Çukurova Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi Dergisi
Çukurova University
Journal of the Faculty of Engineering
ISSN: 2757-9255 CİLT/VOLUME: 41 SAYI/ISSUE: 3 EYLÜL/SEPTEMBER 2026

Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonlarda Küp Numune Boyutunun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Mehmet ALTIN [1,a], **İsmail Hakkı ÇAĞATAY** [2,b]

[1]*Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye*
[2]*Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye*

[a]***ORCID**: 0009-0004-8498-6117;* [b]***ORCID**: 0000-0001-5182-776X*

Makale Bilgileri
Geliş : 20.02.2026
Kabul : 05.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1894002

Sorumlu Yazar
Mehmet ALTIN
mehmetaltin@mersin.edu.tr

Anahtar Kelimeler
Basınç dayanımı
Boyut etkisi
Cidar etkisi
Küp numune

***Atıf şekli:** ALTIN, M., ÇAĞATAY, İ.H., (2026). Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonlarda Küp Numune Boyutunun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 41(3), 779-789.*

ÖZ

Bu çalışma, hedef basınç dayanımları 10-50 MPa aralığında değişen yedi farklı normal dayanımlı beton grubunda, numune boyutunun mekanik performans üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırma kapsamında; 70,7, 100, 120, 150 ve 200 mm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler üretilerek boyutun dayanım üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bulgular, K-I dışındaki tüm gruplarda, numune boyutu arttıkça dayanımın sistematik şekilde yükseldiğini göstermektedir. Özellikle K-VII serisinde dayanım, 70,7 mm'den 200 mm'ye geçildiğinde 31,67 MPa'dan 56,60 MPa'ya ulaşmıştır. İstatistiki analizler sonucu, boyut ile dayanım arasında $y=3{,}183x^{0{,}4836}$ ($R^2=0{,}9683$) formülüyle ifade edilen güçlü bir matematiksel korelasyon saptanmıştır. Küçük ölçeklerdeki düşük dayanımlar çeper (cidar) etkisi ve heterojenliğe bağlanırken; K-I'deki sapmada ise malzemenin düşük dayanım kapasitesinin, boyut etkisinin önüne geçerek kırılmada belirleyici faktör olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, büyük numunelerin çeper etkisinden arınarak gerçek malzeme dayanımını daha kararlı yansıttığı belirlenmiştir.

Investigation of the Effect of Cube Sample Size on Compressive Strength in Concrete of Different Strength Classes

Article Info
Received : 20.02.2026
Accepted : 15.10.2026
DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1894002

Corresponding Author
Mehmet ALTIN
mehmetaltin@mersin.edu.tr

Keywords
Compressive strength
Size effect
Wall effect
Cube specimen

***How to cite:** ALTIN, M., ÇAĞATAY, İ.H., (2026). Investigation of the Effect of Cube Sample Size on Compressive Strength in Concrete of Different Strength Classes. Cukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 41(3), 779-789.*

ABSTRACT

This study investigates the effect of specimen size on mechanical performance across seven normal-strength concrete groups with target compressive strengths of 10–50 MPa. Cube specimens with edge lengths of 70.7, 100, 120, 150, and 200 mm were analyzed. Findings demonstrate a systematic increase in strength as specimen size increases in all groups except K-I. Specifically, K-VII series strength rose from 31.67 MPa to 56.60 MPa when scaling from 70.7 mm to 200 mm. Statistical analyses revealed a strong size-strength correlation, expressed as $y=3.183x^{0.4836}$ ($R^2=0.9683$). Lower strengths at smaller scales are attributed to the wall effect and heterogeneity. The K-I deviation suggests the material's low inherent strength overrides the size effect, governing the failure mechanism. Ultimately, larger specimens were found to eliminate the wall effect, thereby reflecting the true material strength more consistently.

1. GİRİŞ

Beton; hammadde kaynağı ulaşılabilirliği, üretim ve taşıma kolaylığı gibi önemli avantajları sayesinde inşaat sektörünün en vazgeçilmez yapı malzemesidir. Projelendirilen yapıların ihtiyaç duyduğu güvenlik ve dayanıklılık kriterleri, üretilen betonun kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu kalitenin denetiminde ise en temel parametre betonun basınç dayanımıdır.

Betonun karakteristik basınç dayanımının belirlenmesi amacıyla, taze betondan alınan numuneler standart kür koşullarında sertleşmeye bırakılmakta ve ardından laboratuvar ortamında tek eksenli basınç cihazları aracılığıyla kırılma yüküne tabi tutulmaktadır. Bu testlerde kullanılan numune geometrileri, ilgili yönetmeliklere göre değişiklik gösterse de, uygulamada yaygın olarak 150 mm'lik küp ve 150x300 mm'lik silindir numuneler esas alınmaktadır [1,2]. Ancak elde edilen dayanım değerleri; kür ortamı, yükleme hızı, agrega granülometrisi ve numune şekil ve boyutları gibi pek çok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Literatürde 'boyut' ve 'şekil etkisi' (size and shape effect) olarak tanımlanan numune geometrisinin basınç dayanımı üzerindeki belirgin etkisi, betonun mekanik davranış analizindeki en kritik ve tartışmalı başlıklardan biridir [3].

Boyut Etkisi (Size Effect), en genel tanımıyla, malzemenin nominal dayanımının numunenin geometrik boyutlarına bağlı olarak değişmesi olayıdır. Klasik sürekli ortam mekaniği teorileri (elastisite veya plastisite), dayanımın malzeme boyutundan bağımsız bir malzeme sabiti olduğunu varsaysa da; beton gibi yarı-gevrek (quasi-brittle) malzemelerde numune boyutu büyüdükçe nominal basınç dayanımının genellikle azaldığı, çok sayıda deneysel ve teorik çalışma ile ortaya konulmuştur [4-6].

1.1. Klasik Boyut Etkisi Üzerine Temel Çalışmalar

Betonun mekanik davranışında boyut etkisini inceleyen ilk kapsamlı çalışmalardan biri Gonnerman [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, numunenin yükseklik/çap (l/d) oranının dayanım üzerindeki kritik rolünü saptamış; l/d oranı 1,5'in altına düştüğünde ölçülen dayanımın hızla arttığını, 3,0 ve 4,0 oranlarında ise dayanımın standart silindir dayanımının sırasıyla %95 ve %90'ına düştüğünü rapor etmiştir. Benzer şekilde, kütle betonları üzerine çalışan Blanks ve McNamara [8], 1:12 ölçeğine varan geniş çaplı silindir numunelerle yaptıkları testlerde, numune çapı arttıkça birim dayanımın sistematik bir düşüş eğilimi gösterdiğini deneysel verilerle kanıtlamışlardır.

Daha sonraki yıllarda Neville [9], farklı boyutlardaki (70, 125 ve 150 mm) küp numuneler üzerinde çalışarak, küçük numunelerin büyüklerden daha yüksek dayanım verdiğini doğrulamış ve farklı geometriye sahip numunelerin dayanımlarını birbirine dönüştüren genel bağıntılar geliştirmiştir. Yakın dönem çalışmalarından Gyurkó ve Nemes (2020) ise, C20/25 ile C50/60 arasındaki beton sınıflarında yaptıkları deneylerde, boyut etkisinin küp numunelerde silindirlere göre daha belirgin olduğunu; silindir numunelerin dayanımının 0,004 m^3 hacimden, küplerin ise 0,006 m^3 hacimden sonra stabilize olduğunu gözlemlemişlerdir [3].

Teorik çerçevede ise Bažant'ın Boyut Etkisi Yasası (SEL) ve Carpinteri'nin Çok Fraktal Ölçekleme Yasası (MFSL) öne çıkmaktadır. Kırılma mekaniğindeki enerji dengesine dayanan SEL, numune boyutu büyüdükçe davranışın sünekten gevreğe (lineer elastik kırılma mekanizması) geçtiğini ve dayanımın düştüğünü modeller [10]. MFSL ise malzemenin fraktal doğasına odaklanarak, boyut küçüldükçe dayanımın teorik olarak arttığını, ancak çok büyük boyutlarda sabit bir "homojen rejim" değerine yakınsadığını savunur [11].

1.2. Klasik Boyut Etkisi Üzerine Temel Çalışmalar

Literatürdeki genel eğilim "boyut arttıkça dayanım azalır" şeklinde olsa da, malzeme yapısı, çevresel koşullar ve deney parametrelerine bağlı olarak bu durumun tersine işlediği (boyut arttıkça dayanımın arttığı) çalışmalar da mevcuttur.

Örneğin Tokyay ve Özdemir [12], yüksek dayanımlı betonlarda 75 mm çapındaki küçük silindirlerin, daha büyük numunelerden daha düşük dayanım verdiğini saptamıştır. Bu durum, küçük numunelerde yüzey

alanı/hacim oranının yüksek olması nedeniyle oluşan "cidar etkisi" (çeper etkisi) ile açıklanmış; agreganın kalıp çeperi nedeniyle homojen dağılamamasının bu sonucu doğurduğu belirtilmiştir.

Benzer bir "ters boyut etkisi", kür koşullarına bağlı olarak Soroka ve Baum [13] tarafından da rapor edilmiştir. Standart nemli kürde klasik boyut etkisi görülürken, kuru ortamlarda (%40-65 bağıl nem) saklanan küçük numunelerin hızlı su kaybı ve büzülme (rötre) çatlakları nedeniyle dayanımlarının düştüğü, büyük numunelerin ise iç nemlerini koruyarak daha yüksek dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Malzeme iç yapısının etkisi üzerine Yuki ve arkadaşları [14], tüf numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada, numune çapı arttıkça dayanımın monotonik olarak arttığını saptamış ve bu durumu malzeme içindeki sert parçacıkların fraktal dağılımıyla ilişkilendirmiştir. Kristal yapılı kayaçlar üzerine yapılan bir başka çalışmada ise, çok küçük boyutlarda (10-30 mm arası) dayanımın %39 ile %91 oranında arttığı bir "yükselen aşama" belirlenmiştir [15]. Bu artış, numune boyutunun malzemenin ortalama tane çapına oranının (tane ölçeği etkisi) artmasıyla malzemenin daha homojen davranmaya başlamasına ve kristaller arası makaslama direncinin artmasına bağlanmıştır. Ayrıca bazı yarma testlerinde, yük dağılım genişliğinin numune boyutuyla ilişkisinden kaynaklı olarak boyut etkisinin gözlenmediği veya tersine döndüğü durumlar da literatürde yer almaktadır [10].

1.3. Numune Geometrisi ve Mekanik Etkiler

Beton teknolojisinde en yaygın kullanılan iki numune şekli küp ve silindirdir. Aynı beton karışımından hazırlanan numunelerde, küp numunelerin dayanımı genellikle silindir numunelerden daha yüksek çıkmaktadır. Geleneksel betonlarda silindir dayanımı, küp dayanımının yaklaşık %80'i olarak kabul edilir [16]. Silindir numunelerin (özellikle 150x300 mm), yükleme altındaki gerilme dağılımının daha uniform olması ve test makinesinin başlıklarındaki sürtünme etkisinden daha az etkilenmesi nedeniyle daha güvenilir sonuçlar verdiği kabul edilir [17]. Ancak silindirlerin dezavantajı, yükleme yüzeylerinin düzeltilmesi için başlıklama veya taşlama gerektirmesidir.

1.4. Sürtünme ve Yanal Kısıtlama

Test sırasında makine tablaları ile numune yüzeyleri arasındaki sürtünme, numunenin serbestçe yana doğru genişlemesini engeller. Bu durum, numunenin uçlarında yanal bir kısıtlama oluşturarak tek eksenli yüklemeyi uç bölgelerde çok eksenli bir gerilme haline getirir [17].

Silindir numunelerde (l/d =2), numunenin orta kısmında bu kısıtlamadan etkilenmeyen yaklaşık 0.268d uzunluğunda serbest bir bölge kalırken, küplerde (l/d =1) bu kısıtlanmış bölgeler birbirinin üzerine biner. Bu durum, küp numunelerin tüm hacminin yanal olarak hapsedilmesine ve bu sayede yapay bir dayanım artışı göstermesine neden olur [8].

Numunenin narinliği, yani yüksekliğinin çapına veya enine (l/d) olan oranı, ölçülen dayanımı doğrudan belirler. Numunenin narinliği arttıkça ölçülen dayanım azalır. Standart silindirlerde bu oran 2.0 iken, küplerde 1.0'dır. Araştırmalar, dayanımın l/d oranı 1.5'in altına düştüğünde bu orana karşı çok daha hassas hale geldiğini ve dayanımın yapay olarak hızla arttığını göstermektedir [16]. l/d oranı 1.5 ile 2.5 arasında olan numunelerin dayanımı standart silindire çok yakınken (%5 sapma ile), bu oran 3.0 ve 4.0'a çıktığında dayanım standart değerin sırasıyla %95 ve %90'ına düşmektedir [7].

1.5. Düşük ve Normal Dayanımlı Betonlar (DNDB)

Betonun kendi dayanım seviyesi, şekil ve boyut etkisinin şiddetini belirleyen temel bir parametredir. Düşük ve normal dayanımlı betonlarda malzeme daha heterojendir. Bu heterojenlik, numune boyutları ve şekilleri arasındaki dayanım farklarının (boyut etkisi) daha şiddetli görülmesine yol açar [9]. DNDB için silindir/küp dayanım oranı genellikle 1.20 ile 1.25 arasındadır. Ayrıca, döküm yönü ve yerleşme sonrası oluşan boşluklar DNDB numunelerinde dayanımı daha fazla etkiler [18].

Betonun dayanımı arttıkça, içyapı daha homojen hale gelir ancak malzeme davranışı gevrekleşir. Beton sınıfı yükseldikçe, küp ve silindir numuneler arasındaki dayanım farkı azalır ve birbirine yaklaşır [16]. Bazı çalışmalar, yaklaşık 65 MPa dayanım seviyesinden sonra küp ve silindir dayanımlarının neredeyse eşitlendiğini göstermektedir [18].

Farklı geometrideki numunelerden elde edilen sonuçların kıyaslanabilmesi için uluslararası standartlarda ampirik dönüşüm katsayıları kullanılmaktadır. TS EN 206-1 [19], farklı beton sınıfları için karakteristik silindir ($f_{ck,sln}$) ve küp ($f_{ck,küp}$)dayanımı arasındaki ilişkiyi tanımlamış ve beton dayanımı arttıkça aradaki farkın azaldığını standartlaştırmıştır. İlgili standartta belirtilen karakteristik dayanım oranları Çizelge 1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1. TS EN 206-1 e göre küp ve silindir numunelerin basınç dayanımını dönüşümü değerleri

Basınç dayanım sınıfı	En düşük karakteristik silindir dayanımı ($f_{ck,sil}$) (N/mm^2)	En düşük karakteristik küp dayanımı ($f_{ck,küp}$) (N/mm^2)	Dönüşüm oranı ($f_{ck,sil}$/ $f_{ck,küp}$)
C8/10	8	10	0,80
C12/15	12	15	0,80
C16/20	16	20	0,80
C20/25	20	25	0,80
C25/30	25	30	0,83
C30/37	30	37	0,81
C35/45	35	45	0,78
C40/50	40	50	0,80
C45/55	45	55	0,82
C50/60	50	60	0,83
C55/67	55	67	0,82
C60/75	60	75	0,80
C70/85	70	85	0,82
C80/95	80	95	0,84
C90/105	90	105	0,86
C100/115	100	115	0,87

Literatürde numune boyutunun basınç dayanımı üzerindeki etkisine dair birbirine zıt bulgular (artış veya azalış eğilimi) mevcuttur. Bu çalışmada, söz konusu çelişkili durumlar derinlemesine irdelenmiş olup; temel amaç, cidar etkisi ve çevresel kür koşullarının numune boyutu ve dayanım ilişkisi üzerindeki rolünü deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, hedef dayanım aralığı 10-50 MPa arasında değişen yedi farklı beton karışımı tasarlanmış; numuneler 28 gün boyunca açık hava koşullarında kürlenerek eksenel basınç dayanımları ölçülmüştür.

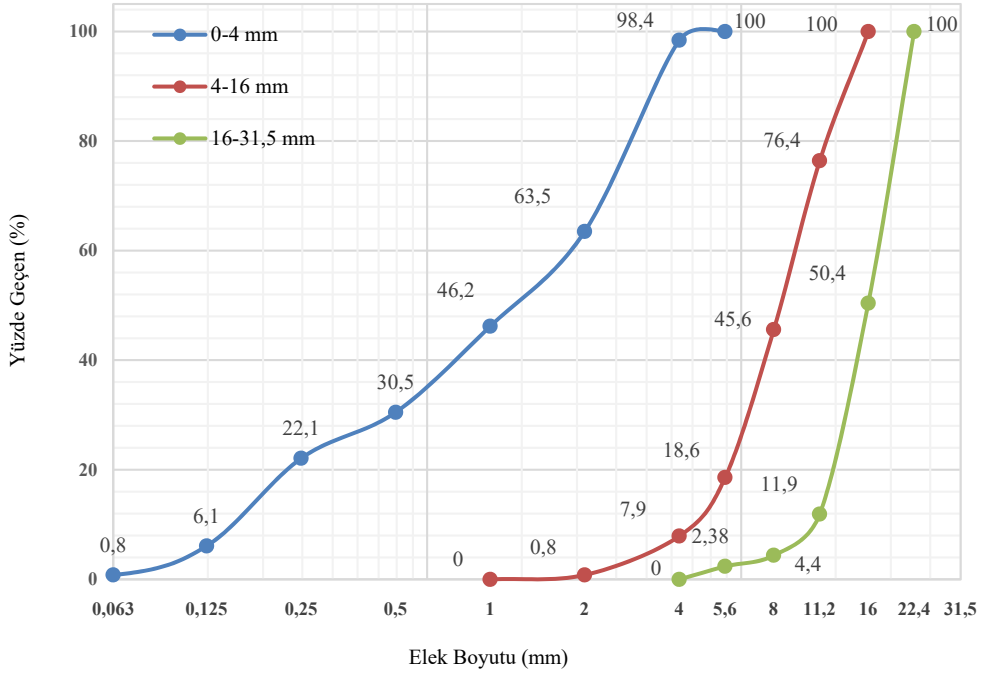
2. YÖNTEM

Bu çalışmada, numune geometrisinin betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Çalışma kapsamında, hedef dayanımları 10 MPa ile 50 MPa arasında değişen yedi farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Özellikle literatürde "Cidar Etkisi" olarak tanımlanan, kalıp yüzeyi ile agrega taneleri arasındaki etkileşimin dayanım üzerindeki rolünü belirginleştirmek amacıyla; karışımlarda kullanılan maksimum agrega çapı (D_{max}) 22,4 mm olarak belirlenmiştir. Üretilen tüm numuneler 28 gün boyunca laboratuvar ortamında açık havada kürlenmiş ve ardından eksenel basınç dayanımları ölçülmüştür. Hazırlanan yedi farklı karışımda bağlayıcı olarak CEM I 52.5 N tipi portland çimentosu kullanılmış olup TS EN 196-1 [20] standardına uygundur, endeks özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Kullanılan çimentonun endeks özellikleri

Kimyasal özellikler	Değerler (%)	Fiziksel özellikler	Değerler
SiO_2	18,90	Özgül ağırlık (gr/cm^3)	3,15
Al_2O_3	4,16	Özgül yüzey (cm^2/gr)	4170
Fe_2O_3	3,04	İncelik, 32µ (%)	5,5
CaO	65,14	İncelik, 90µ (%)	0,4
MgO	1,29	Priz başlangıcı (dakika)	180
SO_3	3,04	Priz bitiş süresi (dakika)	225
K_2O	0,72	Hacim genleşmesi (mm)	1,00
Na_2O	0,34	Mekanik özellikler	Değerler
Cl^-	0,013	Basınç dayanımı	(MPa)
Kızdırma kaybı	2,78	1 Günlük	28,9
Çözünmeyen kalıntı	0,59	2 Günlük	38,8
Toplam katkı (minör)	3,42	7 Günlük	48,6
Serbest CaO	1,10	28 Günlük	55,1

Karışımlar hazırlanırken kullanılan agregaların detaylı granülometrileri Şekil 1'de verilmiştir. Ayrıca, agregaların birim hacim ağırlığı gibi bazı temel fiziksel özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir. Beton üretiminde karıştırma suyu olarak içme suyu kalitesinde şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Agrega elek analizi sonuçları

Çizelge 3. Agrega fiziksel özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri	Agrega tipi		
	0-4 mm	4-16 mm	16-31,5 mm
Kuru birim hacim ağırlığı γk (gr/cm3)	2,46	2,63	2,72
DKY halindeki birim hacim ağırlığı γd (gr/cm3)	2,54	2,67	2,74
İnce agrega görünen birim hacim ağırlık γG (gr/cm3)	2,68	2,72	2,77
Su emme kapasitesi (%)	3,27	1,27	0,72
Nem yüzdesi (%)	1,1	0,71	0,22

Hedef dayanım aralığı 10-50 MPa arasında değişen yedi farklı beton grubu için hazırlanan karışımların malzeme miktarları Çizelge 4'te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 1m^3 için karışım değerleri (kg)

Karışım no		K-I (kg)	K-II (kg)	K-III (kg)	K-IV (kg)	K-V (kg)	K-VI (kg)	K-VII (kg)
Su		144	165	146	143	159	150	154
Çimento		180	260	280	320	400	446	480
Akışkanlaştırıcı 1		0	3,38	2,32	3,38	4,4	5,85	6,5
Akışkanlaştırıcı 2		0	1,04	1,12	1,28	1,6	0	0
Agrega	0-4 mm	1190	1437	1122	1049	900	920	712
	4-16 mm	340	448	218	215	239	354	890
	16-31,5mm	596	0	599	650	667	636	240
Toplam		2450	2310	2365	2377	2365	2506	2576

Hedeflenen boyutlarda numunelerin üretimi için Şekil 2'de görünmekte olan küp kalıplar kullanılmış ve her boyuttan 3 adet olmak üzere toplamda 105 adet küp numune üretilmiştir.



Şekil 2. Numune üretiminde kullanılan kalıplar

Şekil 2'de görülen numuneler, dökümün ardından 24 saat boyunca kalıplarında bekletilmiş, ardından kalıptan çıkarılarak Şekil 3'te gösterildiği üzere 28 gün süreyle açık hava koşullarında kürlenmiştir. Kür süresinin tamamlanmasının ardından, numuneler TS EN 12390-3 [21] standardı esas alınarak, yükleme hızı 0,6 MPa olacak şekilde eksenel basınç testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3. Numuneler ve eksenel basınç testi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Beton küp numunelerde numune boyutunun etkisini araştırmak amacıyla hazırlanan 7 farklı beton karışımına (K I- VII) ait basınç dayanımı sonuçları ve standart sapma değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur.

Çizelge 5. Farklı boyutlardaki küp numunelerin basınç dayanımı sonuçları ve standart sapmaları

	Basınç dayanımları (N/mm^2) ± Standart sapma						
Ebatlar (mm)	K-I	K-II	K-III	K-IV	K-V	K-VI	K-VII
70,7x70,7x70,7	9,73±0,31	16,47±0,55	21,13±1,39	29,73±0,91	29,43±1,86	29,43±1,93	31,67±1,10
100x100x100	8,37±0,68	16,63±0,70	23,50±0,92	42,30±1,47	39,23±1,26	42,60±1,15	44,10±0,26
120x120x120	8,03±0,21	20,13±0,21	29,37±0,38	44,43±4,05	39,35±2,76	41,13±2,57	43,93±2,70
150x150x150	9,47±0,45	23,37±3,09	32,40±1,39	47,95±3,61	40,03±0,99	51,47±1,34	50,87±1,75
200x200x200	10,10±0,20	26,67±1,53	33,73±1,90	49,17±0,81	50,23±0,71	53,99±4,44	56,60±0,50

Elde edilen veriler incelendiğinde;

Düşük Dayanımlı Grup (K-I): En düşük hedef dayanıma sahip olan K-I kodlu seride, numune boyutları arasındaki dayanım farklarının diğer gruplara kıyasla daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu grupta en düşük

dayanım 120 mm kenar uzunluğuna sahip numuneden 8,03 MPa, en yüksek dayanım ise 200 mm kenar uzunluğuna sahip numuneden 10,10 MPa olarak ölçülmüştür.

Genel Artış Eğilimi (K-II – K-VII): K-I grubu haricindeki tüm karışımlarda (K-II, K-III, K-IV, K-V, K-VI ve K-VII), numune boyutu büyüdükçe ölçülen basınç dayanımının da arttığı tespit edilmiştir. İlgili grupların tamamında en düşük dayanım değerleri 70,7 mm boyutundaki numunelerden elde edilirken, en yüksek dayanım değerlerine 200 mm boyutundaki numunelerle ulaşılmıştır.

Standart Numune (150 mm) Referanslı Karşılaştırma:

Standart 150 mm'lik küp numunelerin dayanımı referans alınarak yapılan kıyaslamalarda şu bulgulara ulaşılmıştır:

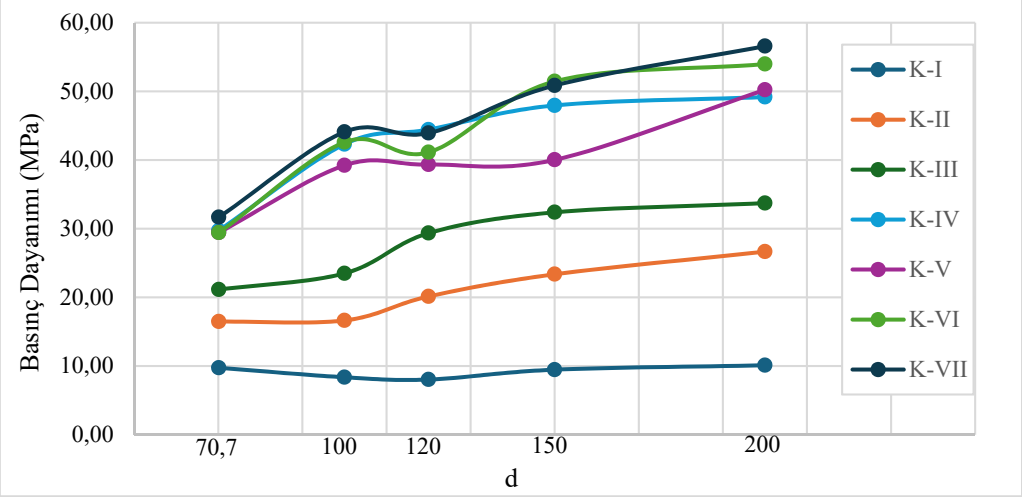
En Küçük Numuneye (70,7mm) Göre Değişim:

150 mm'lik standart numunelerin dayanımı, 70,7 mm'lik numunelere göre tüm serilerde daha yüksek çıkmıştır. Bu artış oranları sırasıyla; K-II grubunda %42, K-V grubunda %36, K-III grubunda %53,3, K-VII grubunda %60,6, K-IV grubunda %61,3 ve K-VI grubunda %74,9 olarak hesaplanmıştır.

En Büyük Numuneye (200 mm) Göre Değişim:

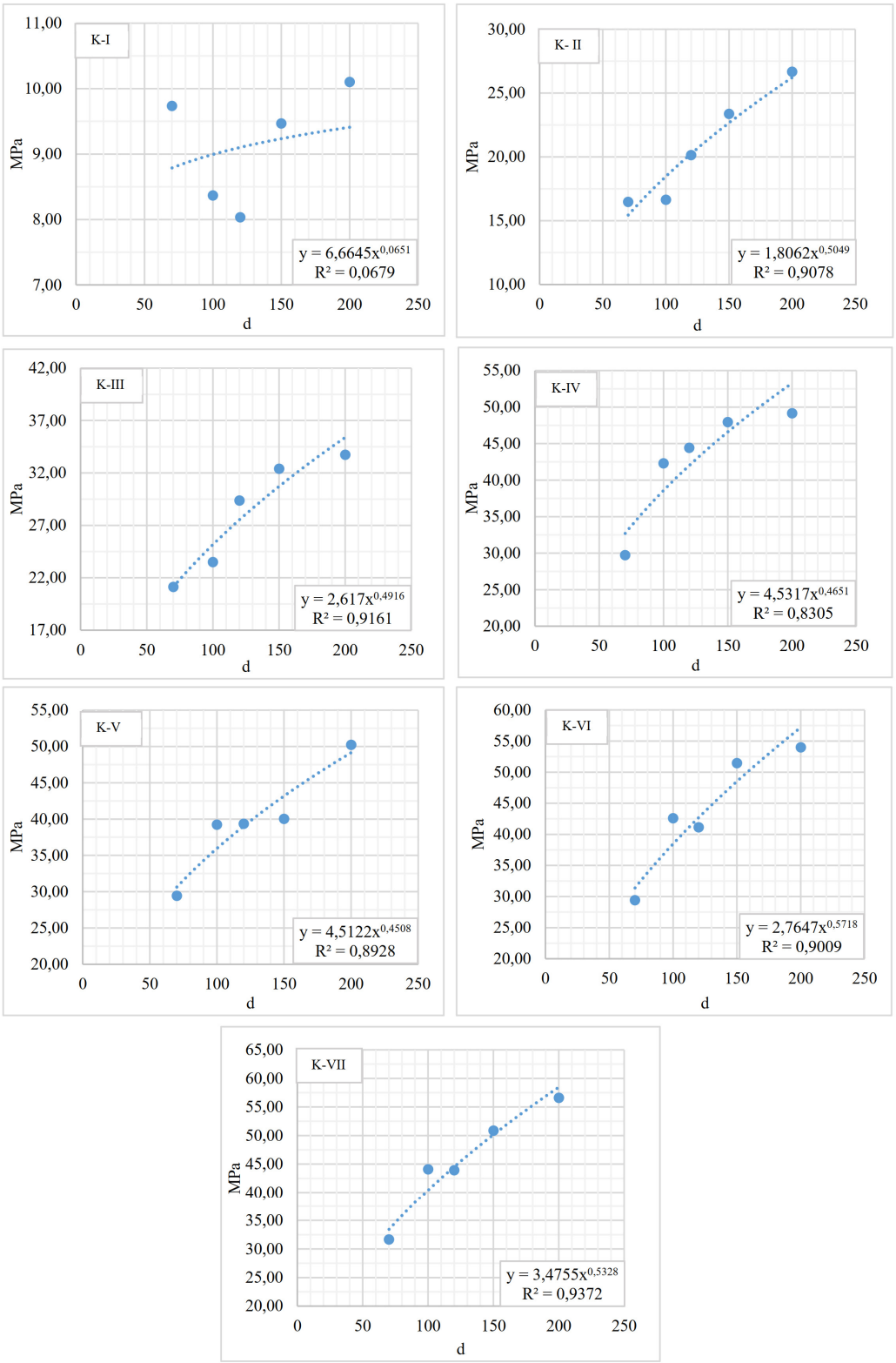
Öte yandan, 150 mm'lik standart numuneler, serinin en büyük hacimli numunesi olan 200 mm'lik küplerin gerisinde kalmıştır. K-IV (%2,4), K-III (%4) ve K-VI (%4,7) gruplarında standart numuneler 200 mm'lik numunelere oldukça yakın değerler verirken; bu fark K-VII grubunda %10,1, K-II grubunda %12,4 ve K-V grubunda %20,3 oranında daha düşük dayanım şeklinde kaydedilmiştir.

Farklı boyutlardaki ve farklı dayanım sınıflarındaki tüm karışımlara ait basınç dayanımı sonuçlarının değişim trendi Şekil 4'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde; en düşük dayanıma sahip olan K-I grubu dışındaki diğer tüm karışımlarda (K-II'den K-VII'ye), numune boyutu arttıkça basınç dayanımının da belirgin bir şekilde arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Farklı boyutlardaki numunelerin basınç dayanımı değişimleri

Bununla birlikte, 10 MPa ile 50 MPa gibi birbirinden oldukça farklı gevreklik ve homojenlik özelliklerine sahip karışımların davranışlarını daha hassas incelemek ve kırılma mekanizmasındaki dayanım sınıfı etkisini detaylandırmak amacıyla; K-I'den K-VII'ye kadar olan her bir seri için ayrı eğilim çizgileri (regresyon denklemleri) oluşturulmuştur (Şekil 5). Sunulan bu ayrıntılı grafikler incelendiğinde; malzemenin hedef dayanımı ve buna bağlı olarak gevrekliği arttıkça, boyut-dayanım ilişkisinin çok daha belirginleştiği ve katsayıların (R^2) yükseldiği görülmektedir. Örneğin yüksek dayanımlı K-VII serisinde oldukça güçlü bir korelasyon (R^2 = 0,9372) gözlenirken; malzemenin kendi düşük yapısal kapasitesinin kırılmayı doğrudan belirlediği K-I serisinde, boyut etkisinin ihmal edilebilir düzeye indiği (R^2 = 0,0679) ve eğilimin yataya yakın bir karakter sergilediği sayısal olarak saptanmıştır.



Şekil 5. Farklı dayanım sınıfları için ayrı ayrı oluşturulmuş boyut-dayanım eğilim çizgileri

Seri bazındaki bu spesifik analizlerin ardından, numune boyutunun dayanım üzerindeki genel etkisini nicelleştirmek amacıyla tüm karışım gruplarının ortalaması alınarak elde edilen veriler ve 150 mm'lik standart küp numuneye göre hesaplanan rölatif dayanımlar Çizelge 6'da özetlenmiştir.

Tüm serilerin ortalaması baz alındığında, 70,7mm'lik numunelerin ortalama dayanımı 23,94 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, 150 mm'lik standart numunenin ortalama dayanımının (36,51 MPa) sadece 0,66'sına tekabül etmekte olup, standart numuneye kıyasla %52,5 oranında en belirgin dayanım düşüşüne işaret etmektedir.

Numune boyutu 100 mm'ye çıkarıldığında, cidar etkisinin azalmasına paralel olarak ortalama dayanım 30,96 MPa değerine yükselmiştir. Standart numuneye göre rölatif dayanım 0,85 seviyesine çıkmış, ancak dayanım kaybı %17,9 oranında devam etmiştir.

Artış eğilimi 120 mm'lik boyutta da sürerek ortalama dayanım 32,34 MPa olarak ölçülmüştür. Standart numuneye (150 mm) yaklaşıldıkça makas daralmış; rölatif oran 0,89'a yükselirken, dayanım farkı %12,9 seviyesine gerilemiştir.

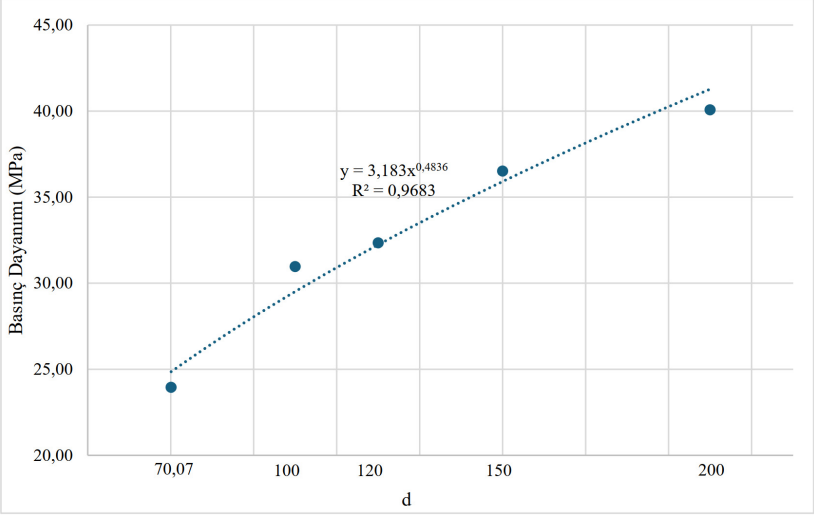
Çizelge 6. Ortalama dayanımlar ve standart küp numeye göre rölatif dayanımlar

Ebatlar (mm)	Ortalama basınç dayanımı (N/mm^2)	Rölatif dayanımlar
70,7x70,7x70,7	23,94	0,66
100x100x100	30,96	0,85
120x120x120	32,34	0,89
150x150x150	36,51	1,00
200x200x200	40,07	1,10

Numune boyutu 200 mm'ye ulaştığında, ortalama dayanım 40,07 MPa ile serinin en yüksek değerine ulaşmıştır. Standart numuneye kıyasla %8,9 oranında (Rölatif oran: 1,10) bir dayanım artışı kaydedilmiştir.

Bu veriler, numune hacmi arttıkça (ve yüzey alanı/hacim oranı düştükçe) dayanımın kademeli ve sistematik bir şekilde arttığını doğrulamaktadır. Küçük boyutlu numunelerde (özellikle 70,7 mm) kaydedilen bu belirgin dayanım düşüşünde, asıl etkinin kalıp yüzeyi ile agregalar arasındaki geometrik kısıtlamadan doğan cidar (çeper) etkisi olduğu düşünülmektedir. Numune boyutunun en büyük agrega çapına olan oranın düşmesi, agregaların homojen dağılımını güçleştirerek dayanımı zayıflattığı öngörülmektedir. Cidar etkisinin yarattığı bu yapısal zayıflığı destekleyen ve ivmelendiren bir diğer unsurun ise açık hava kürü koşulları olduğu tahmin edilmektedir. Yüzey alanı/hacim oranı yüksek olan küçük numunelerin iç suyunu büyük numunelere kıyasla daha hızlı kaybetmesinin, hidratasyonu yavaşlattığı ve kuruma büzülmesine (rötre) yol açarak taşıma kapasitesini daha da düşürdüğü değerlendirilmektedir. Buna karşın büyük hacimli numunelerin, hem cidar etkisinden daha az etkilendiği hem de iç nemini koruyarak daha stabil bir dayanıma ulaştığı düşünülmektedir.

Şekil 6'da sunulan ortalama dayanım verileri üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda; numune boyutu (x) ile basınç dayanımı (y) arasında istatistiksel olarak anlamlı ve kuvvetli bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Ortalama dayanımlar ve eğilim çizgisi

Dağılımın karakteristiği, R^2 = 0,9683 gibi oldukça yüksek bir belirleyicilik katsayısına sahip olan $y=3{,}183x^{0{,}4836}$ üs fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Türetilen modeldeki pozitif üs katsayısı ve eğilim çizgisinin yukarı yönlü eğimi; bu çalışmadaki deney koşullarında, numune boyutu arttıkça basınç dayanımının sistematik bir artış gösterdiğini matematiksel olarak doğrulamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, farklı boyut ve dayanım sınıflarındaki küp numunelerin mekanik davranışları incelenmiş ve elde edilen veriler ışığında aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Düşük dayanımlı K-I karışımı dışındaki tüm numune gruplarında, numune boyutunun artmasıyla birlikte basınç dayanımında belirgin bir artış kaydedilmiştir. Özellikle K-VII karışımında, numune boyutunun 70,7mm'den 200 mm'ye çıkarılmasıyla dayanım değerinin 31,67 MPa'dan 56,60 MPa'ya ulaşarak yaklaşık %78,7 oranında bir artış sergilediği görülmüştür. Bu durum, numune hacmi büyüdükçe malzeme yapısındaki heterojenliğin ve çeper (cidar) etkisinin azalmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir.
- Küçük boyutlu numunelerin mekanik özelliklerinin, yapısal heterojenliklerden ve döküm esnasında oluşan çeper etkisinden daha fazla etkilendiği, bu durumun ise dayanım değerlerinde görece düşüşe neden olduğu saptanmıştır. Örneğin K-IV numunesinde 70,7mm'de 29,73 MPa olan dayanım, 200 mm'de 49,17 MPa değerine yükselerek boyutun mekanik performans üzerindeki güçlü etkisine işaret etmektedir.
- Genel eğilimin aksine, K-I karışımında numune boyutuyla birlikte belirgin bir dayanım artışı gözlenmemesi, doğrudan bu serinin elde ettiği düşük dayanım değerlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Taşıma kapasitesinin çok düşük olması nedeniyle, kırılmanın numune geometrisinden veya kalıp etkileşiminden ziyade, doğrudan malzemenin kendi sınırlarında gerçekleştiği düşünülmektedir. Başka bir deyişle, K-I karışımındaki düşük dayanım seviyesinin, boyut ve cidar etkilerinin mekanik davranışa yansımasının önüne geçtiği düşünülmektedir.
- Numune boyutu ile basınç dayanımı arasında istatistiksel olarak anlamlı ve oldukça güçlü bir ilişki saptanmıştır. Bu ilişki, $y = 3.183x^{0{,}4836}$ üs fonksiyonu ile modellenmiş ve R^2 = 0,9683 gibi yüksek bir korelasyon değeriyle matematiksel olarak doğrulanmıştır.
- Bažant'ın Boyut Etkisi Yasası, numune boyutu büyüdükçe dayanımın düşeceğini öngörür. Bu çalışmada gözlemlenen 'ters boyut etkisi' ise bu yasayla çelişmenin aksine, küçük numunelerde numune/agrega çapı (d/D_{max}) oranının çok düşük olmasından kaynaklanan cidar etkisinin, malzemenin klasik kırılma mekaniği kurallarını baskılayacak kadar belirleyici ve spesifik bir yapısal zayıflık oluşturduğunu göstermektedir.

5. KAYNAKLAR

1. ASTM International (2018). *ASTM C39/C39M-18: Standard test method for compressive strength of xylindrical concrete specimens*. West Conshohocken, PA.
2. Türk Standardları Enstitüsü (2013). *TS EN 12390-1: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri – Bölüm 1: Deney Numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri*. Ankara.
3. Gyurkó, Z. & Nemes, R. (2020). Specimen size and shape effect on the compressive strength of normal strength concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *64*(1), 276-286.
4. Akçaözoğlu, K. ve Atiş, C.D. (2007). Farklı su bağlayıcı oranında hazırlanan harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *22*(1), 115-122.
5. Nikbin, I.M., Dehestani, M., Beygi, M.H.A. & Rezvani, M. (2014). Effects of cube size and placement direction on compressive strength of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, *59*, 144-150.
6. Bažant, Z.P. (1999). Size effect on structural strength: a review. *Archive of Applied Mechanics*, *69*(9-10), 703-725.
7. Murdock, J.W. & Kesler, C.E. (1955). Effect of length of specimen on apparent compressive strength of concrete. *TAM Report*, No. 515.
8. Wu, B., Liu, C. & Yang, Y. (2013). Size effect on compressive behaviours of normal-strength concrete cubes made from demolished concrete blocks and fresh concrete. *Magazine of Concrete Research*, *65*(19), 1155-1167.

9. Neville, A.M. (1966). A general relation for strengths of concrete specimens of different shapes and sizes. *Journal Proceedings*, *63*(10), 1095-1110.
10. Ince, R., Gör, M., Eren, M.E. & Alyamaç, K.E. (2015). The effect of size on the splitting strength of cubic concrete members. *Strain*, *51*(2), 135-146.
11. Carpinteri, A. & Chiaia, B. (1997). Multifractal scaling laws in the breaking behaviour of disordered materials. *Chaos, Solitons & Fractals*, *8*(2), 135-150.
12. Tokyay, 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..
13. 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.
14. Darlington, W.J., Ranjith, P.G. & Choi, S.K. (2011). The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rock-like cementitious brittle materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *44*(5), 513-529.
15. Liang, Q., Lan, H., Yu, Z., Li, B., Sun, W., Shijie, L. & Lv, W. (2024). Reverse size effect of the unconfined compressive strength of crystalline rock: A grain-scale perspective. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *58*(2), 1651-1669.
16. Narayanan, S. (2024). Effect of size and shape of test specimen on compressive strength of concrete. *Concrete International*, *46*(1), 45-51.
17. Carpinteri, A., Ferro, G. & Monetto, I. (1999). Scale effects in uniaxially compressed concrete specimens. *Magazine of Concrete Research*, *51*(3), 217-225..
18. Yi, S.T., Yang, E.I. & Choi, J.C. (2006). Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete. *Nuclear Engineering and Design*, *236*(2), 115-127.
19. Türk Standardları Enstitüsü (2002). *TS EN 206-1: Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Ankara.
20. Türk Standardları Enstitüsü (2009). *TS EN 196-1: Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini*. Ankara.
21. Türk Standardları Enstitüsü. (2003). *TS EN 12390-3: Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*. Ankara.