

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONUN KÜP YARMADA ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE
MALZEME VE BOYUT ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mehmet Esen EREN
(07115101)

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği
Programı: Yapı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ragıp İNCE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Ağustos 2010

AĞUSTOS-2010

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BETONUN KÜP YARMADA ÇEKME DAYANIMI ÜZERİNE
MALZEME VE BOYUT ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Mehmet Esen EREN
(07115101)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Temmuz 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ağustos 2010

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ragıp İNCE (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ali Sayıl ERDOĞAN (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Erdiñ ARICI (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Fahri ÖZKAN (F.Ü)

AĞUSTOS-2010

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, her türlü olanağı sağlayan, her zaman örnek aldığım değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ragıp İNCE'YE,

Çalışmaya başladığım günden beri desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, sevgili hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali Sayıl ERDOĞAN'A ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Kürşad Esat ALYAMAÇ'A,

Deneysel aşamada tecrübesiyle büyük katkıda bulunan İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvar Teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'E,

Her zaman benimle birlikte olan, çalışma ve azmini takdir ettiğim, arkadaşlığı ve meslektaşlığı ile son derece şanslı insanlardan biri olarak kendimi hissettiğim sevgili arkadaşım Necim KAYA'YA,

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan, çalışmam süresince beni destekleyen, bana inanan, akademik yaşamın zorluklarına rağmen beni her zaman cesaretlendiren ve maddi-manevi yardımlarını esirgemeyen sevgili aileme, dostlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Esen EREN

Elazığ - 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	III
SUMMARY	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Betonda Kırılma Mekanîği ve Boyut Etkisi	5
1.1.1. Kırılma Mekanîği Yaklaşımı	7
1.1.2. Betonda Boyut Etkisi	9
1.1.3. Lineer Elastik Kırılma Mekanîği	10
1.1.4. Betonun Lineer Olmayan Kırılma Mekanîği	11
1.1.5. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu	12
1.1.6. Kırılma Mekanîğinde Yarma Deneyleri	14
2. MATERYAL ve METOT.....	19
2.1. Yükleme – Malzeme Analizi	19
2.1.1. Deneyde Kullanılan Malzeme Özellikleri	20
2.1.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları	20
2.1.3. Deneyin Yapılışı	25
2.2. Boyut Etkisi – Malzeme Analizi	27
2.2.1. Deneyde Kullanılacak Malzeme Özellikleri	27
2.2.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları	27
2.2.3. Deneyin Yapılışı	30
3. BULGULAR	31
3.1. Yükleme – Malzeme Deneyi Sonuçları	31
3.2. Boyut Etkisi – Malzeme Deneyi Sonuçları	34
3.2.1. $\beta=0.1$ için Numunelerin BEK' ya Göre Formülasyon ve Grafikleri	37
3.2.2. $\beta=0.1$ için Numunelerin BEK' ya Göre Formülasyon ve Grafikleri	41
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	45
5. KAYNAKLAR	46
ÖZGEÇMİŞ	51

ÖZET

Betonun çekme dayanımı değerinin tayini için kullandığımız yöntemlerden birisi yarma deneyleridir. Yarma deneylerinde, betonun malzeme ve boyut etkisi deney sonuçlarını önemli ölçüde etkiler. Betonun silindir-yarma deneyi üzerine literatürde birçok çalışma mevcutken, küp-yarma deneyi ile ilgili yapılan çalışmalar yetersiz düzeydedir. Sunulan bu tez çalışmasında, betonun küp yarmada çekme dayanımı üzerine malzeme ve boyut etkisi ile özellikle betonun basınç mukavemeti arasında istatistiksel tabanlı ilişkiler kurulması hedeflenmiştir. Betonun mekanik mukavemet değerleri; agreganın tipine, maksimum agrega çapına, su-çimento oranına, yarma - çekme mukavemeti ise; numunenin boyutlarına, yükleme şeridinin genişliğinin numune boyutlarına oranına, yükleme şeridinin kalınlığına ve yükleme şeridinin malzemesin bağlıdır. Bununla birlikte beton numunenin boyutu arttıkça mekanik mukavemet değerlerinde düşüşler gözlenmektedir, bu betonun kırılma mekaniğinde boyut etkisidir. Bunların hepsi göz önüne alınarak birinci aşamada, betonun yarmada çekme dayanımı için, sadece malzeme parametrelerini baz alan dizayn kriterlerinin ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu deneyler için farklı dane çapı aralığına sahip agregalar hazırlanmıştır. d_{max} 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 32 mm olmak üzere 4 farklı grupta seriler oluşturulmuştur. Bu oluşturulan serilerden her birinden 9 adet (150x150x150 mm) küp numuneler hazırlanmıştır. Numunelerde çimento olarak CEM I 42,5 N kullanılmıştır. İkinci aşamada ise maksimum agrega çapı 4, 8, 16 mm olan beton karışımlarla 50, 100 ve 200 mm lik numuneler üzerinde betonun küp-yarmada çekme dayanımında Boyut Etkisi Kuralı ve Değiştirilmiş Boyut Etkisi Kuralı yaklaşımlarına göre inceleme yapılmıştır. Bu deneyler için farklı tip kalıplar hazırlanmış ve kullanılmıştır. Elde edilen deneysel çalışmaların sonucunda, betonun küp yarmada çekme dayanımının malzeme ve boyut etkisi ile değiştiği gözlemlendi ve sonuçlar tablolar haline getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, Yarma Deneyi, Boyut Etkisi, Boyut Etkisi Kuralı, Betonun Çekme Dayanımı.

SUMMARY

Material and Size Effect on Tensile Strength in Cube Brazilian Splitting of Concrete

One of our using methods to find tensile strength of concrete is Brazilian Splitting Test. In split tests, material and size effect of concrete effect test's results significantly. Although studies are available about split-sylindric test of concrete in literatures, studies are not enough about split-cubic test. It is aimed to make connections between the material and size effect on the tensile strength of concrete on cubic splitting and especially on the strength of pressure which are based on statistics. Mechanical strength results of concrete are related to the type of aggregate, the maximum diameter of aggregate, and the water/cement ratio; and the splitting tensile strength is related to the size of piecement, the ratio of the width of bearing split to the size of piecement, the thickness of the bearing strip, and material of the bearing strip. In addition to this, decreases in mechanical strength results are observed with every increase on the size of piecement of concrete, and this is the size effect of concrete in fracture mechanic. When all of these are taken into consideration, on the first step, for the strength of concrete on split-cubic, it is aimed to show the design criteria, which are only based on material parameters. Aggregate having different intervals of diameters are prepared for these experiments. Series, which have $d_{\max}=4\text{mm}$, 8mm, 16mm and 32mm are prepared in four different groups. From each of these series, nine cubic piecements (150x150x150mm) are prepared. CEM I 42,5 N is used as cement in piecements. On the second step, with concrete mixtures having the maximum aggregate diameter of 4, 8, 16 mm; a research was made on 50, 100, 200 mm piecements according to The Size Effect Law and Modified Size Effect Law approaches on the strength of concrete on split-cubic test. Several types of molds are prepared and used for these experiments. As a result of experimental studies, a change on the strength of concrete on split-cubic by the effect of material and size effect is observed and results are shown on tables.

Keywords: Concrete, Splitting Test, Size Effect, Size Effect Law, Tensile Strength of Concrete.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Beton ve içerdiği materyallerin yükleme-gerilme grafiği	5
Şekil 1.2. Kohezif kırık ve parabolik eğri	8
Şekil 1.3. Farklı materyallerin kırılma süreci	12
Şekil 1.4. Fraktal boyut etkisi kanunu logaritmik diyagram	13
Şekil 1.5. Silindirik ve kübik numuneler	16
Şekil 1.6. Elastisite teorisine göre yük taşıyan çubukların rölatif genişliği ile yarma gerilme mukavemetinin değişmesi	17
Şekil 2.1. Plastik küp beton kalıbı	20
Şekil 2.2. Numunelerin üzerine çubukların yerleşimi	26
Şekil 2.3. Numunelerin yüklenmesi ve kayıt anı	26
Şekil 3.1. $\beta=t/d$ oranına göre betonun yarmada-çekme mukavemetinin değişimi	33
Şekil 3.2. Tablo 3.5.'deki veriler ile oluşturulan grafik	37
Şekil 3.3. Tablo 3.5.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	37
Şekil 3.4. Tablo 3.7.'deki veriler ile oluşturulan grafik	38
Şekil 3.5. Tablo 3.7.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	38
Şekil 3.6. Tablo 3.9.'deki veriler ile oluşturulan grafik	39
Şekil 3.7. Tablo 3.9.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	39
Şekil 3.8. $\beta=0.10$ için BEK sonuçlarının eğrisi	40
Şekil 3.9. Tablo 3.6.'deki veriler ile oluşturulan grafik	41
Şekil 3.10. Tablo 3.6.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	41
Şekil 3.11. Tablo 3.8.'deki veriler ile oluşturulan grafik	42
Şekil 3.12. Tablo 3.8.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	42
Şekil 3.13. Tablo 3.10.'deki veriler ile oluşturulan grafik	43
Şekil 3.14. Tablo 3.10.'deki veriler ile oluşturulan logaritmik eğri grafiği	43
Şekil 3.15. $\beta=0.16$ için BEK sonuçlarının eğrisi	44

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. PKÇ 42.5 R Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri	20
Tablo 2.2. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı	21
Tablo 2.3. $d_{\max} = 8$ mm için beton karışım hesabı	22
Tablo 2.4. $d_{\max} = 16$ mm için beton karışım hesabı	23
Tablo 2.5. $d_{\max} = 32$ mm için beton karışım hesabı	25
Tablo 2.6. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı	28
Tablo 2.7. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı	29
Tablo 2.8. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı	30
Tablo 3.1. $d_{\max} = 4$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları	31
Tablo 3.2. $d_{\max} = 8$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları	31
Tablo 3.3. $d_{\max} = 16$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları	32
Tablo 3.4. $d_{\max} = 32$ mm'lik Küp numunelerin deney sonuçları	32
Tablo 3.5. $d_{\max} = 4$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları	34
Tablo 3.6. $d_{\max} = 4$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları	34
Tablo 3.7. $d_{\max} = 8$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları	35
Tablo 3.8. $d_{\max} = 8$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları	35
Tablo 3.9. $d_{\max} = 16$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları	36
Tablo 3.10. $d_{\max} = 16$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları	36

SEMBOLLER LİSTESİ

a_o	: Yarı çentik uzunluğudur
b	: İki boyutlu numunenin kalınlığı
β	: Gevreklik sayısı ve numune genişliğinin numune boyutuna oranı
c_n	: Numune geometrisine bağlı bir sabit
d	: Karakteristik boyut
D	: Kesitin fraktal boyutu
E	: Elastisite modülü
f_c	: Nominal dayanım
f_{st}	: Yarma gerilme mukavemeti
f_t	: Tek eksenli çekme dayanımı
G_c	: Çatlak yayılma hızı
G_F	: Kırılma enerjisi
σ	: Gerilme
σ_y	: Malzemenin akma dayanımı
$\sigma_{max,P}$	: Numunenin maksimum gerilme mukavemeti
σ_N	: Nominal gerilme
K	: Gerilme şiddet çarpanı
l_{ch}	: Karakteristik boy
P_U	: Maksimum yük
r_p	: Kırılma süreci bölgesinin uzunluğu
t	: Kayma gerilmesi
$\square$	: Poisson sabiti
w	: Açık kırık

KISALTMALAR LİSTESİ

LEKM	: Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
KS_{İc}	: Gerilme Şiddet Çarpanının Kritik Değeri
CTOD_c	: Çatlak Ucu Açılma Deplasmanının Kritik Değeri
BEK	: Boyut Etkisi Kanunu
FPZ	: Kırık Geçiş Bölgesi
ÇUAD	: Çatlak Ucu Açılım Deplasmanı

1.GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde, yapıların deprem davranışlarının belirlenmesinde doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılabilir hale gelmiştir. Bu analizler, yapıların doğrusal olmayan davranışı hakkında fikir vermektedir. Doğrusal olmayan statik analiz yöntemleri temel olarak, yapının yatay kuvvet dayanımını temsil eden yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin, malzeme ve geometri değişimi bakımından doğrusal olmayan teoriye göre elde edilmesine ve bunun çeşitli parametrelere göre değerlendirilmesine dayanmaktadır. İtme eğrisi olarak isimlendirilen yatay kuvvet-yer değiştirme ilişkisinin elde edilmesi sayesinde, yapının zayıf elemanları ve bu elemanların zayıf bölgeleri, olabilecek kısmi ve toptan göçme mekanizma durumları, tüm yapının ve elemanların şekil değiştirme talepleri belirlenebilmektedir. Ayrıca, belirli bir deprem seviyesi için yapıdan istenen performans hedefinin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği kontrol edilebilmektedir. Günümüzde bu analizler için genellikle gelişen bilgisayar teknolojilerinden yararlanılmaktadır. Ancak bu bir takım sorunları da beraberinde getirmiştir. Gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak bir çok hazır program ile yapıların doğrusal olmayan davranışları hesaplara dahil edilebilse de yeterli yapısal bilgi birikimine sahip olmayan mühendisler sadece bilgisayar programı sonuçlarına göre hareket ederek istenmeyen durumların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [1].

Beton inşaat mühendisliğinde en yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Bundan dolayı betonun mekanik davranışının yeterince anlaşılmasının önemi günden güne artmaktadır. Günümüzde, betonda çatlak başlaması ve yayılması hakkında yeterli bilgiye sahip olmak ve betonun kırılmasını modellemek önem kazanmaktadır. Betonun özellikle barajlar, nükleer reaktörler, yüksek katlı binalar ve savunma amaçlı yapılarda kullanılması bu malzemenin çatlama davranışının incelenmesine olan ilgiyi arttırmıştır. Son otuz yılda betonun kırılma parametrelerinin saptanmasına yönelik çok sayıda çalışma yapılmasına karşın, gerilme şiddet çarpanı veya kırılma enerjisi gibi parametreler betonun projelendirilmesinde kullanılmamıştır. Çünkü beton gibi heterojen bir malzemede bu parametrelerin boyuta bağlı olduğu belirlenmiştir [2].

Uygulamada beton tasarımı basınç dayanım ilkesine göre yapılır. Böyle bir yaklaşımda beton gevrekliği ihmal edilmektedir. Betonun kırılma parametreleri ile gevrekliğinin saptanması için bugüne dek yapılan çalışmalarda kırılma mekanizmasına dayanan bazı modeller geliştirilmiştir. Bunlar, *i)* Fiktif Çatlak Modeli [3], *ii)* Boyut Etkisi Kuralı [4], *iii)*

İki Parametrelili Model [5] ve iv)Etkin Çatlak Modeli [6,7]. İlk üç model Rilem [8] tarafından da önerilmiştir. Her bir model beton gevrekliğinin bir ölçüsünü verir. Özellikle Fiktif Çatlak Modeli'ndeki karakteristik boy hem beton yapıların sayısal analizinde hem de yeni çimento kompozitlerinin tasarımında bir mikro yapısal gevreklik sayısı sağlayarak başarılı bir biçimde kullanılmaktadır. Karakteristik boy (l_{ch}), Elastisite Modülü (E), kırılma enerjisi (G_F) ve tek eksenli çekme dayanımı (f_t) cinsinden ifade edilmektedir, böylece $l_{ch}=EG_F / f_t^2$ olarak yazılır [9]. Fiktif Çatlak Modeli'ne göre G_F , orta noktasından yüklenen kiriş numunelerde yük-deplasman eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenir. Boyut Etkisi Kuralı'nda en az üç farklı boyutta kiriş numuneler deneye tabi tutulur ve sadece tepe yükleri ölçülür [10]. İki Parametrelili Model'de ise, betonun kırılmasını tanımlayabilmek için en az iki parametre gerekmektedir. Bu parametreler gerilme şiddet çarpanının kritik değeri (KS_{ic}) ve çatlak ucu açılma deplasmanının kritik değeri ($CTOD_c$)'dir. Bu modelde de yine kiriş numuneler önerilmiştir. İki Parametrelili Model'e ait kırılma parametrelerini belirleyebilmek için, son zamanlarda, sadece tepe yüküne gereksinim duyan ve sonlu elemanlar metoduna dayanan basit bir yöntem geliştirilmiştir [11-13].

İnşaat mühendisliğinde geçmişten günümüze birçok yapı malzemesi kullanılmıştır, bunlardan en çok önem taşıyan ve günümüzde halen en önemli yer tutan ise betondur. Standartlarca kullanım alanına göre belirli kurallara bağlanılsa dahi betonun yapısı heterojen olduğundan boyutlandırma sırasında belirli standartların uygulanmasında problemler yaşanmaktadır. Bu nedenle kesin kurallar oluşturulamamaktadır.

Dizayn şartnamelerinde belirtildiği üzere laboratuvar çalışmalarında boyutlandırma işleminde basınç kırılmadan uzak kalınması gerekliliği, bu alanda yapılan çalışmaların kapsamını büyük ölçüde daraltmıştır. Oysaki mühendislik alanında önemli çalışmalar için olumlu yada olumsuz bütün koşulların araştırılıp buna göre tasarımların yapılması gerekmektedir.

Betondaki çatlakların yayılmacı bir şekilde oluşması ve göçme durumunun boyuta bağlı olarak şekillenmesinden dolayı etkin dizaynlar yapmak güç olmasına rağmen kırılma mekaniği prensipleriyle bu sorunu çözmek için daha uygun yaklaşımlar oluşturulabilir.

Malzemede ki gerilme yoğunluğunu artıran çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yoğunluğunu artıran kusurları ve bunlara bağlı oluşan hasarları kırılma mekaniği araştırır [14]. Gerilme yada sıkıştırma esnasında malzemelerin kırılmasını yönlendiren iki ana kriter yükleme ve enerji kriterleridir. Yükleme kriteri çatlak çevresinde gelişen lokal yükleme

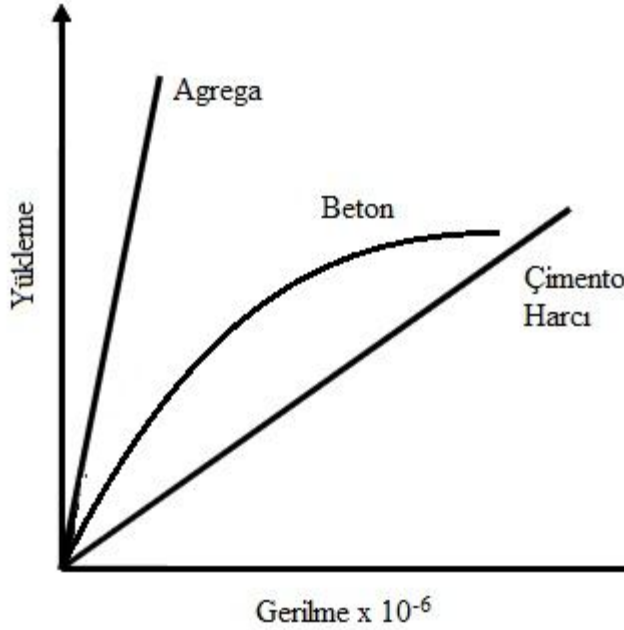
gerilmesi malzemenin kohezif yüklemesinin üstesinden gelmesi için yeterli olmalıdır. Enerji kriteri, bir kırığın yayılması için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır. Bu iki kriter herhangi bir materyalin kırılma davranışını açıklamasına rağmen tüketilen enerji miktarının belirlenmesi ve özel sınırlandırılmış durumlarda kırılma boyunca oluşan yüklemenin doğru olarak nasıl hesaplanması gerektiğini gösterir [15]. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) ilk defa 1950’li yıllarda betona uygulanmaya başlanmıştır. Her ne kadar bir çok çözümde katkıda bulunsa dahi betonda ki neme ve zamana bağlı olarak mekanik sabitlerin değişmesi ve yapısal kusurlardan meydana gelen boyut etkisi LEKM kanunlarının yetersiz kaldığını göstermiştir [16]. Çatlamış bir beton kesitte gerilme transferini mümkün kılan bir kırılma süreci bölgesi vardır. Bu bölgedeki gerilmeler, metallerdeki plastik bölge gibi sabit kalmayıp azalmaktadır [3]. Bu gerilmede ki düşüşün sebebini ise boyut etkisi ile açıklayabiliriz [17]. Son yıllarda, yapıların çökme yüklerinin ve malzeme kırılma parametrelerinin belirlenmesi için kırılma mekaniğinin boyut etkisi hakkında çalışmalar yapılmaktadır [18]. Beton numunenin boyutu arttıkça mekanik mukavemet değerlerinde düşüşler gözlenmektedir. Buna betonun kırılma mekaniğinde boyut etkisi adı verilir [19]. Maksimum yükte çatlağın ilerlemesi sonucu serbest kalan şekil değiştirme enerjisi ile çatlamış beton yüzey tarafından absorbe edilen enerji arasındaki basit denge bağıntısını boyut analizi yardımı ile kurarak kendi adı ile anılan, Boyut Etkisi Kanunu (BEK) geliştirmiştir. Lineer olmayan kırılma mekaniğinin temeli olarak kabul edilen bu kanun, son yıllarda yapılan araştırmalar ve özellikle de silindir yarma deneyine ait sonuçlar, teoremin limit durumda ki davranışlarındaki eksiklikleri ortaya koymuştur [20].

Sunulan bu tez çalışmasında, betonun küp yarmada-çekme dayanımı üzerine malzeme ve boyut etkisi ile özellikle betonun basınç mukavemeti arasında istatistiksel tabanlı ilişkilerin bulunması hedeflenmiştir. Böylece literatürde eksik olan bazı kısımların tamamlanması öngörülmüştür. Deneysel çalışmalar iki aşama şeklinde gerçekleştirildi. Birinci aşamada, betonun yarmada çekme dayanımı için, sadece malzeme parametrelerini baz alan dizayn kriterleri ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu deneyler için farklı dane çapı aralığına sahip agregalar hazırlanmıştır. d_{max} 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 32 mm olmak üzere 4 farklı grupta seriler oluşturulmuştur. Bu oluşturulan serilerden her birinden 9 adet (150x150x150 mm) küp numuneler hazırlanmıştır. Numunelerde çimento olarak CEM I 42.5 N kullanılmıştır. İkinci aşamada ise maksimum agrega çapı 4, 8, 16 mm olan beton karışımlarla 50, 100 ve 200 mm lik numuneler üzerinde betonun küp-yarmada çekme

dayanımında Boyut Etkisi Kuralı ve Doğrusal Boyut Etkisi Kuralı yaklaşımlarına göre inceleme yapılmıştır. Bu deneyler için farklı tip kalıplar hazırlanmış ve kullanılmıştır.

1.1. BETONDA KIRILMA MEKANİĞİ VE BOYUT ETKİSİ

Beton kompozit bir materyal olmasına rağmen, mekanik performansı açısından basit kompozit teorisini tam olarak yansıtmaz. Bu durum şekil (1.1.) de gösterildiği gibi betonun ve betonu oluşturan maddelerin (beton harcı ve agregalar) basit yükleme-gerilme grafiğiyle açıklanabilir. Çimento harcı ile agregalar yükleme-gerilme durumunun %80 nine ulaştığında lineer elastik gerilme davranışı gösterirken, beton yükleme durumunun %40-50 sine ulaştığında lineer olmayan elastik davranış göstermeye başlar [21,22].



Şekil 1.1. Beton ve içerdiği materyallerin yükleme-gerilme grafiği

Yükleme altındaki betonun lineer olmayan davranışı betonun içeriğinde ki 3 fazlı heterojen maddenin tanımlanması ile açıklanabilir; çimento harcı, agregalar ve geçiş fazı. Geçiş fazı, çimento harcı ve agregalar arasındaki ara yüzey bölgesidir; agregalar partikülleri çevresinde 10-50 μm kalınlığında olup diğer iki fazdan daha zayıftır. Diğer iki fazda kırıklar olmamasına rağmen geçiş fazının yüksek porozite ve düşük gerilme kuvveti nedeniyle mikro kırıklar kolaylıkla yayılabilir. Bu beton karışımının lineer olmayan davranışının sonucudur. Kotsovos betonun lineer olmayan eğrisini, betonun içerisinde artış gösteren homojen yükleme durumu ile açıklamaktadır [23].

Betonda gerilme ya da baskıyı oluşturan iki temel kırılma kriteri yükleme ve enerji kriterleridir [24,25]. Yükleme kriteri çatlak çevresinde gelişen lokal yükleme gerilmesi

malzemenin kohezif yüklemesinin üstesinden gelmesi için yeterli olmalıdır. Enerji kriteri, bir kırığın yayılması için gerekli enerji miktarı olarak tanımlanır. Bu iki kriter herhangi bir materyalin kırılma davranışını açıklamasına rağmen tüketilen enerji miktarının belirlenmesi ve özel sınırlandırılmış durumlarda kırılma boyunca oluşan yüklemenin doğru olarak nasıl hesaplanması gerektiğini gösterir [21].

Kırılma mekaniğinin, beton yapı tasarımında kullanılması yapısal güvenlik ve ekonomiyi artırmasının yanı sıra özellikle yüksek dayanımlı betonlar, lifli beton yapılar, çok büyük boyutlu beton yapılar, ön gerilmeli yapılar, beton barajlar gibi güvenliğin gerekli olduğu yapılar için önem arz etmektedir [26].

Uygulamada kırılma mekaniğini kullanılmasının temel nedenleri [27,28];

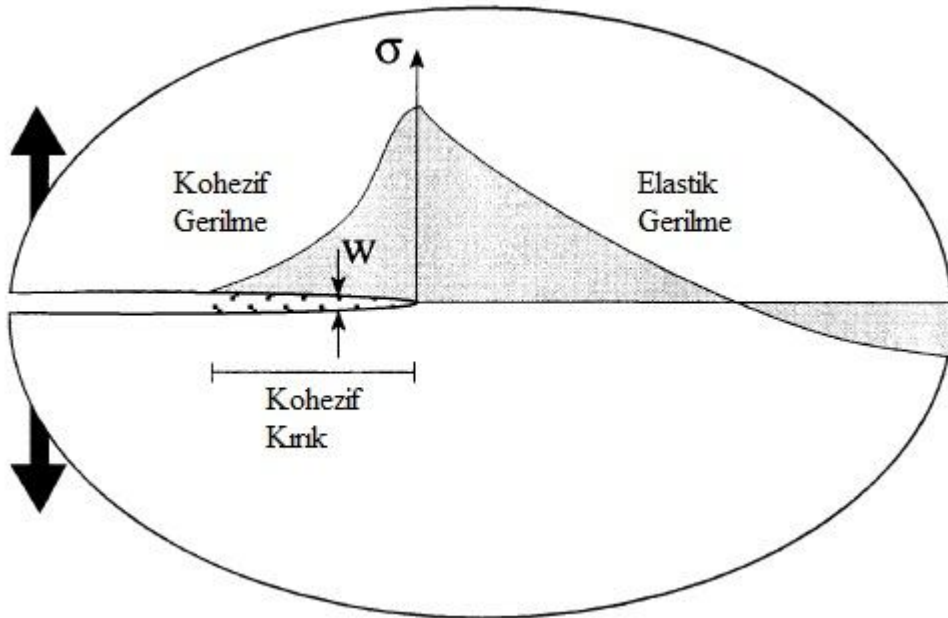
1. Çatlak oluşumu için gerekli enerji : Fiziksel açıdan çatlağın başlaması gerilmeye bağlı olabileceği gibi gerçekte çatlak oluşumu belirli bir enerji gerektirir. Aynı zamanda bu kırılma enerjisi katının yüzey enerjisini yansıtır. Bu nedenle enerji gerekli değildir.
2. Objektif Hesaplamalar : Herhangi bir teoride hesaplar, elaman boyutu ve koordinat seçimi gibi özelliklerden bağımsız olmalıdır. Bu özelliklere bağlı teori kabul edilemez. Beton tasarımının sonlu elaman analizinde kullandığı yaklaşım yaygın çatlak düşüncesidir. Bu yaklaşıma göre, sonlu elamandaki gerilme, malzemenin f_t çekme mukavemeti ile sınırlıdır. Bu dayanıma erişildiğinde sonlu elemandaki gerilme azalmalıdır. Önceki uygulamalarda gerilme aniden sıfıra azalır, düşey inmektedir. Fakat son zamanlarda gerilmenin tedrici olarak azaldığı, yani malzemenin uzama yumuşama davranışı anlaşılmıştır. Uzama yumuşamanın kullanıldığı sonlu eleman program sonuçları, önemli değişiklikler gösterip elamana bağlı sonuçların yanlışlığını göstermiştir.
3. Akma Platosunun Olmaması : Yük-deplasman diyagramına dayanan, elastik ve plastik olarak iki tip yapısal göçme vardır. Plastik göçmenin tipik karakteristiği; yapının çeşitli parçalarının göçmesi, tek bir parametre ile orantılı, tek serbestlik dereceli olarak aynı anda gelişir. Bu göçmeler, yük-deplasman eğrisinde uzun akma platosu ile gösterilirler. Eğer yükleme-deplasman eğrisinin böyle bir akma platosu yok ise göçme plastik değil yarı gevrekli. Eğer burkulmada ki $P-\delta$ etkisi gibi önemli geometrik kusurlar yok ise kırılma, çatlama ve diğer hasarlar yüzünden malzeme yumuşaması ile platonun yok olup, göçme işlemi tek serbestlik dereceli sistem olarak gelişmez.

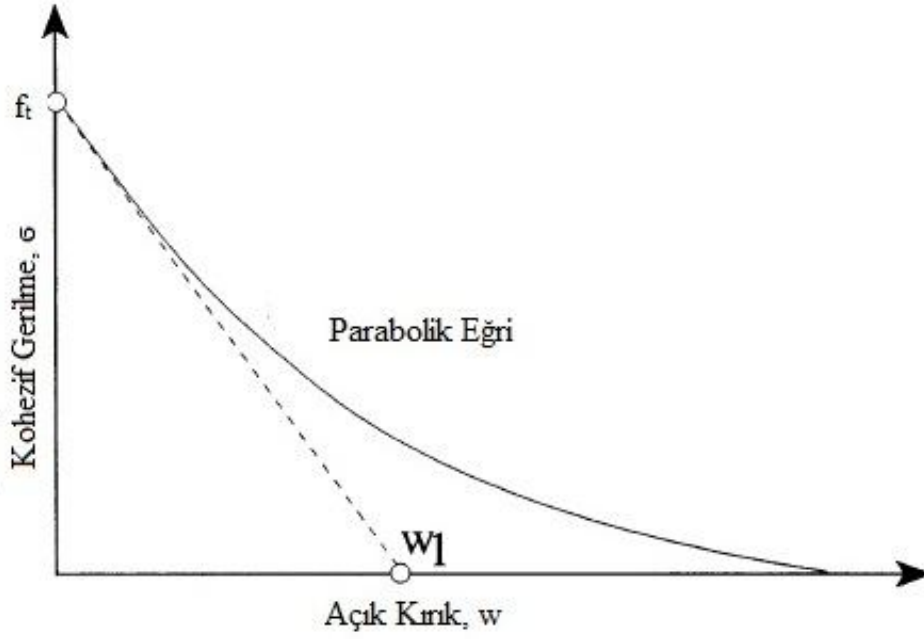
4. Enerji Yutma Kapasitesi ve Süreklilik: Yük-deplasman eğrisinin altındaki alan göçme sırasında yapının yuttuğu enerjiyi verir. Bu enerji özellikle dinamik yükler için önemlidir ve yapının sürekliliğini verir. Plastik limit analiz pik yükün azalması ve yutulan enerji hakkında bilgi vermez. Farklı bir kırılma mekaniği yaklaşımı gereklidir.
5. Boyut Etkisi: Boyut etkisi, dizayn mühendisleri için kırılma mekaniğini kullanmak için çok önemli sebepler içerir [29].

1.1.1. Kırılma Mekaniği Yaklaşımı

Lineer olmayan davranışın en önemli sonucu boyut etkisidir, bu olgu sınırlı analiz teorisinin klasik kopma kriteri ile açıklanamaz. Kohezif kırılma modeli, beton ve diğer çimento içerikli malzemelerin kırılma modelinden faydalanılarak gösterilebilir [30]. Bu model ile yarma testinde boyut etkisi sayısal olarak analiz edilir ve sonuçlar elastik çözümle karşılaştırılır [30,31].

Kohezif kırılma modelinde, malzemede gerilme mukavemeti f_t herhangi bir değerdeyken, maksimum gerilme yönünde dikey kırıklar oluşur. Bu kırık ani bir gerilme olmadan oluşmaz fakat gerilme transferleri şekilde gösterildiği gibi açık kalır [32].





Şekil 1.2. Kohезif kırık ve parabolik eğri

Bu model iki hipotezle açıklanabilir. Birincisi, materyalin hacmi E ve Poisson sabiti (ν) ile izotropik lineer elastik malzeme ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. İkincisi, analiz monotonik yük ve açık kırık için sınırlıdır. Kırığın her hangi bir noktasında gerilme (σ) bu noktada ki açık kırık (w) ile ilişkilidir. Gerilme ve açık kırık ilişkisi bir malzeme özelliği olarak kabul edilebilir ve parabolik eğri ile gösterilebilir [33].

Brezilya (Yarma) testinin kullanıldığı çentiksiz numuneler için eğer analiz gerilmenin belirlenmesi ve maksimum yükün yer değiştirmesi ile sınırlandırılmışsa bu durum parabolik eğrinin sadece başlangıç kısmı ile ilgilidir. Parabolik eğrinin başlangıçtaki lineer yaklaşımı gerilme mukavemeti f_t ile tanımlanır ve başlangıç eğrisinin w_1 yatay kesişimi eğrinin tümü yerine kullanılabilir. Malzeme özellikleri f_t , w_1 ve E ile birliktedir. Boyutsal zemine dayanıldığında, numunenin kendi boyutu düşünülmez, D , yükün tepe noktasını etkiler ama boyut l_{ch1} , azalan karakteristik uzunluk olarak adlandırılan parametre ile ilişkilidir.

$$l_{ch1} = \frac{E w_1}{2 f_t} \quad (1.1)$$

Beton için l_{ch1} değeri 50-400 mm aralığındadır. Farklı beton mukavemetleri ve agrega boyutları için l_{ch1} değeri CEB kod modelinde tavsiye edilen ampirik formüllerden hesaplanır [33].

1.1.2. Betonda Boyut Etkisi

Son yıllarda, yapıların çökme yüklerinin ve malzeme kırılma parametrelerinin belirlenmesi için kırılma mekaniğinin boyut etkisi hakkında çalışmalar yapılmaktadır [18]. Hawkins [34], betonun taşıma kapasitesinin belirlenmesinde boyut etkisinin etkin olmadığını, bunun yanı sıra beton yapılarının dayanımının boyut artışı ile ters orantılı olduğunu belirtmektedir. Beton yapılarında boyut etkisi kırılma mekaniği ile açıklanabilir [35]. Ancak çok büyük numuneler için beton yapıların nominal çekme dayanımı yaklaşık olarak sabittir, fakat boyutun değişmesiyle bu etkide değişmektedir. Mikro derecede nominal çekme mukavemeti yapısal boyutun azalmasıyla artar. Yapısal dizaynda boyutun artışı ile yapının dayanımda oluşan azalmalar önemlidir. Yapının gerçek boyutuna göre daha küçük numuneler kullanarak malzeme dayanım parametreleri hesaplanmaktadır, bununla birlikte laboratuvar şartlarında bulunan bu değerlerin gerçek yapısal değerlerle bağdaşmayacağı düşünülmelidir [28]. Bazant ve Kazemi tarafından önerilen Boyut Etkisi Kuralı geometrik olarak benzer fakat farklı boyuttaki kiriş numuneleri içermektedir [10]. Boyut etkisi, boyutun artışı ile kuvvetin azalması Diğer etkilerden boyut etkisini ayırmak için farklı boyutlarda fakat geometrik olarak benzer şekilleri düşünmek gereklidir [19]. Geometrik yapısı benzer değişik büyüklükteki yapıların tanımlanmasında ve maksimum yük (P_U) nominal gerilme (σ_N) açısından karakterize edilmektedir. Farklı boyutların geometrik olarak benzer yapıları için σ_N değerleri aynı olduğu zaman boyut etkisi yoktur. σ_N 'nin yapı boyutu üzerindeki bağımlılığı, boyut etkisi olarak adlandırılır. Nominal gerilme yapı üzerindeki herhangi bir gerçek gerilmeyi yansıtmaz, fakat benzerlik iki boyutlu olduğu zaman $\sigma_N = c_n(P_U/bd)$, üç boyutlu olduğu zaman $\sigma_N = c_n(P_U/d^2)$ olarak tanımlanabilir (b: iki boyutlu numunenin kalınlığı, d: karakteristik boyut, c_n : numune geometrisine bağlı bir sabit) [21].

Kırılma mekaniği yaklaşımına dayanan boyut etkisi kuralı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{(1+\beta)^{0.5}} \quad , \beta = d / d_0 \quad (1.2)$$

Burada f_t çekme dayanımı, σ_N Nominal dayanım, B ve d_0 katsayılar, β ise gevreklik sayısını göstermektedir [10].

1.1.3. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM)

1970'lere kadar betonun kırılma mekaniği ile ilgili yapılan çalışmalar klasik lineer elastik kırılma mekaniği (LEKM) ile ilgilidir. LEKM, beton gibi yarı gevrek malzemeler için geçersizdir. Bunun nedeni betonun içindeki çatlaklar ve elastik olmayan tabakanın varlığıdır. FPZ (fracture process zone; kırık geçiş bölgesi), LEKM tarafından ihmal edilmektedir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar betonarme yapıların çökme karakterizasyonu için lineer olmayan kırılma mekaniğini geliştirmişlerdir. Bazant'ın lineer olmayan kırılma mekaniği yaklaşımı boyut etkisi kanunları olarak adlandırılmaktadır [36]. Dayanım üzerindeki boyut etkisi başlıca betondaki FPZ ile ilişkilidir. Bu yaklaşımdaki temel gereksinimlerden birisi geometrik olarak benzer, aynı malzemeden yapılmış ve minimum boyut aralığı 1:4 olan test numuneleri için gereklidir [35].

Richart ve ark. yaptıkları çalışmada betondaki mikro kırıkları tanımlamışlardır [37]. Yükleme altındaki çökmenin beton boşluklarında gelişen yükleme gerilmesinden kaynaklandığını göstermişlerdir. Daha sonra Kaplan, betonda LEKM modellerinin uygulanabilirliğini deneysel olarak incelemiştir. Glucklich, betonun kırılma mekaniğini tanımlamak için elastik enerji salım oranı G_c 'nin kullanılmasını [15] ve Ramoult ve Batson betonda çatlak oluşum mekanizmasını incelemişlerdir [38]. Bu parametreleri çentikli paneller ve kirişler üzerinde yapmış oldukları deneylerde tespit etmişlerdir. Bu araştırmalar ve daha sonraki Brown, Shah ve McGarry, Walsh, Gjorv, Rossi vd. tarafından yapılan araştırmalarda, deney numunesinin şekli, boyutları ve başlangıçtaki çentik uzunluğuna bağlı olarak K_{Ic} değerinin sürekli değişmesinden dolayı bu sabitin beton için tutarlı bir malzeme sabiti olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca numune kalınlığı ve çentik genişliğinin, K_{Ic} üzerindeki etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir [28].

Irwin, seramik lifler üzerine yapmış olduğu deneylerde teorik mukavemetin $E/10$ civarında olmadığını görmüş ve teoriyi metalleri de içine alacak şekilde genişletmiştir [39]. Daha sonra sırasıyla açılma, kayma ve burulma durumlarına karşılık gelen üç elemanter mod I, mod II ve mod III genel kırılma modlarını ve bunların karışımlarından oluşan karışık modun kanunlarını ve K adı verilen gerilme şiddet çarpanlarını ortaya koymuştur [40].

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a_o} \quad (1.3)$$

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a_o} \quad (1.4)$$

$$K_{III} = \tau \sqrt{\pi a_0} \quad (1.5)$$

Burada; σ : malzemeye uygulanan çekme gerilmesi, τ : kayma gerilmesi, a_0 : yarı çentik uzunluğudur.

Çatlağın başlangıcı ve yayılma hızı mühendislik açısından önemlidir. Irwin, G_c çatlak yayılma hızı kavramını ortaya atmış ve K_c ile arasındaki bağlantıyı şu formülle açıklamıştır:

$$G_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (1.6)$$

Irwin, çatlağın hemen ucunda kırılma süreci bölgesi adı verilen bölgede gerilme dağılımının sabit ve değerinin malzemenin akma dayanımına eşit olduğunu kabul etmiştir. Kırılma süreci bölgesinin uzunluğunu ise [39];

$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{E G_c}{f_t^2} \quad (1.7)$$

Barenblatt, çatlağın ucundaki bu bölgedeki dağılımın Irwin'in aksine $q(x)$ gibi bir fonksiyon olduğunu kabul edip, matematiksel olarak probleme yaklaşmıştır. Dugdale [41], Billby ve arkadaşlarının [42] teorisini ince elasto-plastik levhalara uygulamışlar ve çatlak ucunda Çatlak Ucu Açılım Deplasmanı (ÇUAD) terimini ortaya atmışlardır. ÇUAD, kritik bir değeri olan W_c 'ye ulaştığında ise, çatlağın ani olarak ilerleyeceğini ve bunun bir malzeme sabiti olarak kullanılabileceğini ispatlamışlardır. Ayrıca G_c ile W_c arasındaki ilişkiyi şu şekilde tanımlamışlardır.

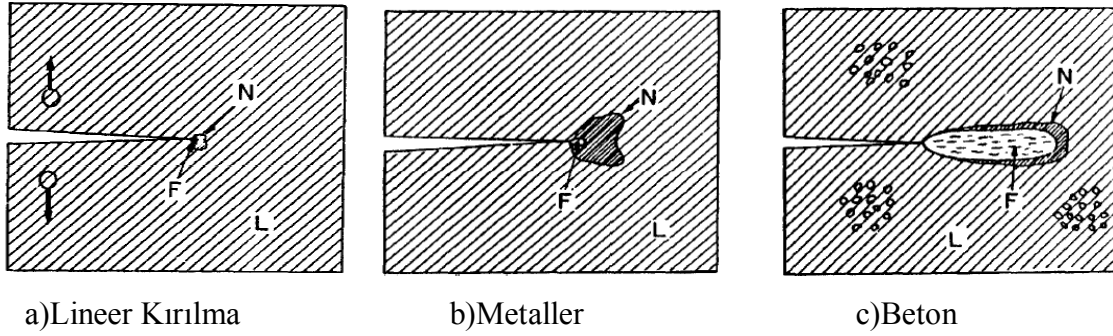
$$G_c = \sigma_y W_c \quad (1.8)$$

Burada σ_y malzemenin akma dayanımıdır [28].

1.1.4. Betonun Lineer Olmayan Kırılma Teorisi

Genellikle lineer olmayan kırılma teorisi iki guruba ayrılır: Bunlardan ilk grup metalikler, ikinci grup ise metalik olmayan beton veya seramik malzemelerdir (Şekil 1.3). Lineer elastik kırılma mekaniğinin aksine lineer olmayan bölge, lineer olmayan kırılma

mekaniğinin her iki gurubu içinde genişdir. Metalik kırılma mekaniğinde, kırılma süreci bölgesi lineer olmayan bölgenin çok küçük bir parçasıdır. Aksine metalik olmayan kırılma mekaniğinde kırılma süreci bölgesi genişdir ve lineer olmayan bölgenin tamamını kaplar. Böylece her ne kadar metallerin kırılma mekaniği teorisinin sonuçlarının çoğu öncelikle kullanılsa daha direkt olarak hesaplamalara katılamaz [21].



Şekil 1.3. Farklı Materyallerin Kırılma Süreci. Lineer bölge (L), Lineer olmayan bölge (N), Kırılma Süreci Bölgesi (F)

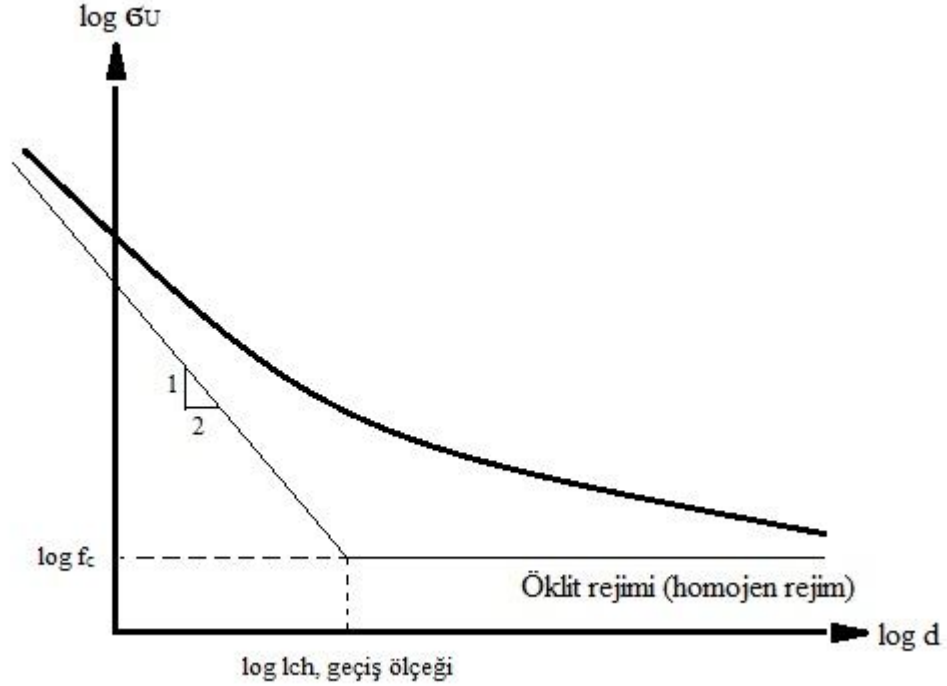
Kırılma süreci bölgesinin uzunluğu, malzemenin granüler yapısı ile ilişkilidir. Örneğin cam gibi tam gevrek bir malzemede 10 mm olan bu tabaka normal beton için 200-500 mm ve $d_{max} = 38$ mm olan baraj betonlarında 700 mm mertebesinde olmaktadır [28,43].

1.1.5. Fraktal Boyut Etkisi Kanunu

Carpinteri, maksimum yükte çatlak yüzeyinde meydana gelen hasarı fraktal geometri ile modelleyerek boyut etkisi kavramına geometrik olarak yaklaşmıştır [44]. İlk olarak, Mandelbrot tarafından kullanılan fraktal kavramı sonsuza kadar kendini tekrarlayan iç içe geçmiş şekiller olarak tanımlanabilir [45]. Bu tür bir geometrik yaklaşımda boyutlar Öklid geometrisindeki tam sayılarla değil, kesirli sayılarla ifade edilebilir.

Fraktal teoriye göre; yük altında bir beton numunede, gerilme transferini sağlayan kesitin, basınç yüklemesine maruz bir beton numunede olduğu gibi, Cantor kümesine benzediği kabul edilir. Kesitin fraktal boyutu, $1 < D \leq 2$ olmak üzere $D = 2 - d_f$ şeklinde ifade edilir. Burada d_f çatlaklar ve boşluklar sebebi ile kesitteki zayıflamayı göstermektedir ($0 \leq d_f \leq 1$) [28]. Carpinteri ve Brown'ın çalışmaları dikkate alarak gerilme transferini sağlayan kesitin fraktal boyutunu 1.5 olarak sınırlandırmıştır ($d_f = 0.5$) [44,46]. Ancak gerilmedeki bu kesirli boyut çok dar bir alanda, yani mikroskopik ölçekte geçerli olmaktadır. Dolayısıyla yapı boyutu arttıkça (makroskopik ölçekte) bu fraktal boyutlar öklid geometrisindeki tam sayı boyutlara yaklaşmaktadır. Cartinperi, bu durumu homojen davranış olarak tanımlamıştır.

Fraktal boyuttaki gerilme kavramı, yine fraktalların kendini tekrarlama özelliğinden faydalanılarak elde edilir. Bunun için fraktal ve öklid geometrisindeki değişmeyen global parametrelerden faydalanılır.



Şekil 1.4. Fraktal boyut etkisi kanunu logaritmik diyagram

Maksimum gerilmenin fraktal boyuttaki ifadesi boyut analizi yardımıyla

$$[\sigma_u^f] = [F] \times [L]^{-(2-d)} \quad (1.9)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada $[F]$ yük, $[L]$ uzunluk boyutudur. Yük boyutu, enine şekil değiştirmeden dolayı oluşan eşdeğer yatay çekme yükü $\square P_u$ şeklinde global bir parametre olarak alınırsa

$$\square P_u = \sigma_u^0 A_0 = \sigma_u^f A_f \quad (1.10)$$

öklid geometrisi ile fraktal geometri arasında denge kurulabilir (burada 0 indisi öklid rejimini, f indisi fraktal rejimini göstermektedir). d kesitin karakteristik boyutu olmak

üzere $A_0 \propto d^2$ makro ölçekte alan, $A_f \propto d^{2-d_f}$ mikro ölçekte alanı göstermektedir. Denklem (1.9) den

$$\sigma_u^f = \sigma_u^0 d^{d_f} \quad (1.11)$$

elde edilir. Denklem (1.11) mikro ölçekte geçerli olduğunda pratikte kullanımı mümkün değildir. Bununla beraber hangi durumlarda fraktal rejimin veya öklid rejiminin kullanılacağı önemlidir. Bu amaçla Carpinteri, bu iki rejim arasındaki geçiş kriterini karakteristik içsel uzunluk adını verdiği ampirik l_{ch} parametresine bağlamıştır. l_{ch} parametresinin yapı boyutu d ye oranı davranışı belirlemektedir. Bu oran küçüldükçe (yapı boyutu arttıkça) yapıda homojen davranış, oranın azalması ile (küçük yapılarda) fraktal davranış gözlemlenir. Brown sınırları ve denklem (1.11) dikkate alınırsa fraktal teoriye göre gerilmekteki boyutun tesirinin analitik formu

$$\sigma_u = f_c \sqrt{1 + \frac{l_{ch}}{d}} \quad (1.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada σ_u nominal dayanım (maksimum yükün kesit alanına oranı) f_c sonsuz boyuttaki bir numune için nominal dayanım ve l_{ch} malzemenin içsel uzunluğudur. Şekil 1.4.'de denklem (1.12) logaritmik ölçekte görülmektedir. Burada fraktal rejimdeki $\frac{1}{2}$ lik eğimler Brown sınırlarını ifade etmektedir. Denklem (1.12) deki ampirik sabitler, formül üzerine yapılacak olan bir dizi dönüşümden sonra uygulanacak olan, en küçük kareler yöntemi ile veya direkt olarak, lineer olmayan eğri uydurma logaritmaları ile bulunabilir [47]. Carpinteri, l_{ch} in malzemenin mikro yapısına, yani betondaki maksimum agrega çapına bağlı olduğunu kabul etmektedir [48].

1.1.6. Kırılma Mekanikinde Yarma Deneyleri

Tüm dünyada yarma deneyi betonun mukavemetinin ölçülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu deney ilk olarak 1943 yılında Brezilya da yapılan Standardizasyon konferansında Lobo Carnerio ve Barcellos tarafından önerilmiştir [49]. Günümüzde Brezilya Testi ASTM C-496, ISO 4105, BS 1881-117 gibi standartlarda yer alan önemli beton deneyleri arasına bir test metodu olarak dahil edilmiştir [33]. Yarma deneyinin ana avantajı dıştan gelen baskılayıcı yüklerin gerekliliğidir. Bir silindirik veya prizmatik

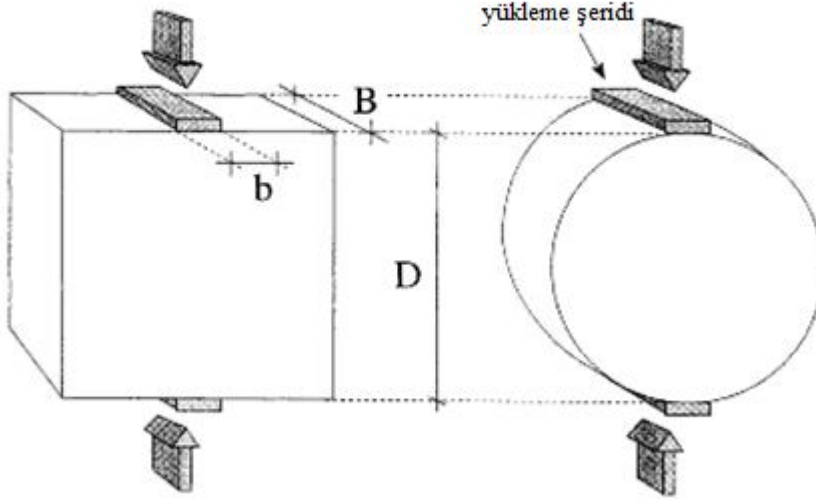
numune, yükleme alanında birbirini gören iki yönden eşit artan bir yükleme ile yüklenir. Yerel göçmeleri engellemek için yükleme yapılan her iki yüzeye ağaçtan yapılan ince tabakalar yerleştirilir. İndüklenen gerilme yük durumu numunenin yarılmasının engellenmesine neden olur. Gerilme yükünün maksimum değeri, elastisite teorisince hesaplanan yarma gerilmesi mukavemetinin düzenli olarak bir materyal özelliğidir. Farklı geometrilere sahip numunelerde dikkat edilmesi gereken nokta, yüklenen çubukların boyutunun ve genişliğinin farklı standartlarca tanımlanmasıdır. Fakat yarma gerilmesi mukavemeti farklı değişkenler hesaplanmaksızın tek bir formülle hesaplanmalıdır. Klasik elastisite teorisi çerçevesinde yarma deneyi uygulamalarında yük taşıyan çubukların genişliği ve geometrisin etkisi bir önceki gün teorik olarak analiz edilmelidir. Yapılan bu çalışmalarda numune tipleri ve yük taşıyan çubuklar tavsiye edilen standartlarda kullanıldığı zaman yarma mukavemeti yalnızca standart eşitlikle belirlendiği gösterilmiştir [33].

Kohezif çatlak modeline dayanarak bazı yazarlar tarafından yapılan yarma deneyi analizlerinde klasik elastisite teorisinden elde edilen sonuçların beton gibi çimento esaslı malzemelere uygulanamayacağını göstermiştir. Bu analizden, standardize edilmiş f_{st} 'nin numune geometrisi, yük taşıyan çubukların genişliği ve numunenin boyutu ile önemli ölçüde farklılık gösterebileceği gösterilmiştir. Başlıca sonuç olarak daha önceden tanımlanan standartlarda yük taşıyan çubukların genişliği ve numune tipi %40'tan daha fazla yarma gerilmesi mukavemetinin hesaplanan değerini etkileyebilir. Bu durum granit ve beton numunelerini test eden araştırmacılar tarafından deneysel olarak desteklenmiştir [20].

Yarma deneyinde, silindirik veya prizmatik numuneler birbirini dik gören iki taraftan kademeli olarak yüklenir. Yükleme noktasındaki çoklu çatlakları ve göçmeyi engellemek için, yük genişliği farklı standartlarca değişen iki taşıyıcı çubuk aracılığıyla dağıtılır. Eğer malzeme davranışı lineer elastik ise, bu geometri ile yükleme diyagramı boyunca eşite yakın gerilme durumu sağlanır. Böylece numunenin yükleme yapılan düzlemi boyunca her iki taraftan yarıma sağlanır. Konsantre yüklemelerde bu plandaki maksimum gerilme mukavemeti aşağıda verilen formülle hesaplanabilir [50]:

$$\sigma_{max,P} = \frac{2P}{\pi BD} \quad (1.13)$$

Burada ki $\sigma_{\max,P}$, numunenin maksimum gerilme mukavemetidir. P, B, ve D de sırasıyla numuneye uygulanan yük, numunenin kalınlığı ve derinliğidir.



Şekil 1.5. Silindirik ve kübik numuneler

Elastisite teorisince hesaplanan maksimum gerilme yarma gerilme mukavemeti olarak adlandırılan bir malzeme özelliğidir. Eğer yük alan çubuklar dar ise ve malzeme davranışı lineer-elastik-gevrek ise f_{st} gerilme mukavemetine yakındır. Yarma gerilme mukavemeti, f_{st} , şu formülle hesaplanır:

$$f_{st} = \frac{2Pu}{\pi BD} \quad (1.14)$$

Buradaki P_u test boyunca kaydedilen maksimum yüküdür [33].

Halen kullanılan, yarma gerilmesi mukavemeti elastisite teorisinden türetilmiş olup, bu teori numunenin her iki tarafından kademeli olarak yapılan çizgisel yüklemeyi kabul eder. Bununla birlikte, sınırlı genişlikteki taşıma çubukları yükü dağıtır ve sonuç olarak gerilim mukavemeti dağılımı pratikte gerçekleşmez. Yük alan çubukların genişliği arttıkça, herhangi bir yük altında ki yükleme boyunca oluşan maksimum gerilme mukavemeti azalır. Silindirik ve kübik numuneler için, yükleme yapılan çubukların genişliği dikkate alınarak, maksimum gerilme mukavemeti şu şekilde hesaplanır [51]:

$$\sigma_N = \frac{2P}{\pi BD} (1 - \beta^2)^{3/2} \quad \text{Silindirik Numuneler için} \quad (1.15)$$

$$\sigma_N = \frac{2P}{\pi BD} [(1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115] \quad \text{Kübik Numuneler için} \quad (1.16)$$

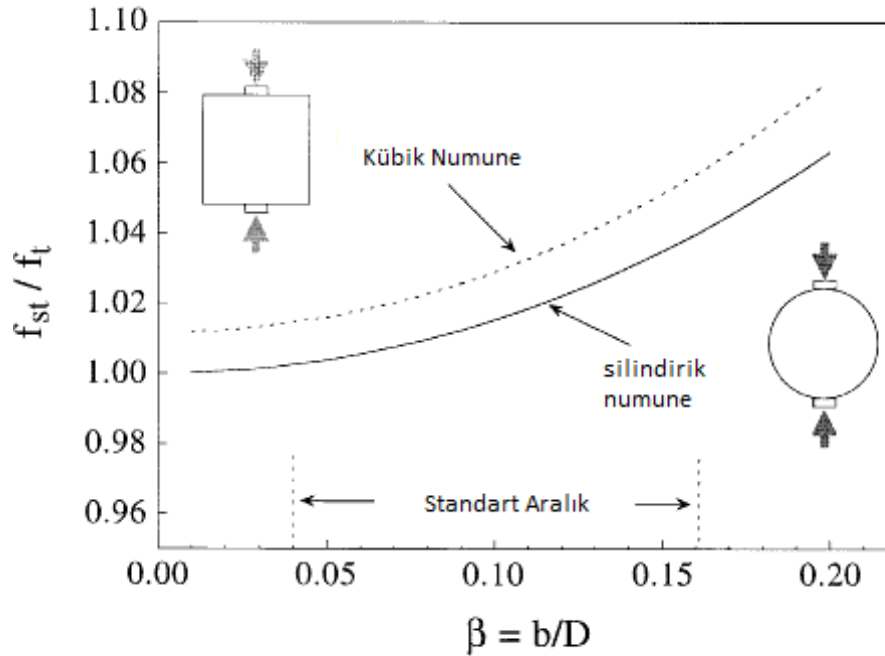
Burada ki B ve D, numune boyutlarıdır. P yükleme miktarı ve $\beta=b/D$ ise yük taşıyan parçaların rölatif genişliğidir. Her iki formülde $\beta \leq 0.20$ olduğu zaman geçerlidir.

Lineer elastik davranış gösteren gevrek materyallerde çökmenin, maksimum gerilme mukavemeti kritik değere ulaştığı zaman oluştuğu düşünülmektedir. Uygulamada bu kritik değer gerçek gerilme mukavemeti ile birlikte hesaplanır.

$$f_t = \frac{2Pu}{\pi BD} (1 - \beta^2)^{3/2} \quad \text{Silindirik Numuneler için} \quad (1.17)$$

$$f_t = \frac{2Pu}{\pi BD} [(1 - \beta^2)^{5/3} - 0.0115] \quad \text{Kübik Numuneler için} \quad (1.18)$$

P_u , deney süresince kaydedilen maksimum yükür.



Şekil 1.6. Elastisite teorisine göre yük taşıyan çubukların rölatif genişliği ile yarma gerilme mukavemetinin değişmesi [51].

Şekil 1.6’da yük taşıma çubukları β ’nın rölatif genişliğinin bir fonksiyonu olarak gerilme mukavemeti f_t açısından yarma gerilme mukavemetini göstermektedir. Teorikte, yarma gerilme mukavemeti, yük taşıyıcı çubukların genişliği ile doğru orantılı olarak artar [33].

2. MATERYAL ve METOT

Deneyisel çalışmaya başlamadan önce gerekli literatür taraması yapılmıştır. Yapılan bu taramada boyut etkisi-malzeme ve yükleme-malzeme konularında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Betonun silindir-yarma deneyi üzerine literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen küp-yarma deneyi üzerine yapılan araştırmalar yetersiz düzeydedir. Bu nedenle diğer mukavemet halleri ile ilgili istatistik tabanlı bağlantılar tam olarak ortaya konulamamıştır.

Betonun mekanik mukavemet değerlerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar, betonun mekanik mukavemet değerleri agreganın tipine(nehir/kırmataş), maksimum agrega çapına ve su/çimento oranı gibi malzeme parametrelerine bağımlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte günümüz dizayn çalışmalarında sadece basınç dayanımı hedef alınmamakta, aynı zamanda özel yapı tiplerinde betonun çekme dayanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan çok iyi bilinmektedir ki beton numunenin boyutu arttıkça mekanik mukavemet değerlerinde düşüşler gözlenmektedir. Buna beton/betonarmenin kırılma mekaniğinde boyut etkisi adı verilmektedir.

Bunların hepsi göz önüne alındığında bu tez çalışması iki aşama şeklinde gerçekleştirildi. Birinci aşamada, betonun yarmada çekme dayanımı için, sadece malzeme parametrelerini baz alan dizayn kriterleri ortaya konulması hedeflenmiştir. Bu deneyler için farklı dane çapı aralığına sahip agregalar hazırlanmıştır. d_{max} 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 32 mm olmak üzere 4 farklı grupta seriler oluşturulmuştur. Bu oluşturulan serilerden her birinden 9 adet (150x150x150 mm) küp numuneler hazırlanmıştır. Numunelerde çimento olarak CEM I 42.5 N kullanılmıştır.

İkinci aşamada ise maksimum agrega çapı 4, 8, 16 mm olan beton karışımlarla 50, 100 ve 200 mm'lik numuneler üzerinde betonun küp-yarmada çekme dayanımında Boyut Etkisi Kuralı ve Doğrusal Boyut Etkisi Kuralı yaklaşımlarına göre inceleme yapılmıştır. Bu deneyler için farklı tip kalıplar hazırlanmış ve kullanılmıştır.

2.1. Yükleme – Malzeme Analizi

Yükleme –Malzeme analizi yapılırken deney için 4 farklı dane aralığına sahip agrega grubunu kullandık. Bu agregaların maksimum dane çapı dağılımı 4 mm, 8 mm, 16 mm ve 32 mm olarak belirlendi. Granülometrik bir karışım oluşturulması amacıyla TS 706'daki sınır değerlere uygun olarak ayarlama yapılmıştır.

2.1.1. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri

Granülometrik bir karışım oluşturulması amacıyla TS 706'daki sınır değerlere uygun olarak ayarlama yapılmıştır.

Deneylerde Elazığ Altınova Çimento San. T.A.Ş.'nin ürettiği CEM I 42.5 N tipi yüksek dayanımlı çimento kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal veriler tablo 2.1 de verilmiştir.

Tablo 2.1. CEM I 42.5 N Tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri

Kimyasal Analiz Sonuçları									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	T.E.			
32.08	6.05	3.23	49	3.85	3.31	1.05			
Fiziksel Analiz Sonuçları									
45µ	Blaine	Priz b.	Priz s.	Öz. ağı.	Yoğunluk	H. gen.	2 gün	7 gün	28 gün
1.3	3493	1.55	3.05	3.06	980	6	23.8	41.3	57

Deney sırasında EN 12390-1 standartlarına uygun (150x150x150 mm) ebadında küp plastik kalıplar kullanıldı. Bu kalıplar kullanılmadan önce gerekli temizliği ve yağlama işlemi yapıldı.



Şekil 2.1. Plastik küp beton kalıbı

2.1.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları

Öncelikle $d_{max} = 4$ mm için gerekli karışım hesaplarını yapıp deneye başladım. Karışım için gereken agrega, çimento, su hesaplamalarını tamamladım. Bu hesabı şu şekilde gerçekleştirdik.

$d_{\max} = 4$ mm için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.6 için,

Çimento = 450

Su = 270

Hava = % 2 ise;

$1000 \text{ dm}^3 = 450/3.1 + 270 + 20 + \text{Agrega}$

1000 dm^3 betonda bulunan Agreg a hacmi 564.8 dm^3 olarak hesaplanır. Özgöl Ağırlık formülünden,

$$d = m / V \quad (1.19)$$

$$2.64 = m / 564.8$$

$m = 1491$ kg bulunur.

Biz 60 dm^3 karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.2. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm^3</u>	<u>60 dm^3</u>
Çimento	450 kg	27 kg
Su	270 l	16.2 l
1 no'lu elekten geçen kum	746 kg	45 kg
1 no'lu elekten geçemeyen kum	746 kg	45 kg

$d_{\max} = 8 \text{ mm}$ için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.6 için,

Çimento = 400

Su = 240

Hava = % 2 ise;

$1000 \text{ dm}^3 = 400/3.1 + 240 + 20 + \text{Agrega}$

1000 dm^3 betonda bulunan Agreganın hacmi 611 dm^3 olarak hesaplanır.

Özgül Ağırlık formülünden,

- (0 - 4) kum (%65)
 $2.64 = m / (611 \times (65/100))$
 $m_{(0-4)} = 1048.5 \text{ kg}$ bulunur.
- (4 - 8) kum (%35)
 $2.66 = m / (611 \times (35/100))$
 $m_{(4-8)} = 569 \text{ kg}$ bulunur.

Biz 60 dm^3 karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.3. $d_{\max} = 8 \text{ mm}$ için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm^3</u>	<u>60 dm^3</u>
Çimento	400 kg	24 kg
Su	240 l	14.4 l
$d_{\max} (0-4)$	1048.5 kg	63 kg
$d_{\max} (4-8)$	569 kg	34 kg

$d_{\max} = 16$ mm için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.5 için,

Çimento = 350

Su = 175

Hava = % 2 ise;

$1000 \text{ dm}^3 = 350/3.1 + 175 + 20 + \text{Agrega}$

1000 dm^3 betonda bulunan Agreganın hacmi 692 dm^3 olarak hesaplanır.

Özgül Ağırlık formülünden,

- (0 - 8) kum (%60)
 $2.64 = m / (692 \times (60/100))$
 $m_{(0-4)} = 1096 \text{ kg}$ bulunur.
- (8 - 16) çakıl (%40)
 $2.66 = m / (692 \times (40/100))$
 $m_{(4-8)} = 736 \text{ kg}$ bulunur.

Biz 60 dm^3 karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.4. $d_{\max} = 16$ mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm^3</u>	<u>60 dm^3</u>
Çimento	350 kg	21 kg
Su	175 l	10.5 l
$d_{\max} (0-4)$	1096 kg	66 kg
$d_{\max} (4-8)$	736 kg	44 kg

$d_{\max} = 32$ mm için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.55 için,

Çimento = 300

Su = 165

Hava = % 2 ise;

$1000 \text{ dm}^3 = 300/3.1 + 165 + 20 + \text{Agrega}$

1000 dm^3 betonda bulunan Agregada hacmi 718 dm^3 olarak hesaplanır.

Özgöl Ağırlık formülünden,

- (0 - 4) kum (%45)
 $2.64 = m / (718 \times (45/100))$
 $m_{(0-4)} = 853 \text{ kg}$ bulunur.
- (4 - 8) kum (%30)
 $2.64 = m / (718 \times (30/100))$
 $m_{(0-4)} = 569 \text{ kg}$ bulunur.
- (8 - 32) çakıl (%25)
 $2.66 = m / (718 \times (25/100))$
 $m_{(4-8)} = 478 \text{ kg}$ bulunur.

Biz 60 dm^3 karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.5. $d_{\max} = 32$ mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	1000 dm^3	60 dm^3
Çimento	300 kg	18 kg
Su	165 l	9.9 l
$d_{\max} (0-4)$	853 kg	51 kg
$d_{\max} (4-8)$	569 kg	34 kg
$d_{\max} (8-32)$	478 kg	29 kg

2.1.3. Deneyin Yapılışı

Bu şekilde bize gerekli agrega miktarlarımızı hesapladık. Daha sonra gerekli eleme işlemleri ile agregalarımızı temin ettik. Deney için gerekli olan malzemelerimi hazırlayıp, tartma işlemi ile ayarladıktan sonra deneye başladık. Laboratuvarımızda bulunan beton mikserimize agregayı, çimentoyu ve suyu katarak, gerekli slump değerine ulaşınca kadar karıştırma işlemini yaptık. Sonrasında önceden hazırladığımız beton küp numune kalıplarımıza bu karışımımızı doldurduk ve bu oluşturduğumuz numunelere isimler verdik. Bu numuneler kalıplara doldurulurken sarsma yöntemiyle ve çekiçleme ile boşluk bırakmadan dökümlerimizi tamamladık. Hazırladığımız numuneleri 24 saat nemli bir bezin altında beklettikten sonra oda sıcaklığındaki su ile dolu kür havuzlarına yerleştirdik. Su içinde 28 gün beklettikten sonra sudan çıkardık. Çıkardığımız numuneleri 24 saat beklettikten sonra yarma deneyi için hazırladık. Bu işlemi yaparken;

$$t_1 / d = 0.05 \quad \rightarrow \quad d = 150 \text{ mm} , t_1 = 7.5 \text{ mm}$$

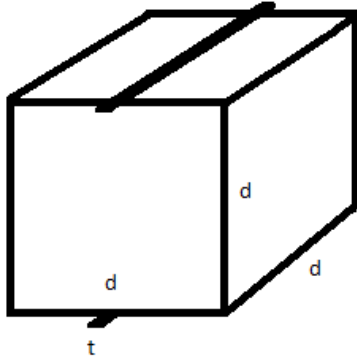
$$t_2 / d = 0.10 \quad \rightarrow \quad d = 150 \text{ mm} , t_2 = 15 \text{ mm}$$

$$t_3 / d = 0.15 \quad \rightarrow \quad d = 150 \text{ mm} , t_3 = 22.5 \text{ mm}$$

şeklinde üç grup oluşturduk.

Numunelerin genişliği (d) 150 mm olduğundan, 3 farklı genişlikte (t) plywood çubuklar kestirip hazırladık. Bu çubukların uzunluğu küp numuneyi her iki taraftan 1 cm geçecek şekilde 170 mm, et kalınlığı .. mm, genişliği de yukarıda ki üç grubu sağlayacak şekilde $t_1 = 7.5$ mm, $t_2 = 15$ mm, $t_3 = 22.5$ mm şeklinde kestirilip, hazırlandı.

Sonrasında bu çubuklar küp numunelerin hem üst hem alt tarafına, tam orta noktalarına gelecek şekilde sabitlendi.



Şekil 2.2. Numunelerin üzerine çubukların yerleşimi

Sonrasında bu numuneler deney aletine yerleştirildi ve 0 dan başlayarak yüklemeler yapıldı. Yapılan yüklemelerde sonuçlar kaydedildi.



Şekil 2.3. Numunelerin yüklenmesi ve kayıt anı

2.2. Boyut Etkisi – Malzeme Analizi

Maksimum agrega çapı 4, 8, 16 mm olan beton karışımlarla 50, 100 ve 200 mm lik numuneler üzerinde;

$$t_1 / d = 0.10$$

$$t_2 / d = 0.16$$

olmak üzere iki farklı oranda betonun küp yarmada çekme dayanımında boyut etkisi inceledik.

2.2.1. Deneyde Kullanılacak Malzemelerin Özellikleri

Granülometrik bir karışım oluşturulması amacıyla TS 706'daki sınır değerlere uygun olarak ayarlama yapılmıştır.

Deneylerde Elazığ Altınova Çimento San. T.A.Ş.'nin ürettiği CEM I 42.5 N tipi yüksek dayanımlı çimento kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal veriler tablo 2.1 de verilmiştir.

Deney sırasında EN 12390-1 standartlarına uygun (50x50x50 mm), (100x100x100 mm) ve (200x200x200 mm) ebatlarında küp çelik kalıplar, (150x150x150 mm) ebadında küp plastik kalıp kullanıldı. Bu kalıplar kullanılmadan önce gerekli temizliği ve yağlama işlemi yapıldı.

Deneyde kullanılmak üzere t/d oranlarını sağlayacak şekilde plywood malzemesinden çubuklar kestirip hazırladık.

2.2.2. Numunelerin Malzeme Karışım Miktarları

Öncelikle $d_{max} = 4$ mm için gerekli karışım hesaplarını yapıp deneye başladım. Karışım için gereken agrega, çimento, su hesaplamalarını tamamladım. Bu hesabı şu şekilde gerçekleştirdik.

$$\text{Su}/\text{Çimento} = 0.6 \text{ için,}$$

$$\text{Çimento} = 450$$

$$\text{Su} = 270$$

$$\text{Hava} = \% 2 \text{ ise;}$$

$$1000 \text{ dm}^3 = 450/3.1 + 270 + 20 + \text{Agrega}$$

1000 dm^3 betonda bulunan Agreganın hacmi 564.8 dm^3 olarak hesaplanır. Özgül Ağırlık formülünden,

$$d = m / V$$

$$2.64 = m / 564.8$$

$$m = 1491 \text{ kg bulunur.}$$

Biz 50 dm³ karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.6. $d_{\max} = 4$ mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm³</u>	<u>50 dm³</u>
Çimento	450 kg	22.5 kg
Su	270 l	13.5 l
1 no'lu elekten geçen kum	746 kg	37.3 kg
1 no'lu elekten geçemeyen kum	746 kg	37.3 kg

$d_{\max} = 8$ mm için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.6 için,

Çimento = 400

Su = 240

Hava = % 2 ise;

$1000 \text{ dm}^3 = 400/3.1 + 240 + 20 + \text{Agrega}$

1000 dm^3 betonda bulunan Agreg a hacmi 611 dm^3 olarak hesaplanır.

Özgöl Ağırlık formülünden,

- (0 - 4) kum (%65)
 $2.64 = m / (611 \times (65/100))$
 $m_{(0-4)} = 1048.5 \text{ kg}$ bulunur.
- (4 - 8) kum (%35)
 $2.66 = m / (611 \times (35/100))$
 $m_{(4-8)} = 569 \text{ kg}$ bulunur.

Biz 50 dm³ karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.7. d_{max} = 8 mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm³</u>	<u>50 dm³</u>
Çimento	400 kg	20 kg
Su	240 l	12 l
d _{max} (0-4)	1048.5 kg	52.5 kg
d _{max} (4-8)	569 kg	28.5 kg

d_{max} = 16 mm için gerekli karışım hesabı;

Su/Çimento = 0.6 için,

Çimento = 350

Su = 210

Hava = % 2 ise;

1000 dm³ = 350/3.1 + 210 + 20 + Agreg

1000 dm³ betonda bulunan Agreg hacmi 657 dm³ olarak hesaplanır.

Özgül Ağırlık formülünden,

- (0 - 8) kum (%60)
2.64 = m / (657 x (60/100))
m₍₀₋₄₎ = 1041 kg bulunur.
- (8 - 16) çakıl (%40)
2.66 = m / (657 x (40/100))
m₍₄₋₈₎ = 699 kg bulunur.

Biz 50 dm³ karışım hazırlayacak şekilde bir ölçü çıkarırsak;

Tablo 2.8. $d_{\max} = 16$ mm için beton karışım hesabı

Malzeme Türü	<u>1000 dm³</u>	<u>50 dm³</u>
Çimento	350 kg	17.5 kg
Su	210 l	10.5 l
$d_{\max} (0-4)$	1041 kg	52 kg
$d_{\max} (4-8)$	699 kg	35 kg

2.2.3. Deneyin Yapılışı

Bulunan oranlar ve miktarlar doğrultusunda, gerekli karışımı hazırlamak için gerekli olan agregamızı eleme işlemleri ile ayarlayıp, bulduğumuz ölçülere göre tartıp hazırladık. Gerekli olan çimento ve suyu da tartıp hazırladıktan sonra, hazırladığımız kalıpları kontrol edip deneyimize başladık. Gerekli malzemeleri sırasıyla miksera döktükten sonra, beton karışımı gerekli slump değerine ulaşınca harcımızı sırasıyla tüm kalıplarımıza yerleştirdik. Oluşan numunelerimizi 24 saat nemli bezin altında beklettikten sonra oda sıcaklığında ki beton kür havuzuna yerleştirdik. Bu havuzda 28 gün suda beklettikten sonra, sudan çıkarıp deneylerimizi yapmak için önceden hazırladığımız plywood malzemelerimizi numunelerimizin üzerine yerleştirdik. Bu yerleştirme işleminden sonra yükleme yaparak kırılma sonuçları kaydettik.

3. BULGULAR

3.1. Yükleme – Malzeme Deneyi Sonuçları

Tablo 3.1. $d_{\max}=4$ mm’lik Küp numunelerin deney sonuçları ($f_c=41.0$ MPa)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ (N/mm ²)
Seri I	150	7.5	0.05	79.8	2.26
		7.5		87.2	2.47
		7.5		100.9	2.86
Seri II	150	15	0.10	107.9	3.05
		15		87.9	2.49
		15		72.4	2.05
Seri III	150	22.5	0.15	124.9	3.54
		22.5		105.6	2.99
		22.5		81.5	2.31

Tablo 3.2. $d_{\max}=8$ mm’lik Küp numunelerin deney sonuçları ($f_c=48.4$ MPa)

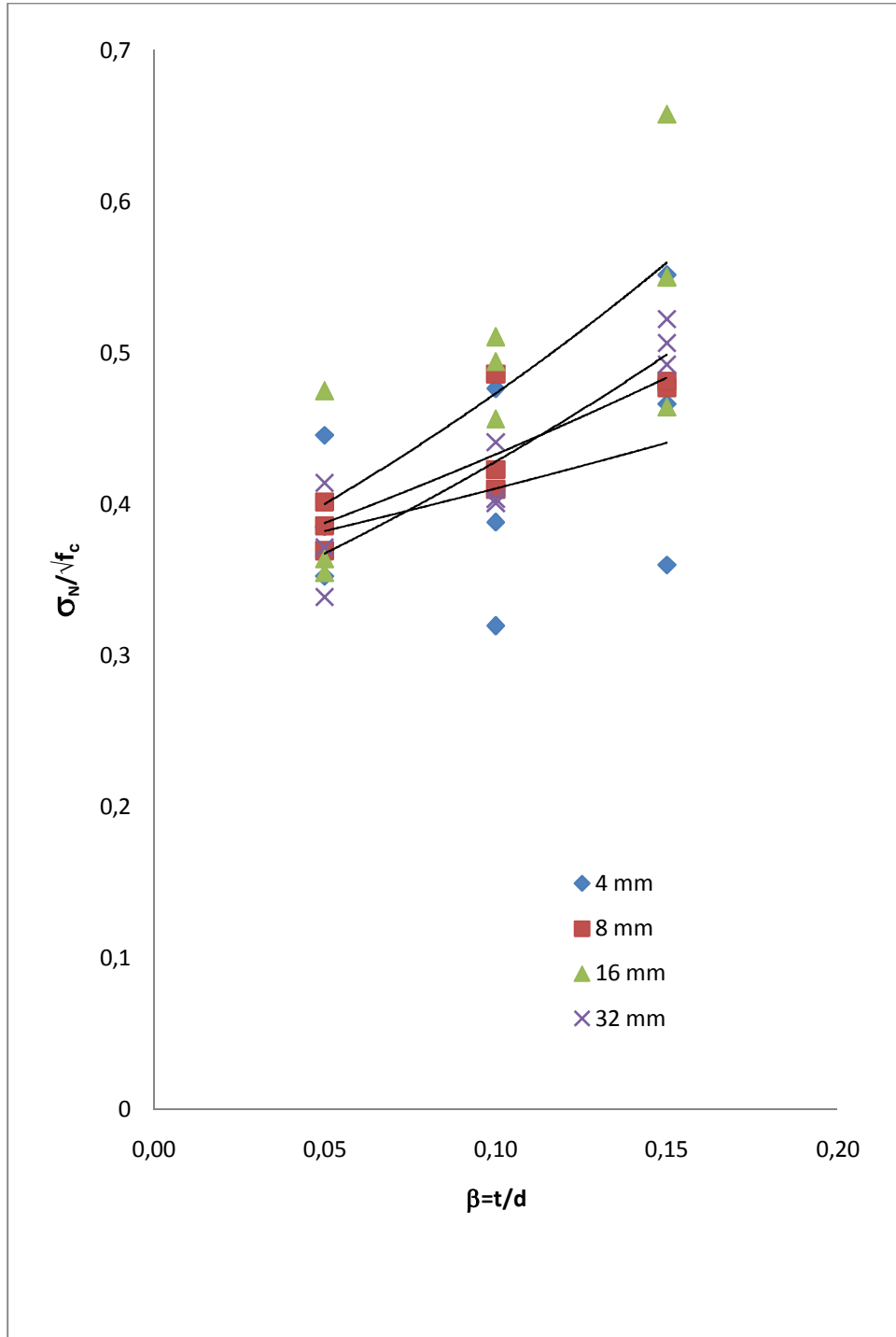
Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ (N/mm ²)
Seri I	150	7.5	0.05	94.8	2.68
		7.5		98.7	2.79
		7.5		90.8	2.57
Seri II	150	15	0.10	100.8	2.85
		15		119.5	3.38
		15		104	2.94
Seri III	150	22.5	0.15	117.3	3.32
		22.5		118.3	3.35
		22.5		112.3	3.18

Tablo 3.3. $d_{\max}=16$ mm’lik Küp numunelerin deney sonuçları ($f_c=42.6$ MPa)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ (N/mm ²)
Seri I	150	7.5	0.05	81.9	2.32
		7.5		84	2.38
		7.5		109.6	3.10
Seri II	150	15	0.10	114	3.23
		15		117.8	3.33
		15		105.3	2.98
Seri III	150	22.5	0.15	107.1	3.03
		22.5		126.9	3.59
		22.5		151.7	4.29

Tablo 3.4. $d_{\max}=32$ mm’lik Küp numunelerin deney sonuçları ($f_c=46.6$ MPa)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ (N/mm ²)
Seri I	150	7.5	0.05	81.7	2.31
		7.5		89.6	2.54
		7.5		99.9	2.83
Seri II	150	15	0.10	97.3	2.75
		15		96.7	2.74
		15		106.4	3.01
Seri III	150	22.5	0.15	126	3.57
		22.5		118.8	3.36
		22.5		122.2	3.46



Şekil 3.1. $\beta=t/d$ oranına göre betonun yarmada-çekme mukavemetinin değişimi

3.2. Boyut Etkisi – Malzeme Deney Sonuçları

Tablo 3.5. $d_{\max}=4$ mm’lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları

($f_c=26.6$ MPa, $B=5.2$, $d_0=69.05$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	5	0.10	14,7	3,743
				15,3	3,896
				15,0	3,820
Seri II	100	10	0.10	56,4	3,591
				53,2	3,387
				53,9	3,431
Seri III	200	20	0.10	152,7	2,430
				181,2	2,884
				162,3	2,583

Tablo 3.6. $d_{\max}=4$ mm’lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları

($f_c=31.0$ MPa, $B=6.18$, $d_0=45.61$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	8	0.16	19,3	4,915
				18,6	4,736
				15,3	3,896
Seri II	100	16	0.16	54,4	3,463
				50,1	3,189
				52,7	3,355
Seri III	200	32	0.16	182,7	2,908
				148,2	2,359
				182,2	2,900

Tablo 3.7. $d_{\max}=8$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları $(f_c=27.0$ MPa, $B=5.21$, $d_0=72.03$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	5	0.10	16,7	4,253
				15,0	3,820
				18,7	4,762
Seri II	100	10	0.10	48,2	3,069
				52,9	3,368
				50,5	3,215
Seri III	200	20	0.10	157,0	2,499
				188,7	3,003
				170,6	2,715

Tablo 3.8. $d_{\max}=8$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları $(f_c=30.5$ MPa, $B=6.76$, $d_0=47.45$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	8	0.16	21,1	5,373
				17,5	4,456
				18,9	4,813
Seri II	100	16	0.16	59,4	3,782
				55,4	3,527
				62,0	3,947
Seri III	200	32	0.16	210,1	3,344
				183,0	2,913
				172,9	2,752

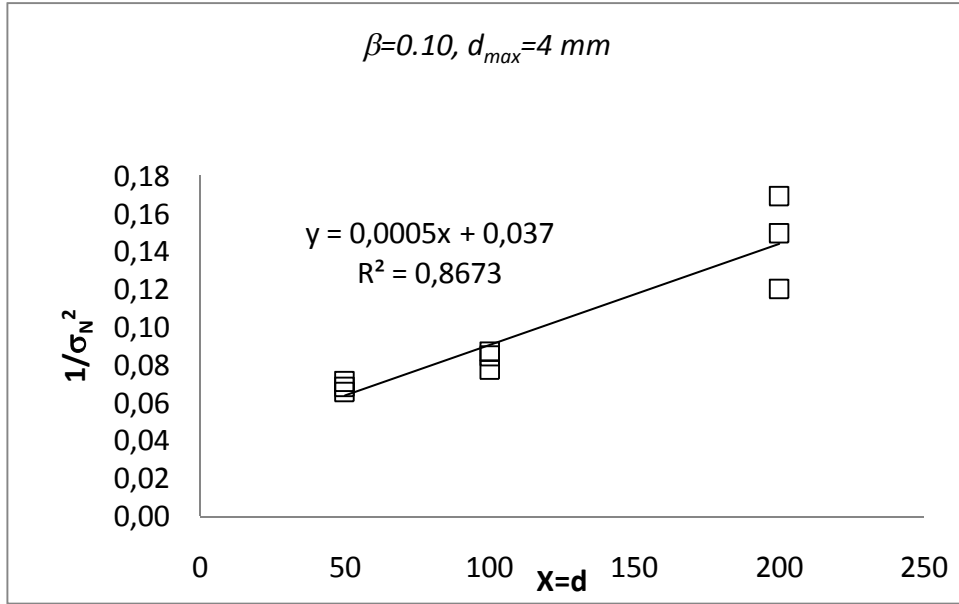
Tablo 3.9. $d_{\max}=16$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.10$ için deney sonuçları $(f_c=31.9$ MPa, $B=4.27$, $d_0=166.77$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	5	0.10	14,9	3,794
				14,2	3,616
				15,4	3,922
Seri II	100	10	0.10	46,7	2,973
				52,0	3,310
				62,9	4,004
Seri III	200	20	0.10	189,3	3,013
				171,7	2,733
				184,5	2,936

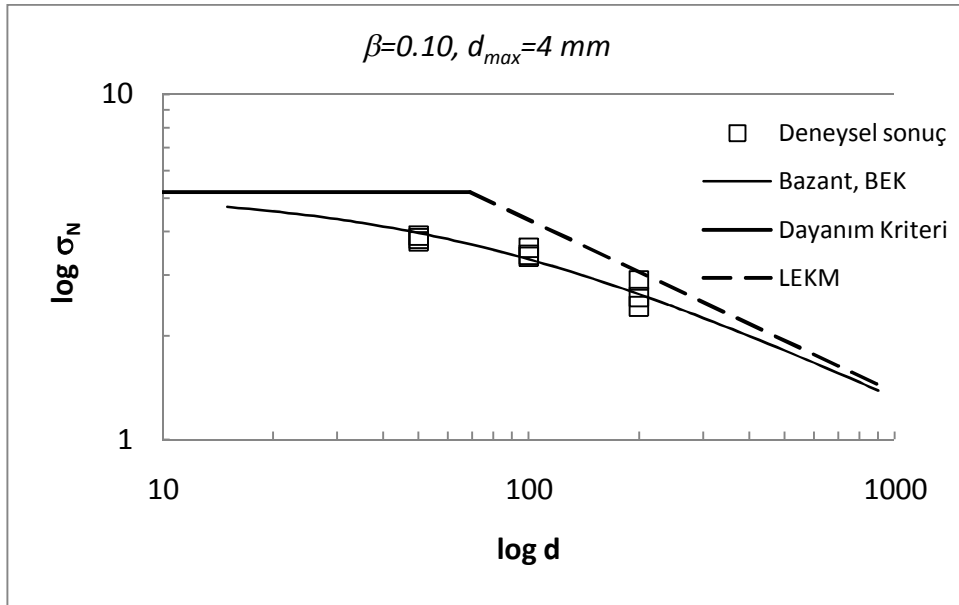
Tablo 3.10. $d_{\max}=16$ mm'lik Küp numunelerin $t/d=0.16$ için deney sonuçları $(f_c=31.7$ MPa, $B=4.68$, $d_0=189.64$ mm)

Seri No	d (mm)	t (mm)	t/d	P (kN)	σ_N
Seri I	50	8	0.16	15,9	4,049
				17,0	4,329
				19,5	4,966
Seri II	100	16	0.16	58,7	3,737
				55,0	3,501
				54,7	3,482
Seri III	200	32	0.16	213,2	3,393
				211,1	3,360
				202,2	3,218

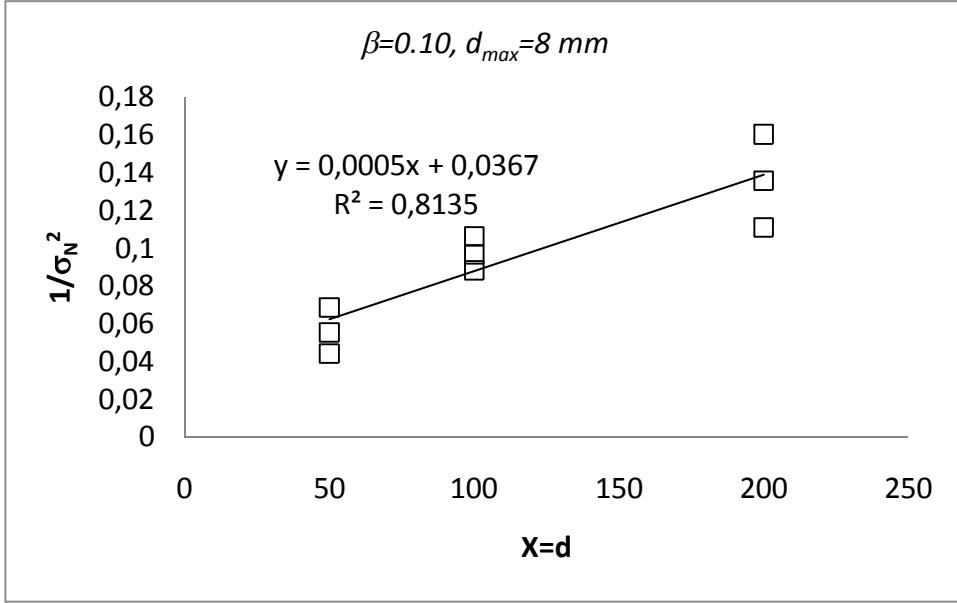
3.2.1. $\beta=0.1$ için Numunelerin BEK' ya Göre Formülasyon ve Grafikleri



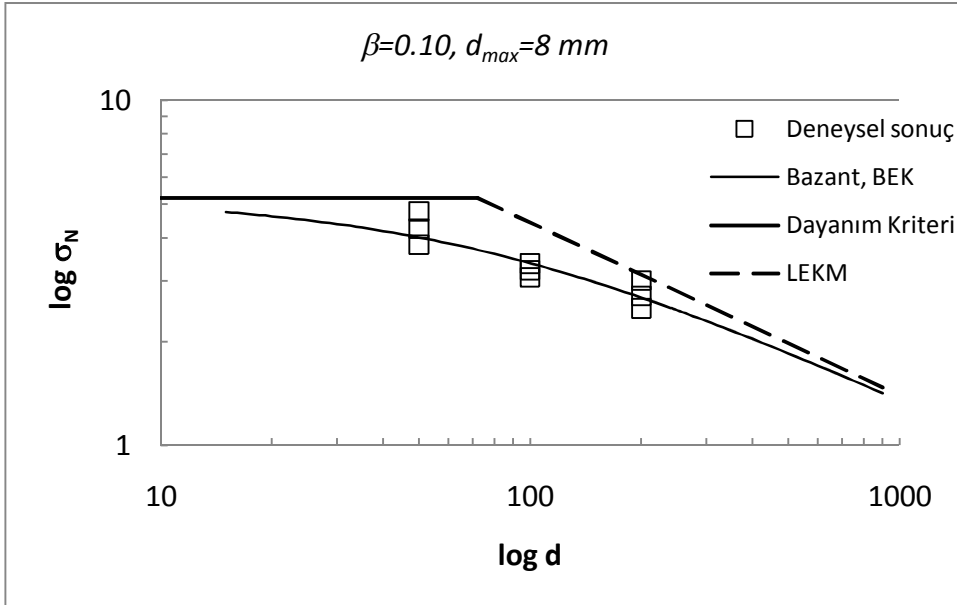
Şekil 3.2. $d_{max}=4 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için BEK lineerizasyon işlemi



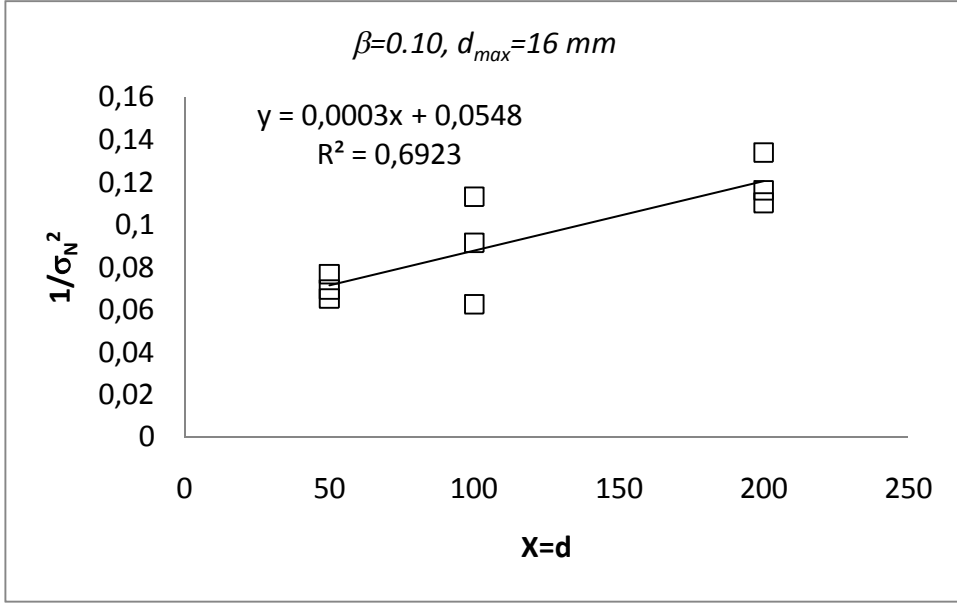
Şekil 3.3. $d_{max}=4 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için Bazant'ın BEK



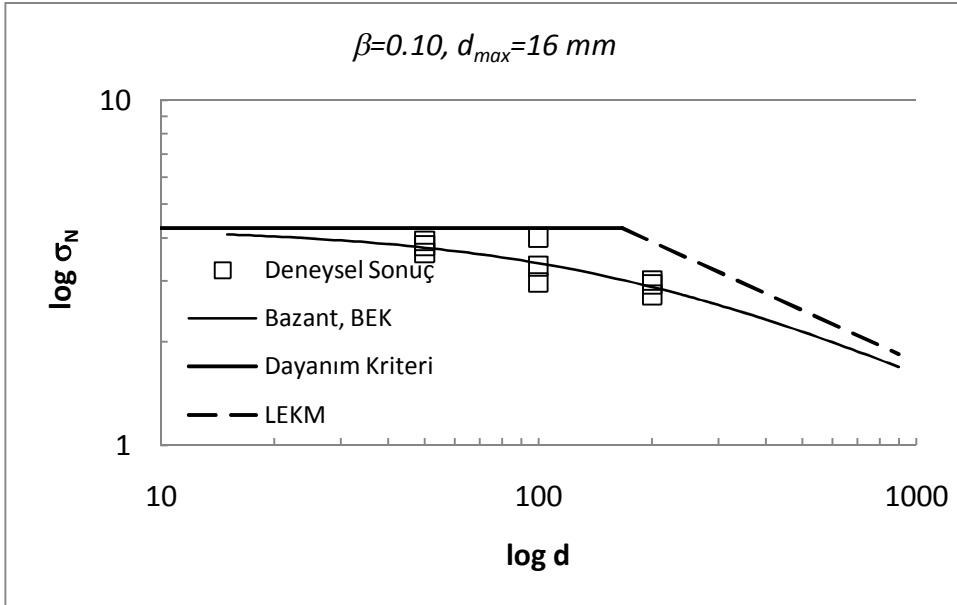
Şekil 3.4. $d_{max}=8 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için BEK lineerizasyon işlemi



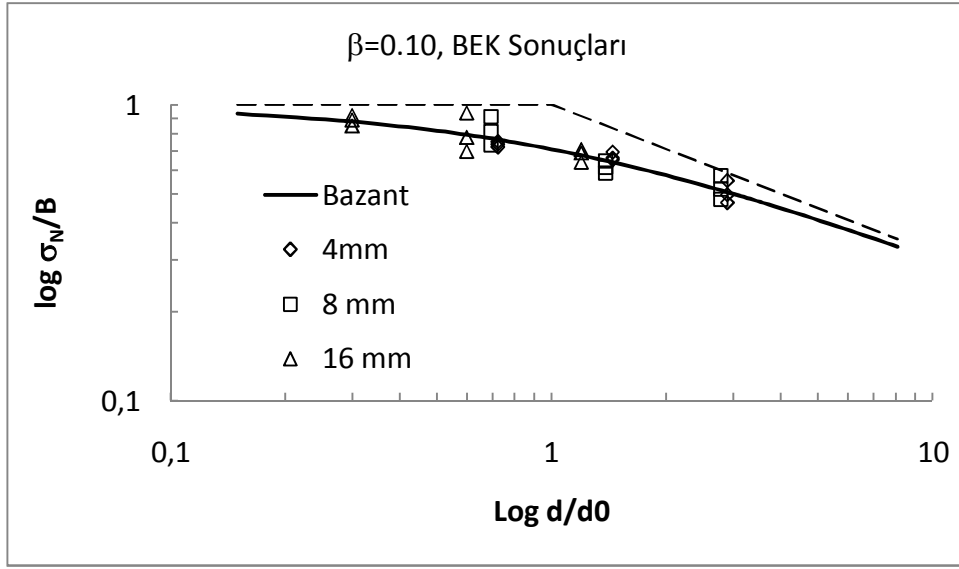
Şekil 3.5. $d_{max}=8 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için Bazant'ın BEK



Şekil 3.6. $d_{max}=16 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için BEK lineerizasyon işlemi

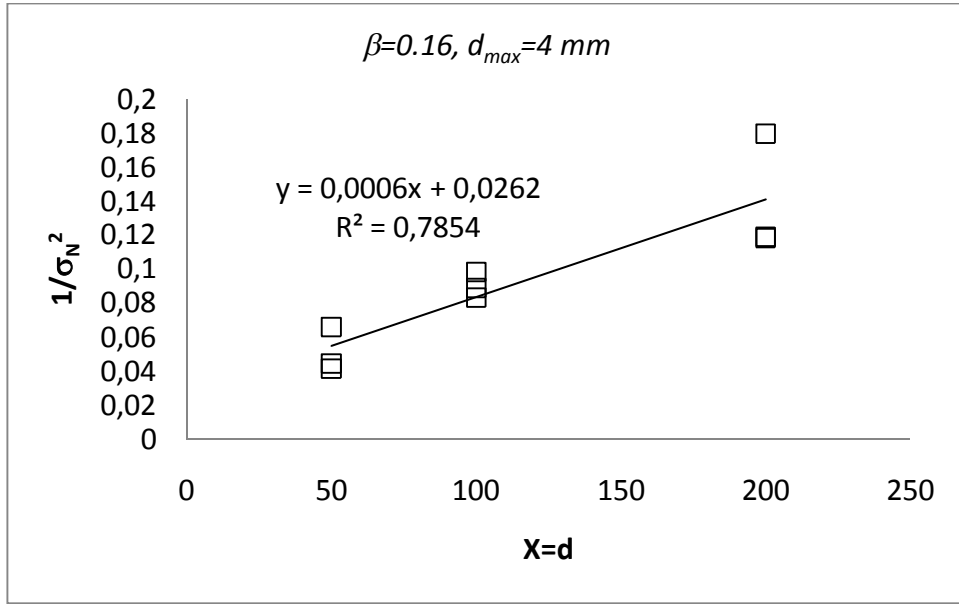


Şekil 3.7. $d_{max}=16 \text{ mm}$, $\beta=0.1$ için Bazant'ın BEK

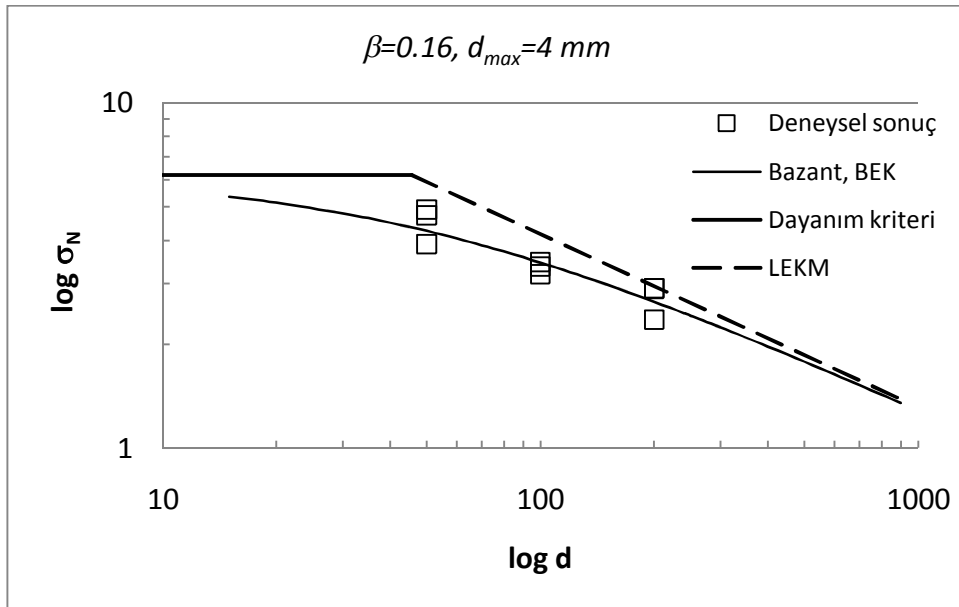


Şekil 3.8. $\beta=0.10$ için BEK toplu gösterimi

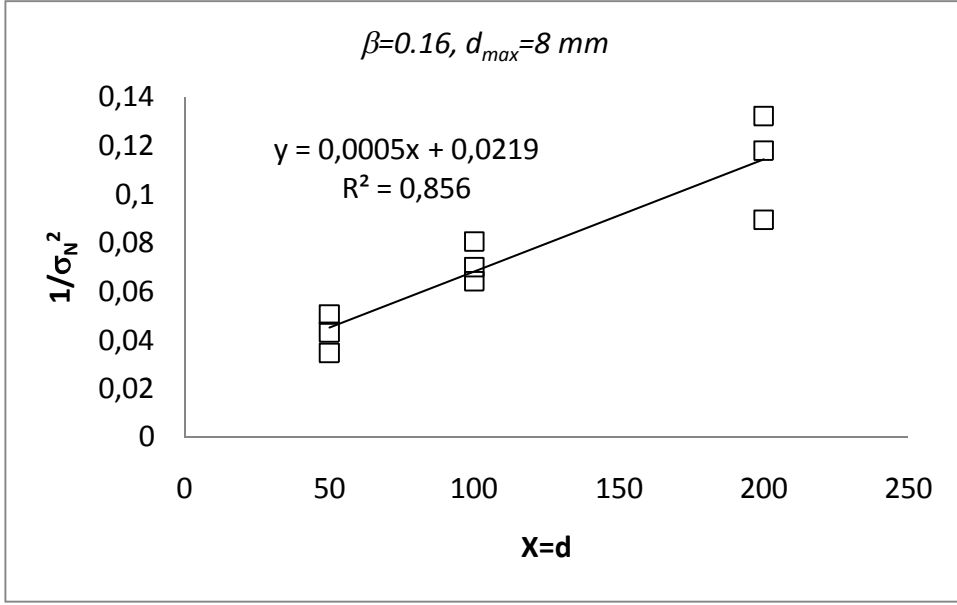
3.2.2. $\beta=0.16$ için Numunelerin BEK' ya Göre Formülasyon ve Grafikleri



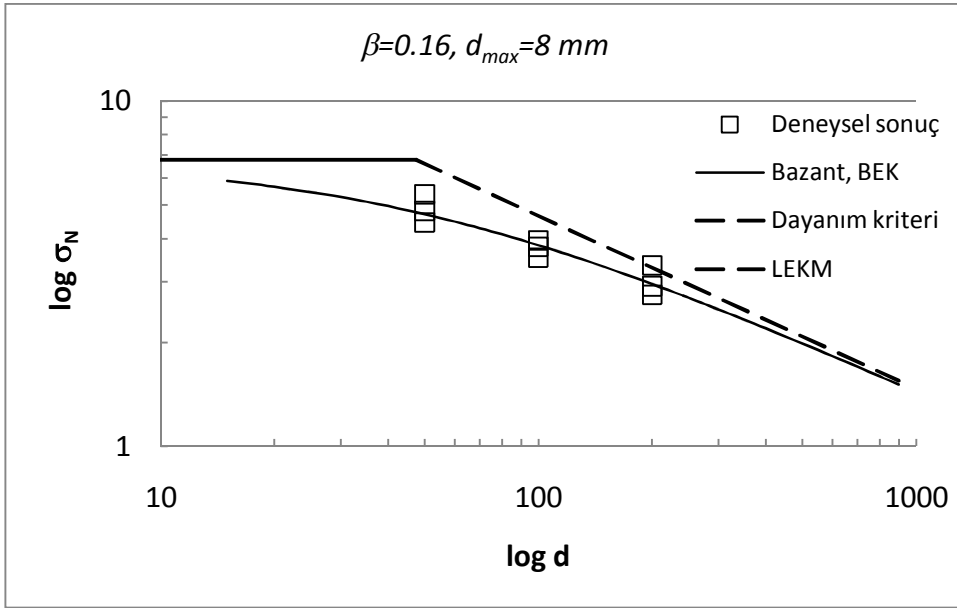
Şekil 3.9. $d_{max}=4 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için BEK lineerizasyon işlemi



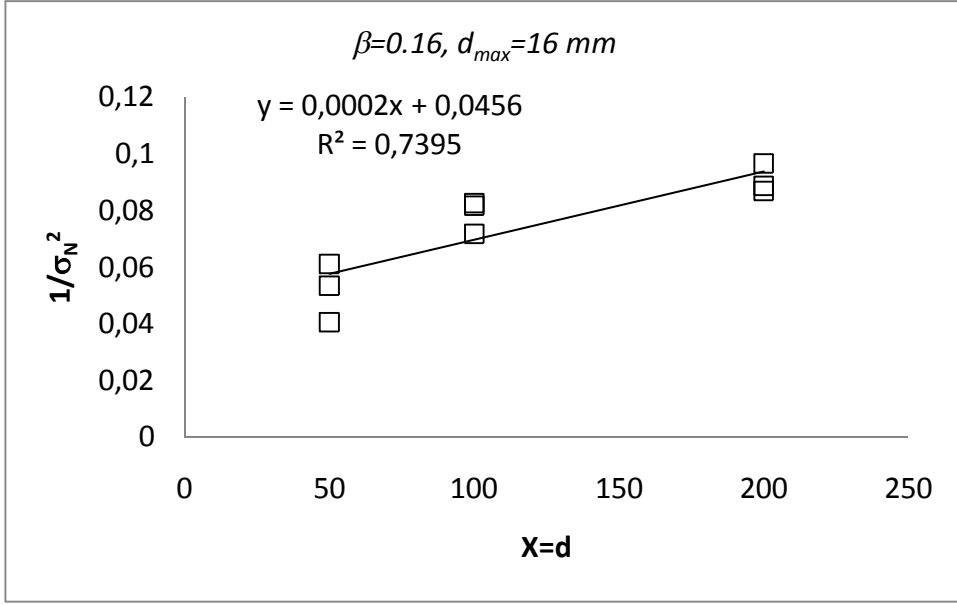
Şekil 3.10. $d_{max}=4 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için Bazant'ın BEK



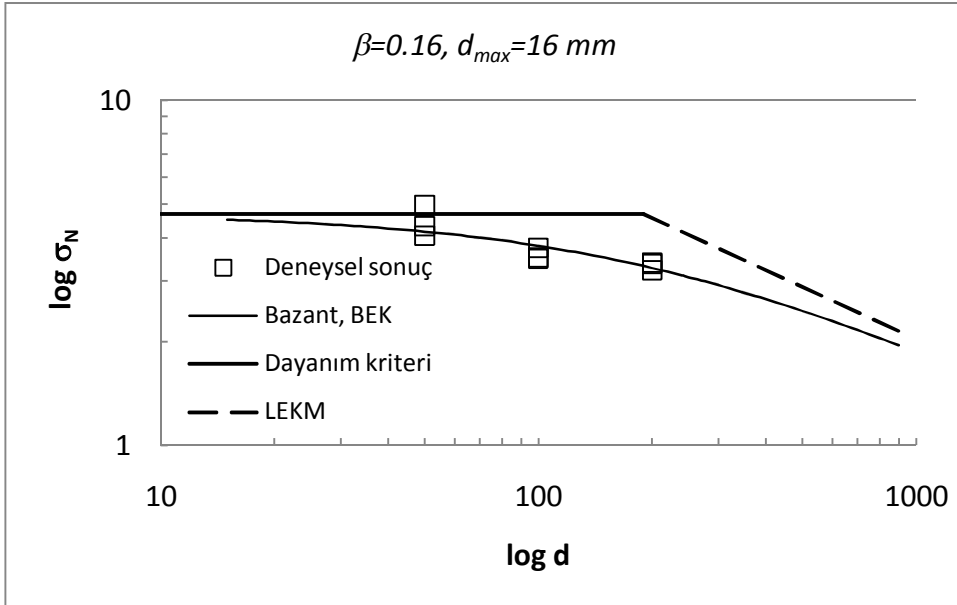
Şekil 3.11. $d_{max}=8 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için BEK lineerizasyon işlemi



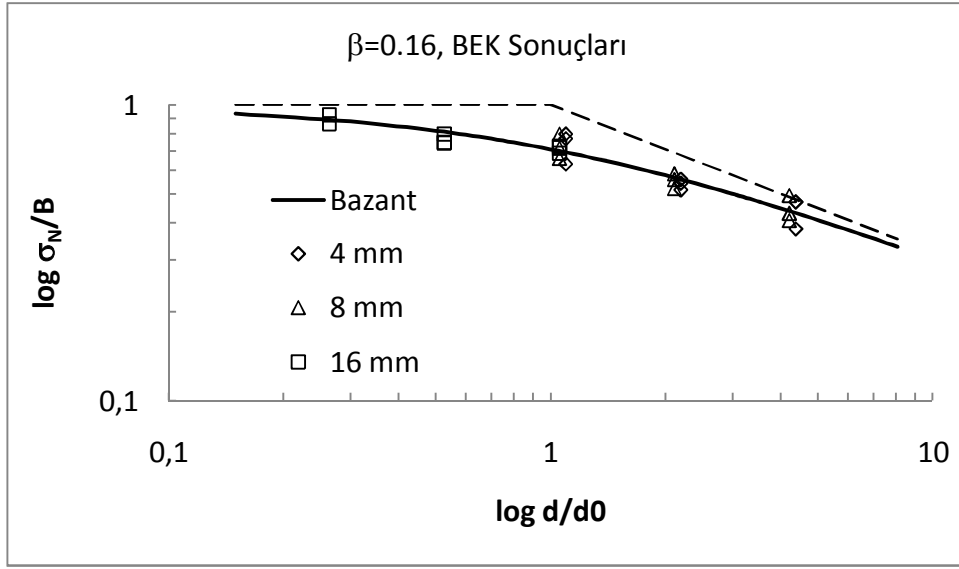
Şekil 3.12. $d_{max}=8 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için Bazant'ın BEK



Şekil 3.13. $d_{max}=16 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için BEK lineerizasyon işlemi



Şekil 3.14. $d_{max}=16 \text{ mm}$, $\beta=0.16$ için Bazant'ın BEK



Şekil 3.15. $\beta=0.16$ için BEK toplu gösterimi

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan deneysel ve teoriksel çalışmalar sonucunda, betonun küp yarmada çekme dayanımı üzerine malzeme ve boyut parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Buna göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- 1) Yapılan deneysel çalışmalarda, β = yükleme şerit genişliği / numune boyutu ile betonun nominal yarmada-çekme mukavemeti arasındaki ilişki Rocco v.d. [51] tarafından belirlenen analitik yaklaşımlarla uyushmaktadır.
- 2) Yapılan çalışmalarda betonun yarmada-çekme mukavemetinde boyut etkisinin Bazant'ın BEK iyi uyduğu tespit edilmiştir. Nitekim minimum korelasyon katsayısı $r=0.83$ çıkması bunu ispatlamaktadır.
- 3) Literatürde silindir yarmada-çekme mukavemeti üzerine birçok boyut etkisi çalışmaları mevcutken, küp yarma için böyle bir çalışmaya şimdiye kadar sadece $d_{max}=3$ mm için harç numuneleri için denenmiştir. Bu çalışmada $d_{max} = 4, 8, 16$ mm'lik betonlar kullanıldığından bu konuda öncüdür.
- 4) Yarmada-çekmede boyut etkisi çalışmalarında şimdiye kadar (β = yükleme şerit genişliği / numune boyutu) ilişkisi dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada ise $\beta = 0.10$, 0.16 için (bunlar uygulamada yaygın kullanılır, hatta Rocco v.d. [51] e göre $\beta =0.16$ Şekil 1.6 da da görülebileceği gibi standart aralığın üst limit değeridir) dikkate alınmıştır.
- 5) Dane çapı küçüldükçe genelleştirilmiş BEK davranışlarında görülebileceği gibi malzeme davranışı gevrek olmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. **Demir, F., Gençoğlu, M., Korkmaz, A. and Tekeli, H.,** 2006. Beton basınç dayanımının yapısal davranışa etkisi, 7. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 28-30 Kasım.
2. **Shah, S.P. ve Taşdemir, M.A.,** 1994. Role of Fracture Mechanics in Concrete Technology, *Advances in Concrete Technology*, pp. 161-202, Ed. Malhotra V.M., CANMET
3. **Hillerborg, A., Modeer, 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.
4. **Bazant, Z.P. and Kazemi, M. T.,** 1990. Determination of Fracture Energy, Process Zone Length, and Brittleness Number from Size Effect, with Application to Rock and Concrete, *International Journal of Fracture*, **44**, 111-131.
5. **Jenq, Y.S. and Shah, S.P.,** 1985. Two Parameter Fracture Model for Concrete, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, **4**, 1227-1241.
6. **Nallathambi, P. and Karihaloo, B.L.,** 1986. Determination of Specimen-size Independent Fracture Toughness of Plain Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **38**, 135, 67-76.
7. **Swartz, S.E. ve Refai, T.M.E.,** 1988. Influence of Size Effects on Opening Mode Fracture Parameters for Precracked Concrete Beams in Bending, *Fracture of Concrete and Rock*, 243-254.
8. **Shah, S.P., Rilem, TC 89-FMT.,** 1990. Size-effect Method for Determining Fracture Energy and Process Zone Size of Concrete, *Materials and Structures*, **23**, 138, 461-465.
9. **Hillerborg, A.,** 1985. The Theoretical Basis of a Method to Determine the Fracture Energy (GF) of Concrete, *Materials and Structures*, **18**, 106, 291-296.
10. **Eser, Ö.M. and Taşdemir M.A.,** 2002. Kırılma mekaniği modellerinin çentikli beton disk numunelere uygulanması. *İtü dergisi/d mühendislik*, **2**, 63-74.

11. **Tang, T., Shah, S.P. and Ouyang, C.,** 1992. Fracture Mechanics and Size Effect of Concrete in Tension, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 118, 11, 3169-3185.
12. **Tang, T., Ouyang, C. and Shah, S.P.,** 1996. A Simple Method for Detemining Material Fracture Parameters from Peak Loads, *ACI Materials Journal*, 93, 2, 147-157.
13. **Yang, S., Tang, T., Zollinger, D.G. and Gurjar, A.,** 1997. Splitting Tension Tests to Determine Concrete Fracture Parameters by Peak-load Method, *Advance Cement Based Materials*, 5, 18-28.
14. **Griffith, A.A.,** 1921. The phenomana of rupture and flaw in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London, Series A, 221, 163-198s.
15. **Reda Taha, M.M. and Shrive, N.G.** Fracture of Civil Engineering Materials ENCI 617. Fracture of Concrete-Lecture Notes. 1-26.
16. **Kesler, C.E., Naus D.J. and Lott J.L.,** 1971. Fracture mechanics-its applicability to concrete, In:Proc., Int. Conf. On the Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, *The Soc. of Mater. Sci.*, 4, 113-124.
17. **Bazant, Z.P. and Xi, Y.,** 1990, Statistical size effect in concrete structures:Nonlocal theory, *Center for Advanced Cement Based Materials Report*, 89-12/B623s, Northwestern University, Evanston, IL.
18. **Bazant, Z.P., Kazemi, M.T. and Gettu, K.,** 1989. Recent studies of size effect in concrete structures, *In Transactions of the Tenth International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, pp. 85-93, Ed. Hadjian, A.H.
19. **Bazant, Z.P.,** 1984. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, *Journal of Engineering Materials, ASCE*, 110, 518-535.
20. **Bazant, Z.P., Kazemi, M.T., Hasegawa, T. and Mazars, J.,** 2000. Size effect in Brazilian split-cylinder tests: measurement and fracture analysis, *Int. Journal of Solids and Structures* 37, 69-80.
21. **Bazant, Z.P. and Gopalaratnaml, V.S.,** 1999. Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties Reported by ACI Committee 446, Fracture Mechanics Report.

22. **Neville, A.M.**, 1995. Properties of concrete. Fourth Edition, Longman, London,
23. **Kotsovos, M.D.**, 1984. Concrete. A Brittle Fracturing Material, *Materials and Construction*, **17**, 107-115.
24. **Wang, E.Z., and Shrive, N.G.**, 1995, Brittle Fracture in Compression: Mechanisms, Models and Criteria, *Engineering Fracture Mechanics*, **52**, 1107-1126.
25. **Shrive, N.G., and El-Rahaman, M.**, 1985. Understanding the Cause of Cracking in Concrete: A Diagnostic Aid, *Concrete International*, **5**, 39-44.
26. **Gettu, R. and Shah, S.P.**, 1992, Fracture mechanics and high strength concrete, In G-45, 1-75.
27. **Şener, S.**, 1993. Yüksek dayanımlı betonda kırılma mekaniği, Prof. İ. Turgay Sabis Anısına Sempozyum, 24 Kasım, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
28. **Arıcı, E.**, 2003. Tekil temellerin yatak mukavemetinde boyut etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
29. **Bazant, Z.P., Gettu, K. and Kazemi, M.T.**, 1989. Prediction of material fracture parameters and structure response from size effect., *Center for Advanced Cement Based Composites Report*, **89-3/498p** Northwestern University, Evanston, IL.
30. **Bazant, Z.P. and Becq-Giraudon, E.** 2002. Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. *Cement & Concrete Research* **32**, 529-556.
31. **Planas, J. and Elices, M.**, 1991. Nonlinear fracture of cohesive materials, *Int. J. Fract.* **51**, 139-157
32. **Planas, J., Guinea G.V. and Elices M.**, 1997. Generalized size effect equation for quasibrittle materials, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* **20**, 671-687.
33. **Rocco, C., Guineab, G. V., Planasb J. and Elices M.** 2001, Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view. *Cement and Concrete Research.*, **31**, 73-82.
34. **Hawkins, N.M.**, 1968. The bearing strength of concrete loaded through rigid plates, *Mag. Concrete Res.*, **20**, 31-40.

35. **İnce, R. and Arıcı, E.**, 2004. Size effect in bearing strength of concrete cubes, *Construction and Building Materials*, **18**, 603-609.
36. **Bazant, Z.P., Pfeiffer, P.A.**, 1987. Determination of fracture energy properties from size effect and brittleness number. *ACI Mater J*, **84**:463–80.
37. **Richart, F.E., Brandtzaeg, P.L., and Brown, P. L.**, 1923, A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses”, Bulletin No. 185, Engineering Experiment Station, University of Illinois, USA.
38. **Ramouldi, J.P., and Batson, G.B.**, 1963, Mechanism of Crack Arrest in Concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, EM3, 147-168
39. **Irwin, G.R.** 1957, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *J. Appl. Mech.* **24**, 361-364
40. **İnce, R.** 1998. Betonarme yapı elemanlarında basınç-kesme kırılmasının ve boyut etkisinin deneysel ve numerik olarak incelenmesi. *Doktora tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Ens.Elazığ
41. **Dugdale, D.S.**, 1960, Yielding of steel sheets containing slits, *J. Mech. Phsy. Solids*, **8**, 100-104
42. **Bilby, B.A., Cottrell, A.H. and Swinden K.H.**, 1963, The spread of plastic yield from a notch, *Proc. Roy. Soc. London*, **A272**, 304-314.
43. **Bache, H.H.**, 1986, Fracture mechanics in design of concrete and concrete structures, In G-23, 577-586
44. **Carpinteri, A.**, 1994, Scaling laws and renormalization groups for the strenght and toughness of disordered materials, *Int. J. Solids Struct*, **31**, 291-302
45. **Mandelbrot, B.**, 1982, The fractal geometry of nature. W.H.Freeman and Company
46. **Brown, J.H.**, 1972, Measuring the fracture toughness of cement paste and mortars. *Cement Cocr. Res.*3, 475-480
47. **İnce, R. ve Arslan, A.**, 2000, Kesme açıklığı kısa kayma donatısız betonarme kirişlerde boyut etkisi, *Tr. J. Engin. Environ. Sci.*, 69-77
48. **Carpinteri, A. and Puzzi S.** 2008, Self-similarity in concrete fracture: size-scale effects and transition between different collapse mechanisms. *Int. J. Fract.* **154**, 167–175

- 49. **Lobo Carneiro, F. and Barcellos A.**, 1949. Resistance a la Traction des Betons, *Int. Assoc. Test. Res. Lab. Mater. Struct. RILEM Bull.* **13**, 98-125
- 50. **Timoshenko S.P. and Goodier J.N.**, 1991. Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York
- 51. **Rocco, C., Guineab, G. V., Planasb J. and Elices M.**, 1995, The effect of the boundary conditions on the cylinder splitting strength, in *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2*, pp. 75-84, Ed. F.H.Wittmann, Aedificatio Publishers, Freiburg

ÖZGEÇMİŞ

1983 Malatya doğumluyum. İlköğretimimi Malatya Gazi İlköğretim Okulu'nda, orta öğretimimi Ankara Bahçelievler Deneme Lisesi'nde tamamladım. 2007 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldum. Aynı yıl Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans eğitimime başladım. Şu an da kendi kurmuş olduğum inşaat şirketi ile çalışmalarımı sürdürmekteyim.