the tensile capacity of the elements decreases as the size increases. The aim of this study is to experimentally obtain the breaking loads of beam, cylinder and cube concrete samples of different sizes under axial compression load and to calculate the parameters by plotting the size effect curves with the obtained values. For this purpose, various concrete test specimens from beams, cylinders and cubes of different sizes were used in the experimental study. The existence of the size effect was clearly seen with the results obtained from the experiments with beam, cylinder and cube samples of different sizes.

Keywords: Fracture mechanics, size effect, compressive strength, reinforced concrete experiments

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez, diğer pek çok kişinin desteği olmadan mümkün olamazdı. Öncelikle danışmanım Doç. Dr. Varol KOÇ 'a değerli tavsiyeleri, ilham verici teşvikleri ve tezim boyunca gösterdiği sabır için teşekkür etmek istiyorum. Engin bilgi ve deneyimi akademik çalışmalarına büyük katkı sağlamıştır. Tez çalışmamın deney aşamalarında yardımları olan Erbaa Er Yapı, Erbaa Hazır Beton, Erbaa İkizler Hazır Beton , Karayolları 7.Şube Müdürlüğüne ve Beton Laboratuvarı çalışanı teknisyen Necdet BİLGİCİ ' ye teşekkür ederim. Ayrıca bana her zaman güvenen, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların muazzam anlayışı ve teşviki olmasaydı çalışmamı tamamlamam imkânsız olurdu. Son olarak, tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Samet ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	4
2.1. Beton.....	4
2.1.1. Betonun mekanik özellikleri.....	4
2.1.2. Betonun basınç dayanımı	4
2.1.2.1. Düşük ve normal dayanımlı betonlar	5
2.1.2.2. Yüksek dayanımlı betonlar	6
2.1.2.3. Beton çeşitleri	6
2.1.2.4. Silis dumanının betonun mekanik özelliklere etkisi	7
2.1.2.5. Silis dumanının betonun fiziksel özelliklere etkisi	8
2.1.2.6. Kimyasal katkı kullanımı	9
2.2. Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler	10
2.2.1. Çimento ile ilgili faktörler.....	10
2.2.2. Karışımdaki agrega ile ilgili faktörler	11
2.2.3. Su / çimento oranı	12
2.2.4. Sıkıştırma düzeyi	12
2.2.5. Betonun deney yaşı	12
2.2.6. Kür koşulları	13
2.3. Literatür Taraması.....	13
2.4. Deney Yöntemi İle İlişkili Faktörler	19
2.4.1. Yükleme hızı.....	19
2.4.2. Numunelerin nem içeriği	19
2.4.3. Numune boyutu.....	20
2.5. Basınç dayanımına etkileyen diğer faktörler	21
2.5.1. Numune biçimi.....	22
2.5.2. Düzensiz dayanım	22
2.5.3. Agrega boyutu ve granülometrisi.....	22
2.5.4. Numune ve basınç tablası arasındaki teğetsel gerilme kuvveti.....	23
2.5.5. Kalıplama ve yükleme doğrultusu	24
2.5.6. Cidar Etkisi	25
2.5.7. Yükleme Bloğu ve Eksantrisite.....	26
2.6. Sorunun Doğası.....	27
2.6.1. Boyut Etkisi Kavramı.....	27
2.6.1.1. Boyut Etkisi Tanımı	30
2.6.1.2. Yapısal Dayanım Üzerindeki Boyut Etkisinin Kaynakları	30
2.6.1.3. Weibull'a Kadar Boyut Etkisinin Geçmişi	33
2.6.1.4. Kırılma Mekanizması Boyut Etkisinin Sayısallaştırılması	35
2.6.1.5. Nominal Gerilme ve Nominal Mukavemet.....	35
2.6.1.6. Boyut Etkisi Denklemleri.....	37
2.6.1.7. Kırılma Mekanizması Boyut Etkisinin Basit Açıklaması	38
2.6.2. Evrensel Boyut Etkisi Yasası.....	41
2.6.3. Boyut Etkisi için Deneysel Kanıt.....	42
2.6.4. Çentikli veya Çatlaklı Yapılar.....	45
2.6.5. Çentiksiz veya Çatlaksız Yapılar	48
2.6.6. Güç Ölçeklendirmesi ve Boyut Etkisi Olmaması Durumu	50
2.6.7. Weibull İstatistiksel Boyut Etkisi	52

2.6.8. Plastisite ve LEFM Arasında Köprü Kuran Yarı Gevrek (Quasi-Brittel) Boyut Etkisi ve Tarihçesi.....	55
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	59
3.1. Deney Numuneleri ve Deney Numunelerinin Özellikleri.....	59
3.2. Kullanılan Malzemeler.....	61
3.2.1. Çimento.....	62
3.2.2. Agrega ve Beton Karışım Hesabı	63
3.2.2.1. Beton İçin Karışıma Giren Malzemenin Granülometri Formu	63
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	64
3.3.1. Betonun Yerleştirilmesi ve Kalıplardan Çıkartılması	64
3.4. Deneyin Yapılması.....	66
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	67
4.1. Küp Numuneler İçin Deney Sonuçları.....	67
4.2. Kiriş Numuneler İçin Deney Sonuçları.....	68
4.3. Silindir Numuneler İçin Deney Sonuçları.....	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
KAYNAKLAR	72
ÖZ GEÇMİŞ.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
CaCO ₃	: Kireç Taşı
DEN-EC	: Eksantrik Sıkıştırma Çift Kenarlı Çentik
DEN-EC	: Eksantrik Sıkıştırma Çift Kenarlı Çentik
DEN-S	: Kesmede Çift Kenarlı Çentik
FPZ	: Kırılma Süreci Bölgesi
LEFM	: Doğrusal Elastik Kırılma Mekanikliği
MPa	: Mega Paskal

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Numune Yüzeyi ile Pres Tablası Arasındaki Sürtünme Kuvvetleri.....	24
Şekil 2.2. İstatistiksel ve kırılma boyutu etkisi arasındaki farkın özü	31
Şekil 2.3. (a) Üç noktadan eğilmiş kiriş (b) Elastik gerilme dağılımı (c) Plastik gerilme dağılımı (d) Elastik kayma gerilmesi dağılımı (e) Plastik kayma gerilmesi dağılımı (f) Burulmaya maruz mil (g) Elastik kayma gerilmesi dağılımı (h) Plastik kayma gerilmesi dağılımı (i) Doğrusal dağılmış yüke sahip konsol kiriş	36
Şekil 2.4. Boyut etkileri: (a) nominal gerilme ve bağıl sapma eğrileri üzerinde ve (b) bilogaritmik bir grafikte mukavemet üzerinde.....	38
Şekil 2.5. Boyut etkisini açıklamak için çizimler: (a) küt çatlak bandı (b) yarık benzeri işlem bölgesi	39
Şekil 2.6. (a,b) Geliştirilmiş evrensel boyut etkisi yasası USEL (solda Weibull istatistiği olmadan, sağda Weibull istatistiği ile) ve (c,d,e) Duan ve Hu'nun (2003) yaklaşımına kıyasla USEL'den elde edilen profiller	42
Şekil 2.7. Walsh'un (1972) boyut etkisi sonuçları	46
Şekil 2.8. Bazant ve Pfeiffer'in (1986, 1987) boyut etkisi sonuçları	46
Şekil 2.9. Gettu, Bazant ve Karr'ın (1990) boyut etkisi sonuçları. Bazant ve Pfeiffer'in (1987) normal beton için sonuçları da karşılaştırma için dahil edilmiştir	47
Şekil 2.10.Çeşitli kaya ve seramik türleri için boyut etkisi sonuçları.....	49
Şekil 2.11. Çift zımba testlerinde ve çubuk çekmede boyut etkisi	49
Şekil 2.12. Düz (J1) ve güçlendirilmiş (J2) beton prizmalar için burulmada boyut etkisi; ankrajsız (K1) ve ankrajlı (K2) çubuklar için boylamasına güçlendirilmiş kirişlerin diyagonal kesme hasarı; ve döşemelerin delme kesmesi.....	50
Şekil 2.13. Plakaların delinmesinde yük-sehim eğrisi üzerindeki boyut etkisi	50
Şekil 2.14. (a) Farklı boyutlarda geometrik olarak benzer yapılar (b) güç ölçeklendirme yasaları (c) plastisitenin güç yasası (yatay asimptot) ve LEFM'nin güç yasası (eğimli asimptot) arasında köprü kuran yarı kırılan arızalar için boyut etkisi yasası.....	51
Şekil 2.15. (a) Rastgele mukavemete sahip çok sayıda bağlantıya sahip zincir (b) küçük bir elemanın arıza olasılığı (c) kritik hale gelme olasılıkları farklı olan çok sayıda mikro çatlak yapı içeren.....	53
Şekil 3.1.(a)Silindir Numune Şekilleri.....	59
Şekil 3.1.(b) Küp Numune Şekilleri.....	60
Şekil 3.1. (c) Kiriş Numune Şekilleri.....	61
Şekil 3.2. Numunelerin Hazırlanması.....	61
Şekil 3.3. Agrega Granülometri Eğrisi.....	64
Şekil 3.4. Kalıpların Yağlanması.....	65
Şekil 3.5. Numunelerin Deneye Hazırlanması.....	65
Şekil 3.6. Numunelerin Test Edilmesi.....	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Boyut etkisi test serilerinin özeti	43
Tablo 2.2. Boyut etkisi testlerinin temel verileri.....	44
Tablo 3.1. Çimentonun fiziksel özellikleri	62
Tablo 3.2. Çimento basınç dayanım sonuçları	62
Tablo 3.3. Çimentonun kimyasal özellikleri	63
Tablo 3.4. Beton için karışıma giren malzeme granülometrisi formu	63
Tablo 3.5. Beton sınıfı karışım formu	64
Tablo 4.1. Küp numuneler için boyut etkisi.....	67
Tablo 4.2. 50x100x300 mm Kiriş numuneler için boyut etkisi	68
Tablo 4.3. 50x150x300 mm Kiriş numuneler için boyut etkisi	68
Tablo 4.4. 50x200x600 mm Kiriş numuneler için boyut etkisi	68
Tablo 4.5. 3,75 x 7,5 cm Silindir numuneler için boyut etkisi	69
Tablo 4.6. 7,5 x 15 cm Silindir numuneler için boyut etkisi	69
Tablo 4.7. 15 x 30 cm Silindir numuneler için boyut etkisi	69

1. GİRİŞ

Beton günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Yol, bina, köprü, baraj, kanal gibi yapılarda kullanılır. Beton, dayanıklılığı, yangına dayanıklılığı, suya dayanıklılığı, maliyet etkinliği, enerji verimliliği ve yerinde imal edilebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Meyer, 2009). Beton ayrıca prekast betonarme elemanların imalatında da kullanılır. Modern binalarda nükleer radyasyona karşı da kullanılır. Kişi başına ortalama küresel beton üretimi yılda yaklaşık 1 tondur. Beton, genellikle 5.000 yılı aşkın bir süredir birçok biçimde kullanılmaktadır. Eski Mısırlılar piramitleri inşa etmek için kil harcı kullandılar. Harç, kireç taşının (CaCO_3) ısıtılması ve karbondioksitin (CO_2) uzaklaştırılmasıyla elde edildi. Elde edilen kireç agregası ile karıştırılarak harç olarak kullanılmıştır. Hidrolik çimentonun icadı Roma dönemine kadar uzanır. Romalılar sönmüş kireci volkanik puzolan külüyle karıştırdılar. Bu amorf silika puzolan, su varlığında alkalilerle kimyasal olarak reaksiyona girer ve silika jel olarak katılır (Emir Hazır Beton, 2022). 1824'de İngiliz duvarcı Joseph Aspdin, bağlayıcı bir madde olan çimento yapmak için kireç taşını kil ile kaynattı. Portland çimentosu, adını Portland Adası kireçtaşına benzerliğinden alır (Müller ve Wiens, 2016). Daha sonra, çimento ile karıştırılmış agregadan evler, barajlar ve yollar inşa edildi.

Beton için gerekli olan çimento ve agregalar ayrı endüstriler tarafından üretilir. Son adım ise karışımın hazırlanması ve betonun kullanılmasıdır. Doğru karışım oranının seçilmesi; ekonomi, işlenebilirlik, dayanım, dayanıklılık ve görünüm gibi dengeli özellikler sunar. Agregası ve çimento tipine göre karışım oranının hesaplanması için birçok yöntem önerilmiştir. Betonun dayanımını etkileyen en önemli faktör, çimento karışım suyu miktarının çimentoya oranıdır. Bir diğer önemli faktör de betondaki hava yüzdesidir. Normal betonda bu miktar %0,3-3 civarındadır. Bu iki etki, beton kalitesini kontrol etmede en önemli iki faktördür. Homojen bir beton karışımı elde etmek de önemlidir. İstenilen kalitede kullanıma hazır karışım uzman görüşü alındıktan sonra şantiyeye teslim edilir. Karıştırma hem sabit hem de mobil karıştırıcılarda yapılabilir. Bu tip karıştırma tesislerinin avantajı kontrollü karıştırmadır. Doğru kum ve çakıl ile kaliteli beton elde etmek kolaydır. Beton imalatındaki son adım, dökülen betonun bakımı ve kürlenmesidir. Sertleşme, Portland çimentosunun hidrasyonu ve su ile kimyasal reaksiyon yoluyla gerçekleşir. İlk yedi gün nemli kalması önemlidir (Wangler ve ark. 2019). Bunun için betonun dış

yüzeyi sulandır veya nemli bir mat kullanılabilir.

Betonun dayanıklılığı, dış ortamın agresif unsurlarına karşı direncidir. Bu elemanlara ek olarak, bazı durumlarda beton bileşenleri de reaksiyona girebilir. Dahili beton korozyonu, dış ortam tarafından şiddetlendirilebilir. Beton, doğal kimyasal hasarlara karşı dayanıklı olmalı ve dış fiziksel ve kimyasal faktörlerin etkisi altında özelliklerini kaybetmemelidir (Connolly, 2014). Bu, yeterli kimyasal kararlılık (direnc) gerektirir. Beton, değişen derecelerde olumsuz etkilere sahip çeşitli kimyasal reaksiyonlar nedeniyle zamanla mukavemetini kaybedebilir. Bu durumda yapı, betona etki eden kuvvetlere dayanamadığı için kısmen veya tamamen çöker veya kullanılamaz hale gelir. Fizikokimyasal bir süreç olan karbonatlaşma, ortamın alkaliliğini azaltır ve koruyucu oksit tabakalarının parçalanmasına neden olur. Çimento hidratlarındaki Ca(OH)_2 betonun alkaliliğini sağlar ve pH değeri 12 civarındadır. Ancak zamanla Ca(OH)_2 havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 pH değişimlerine dönüşür. Atmosferdeki karbondioksit miktarı hacimce %0,03'tür. CO_2 konsantrasyonu ne kadar yüksek olursa, karbonizasyon oranı da o kadar yüksek olur. Karbon derinliği birkaç milimetre ile sınırlandırılabilir, ancak kusurlu betonda mekanik stresin yokluğunda çatlaklar oluştuğunda 10 cm'yi aşan karbon derinlikleri bildirilmiştir (Wight ve MacGregor, 2016).

Kurucu elemanların özelliklerinin ayrı ayrı üst üste binmesi, betonun genel yapısını vermez. Betonun davranışının çoğu, bu bileşenlerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Beton, çimento, ince agrega, kaba agrega, su ve muhtemelen çeşitli kimyasal ve/veya mineral katkılardan oluşan kompozit bir malzemedir. Betonun en önemli özelliği basınç dayanımıdır. Bu bileşen, malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum gerilme değeri olarak tanımlanabilir. Betonun mukavemeti çimentonun hidratasyonuna bağlı olduğundan ve bu süreç zamana bağlı olduğundan, mukavemet tanımlanırken genellikle betonun yaşı ile birlikte anılır. Mukavemet, standart boyutlu numuneler ve normal ortam koşullarında (sıcaklık ve nem) tutulan standart test prosedürleri kullanılarak belirlenir. Çeşitli spesifik araştırmalar, malzemelerin mevcut özellikleri ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu çalışmalar sonucunda betonun basınç dayanımı ile aynı yönde değişen özelliklere sahip olduğu ve ters yönde değişen özelliklere sahip olduğu bulunmuştur. Bu ilişkiden dolayı basınç dayanımı beton için bir kalite kriteri olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, diğer özellikler ile basınç dayanımı arasındaki

ilişki mutlak değildir. Bazı özel uygulamalar için, söz konusu uygulama için önemli olan özellikleri ampirik olarak incelemek esastır. Betonarme yapılar için belirli bir dayanımda beton üretilmesi arzu edilir (Dubuç, 2006). Bu amaca ulaşmak için öncelikle betonun bileşimini doğru bir şekilde belirlemek gerekir. Betonun basınç dayanımı birçok faktörden etkilenir. Bu, aynı agrega ve çimento ve aynı bileşim ve üretim süreciyle bile betonun dayanımının büyük ölçüde değişebileceği anlamına gelir (Syverson, 2004). Betonun basınç dayanımı, özellikle su ve çimento oranı, agrega türü ve oranı, kür koşulları, çimento türü ve miktarı, test koşulları vb. Numune büyüklüğü gibi etkileyen faktörler deneysel koşullarda önemli faktörlerdir. Bu etkinin farklı örneklem büyüklükleri üzerindeki etkisi kesin olarak belirlenmemiştir.

Beton yapay bir taş olduğu için mikro yapısı incelenebilir. Sertleştirilmiş beton petrografisi, geleneksel petrografiden daha basit ama daha karmaşıktır. Bu kolaydır çünkü tüm minerallerin incelenmesi ve sayılması gerekmez, ancak petrolojideki gözlemler zordur çünkü nedensel olarak ilişkili olmaları gerekir (Zhang, 2021). Özel teknikler kullanılarak hazırlanan numuneler, betondaki kaya dağılımı, çatlaklar, soğuk derzler, gözenekli yapılar gibi göstergeleri değerlendirmek ve beton kalitesi hakkında önemli sonuçlar çıkarmak için kullanılabilir.

Şu anda, kaya araştırmalarında en çok atıfta bulunulan teknik, floresan epoksi tekniğidir. Kaya araştırması dört bölüme ayrılabilir. Birincisi görsel inceleme ve manuel incelemedir. Petrolojik analiz için kesit alma ve analizden önce sahada toplanan ve laboratuvarında kurutulmuş numunelerin görsel ve manuel incelemelerini gerçekleştirmek gerekir. Numunedeki önemli kusurları, çatlakları, sertleştiricileri, delikleri veya buzları fotoğraflayıp ve belgelemek önemlidir. Görsel incelemeden sonra, üç farklı ham numune elde etmek için beton numunesini kesmek gerekir. Numune artık düz profil analizi, ince duvar profili analizi ve hava boşluğu analizi için hazırlanmıştır. Beton petrografisi, özellikle uyuşmazlık çözümünde önemli bir tekniktir. Zamanla öğrenilen ve uygulanması zor olan sistemler vardır. Numune hazırlama aşaması da analizde çok önemlidir ve teknolojinin kendisi denilebilir. Ancak tüm bu zorlukların üstesinden gelen petroloji, yüksek teknoloji beton üretiminde öncü rol oynayan beton hakkında gerekli bilgileri sağlamaktadır. Bu sayede karışım homojenliği, agrega dağılımı, mineral agrega etkinliği ayarlanabilir ve dış müdahaleler en aza indirilebilir (Lukkarila, 2022).

2. KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Beton

İnsanlar binlerce yıl önce yapı malzemesi olarak taşı kullanmaya başladıklarında, iyi bir bağlayıcısı olmadığı için sınırlı yapılar yapılabiliyordu. Antik Yunan, İyon ve Roma tapınaklarındaki belirli açıklıkları kapatmak için devasa taş kirişler kullanıldı. Bununla birlikte, taşın düşük çekme mukavemeti nedeniyle açıklıklar sınırlıydı ve ağır elemanların taşınması ve değiştirilmesinde ciddi sorunlar ortaya çıkaran büyük parçalar gerekiyordu. İnsanların daha büyük açıklıklardan geçme tutkusu, yeni inşaat sistemleri arayışına yol açmış, bunun sonucunda daha dayanıklı yapılar oluşturan kireç ve doğal çimento gibi bağlayıcılar keşfedilmiştir. Kum, çakıl, çimento, kimyasallar, mineraller ve suyun belirli oranlarda karıştırılması, kalıpta istenen şekli alan bir plastik malzeme olan betonu oluşturur. Betonu diğer yapı malzemelerinden ayıran en önemli özellikleri her türlü şekli alabilmesini sağlayan plastik kıvamı ve basınç dayanımıdır (Sun, 2022). Yüksek kaliteli betonun işlenebilirlik, dayanım ve dış etkenlere karşı direnç gibi özelliklere sahip olması beklenir. Basınç dayanımı, betonun kalitesi hakkında genel bir fikir verir. Bu, diğer birçok özelliği etkilediği için alaşım seçiminde en önemli faktör olarak kabul edilir. Ancak bazı durumlarda su geçirmezlik ve dayanıklılık daha önemli özellikler olabilir. Belirli bir basınç dayanımı sağlamak için seçilen karışımın, uygulamaya bağlı olarak ekonomik ve kolay işlenebilir olması gerekir.

2.1.1. Betonun mekanik özellikleri

Beton pürüzlü, yarı gevrek bir malzemedir. Karakteristik davranışı zamana ve yüke göre değişir. Bu özellikler arasında betonun mukavemeti ve deformasyonu ilk sıralarda yer almaktadır.

2.1.2. Betonun basınç dayanımı

Beton, diğer pek çok kırılğan yapı malzemesi gibi basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı düşük bir malzemedir. Betonun çok düşük çekme dayanımı genellikle hesaplamalarda dikkate alınmadığından basınç dayanımına özellikle dikkat edilir. Betonun basınç dayanımı, 28 gün boyunca suya batırılmış 150 mm çapında, 300 mm uzunluğunda silindirik bir numunenin eksenel basınç dayanımı olarak tanımlanır. Ülkemizde ve bazı ülkelerde silindir yerine 150x150x150 mm kübik kalıp da kullanılmaktadır. Kübik ve silindirik numuneler arasındaki ilişkiyi belirlemek için

birçok deney yapılmıştır. Silindir - küp dayanım oranları ortalama 0,80 ile 0,85 arasında verilmektedir ancak bu her zaman doğru değildir. Farklı beton dayanımları ile farklı beton boyutlarında değişken oranlar görülür. Bir küp numune, bir silindirden daha geniş bir alana ve daha yüksek bir dayanıklılığa sahiptir. Dolayısıyla nihai göçme yükü yaklaşık olarak daha yüksektir. Bu durumda numuneyi kırmak için daha güçlü bir pres gerekir. Büzülme, küpün keskin köşelerinde gerilim yoğunlaşmaları yaratabilir. Küp testinde, kırılma eğimli çatlağın başlamasıyla başlar ve numune kademeli olarak piramidal bir şekil alır. Eksenel sıkıştırma altındaki bu tip numune arızası, plaka ile numune arasındaki sürtünmenin neden olduğu yük eksenine dik kuvvetlerden kaynaklanır.

2.1.2.1. Düşük ve normal dayanımlı betonlar

Düşük dayanımlı betonlar, basınç dayanımları 20 MPa'nın altında olan betonlardır. Bu betonlar, normal ve yüksek dayanımlı betonlardan daha düşük mukavemet özelliklerine sahiptir. Düşük dayanımlı betonlar genellikle bazı özel uygulamalarda tercih edilir. Düşük dayanımlı betonlar, yapı sektöründe genellikle hafif yüklerin taşınması gereken durumlarda kullanılır. Örneğin, iç mekan zemin kaplamaları, dökme duvarlar, zemin tabanları, yürüyüş yolları ve benzeri uygulamalarda düşük dayanımlı betonlar tercih edilebilir. Ayrıca, dekoratif amaçlarla kullanılan betonların da düşük dayanımlı olması yaygındır. Düşük dayanımlı betonlar, yüksek işlenebilirlik özellikleri ile de dikkat çeker. Bu özellikleri sayesinde, özel şekillendirme gerektiren uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilirler. Aynı zamanda, düşük dayanımlı betonlar düşük maliyetli ve çevre dostu bir seçenek olabilir (Doğangün, 2017).

Normal dayanımlı betonlar, dünya genelinde ve Türkiye'de en yaygın kullanılan beton türüdür. Ancak, normal dayanım sınıfına girdiği değer aralıkları konusunda farklı kabuller bulunmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsü'nün (ACI) 2010 tarihli 363R-2 raporuna göre, normal dayanımlı betonlar, 41 MPa silindir basınç dayanımına kadar olan betonlar olarak tanımlanmıştır. Bu değer altındaki betonlar ise düşük dayanımlı betonlar olarak kabul edilir. Öte yandan, Ersoy ve Tankut (1991) tarafından yapılan çalışmada, silindir basınç dayanımı 50 MPa'ya kadar olan betonlar normal dayanıma sahip olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlama, daha yüksek dayanımlı betonların normal sınıfa girmediği anlamına gelir. Normal dayanımlı betonlar, genellikle yapı sektöründe temel yapı malzemesi olarak kullanılır. İnşaat projelerinde

temel, kolon, kiriş ve döşeme gibi yapı elemanlarının imalatında yaygın olarak tercih edilirler. Normal dayanımlı betonlar, ekonomik ve dayanıklı olmaları, işlenebilirlikleri ve geniş kullanım alanları nedeniyle tercih edilen bir seçenektir (Göktaş, 2019).

2.1.2.2. Yüksek dayanımlı betonlar

Yüksek dayanımlı betonlar, beton teknolojisindeki ilerlemelerle birlikte geliştirilen yeni teknikler, kimyasal ve mineral katkıları ile liflerin kullanılmasıyla elde edilen özel bir beton türüdür. Bu betonlar, normal betonlara göre üstün iç yapı ve mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek dayanımlı betonlar, 60-115 N/mm² arasında küp basınç dayanımı ve 50-100 N/mm² arasında silindirik basınç dayanımı sağlayabilen bir genişlikte yer almaktadır. Bu yüksek dayanım, yapıların daha büyük yükleri taşıması veya daha ince kesitlerde kullanılması gibi avantajlar sunar. Yüksek dayanımlı betonların üretiminde önemli rol oynayan faktörlerden biri silis dumanıdır. Silis dumanı, yüksek dayanımlı çimento ve süper akışkanlaştırıcı malzemelerle birlikte kullanıldığında, çimento hamurunda meydana gelen boşlukları doldurarak kılcal çatlakları belirgin şekilde azaltır. Bu sayede, betonun basınç dayanımı artar ve üstün bir performans elde edilir. Yüksek dayanımlı betonlar, yapı sektöründe genellikle büyük köprüler, gökdelenler, endüstriyel tesisler ve altyapı projelerinde kullanılır. Bu betonlar, yapısal güvenilirlik, dayanıklılık ve daha ince yapı elemanlarının kullanımı gibi avantajlar sunarak mühendislik gereksinimlerini karşılamaya yardımcı olur (Ersoy, 2000).

2.1.2.3. Beton çeşitleri

Beton, yapısal özelliklerine ve bileşenlerine bağlı olarak farklı tiplere ayrılabilir. Yapısına göre, betonu yalın beton, güçlendirilmiş beton, öngermeli beton, kısmi öngermeli beton, fiberle güçlendirilmiş beton ve hibrit yapı beton gibi gruplara ayırabiliriz (Cengiz, 2015; Naaman, 2006):

- Yalın beton, en temel beton tipidir ve çimento, agrega ve suyun karışımından oluşur. Yapısal taşıyıcı elemanlarda, döşeme ve zemin kaplamalarında yaygın olarak kullanılır.
- Güçlendirilmiş beton, yalın betona çelik donatı eklenerek elde edilir. Çelik donatı, betonun gerilmelere dayanma kabiliyetini artırır ve yapıya

mukavemet sağlar. Güçlendirilmiş beton, genellikle kolonlar, kirişler ve temeller gibi yapısal elemanlarda kullanılır.

- Öngermeli beton, beton elemanlara gerilim uygulandıktan sonra betonun donatılanması işlemidir. Bu sayede, betonun taşıma kapasitesi artar ve daha uzun açıklıkların geçilebileceği yapılar elde edilebilir. Öngermeli beton, genellikle köprüler, kirişler ve yüksek binalarda kullanılır.
- Kısmi öngermeli beton, hem gerilmeli hem de gerilmeli olmayan bölgelerin bir arada kullanıldığı bir beton türüdür. Gerilmeli bölgeler, daha büyük açıklıkları taşıırken gerilmeli olmayan bölgeler, yapıya dayanıklılık sağlar. Bu yöntemle ekonomik ve hafif yapılar elde edilebilir.
- Fiberle güçlendirilmiş beton, beton matrisine çelik, cam, karbon veya polimer fiberlerin eklenmesiyle elde edilir. Fiberler, betonun çatlak oluşumunu önler ve dayanıklılığını artırır. Bu tür beton, yüksek darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda, zemin kaplamalarında ve dökme duvarlarda kullanılır.
- Hibrit yapılı beton, farklı güçlendirme tekniklerinin birleştirildiği bir beton çeşididir. Örneğin, çelik donatı ile fiberle güçlendirilmiş betonun bir araya getirilmesiyle elde edilebilir. Bu sayede, farklı avantajları bir arada sunan özel yapılar inşa edilebilir (Naaman, 2006).

2.1.2.4. Silis dumanının betonun mekanik özelliklerine etkisi

Silis dumanı, betonun mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir mineral katkı maddesidir. Silis dumanı, silis oksitin çok ince partikülleridir ve çimento hamuruna eklenerek betonun performansını geliştirir. Silis dumanının en belirgin etkisi, betonun dayanımını artırmasıdır. Silis dumanı, çimento hamurundaki boşlukları doldurarak yoğun bir matris oluşturur ve bu sayede betonun basınç dayanımını önemli ölçüde yükseltir. Aynı zamanda silis dumanı, kılcal çatlakların oluşumunu engelleyerek betonun dayanıklılığını artırır. Silis dumanı aynı zamanda betonun su geçirgenliğini azaltır. Silis dumanı içeren beton, daha yoğun ve kompakt bir yapıya sahip olduğundan, suyun betona nüfuz etmesini engeller. Bu özellik, yapıların suya dayanıklılığını artırır ve betonun ömrünü uzatır. Diğer bir önemli etkisi ise termal özellikler üzerindedir. Silis dumanı, betonun termal genleşmesini

azaltarak termal stabilite sağlar. Bu, betonun sıcaklık değişimlerine karşı daha dirençli olmasını ve çatlak oluşumunu engellemesini sağlar. Ayrıca, silis dumanı betonun kimyasal direncini de artırır. Silis dumanı içeren beton, kimyasal saldırılara karşı daha dayanıklı olur ve agresif ortamlarda daha uzun süre dayanabilir. Sonuç olarak, silis dumanı betonun mekanik özelliklerine olumlu etkiler sağlar. Betonun dayanımını artırır, su geçirgenliğini azaltır, termal stabilite sağlar ve kimyasal direncini artırır. Bu nedenle, silis dumanı, yüksek performanslı ve dayanıklı beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir mineral katkı maddesidir (Beycioğlu, Başyigit ve Kılınçarslan, 2010; Demir, 2009; Demirel ve Yazıcıoğlu, 2007).

2.1.2.5. Silis dumanının betonun fiziksel özelliklerine etkisi

Silis dumanı, betonun fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkileyen bir mineral katkı maddesidir. Betonun fiziksel özellikleri, betonun işlenebilirliği, dayanıklılığı, yoğunluğu ve yüzey özellikleri gibi unsurları içerir. Silis dumanının en belirgin etkilerinden biri, betonun işlenebilirliğini etkilemesidir. Silis dumanı eklenen beton karışımı, daha yoğun bir kıvama sahip olur. Bu nedenle, betonun akışkanlığı ve işlenebilirliği azalır. İşlenebilirlik, betonun şekillendirme sürecindeki davranışını ve kolaylığını ifade eder. Ayrıca, silis dumanı betonun yoğunluğunu artırır. Silis dumanı içeren beton, daha yoğun bir matris oluşturarak betonun genel yoğunluğunu artırır. Yoğun beton, daha dayanıklı ve mukavemetli bir yapı oluşturur (Demir, 2009). Silis dumanının yüzey özelliklerine de etkisi vardır. Silis dumanı içeren beton, yüzey pürüzlülüğünü azaltarak daha düz ve homojen bir yüzey elde edilmesini sağlar. Bu, özellikle estetik açıdan önemli olan uygulamalarda avantaj sağlar. Diğer bir etkisi ise betonun su emme özelliğini azaltmasıdır. Silis dumanı içeren beton, daha yoğun bir yapıya sahip olduğundan, suyun betona nüfuz etmesini engeller. Bu, betonun suya karşı dayanıklılığını artırır ve çevresel etkilere karşı daha dirençli hale getirir. Sonuç olarak, silis dumanı betonun fiziksel özelliklerine çeşitli etkileri olan bir mineral katkı maddesidir. İşlenebilirliği azaltırken, yoğunluğu artırır ve yüzey özelliklerini iyileştirir. Ayrıca, su emme özelliğini azaltarak betonun dayanıklılığını ve performansını artırır. Bu nedenle, silis dumanı, çeşitli beton uygulamalarında fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla sıklıkla kullanılan bir malzemedir (Kandil, 2014; Özcan ve Atiş, 2017).

2.1.2.6. Kimyasal katkı kullanımı

Genel olarak katkı maddeleri, harçların ve betonların taze ve sertleşmiş özelliklerini değiştiren ve betonun diğer ana bileşenlerinden daha az kullanılan kimyasallardır. Reolojiyi, hava içeriğini ve hazır beton veya harcın fiziksel, mekanik ve kimyasal maddelere karşı direncini etkileyen katkı maddeleri olarak kullanım amaçlarına göre gruplandırılabilirler (Mather, 2004). Süper akışkanlaştırıcılar, işlenebilirlik değişikliklerini etkileyerek, su-çimento oranını düşürerek, boşlukları ve ayrışmayı ortadan kaldırarak ve mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirerek taze beton veya harcın reolojik özelliklerini etkiler. Akışkanlaştırıcılar işlevlerine göre düzenli akışkanlaştırıcılar, orta düzeyde su azaltan akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olarak sınıflandırılabilir (Kıvanç, 2006). Son yıllarda, süperakışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanımı, betonun kalitesini, özellikle yüksek kaliteli betonu iyileştirmiştir. Bu tür süper akışkanlaştırıcıların etkinliği, çimento partiküllerinin hava sürüklenmesine, emilmesine ve geciktirilmesine dayanmaktadır. Kapalı bir alanda plastikleştirici kullanıldığında yüzey sürtünme kuvveti oluşmaz. Sonuç olarak, bu sabit hava katmanları betondaki iç sürtünmeyi azaltarak daha az su ile benzer işlenebilirlik sağlar (Naik, 2008).

Beton endüstrisinin özel ihtiyaçları, istenen performansa sahip polimerlerin geliştirilmesini gerektirir. Özellikle polikarboksilik asit eterlerden modifiye nesil plastikleştiricilerin kullanımı bu kapsamda başlamıştır. Bu tür Süper akışkanlaştırıcılar (SAA), betonda su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet elde etmek, hidrasyon ısını düşürmek, işlenebilirliği artırmak, ekonomik bir beton üretimi sağlamak ve yerleştirme zorluğu yaşanan bölgelerde kolaylık sağlamak gibi avantajlar sunar. Bu katkı maddeleri, çimento taneciklerinin yüzeyinde adsorbe olarak etki gösterir. Adsorpsiyon oranı çimentonun kimyasal ve mineralojik özelliklerine, inceliğine ve C3A içeriğine bağlıdır. Süper akışkanlaştırıcılar, çimento tanecikleriyle etkileşime girerek elektrostatik itme ve sterik etki gibi mekanizmalar aracılığıyla dağılım sağlar. Bu dağılım mekanizmaları, sülfonatlı sentetik polimerler ve karboksilatlı sentetik polimerler gibi farklı polimer türleriyle ilişkilidir. Polimerlerin molekül ağırlığı da dağılım yeteneğini etkiler. Yüksek moleküler ağırlığa sahip polimerler, çimento tanecikleri tarafından daha iyi adsorbe edilir ve daha iyi dağılım sağlar. Ancak, aşırı yüksek moleküler ağırlıklar dağılım yeteneğini azaltabilir. SAA'lar ayrıca sualtı betonlarında yıkanmayı önlemek

için de kullanılır. Bu durumda, süper akışkanlaştırıcılar betonun viskozitesini ve kayma eşiğini artırarak, su/imento oranını artırmadan akışkanlığı artırır (Doğın, 2000; Sonebi ve Khayat, 2001).

2.2. Betonun Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler

Betonun basınç dayanımı doğru prensipler kullanılarak belirlenir, ancak bileşim dışındaki birçok faktörden etkilenir.

Betonun dayanımını etkileyen faktörler iki gruba ayrılabilir:

a) test prosedüründen bağımsız faktörler, b) test prosedürüyle ilgili faktörler;

2.2.1. Çimento ile ilgili faktörler

Betonu oluşturan agregaları bir arada tutan beton hamuru mukavemetini kaybettiğinde betonun mukavemeti de azalır. Bu da imento hamuru dayanımının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu alışma şekline göre imento, betonun mukavemetini iki şekilde değiştirir. Birincisi imento miktarıdır. Bu miktarın artırılması imento hamuru miktarını artıracaktır. Bu nedenle beton yüklendiğinde imento hamurunda daha az gerilme meydana gelebilir. Bu, artan mukavemet veya stres nedeniyle betonun mukavemetini azaltır. Başka bir deyişle, imento içeriği ne kadar ykseksse, beton o kadar güçlüdür (Wangler ve ark. 2019).

Beton, yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından önemli bir yapı malzemesidir. Betonun en önemli özelliklerinden biri basınç mukavemetidir. Basınç mukavemeti, betonun dayanma gücünü ve yük taşıma kapasitesini belirler. Bu mukavemet, imento hamurunun kalitesine ve imento konsantrasyonuna bağlıdır. Agregaların sağlam olduğu varsayıldığında, betonun basınç dayanımı imento hamurunun dayanımını yansıtır. Betonun basınç dayanımını etkileyen faktörler, aynı zamanda betonun genel kalitesini de etkiler. Örneğin, su/imento oranı, kullanılan agregaların özellikleri, karışım oranları ve doğru sıkıştırma gibi faktörler betonun basınç dayanımını etkiler. Yüksek kaliteli imento kullanımı ve uygun imento miktarı da betonun mukavemetini artırır. Basınç dayanımı, yapıların güvenliği ve sağlamlığı için önemli bir ldr. Mühendisler ve yapı tasarımcıları, betonun basınç dayanımını optimize etmek için çeşitli önlemler alırlar. Bu nedenle, betonun basınç dayanımı, yapıların performansını belirlemek ve kaliteli yapılar inşa etmek için dikkate alınması gereken kritik bir faktördür (Binici, ağatay ve Kaplan, 2000).

2.2.2. Karışımdaki agregâ ile ilgili faktörler

Betonun kalitesi ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan faktörlerden biri de karışımda kullanılan agregâ olarak adlandırılan malzemelerdir. Agregâ, kum, çakıl, taş gibi granüler malzemeleri ifade eder ve betonda çimento ve su ile birleşerek betonun hacim matrisini oluştururlar. Karışımdaki agregâ ile ilgili faktörler, betonun mukavemeti, dayanıklılığı, işlenebilirliği ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde etkilidir. Agregâ ile ilgili bazı önemli faktörler şunlardır (Aydeniz, 2012):

- Agregâ türü ve özellikleri: Agregaların türü, boyutu, şekli ve mineralojik özellikleri betonun mukavemetine ve diğer mekanik özelliklerine etki eder. Daha sağlam, sert ve uygun boyuttaki agregalar genellikle daha yüksek mukavemetli betonlar elde etmek için tercih edilir.
- Agregâ gradasyonu: Agregaların doğru bir şekilde gradelendirilmesi, betonun homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar. İyi bir agreganın farklı boyutlarda tanecikler içermesi, betonun iyice dolması ve güçlü bir matris oluşturması için önemlidir.
- Agregâ-çimento oranı: Agregâ-çimento oranı, betonun içindeki agregâ miktarını çimento miktarına göre belirler. Bu oran, betonun mukavemeti, işlenebilirliği ve dayanıklılığı üzerinde etkilidir. Doğru oranlama, agregâ ve çimento arasında uygun bir denge sağlar.
- Agregâ nem içeriği: Agregaların nem içeriği, beton karışımının su gereksinimini etkiler. Agregaların fazla nem içermesi, su/çimento oranını artırarak betonun mukavemetini düşürebilir. Bu nedenle, agregaların nem içeriği kontrol edilmeli ve uygun bir şekilde karışıma dahil edilmelidir.
- Agregâ kaynaklı reaktiflik: Bazı agregalar, özellikle bazalt ve bazalt bazlı malzemeler, betonda alkali-silika reaksiyonuna neden olabilir. Bu reaksiyon, betonun çatlamasına ve dayanıklılığının azalmasına yol açabilir. Bu nedenle, reaktif agregaların kullanımı önlenmeli veya kontrol altında tutulmalıdır (Binal, 2012).

2.2.3. Su / çimento oranı

Betonun dayanım ve durabilitesini etkileyen en önemli birleşim parametresi su-çimento oranıdır. Bu oran betonun işlenebilirliği için çok önemlidir. Agrega kalitesi ve miktarı çok önemli bir rol oynamaktadır.

Uygun şekilde sıkıştırılmış betondaki boşluk miktarı, su/çimento oranı ile doğru orantılıdır. Düşük su-çimento oranında yüksek mukavemet elde edilebilir. Ancak çok az su varsa beton dökülemez. Bu nedenle, gücü maksimize eden uygun bir değer olmalıdır. Aşırı su kullanımı betonun rötresini engeller, gözenekliliği artırır ve darbe dayanımını azaltır (Türkel, 2006).

2.2.4. Sıkıştırma düzeyi

Betonun dayanımını etkileyen diğer bir parametre de basınç derecesidir. Alanı en aza indirmek için beton sıkıştırılır. En az boşluk ve gözenekliliğe sahip iyi sıkıştırılmış beton, hafif sıkıştırılmış betondan daha güçlüdür. Betondaki büyük boşluklar, mukavemet kaybına neden olur ve bu nedenle yapı malzemelerinin ana kusurlarından biridir (Lu ve ark, 2018). Bu boşluklar genellikle kaba agregalar ile çimento hamuru arasında oluşur ve iki nesne arasındaki bağ kuvvetini büyük ölçüde azaltır. Çimento hamuru ile agregalar arasındaki bağın zayıflaması, mukavemette önemli bir düşüşe neden olur.

2.2.5. Betonun deney yaşı

Betonun dayanımı, uygun sıcaklık ve nem ortamında zamanla artan bir süreçtir. Beton numunesi yaşlandıkça, içerisindeki çimento ve su reaksiyonları devam eder ve kristal yapının oluşumu gerçekleşir. Bu süreçte betonun dayanımı da artar. Betonun gücü, özellikle erken yaşlarda hızla gelişir. İlk günlerde beton hızla küreşir ve ilk mukavemet kazanılır. Ancak, uygulamada betonun 28 günlük dayanımı büyük önem taşır çünkü betonun zaman içinde elde edebileceği maksimum dayanım yaklaşık olarak ilk 28 günde gerçekleşir. Mukavemet artış hızını etkileyen bir diğer faktör ise su/çimento oranıdır. Su/çimento oranı düşük olan betonlar, daha az su içerdikleri için suyla reaksiyona girecek çimento miktarı daha az olur. Bu durumda, çimento parçacıkları arasındaki bağlar daha güçlü olur ve betonun dayanım kazanma hızı artar. Betonun dayanımını etkileyen faktörler arasında çimento tipi, agregaların kalitesi, karışım oranları ve uygun kürelemede bulunur. Betonun dayanımı aynı zamanda kullanım şartlarına ve çevresel faktörlere de bağlıdır (Özkul vd. 1999).

2.2.6. Kür koşulları

Kürün iki farklı boyuttaki örneğe uygulanması, değişimin farklı oranlarda gerçekleşmesine neden olur. Numune boyutu küçüldükçe yüzey alanı/hacim oranı artar ve nem yolu uzunluğu değişir. Malzemenin mukavemeti, numunenin boyutuna bağlı olarak numunenin merkezinden yüzeyine değişir ve test sırasında hidrasyon numunenin yüzeyi boyunca tekdüze değildir. Sabnis ve Aron (1971) tarafından yapılan bir araştırmada, numunenin yüzeyini nemli tutmanın, boyut küçültmeye bağlı olarak mukavemetteki artışı en aza indirdiği bulundu. Genişletilmiş betonun kesilmesiyle elde edilen 250-560 mm'lik karotların dayanımı bir yıl sonra çok az değişiklik gösterdi. Numuneler testten önce kurutulursa daha yüksek dayanım değerleri elde edilir. Bu, numune boyutuyla ters orantılı olarak değişen yüzey alanının hacme oranına bağlıdır. En büyük numune yüzeyi çok yavaş kurur, bu da yüzeyden en uzak noktada en düşük akış bileşeni ve en yüksek gerilim değeri ile sonuçlanır.

Soroka ve Baum (1994) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, numuneler kürlendirme koşullarına göre kurutularak numune boyutuna göre mukavemet ölçülmüştür ve ölçülen mukavemet değerleri özellikle küçük numuneler için bu etkiyi göstermiştir. Mukavemetin boyut arttıkça azaldığına, kuru mukavemetin aksine dış tabakanın hidrasyon gecikmesinin azaldığına ve iç yapının daha çatlayabilir hale geldiğine inanılmaktadır. Çalışmalar, kübik numunelerin mukavemetinin kürlendirmeden daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Bu etki, daha küçük numuneler için daha büyüktür ve boyut etkisi ile azalır. Mukavemet üzerindeki bu zararlı etki, dış tabakanın yavaşlaması ve kurummasından kaynaklanan çatlama ile ilgilidir.

2.3. Literatür Taraması

Essam'ın (2009) ağır betonun darbe davranışına ilişkin araştırması, dinamik yüklere ve patlamalara dayanabilen beton yapılar ortaya çıkardı. Brower ve Ferraris (2003)'ün çalışmasında üretilen betonun iyi mekanik özellikler, radyasyon azaltımı ve dayanıklılık gibi avantajları nedeniyle koruyucu beton olarak kullanılabileceği fark edildi. Deneylerde ince agrega olarak Portland çimentosu ve ince serpantin, kaba agrega olarak da ilmenit kullanılmıştır. Ayrıca farklı miktarlarda çelik lifler eklenmiş ve farklı katkı maddeleri ile kullanılmıştır. Standart 15 x 15 x 15 cm küp, 20 x 10 cm silindir ve 70 x 10 x 10 cm kiriş kullanılarak çeşitli oranlarda numuneler ve beton

karışımları hazırlanarak basma, eğme ve çekme, ultrasonik ve darbe testleri yapılmıştır. İlmenit ve serpantin gibi yapay agregaların, ağır beton barınaklar inşa etmek için gerekli mekanik özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir (Rahimov ve Muminov, 2022). Özel testler, ilmenit bobinlerinden yapılan ağır betonun, sıradan betondan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, karıştırılarak yapılan ağır betonun, normal dayanımlı betondan daha güçlü olduğu bulunmuştur. Kantar ve ark. (2011) 150 x 150 x 710 mm boyutlarında 10 adet betonarme mesnet (5 normal ve 5 ağır) imal etmek ve farklı beton dayanımlarının darbe davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için bir çalışma yapılmıştır. Beton karışımında KPÇ 2.5 tipi Portland çimentosu ve 0-7 mm ve 7-15 mm çapında iki tip dolgu maddesi kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı beton elde etmek için numunelere ağırlıkça %1 çimento akışkanlaştırıcı ve silis dumanı ilave edilmiştir. Numuneler, 5 farklı yükseklikten düşürülen sabit ağırlıklı bir çekiçe test edilmiştir. Darbeden kaynaklanan hızlanma zaman içinde ölçülmüştür. Test elemanının hız, yer değiştirme ve enerji değişimleri hesaplanmıştır. Farklı yüksekliklerden ağır çekiçler atıldığında normal ve betonarme yıkım gözlenmiştir. Darbe yüklemesi altındaki normal ve yüksek basınçlı beton kiriş numunelerinin hasar ve göçme modelleri farklıdır. Darbe yüküne maruz kaldığında numunenin iç davranışını araştırmak için kiriş elemanı üzerinde simetrik olarak iki ivme ölçümü yapılmıştır. Ayrıca, müteakip normal mukavemet test elemanı düşürüldükten sonra kılcal çatlaklar ve artan genişlikler gözlemlenmiştir. Yüksek dayanımlı deney elemanlarında, çatlak gelişimi ani olup düşme sayısı artmasına rağmen gözlenebilir hasar belirtisi olmadan göçme meydana gelmiştir. Normal basınç dayanımlı deney elemanlarında ise agrega dağılımının kırılmada önemli rol oynadığı, çatlakların dallanma gösterdiği ve çatlak dağılımının değiştiği görülmüştür. Betonun basınç dayanımındaki artış, betonun çarpışma davranışını etkileyerek tüketilen enerjiyi, çekiç düşme sayısını, ivmeyi artırırken deplasmanları azaltmıştır.

Selvi (2008) geliştirilen test programında, 15 x 15 x 71 cm kesitli 10 adet beton kiriş, 30, 35 ve 50 cm'lik pirinç tarlalarına çeşitli yüksekliklerden düşürülen sabit ağırlıklı çekiç darbelerine maruz bırakılmıştır. Malzeme olarak 0-7 mm ve 7-15 mm çapında iki akışkan malzeme ve Ankara yöresinden Portland çimentosu CEM I PO 2.5 kullanılmıştır. Oluşturulan kiriş numunelerinden beşi normal dayanımlı beton, beşi ise yüksek dayanımlı betondur. Farklı yüksekliklerden düşürülen beş sabit

ağırlıklı çekiç (5.25 kg), numune çökene kadar numunenin üzerine düşürülmüştür. Her damla için, ivmeölçerler ve kuvvet ölçerler kullanılarak numunenin iç etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Uğurlu (1999) çalışmasında, çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin beton davranışı üzerindeki önemini incelemiştir. Betonun farklı özelliklere sahip olabileceğini ve beton sınıflandırmasının bu farklılıkları ayırt etmede kullanılan bir kavram olduğunu belirtmiştir. Betonun gerilme-deformasyon davranışını tek bir tarifleme yapmanın mümkün olmadığını vurgulayarak, kısa süreli yükleme altındaki davranışını incelediği ifade edilmiştir. Kompozit davranışının malzemelerin etkileşimiyle belirlendiği ve tek eksenli yükleme altında betonun kırılma sürecinin üç aşamada gerçekleştiği açıklanmıştır. Sonuç olarak, agrega-çimento hamuru bağının karmaşık olduğu ve basit genellemelerle açıklanamayacağı ifade edilmiştir.

Akkaya, Bayramov ve Taşdemir (2003) tarafından yapılan çalışmada önce betonun malzeme davranışı, iç yapısı ve mekanik davranışı arasındaki ilişki incelenmiş, daha sonra kırılma parametreleri tanıtılmıştır. Betonun kırılma süreci bölgesi ve şekil değiştirme kapasitesi değerlendirilmiş ve betonda enerjinin nasıl yutulduğu toklaşma mekanizmaları ile beraber incelenmiştir.

Betonun çekme dayanımı üzerindeki etkileri inceleyen bir çalışma, mezo-bileşenlerin heterojenliklerini ve gerilme hızının rolünü ele alarak betonun üç faza sahip bir kompozit olarak modellendiğini göstermiştir. Çift kenarlı çentikli beton numuneleri kullanılarak farklı gerilme hızlarında yapılan dinamik çekme deneyleri, yapısal boyutların betonun dayanımına etkisini ortaya koymuştur. Sonuçlar, dinamik çekme dayanımının yapısal boyutlarla statik dayanımdan farklı davrandığını göstermiştir. Kritik bir gerilme hızı belirlenmiş ve bu hızda dinamik çekme dayanımı numune boyutundan bağımsız hale gelmiştir. Bu kritik hız altında gerilme dayanımı numune boyutuyla azalırken, kritik hızın üzerinde farklı boyutlardaki numuneler arasında belirgin bir fark olmamıştır. Bu çalışma, betonun çekme dayanımı için bir Statik ve Dinamik birleşik Boyut Etkisi Yasası'nın (SD-SEL) oluşturulmasını önermiş ve bu öneri mezoskopik sayısal simülasyonlarla doğrulanmıştır (Jin vd., 2019).

Bir çalışmada betonun kırılma özelliklerindeki boyut etkisini araştırmak amacıyla 100 mm, 200 mm ve 300 mm yüksekliğinde üç farklı beton kiriş örneği kullanılmıştır. Bu örnekler önce 115 gün boyunca %30 pik yüke maruz bırakılmış,

ardından standart statik üç nokta eğilme (TPB) yüklemesi altında kırılana kadar test edilmiştir. İlk çatlama direnci, kararsız kırılma direnci, kırılma enerjisi ve kırılma süreci bölgesinin gelişimi, deneysel sonuçlar kullanılarak sürekli yükleme sonrası betonun boyut etkisi üzerinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sürekli yükleme sonrası betonun çatlama başlatma direncinin arttığını ve bu nedenle ilk çatlama yükünün ve ilk kırılma tokluğunun arttığını göstermiştir (Rong vd. 2019).

Bir diğer araştırma, beton gibi kırılğan malzemelerde boyut etkisinin sayısal mezo ölçekli sonuçlarını sunmuştur. Deneysel temelli mezo-yapı ile yarı-statik çekme gerilimi sırasında boyut etkisini simüle etmek için ayrık eleman yöntemi (DEM) kullanılmıştır. İki boyutlu (2D) hesaplamalar, iki farklı kırılma modunun (yarı gevrek ve geri tepme kararsızlığı ile çok gevrek) meydana geldiği iki çaplı beton silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Beton, agrega parçacıkları, çimento matrisi, arayüzey geçiş bölgeleri ve makro boşluklardan oluşan rastgele heterojen 4 fazlı bir malzeme olarak modellenmiştir. Farklı numune çaplarının dayanım, gevreklik ve kırılma modeli üzerindeki etkisi incelenmiş, her bir iç enerji bileşeni detaylı olarak analiz edilmiş ve farklı tepe sonrası davranışlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, beton numune çapının artmasıyla dayanımın azaldığını göstermiştir ve bu, deneylerle uyumlu bir şekilde hesaplanmıştır (Suchorzewski vd. 2019).

Başka bir çalışma, betonun dinamik davranışı ve boyut etkisi üzerine odaklanan mezoskopik bir simülasyon yöntemi geliştirmiştir. Bu yaklaşımda, betonun içsel heterojenlikleri ayrıntılı olarak tanımlanmış ve mezo bileşenlerin gerilme hızı etkisi hesaba katılmıştır. Kare şeklindeki beton numuneleri kullanarak farklı şekil değiştirme hızları (10-5/s ila 200/s) altında betonun dinamik basınç davranışını ve boyut etkisini modellemiş ve incelemiştir. Ayrıca, gerinim oranının betonun basınç dayanımındaki boyut etkisi üzerindeki etkisi de değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları, belirli bir kritik gerinim oranının varlığını ortaya koymuştur. Bu kritik değeri aşan gerinim oranları, numune boyutunun artmasıyla basınç dayanımını artırırken, gerinim oranı arttıkça dinamik basınç dayanımındaki boyut etkisinin daha belirgin hale geldiğini göstermiştir. Bununla birlikte, uygulanan gerinim oranı bu kritik değerin altındaysa, numune boyutu arttıkça basınç dayanımının azaldığı ve gerinim oranı arttıkça dinamik basınç dayanımındaki boyut etkisinin azaldığı görülmüştür (Liu vd. 2019).

Bir başka çalışmanın amacı, beton kırılma testlerinde boyut etkisi ve bulaşmış çatlak modellerini incelemek ve bu doğrusal olmayan modellerin boyutun etkilerini belirlemek olmuştur. Bu bağlamda, laboratuvar boyutundaki çatlaklı beton numuneleri için Sabit Yayılı Çatlak Modeli (FCM) geliştirilmiş ve boyut etkisi modelinin farklı kırılma parametreleri üzerindeki etkisi laboratuvar ve sayısal analizlerle değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, normal beton ve baraj betonunun malzeme özelliklerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ayrıca, kırılma enerjisi, Kırılma İşlem Bölgesi (FPZ) uzunluğu ve kırılma tokluğunun boyut etkisi üzerindeki etkilerini gösteren özel denklemlerin oluşturulması gerekliliği ortaya konulmuştur. Bu çalışma, Bazant'ın boyut etkisi modeli ve diğer doğrusal olmayan kırılma modellerinden elde edilen kırılma parametrelerinin numune boyutundan etkilendiği sonucuna ulaşmıştır (Pirooznia ve Moradloo, 2020).

Diğer bir araştırma, beton malzemelerin yarmada çekme dayanımına etkisi nadiren araştırılan maksimum agrega boyutu (MAS) ve beton dayanım sınıfı (CSG) gibi belirli malzeme parametrelerini ele almıştır. Deneysel ve sayısal yöntemlerle, farklı MAS ve CSG kombinasyonları üzerinde çalışılmıştır. Toplam 84 beton kübik numune dört farklı MAS ve üç CSG seviyesi ile farklı kenar uzunluklarında test edilmiştir. Sayısal olarak, 114 beton kübik model oluşturulmuş ve simüle edilmiştir. Sonuçlar, yarma çekme dayanımının artan kenar uzunluğu ile azaldığını ve bu düşüşün kenar uzunluğu arttıkça azaldığını göstermiştir. Daha küçük MAS, dayanım düşüşünü artırırken, yüksek CSG seviyeleri daha belirgin dayanım düşüşleri sergilemiştir. Ayrıca, MAS ve CSG'nin makroskopik kırılma davranışına olan etkileri ve ilgili boyut etkisi mekanizması analiz edilmiştir (Jin, Yu ve Du, 2020).

Bir çalışmada, pratik mühendislik uygulamalarında karşılaşılan karmaşık gerilme durumları altında betonun mekanik davranışını incelemek için bir 3D mezoskopik modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Farklı yanal gerilme oranları ($\lambda = 0, \pm 0.25, \pm 0.5, \pm 0.75, \pm 1$ ve ∞) altında yarı statik iki eksenli basınç (C-C durumu) ve iki eksenli basınç-gerilme (C-T durumu) koşullarında çeşitli boyutlardaki beton numunelerinin davranışları simüle edilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda, yanal gerilme oranının kırılma modu, nominal mil basınç dayanımı, nominal yanal çekme dayanımı (yalnızca C-T durumu için) ve ilgili boyut etkisi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, C-C durumu için mil basınç dayanımının önce arttığını ve daha sonra azaldığını göstermiştir. İlgili boyut etkisi, yanal gerilme

oranı arttıkça kademeli olarak zayıflamış ve daha sonra tekrar güçlenmiştir. C-T durumu için ise yanal gerilme oranının artmasıyla birlikte mil basınç dayanımının kademeli olarak azaldığı ve buna paralel olarak yanal çekme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda, artan mil basınç gerilimi ile birlikte karşılık gelen boyut etkisinin kademeli olarak arttığı gözlemlenmiştir (Jin vd. 2021).

Başka bir çalışma, C30 beton diskin dört farklı çapında (70 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm) hazırlanan örneklerin, 0,61 su-çimento oranıyla, 2×10^{-5} s-1 ile 12 s-1 arasındaki geniş bir gerilme hızı aralığında çekme testine tabi tutulmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, dinamik boyut etkisinin net bir şekilde gözlemlendiğini ortaya koymuştur. Dinamik boyut etkisi, 2×10^{-3} s-1'in altındaki gerilme hızlarında statik boyut etkisine benzer bir şekilde davranmış, yani daha küçük boyuttaki numuneler daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olmuştur. Ancak, 2 s-1'in üzerindeki daha yüksek gerilim oranları, daha büyük boyuttaki numunelerin dinamik mukavemetini artırdığını göstermiştir. Dolayısıyla, daha büyük boyutlu numuneler daha yüksek dinamik çekme mukavemeti sergilemiştir. (Zhong vd. 2021).

Bir diğer araştırma, gözenekli betonun mekanik özellikleri üzerindeki boyut ve şekil etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. İki farklı agrega tipi ve üç farklı çimento sınıfı kullanılarak farklı numune tipleri (silindirik ve kübik numuneler) oluşturulmuştur. Öncelikle, gözenekli beton numuneleri, şekil ve boyutun betonun geçirgenliği üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla test edilmiştir. Daha sonra, çeşitli küp ve küboid numuneler belirli boyutlarda seçilerek betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ölçülmüştür. Ayrıca, basınç dayanımı ve yarıлма dayanımını test etmek için iki farklı boyutta silindirik numuneler seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gözenekliliğin, agrega boyutunun, agrega tipinin ve çimento sınıfının gözenekli betonun dayanımını etkileyebileceğini göstermiştir. Ayrıca, farklı şekillerdeki numunelerin (küp, küboid, silindirik) basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarıлма dayanımı ve benzeri özelliklerde önemli farklılıklar sergileyebileceği bulunmuştur (Zhang vd. 2021).

Diğer bir çalışma, betonun doğrusal olmayan mekanik davranışında önemli bir rol oynayan agreganın boyut etkisi ile ilişkili bir mezo-mekanik modelleme yöntemi geliştirmiştir. Farklı kenar uzunluklarına, maksimum agrega boyutlarına (MAS) ve beton dayanım sınıflarına sahip kare beton numunelerinin yarı statik yük altında tek

eksenli basınç göçmesi davranışını simüle etmek için sürekli derecelendirilmiş agrega modeli kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, MAS'ın betonun iç bileşenlerindeki çatlak ilerleme biçimini etkilediğini ve artan MAS'ın nominal basınç dayanımını azalttığını göstermiştir. Aynı zamanda, artan MAS'ın, dayanımın yapısal boyuta olan duyarlılığını artırabileceği ve boyut etkisini daha belirgin hale getirebileceği görülmüştür. Sayısal analizin yanı sıra, nominal basınç dayanımını MAS'ı dikkate alan değiştirilmiş bir Tip-2 boyut etkisi yasasıyla teorik olarak açıklamıştır. Bu, basınç dayanımının boyut etkisi davranışını nicel olarak tahmin etmeye olanak tanımıştır (Jin vd. 2021).

2.4. Deney Yöntemi İle İlişkili Faktörler

2.4.1. Yükleme hızı

Beton zamanla deforme olabilen bir malzemedir, bu nedenle yük oranı, mukavemeti belirlemede en önemli faktörlerden biridir. Çoğu testte, yavaş yüklenen numunelerin mukavemetinin, hızlı yüklenen numunelerden daha düşük olduğu bulunmuştur. Bu çalışmalara dayanarak, yük hızı düştükçe kuvvet önemli ölçüde artarken kuvvet azalır. Bu nedenle beton, kalıcı yükler ve deprem gibi ani yükler altında çok farklı davranır. Benzer şekilde teknik verilerde ve yönetmeliklerde standart sıkıştırma testleri tanımlandığında, yük faktörü $\text{kgf/cm}^2/\text{s}$ cinsinden verilir (Ersoy, 2000).

2.4.2. Numunelerin nem içeriği

Numunenin nem içeriği, basınç dayanımını etkileyen diğer bir faktördür. Genel olarak, tamamen doymuş bir numunenin mukavemetinin, kuru bir ortamda kürlenmiş bir numuneden %10-15 daha düşük olduğu kabul edilir. Bir numunenin gücünü değerlendirirken nem göz önünde bulundurulmalıdır. Numune bozulmamışsa ve ıslak değilse, kuru sıkıştırma testi yapılmalıdır. Bununla birlikte, BS standartları, test ve testten önce numunelerin en az 40 saat suda tutulmasını gerektirir. Numunenin suda bekletilmesinden kaynaklanan "ekstra nem", numunenin mukavemetini olumsuz etkiler (Arıoğlu ve Arıoğlu, 2005).

Bartlett ve MacGregor 1994 yılında yaptığı çalışmada 50*100 ve 100*200 mm çaplı karotlara basınç deneyinden önce su içinde saklama süresinin dayanım üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu sonuçlarda deney öncesi numunenin su içinde saklanması dayanım kaybına neden olmuş ve bu kaybın boyutu özellikle uzun süre

(22 gün) su içinde tutulan küçük çaplı (50 mm) karotta çok daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle suyun küçük çaplı karotun basınç dayanımını azaltıcı etkisi daha belirgindir.

2.4.3. Numune boyutu

Malzemelerde boyut etkisi, malzeme içindeki boşluklar ve mikro çatlaklar gibi iç mikroskobik olaylarla ilişkilendirilen bir fenomendir. Bu etki, malzemenin mekanik özelliklerini boyutuna bağlı olarak değiştirir. Beton gibi heterojen malzemelerde, agrega ve numune boyutu, geometrik homojenlik derecesinin dayanım üzerinde önemli bir faktör olduğunu düşündürmektedir. Araştırmacılar, boyut etkisini anlamak ve belirlemek için çeşitli yaklaşımlar geliştirmiştir. Bu yaklaşımlardan biri, numune boyutuyla içerisindeki kusurların niteliği arasında ilişki kurmaktır. Numunelerin boyutu, içerisindeki kusurların dağılımını etkileyebilir ve dolayısıyla dayanımı etkileyebilir. Bu nedenle, malzeme boyutunu anlamak ve kontrol etmek, mühendislik uygulamalarında önemlidir. Boyut etkisi, malzeme tasarımı ve yapısal analizde dikkate alınmalıdır, çünkü farklı boyutlardaki malzemeler arasında dayanım ve davranış farklılıkları olabilir. Araştırmalar, boyut etkisini daha iyi anlamak ve malzeme performansını geliştirmek için devam etmektedir (Tanigawa ve Yamada, 1978; Aktaran: Türkel, 2006).

Çalışmalarda, küçük boyutlu numunelerin genellikle daha yüksek dayanıma sahip olduğu ve dayanımın küçük numuneler arasında büyük ölçüde değişebildiği gözlemlenmiştir. Boyut etkisi ve dayanımdaki dağılımın açıklanması için çeşitli teoriler geliştirilmeye çalışılmıştır. İstatistiksel teoriler, dayanımdaki değişimi ve heterojen malzemenin uygun karakterinin istatistiksel dağılımını elde etmeye odaklanmaktadır. Betonun mikro yapısıyla ilgili yapılan çalışmalar, Weibull, Tucker, Wright-Garwood, Nielsen, Glucklich ve Cohen gibi araştırmacılar tarafından ana etkileri belirlemek için özel ultrastrüktürel çalışmaları içermiştir. Bu çalışmalar, boyut etkisini anlamak ve dayanımın tahmin edilmesi için önemli bir temel oluşturmaktadır. Boyut etkisi, mikro yapıya dayalı olarak iki yaklaşım olan "Demet Teorisi" ve "Zayıf Bağ Teorisi" ile açıklanmıştır. Demet teorisinde dayanım, hem zayıf fiberlerden hem de komşu fiberlerden elde edilen değerlere bağlıdır. Zayıf bağ teorisinde ise tek bir fiberdeki tek bir kusurun tüm malzemenin kırılmasını etkilediği kabul edilir. Her iki teori de boyut etkisini tam olarak açıklayamaz, ancak temel bir anlayış sağlar (Haris ve Sabnis, 1999; Şener, 1997).

Boyut etkisi, malzemelerin heterojen davranışından kaynaklanan verilere dayanarak araştırılmaktadır. Numune boyutunun malzemenin davranışı üzerindeki değişimleri anlamak önemlidir. Çeşitli deneysel çalışmalar, betonun boyut özellikleriyle ilgili faktörleri belirlemeye yönelik sonuçlar ortaya koymuştur. Baalbaki, 100x200 ve 150x300 mm çaplı silindir numuneler üzerinde yaptığı çalışmada numune boyutu ve elastisite modülünün orantılı olduğunu belirlemiştir. Pistilli ve Willems ise 27,6–62,1 MPa arasındaki betonlarda silindir boyutunun önemsiz olduğunu, ancak 62,1–110,4 MPa dayanımlarda önemli bir değişim olduğunu göstermiştir. Aitcin'in çalışmasında büyük boyutlu numunelerin basınç dayanımı değişim katsayısının daha büyük olduğu ve büyük boyutlu silindirlerin daha düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir (Aktaran: Issa vd. 2000).

Day ve Haque ise kalıp türü ve silindir boyutunun etkisini inceleyerek, boyutun basınç dayanımında önemli bir faktör olduğunu ortaya koymuşlardır (Chin vd. 1997; Rashid vd. 2002). Breau'nun araştırması ise belli bir boyuttan sonra boyut etkisinin kaybolduğunu ve düşük mukavemetli betonlardaki boyut etkisinin yüksek mukavemetli betonlardan daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar, boyut etkisinin beton davranışını etkileyen önemli bir faktör olduğunu ve farklı boyutlardaki numunelerin dayanımında farklılıklar olduğunu göstermektedir (Aktaran: Türkel, 2006).

2.5. Basınç dayanımına etkileyen diğer faktörler

Beton, agregalardan ve bir çimento bileşiminden oluşur. Mekanik özellikleri agrega dağılımına bağlıdır. Örneğin Young modülü, mikromekanik agrega yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Betonu kırılma noktasına kadar yüklerken, agrega yoğunluğu, beton kırılma enerjisinin yalnızca agrega dağılımına bağlı olduğu gerçeğiyle bağlantılı olarak, çatlamış yüzeyin sürtünme uzunluğunu belirler. Çoğu çalışmada agrega dağılımı gözlenir, ancak beton karışımlarında sınır tabakası kalınlığı, agrega yoğunluğu ve sürtünme yüzeyleri arasındaki ilişkiyi yalnızca istatistiksel yöntemler açıklayabilir. Takım yüzeyinin etkisi özellikle önemlidir. Özellikle kalıp yüzeyleri aglomeraların düzensiz dağılmasına neden olur. Kaba agrega ve ince agrega, kalıbın dört köşesine eşit olarak dağıtılabilir. Belli bir değer üzerinde iri agrega, kalıp yüzeyi darbelerine karşı daha hassastır. Buradaki numune boyutunun maksimum beton kalıp boyutundan daha büyük olduğuna dikkat edin. Bazı standartlar numune boyutunu ve maksimum agrega çapını sınırlar. Bir mm

küp deney numunesi için maksimum agrega boyutunun 25 mm olması gerektiğini ve numunenin oranının agreganın maksimum çapı 25 mm olmalıdır (Türkel, 2006).

2.5.1. Numune biçimi

Numune geometrisine göre değişen sıkıştırma kuvveti, numune yüzeyi ile sıkıştırma tablası arasındaki sürtünme kuvvetine bağlıdır. Bu kuvvet, numunenin serbestçe genişlemesini önleyerek numune arızasını ve bozulmasını yavaşlatır. Sürtünme kuvveti numune kalınlığı (yükseklik/çap) ile artar veya azalır. Kalınlık azaldıkça, sürtünme kuvvetleri numunenin yüksekliği boyunca etki ederek kenetleme kuvvetini artırır ve yanıl bozulmayı önler. Daralma sırasında serbest yanıl genişleme meydana gelir ve bu da basınç dayanımını azaltır. Bu sonuçlar, 1.2 m bloklardan 5 yıl sonra alınan 100 mm ve 50 mm çaplı karotların basınç dayanımının $1 \leq \lambda \leq 2$ aralığında narinlik faktöründen neredeyse bağımsız olduğunu göstermektedir. Barlett ve Macgregor, 50 mm çaplı bir çekirdeğin narinliğe 100 mm çapındaki bir çekirdeğe göre daha fazla katkıda bulunduğunu buldu. Numune konikliği 2100 mm'lik bir çekirdek çapı için 0,88'lik bir düzeltme faktörüne sahipse, bu oran 50 mm'lik bir çekirdek çapı için 0,80'e düşer (Arıoğlu ve Arıoğlu, 2005).

2.5.2. Düzensiz dayanım

Malzemenin istatistiksel heterojenliği, direncini belirleyen mikromekanizmada önemli bir rol oynar. Bu, mikro yapıdaki kusurların boyut dağılımının malzemenin mukavemeti üzerindeki etkisini gösterir. Bununla birlikte, mukavemetteki düzensizlik, Weibull tipi olasılıksal modellere dayanan malzeme düzensizliğinden kaynaklanmaktadır ve maksimum gerilme çoğu yapı üzerinde üniform olmadığında, çoğu yapıda gevrek kırılma için gözlemlenen boyut etkisini tam olarak açıklamıyor gibi görünmektedir (Haris ve Sabnis, 1999).

2.5.3. Agrega boyutu ve granülometrisi

Beton, agregalardan ve bir çimento bileşiminden oluşur. Mekanik özellikleri agregaların dağılımına bağlıdır. Örneğin, elastik modül, mikromekanizma bağılı olarak agrega yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak belirlenebilir. Beton kırılma noktasına kadar yüklendiğinde, agrega yoğunluğu kırılma yüzeyi sürtünme uzunluğunu belirler, çünkü beton kırılma enerjisi tamamen agrega dağılımına bağlıdır. Çoğu çalışmada kaya dağılımı gözlemlenmiş olmasına rağmen, beton karışımlarında sınır tabaka kalınlığı, kaya yoğunluğu ve sürtünme alanı arasındaki

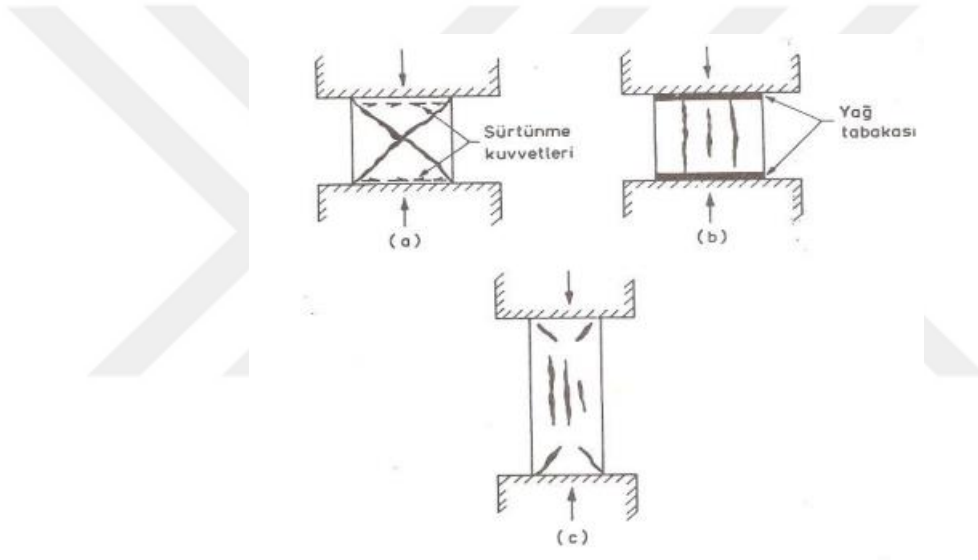
ilişkiyi yalnızca istatistiksel yöntemler açıklayabilir. Takım yüzeyinin etkisi özellikle önemlidir. Özellikle kalıp yüzeyleri aglomeraların düzensiz dağılmasına neden olur. Kaba agrega ve ince agrega, kalıbın dört köşesine kolayca dağıtılabilir. Belirli bir seviyenin üzerindeki kaba agrega kalıba duyarlıdır. Buradaki numune boyutunun maksimum kalıp boyutundan daha büyük olduğuna dikkat edin. Çeşitli kriterler numune boyutunu ve maksimum agrega çapını sınırlar. Örneğin, BS 1881 1970, 100 mm'lik bir kübik numune için maksimum agrega boyutunun 25 mm olduğunu ve numune boyutunun maksimum agrega çapına oranının 25 mm olduğunu şart koşar (Kosaiyakanon ve Pisitpaibool, 2005).

Silindirik ASTM numuneleri için silindir çapın maksimum agrega çapına oranı 3'tür ve ABD Çalışma Komitesi bu oranı değişiklik için kabul etmiştir. Genel olarak bu oran 3 ile tatminkar arasında bulunmuştur. Carrasquillo (1988), minimum örneklem boyutunun maksimum genel boyutun üç katı olması gerektiğini gösterdi. Bu, örnek sıkıştırmanın önemli bir bileşenidir. Issa, Islam ve Yousif (2000) tarafından yapılan bir araştırma, maksimum toplam boyut küçüldükçe güç oranının düştüğünü gözlemledi. Bu, çapı 0,75 mm'den farklı olan agregalar için geçerlidir. Bazı çalışmalar, küçük silindirlerin büyük bir kuvvetle kırılmaya başladığını göstermiştir. Tanigawa ve Yamada (1978), farklı agrega boyutlarının sadece betonun içyapısını değil, aynı zamanda karışımın mukavemetini de etkilediğini bulmuşlardır. Araştırmacılar, çapı 3 mm'den az olan maksimum agrega boyutunun, beton heterojenliğine göre değişen basınç dayanımı üzerinde hiçbir etkisinin olmadığını bulmuşlardır. Burada tartışılan agrega boyutu etkilerinin genellikle numune boyutunun maksimum agrega çapına oranı ile açıklanabileceğini, ancak geometrik Büyük boyutların daha az güçlü olabileceğini bulmuşlardır. Toplama, sınırlayıcı boyuta ulaşmak için gerekli ekranlardan geçer. Bu işlem, numunenin gücü üzerinde büyük bir etki ile karakterize edilir. Örneğin, maksimum çapı 38 mm olan bir karışımdan beton yapılırsa, maksimum çapı 18 mm olan bir karışım elde edildiği gözlemlenmiştir. Başka bir çalışmada, maksimum çapı 152 mm olan alaşımlardan maksimum 38,1 mm çapa kadar yapılan numuneler için -29 aralığında mukavemet değerlerinde bir artış bulundu.

2.5.4. Numune ve basınç tablası arasındaki teğetsel gerilme kuvveti

Deneyisel çalışmalar, plaka ile numune yüzeyi arasında bir yağ tabakasının varlığının sürtünmeyi azalttığını ve numunenin kırılma modunu değiştirdiğini

göstermiştir. Sonuç olarak, eksenel sıkıştırma testlerinde uygulanan yük eksenine dik kırılmalar meydana gelir ve bu da mukavemetin azalmasına neden olur. Test makinesinin tipi ve yükleme yüzeyinin sertliği test sonuçlarını önemli ölçüde etkiler. Plaka ve numune yüzeyleri arasındaki sürtünme nedeniyle oluşan kuvvetler, uygulanan yük yüzeyinden uzaklaştıkça azalır. Bunun doğal bir sonucu olarak, sürtünmenin kırılma üzerindeki etkisi, numune yüksekliğinin kesit boyutuna oranı arttıkça azalır. Yükseklik/çap oranı 2 olan bir silindir, oranı 1 olan bir küpe kıyasla daha güvenilir bir numune olarak kabul edilir. Standart silindir sıkıştırma testlerinde, yönetmelikler tarafından önerildiği gibi uygun kapak uygulandığında, kapak sürtünmeyi azaltır, şekilde gösterildiği gibi kırılma ile sonuçlanır ve yerel sürtünme kuvvetleri numunenin ortasında etkisini kaybeder (Ersoy, 2000).



Şekil 2.1. Numune Yüzeyi ile Pres Tablası Arasındaki Sürtünme Kuvvetleri (Türkel, 2006).

2.5.5. Kalıplama ve yükleme doğrultusu

Chin, Mansur ve Wee (1997), prizmatik numunelerin aynı boyutlarda yatay ve dikey olarak döküldüğü döküm yönü üzerine deneysel bir çalışma yürütmüştür. Genel olarak, dikey olarak dökülen numunelerin, yatay olarak dökülen numunelere kıyasla gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kolunda daha yüksek süneklik sergilediği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, döküm yönünün etkisinin numune şekli etkisinden daha az önemli olduğu düşünülmektedir ve numune şekli etkisine benzer şekilde, döküm yönünün etkisi mukavemet artışı ile azalmaktadır. Yatay olarak dökülen numunelerdeki daha düşük süneklik, betondaki iri agregaların

yükleme yönü boyunca hizalanmasına bağlanabilir. Yatay olarak dökülen numunelerde, iri agregaların çoğu yükleme yönüne paralel olarak hizalanır ve numunedeki gecikmeli gerilmelerin büyümesini etkiler. Yatay olarak dökülen numunelerin yükleme eksenine boyunca, yoğun bir mikro çatlak bölgesi oluşur ve bu da agrega ile çimento hamuru arasında daha yüksek bir bağ alanı konsantrasyonuna neden olur. Sonuç olarak, yatay olarak dökülen numuneler dikey olarak dökülen numunelere kıyasla daha düşük gerilme yaşar, bu da normal dayanımlı betonda elde edilen gözlemlerle çelişir. Normal dayanımlı betonda, numune döküm yönüne paralel yönde yüklendiğinde, döküm yönüne dik olarak yüklenen numunelere kıyasla daha düşük sonuçlar elde edilir. Bu fenomen, taze betonda suyun yer değiştirmesinin esas olarak iri agregalar arasındaki boşluklarda ve zayıf bölgelerde meydana geldiği betondaki yönelim ve anizotropi farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Ancak, su-bağlayıcı oranı azaltıldığında, agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ güçlenir ve beton daha homojen bir malzeme haline gelir. Bu da betonun dayanımı arttıkça döküm yönünün etkisinin azalmasına yol açar. Bu konuda yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, yatay olarak dökülen numuneler, numune yaşından bağımsız olarak, dikey olarak dökülen numunelere göre %7-12 oranında daha zayıf bulunmuştur. Yip ve Tom tarafından 1988 yılında yapılan çalışmalarda, $d=50$ mm ve $d=100$ mm numune boyutları için rapor edilen oranlar sırasıyla %8 ve %4 daha düşüktür. Beton Birliği, 1987 tarihli bir kaynakta bu oranı %8 olarak belirtmiştir (Aktaran: Arıoğlu ve Arıoğlu, 2005).

2.5.6. Cidar Etkisi

Betonun kalıp yüzeyi civarında farklı bir bileşime sahip olması, betonun mukavemeti üzerinde etkili olan bir diğer faktördür ve bu nedenle dayanım iç kısmından farklılık gösterir. Bu etki, sınırlı etki olarak adlandırılan bir tabaka ile ortaya çıkar ve bu tabakanın kalınlığı ortalama bir agrega boyutu kadardır. Küçük bir numunede, bu etki büyük bir numuneye göre daha belirgindir. Çünkü sınır tabaka kalınlığı numune boyutundan bağımsızdır ve çok ince bir kesitte önemsiz olabilir (Haris ve Sabnis, 1999).

Sınırlı etkinin neden olduğu sınırlama, agrega granülometrisinde ortaya çıkar ve beton şekillendirmede önemli bir rol oynar. İri taneli agregalar arasındaki boşlukları doldurmak için daha fazla çimento harcına ihtiyaç duyulur ve bu, beton içinde gereğinden fazla çimento harcı kullanıldığında uygun bir karışım elde

edilebilir (Yavuz, 1995).

Literatürde, en büyük boyuttaki numuneler için, gerilmeye maruz kalan en büyük hacimli betonların düşük dayanıma sahip olma olasılığından bahsedilir. Sonuç olarak, dayanım azalması numune boyutu arttıkça gerçekleşir. Öte yandan, benzer karışımlarda, en küçük numunenin en yüksek dayanım değerine sahip olması beklenirken tam tersi bir durumla karşılaşılır. Küçük numunelerdeki bu zıtlık, sınırlı etkiyle ilişkilendirilir. Kaba agregası ile kalıp yüzeyi arasındaki boşluğu doldurmak için gereken çimento hamuru iç kısımda yoğun kütleden daha fazladır, bu nedenle sınırlı etkiyi azaltmak son derece önemlidir. Numunenin işlenebilirliğindeki bu etki, yüzey alanı / hacim oranı yüksek olan numunelerde daha fazla önem taşır. Tokyay ve Özdemir'in çalışmaları, küçük numunelerdeki düşük dayanımın sınırlı etkiden kaynaklandığını ve yüksek yüzey alanı / hacim oranına sahip olması ve sıkıştırmanın tam olarak sağlanamamasının etkili olduğunu göstermektedir. Bu etki, özellikle küp numunelerde daha önemlidir (Tokyay ve Özdemir, 1997).

Zheng, Li ve Zhao'nun (2003) çalışmalarında, beton kırılmaya kadar yüklendiğinde, agregası yoğunluğunun kırılan yüzeyde sürtünme boyunu etkilediği belirlenmiştir. Bu nedenle, betondaki kırılma enerjisi ve mukavemet, agregası dağılımı ile ilişkilidir. Betonun sınır yüzeyindeki agregası parçacıklarının dağılımı ve yoğunluğu homojen olmadığından, betonun sınır yüzeylerindeki kalınlık ve agregası yoğunluğu arasındaki ilişkiyi açıklamak için istatistiksel bir yöntem kullanılmıştır. Sonuç olarak, dağılımın belirli bir değeri aştıktan sonra homojen hale geldiği tespit edilmiştir, bu da betonun mukavemeti açısından önemlidir.

2.5.7. Yükleme Bloğu ve Eksantrite

Basınç dayanımı, test koşullarına ve diğer faktörlere bağlı olarak değişir. Bunlardan ilk bahsedilmesi gereken, yük tablasının dayandığı kürenin çapının etkisi ve numunenin yük eksenine göre eksantrikliğinin etkisidir. Özellikle yükleme bloğunun çapı önemli bir faktördür. Bu konuda bir çalışma Lessard, Chaallal ve Aitcin (1993) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre, numunenin çapı değiştikçe yükün oturduğu kürenin çapı da değiştirilmelidir. ASTM C39-83b'ye göre sıkıştırma testi sırasında koni arızası beklemek normaldir. Bunun nedeni, makine tablası ile numune kafasının beton yüzeyi arasındaki gecikmeli gerilimdir. Bununla birlikte, 102 mm'lik yük bloğu ile kırılma, güç okumasını düşürdü. Neville'e göre, bu oran, mukavemetleri 5 MPa civarında olan ve gecikmeli stresi olmayan

numuneler için daha düşük olabilir. Sıkıştırma testlerinde kullanılan yük bloğunun numunenin boyutu için yeterli olması gerektiğine dikkat edin. Diğer bir etki ise, aynı proses içindeki farklı yük bloklarından kaynaklanan yük eksenine eksantriklik etkileridir. Normal dayanımlı beton için bu değer -6mm'dir ve mükemmel merkezlenmiş numuneler için dayanım açısından pek bir fark yoktur. Ancak bu fark belli bir değerin üzerinde ortaya çıkmaktadır. Yüksek dayanımlı beton için bu değer 6mm ise tam konsantre numuneye göre dayanım farkı göze çarpmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre 6 mm normal dayanımlı beton ve mm yüksek dayanımlı betonda test edilen eksantriklikler için olumsuz bir durum gözlenmemiştir (Lessard, Chaallal ve Aitcin, 1993).

2.6. Sorunun Doğası

2.6.1. Boyut Etkisi Kavramı

Boyut etkisi, her fiziksel teoremin merkezinde yer alan bir ölçeklendirme problemi. Akışkanlar mekaniği araştırmalarında ölçekleme sorunu yüz yılı aşkın bir süredir sürekli olarak önemli bir rol oynamıştır. Katı mekaniği araştırmalarında ise ölçekleme konusuna gösterilen ilgi birçok kesintiye uğramış ve ancak son on yılda yoğunlaşmıştır. Şaşırtıcı olmayan bir şekilde, 1970'lerde başlayan klasik olmayan boyut etkisine ilişkin modern çalışmalar, büyük yapıların ölçekleri (örneğin barajlar, reaktör muhafazaları, köprüler) ile laboratuvar testlerinin ölçekleri arasında kaçınılmaz olarak büyük bir boşluk bulunan beton yapıların sorunları tarafından teşvik edilmiştir. Bu fark, bu tür yapılarda yaklaşık bir büyüklük mertebesi içerir (tam ölçekli bir testin gerçekleştirildiği nadir durumlarda bile, tam ölçekte yeterli bir istatistiksel temel elde etmek imkânsızdır). Boyut etkisi sorunu son zamanlarda büyük gemi gövdeleri, perdeler, güverteler, bacalar ve direklerin yanı sıra büyük yük taşıyan gövde panelleri için gelişmiş fiber kompozitler ve sandviçler kullanma çabalarında çok önemli bir husus haline gelmiştir. Geoteknik mühendisliği, kutup mühendisliği ve jeomekanik alanlarında ölçeklendirme sorunları daha da büyüktür. Bir kazı duvarının ya da bir tünelin güvenliğini, bir dağın kayma riskini, yer kabuğundaki bir fayın kayma riskini ya da Kuzey Kutbu'ndaki bir petrol platformuna hareket eden bir mil büyüklüğündeki buz kütesinin uyguladığı kuvveti analiz ederken, laboratuvardan ölçek atlaması birçok büyüklük mertebesi kapsar. Öte yandan, çoğu makine ve havacılık mühendisliğinde, yapısal bileşenler genellikle tam boyutta test edilebildiği için ölçeklendirme sorunu daha az baskı yaratmaktadır.

Ancak bu durumda bile teorinin ima ettiği ölçeklendirmenin doğru olması gerektiği kabul edilmelidir. Ölçekleme, herhangi bir fiziksel teorinin en temel özelliğidir. Eğer bir teorinin ölçeklendirme özellikleri yanlışsa, teorinin kendisi de yanlıştır. Katı mekaniğinde boyut etkisi, geometrik olarak benzer yapılar karşılaştırıldığında karakteristik yapı boyutu (boyut) D'nin yapının nominal mukavemeti σ_N üzerindeki etkisi olarak anlaşılır. Nominal gerilme (veya maksimum yük durumunda mukavemet), iki veya üç boyutlu benzerlik için sırasıyla $\sigma_N = c_N^P/b_D$ veya c_N^P/b^2 olarak tanımlanır; P=yük (veya yük parametresi), b yapı kalınlığı ve c_N kolaylık sağlamak için seçilen keyfi katsayı (normalde $c_N = 1$). Yani c_N gerçek bir gerilme değil, gerilme boyutuna sahip bir yük parametresidir. D'nin tanımı keyfi olabilir (örneğin, kiriş derinliği veya yarı derinliği, kiriş ağıklığı, diyagonal boyut, vb) çünkü geometrik olarak benzer yapıları karşılaştırmak için önemli değildir (Bazant, 2001).

Fizikteki temel ölçeklendirme yasaları, hiçbir karakteristik boyutun (veya uzunluğun) bulunmadığı D cinsinden güç yasalarıdır. Klasik Weibull malzeme mukavemetinin rastlantısallığından kaynaklanan istatistiksel boyut etkisi teorisi bu türdendir. 1970'lerde, istatistiksel boyut etkisini bastıran büyük bir deterministik boyut etkisinin, kırılma veya hasarın kararlı yayılımı ve doğal enerji salınımının neden olduğu stres yeniden dağılımlarından kaynaklanabileceği bulunmuştur. Deterministik kararlı etki yasası, iki bitişik boyut aralığında geçerli olan iki farklı güç yasası arasında köprü kurmanın bir yolunu sağlar. Bu köprüleme geçişinin gerçekteştiği yapı boyutu, karakteristik boyutu temsil eder. Bu yeni tür boyut etkisinin ilk olarak tanımlandığı ve bugüne kadar en derinlemesine ve en büyük deneysel çabayla çalışıldığı malzeme betondur. Genel olarak, kırılğan olmayan (plastik, sünek) davranış için küçük ölçekli güç yasası ile kırılğan davranış için büyük ölçekli güç yasası arasında köprü kuran bir boyut etkisi, malzemenin ihmal edilemeyecek belirli bir karakteristik uzunluğunun varlığına işaret eder. Yarı gevrek malzemelerin en önemli özelliğini temsil eden bu uzunluk, malzeme homojenliklerinin tipik boyutunu veya kırılma süreci bölgesini (FPZ) karakterize eder. Betonun yanı sıra, diğer yarı kırılğan malzemeler arasında kayalar, çimento harçları, buz (özellikle deniz buzu), konsolide kar, sert fiber kompozitler ve partikül kompozitler, sertleştirilmiş seramikler, fiber takviyeli betonlar, diş çimentoları, kemik ve kıkırdak, biyolojik kabuklar, sert killer, çimentolu kumlar, harçlı topraklar, kömür, kağıt, ahşap, ahşap yonga levha, çeşitli refrakterler ve dolgulu elastomerler

ve bazı özel sert metal alaşımları bulunmaktadır. Bu malzemelerin çeşitli "yüksek teknoloji" uygulamaları için boyut etkisi ve ölçeklendirmeye yoğun bir ilgi ortaya çıkmaktadır. Yarı kırılğan davranış, malzeme homojensizlikleri oluşturularak veya artırılarak elde edilebilir. Böyle bir davranış arzu edilir çünkü plastik akma kabiliyeti olmayan bir malzemeden yapılan yapıya önemli bir enerji emme kabiliyeti kazandırır. Uzun zaman önce, inşaat mühendisleri bilinçsizce ama akıllıca beton yapıları yarı kırılğan özellikler elde etmek ve geliştirmek için tasarladılar. Modern "yüksek teknoloji" malzemelerinin çoğu yarı-kırılğan özellikleri hemen hemen aynı yolla elde eder - inklüzyonlar, gömülü takviye ve kasıtlı mikro çatlama yoluyla (seramiklerin dönüşüm sertleşmesinde olduğu gibi, betonun büzülme mikro çatlama benzer şekilde). Gerçekte, betonu taklit ederler. Malzeme biliminde, malzeme mukavemetinin normal laboratuvar testlerinden mikroelektronik bileşenlere ve mikromekanizmalara geçişte birkaç büyüklük mertebesini kapsayan ters boyut etkisinin ele alınması gerekir. Boyutları 1 ila 10 cm arasında değişen laboratuvar numuneleri ölçeğinde doğrusal elastik kırılma mekaniğini (LEFM) takip eden bir malzeme, 0,1 ila 100 mikron ölçeğinde yarı kırılğan ve hatta sünek (plastik) arıza sergileyebilir (Bazant, 2001).

Çeşitli yükleme koşulları altında bir beton elemanın nihai dayanımını tahmin ederken boyutun etkisini dikkate almak önemlidir. Özetle, boyut etkisi olarak bilinen bu durum, bir elemanın boyutu arttıkça mukavemetinin azalma eğilimi göstermesidir. Katı mekaniğinde, akışkanlar mekaniğinden farklı olarak, boyut etkisinin hesaplanması gerekmeseydi, boyut etkisi veya ölçeklendirme bilgisinin genel olarak yarı kırılğan arızaların analitik tahminlerini elde etmek için bir araç olduğu hala yaygın olarak kabul edilmemektedir. İlgilenilen gerçek boyut için, doğrudan analitik bir çözüm zordur, neredeyse imkânsızdır. Bununla birlikte, yapıyı yok olan boyuta veya sonsuz boyuta kadar ölçeklendirerek, her ikisini de çözmek çok daha kolay olan sünek veya kırılğan bir yanıt elde edilir. Bu asimptotik çözümleri bilerek, pratik ilgi alanının orta aralığı için yaklaşık bir arıza tahmini, asimptotik eşleştirme - zıt sonsuzluklar arasında 'enterpolasyon' ile elde edilebilir. Bu nedenle boyut etkisi, tüm yarı kırılğan arızalar için temel problemdir (Bažant ve Yu, 2004).

Literatürde bildirilen bazı bulgular, çekme dayanımı (Zhong, Pan, Wang ve Zhang, 2020; Liu, Wenxuan, Xiuli ve Wangxian, 2019; Suchorzewski, Teichman ve Nitka, 2018) ve kırılma enerjisi (Zhu, 2018; Chandran ve Galyon Dorman, 2021) gibi

betonun kırılma özelliklerini test ederken boyut etkisinin de önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Ne yazık ki, bu sorun çok daha az tanınmakta ve tanımlanmaktadır (Akram, 2021).

2.6.1.1. Boyut Etkisi Tanımı

Rastgele olmayan mukavemete (ft) sahip bir malzemeden yapılan elastik veya plastik yapıların klasik teorilerine göre, geometrik olarak benzer yapılar düşünüldüğünde bir yapının nominal mukavemeti (σ_N) yapı boyutundan (D) bağımsızdır. Bu özellikten herhangi bir sapma boyut etkisi olarak adlandırılır. Örneğin, geleneksel malzeme mukavemeti, aynı malzemeden yapılmışlarsa büyük bir kiriş ile küçük bir kirişin aynı gerilimde başarısız olacağını öngörür. Gerçek dünyada, boyut etkileri nedeniyle, daha büyük bir kiriş daha küçük bir kirişten daha düşük bir gerilimde başarısız olacaktır. Yapısal boyut etkisi, aynı malzemeden yapılmış, aynı mikro yapıya sahip yapılarla ilgilidir. Malzeme homojenliklerinin boyut etkisinden, özellikle de polikristalin metallerde azalan tane boyutu ile malzeme mukavemetinin nasıl arttığını açıklayan Hall-Petch etkisinden ayırt edilmelidir (Bazant, 2001).

Boyut etkisinin iki nedeni olabilir:

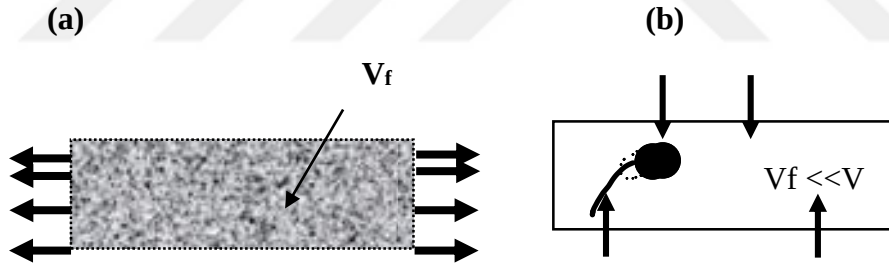
- İstatistiksel, malzeme mukavemeti rastgeleliği nedeniyle, kritik bir kusurun yüksek gerilimli bir yerde meydana gelme olasılığı ve artan hacim ciddi bir kusur olasılığını artırır.
- Maksimum yüke ulaşılmadan önce büyük bir çatlak veya hasarlı malzeme içeren büyük bir kırılma süreci bölgesi (FPZ) geliştiğinde enerji salınımı nedeniyle enerjik (ve istatistiksel olmayan).

2.6.1.2. Yapısal Dayanım Üzerindeki Boyut Etkisinin Kaynakları

Nominal mukavemetin yapı boyutuna bağlı olmasına neden olabilecek altı farklı boyut etkisi vardır (Bažant ve Planas, 1998):

1. Duvar etkisi olarak da bilinen sınır tabaka etkisi. Bu etki, kalıp işinin duvarlarına bitişik beton tabakasının kaçınılmaz olarak elemanın iç kısmına göre daha az miktarda büyük agrega parçasına ve daha fazla miktarda çimento ve harç içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, kalınlığı yapı boyutundan bağımsız olan ve maksimum agrega boyutuyla aynı büyüklükte olan yüzey

tabakası farklı özelliklere sahiptir. Boyut etkisi, daha küçük bir elemanda yüzey tabakasının kesitin büyük bir bölümünü kaplaması, büyük bir elemanda ise kesitin küçük bir bölümünü kaplamasından kaynaklanmaktadır. Çoğu durumda, bu tür bir boyut etkisi çok güçlü görünmemektedir. İkinci tip sınır tabaka etkisi, yüzeye paralel normal gerilme altında, agrega ve harç matrisinin elastik özellikleri arasındaki uyumsuzluğun iç kısımda enine gerilmelere neden olurken, yüzeyde bu gerilmelerin sıfır olması nedeniyle ortaya çıkar. Üçüncü tip sınır tabaka boyutu etkisi, Poisson etkisinden (yanal genleşme) kaynaklanır ve yüzey tabakasının neredeyse düzlemsel gerilimde olmasına neden olurken, iç kısım neredeyse düzlemsel gerilmededir. Bu da çatlak ön kenarının yüzeyde sonlandığı noktadaki tekil gerilme alanının çatlak ön kenarının iç noktalarından farklı olmasına neden olur (Bazant ve Estenssoro 1979). Bunun metallerde yorulma çatlağı büyümesinde kolayca gözlemlenebilen doğrudan bir sonucu, ilerleyen bir çatlağın ön kenarının sonlanmasının yüzeye dik olamayacağıdır. İkinci ve üçüncü tipler, sınır tabakası ve iç kısmın bileşimi aynı olsa bile mevcuttur.



Şekil 2.2. İstatistiksel ve kırılma boyutu etkisi arasındaki farkın özü (ACI Komitesi 446 ‘dan uyarlanmıştır).

2. Isı iletimi veya gözenek suyu transferi gibi difüzyon olayları. Bunların boyut etkisi, difüzyon yarı sürelerinin (yani soğutma, ısıtma, kurutma vb. yarı süreleri) yapının boyutunun karesi ile orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda, difüzyon süreci malzeme özelliklerini değiştirir ve artık gerilmeler üretir, bu da elastik olmayan gerilmeler ve çatlama üretir. Örneğin, kurutma işlemi beton elemanın yüzey tabakasında çekme çatlamaına neden olabilir. Farklı kuruma süreleri ve farklı depolanmış enerjiler nedeniyle, çatlamanın kapsamı ve

yoğunluğu küçük ve büyük elemanlarda oldukça farklı olabilir ve böylece farklı bir tepki ortaya çıkabilir. Uzun süreli arızalar için, kurumanın beton sünme özelliklerinde bir değişikliğe neden olması, sünmenin bu gerilmeleri gevşetmesi ve kalın elemanlarda kurumanın ince elemanlara göre çok daha yavaş gerçekleşmesi önemlidir.

3. Hidratasyon ısısı veya kimyasal reaksiyonlarla ilişkili diğer olaylar. Bu etki, bir beton elemanda üretilen hidratasyon ısısının dağılma süresinin yarısının elemanın karesi veya kalınlığı (boyutu) ile orantılı olması nedeniyle bir öncekiyle ilişkilidir. Bu nedenle, daha kalın elemanlar daha yüksek sıcaklıklara kadar ısınır, bu da beton yapımında iyi bilinen bir sorundur. Yine, homojen olmayan sıcaklık artışı çatlamaya neden olabilir, kurumayı tetikleyebilir ve malzeme özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir.
4. Malzeme dayanımının rastlantısallığından kaynaklanan ve geleneksel olarak beton yapılarıdaki çoğu boyut etkisini açıkladığına inanılan istatistiksel boyut etkisi. Weibull (1939) tarafından ortaya atılan bu boyut etkisinin teorisi, bir zincir modeline dayanmaktadır. Bir zincirin kırılma yükü, zincirdeki halkaların dayanımının minimum değeri tarafından belirlenir ve istatistiksel boyut etkisi, zincir ne kadar uzun olursa, zincirde karşılaşılması muhtemel dayanım değerinin o kadar küçük olmasından kaynaklanır. Uzun bir beton çubuğun gerilim altında kırılmasında (Şekil 2.1) gözlemlenen boyut etkisi için kesinlikle geçerli olan bu açıklama, Weibull'un en zayıf bağlantı istatistiği ile açıklanmaktadır. Bununla birlikte, daha yakından incelendiğinde, bu açıklamanın betonarme yapıların çoğu arıza türüne uygulanamaz olduğu görülmektedir. Makroskopik bir çatlağın başlamasıyla (yani mikroskopik bir kusur veya çatlak makroskopik boyutlara ulaşır ulaşmaz) başarısız olan metalik ve diğer yapıların aksine, beton yapılar ancak çatlama bölgelerinin veya kırıkların büyük ve kararlı bir şekilde büyümesinden sonra başarısız olur. Kararlı çatlak büyümesi büyük stres dağılımlarına ve depolanmış enerjinin serbest kalmasına neden olur, bu da çok daha güçlü bir boyut etkisine neden olur ve olası herhangi bir istatistiksel boyut etkisi üzerinde baskındır. Aynı zamanda, kırılma mekaniği, kırılma anında belirleyici çatlak büyümesinin olası

konumlarını çok küçük bir bölge ile sınırlar. Bu, bu bölgenin dışındaki rastgele mukavemet değerlerinin önemsiz hale gelmesine neden olur ve böylece istatistiksel boyut etkisini bastırır. Ayrıca, betonarme kirişlerin diyagonal kesme göçmesi üzerine yapılan bazı yeni deneylerin istatistiksel teorisinin öngörülerıyla çeliştiği görülür.

5. Kırılma mekaniği boyut etkisi, yapının depolanmış enerjisinin kırılma cephesine salınmasından kaynaklanır. Bu, boyut etkisinin en önemli kaynağıdır ve bir sonraki bölümde daha ayrıntılı olarak ve kitabın geri kalanında kapsamlı bir şekilde incelenecektir.
6. Çatlak yüzeylerinin fraktal yapısı. Eğer fraktalite yeni çatlak yüzeyinin oluşum sürecinde önemli bir rol oynasaydı, kırılma mekaniği boyut etkisini değiştirirdi. Ancak, son çalışmalar böyle bir role işaret etmemektedir. Muhtemelen bu boyut etkisi sadece varsayımsal bir varsayımdır.

Pratik testlerde, farklı boyutlardaki yapıların geometrik olarak üç boyuttan ziyade iki boyutta benzer olması ve tüm boyutlar için aynı kalınlıkta olması halinde, boyut etkisinin ilk 3 kaynağı büyük ölçüde ortadan kaldırılabilir. Yeterince kalın yapılar için 1. kaynak ihmal edilebilir hale gelir. Kaynak 2, numune sızdırmazsa ve sabit sıcaklıktaysa ihmal edilebilir. Kaynak 3 sadece çok büyük yapılar için önemlidir. İstatistiksel boyut etkisi her zaman mevcuttur, ancak kırılma boyutu etkisi önemli olduğunda etkisi nispeten önemsizdir.

2.6.1.3. Weibull'a Kadar Boyut Etkisinin Geçmişi

Boyut etkisi hakkındaki spekülasyonlar Leonardo da Vinci'ye (1500'ler) kadar uzanmaktadır. "Eşit kalınlıktaki kordonlar arasında en uzun olanın en az güçlü olduğunu" gözlemlemiş ve "bir kordon ne kadar kısaysa o kadar güçlüdür" diyerek ters orantıyı ima etmiştir. Bir yüzyıl sonra, stres kavramının mucidi Galileo Galilei, Leonardo'nun boyut etkisinin doğru olamayacağını savunmuştur. Ayrıca bir hayvanın büyüklüğünün kemiklerinin şekli üzerindeki etkisini tartışmış ve kemiklerin iriliğinin devlerin zayıflığı olduğunu belirtmiştir. Mariotte tarafından önemli bir fikir ortaya atılmıştır. Kapsamlı deneylerine dayanarak, "uzun bir halat ile kısa bir halatın her zaman aynı ağırlığı taşıdığını, ancak uzun bir halatta, kısa bir halata göre daha çabuk kopacağı hatalı bir yer olabileceğini" gözlemlemiş ve "mutlak direnci bir yerde diğerinden daha az olan maddenin eşitsizliği" ilkesini önermiştir.

Başka bir deyişle, yapı ne kadar büyükse, içinde düşük mukavemetli bir unsurla karşılaşma olasılığı da o kadar büyüktür. Bu, istatistiksel boyut etkisi teorisinin temel fikridir. Dikkat eksikliği olmamasına rağmen, kırılma mekaniğinin kurucusu Griffith'in dikkate değer çalışmasına kadar iki buçuk yüzyıl boyunca fazla ilerleme kaydedilmemiştir. Cam liflerinin nominal mukavemetinin, çap 0.0042 inçten 0.00013 inçe düştüğünde 42.300 psi'den 491.000 psi'ye yükseldiğini deneysel olarak göstermiş ve "izotropik katıların zayıflığının, süreksizliklerin veya kusurların varlığından kaynaklandığı..." sonucuna varmıştır. Bu kusurlar ortadan kaldırılabilsen teknik malzemelerin etkin mukavemeti en az 10 veya 20 kat artırılabilir. Ancak Griffith'e göre başarısızlık anındaki kusurlar veya çatlaklar hala sadece mikroskobikti; rastgele dağılımları malzemenin makroskobik mukavemetini kontrol ediyordu ancak mukavemet kavramını geçersiz kılmıyordu. Böylece Griffith, Mariotte'un istatistiksel fikrinin fiziksel temelini keşfetmiş, ancak yeni bir tür boyut etkisi keşfetmemişti. Boyut etkisinin istatistiksel teorisi, Peirce bir zincir için en zayıf bağlantı modelini formüle ettikten ve Tippett ve Frechet tarafından ortaya atılan ve Weibull dağılımını türeten ve herhangi bir pozitif üssün güç fonksiyonu olarak asimptotik olarak eşiğe yaklaşan ve bir eşiğe sahip olan çok sayıda rastgele değişken kümesinin minimumunun dağılımını temsil ettiğini kanıtlayan Fischer ve Tippett tarafından tamamen tanımlanan aşırı değer istatistiğini tanıttıktan sonra ortaya çıkmaya başladı. Von Mises ve diğerleri tarafından iyileştirmeler yapılmıştır (Fantilli, Iori ve Vallini, 2007).

İstatistiksel güç teorisinin temel taşı Weibull tarafından atılmıştır. Sezgisel ve deneysel bir temelde, son derece küçük bir olasılıkla düşük mukavemet değerlerinin kuyruk dağılımının daha önce bilinen dağılımların hiçbirisi tarafından yeterince temsil edilemeyeceği sonucuna varmış ve küçük bir malzeme elemanının mukavemetinin kümülatif olasılık dağılımının, sonlu veya sıfır eşikten mukavemet farkının bir güç fonksiyonu olduğunu varsaymıştır. Sonuçta ortaya çıkan ve Fischer ve Tippett tarafından tamamen farklı bir bağlamda türetilenle aynı olan minimum mukavemet dağılımı Weibull dağılımı olarak bilinmeye başlandı. Diğerleri daha sonra mikroskobik kusurların veya mikro çatlakların istatistiksel dağılımı yoluyla teorik bir gerekçe sunmuştur. Metaller ve seramiklere yapılan iyileştirmeler ve uygulamalar (yorulma gevrekliği, düşük ve gevrek-sünek geçiş sıcaklıklarında çeliklerin yarıılma tokluğu, kırılma tokluğu verilerinin dağılımının değerlendirilmesi) günümüze kadar

devam etmiştir. Weibull teorisinin yorulma ile gevrekleşen metallere ve seramiklere uygulamaları kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Boyut etkisinin en büyük endişe kaynağı olduğu beton uygulamaları Zaitsev ve Wittmann, Mihashi ve Izumi, Wittmann ve Zaitsev, Zech ve Wittmann, Mihashi, Mihashi ve Izumi, Carpinteri ve diğerleri tarafından incelenmiştir (RILEM Committee QFS, 2004).

Yaklaşık 1985 yılına kadar, çoğu mekanikçi deterministik bir boyut etkisi olasılığına neredeyse hiç dikkat etmemiştir. Testlerde bir boyut etkisi tespit edildiğinde, bunun otomatik olarak istatistiksel olduğu varsayılıyordu ve bu nedenle çalışmasının mekanisyonlardan ziyade istatistikçilere ait olduğu düşünülüyordu. Bunun nedeni muhtemelen, kırılma kriterinin gerilmeler ve gerinimler cinsinden yazıldığı klasik süreklilik mekaniğinde (mukavemet limitli elastisite, plastisite ve viskoplastisite ile sadece mikroskobik çatlaklar veya kusurlar içeren cisimlerin kırılma mekaniği) boyut etkisinin görülmemesiydi. Bu konudan S. P. Timoshenko 1953 yılında yazdığı Malzemelerin Mukavemetinin Anıtsal Tarihi adlı eserinde bahsetmemiştir bile. Ancak bu tutum 1980'lerde büyük ölçüde değişmiştir. Nükleer enerji santralleri için beton yapılarda iyi finanse edilen araştırmaların sonucu olarak, deterministik bir boyut etkisi sergileyen teoriler geliştirilmiştir (Bazant, 2001).

2.6.1.4. Kırılma Mekaniği Boyut Etkisinin Sayısallaştırılması

Plastisite veya limit analizine dayalı klasik teorilerde, geometrik olarak benzer yapıların mukavemeti yapı boyutundan bağımsızdır. Ancak daha önce de belirtildiği gibi, beton yapılar ve genel olarak gevrek veya yarı gevrek malzemelerden yapılmış yapılar bu eğilimi takip etmez. Bu bölümde ilk olarak bir yapı elemanının mukavemeti ve boyutundan ne anlaşıldığı tanımlanacak ve ardından mukavemetin boyuta nasıl bağlı olduğu incelenecektir. Son olarak Bazant'ın boyut etkisi yasasının basit bir gerekçesi verilecektir.

2.6.1.5. Nominal Gerilme ve Nominal Mukavemet

Boyut etkisi, yapı mukavemetinin yapı boyutuna olan bağımlılığı olarak anlaşılmaktadır. Mukavemet geleneksel olarak en yüksek yükteki nominal gerilme olarak adlandırılan değer olarak tanımlanır. Nominal gerilme, tipik bir kesit alanına bölünen yük ile orantılı olarak tanımlanan bir yük parametresidir:

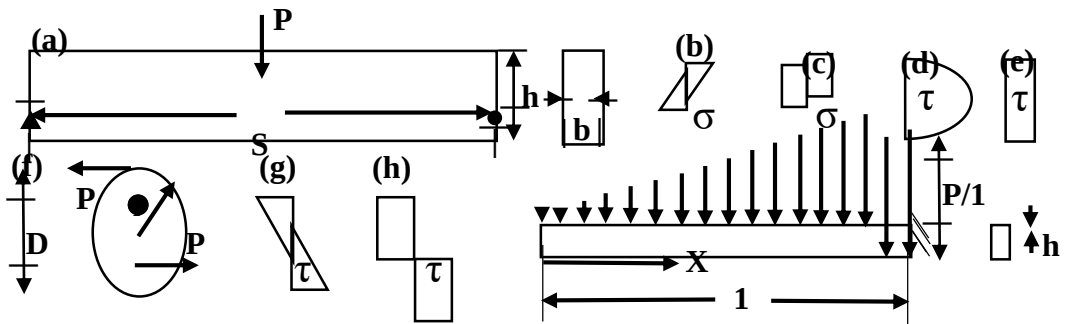
$$\sigma_N = c_N (P/bD) \text{ 2B benzerliği için } \sigma_N = c_N (P/D^2) \text{ 3B benzerliği için } \quad (2.1)$$

Burada P = uygulanan yük, b =iki boyutlu yapının kalınlığı (bazı nedenlerden dolayı, deneylerde tercihen tüm yapı boyutları için aynı seçilmelidir); D = yapının veya numunenin karakteristik boyutu; ve c_N = kolaylık sağlamak için konulan ve istenirse $c_N = 1$ olarak seçilebilen katsayı. $P = P_u$ = maksimum yük için Eşitlik (1.4.1) nominal mukavemeti, σ_{Nu} , verir.

c_N katsayısı, Eşitlik (2.1)'in belirli bir teoriye göre hesaplanan bir yapının belirli bir noktasındaki gerilme formülüyle çakışmasını sağlamak için seçilebilir. Örneğin, Şekil 2.3. a'da gösterildiği gibi, açıklığın ortasından P yükü ile yüklenmiş, S açıklıklı ve h derinliğinde basit mesnetli bir kiriş düşünün. Şimdi, örneğin, kirişteki maksimum normal gerilme için elastik eğilme formülüne (Şekil 2.3b) denk gelecek şekilde gm 'yi ve karakteristik boyut olarak kiriş derinliğini ($D = h$) seçebiliriz, bu durumda

$$\sigma_N = (3PS/2bh^2) = c_N (P/Bd), \text{ with } c_N = 1.5 S/h \quad (2.2)$$

Görünüşe göre c_N , çeşitli kirişler için değişebilen açıklık-derinlik oranına bağlıdır. Bu nedenle, boyut etkisinin yalnızca geometrik olarak benzer numuneler veya geometrik olarak benzer çentiklere veya ilk çatlaklara sahip farklı boyutlardaki yapılar dikkate alınarak tutarlı bir şekilde tanımlanabileceğini belirtmek önemlidir. Geometrik benzerlik olmadan, boyut etkisi değişen yapı şeklinin etkileriyle kirlenecektir. Bu kısıtlamayla (çoğunlukla örtük olarak varsayılır), c_N katsayısı sabittir çünkü geometrik olarak benzer yapılar için S/h tanımı gereği sabittir.



Şekil 2.3. (a) Üç noktadan eğilmiş kiriş (b) Elastik gerilme dağılımı (c) Plastik gerilme dağılımı (d) Elastik kayma gerilmesi dağılımı (e) Plastik kayma gerilmesi dağılımı (f) Burulmaya maruz mil (g) Elastik kayma gerilmesi dağılımı (h) Plastik kayma gerilmesi dağılımı (i) Doğrusal dağılmış yüke sahip konsol kiriş.

Yukarıdaki σ_N tanımı mümkün olan tek tanım değildir. Alternatif olarak, σ_N 'yi maksimum gerilme için plastik eğilme formülüne denk gelecek şekilde seçebiliriz (Şekil 2.3c), bu durumda;

$$\sigma_N = (PS/bh^2) = c_N (P/bD), \text{ with } c_N = S/h (= \text{sabit}) \quad (2.3)$$

Alternatif olarak, karakteristik boyut olarak kiriş derinliği yerine kiriş açıklığını seçebiliriz ($D = S$), bu durumda,

$$\sigma_N = (3PS/2bh^2) = c_N (P/bD), \text{ with } c_N = 1.5 S^2/h^2 (= \text{sabit}) \quad (2.4)$$

Elastik eğilme teorisine (Şekil 2.4d) göre destek yakınındaki maksimu gerilmesi formülü ile çakışacak şekilde σ_N de seçilebilir, bu durumda $D = h$,

$$\sigma_N = (3P/4bh) = c_N (P/bD), \text{ with } c_N = 0.75 (= \text{sabit}) \quad (2.5)$$

Alternatif olarak, yayılımı karakteristik boyut olarak kullanarak yazılabilir,

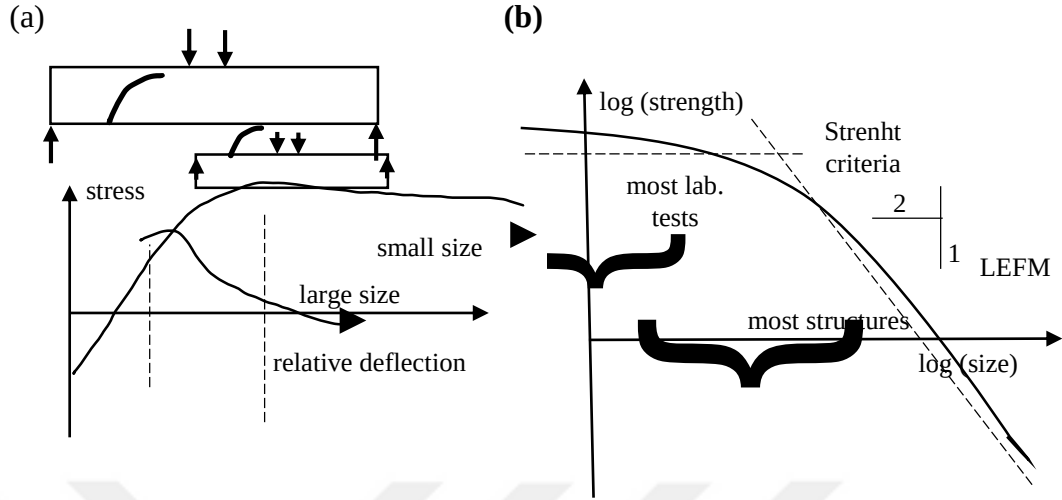
$$\sigma_N = (3P/4bh) = c_N (P/bD), \text{ with } c_N = 3 S/4h (= \text{sabit}) \quad (2.6)$$

Yukarıdaki formüllerin tümü üç noktadan eğilmiş kirişler için dayanımın geçerli tanımlarıdır, ancak ilki (2.2) en genel olarak kullanılanıdır. Özet nominal gerilme, yapı şekli ve malzeme davranışının karmaşıklığına bakılmaksız basit denklem (2.1) ile tanımlanabilir ve gerilme boyutuna sahip bir yük parametresi olarak kullanılabilir.

2.6.1.6. Boyut Etkisi Denklemleri

Yukarıdaki tanımlara göre boyut etkisi, σ_{Nu} nominal dayanımının D boyutu ile değişiminden oluşur. Boyut etkisinin özel yönlerini gösteren çeşitli olası grafikler vardır, ancak en yaygın kullanılanı Şekil 2.4 de gösterilen $\log \sigma_{Nu}$ 'nun $\log D$ 'ye karşı çizildiği logaritmik grafiklerdir. Mukavemet teorisi (akma veya mukavemet kriterlerine dayalı) boyut etkisinin olmadığını öngörmektedir (Şekil 2.4b'deki yatay kesikli çizgi); bu, çoğu mühendislik yaklaşımında ve kodunda varsayılan yanıt türüdür. Diğer uçta ise, sabit bir çatlak-boyut oranında (görelî çatlak uzunluğu) çatlak kararsızlığı ile başarısız olan yapıların tamamen gevrek davranışı yer almaktadır. Bir sonraki bölümde, doğrusal elastik kırılma mekanizmasının (LEFM) temellerini sunduktan sonra, böyle bir durumda boyut etkisinin Şekil 2.4'deki grafikte $-1/2$ eğimli bir çizgi olarak gösterildiği görülmektedir. Gerçek boyut etkisi davranışı en

iyi şekilde Şekil 2.4b'de çizildiği gibi asimptot olarak iki düz çizgiye sahip bir geçiş eğrisi ile tanımlanır.



Şekil 2.4. Boyut etkileri: (a) nominal gerilme ve bağıl sapma eğrileri üzerinde ve (b) bilogaritmik bir grafikte mukavemet üzerinde (Bažant ve Planas, 1998).

Bu koşulu sağlayan en basit büyüklük etkisi yasası Bazant (1984) tarafından çok sayıda pratik durum için yaklaşık olarak geçerli olan çok hafif varsayımlar altında türetilmiştir. Bazant'ın boyut etkisi denklemi, kısa bir türetmenin sunulduğu bir sonraki paragrafta gösterildiği gibi çatlak büyümesi için gereken enerjiyi devreye sokmaktadır. Bununla birlikte, nihai ifade (kırılma enerjisi terimini açıkça göstermeden) sadece iki parametreye bağlı bir fonksiyon olarak şu şekilde yazılabilir

$$\sigma_{Nu} = B f'_t / (1 + D/D_0)^{1/2} \quad (2.7)$$

Burada f'_t malzemenin çekme dayanımıdır, sadece boyutsal amaçlar için kullanılır, B boyutsuz bir sabittir ve D_0 uzunluk boyutuna sahip bir sabittir. Hem B hem de D_0 malzemenin kırılma özelliklerine ve yapının geometrisine (şekline) bağlıdır, ancak yapı boyutuna bağlı değildir. Bu boyut etkisi yasasının basit türevleri aşağıda verilmiştir.

2.6.1.7. Kırılma Mekaniği Boyut Etkisinin Basit Açıklaması

Şekil 2.5'de gösterildiği gibi düzgün gerilimli bir panel, ilk olarak, kırılmanın panelin orta bölümü boyunca h_f kalınlığında bir çatlak bandı (veya kırılma bandı) oluşumu şeklinde ilerlediği varsayıldığında, çatlak bandının birim uzunlukta uzatılması, numunenin birim kalınlığı başına kırılma enerjisi olarak adlandırılan ve G_f olarak gösterilen belirli bir miktarda enerji gerektirecektir. G_f değeri, mevcut

Bunu yapmak için, sabit σ_N 'de (maksimum yük koşulu) yapıdan salınan gerilme enerjisinin çatlak bandını daha da ilerletmek için kullanıldığı yazılır. Bir yaklaşım olarak, h f kalınlığında bir çatlak bandının varlığının banttaki ve çapraz çizgili alandaki gerilme enerjisi yoğunluğunu $\sigma_N^2/2E$ (sağlam panel için) sıfıra (E = malzemenin elastik modülü) düşürdüğü varsayılabilir. Çapraz çizgili alan, bazı ampirik k eğimli iki çizgi ile sınırlıdır. Çatlak bandı hiçbir sınır yer değiştirmesi olmadan Δ_a kadar uzadığında, serbest kalan ek gerilme enerjisi, yatay boyuttaki Δ_a yoğun çapraz çizgili şeritten gelir (Şekil 2.5a).

Niceliksel olarak, birim panel kalınlığı başına salınan enerji, yoğun çapraz çizgili bölgenin alanı $h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a$ çarpı kalınlık, çarpı sağlam panelin enerji yoğunluğu $\sigma_N^2/2E$ ile verilir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen şeritten enerji salınımı (sabit sınır yer değiştirmesinde) $b(h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a) \sigma_N^2/2E$ 'dir, burada b panel kalınlığıdır. Bu, Gfb Δa olan kırığı oluşturmak için gereken enerjiye eşit olmalıdır, bu

nedenle

$$b(h_f \Delta a + 2ka_0 \Delta a) \sigma_N^2 / 2E = G_f b \Delta a \quad (2.8)$$

Nominal gerilme için çözüldüğünde, boyut etkisi yasası (2.7) elde edilir.

$$Bf'_t = ((2G_f E) / (h_f))^{1/2} = \text{sabit} , \text{ ve } D_0 = ((h_f D) / (2ka_0)) = \text{sabit} \quad (2.9)$$

D_0 'ın k sabiti aracılığıyla yapı şekline bağlı olduğunu ancak yapılar geometrik olarak benzer ise yapı boyutundan bağımsız olduğu unutulmamalıdır ($D/a_0 = \text{sabit}$); f'_t = çekme dayanımı, kolaylık sağlamak için eklenmiştir ve h_f = burada yapı boyutundan bağımsız olarak yaklaşık bir sabit olarak ele alınan kırık bandı cephesinin genişliği). Boyut etkisinin bu açıklamasının sadece bir çatlak bandı için geçerli olduğu ancak keskin bir çizgi çatlağı için geçerli olmadığı izlenimine kapılmamak için Şekil 2.5b'de gösterildiği gibi çizgi çatlakları olan farklı boyutlardaki benzer panelleri göz önünde bulundurun. Betonda, sürekli bir çatlakın ucunun önünde her zaman, en kaba yaklaşımla sabit kabul edilebilecek sonlu bir uzunluğa sahip oldukça büyük bir kırılma süreci bölgesi vardır. Bu bölgenin uzunluğu boyunca, enine normal gerilme kademeli olarak f'_t 'den 0'a düşer. Bu bölgenin varlığı nedeniyle, bitişik malzemeden gerilme enerjisinin salınmasına neden olan elastik olarak eşdeğer çatlak uzunluğu, sürekli çatlak uzunluğundan, a_0 , yaklaşık olarak bir malzeme sabiti olduğu varsayılabilir bir C_f mesafesi kadar daha uzundur.

Çatlak Δa uzunluğu kadar uzadığında, kırılma süreci bölgesi çatlak ucuyla birlikte hareket eder ve ek gerilme enerjisinin serbest kaldığı alan Şekil 2.5b'de yoğun bir şekilde çapraz taranmış olan yatay boyuttaki A a şeritlerinden oluşur. Çatlak bandı için daha önce uygulanan prosedürün aynısını izleyerek, enerjinin salındığı bölgenin alanının $2k(a_0 + C_f)\Delta a$ olduğu görülür. Dolayısıyla toplam enerji salınımı $b2k(a_0 + C_f)\Delta a \sigma_N^2 / 2E$ 'dir, bu da çatlak uzaması için gereken enerjiye, $bG_f \Delta a$, eşitlenmelidir, böylece denklem elde edilir.

$$b2k(a_0 + C_f)\Delta a \sigma_N^2 / 2E \quad (2.10)$$

σ_N için çözüldüğünde (2.7)'deki boyut etkisi yasası tekrar elde edilir.

$$Bf'_t = ((2G_f E) / (k C_f))^{1/2} = \text{sabit} , \text{ ve } D_0 = C_f D / a_0 = \text{sabit} \quad (2.11)$$

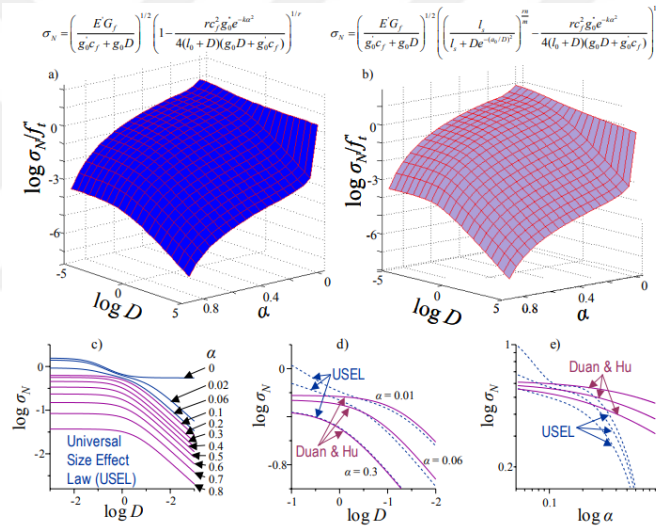
Yukarıdaki denklemler, yapısal enerji salınımının belirlenmesindeki basitleştirici varsayımlar nedeniyle ayrıntılarında sadece yaklaşıktır. Bununla

birlikte, yapıları doğrudur. Aynı form, diğer geometriler (örneğin eğilme) için basitleştirilmiş teoriler kullanılarak elde edilir. İnce ayarlı denklemler daha sofistike kırılma mekaniği kavramlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Eşitlik (2.7) boyutsal analiz ve benzerlik argümanları ile tamamen genel bir şekilde de türetilir. Bu genel türetme iki temel hipoteze dayanmaktadır: (1) bir kırığın veya çatlak bandının yayılması, kırılma düzleminin birim alanı başına yaklaşık olarak sabit bir enerji kaynağı (kırılma enerjisi, G_f) gerektirir ve (2) kırığın veya çatlak bandının yayılması nedeniyle yapı tarafından salınan enerji, hem kırılma uzunluğunun hem de kırılma cephesindeki kırılma işlem bölgesinin boyutunun bir fonksiyonudur. Eşitlik (2.7)'nin beton yapıların gevrek kırılmalarına uygulanması iki ek hipoteze dayanır: (3) farklı boyutlardaki geometrik olarak benzer yapıların kırılma modları da geometrik olarak benzerdir (örneğin, diyagonal bir kesme çatlağı yaklaşık aynı eğime ve aynı bağıl uzunluğa sahiptir) ve (4) yapı çatlak başlangıcında kırılmaz (bu gerçekten iyi bir tasarımın gereğidir). Bu hipotezler hiçbir zaman mükemmel bir şekilde yerine getirilmez, bu nedenle Eşitlik (2.7)'nin yaklaşık olduğu ve çoğu yapı için yalnızca yaklaşık 1:20 boyut aralığında geçerli olduğu unutulmamalıdır (daha geniş bir boyut aralığı için daha karmaşık bir formül gerekecektir). Bu boyut aralığı çoğu pratik amaç için yeterlidir, ancak bazı yapılar için ilgi aralığı uygulanabilirlik aralığının ötesine uzanır. Bunun nedeni, yapı boyutunda yeterince büyük bir değişikliğin arıza modunu değiştirebilmesi ve dolayısıyla Eşitlik (2.7)'yi bu boyutun ötesinde uygulanamaz hale getirebilmesidir; bu durum örneğin Brezilya bölünmüş silindir testleri için geçerlidir.

2.6.2. Evrensel Boyut Etkisi Yasası

Artık çok iyi bilindiği gibi, pürüzsüz bir yüzeyden çatlak başlangıcı için boyut etkisi ($a_0 = 0$), maksimum yükte büyük çentikler veya büyük gerilimsiz (yorulmuş) çatlaklar için boyut etkisinden çok farklıdır (a_0 / D çok küçük değil). Yapının ortalama nominal mukavemeti σ_N söz konusu olduğunda, birincisi her zaman enerjiktir (yani tamamen deterministiktir), ikincisi ise sadece yeterince küçük boyutlar için tamamen enerjiktir ve yeterince büyük boyutlar için istatistiksel hale gelir. Bu boyut etkilerinin her ikisini de içeren ve aralarındaki geçişi kapsayan evrensel bir boyut etkisi yasası bulmak ilgi çekicidir. Bu amaçla Bažant ve Li (1996) tarafından bir formül önerilmiştir (Bažant 2002).

Ancak, bu formül düzgün değildi ve çatlak başlangıcı arızaları için istatistiksel (Weibull) kısmı içermiyordu. Şimdi daha iyi bir formül elde edilmiştir; “solda E' = etkin Young modülü, f_t = malzemenin yerel çekme dayanımı; g_0, g'_0, g''_0 boyutsuz enerji salım fonksiyonu $g(\alpha)$ ve $\alpha_0 = a_0 / D$ 'deki türevlerinin değerleridir; $l_0 = E'G_f / f_t^2$ = Irwin'in karakteristik uzunluğu (ilk kırılma enerjisine karşılık gelir); $g(\alpha) = k^2(\alpha)$, $k(\alpha)$ boyutsuz gerilme yoğunluğu faktörüdür; m = Weibull beton modülü (yaklaşık 24), n = ölçeklendirme için boyut sayısı; r, k = ampirik pozitif sabitler; ve c_f = sabit ($c_f / 10$ oranı yumuşama eğrisi şekline bağlıdır ve üçgen yumuşama için $c_f \approx l_0 / 2$ 'dir)”. Şekil 2.6'daki formüller 6 durumun asimptotik eşleştirmesi ile elde edilmiştir: “küçük boyutlu ve büyük boyutlu asimptotik davranışlar (her biri için genişlemenin ilk iki terimi), büyük çentik ve kaybolan çentik davranışları ve boyut etkisinin enerjik ve istatistiksel kısımları”.



Şekil 2.6. (a,b) Geliştirilmiş evrensel boyut etkisi yasası USEL (solda Weibull istatistiği olmadan, sağda Weibull istatistiği ile) ve (c,d,e) Duan ve Hu'nun (2003) yaklaşımına kıyasla USEL'den elde edilen profiller (Bazant ve Yu, 2004).

2.6.3. Boyut Etkisi için DeneySEL Kanıt

Bazant tarafından önerilen boyut etkisi kanunu [Eşitlik (2.12)] hem çentikli kırılma numuneleri hem de çentiksiz yapılar için çok sayıda deneysel veri ile doğrulanmıştır. Mevcut olanlar arasında 23 test serisinden elde edilen sonuçlar, çeşitli yazarlara, malzemelere ve numunelere karşılık gelecek şekilde aşağıda kısaca incelenmiştir. Numune özelliklerinin temelleri Tablo 2.1 özetlenmiştir. Özellikle, her bir deney serisine Eşitlik (2.2)'e karşılık gelen c_N katsayısı yer almaktadır.

Tablo 2.1. Boyut etkisi test serilerinin özeti (Bažant ve Planas, 1998).

Seires	Material	Specimentype	a ₀ /D	S/D	b(mm)	C/N	Reference
A1-A6	concrete	SEN-TPB	1/3	4	76.2	6	Walsh 1972
B1	concrete	SEN-TPB	1/6	2.5	38.1	3.75	Bazant and Pfeiffer 1987
B2	concrete	DEN-EC	1/6	-	38.1	1	Ibid
B3	concrete	DEN-T	1/6	-	19.1	1	Ibid
B4	concrete	DEN-S	1/6	-	38.1	1	Bazant and Pfeiffer 1986
C1	mortar	SEN-TPB	1/6	2.5	38.1	3.75	Bazant and Pfeiffer 1987
C2	mortar	DEN-EC	1/6	-	38.1	1	Ibid
C3	mortar	DEN-T	1/6	-	19.1	1	Ibid
C4	mortar	DEN-S	1/6	-	38.1	1	Bazant and Pfeiffer 1986
D1	HSC	SEN-TPB	1/3	2.5	38.1	3.75	Gettu, Bazant and Karr 1990
E1	marble	SEN-TPB	0.5	4	30	6	Fathy 1992
E2	granite	SEN-TPB	0.5	4	30	6	Ibid
F1	limestone	SEN-TPB	0.4	4	13	6	Bazant, Gettu and Kazemi SEN-TPB 1991
G1	SiO ₂	SEN-TPB	0.2b	4	=D	6	McKinney and Rice 1981
G2	SiC CN-137	SEN-TPB	0.2	4	=D	6	Ibid
G3	SiC CN-163	SEN-TPB	0.2	4	=D	6	Ibid
H1-2	concrete	DP	-	-	-	0.4	Marti 1989
I1	microcon	BPO	-	-	-	4/π	Bazant and Şener 1988
J1	mortar	UPT	-	-	-	0.75	Bazant, Şener and Prat 1988
J2	R.mortar	RPT	-	-	-	0.75	Ibid
K1	R.mortar	LRB-UB	-	-	-	0.5	Bazant and Kazemi 1991
K2	R.mortar	LRB-AB	-	-	-	0.5	Ibid
L1	microcon	PS	-	-	-	1/π	Bazant and Cao 1987

^a Değişken. Sonuçlar sabit bir a₀/D = 0,2 değerine indirgenmiştir.

Malzemelerin bazı özellikleri, boyut aralığı ve Bf'_t ve D_0 için en iyi uyumlarla birlikte, verilerin kaynaklarının da gösterildiği Tablo 2.1.'de özetlenmiştir. Testlerle

ilgili daha fazla ayrıntı aşağıda verilmiştir; ancak ayrıntılı açıklamalar verilmemiştir, bunlar başvurulacak kaynaklardan elde edilebilir. Literatürde boyut etkisi yasasının deneysel verilere en iyi şekilde uydurulması için çeşitli uydurma prosedürleri kullanıldığından, bu kitapta birleştirilmiş bir prosedür kullanılmıştır. Bu prosedürde doğrusal olmayan regresyon doğrudan bilogaritmik bir diyagram olarak sunulan veriler üzerinde gerçekleştirilir. Bunu yapmak için, $v = \ln \sigma_{Nu}$ olarak adlandırılır ve v , karesel hatası Denklem 2.12'ye eşdeğer aşağıdaki yaklaşık denklemle minimize edilecek değişken olarak alınır

$$\sigma_{Nu} = (Bf'_t) / (1 + D + D_0)^{1/2} \quad (2.12)$$

$$\sigma_N = C_N P / (bD) \text{ for 2D similarity, } \sigma_N = C_N P / D^2 \text{ for 3D similarity} \quad (2.13)$$

$$v = \ln(Bf'_t) - 0.5 \ln(1 + D/D_0) \quad (2.14)$$

Bf'_t ve D_0 için optimum uyumlar standart bir Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak hesaplanmıştır. Bf'_t ve D_0 değerleri standart hatalarıyla birlikte Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Boyut etkisi testlerinin temel verileri (Bažant ve Planas, 1998).

Seires	Material	d_s^a (m)	Mukavemet ^b	Elastisite Modülü	Boyut Aralığı	Bf'_t	D_0 (mm)
A1	concrete	12.7	23.1	n.a	76-381	4.5±0.9	36±17
A2	concrete	12.7	35.4	n.a	76-381	2.8±0.5	157±99
A3	concrete	12.7	14.3	n.a	76-381	3.2±2.1	34±5.2
A4	concrete	12.7	15.6	n.a	76-381	1.7±0.3	126±78
A5	concrete	12.7	46.8	n.a	76-381	2.9±0.4	212±114
A6	concrete	12.7	32.7	n.a	76-381	4.1±0.7	55±23
B1	concrete	12.7	34.1	n.a	76-305	6.0±3	60±10
B2	concrete	12.7	37.4	n.a	76-305	3.9±.2	54±10
B3	concrete	12.7	29.1	n.a	76-152	2.7±0.1	184±38
B4	concrete	12.7	39.7	n.a	76-305	4.6±.1	719±30
C1	mortar	4.83	48/4	n.a	76-305	14±4	7.7±.4
C2	mortar	4.83	48.1	n.a	76-305	6.6±1.3	10±5
C3	mortar	4.86	46.4	n.a	76-152	3.3±0.1	95±17
C4	mortar	4.83	49.0	n.a	76-305	5.9±0.2	190±25

D1	HSC	9.5	96.0	n.a	38-152	32±8	19±11
E1	marble	4	7.7 ^c	36	12.5-100	3.7±0.2	47±10
E2	granite	2	12.3 ^c	39	12.5-100	5.1±0.2	35±5
F1	limestone	1.5	3.45 ^c	30.5	13-102	3.3±0.1	45±6
G1	SiO ²	0.02	-	58	5-35	17±3	2.6±2
G2	SiC CN-137	2	-	130	7-37	36±4	101±157
G3	SiC CN-163	2	-	140	7-37	35±3	7.3±2.2
H1	concrete	9.5	33.3	n.a	76-610	2.7±0.1	352±63
H2	concrete	9.5	23.6	n.a	76-1219	1.95±0.05	601±83
I1	microcon	6.35	45.8	13-51	45.9	36±14	6±6
J1	mortar	4.83	43.7	n.a	38-152	5.4±0.3	37±6
J2	mortar	4.83	43.6	n.a	38-152	6.2±2.1	23±20
K1	mortar	4.83	46.8	n.a	41-163	2.2±0.1	151±40
K2	mortar	4.83	46.2	n.a	21-330	4.6±1	11±6

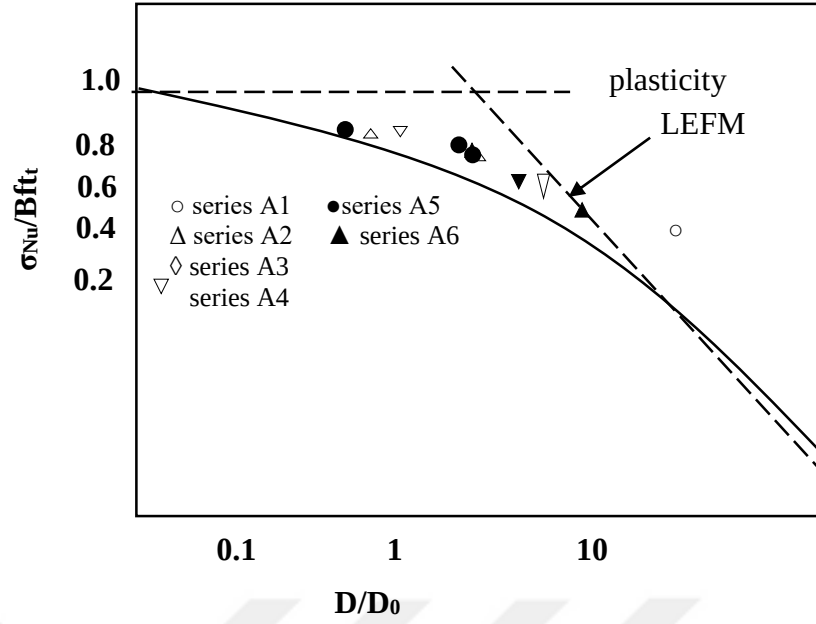
^a Maksimum agreg a veya tane boyutu

^b Aksi belirtilmedikçe basınç

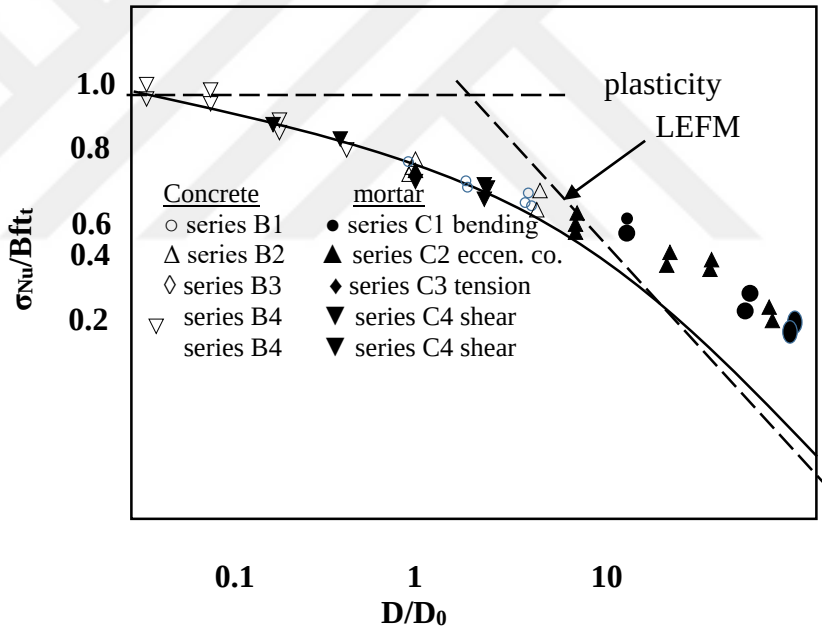
^c Yarma (splitting) çekme dayanımı

2.6.4. Çentikli veya Çatlaklı Yapılar

Boyut etkisi kanunu ilk olarak Bazant, sonuçları Şekil 2.67’de özetlenen Walsh testleriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Walsh üç nokta eğilmede tek kenarı çentikli kirişler kullanmıştır (SEN-TPB, Tablo 2.1 Test Serisi A l-6). Görünüşe göre test sonuçlarını $\log \sigma_{Nu}$ ‘ya karşı $\log D$ olarak çizen ilk kişi Walsh olmuştur, ancak bu grafiği matematiksel olarak tanımlamaya veya genelleştirmeye çalışmamıştır. Bununla birlikte, Walsh’un klasik testleri sınırlı aralıktaydı, elde edilen dağılım için çok kısaydı ve yalnızca bir tür kırılma numunesi içermiş ve bu nedenle karşılaştırmalar tamamen kesin olmamıştır. Bazant ve Pfeiffer (1986, 1987) tarafından daha geniş bir boyut aralığını ve dört farklı numune türünü kapsayan daha güçlü bir deneysel doğrulama sunulmuştur: “SEN-TPB, eksantrik sıkıştırmada çift kenarlı çentik (DEN-EC), eksantrik sıkıştırmada çift kenarlı çentik (DEN-EC) ve kesmede çift kenarlı çentik (DEN-S) (Tablo 2.1 ve Şekil 2.8), test serileri Bl-4 ve Cl-4”. Araştırma beton (Bl-4 serisi) ve harç (Cl-4 serisi) üzerinde yapılan testleri de içermektedir.



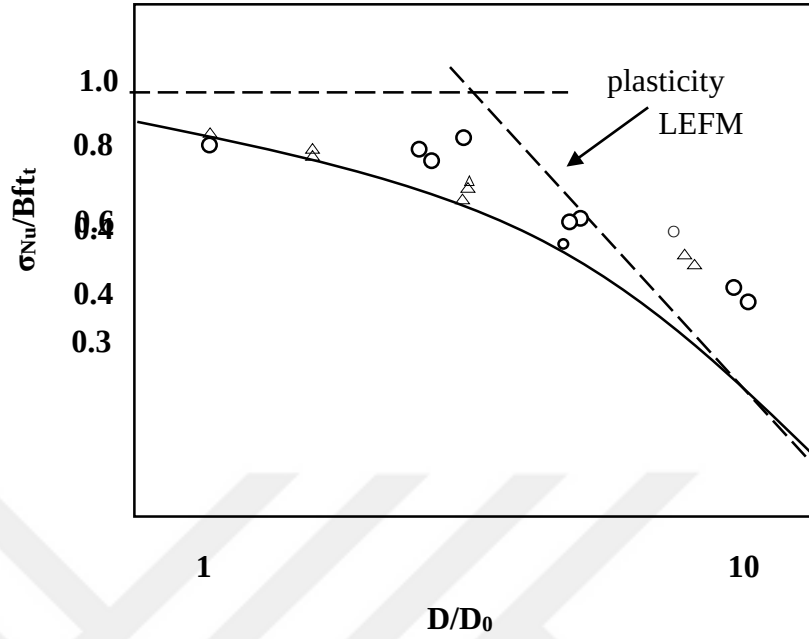
Şekil 2.7. Walsh'un (1972) boyut etkisi sonuçları (Bažant ve Planas, 1998).



Şekil 2.8. Bazant ve Pfeiffer'in (1986, 1987) boyut etkisi sonuçları (Aktaran: Bažant ve Planas, 1998).

Test sonuçları ve bunların boyut etkisi yasasına göre optimum uyumları Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Açıkçası, karşılaştırma boyut etkisi yasası için güçlü bir gerekçe sağlamaktadır. Şekil 2.8'deki veri noktaları bireysel testleri ifade etmektedir. Gettu, Bazant ve Karr (1990) tarafından SEN-TPB kullanılarak yüksek dayanımlı beton üzerinde deneysel bir boyut etkisi çalışması yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 2.9'da,

yine boyut etkisi kanunu ve asimptotları tarafından optimum uyumlarla karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Gettu, Bazant ve Karr'ın (1990) boyut etkisi sonuçları. Bazant ve Pfeiffer'in (1987) normal beton için sonuçları da karşılaştırma için dahil edilmiştir (Aktaran: Bazant ve Planas, 1998).

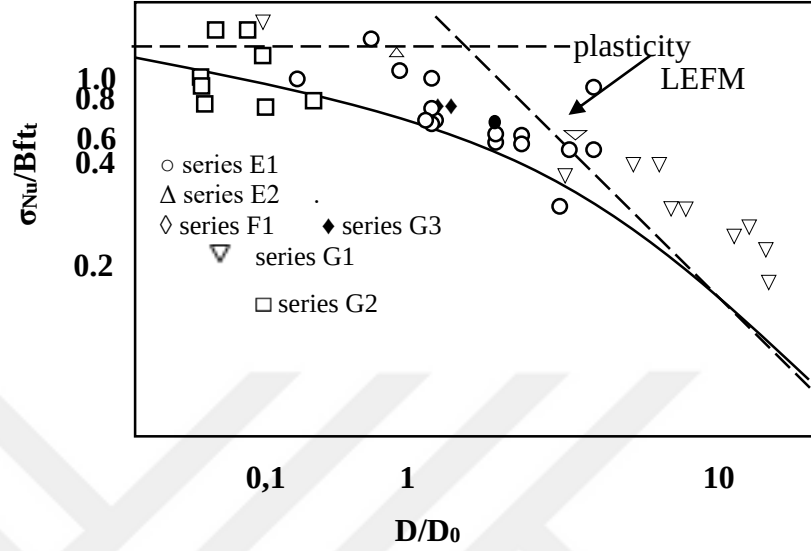
Beton için, yukarıda belirtilen sonuçlar Bazant ve Gettu tarafından yayınlanan SENTPB numuneleri için kapsamlı boyut etkisi verileri ile tamamlanmıştır. Ancak bu testler (Bazant, Bai ve Gettu 1993 tarafından kireçtaşının kırılmasına ilişkin benzer testlerin yanı sıra) yükleme hızının etkisinin sistematik bir incelemesini de içermektedir. Ayrıca, boyut etkisi yasasının Jenq ve Shah (1985) tarafından yapılan boyut etkisi testlerinin sonuçlarıyla iyi bir uyum gösterdiği gösterilmiştir, ancak boyut aralığı elde edilen dağılıma kıyasla çok sınırlı olduğu için iyi bir uyum mümkün olmamıştır. Boyut etkisi yasasının (Denklem 2.12) beton dışındaki malzemelerdeki çentikli numunelerin mukavemet değişimini tanımlama kabiliyeti, özellikle kayalar ve seramikler için de araştırılmıştır. Daha iri taneli kayalardan seramiklere geçen Fathy (1992) mermer ve graniti; Bazant, Gettu ve Kazemi (1991) kireçtaşını; McKinney ve Rice (1981) ise kayma döküm erimiş silika (SiO_2) ve nitridize silisyum karbürü (SiC CN-137 ve SiC CN-137) test etmiştir. Şekil 2.9 onların test sonuçlarını özetlemektedir. Boyut etkisi yasasının çeşitli sonuçları kabul edilebilir derecede iyi açıkladığı görülebilir.

Son deneysel veriler, kompozitler ve buz için benzer bir uyum derecesine işaret etmektedir. Bazant, Daniel ve Li (1996) yüksek ortotropik karbon-epoksi fiber laminatların hem tek hem de çift kenarlı çentikli numunelerini gerilimde test etmiş ve 1:8 boyut aralığı için boyut etkisi yasası ile iyi bir uyum bulmuşlardır. Adamson ve diğerleri (1995) ve Mulmule, Dempsey ve Adamson (1995) çeşitli numune geometrileri kullanarak deniz buzu üzerinde çeşitli test serileri gerçekleştirmiştir. Serilerden birinde, çentik ağzında açma kuvvetlerine maruz kalan çentikli kare plakalar 1:160 boyut oranıyla test edilmiştir (numunelerin boyutu 0,5 ila 80 m arasında değişmektedir). Bu, bugüne kadar bilinen en geniş boyut aralığına sahip test serisidir. Sonuçlar, boyut etkisi yasası ile çok iyi bir uyum göstermiştir.

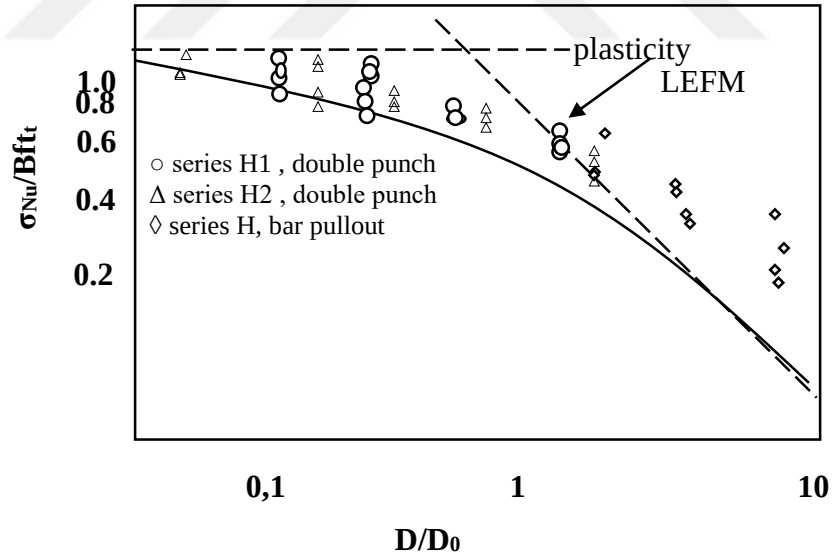
2.6.5. Çentiksiz veya Çatlaksız Yapılar

Çentiksiz beton yapıların çeşitli arıza türleri için (Denklem 2.7)'yi doğrulamak amacıyla kapsamlı testler gerçekleştirilmiştir. Kırılma mekaniğinin beton yapıların gevrek hasarlarına uygulanabilirliğinin ek bir doğrulaması olarak kabul edilebilecek sonuçların bir örneği Şekil 2.9 ve 2.10'de gösterilmektedir. Kırılma mekaniğinin uygulanabilirliğinin bir başka kanıtı olarak, Şekil 2.11'de, delme makaslama hatası için, boyut arttıkça tepe sonrası yük düşüşünün daha dik ve daha büyük hale geldiği gösterilmektedir. Bunun nedeni, daha büyük bir numunede (aynı σ_N için) bir birim çatlak uzantısına salınacak daha fazla enerji olmasıdır. Çatlak uzaması aynı miktarda enerjiyi dağıttığı için yük azaltılmalıdır. Literatürde rapor edilen normal boyutlu agregaya sahip beton numuneler üzerindeki mevcut test verileri de boyut etkisine dair kanıtlar sunmaktadır ve kırılma mekaniğine dayalı bir açıklama ihtiyacı Reinhardt başta olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Literatürdeki verilerin genellikle Şekil 2.3b ile uyumlu olduğu görülmüştür, ancak veriler çok büyük istatistiksel dağılım gösterdiğinden ve boyut aralığı yetersiz olduğundan kanıtlar genellikle çok güçlü değildir. Büyük dağılım ve boyut aralığı sınırlaması nedeniyle, Weibull'un istatistiksel teorisi gibi diğer boyut etkisi teorileri ile yaklaşık eşit derecede iyi uyumlar elde edilebilir. Ancak, Şekil 2.6-2.11'de ölçülen boyut etkisi eğrileri Weibull tipi istatistiksel teori ile uyuşmamaktadır. Bu teori iki boyutlu benzerlikler için $-1/6$ ve iki boyutlu benzerlikler için $-1/4$ eğimli düz bir çizgi vermektedir ki bu değerler şekillerde görüldenden önemli ölçüde daha küçüktür. Dağılımın büyük bir kısmı muhtemelen çeşitli boyutlardaki test numunelerinin geometrik olarak benzer olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle (Denklem

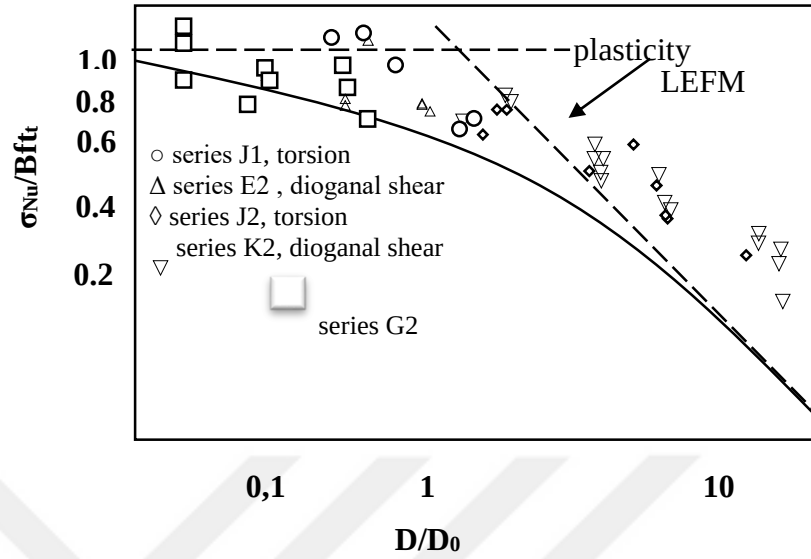
2.7) ile karşılaştırma yapılmadan önce şekil faktörleri için teorik ayarlamalar yapılmalıdır ve kesin teori bilinmediğinden, bu tür ayarlamalar dağılım olarak ortaya çıkan ek hatalar getirmektedir.



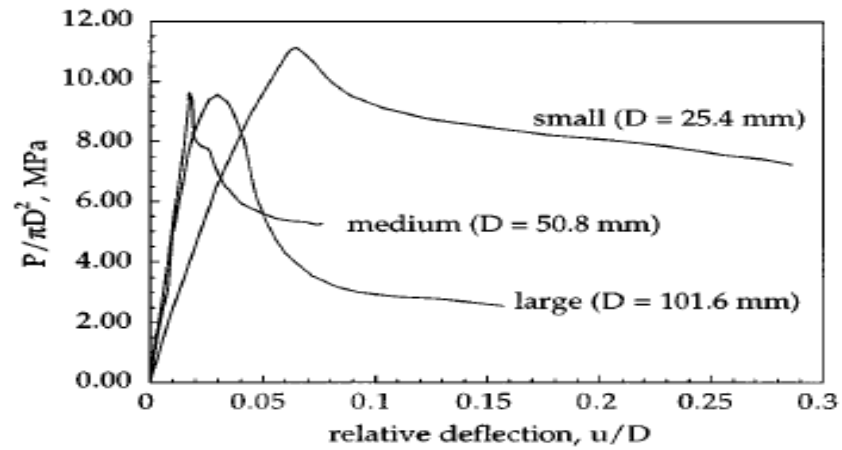
Şekil 2.10. Çeşitli kaya ve seramik türleri için boyut etkisi sonuçları (Bažant ve Planas, 1998).



Şekil 2.11. Çift zımba testlerinde ve çubuk çekmede boyut etkisi (Bažant ve Planas, 1998).



Şekil 2.12. Düz (J1) ve güçlendirilmiş (J2) beton prizmalar için burulmada boyut etkisi; ankrajsız (K1) ve ankrajlı (K2) çubuklar için boylamasına güçlendirilmiş kirişlerin diyagonal kesme hasarı; ve döşemelerin delme kesmesi (Aktaran: Bazant ve Planas, 1998).



Şekil 2.13. Plakaların delinmesinde yük-sehim eğrisi üzerindeki boyut etkisi (Bazant ve Planas, 1998).

2.6.6. Güç Ölçeklendirmesi ve Boyut Etkisi Olmaması Durumu

Öncelikle, karakteristik uzunluk içermeyen tüm fiziksel sistemler için geçerli olan basit ölçeklendirmeyi açıklamak uygun olacaktır. Geometrik olarak benzer sistemleri, örneğin Şekil 14a'da gösterilen kirişleri ele alalım ve yapının karakteristik boyutu (boyut) D 'nin bir fonksiyonu olarak Y tepkisini (örneğin, maksimum gerilme veya maksimum sapma) çıkarmaya çalışalım. Belirli bir referans boyutu D_0 seçilir ve

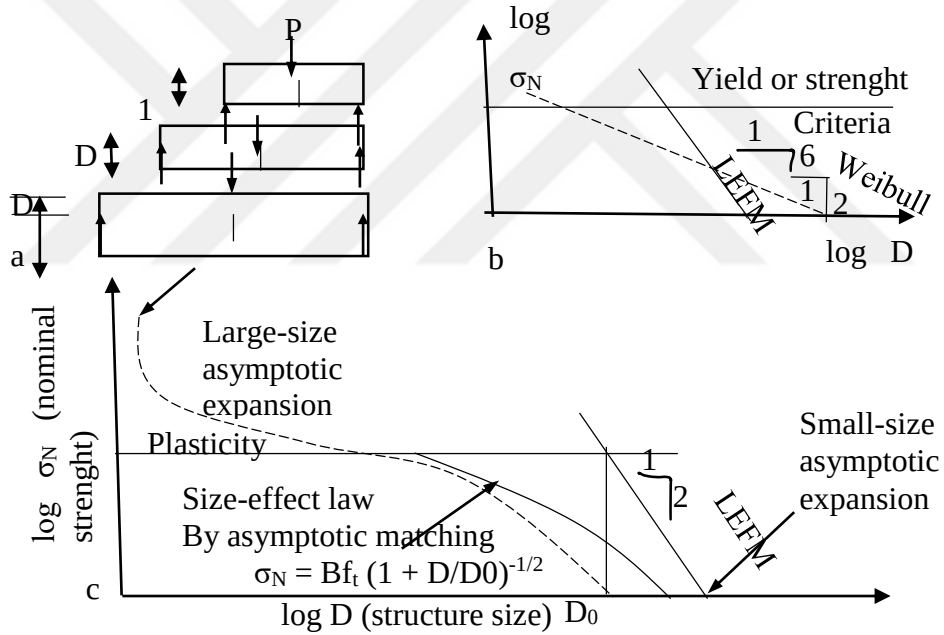
buna karşılık gelen yanıtı Y_0 olarak gösterilir. Rastgele bir D boyutuna sahip geometrik olarak benzer bir yapı için yanıt $Y = Y_0 f(D/D_0)$ olarak ifade edilebilir; burada f , ölçeklendirme yasasını tanımlayan boyutsuz bir argümanın boyutsuz bir fonksiyonudur. Örneğin, D_1 ve D_2 boyutları için $Y_1 = Y_0 f(D_1/D_0)$ ve $Y_2 = Y_0 f(D_2/D_0)$. Ancak, karakteristik uzunluk olmadığından, D_1 'i referans boyut olarak alabilir ve $Y_2 = Y_1 f(D_2/D_1)$ yazabiliriz. Sonuç olarak, denklem

$$f(D_2/D_1) f(D_1/D_0) = f(D_2/D_0) \quad (2.15)$$

D_0 , D_1 ve D_2 boyutlarının herhangi bir kombinasyonu için geçerli olmalıdır. Bu, bilinmeyen ölçekleme fonksiyonu f için fonksiyonel bir denklemdir. Herhangi bir olası çözüm bir güç yasası biçiminde olmalıdır.

$$F(D/D_0) = (D/D_0)^s \quad (2.16)$$

burada s keyfi ancak sabit bir üs değeridir.



Şekil 2.14. (a) Farklı boyutlarda geometrik olarak benzer yapılar (b) güç ölçeklendirme yasaları (c) plastisitenin güç yasası (yatay asimptot) ve LEFM'nin güç yasası (eğimli asimptot) arasında köprü kuran yarı kırılgan arızalar için boyut etkisi yasası (RILEM Committee QFS, 2004).

Öte yandan, örneğin $f(D/D_0) = \log(D/D_0)$ olduğunda, Eşitlik (2.15) karşılanmaz. Dolayısıyla, logaritmik ölçekleme ancak sistem bir karakteristik uzunluğa sahipse ve referans boyutundaki bir değişiklik f ölçekleme fonksiyonunda bir değişiklik anlamına geliyorsa mümkün olabilir. Güç ölçeklemesi, karakteristik uzunluğun olmadığı her fiziksel teori için geçerli olmalıdır. Katı mekaniğinde bu tür kırılma teorileri arasında mukavemet limitli elastisite, elasto-plastisite, viskoplastisite

ve LEFM (FPZ'nin bir noktaya büzüldüğü varsayılır) yer alır. Üstel s'yi belirlemek için malzemenin kırılma kriteri dikkate alınmalıdır. Mukavemet sınırı olan elastisite (mukavemet teorisi) veya gerilmeler veya gerinimler veya her ikisi cinsinden ifade edilen bir akma yüzeyi olan plastisite (veya elasto-plastisite) için, Y yanıtı gerilme veya gerinimi temsil ettiğinde $s = 0$ bulunur (örneğin maksimum gerilme veya belirli homolog noktalardaki gerilme veya başarısızlıktaki nominal gerilme). Dolayısıyla, karakteristik bir boyut yoksa, farklı boyutlardaki geometrik olarak benzer tüm yapılar aynı nominal gerilimde başarısız olmalıdır. Geleneksel olarak, bu durum boyut etkisinin olmadığı durum olarak bilinir. Öte yandan, LEFM'de, geometrik olarak benzer çatlaklara veya çentiklere sahip geometrik olarak benzer yapıların dikkate alınması koşuluyla, $s = 1=2$ 'dir. Bu genel olarak Rice'ın J-integrali yardımıyla gösterilebilir. $\log \sigma_N$, $\log D$ 'ye karşı çizilirse, güç yasası düz bir çizgidir (Şekil 2b). Plastisite veya mukavemet sınırı olan elastikiyet için, güç yasasının üssü kaybolur, yani bu çizginin eğimi 0'dır. LEFM için eğim $1=2$ 'dir. Ortaya çıkmakta olan 'sıcak' bir konu, boyut etkisinin bu iki güç yasası arasında köprü oluşturduğu yarı kırılğan malzemeler ve yapılarıdır.

2.6.7. Weibull İstatistiksel Boyut Etkisi

Klasik boyut etkisi teorisi istatistiksel olmuştur. Rastgele güçteki bir zincir halkasının başarısızlığı için en zayıf halka modelinin üç boyutlu sürekli genellemesi (Şekil 15a) aşağıdaki dağılıma yol açar (Bazant, 2001).

$$P_f(\sigma_N) = 1 - \exp \left[- \int_V c(\sigma(\mathbf{x}), \sigma_N) dV(\mathbf{x}) \right] \quad (2.17)$$

Makroskopik kırılmanın yapının herhangi bir yerindeki bir mikro çatlaktan (veya bir kusurdan) başlamasıyla başarısız olan bir yapının olasılığını temsil eder; σ = nominal gerilme σ_N 'ye karşılık gelen yük tarafından indüklenen gerilme tensör alanı, $\mathbf{x}$ = koordinat vektörü, V = yapının hacmi ve $c(\sigma) =$ malzemenin başarısızlık olasılığının uzamsal konsantrasyonunu veren fonksiyon ($=V_r^{-1}$ malzeme temsili hacminin V_r başarısızlık olasılığı); $c(\sigma) \approx \sum_i P_1(\sigma_i)/V_0$ burada σ_i = asal gerilmeler ($i = 1,2,3$) ve $P_1(\sigma) = \sigma$ tek eksenli çekme gerilmesine maruz kalan V_0 hacmindeki (veya malzemenin temsili hacmindeki) mümkün olan en küçük test örneğinin başarısızlık olasılığı (kümülatif);

$$P_1(\sigma) = \left(\frac{(\sigma - \sigma_u)}{s_0} \right)^m \quad (2.18)$$

Burada m ; s_0 ; σ_1 = malzeme sabitleri (m = Weibull modülü, genellikle 5 ila 50 arasında; s_0 = ölçek parametresi; σ_u = genellikle 0 olarak alınabilen mukavemet eşiği) ve $V_0 = c(\sigma)$ 'nin ölçüldüğü numunelerin hacmi olarak anlaşılan referans hacmi. Tek eksenli gerilme altındaki numuneler için (ve $\sigma_u = 0$) (2.17) ve (2.18) nominal dayanımın ortalaması ve değişim katsayısı için aşağıdaki basit ifadelerle yol açar:

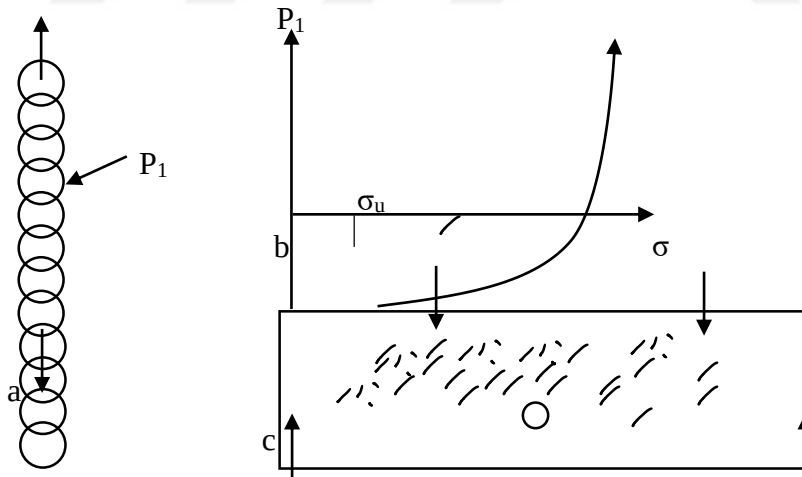
$$\overline{\sigma_N} = s_0 \Gamma(1+m^{-1})(V_0 / V)^{1/m} \quad (2.19)$$

$$\omega = ((\Gamma(1+2m^{-1})) / (\Gamma^2(1+m^{-1}))-1)^{1/2} \quad (2.20)$$

Burada Γ gama fonksiyonudur. ω sadece m 'ye bağlı olduğundan, genellikle aynı test numunelerinin mukavemetinin gözlemlenen istatistiksel dağılımından m 'yi belirlemek için kullanılır. σ_N ifadesi, D boyutuna bağlı olan V hacminin etkisini içerir. Genel olarak, üniform olmayan çok boyutlu gerilmeye sahip yapılar için, Weibull teorisinin boyut etkisi ($\sigma_u \approx 0$ için) tipindedir:

$$\overline{\sigma_N} \propto D^{-n_d/m} \quad (2.21)$$

Burada $n_d=m$ (7) tek, iki veya üç boyutlu benzerlik için $n_d = 1, 2$ veya 3'tür.



Şekil 2.15. (a) Rastgele mukavemete sahip çok sayıda bağlantıya sahip zincir (b) küçük bir elemanın arıza olasılığı (c) kritik hale gelme olasılıkları farklı olan çok sayıda mikro çatlak içeren yapı (Bazant, 2001).

Denklem (2.19)'a göre, düzgün gerilmiş bir numune için $\sigma_w = \sigma_N (V = V_0)^{1/m}$ değeri, Weibull gerilmesi olarak adlandırılan boyuttan bağımsız bir gerilme ölçüsü olarak kabul edilebilir. Bu bakış açısıyla Beremin (1983), büyük bir çatlak ucu

plastik bölgesindeki tekdüze olmayan gerilmenin Weibull gerilmesi olarak adlandırılan yöntemle dikkate alınmasını önermiştir:

$$\sigma_w = \left(\sum_{i=1}^m \sigma_i^m V_i/V_0 \right)^{1/m} \quad (2.22)$$

Burada V_i ($i = 1, 2, \dots, NW$) maksimum asal gerilme σ_i 'ye sahip plastik bölgenin elemanlarıdır. Ruggieri ve Dodds (1996) (2.19)'daki toplamı bir integral ile değiştirmiştir. Bununla birlikte, Denklem (2.21) yalnızca boyutu D 'den neredeyse bağımsız olan çatlak ucu plastik bölgesini dikkate alır. Sonuç olarak, Denklem (2.21) yalnızca kırılma anındaki çatlak henüz makroskopik değilse, yapısal boyutlara kıyasla hala ihmal edilebilirse uygulanabilir. Yarı kırılğan yapılar söz konusu olduğunda, klasik Weibull teorisinin uygulamaları bir dizi ciddi itirazla karşı karşıya kalmaktadır (Aktaran: Bazant, 2001).:

1. Denklem (2.21)'de boyut etkisinin bir güç yasası olması, herhangi bir karakteristik uzunluğun olmadığını ima etmektedir. Ancak malzeme büyük ölçüde homojensizlik içeriyorsa bu doğru olamaz.

2. Makroskopik FPZ veya P_{max} tepe yükünden önce kararlı çatlak büyümesinin neden olduğu gerilme yeniden dağılımları nedeniyle enerji salınımı, göz ardı edilen deterministik bir boyut etkisine yol açar. Bu nedenle Weibull teorisi yalnızca mikroskobik bir çatlak makroskobik hale gelir gelmez yapı başarısız olursa geçerlidir.

3. Klasik Weibull teorisine göre, her yapı matematiksel olarak tek eksenli gerilmiş bir çubuğa (veya zincire, Şekil 2.15) eşdeğer olacaktır, bu da yapısal geometri ve kırılma mekanizması hakkında hiçbir bilginin dikkate alınmadığı anlamına gelmektedir.

4. İki ve üç boyutlu benzerlik ($nd = 2$ veya 3) arasındaki boyut etkisi farkları çok büyük tahmin edilmektedir.

5. Kırılğan malzemelerle ilgili birçok test (örneğin, betonarme kirişlerin diyagonal kesme hatası) Weibull teorisi tarafından öngörülenden çok daha güçlü bir boyut etkisi göstermektedir.

6. Klasik teori, hasar gelişiminin yerel olmayan özelliklerinden kaynaklanan komşu elemanların malzeme hasar olasılıklarının uzamsal korelasyonlarını ihmal

etmektedir (bazı fenomenolojik yük paylaşımı hipotezlerine dayanan genellemeler mekanikten ayrılmıştır).

7. Denklem (2.19) tek boyutlu ($V = \text{sabit}$) numuneler için istatistiksel dağılım test verilerine ve Denklem (21) boyut veya V etkisi (çentiksiz düz beton numuneler) ortalama test verilerine uydurulduğunda, Weibull üssü m 'nin optimum değerleri çok farklıdır, yani sırasıyla $m = 12$ ve $m = 24$. Teori uygulanabilir olsaydı, bu değerlerin çakışması gerekirdi (Bažant ve Novák 2000).

Bu sınırlamalar göz önüne alındığında, beton yapılar arasında Weibull teorisi bazı aşırı kalın düz (donatısız) yapılara uygulanabilir görünmektedir, örneğin yatay kiriş görevi gören bir kemer barajın eğilmesi (ancak kemer barajların veya ağırlık barajlarının dikey eğilmesi için değil, çünkü büyük dikey basınç gerilmeleri maksimum yükten önce uzun çatlakların istikrarlı bir şekilde büyümesine neden olur). Diğer düz beton yapıların çoğu, deterministik boyut etkisinin baskın olmasını önleyecek kadar kalın değildir. Çelik veya fiber takviye de bunu engeller.

2.6.8. Plastisite ve LEFM Arasında Köprü Kuran Yarı Gevrek (Quasi-Brittle) Boyut Etkisi ve Tarihçesi

Beton kısmen gevrek özellik gösterse de kırılma mekaniği incelendiğinde yarı gevrek (quasi-brittle) davranış sergilediği açıkça görülmektedir. Yarı kırılğan malzemeler (1) tamamen plastik deformasyon yapamayan ve (2) normal kullanımda yapı boyutu D 'ye kıyasla ihmal edilemeyecek bir FPZ'ye sahip olan malzemelerdir. Yarı kırılğanlık kavramı mutlak değil, D 'ye bağlı olarak görecelidir, Çatlak başlangıcının malzeme mukavemeti tarafından yönetilmesi dışında (ki bu da kırılğan seramiklerde veya yorulmaya karşı dayanıklı çelikte olduğu gibi FPZ'deki mikroskobik kusurların kırılma davranışı tarafından belirlenir) LEFM'yi takip eder. Yeterince küçük D için, her yarı gevrek yapı mükemmel plastik çatlağa sahip elastik bir cisme eşdeğerdir (Bažant 2002a'da kanıtlandığı gibi) ve plastisite teorisini takip eder, ancak bu tür plastik davranışın elde edildiği D boyutu, D 'nin malzemenin homojenlik boyutundan daha küçük olduğu soyut bir teorik ekstrapolasyonu temsil edebilir. Tüm gevrek malzemeler (yani, çatlak büyümesinin LEFM tarafından yönetildiği malzemeler) yeterince küçük bir ölçekte yarı gevrek hale gelir (örneğin, $D > 1$ mm için gevrek olan ince taneli bir seramik, $D \approx 1$ μm için yarı gevrek olabilir) ve tüm yarı gevrek malzemeler yeterince büyük bir ölçekte mükemmel gevrek hale gelir (örn, büyük bir yerçekimi barajı ölçeğinde normal boyutlu agregaya sahip

beton, 100 m ölçeğinde deniz buzu veya 1 km'yi aşan bütün bir dağ ölçeğinde 10 m aralıklı eklemlere sahip eklemli kaya kütlesi). Tek başına plastisite ve tek başına LEFM karakteristik bir uzunluğa sahip değilken, plastisite ve LEFM arasında köprü kurmak için göz önünde bulundurulması gereken her ikisinin kombinasyonu karakteristik bir uzunluğa sahiptir. Irwin (1958: Aktaran: RILEM Committee QFS, 2004) bir çatlak ucunun önünde oluşan plastik bölgenin l_p boyutunu incelemiştir. Kabaca bir $l_p \approx K_I^2 / \pi \sigma_f^2$, tahmini türetmiştir; burada K_I mod-I gerilme yoğunluğu faktörü ve σ_0 malzeme mukavemeti veya akma sınırındır. Düzlem gerilme altında yeni başlayan çatlak ilerlemesinde, K_I kırılma tokluğuna eşittir, $K_{IC} = p\sqrt{EG_F}$, burada E Young modülü ve G_f kırılma enerjisidir. Bu, karakteristik bir uzunluk (malzeme uzunluğu) tanımını motive eder:

$$L_0 = (EG_f / a_0^2) \quad (2.23)$$

Bu da yarı kırılğan malzemelerde FPZ'nin boyutunu yaklaşık olarak karakterize eder. Dolayısıyla, deterministik yarı kırılğan boyut etkisinin anahtarı, mukavemet veya akma kavramının kırılma mekaniği ile birleşimidir. Dinamikte, bu ayrıca karakteristik bir zamanın (malzeme zamanı) varlığını ima eder:

$$\tau_0 = l_0 / v \quad (2.24)$$

v hızındaki bir dalğanın l_0 mesafesine yayılması için geçen süreyi temsil eder. LEFM ilk kez betona uygulandıktan sonra (Kaplan 1961), test sonuçlarıyla uyuşmadığı görülmüştür. Leicester (1969) farklı boyutlardaki geometrik olarak benzer çentikli kirişleri test etmiş, sonuçları $\sigma_N \propto D^n$ şeklinde bir güç yasasına uydurmuş ve optimum n değerinin LEFM'nin gerektirdiği değer olan $1/2$ 'den küçük olduğunu gözlemlemiştir. Azaltılmış üslü güç yasası, geçiş boyutu aralığının orta kısmındaki test verilerine elbette iyi uymaktadır, ancak sünek ve LEFM boyut etkilerinin köprülenmesini sağlamamaktadır. Azaltılmış üs değeri sonlu açılı çentiklerle açıklanmaya çalışılmıştır, ancak bu iki nedenden dolayı itiraz edilebilir:

(i) sonlu açılı çentikler yayılamaz (bunun yerine, çentik ucundan bir çatlak çıkmalıdır),

(ii) sonlu açılı çentiklerin tekil gerilme alanı, çentik ucuna sıfır enerji akışı sağlar.

Weibull teorisinde olduğu gibi, Leicester'ın güç yasası da karakteristik bir uzunluğun var olmadığını ima eder, ki bu durum homojen olmayan yapılarının büyüklüğü nedeniyle beton için geçerli değildir. Farklı boyutlardaki çentikli geometrik olarak benzer beton kirişlerin daha kapsamlı testleri Walsh (1976) tarafından gerçekleştirilmiştir. Matematiksel bir formülasyona girişmemiş olsa da, boyuta karşı nominal dayanımın çift logaritmik grafiğini çizen ve bunun plastisite ile LEFM arasında bir geçiş olduğunu gözlemleyen ilk kişi olmuştur. Önemli bir ilerleme Hillerborg ve arkadaşları (1976) tarafından gerçekleştirilmiştir. Barenblatt (1959, 1962) ve Dugdale'in (1960) yumuşama ve plastik FPZ modellerinden esinlenerek, çatlak açılması için bir yumuşama gerilme-yer değiştirme yasası ile karakterize edilen kohezif (veya hayali) çatlak modelini formüle etmişler ve sonlu eleman hesaplamaları ile çentiksiz düz beton kirişlerin eğilmedeki başarısızlıklarının, kopma modülü testleri ile uyumlu olarak deterministik bir boyut etkisi sergilediğini göstermişlerdir. Dağıtılmış (bulaşmış) çatlak hasarını analiz eden Bažant (1976), çatlağın bir çatlak bandında lokalize olmasının, yapıların tepe sonrası sapmaları ve enerji dağılımı üzerinde deterministik bir boyut etkisi yarattığını göstermiştir. Çatlak bandının etkisi, yaklaşık olarak ucunda oldukça büyük bir FPZ bulunan uzun bir kırığın etkisine eşdeğerdir. Daha sonra, Bažant (1984) yaklaşık bir enerji salınım analizi kullanarak, büyük kararlı çatlak büyümesinden sonra başarısız olan yapılardaki yarı kırılğan boyut etkisi için aşağıdaki yaklaşık boyut etkisi yasasını türetmiştir (Aktaran: RILEM Committee QFS, 2004):

$$\sigma_N = B\sigma_0 (1 + D/D_0)^{-1/2} + \sigma_R \quad (2.25)$$

veya daha genel olarak

$$\sigma_N = B\sigma_0 (1 + (D/D_0)^r)^{-1/2r} + \sigma_R \quad (2.26)$$

Burada r , B = pozitif boyutsuz sabitler; D_0 = geçiş boyutunu temsil eden sabit (plastisite ve LEFM güç yasalarının kesiştiği); hem D_0 hem de B yapı geometrisine (şekline) bağlıdır. Genellikle sabit $\sigma_R = 0$, ancak FPZ dışında σ_R artık çatlak köprüleme gerilmesi olduğunda (fiber kompozitlerde olduğu gibi) veya büyük boyutlarda paralel hareket eden bazı plastik mekanizmalar ortaya çıktığında ve baskın hale geldiğinde (Brezilya bölünmüş silindir testinde olduğu gibi).

Eşitlik (2.25)'in çatlak bandı modeli (Bažant 1976, Bažant ve Oh 1983) ve gerinim yumuşaması hasarının lokalizasyonunu gerçekçi bir şekilde simüle edebilen

ve sahte ağ hassasiyetinden kaçınabilen yerel olmayan sürekli hasar modelleri için sayısal sonuçlar tarafından yakından takip edildiği gösterilmiştir. 1980'lerin ortalarından itibaren, beton yapıların yarı kırılğan boyut etkisine olan ilgi büyük ölçüde artmış ve birçok araştırmacı kayda değer katkılarda bulunmuştur; bunlardan birkaçını saymak gerekirse Planas ve Elices (1988, 1989, 1993), Petersson (1981) ve Carpinteri (1996) başta gelmektedir. Boyut etkisi son zamanlarda beton kırılmasıyla ilgili konferanslarda ana tema haline gelmiştir (Bažant ve Rajapakse, 1999). P_{max} üzerindeki boyut etkisinin ölçümlerinin, kırılma enerjisi, etkili FPZ uzunluğu ve (geometriye bağlı) R-eğrisi de dahil olmak üzere, yarı kırılğan malzemelerin kırılma özelliklerini belirlemek için basit bir yol sunduğu gösterilmiştir (Aktaran: RILEM Committee QFS, 2004).

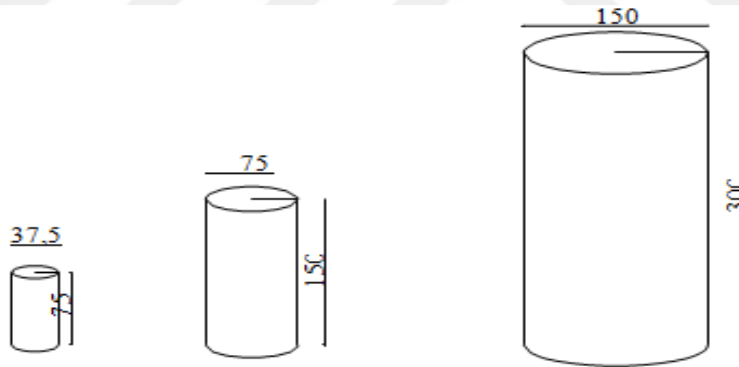


3. MATERYAL VE YÖNTEM

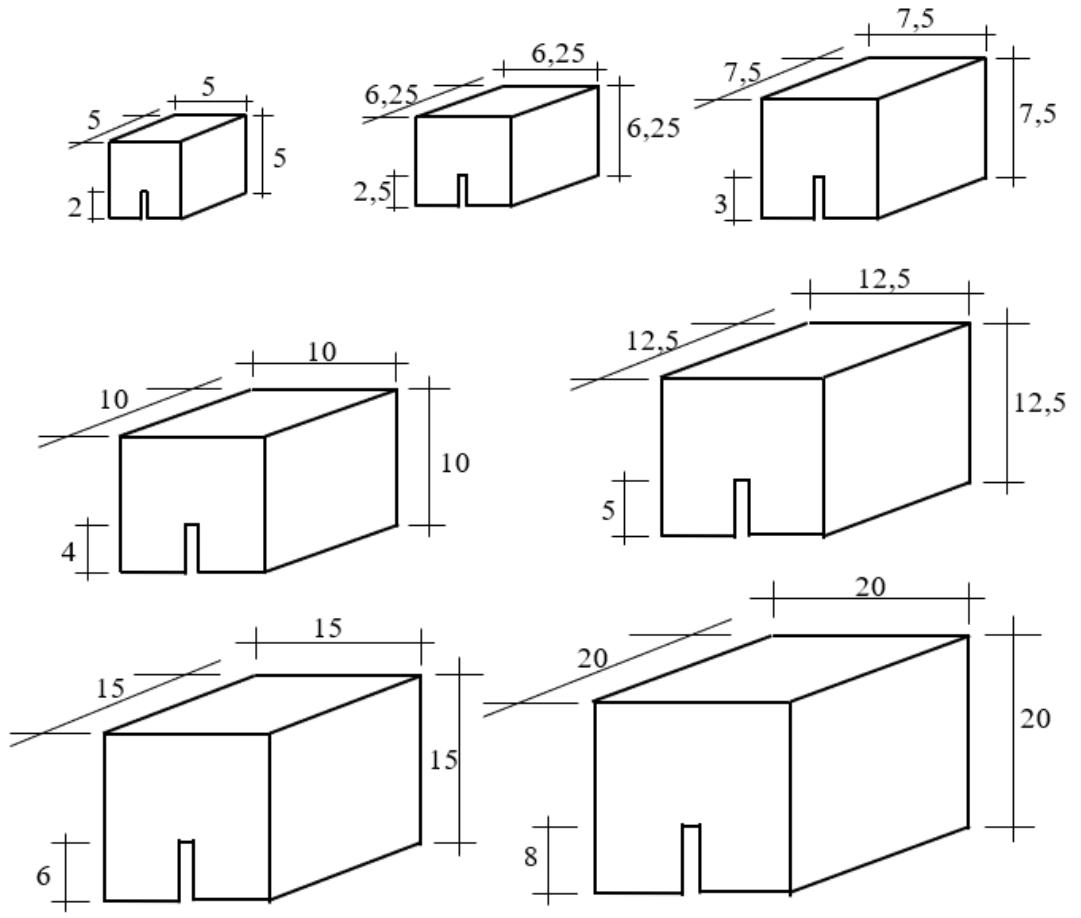
Deney numuneleri ve numunelerin özellikleri, kullanılan malzemeler, deney numunelerinin hazırlanması ve deneyin yapılmasından bahsedilmektedir.

3.1. Deney Numuneleri ve Deney Numunelerinin Özellikleri

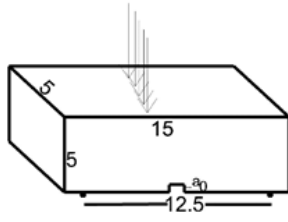
Farklı boyutlardaki kiriş, silindir ve küp beton numunelerde boyut etkisinin araştırıldığı bu çalışmada C-20 hazır beton sınıfı kullanılmıştır. Araştırmada Erbaa İkizler Hazır Beton Santralinde üretilen C-20 sınıfındaki betonlardan alınan numuneler kullanılarak deney grupları oluşturulmuştur. Her bir seri kiriş, küp ve silindir numunelerden oluşmaktadır. Üç ayrı geometrik şekillerde numuneler hazırlanmıştır. Kiriş numuneler olarak 18'er adet 50x150x300 mm, 50x100x300 mm ve 50x200x600 mm, küp numuneler olarak 6'şar 50x50x50 mm, 62,5x62,5x62,5 mm, 75x75x75 mm, 100x100x100 mm, 125x125x125 mm, 150x150x150 mm, 200x200x200 mm ve 300x300x300 mm, silindirik numuneler ise 6'şar adet 37,5 x 75 mm, 75x150 mm ve 150x300 mm olarak kalıplar üretilmiştir.



Şekil. 3.1 (a) Silindir Numune Şekilleri (ölçüler mm)



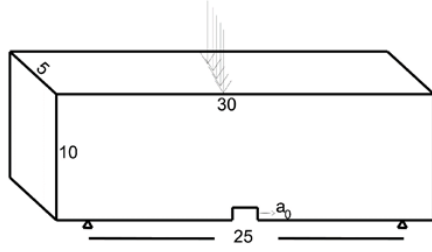
Şekil. 3.1 (b) Küp Numune Şekilleri (ölçüler cm)



$a_0 = 0,5$ cm için

$a_0 = 1$ cm için

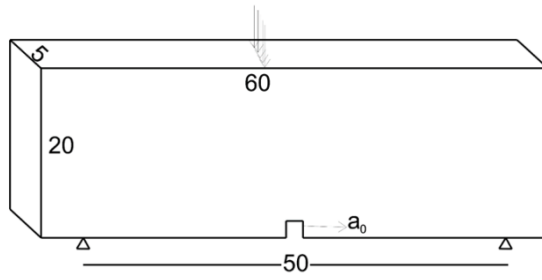
$a_0 = 2$ cm için



$a_0 = 1$ cm için

$a_0 = 2$ cm için

$a_0 = 4$ cm için



$a_0 = 2$ cm için

$a_0 = 4$ cm için

$a_0 = 8$ cm için

Şekil. 3.1 (c) Kiriş Numune Şekilleri (ölçüler cm)



Şekil. 3.2 Numunelerin Hazırlanması

3.2. Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinden bahsedilmiştir.

3.2.1. Çimento

Deneylerde Akçansa Lâdik Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş tarafından üretilen PÇ 42,5 ve PÇ 32,5 çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentolar TS EN 196-1 Standardına uygundur. Kimyasal ve Fiziksel özellikleri içeren rapor üretici firmanın Ladik'te bulunan kalite kontrol laboratuvarından alınmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de, mekanik özellikleri Tablo 3.2'de, kimyasal özellikleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Çimentonun fiziksel özellikleri

Çimentonun Cinsi	CEM I 42,5 R	CEM II/B-P 32,5 R
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3,10	2,88
Priz Süresi Başlangıcı (dak.)	135	170
Priz Süresi Sonu (dak.)	200	240
Özgöl Yüzey(cm ² /g)	3690	4663
Hacim Genleşmesi (mm)	1	0

Tablo 3.2. Çimento Basınç Dayanım Sonuçları

GÜN	Basınç Dayanımı (MPa) CEM I 42,5 R	Basınç Dayanımı (MPa) CEM II/B-P 32,5 R
2	29,7	18,0
7	44,4	30,2
28	55,7	46,0

Tablo 3.3. Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Özellik	Standart	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	$\leq \%5.0$
Çözünmeyen Kalıntı	EN 196-2	CEM I CEM III	Hepsi için	$\leq \%5.0$
Sülfat Miktarı (SO ₃ olarak) EN 196-2		CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5 N 32.5 R 42.5 N	$\leq \%3.5$
		CEM III	42.5 R 52.5 N 52.5 R	$\leq \%4.0$
Klorür İçeriği	EN 196-21	Hepsi için	Hepsi için	$\leq \%0.10$
Puzolanik Özellik	EN 196-5	CEM VI	Hepsi için	Deneyi Sağlar

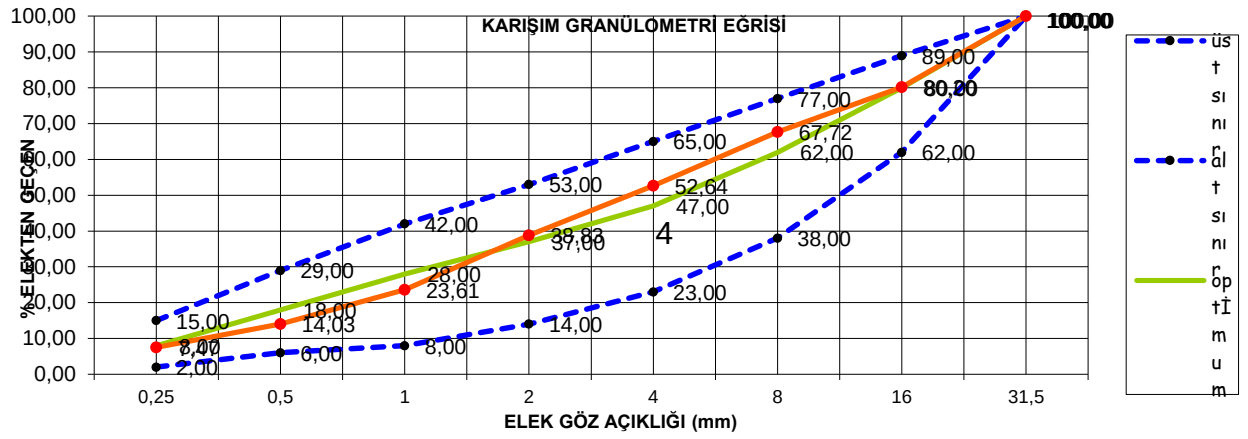
3.2.2. Agrega ve Beton Karışım Hesabı

Araştırmada C-20 beton sınıfı kullanılmıştır. Bu sınıftaki betona ait deneylerde iri agregalar olarak Mıcır 1 No (8–16 mm) kullanılmıştır. İnce agregalar olarak kum kullanılmıştır. Deney numunelerinde kullanılan agregaların $d_{max} = 10-16$ mm arası olacak şekilde betonlar üretilmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri ve elek analizleri farklı sınıftaki betonlar için ayrı ayrı çizelgelerde sunulmuştur.

3.2.2.1. Beton İçin Karışıma Giren Malzemenin Granülometri Formu

Tablo 3.4 Beton İçin Karışıma Giren Malzeme Granülometrisi Formu

MALZEME		KARIŞIM ORANI 27	ELEK GÖZ AÇIKLIĞI (mm)									
ANMA CAPI (mm)	CİNSİ		0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
0-5	I	65,0	5	6,2	11,2	21,2	35,8	58,9	80	100	100	100
5-13	II	3,0	2	2,8	4,8	6,7	9,8	16,8	20	89,2	100	100
13-19	III	12,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	100	100
19-25	IV	20,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1	100
			ELEKTEN GEÇEN YİĞİLMİ % DEĞERLERİ									



Şekil 3.3. Agrega Granülometri Eğrisi

Tablo 3.5. Beton Sınıfı Karışım Formu

TEORİK AĞIRLIKLAR						RUTUBET DÜZELTMESİ			
KARİŞİMA GİREN MALZEMELER	Hacim (dm ³)	MIX	Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Ağırlık (kg)	AĞIRLIK %	OA*A%	Rutubet (%)	Su emme (%)	Fark
ÇİMENTO	84		3,1	260	0,11	0,34			
SU	165		1	165	0,07	0,07			
HAVA	18								
Tpl. (ç+kül+su+h.)	267 dm ³								
Agrega tpl. Hacim	733 dm ³								
kırma kum	477	0,65	2,46	1128	0,48	1,18	2,00	5,74	-3,7
dere kum	22	0,03	2,56	100	0,04	0,11	4,00	3,49	0,5
				0					0,0
ince çakıl	88	0,12	2,66	250	0,11	0,28	2,00	1,27	0,7
iri çakıl	147	0,20	2,69	450	0,19	0,51	1,00	0,95	0,1
				3,12					
KATKI 1		1,2	1,05						
KATKI 2		0,0		0		2,49			
Toplam			Birim ağırlık (kg/m ³)	2356					

DÜZELTİLMİŞ KARİŞİM DEĞERLERİ		
1000 dm ³	Malzeme	10 dm ³
260 kg	Çimento	2.600 gr
165 kg	Su	1.650 gr
1086 kg	0*7	10.858 gr
100 kg	0*3	1.000 gr
0 kg		0
250 kg	7*15	2.500 gr
450 kg	15*25	4.500 gr
3,12 kg	Katki 1	31,2 gr
0,00 kg	Katki 2	0,00 gr

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numunelerinin nasıl hazırlandığını, kalıplara yerleştirildiğini ve diğer işlemlerden bahsedilmiştir.

3.3.1. Betonun Yerleştirilmesi ve Kalıplardan Çıkartılması

Farklı ebatlarda ahşap malzemeden hazırlanan küp ve kiriş numune kalıpları için ve korige borudan silindir numune kalıpları TS EN 12390–2 ‘e göre betonun kalıba yapışmasını önlemek üzere doldurma öncesinde kalıp iç yüzeyi çimento ile etkileşmeyen kalıp ayırıcı olarak kullanılan yağ ile ince bir tabaka halinde kaplanarak hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.4).

Çalışmamda Erbaa İkizler Hazır Beton Santralinde üretilen C-20 hazır beton sınıfında betondan aynı zamanlarda yapılan numuneler kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Beton numuneleri, kalıplara yüksekliği 10 cm’yi geçmeyen, eşit tabakalar halinde doldurulmuştur. Betonun kalıplara

yerleştirilmesinde TS EN 12390-2 standardına uygun bir şekilde daire kesitli çubuk ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Sıkıştırma çubuğu darbeleri, numune kalıbının en kesit alanına eşit şekilde dağıtılarak, ilk dökülen tabakanın sıkıştırılmasında çubuğun kalıp tabanına sertçe çarpmamasına, diğer tabakaların sıkıştırılması sırasında da bir önceki tabakaya fazla girmemesine dikkat edilerek yapılmıştır. Her tabaka sıkıştırma çubuğu ile en az 25'er defa şişlenerek boşluklar en aza indirilmeye çalışılmıştır. Hava kabarcıkları çıkışı duruncaya ve boşlukların dolması sağlanıncaya kadar kalıpların dış kenarlarına tokmak ile hafifçe vurulmuştur. Kalıbın üst yüzeyinden taşan fazla beton, çelik mala ile kesme hareketi yapılarak beton yüzeyinin düzgün şekilde çıkması için düzeltilmiştir.

Beton numuneleri, kalıplardan çıkarıldıktan sonra 28 gün boyunca $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilmiştir. 28. gün sonunda kür havuzundan çıkarılan numuneler ortam koşullarında hava kurusu hale gelene kadar bekletilmiştir. Numuneler daha sonra spiral ile çeşitli boyutlarda çentikler açılarak deneysel çalışmalara hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.4. Kalıpların Yağlanması



Şekil 3.5. Numunelerin Deneye Hazırlanması

3.4. Deneyin Yapılması

Farklı boyutlarda ve geometrik şekillerde hazırlanan deney numuneleri, kırıış numuneler Erbaa Er Yapı, küp şeklindeki küçük boyutlu numuneler Erbaa Hazır Beton ve büyük boyuttaki kup numuneler ve silindirik numuneler Karayolları 7. Bölge Müdürlüğü Beton Araştırma Laboratuvarında bulunan pres kullanılarak analiz edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Numunelerin Test Edilmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde laboratuvar çalışmalarında elde edilen sonuçlar ve değerler aşağıda yer alan tablolarda gösterilmiştir.

4.1. Küp Numuneler İçin Deney Sonuçları

Tablo 4.1 Küp numuneler için yük ve gerilme değerleri

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Küp No	Çentik Boyu cm	Kırılma Yüğü kN	Basınç Değeri Mpa
5x5x5 cm	C-20	1		70,56	17,97
		2	2	59,79	15,23
		3		57,89	14,74
6,25x6,25x6,25 cm		1		98,5	16,05
		2	2,5	76,38	12,45
		3		94,23	15,36
7,5x7,5x7,5 cm		1		169,5	30,11
		2		165,6	29,42
		3	3	157	27,89
10x10x10 cm		1		266,7	26,67
		2		224,7	22,47
		3	4	217,6	21,76
12,5x12,5x12,5 cm		1		479,6	30,68
		2		441,4	28,24
		3	5	448,9	28,72
15x15x15 cm		1		569,2	25,3
		2		547,6	24,34
		3	6	546,4	24,28
20x20x20 cm		1		1495,7	37,39
		2		1336,4	33,41
		3	8	1249,6	31,24

4.2. Kiriş Numuneler İçin Deney Sonuçları

Tablo 4.2. 50x50x150 mm kiriş numuneler için boyut etkisi

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Kiriş No	Çentik Boyu cm	Eğilme Kuvveti kgf	Eğilme Mukavemeti (kgf/cm ²)	Eğilme Kırılma Yüğü (kgf/mm)
50x50x150 mm	C-20	1		3,54	0,88	11,8
		2	0,5	3,92	0,98	13,07
		3		4,69	1,17	15,63
		1		3,57	0,89	11,9
		2	1	3,64	0,91	12,13
		3		3,23	0,81	10,77
		1		3,69	0,92	12,3
		2	2	3,39	0,85	11,3
		3		2,89	0,72	9,63

Tablo 4.3. 50x100x300 mm kiriş numuneler için yük ve gerilme değerleri

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Kiriş No	Çentik Boyu cm	Eğilme Kuvveti kgf	Eğilme Mukavemeti (kgf/cm ²)	Eğilme Kırılma Yüğü (kgf/mm)
50x100x300 mm	C-20	1		8,54	6,4	170,8
		2	1	5,8	4,35	116
		3		7,72	5,79	154,4
		1		7,84	5,88	156,8
		2	2	7,66	5,74	153,2
		3		6,95	5,21	139
		1		8,26	6,2	165,2
		2	4	8,13	6,1	162,6
		3		6,81	5,11	136,2

Tablo 4.4. 50x200x600 mm kiriş numuneler için boyut etkisi

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Kiriş No	Çentik Boyu cm	Eğilme Kuvveti kgf	Eğilme Mukavemeti (kgf/cm ²)	Eğilme Kırılma Yüğü (kgf/mm)
50x200x600 mm	C-20	1		13,3	4,99	266
		2	2	10,56	3,96	211,2
		3		8,88	3,33	177,6
		1		11,77	4,41	235,4
		2	4	13,45	5,04	269
		3		14,59	5,47	291,8
		1		11,09	4,16	221,8
		2	8	11,48	4,3	229,6
		3		10,25	3,84	205

4.3. Silindir Numuneler İçin Deney Sonuçları

Tablo 4.5. 3,75 x 7,5 cm silindir numuneler için yük ve gerilme değerleri

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Silindir No	Kırılma Yüğü kN	Basınç Değeri MPa
3,75 x 7,5 cm	C-20	1	26,86	24,27
		2	26,27	23,74
		3	25,23	22,8

Tablo 4.6. 7,5 x 15 cm silindir numuneler için yük ve gerilme değerleri

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Silindir No	Kırılma Yüğü kN	Basınç Değeri MPa
7,5 x 15 cm	C-20	1	99,59	22,54
		2	117,88	26,68
		3	146,73	33,21

Tablo 4.7. 15 x 30 cm silindir numuneler için yük ve gerilme değerleri

Numune Boyutu	Beton Sınıfı	Silindir No	Kırılma Yüğü kN	Basınç Değeri MPa
15 x 30 cm	C-20	1	678,1	38,37
		2	760,4	43,03
		3	681,9	38,59

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

C-20 betonundan yapılan küp, kiriş ve silindir numuneler olmak üzere toplamda 108 adet deney numuneleri boyut etkisi araştırmaları sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Kiriş boyutu arttıkça, taşınabilen gerilme değeri düşmüştür. Bu durum boyut etkisinin varlığını göstermektedir. Küçük numunelerde daha büyük, büyük numunelerde daha küçük gerilme değerleri oluşmuştur.
2. Küçük çentikli küçük boyutlu kirişler için, karşılanabilen gerilme büyük, derin çentikli büyük kirişler için küçüktür. Dolayısıyla boyutla orantılı olarak boyut etkisi artmıştır.
3. Silindir ve küp basınç dayanımı numune boyutuna ve şekline göre değişim göstermektedir. Bu değişimde de numune boyutunun artmasıyla mukavemetin azaldığı gözlemlenmiştir.
4. Çentikli küp numuneler, kiriş numunelere nazaran daha kompakt ve hafif olduğundan deneyleri gerçekleştirmenin daha kolay olduğu gözlemlenmiştir.
5. Boyut etkisi yönetmeliklerde göz önüne bulundurulmalıdır.
6. Silindir ve küp numunelerde gerilmeler kıyaslandığında boyut etkisinin çok net şekilde yakalanamamıştır. İleriki çalışmalarda aynı beton karışımından daha dikkatli numune hazırlama ve test etme teknikleri kullanılarak deneyler yapılması planlanmaktadır.
7. Silindir ve küp numunelerden boyut etkisine uygun sonuçlar elde edilemediği için tüm deney sonuçlarının boyut etkisi parametrelerini bulmaya yönelik toplu inceleme, grafik oluşturma ve analiz etme işlemleri bu tez kapsamında yapılmamıştır. İleriki çalışmalardan sonra bunların yapılıp yayına dönüştürülmesi düşünülmektedir.
8. Silindir ve küp numunelerde gerilmeler kıyaslandığında boyut etkisinin çok net şekilde yakalanamamış olma nedenlerinin şunlar olduğu düşünülmektedir:
 - a. Tüm numuneler kalıplara yerleştirilirken sarsma tablası değil, şişleme yöntemi kullanılmıştır. En küçük silindir ve küp

numune kalıplarına bu sebeple beton yerleşiminin iyi olmadığı düşünülmektedir.

- b. Kalıp içinde özellikle küçük numunelerde kalıplar sökülürken ve numunelerin küre götürülüp getirilme ve test cihazlarına yerleştirilme aşamalarında yeterince hassas davranılmamış olabilir.
- c. Kalan boşluklar dayanımı olumsuz etkilemiştir. Numunelerin testi aşamasında da küçük boyutlu silindir ve küp numunelerin deney düzeneği yetersizliği ve/veya test etme hatalarından dolayı düzgün sonuçlar alınamadığı düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Akkaya, Y., Bayramov, F., ve Taşdemir, M. A. (2003). Betonun kırılma mekaniği; tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağlantılar. *Türkiye mühendislik haberleri*, 426(4), 70-75.
- Akram, A. (2021). Size effect at testing strength properties of concrete. *Budownictwo i Architektura*, 20(4), 37-46.
- Almutairi, A.L., Tayeh, B.A., Adesina, A., Isleem, H.F. and Zeyad, A.M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, p.e00733.
- Arıoğlu, E., Arıoğlu, N. (2005). *Üst ve alt yapılarda beton karot deneyleri ve değerlendirilmesi*, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- Atalay, H.M., Ozden, Ş., Akpınar, E. and Erdoğan, H. (2012). *Structural precast concrete in turkey: development and earthquake performance in last decades*. In Proceedings of CENG'12 the 7th International Symposium on Civil and Environmental Engineering (p. 13).
- Aydeniz, S. (2012). *Agrega dane boyutunun beton dayanımına etkisi ve su emmesine etkilerinin araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Azandariani, M.G., Ghanbari-Ghazijahani, T., Mohebkah, A. and Classen, M. (2021). Concrete-and timber-filled tubes under axial compression–Numerical and theoretical study. *Journal of Building Engineering*, 44, 103231.
- Barlett, F.M., Macgregor, J.G (1994). Effect of core length-to-diameter ratio on concrete core strengths, *ACI Materials Journal*, 91, 4, 339-348 July-August.
- Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I., 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes. *Waste management*, 27(12), pp.1870-1876.
- Bazant Z.P., and Oh B.-H. (1983). *Crack band theory for fracture of concrete.*” Materials and Structures (RILEM, Paris), 16, 155–177.
- Bazant, Z. P. (2001). Size effect on structural strength. Handbook of Materials Behavior Models.<http://www.civil.northwestern.edu/people/bazant/PDFs/Backup%20of%20Papers/S38%20updated%202001.pdf>.
- Bazant, Z. P., ve Yu, Q. (2004). Size effect in fracture of concrete specimens and structures: new problems and progress. *Acta Polytechnica*, 44(5-6).
- Bazant, Z.P. (1976). Instability, ductility, and size effect in strain-softening concrete.” J. Engng. Mech. Div., Am. Soc. Civil Engrs., 102, EM2, 331–344; disc. 103, 357–358, 775–777, 104, 501–502.
- Bazant, Z.P. (1984). Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal. *J. of Engng. Mechanics*, ASCE, 110, 518–535.”
- Bazant, Z.P. (1996). Analysis of work-of fracture method for measuring fracture energy of concrete.” *J. of Engng. Mechanics* ASCE 122 (2), 138-144.
- Bazant, Z.P. (2002b). *Scaling of structural strength* Hermes Penton Science, London.
- Bazant, Z.P., and Novák, D. (2000a). Probabilistic nonlocal theory for quasibrittle fracture initiation and size effect. I. Theory. *J. of Engng. Mech.* ASCE 126 (2), 166–174.
- Bazant, Z.P., and Novák, D. (2000c). Energeticstatistical size effect in quasibrittle failure at crack initiation. *ACI Materials Journal* 97 (3), 381–392.

- Bažant, Z.P., and Planas, J. (1998). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Bažant, Z.P., and Rajapakse, Y.D.S., Editors (1999). Fracture scaling (Proc., ONR Workshop on Fracture Scaling, University of Maryland, College Park, June 10– 12, 1999; special issue reprinted from Int. J. of Fracture, Vol. 95, 1999), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Beremin, F.M. (1983). A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel." *Metallurgy Transactions A*, 14, 2277–2287.
- Beycioğlu, A., Başığit, C., ve Kılınçarslan, Ş. (2010). Pomza agregalı hafif beton özelliklerine silis dumanının etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(2), 200-205.
- Binal, A. (2012). Pesimum reaktif agrega içeriğinin alkali-silika reaksiyonuna etkisinin deneysel yöntemlerle araştırılması. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, 17(2).
- Binici, H., Çağatay, İ. H., ve Kaplan, H. (2000). Değişik faktörlerin beton mukevemetine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(3), 203-209.
- Brower, L. E., ve Ferraris, C. F. (2003). Comparison of concrete rheometers. *Concrete International*, 25(8), 41-47.
- Bungey, J.H. and Grantham, M.G. (2006). *Testing of concrete in structures*. Crc Press.
- Carpinteri, A., ed. (1996). "Size-scale effects in the failure mechanisms of materials and structures", Proceedings of the International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM) Symposium on Size-Scale Effects in the Failure Mechanisms of Materials and Structures, E ve FN Spon, London.
- Carrasquillo, R.L., Carrasquillo, P.M. (1988). Evaluation of the use of current concrete practise in the production of high strength concrete, *ACI Material Journal* , 85, 1 , 49-54.
- Cengiz, A. (2015). *İnşaat endüstrisine yönelik doğal elyaf katkılı kompozit malzemelerin hazırlanması*. (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı.
- Chandran K. S.R., Galyon Dorman S. (2021). The nature of specimen-size-effect on fatigue crack growth and net-section fracture mechanics approach to extract the size-independent behavior. *International Journal of Fatigue*, 145(2), 2021.
- Chen, J., Chan, T.M. and Chung, K.F. (2021). Design of square and rectangular CFST cross-sectional capacities in compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106419.
- Chin, M.S., Mansur, M.A., Wee, T.H. (1997). Effects of shape, size and casting direction of specimens on stress-strain curves of high strength concrete, *ACI Material Journal*, 94, 3 , 209-219.
- Connolly, N.D. (2014). *A world more concrete*. In A World More Concrete. University of Chicago Press.
- Demir, İ. (2009). Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 1(2), 1-7.
- Demirel, B., ve Yazıcıoğlu, S. (2007). Silis dumanının karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özelliklerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 103-109.
- Dobry, J., Wolfger, H. and Benko, V. (2022). Reliability of slender concrete columns designed according to the Eurocodes. *Engineering Structures*, 265, p.114266.

- Doğan Ü.A., 2000. *Yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların harç ve beton özelliklerine etkisi*, (Yüksek Lisans Tezi). İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğangün, A. (2017). *Betonarme yapıların hesap ve tasarımı*, 15. Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Duan, K., and Hu, X.Z. (2003). Scaling of quasibrittle fracture: Boundary effect. submitted to Engineering Fracture Mechanics.
- Duan, L.X., Wang, W.D., Xian, W. and Shi, Y.L. (2022). Shear response of circular-in-square CFDST members: Experimental investigation and finite element analysis. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107160.
- Dubuc, E.J. (2006). August. Concrete quasitopoi. In Applications of Sheaves: Proceedings of the Research Symposium on Applications of Sheaf Theory to Logic, Algebra, and Analysis, Durham, July 9–21, 1977 (pp. 239-254). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Emir Hazır Beton (2022). Tarihçe. <https://www.emirbeton.com.tr/tr/tarih%C3%A7e~12>.
- Ersoy, U. (2000). *Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı*, ODTÜ, Evrim Yayınları, Ankara, 18-24.
- Essam E. (2009). Behavior of heavy weight concrete under impact effect 13th İnternation conference on Assat 13 CV-23. EGYPT.
- Fan, J.H., Wang, W.D., Shi, Y.L. and Ji, S.H. (2022). Torsional behaviour of tapered CFDST members with large void ratio. *Journal of Building Engineering*, 52, p.104434.
- Fantilli, A. P., Iori, I., ve Vallini, P. (2007). Size effect of compressed concrete in four point bending RC beams. *Engineering fracture mechanics*, 74(1-2), 97-108.
- Forty, A. (2013). *Concrete and culture: a material history*. Reaktion Books.
- Fuchs, W., Eligehausen, R. and Breen, J.E. (1995). Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete. *Structural Journal*, 92(1), pp.73-94.
- Göktaş, Y. (2019). *Normal dayanımlı betonların kalitesinin istatistiksel olarak incelenmesi ve yeni bir malzeme katsayısının önerilmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Haris, H.G., Sabnis, G.M. (1999). Structural modelling and experimental techniques, CRC Pres Second Edition, 415-433.
- Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6, 773–782
- Hu, H.S., Lin, K., Shahrooz, B.M. and Guo, Z.X. (2021). Revisiting the composite action in axially loaded circular CFST columns through direct measurement of load components. *Engineering Structures*, 235, 112066.
- Hu, Y., Cao, X., Xie, Y., Feng, C., Wang, S. and Zhang, W. (2021). The inspection and strength checking of old circular prestressed reinforced concrete pole. In E3S Web of Conferences (Vol. 252, p. 03033). EDP Sciences.
- Huang, Y., Yang, J., Feng, R. and Chen, H. (2022). Resistance of cold-formed sorbite stainless steel circular tubes under uniaxial compression. *Thin-Walled Structures*, 179, 109739.
- Huynh, V.H., Nguyen, T., Nguyen, D.P., Nguyen, T.S. and Nguyen, T.C. (2022). A novel direct SPT method to accurately estimate ultimate axial bearing capacity of bored PHC nodular piles with 81 case studies in Vietnam. *Soils and Foundations*, 62(4), 101163.

- Issa, S.A., Islam, Md.S., Issa, M.A., Yousif, A.A, Issa, Mohsen, A. (2000). Specimen and aggregate size effect on concrete compressive strength, cement. *Concrete and Aggregates* , 22 , 2 , 103-115.
- Jin, L., Li, J., Yu, W., & Du, X. (2021). Mesoscopic simulations on the strength and size effect of concrete under biaxial loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 253, 107870.
- Jin, L., Yu, W., & Du, X. (2020). Size effect on static splitting tensile strength of concrete: Experimental and numerical studies. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10), 04020308.
- Jin, L., Yu, W., Du, X., & Yang, W. (2019). Dynamic size effect of concrete under tension: A numerical study. *International Journal of Impact Engineering*, 132, 103318.
- Jin, L., Yu, W., Li, D., & Du, X. (2021). Numerical and theoretical investigation on the size effect of concrete compressive strength considering the maximum aggregate size. *International Journal of Mechanical Sciences*, 192, 106130.
- Jose, J.P.A., Al Khazaleh, M., Prakash, F. and Raj, F.M. (2023). Experimental study of reinforced concrete piles wrapped with fibre reinforced polymer under vertical load. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 28.
- Kandil, U. (2014). *Uçucu kül ve silis dumanı içeren betonların geçirimsizlik özelliklerinin araştırılması* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kantar, E., Arslan, A. and Anıl, Ö. (2011). Effect of concrete compressive strength variation on impact behaviour, *J.Fac.Eng.Arch.Gazi Univ.* 26, 115-123.
- Khoury, G.A., Majorana, C.E., Pesavento, F. and Schrefler, B.A. (2002). Modelling of heated concrete. *Magazine of concrete research*, 54(2), 77-101.
- Kıvanç, H. (2006). *Süper akışkanlaştırıcı katkıların sualtı betonu özelliklerine etkisi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kosaiyakanon, N. and Pisitpaibool, C. (2022). Behaviors of precast reinforced concrete drainage pipes under static load using finite element model.
- Köken, A., Köroğlu, M.A. And Yonar, F. (2008). Atık betonların beton agregası olarak kullanılabilirliği. *Selcuk University Journal of Engineering Sciences*, 7(1), pp.86-97.
- Lei, Y., O'Dowd, N.P., Busso, E.P., and Webster, G.A. (1998). Weibull stress solutions for 2-D cracks in elastic and elastic-plastic materials. *Int. J. of Fracture* 89, 245-268.
- Leicester, R.H. (1969). The size effect of notches", *Proc., 2nd Australasian Conf. on Mech. of Struct. Mater., Melbourne*, pp. 4.1-4.20.
- Lessard, M., Chaallal, O., Aitcin, P.C. (1993). Testing High Strength Concrete Compressive Strength, *ACI Materials Journal* , 90, 4 , 303-308.
- Li, Z., Zhou, X., Ma, H. and Hou, D. (2022). *Advanced concrete technology*. John Wiley ve Sons.
- Liu J, Wenxuan Y, Xiuli D, Wangxian Y. (2019). Mesoscopic numerical simulation of dynamic size effect on the splitting-tensile strength of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 209, 317-332.
- Liu, J., Wenxuan, Y., Xiuli, D. U., ZHANG, S., & Dong, L. I. (2019). Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 125, 1-12.
- Lu, Y., Abuel-Naga, H., Shaia, H.A. and Shang, Z. (2022). Preliminary study on the behaviour of fibre-reinforced polymer piles in sandy soils. *Buildings*, 12(8), 1144.

- Lukkarila, M. (2022). Concrete petrography gives a grander view. <https://www.betonconsultingeng.com/concrete-petrography-grander-view/>.
- Luo, C., Ren, X., Han, D., Zhang, X.G., Zhong, R., Zhang, X.Y. and Xie, Y.M. (2022). A novel concrete-filled auxetic tube composite structure: Design and compressive characteristic study. *Engineering Structures*, 268, 14759.
- Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A. (2003). *Non-linear mechanics of reinforced concrete*. CRC Press.
- Mather, B. (2004). Concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 3-4.
- Mehta, P.K. (2009). Global concrete industry sustainability. *Concrete international*, 31(2), 45-48.
- Mehta, P.K. and Monteiro, P.J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and concrete composites*, 31(8), 601-605.
- Monteiro, P.J., Miller, S.A. and Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature materials*, 16(7), 698-699.
- Müller, H.S. and Wiens, U. (2016). Beton. Beton-Kalender 2016: Beton im Hochbau Silos und Behälter, 1-168.
- Naaman A. E. (2006). Reinforced concrete: Encyclopedia of Materials: Science and Technology. 8095–8110.
- Naik, T.R. (2008). Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(2), 98-103.
- Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15.
- Özcan, F., ve Atiş, C. D. (2017). Silis dumanı ile üretilen harçların karbonatlaşma ve rötre özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 634-641.
- Özkul, M.H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M. (1999). Her yönüyle beton, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Petersson, P.E. (1981). Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. Report TVBM-1006, Div. of Building Materials, Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden.
- Pirooznia, A., & Moradloo, A. (2020). Investigation of size effect and smeared crack models in ordinary and dam concrete fracture tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 226, 106863.
- Planas, J. and Elices, M. (1988). *Conceptual and experimental problems in the determination of the fracture energy of concrete*. Proc. Int. Workshop on "Fracture Toughness and Fracture Energy, Test Methods for Concrete and Rock, Tohoku Univ., Sendai, Japan, 203-212.
- Planas, J. and Elices, M. (1989). In cracking and damage, ed. by J. Mazars and Z.P. Bažant, Elsevier, London.
- Planas, J. and Elices, M. (1993). Drying shrinkage effects on the modulus of rupture." Creep and Shrinkage of Concrete (Proc., 5th Int. RILEM Symp., Barcelona), Z.P. Bažant, and I. Carol, eds., EveFN Spon, London.
- Qu, C. (2009). The plastic limit stability analogy between centrifugal concreted-filled steel tubes and cylindrical shells with spiral stiffeners under torsion. In 2009 Second

- International Conference on Information and Computing Science (Vol. 4, pp. 194-197). IEEE.
- Rahimov, A.M. and Muminov, K.K. (2022). Concrete heat treatment methods. *Czech Journal of Multidisciplinary Innovations*, 10, 4-14.
- Rashid, M.A., Mansur, M.A., Paramasiam, P. (2002). Correlation between Mechanical Properties of High Strength Concrete, *Journal Material Civil Engineering* , 14, 3 , 230-238.
- RILEM Committee QFS. (2004). Quasibrittle fracture scaling and size effect. *Mater. Struct.*, 37(272), 547-586.
- Rodgers Jr, T.E. (1984). Prestressed concrete poles: state-of-the-art. *PCI Journal*, 29(5), 52-103.
- Rodriguez-Camacho, R.E. and Uribe-Afif, R. (2002). Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. *Cement and concrete research*, 32(12), 1851-1858.
- Rong, H., Dong, W., Zhang, X., & Zhang, B. (2019). Size effect on fracture properties of concrete after sustained loading. *Materials and Structures*, 52, 1-12.
- Ruggieri, C., and Dodds, R.H. (1996). Transferability model for brittle fracture including constraint and ductile tearing effects—a probabilistic approach. *Int. J. of Fracture* 79, 309–340.
- Sabnis, G. M., ve Aroni, S. (1971). Size effect in material systems-The state of the art. In Proceedings of the Southampton 1969 civil engineering materials conference. Southampton (131-42).
- Sanchez, F. and Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete—a review. *Construction and building materials*, 24(11), 2060-2071.
- Selvi, M. (2008). *Beton dayanımındaki değişimin çarpma dayanımına olan etkisinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü.
- Shcherban, E., Prokopov, A.Y., Stel'makh, S. and Shuyskiy, A.I. (2020). Effect of disperse reinforcement on the structural quality factor of vibrated and centrifuged concretes on the combined aggregate. In Materials Science Forum (Vol. 974, pp. 283-287). Trans Tech Publications Ltd.
- Sneddon, C. (2015). *Concrete revolution*. In Concrete Revolution. University of Chicago Press.
- Sonebi M., Khayat K.H. (2001). Effect of mixture composition on relative strength of highly flowable underwater concrete, *ACI Materials Journal*, 98, 233-239
- Soroka, I., Baum, H. (1994). Influence of specimen size on effect of curing regime on concrete compressive strength, *Journal of Materials in Civil Engineering* , 6, 1,15-22.
- Suchorzewski J, Tejchman J, Nitka M. (2018). Experimental and numerical investigations of concrete behaviour at meso-level during quasi-static splitting tension. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96, 720-739.
- Suchorzewski, J., Tejchman, J., Nitka, M., & Bobiński, J. (2019). Meso-scale analyses of size effect in brittle materials using DEM. *Granular Matter*, 21, 1-19.
- Sun, X. (2022). The performance of self-compacting recycled concrete short column of steel tube for construction. *International Journal of Materials and Product Technology*, 64(3-4), 278-291.
- Syverson, C. (2004). Market structure and productivity: A concrete example. *Journal of political Economy*, 112(6), 1181-1222.

- Şener, S. (1997). Size effect tests of high strength concrete, *Journals of Materials in Civil Engineering* , 9(1), 46-48.
- Tang, Q., Ma, Z., Wu, H. and Wang, W. (2020). The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 114, 103807.
- Tang, S.W., Yao, Y., Andrade, C. and Li, Z.J. (2015). Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, 78, 143-154.
- Tanigawa, Y., Yamada, K., 1978. Size Effect in Compressive Strength of Concrete. *Cement and Concrete Research* , 8, 181-190.
- Thomas, T.H. (2017). *Unified Theory of Reinforced Concrete*. Routledge.
- Tokay, M., Özdemir, M. (1997). Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 27 , 8, 1281-1289.
- Tran, V.Q., Dang, V.Q. and Ho, L.S. (2022). Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach. *Construction and Building Materials*, 323, 126578.
- Türkel, A. (2006). *Betonun basınç dayanımına numune boyutunun etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Walsh, P.F. (1976). Crack initiation in plain concrete. *Magazine of Concrete Research* 28 37-41.
- Wang, Q., Liu, R., Liu, P., Liu, C., Sun, L. and Zhang, H. (2022). Effects of silica fume on the abrasion resistance of low-heat Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 329, 27165.
- Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N. and Flatt, R. (2016). Digital concrete: opportunities and challenges. *RILEM Technical Letters*, 1, 67-75.
- Wangler, T., Roussel, N., Bos, F.P., Salet, T.A. and Flatt, R.J. (2019). Digital concrete: a review. *Cement and Concrete Research*, 123, 105780.
- Wight, J.K. and MacGregor, J.G. (2016). *Reinforced concrete*. Pearson Education UK.
- Yaman, İ.Ö. and Ceylan, H. (2013). *Silindirle sıkıştırılmış beton yollar*. Beton 2013 Hazır Beton Kongresi, 21-23.
- Yan, X.F., Hassanein, M.F., Wang, F. and He, M.N. (2021). Behaviour and design of high-strength concrete-filled rectangular ferritic stainless steel tubular (CFFSST) short columns subjected to axial compression. *Engineering Structures*, 242, 12611.
- Yang, X., Zhang, Z., Zhu, Y., Ma, W., Chen, J. and Li, D. (2023). Dynamic responses and residual capacity of high-strength CFST members subjected to axial impact. *Journal of Constructional Steel Research*, 202, 107800.
- Yavuz, E. (1995). *Betondaki boyut etkisinin bileşimle ilgisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Zhang, C., Nerella, V.N., Krishna, A., Wang, S., Zhang, Y., Mechtcherine, V. and Banthia, N. (2021). Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104155.
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., Yang, J., & Wang, H. (2021). Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121074.

- Zheng, J.J, Li, C.Q., Zhao, L.Y. (2003). Simulation of two-dimensional aggregate distribution with wall effect, *Journals of Materials in Civil Engineering* , 15 , 5 , 506-510.
- Zhong W, Pan J, Wang J, Zhang C. (2020). Size effect in dynamic splitting tensile strength of concrete: Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 270(3), 2020.
- Zhong, W., Pan, J., Wang, J., & Zhang, C. (2021). Size effect in dynamic splitting tensile strength of concrete: Experimental investigation. *Construction and Building Materials*, 270, 121449.
- Zhu R. (2018). Scale and aggregate size effects on concrete fracture: experimental investigation and discrete element modelling, Civil Engineering, Écolecentrale de Nantes.



ÖZ GEÇMİŞ

Samet ÖZTÜRK, Erbaa Coşkun Önder Lisesi ‘ ni bitirdikten sonra Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat ve Makine Mühendisliği bölümünden 2011 tarihinde mezun oldu. 2012 yılında OMÜ LEE İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans programına girdi. Mezuniyetinden bu yana Erbaa Belediyesi ‘nde görev yapan Samet ÖZTÜRK, orta derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0009-0003-3765-6353

Yayınlar:

1. Koç V., Öztürk S. 2023, Size Effect On Notched Concrete Beam Samples, 9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi , pp. 310-320.
2. Koç V., Öztürk S. 2023, Size Effect On Notched Concrete Cube Samples, 9. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi , pp.321-331.

Kazanılan Ödüller, Teşvikler ve Burslar

1. 2020 Türkiye Belediyeler Birliği Bisikletli Ulaşım Fikir ve Proje Uygulama Yarışmasında “ Çevre Dostu Kent Erbaa Projesi ” adı altında ödül kazanıldı.