

HASARSIZ DENEY YÖNTEMLERİ İLE BETON KALİTESİNİN BELİRLENMESİ

Mahmut TURAN¹ , *Muhammed Ali TANRIKULU²

¹DPÜ Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya, mturan@dumlupinar.edu.tr

²Tanrikulu Mühendislik, Haceloğlu İş Merkezi No:89, 43020, Kütahya, malitanrikulu@hotmail.com

Geliş Tarihi:20.09.2013

Kabul Tarihi:27.11.2013

ÖZET

Bu çalışmada iki farklı agrega granülometrisi ve 4 farklı su/çimento (s/ç) oranı kullanılarak her biri 4 küp ve 7 silindirden oluşan 32 grup beton numuneler hazırlanmıştır. Deneysel numuneleri üzerinde test çekici ve ultrasonik ses hızı-ultrasonic pulse velocity- (UPV) ölçümleri yapıldıktan sonra basınç ve yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımları ile UPV ve test çekici değerleri arasında, silindir yarma dayanımları ile UPV ve test çekici değerleri arasındaki ilişkiler s/ç oranı ve beton yaşı için incelenmiştir. İstatistik analizler yapılarak basınç dayanımları ve silindir yarma dayanımları ile UPV arasında üstel denklemler elde edilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton dayanımı, Hasarsız deney yöntemi, UPV, Test çekici.

DETERMINATION OF CONCRETE QUALITY WITH NONDESTRUCTIVE TEST METHODS

ABSTRACT

In this study 32 groups of concrete specimens each covers 4 cubes and 7 cylinders, were prepared using two different aggregate gradings and four different water/cement (w/c) ratios. After rebound hammer and ultrasonic pulse velocity (UPV) measurements on concrete specimens, their compressive strengths and cylinder splitting strengths were determined. Relationships between the compressive strengths with UPV and rebound hammer, the cylinder splitting strengths with UPV and rebound hammer were examined for w/c ratio and concrete age, respectively. Statistical analyses yielded exponential equations between compressive strength and cylinder splitting strength with UPV. It is shown that experimental and theoretical results are in good agreement.

Key words: Concrete strength, Nondestructive test method, UPV, Rebound hammer

1.GİRİŞ

Doğal afetlere karşı ya da depremde hasar gören yapıların onarım ve güçlendirilmesinde, yapıdaki gerçek malzeme niteliğinin belirlenmesi, yapılması öncelikli işlerin başında yer almaktadır. Betonarme yapılarda beton kalitesinin tespiti için kullanılan yöntemlerden biride hasarsız deney yöntemleridir. Hasarsız deney

yöntemleri yapının taşıyıcı sistemine zarar vermeden yapıda kullanılan betonun dayanımını ve benzer özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler olup, uygulama kolaylığı ile zaman kaybının en aza indirilmesi ve ekonomik olması gibi avantajları bulunmaktadır. Ultrasonik test cihazı ve beton test çekici kullanılarak beton üzerinde uygulanan hasarsız deney yöntemleri XX. yüzyıl ortalarından günümüze kadar gelmiş olup, bu konuda yapılmış olan çalışmalar evrensel literatürde çok geniş yer tutmaktadır [1,2]. Bu nedenle beton test çekici ve ultrasonik test cihazıyla ilgili önemli ve son zamanlarda yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Abo-Qudais [3] yaptığı çalışmada; betondaki agrega granülometrisinin, s/ç oranının ve kür süresinin ultrasonik ses hızı (UPV) üzerindeki etkilerini incelemiş ve kür süresi arttıkça UPV değerlerinin arttığı, s/ç oranı arttığında UPV değerinin azaldığı, büyük agrega boyutu kullanıldığı zaman UPV değerlerinin yüksek çıktığı sonucuna varmıştır. Khan ve ark.[4] yaptıkları çalışmada ultrasonik ses hızı ile yüksek performanslı betonların gerçek dayanımları arasında bir gerilme modeli kurmayı amaçlamışlardır. Ancak yüksek performanslı betonların dayanımının UPV ile belirlenmesinde standart bir bağıntı kuramamışlar ve normal yapılarda beton dayanımının tahmini için önerilen bağıntılar yüksek performans betonunun kullanıldığı özel yapılarda da kullanılabilir sonucuna ulaşmışlardır. Turgut ve Küçük [5] yaptıkları çalışmada; beton döküm yönünde ve yatay yönde doğrudan, dolaylı ve yarı dolaylı ultrasonik ses hızı (UPV) ölçümleri yapmışlar ve doğrudan yapılan UPV'lerin dolaylı olarak döküm yönündeki UPV'den ortalama %9, dolaylı olarak yatay yöndeki UPV'ler den ortalama %4 ve yarı dolaylı UPV'ler den ortalama %4 daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Dolaylı yatay ortalama UPV değeri, döküm yönündeki UPV değerinden % 5 daha yüksek çıktığı sonucuna varmışlardır. Kheder [6] yaptığı çalışmada, ıslak ve havada kurumuş betonların basınç dayanımını tahmin etmek için UPV ve beton test çekici yöntemlerini kullanmıştır. Qasrawi [7] hasarsız deney yöntemleri ile beton dayanımı tahminlerini özetlemiş ve yaptığı çalışmada beton numunelere, hem test çekici hem de ultrasonik ses hızı testleri uygulamıştır. Beton dayanımının belirlenmesinde ultrasonik ses hızı yönteminin daha etkili olduğu sonucuna varmış olmakla birlikte UPV ve test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılmasının daha güvenilir olduğunu ifade etmiştir. del Rio ve ark.[8] yaptıkları çalışmada, beton basınç dayanımı ile UPV arasında üstel bir matematiksel ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır. Hobbs ve Kebir [9] tarafından yapılan çalışmada, ultrasonik ses hızı yönteminin beton dayanımının belirlenmesinde daha etkili olduğu gözlenmiş, fakat bu yöntemin tek başına kullanımı yerine UPV ve test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılarak elde edilen sonuçların daha güvenilir olduğu fikrine ulaşılmıştır. Demirboğa ve ark. [10] yaptıkları çalışmada; ultrasesi, mineral katkılı betonun basınç dayanımını ölçmede kullanmışlardır. Ultrases hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkinin, mineral katkı ile üstel ilişkili olduğu kanaatine varılmış, ancak, her mineral katkı için katsayıların değiştiği tespit edilmiştir.

Yukarıda belirtilen çalışmalar haricinde evrensel literatürde test çekici ve UPV ile veya her ikisi kullanılarak yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [11-13].

Bu çalışmada betonarme yapılarda betonun kalitesinin belirlenmesi için kullanılan deney yöntemlerinden beton test çekici (schmidt çekici) ve sesin ortamda yayılma hızı bağıntıları üzerine temellenmiş olan ultrasonik ses hızının ölçülmesi yöntemi birlikte kullanılmıştır. Çalışmanın başlıca amacı ultrasonik ses hızı ve test çekici değerleri ile betonun basınç ve silindirik yarma dayanımları arasında ki ilişkilerin incelenmesidir.

2. DENEYSEL YAKLAŞIM

Deney Numunelerinin hazırlanmasında iki farklı agrega granülometrisi ve 4 farklı s/ç oranı kullanılmıştır. Bu amaçla TS706 EN 12620+A1'e [14] göre en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan A16 granülometri eğrisine uygun, 4 farklı s/ç oranında (0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75) ve 4 farklı beton yaşında (7, 28, 60 ve 90 gün) 16 grup

ve B16 granülometri eğrisine uygun, 4 farklı s/ç oranında (0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75) ve 4 farklı beton yaşında (7, 28, 60 ve 90 gün) 16 grup olmak üzere toplam 32 grup karışım hazırlanmıştır. Her bir grup 4 adet 150 mm boyutlu standart küp ve 7 adet 150x300 mm boyutlu standart silindir olmak üzere toplam 11 adet numuneden oluşmaktadır. Yukarıdaki şekilde gruplandırılan deney numuneleri benzer özelliklerine göre ayrıca 16 seriye ayrılmış olup, her bir seri dört gruptan oluşmaktadır. Hazırlanan deney numunelerinin seri, grup ve özellikleri aşağıda Çizelge 1 ve Çizelge 2 de verilmiştir. Deney numuneleri ayrıca iki kısma ayrılmaktadır. Birinci kısım deney numuneleri, granülometri eğrisi A16 ve B16 olan küp ve silindir numunelerin, s/ç oranı sabit tutularak farklı beton yaşlarında (7gün, 28 gün, 60 gün, 90 gün) ölçülen UPV, test çekici ve dayanım değerlerinin belirlendiği numunelerden oluşmaktadır. Bu deney numuneleri, Çizelge 1 deki A16 agrega granülometrisine sahip I., II., III. ve IV. seriler ile B16 agrega granülometrisine sahip V., VI., VII. ve VIII. serilerden oluşan deney numunelerini kapsamaktadır.

Çizelge 1. I. II. III. IV. V. VI. VII. ve VIII. seri deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları

Seri no	Grup no	Numune türü	s/ç	Beton yaşı	Hız(km/s)	Test çekici	fcu (MPa)	fct (MPa)	Seri no	Grup no	Numune türü	s/ç	Beton yaşı	Hız (km/s)	Test çekici	fcu (MPa)	fct (MPa)
I	A1	S	0,60	7	4,27	22,18	22,37		V	B1	S	0,60	7	4,16	22,08	23,17	
		S	0,60	7	4,27	21,99		2,29			S	0,60	7	4,16	22,24		2,31
		K	0,60	7	4,51	16,97	24,95				K	0,60	7	4,27	16,67	24,76	
	A2	S	0,60	28	4,56	22,63	30,18			B2	S	0,60	28	4,55	22,19	31,67	
		S	0,60	28	4,56	22,61		3,39			S	0,60	28	4,56	22,25		3,33
		K	0,60	28	4,95	18,27	41,09				K	0,60	28	4,91	17,23	38,51	
	A3	S	0,60	60	4,59	23,10	36,43			B3	S	0,60	60	4,70	23,30	37,24	
		S	0,60	60	4,60	22,83		3,59			S	0,60	60	4,70	23,31		3,62
		K	0,60	60	5,02	19,14	43,44				K	0,60	60	4,99	20,44	42,70	
	A4	S	0,60	90	4,67	23,16	38,25			B4	S	0,60	90	4,73	23,89	39,23	
		S	0,60	90	4,67	22,85		3,89			S	0,60	90	4,73	23,60		4,19
		K	0,60	90	5,03	19,32	44,61				K	0,60	90	5,03	21,38	44,39	
II	A5	S	0,65	7	4,03	21,34	17,14		VI	B5	S	0,65	7	4,08	19,87	16,39	
		S	0,65	7	3,98	20,92		2,04			S	0,65	7	4,08	19,81		2,00
		K	0,65	7	4,13	16,84	18,79				K	0,65	7	4,21	15,00	20,28	
	A6	S	0,65	28	4,41	22,01	28,32			B6	S	0,65	28	4,48	20,82	30,92	
		S	0,65	28	4,42	22,10		3,14			S	0,65	28	4,48	20,92		3,15
		K	0,65	28	4,65	17,37	33,57				K	0,65	28	4,77	16,84	32,66	
	A7	S	0,65	60	4,50	22,37	32,61			B7	S	0,65	60	4,55	22,11	34,67	
		S	0,65	60	4,49	22,42		3,54			S	0,65	60	4,54	22,01		3,26
		K	0,65	60	4,83	18,53	37,81				K	0,65	60	4,83	19,86	37,34	
	A8	S	0,65	90	4,54	22,56	32,73			B8	S	0,65	90	4,57	23,26	35,12	
		S	0,65	90	4,54	22,61		3,70			S	0,65	90	4,59	22,22		3,46

Çizelge 1. I. II. III. IV. V. VI. VII. ve VIII. seri deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (devamı)

III	A9	K	0,65	90	4,90	18,77	38,11		VII	B9	K	0,65	90	4,89	20,04	37,79								
		S	0,70	7	3,76	15,85	11,89				S	0,70	7	4,00	18,73	13,11								
		S	0,70	7	3,74	15,97		1,33			S	0,70	7	3,99	18,79		1,64							
	A10	K	0,70	7	4,13	10,94	14,66			B10	K	0,70	7	4,06	11,78	15,92		S	0,70	28	4,38	19,75	25,61	
		S	0,70	28	4,15	17,72	20,84				S	0,70	28	4,38	19,68		2,73							
		S	0,70	28	4,15	17,33		2,48			K	0,70	28	4,67	15,93	28,78								
	A11	K	0,70	28	4,58	12,97	23,82			B11	S	0,70	60	4,48	21,30	29,49		S	0,70	60	4,48	20,82		3,25
		S	0,70	60	4,44	20,65	23,07				S	0,70	60	4,48	20,82		3,25							
		S	0,70	60	4,44	20,39		2,49			K	0,70	60	4,80	19,52	33,37								
	A12	K	0,70	60	4,71	16,97	31,76			B12	S	0,70	90	4,55	22,54	30,47		S	0,70	90	4,55	22,01		3,26
		S	0,70	90	4,47	22,39	26,34				S	0,70	90	4,55	22,01		3,26							
		S	0,70	90	4,47	22,42		2,64			K	0,70	90	4,95	19,75	36,24								
IV	A13	S	0,75	7	3,62	11,59	8,90		VIII	B13	S	0,75	7	3,82	15,32	10,02		S	0,75	28	4,24	18,89	22,47	
		S	0,75	7	3,63	11,78		1,03			S	0,75	28	4,23	18,90		2,10							
		K	0,75	7	3,74	10,00	11,21				K	0,75	28	4,52	14,75	23,19								
	A14	S	0,75	28	4,02	13,73	15,76			B14	S	0,75	60	4,34	21,23	26,14		S	0,75	60	4,34	20,02		2,68
		S	0,75	28	4,02	13,36		2,18			S	0,75	60	4,34	20,02		2,68							
		K	0,75	28	4,08	11,39	20,53				K	0,75	60	4,60	18,94	27,98								
	A15	S	0,75	60	4,35	19,54	19,54			B15	S	0,75	90	4,45	21,84	26,71		S	0,75	90	4,44	21,30		2,8
		S	0,75	60	4,35	19,68		2,38			S	0,75	90	4,44	21,30		2,8							
		K	0,75	60	4,56	15,17	22,97				K	0,75	90	4,71	19,75	28,06								
	A16	S	0,75	90	4,41	22,08	20,73			B16	S	0,75	90	4,45	21,84	26,71		S	0,75	90	4,44	21,30		2,8
		S	0,75	90	4,42	22,24		2,49			S	0,75	90	4,44	21,30		2,8							
		K	0,75	90	4,62	16,61	23,37				K	0,75	90	4,71	19,75	28,06								
A16 Eğrisi: çimento:kum:çakıl=1:1,637:3,175									B16 Eğrisi: çimento:kum:çakıl=1:2,511:2,302															

İkinci kısım deney numuneleri ise yine granülometri eğrisi A16 ve B16 olan küp ve silindir numunelerin, beton yaşı sabit tutularak farklı s/ç oranlarında (0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75) ölçülen UPV, test çekici ve dayanım değerlerinin belirlendiği numunelerden oluşmaktadır. Bu deney numuneleri Çizelge 2 deki A16 agrega granülometrisine sahip IX., X., XI. ve XII. seriler ile B16 agrega granülometrisine sahip XIII., XIV., XV. ve XVI. serilerden oluşan deney numunelerini kapsamaktadır. Deney numunelerine ilişkin geniş bilgi kaynak [15] de verilmiştir.

Çizelge 2. IX. X. XI. XII. XIII. XIV. XV. ve XVI. seri deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları

Serino	Grup no	Numune türü	s/ç	Beton yaşı	Hız (km/s)	Test çekici	f _{cu} (MPa)	f _{ct} (MPa)	Serino	Grup no	Numune türü	s/ç	Beton yaşı	Hız (km/s)	Test çekici	f _{cu} (MPa)	f _{ct} (MPa)	
IX	A1	S	0,60	7	4,27	22,18	22,37		XIII	B1	S	0,60	7	4,16	22,08	23,17		
		S	0,60	7	4,27	21,99		2,29			S	0,60	7	4,16	22,24		2,31	
		K	0,60	7	4,51	16,97	24,95				K	0,60	7	4,27	16,67	24,76		
	A5	S	0,65	7	4,03	21,34	17,14			B5	S	0,65	7	4,08	19,87	16,39		
		S	0,65	7	3,98	20,92		2,04			S	0,65	7	4,08	19,81		2,00	
		K	0,65	7	4,13	16,84	18,79				K	0,65	7	4,21	15,00	20,28		
	A9	S	0,70	7	3,76	15,85	11,89			B9	S	0,70	7	4,00	18,73	13,11		
		S	0,70	7	3,74	15,97		1,33			S	0,70	7	3,99	18,79		1,64	
		K	0,70	7	4,13	10,94	14,66				K	0,70	7	4,06	11,78	15,92		
	A13	S	0,75	7	3,62	11,59	8,90			B13	S	0,75	7	3,82	15,32	10,02		
		S	0,75	7	3,63	11,78		1,03			S	0,75	7	3,82	15,19		1,14	
		K	0,75	7	3,74	10,00	11,21				K	0,75	7	3,90	10,00	11,12		
X	A2	S	0,60	28	4,56	22,63	30,18		XIV	B2	S	0,60	28	4,55	22,19	31,67		
		S	0,60	28	4,56	22,61		3,39			S	0,60	28	4,56	22,25		3,33	
		K	0,60	28	4,95	18,27	41,09				K	0,60	28	4,91	17,23	38,51		
	A6	S	0,65	28	4,41	22,01	28,32			B6	S	0,65	28	4,48	20,82	30,92		
		S	0,65	28	4,42	22,10		3,14			S	0,65	28	4,48	20,92		3,15	
		K	0,65	28	4,65	17,37	33,57				K	0,65	28	4,77	16,84	32,66		
	A10	S	0,70	28	4,15	17,72	20,84			B10	S	0,70	28	4,38	19,75	25,61		
		S	0,70	28	4,15	17,33		2,48			S	0,70	28	4,38	19,68		2,73	
		K	0,70	28	4,58	12,97	23,82				K	0,70	28	4,67	15,93	26,30		
	A14	S	0,75	28	4,02	13,73	15,76			B14	S	0,75	28	4,24	18,89	22,47		
		S	0,75	28	4,02	13,36		2,18			S	0,75	28	4,23	18,90		2,10	
		K	0,75	28	4,08	11,39	20,53				K	0,75	28	4,52	14,75	23,19		
XI	A3	S	0,60	60	4,59	23,10	36,43		XV	B3	S	0,60	60	4,70	23,30	37,24		
		S	0,60	60	4,60	22,83		3,59			S	0,60	60	4,70	23,31		3,62	
		K	0,60	60	5,02	19,14	43,44				K	0,60	60	4,99	20,44	42,70		
	A7	S	0,65	60	4,50	22,37	32,61			B7	S	0,65	60	4,55	22,11	34,67		
		S	0,65	60	4,49	22,42		3,54			S	0,65	60	4,54	22,01		3,26	
		K	0,65	60	4,83	18,53	37,81				K	0,65	60	4,83	19,86	37,34		
	A11	S	0,70	60	4,44	20,65	23,07			B11	S	0,70	60	4,48	21,30	29,49		
		S	0,70	60	4,44	20,39		2,49			S	0,70	60	4,48	20,82		3,25	
		K	0,70	60	4,71	16,97	31,76				K	0,70	60	4,80	19,52	33,37		
			S	0,75	60	4,35	19,54	19,54			B15	S	0,75	60	4,34	21,23	26,14	

Çizelge 2. IX. X. XI. XII. XIII. XIV. XV. ve XVI. seri deney numunelerinin özellikleri ve deney sonuçları (devamı)

A15	S	0,75	60	4,35	19,68		2,18		S	0,75	60	4,34	20,02		2,68
	K	0,75	60	4,56	15,17	22,97			K	0,75	60	4,60	18,94	27,98	
A4	S	0,60	90	4,67	23,16	38,25			S	0,60	90	4,73	23,89	39,23	
	S	0,60	90	4,67	22,85		3,89		S	0,60	90	4,73	23,60		4,19
A8	K	0,60	90	5,03	19,32	44,61			K	0,60	90	5,03	21,38	44,39	
	S	0,65	90	4,54	22,56	32,73			S	0,65	90	4,57	23,26	35,12	
A12	S	0,65	90	4,54	22,61		3,70		S	0,65	90	4,59	22,22		3,46
	K	0,65	90	4,90	18,77	38,11			K	0,65	90	4,89	20,04	37,79	
A16	S	0,70	90	4,47	22,39	26,34			S	0,70	90	4,55	22,54	30,47	
	S	0,70	90	4,47	22,42		2,64		S	0,70	90	4,55	22,01		3,26
A16	K	0,70	90	4,76	18,51	31,76			K	0,70	90	4,95	19,75	36,24	
	S	0,75	90	4,41	22,08	20,73			S	0,75	90	4,45	21,84	26,71	
A16	S	0,75	90	4,42	22,24		2,49		S	0,75	90	4,44	21,30		2,85
	K	0,75	90	4,62	16,61	23,37			K	0,75	90	4,71	19,75	28,06	

Numunelerin hazırlanmasında kullanılan kırmataş agrega, TS 3529 'a [16] göre deneye tabi tutularak; karışık agreganın sıkışık birim ağırlığı 19,25 kN/m³, gevşek birim ağırlığı 16,83 kN/m³ olarak bulunmuştur. Beton yapımında kullanılan etüv kurusu agrega TS 802' ye [17] uygun olarak ağırlık hesabına göre hazırlanmıştır. A16 ideal granülometri eğrisi için ağırlık oranları, çimento: kum: çakıl = 1: 1,637: 3,175 ve B16 ideal granülometri eğrisi için ağırlık oranları, çimento: kum: çakıl = 1: 2,511: 2,302 olup; s/ç= 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 olarak değişken seçilmiştir. Numunelerin hazırlanmasında kullanılan 400 dozlu beton kırmataş agrega, PZÇ/A/CEM IV (P-V) 32.5 R çimentosu ve şebeke suyu ile üretilmiştir. Küp ve silindir numunelerin üretiminde TS EN 12390-1' e [18] uygun çelik kalıp kullanılmıştır. TS EN 12390-2' ye [18] uygun olarak hazırlanan beton, küplere iki silindirlere ise 3 tabaka halinde yerleştirilmiş ve her tabaka vibratör ile sıkıştırılmıştır. Bu şekilde hazırlanan numuneler 24 saat laboratuar da bırakılmış ve 24 saat sonunda kalıplardan çıkartılarak su sıcaklığı 20 ± 2 °C' de sabit olan kür havuzunda ölçüm ve kırım yapılacakları güne kadar su içinde bekletilmişlerdir.

Bu çalışmada, marka ve modeli "JI-355 Rebound value R, je İL Precision Industrial Instrument, Co. , Ltd." olan test çekici ve marka ve modeli, "Qust-120+ ,Product: 54KHz' lik Ultrasonic non-destructive tester, manufactured by Qcom, Inc. Made in Korea" olan cihaz kullanılmıştır. Ultrasonik test cihazı ile direkt okuma yöntemi uygulanmıştır. Test çekici ve UPV okumaları numunelerin kırılma yaşı olan (7, 28, 60 ve 90.) günlerde yapılmıştır. Beton dökümünden sonra test çekici ve UPV ölçümleri yapılmak üzere kür havuzundan çıkartılan numunelerin yüzeyleri kuru ve temiz bir bez ile silinerek kısa bir süre kurumaları için beklenmiştir. Test çekici okumaları TS EN 12504-2'ye [19] uygun olarak yapılmıştır. Hazırlanan silindir numunelerde 12 adet üst yüzeyde, 12 adet alt yüzeyde olmak üzere toplam 24 adet deney noktasına döküm yönünde ve düşey olarak test çekici uygulanmış ve değerleri kaydedilmiştir. Benzer şekilde küp numunelerin dört yan yüzeyine 36 adet deney noktasına döküm yönüne dik, düşey ve alt yüzeyindeki 9 adet deney noktasına döküm yönünde, düşey olmak üzere toplam 45 adet deney noktasına, test çekici uygulanmış ve

değerleri kaydedilmiştir. Ultrasonik ses hızı deneyi TS EN 12504-4'e [20] uygun olarak yapılmıştır. Silindir numunelerde alt yüzeyde 12 ve üst yüzeyde 12 adet nokta, deney noktası olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde küp numunelerin üst ve alt yüzeyi hariç diğer dört yan yüzeyi de hazırlanarak, her yüzde 9 deney noktası belirlenmiştir. UPV okumaları alınırken numunenin karşılıklı yüzeylerine konulan propların numuneyle temas eden yüzeylerine gres yağı sürülerek propla numune arasında hiçbir boşluk kalmaması sağlanmıştır. Silindirlerin belirlenen 12 adet deney noktasından döküm yönünde ve doğrudan UPV geçiş süresi okumaları alınıp kaydedilmiştir. Benzer şekilde küplerin de karşılıklı iki yüzündeki 9 adet deney noktasından döküm yönüne dik, doğrudan ve yine diğer karşılıklı iki yüzünden 9 adet deney noktasından döküm yönüne dik, doğrudan olmak üzere toplam 18 adet deney noktasından UPV geçiş süresi okumaları kaydedilmiştir.

Deney numunelerini kırmak için TS-EN 12390-4'e [18] uygun ve kalibre edilmiş bir basınç cihazı (pres) kullanılmıştır. Kırılma yaşı olan 7, 28, 60 ve 90. günlerde test çekici ve UPV deneyleri tamamlandıktan sonra basınçta kırılacak silindir numunelerin üst yüzeylerine ince bir tabaka şeklinde alçı başlık yapılmıştır. Her bir numunenin ağırlığı ve yüksekliği ölçülüp kaydedilmiştir. Her gruptan 4 adet küp, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda iki yan yüzü kullanılarak, 4 adet silindir, yük uygulama yönü beton döküm yönünde olacak şekilde TS EN 12390-3'e [18] uygun olarak 0.6 MPa/s yükleme hızında tek eksenli basınç altında kırılmış ve sonuçları kaydedilmiştir. Her gruptan 3 adet standart silindir TS EN 12390-6'ya [18] uygun olarak yarmada çekme dayanımının tayini için 0.05 MPa/s sabit yükleme hızında preste kırılmış ve sonuçları kaydedilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR

Çizelge 1 ve 2 de belirtildiği üzere gruplandırılmış ve benzer özelliklerine göre serilere ayrılmış olan deney numuneleri üzerinde yapılan test çekici, UPV, tek eksenli basınç deneyi ve silindir yarma deneyinden elde edilen deney sonuçları agrega granülometrisi, s/ç oranı ve beton kırılma yaşına göre farklılıklar göstermektedir. Birinci kısım deneylerde s/ç oranı sabit tutulup beton yaşı değişken alınmıştır. Agrega granülometrisi A16 olup; I. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,60 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları, II. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,65 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları, III. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,70 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları ve IV. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,75 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları Çizelge 1 de verilmiştir. Çizelge 1 den görüldüğü gibi s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 olan silindir numunelerin beton yaşı arttıkça; UPV hızları, test çekici değerleri, basınç dayanımları (fcu) ve yarmada çekme dayanımları (fct) artmıştır. Aynı şekilde s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 olan küp numunelerin beton yaşı arttıkça; UPV hızları, test çekici değerleri ile basınç dayanımlarının (fcu) arttığı açıkça görülmektedir.

Agrega granülometrisi B16 olup; V. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,60 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları, VI. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,65 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları, VII. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,70 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları ve VIII. seriyi oluşturan ve s/ç oranı 0,75 olan numunelerin 7, 28, 60 ve 90 günlük deney sonuçları da Çizelge 1 de verilmiştir. Çizelge 1 den görüldüğü üzere s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 olan silindir numunelerin beton yaşı arttıkça; UPV geçiş süreleri azaldığından, hızları artmış, test çekici değerleri artmış, basınç dayanımları (fcu) ve yarmada çekme dayanım değerleri (fct) artmış bulunmaktadır. Aynı şekilde s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 olan küp numunelerin beton yaşı arttıkça; UPV hızları, test çekici değerleri ve basınç dayanımları (fcu) artmıştır. Tablodan görüldüğü gibi beton yaşı UPV ve test çekici değerlerini etkilemektedir. Zamanın fonksiyonu olan hidrasyonun artması ve devam etmesi nedeniyle betonun

dayanımı artmaktadır. Bu nedenle beton yaşı arttıkça betonun dayanımı artacağından UPV ve test çekici değerleri de artmaktadır.

İkinci kısım deneylerde beton yaşı sabit tutulup s/ç oranı değişken alınmıştır. Agregra granülometrisi A16 olup; IX seriyi oluşturan ve beton yaşı 7 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları, X. seriyi oluşturan ve beton yaşı 28 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları, XI. seriyi oluşturan ve beton yaşı 60 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları ve XII. oluşturan ve beton yaşı 90 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları Çizelge 2 de verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere 7, 28, 60 ve 90 günlük silindir numunelerin s/ç oranı arttıkça; UPV hızları azalmakta, test çekici değerleri azalmakta ve kırılma yüküne bağlı olarak basınç dayanımları (fcu) ve yarmada çekme dayanımları (fct) azalma göstermektedir. Aynı şekilde 7, 28, 60 ve 90 günlük küp numunelerin s/ç oranı arttıkça; UPV hızları, test çekici değerleri ve kırılma yüküne bağlı olarak basınç dayanımları (fcu) azalmaktadır. Çünkü s/ç oranının artması ile betondaki boşluk oranı artmakta ve beton dayanımı düşmektedir. Betondaki boşluk miktarı arttıkça ultrasesin bir uçtan diğer uca geçiş süresinin artması nedeniyle UPV azalmaktadır. Benzer şekilde beton test çekici değerleri de betondaki boşluk oranının fazla olması nedeniyle düşük çıkmaktadır.

Agregra granülometrisi B16 olup; XIII. seriyi oluşturan ve beton yaşı 7 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları, XIV. seriyi oluşturan ve beton yaşı 28 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları, XV. seriyi oluşturan ve beton yaşı 60 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları ve XVI. seriyi oluşturan ve beton yaşı 90 gün olan numunelerin s/ç oranı 0,60, 0,65, 0,70 ve 0,75 için elde edilmiş deney sonuçları da Çizelge 2 de verilmiştir. Çizelge 2 den görüldüğü üzere 7, 28, 60 ve 90 günlük silindir numunelerin s/ç oranı arttıkça; UPV hızları ve test çekici değerleri azalmış, kırılma yüküne bağlı olarak basınç dayanımları (fcu) ve yarmada çekme dayanımları (fct) azalmıştır. Benzer şekilde 7, 28, 60 ve 90 günlük küp numunelerin s/ç oranı arttıkça; UPV hızları, test çekici değerleri ve kırılma yüküne bağlı olarak basınç dayanımları (fcu) azalmıştır.

4. SONUÇLARIN ANALİZ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Elde edilen deneysel sonuçlar analiz edilerek, agregra granülometrisi, s/ç oranı ve beton yaşının dayanım üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla Agregra granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip farklı beton yaşlarındaki küp numunelerin basınç dayanımı ile UPV ve test çekici ilişkisi, silindir numunelerin basınç dayanımı ile UPV ve test çekici ilişkisi ve silindir numunelerin silindir yarma dayanımı ile UPV ve test çekici ilişkisi için iki değişkenli doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır.

Agregra granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 1 de gösterilmiştir. Şekil 1 de görülen fcu-UPV ilişkisi istatistiksel olarak analiz edilerek aşağıda verilen regresyon denklemleri ve R² değerleri bulunmuştur.

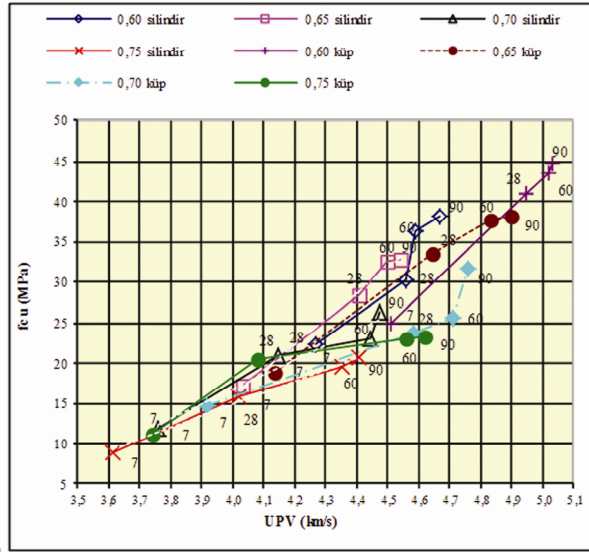
s/ç =0,60 olan silindirler için: $fcu_{st} = 38,824UPV - 143,742$ (MPa), $R^2 = 0,911$ ve aynı s/ç ye sahip küpler için: $fcu_{kt} = 37,035UPV - 142,082$ (MPa), $R^2 = 0,999$ olup; s/ç =0,65 olan silindirler için: $fcu_{st} = 31,552UPV - 110,183$ (MPa), $R^2 = 0,993$ ve aynı s/ç ye sahip küpler için: $fcu_{kt} = 26,054UPV - 88,490$ (MPa), $R^2 = 0,990$ bulunmuştur. s/ç = 0,70 olan silindirler için: $fcu_{st} = 18,081UPV - 55,511$ (MPa), $R^2 = 0,947$ ve aynı s/ç ye sahip küpler için: $fcu_{kt} = 16,969UPV - 52,263$ (MPa), $R^2 = 0,879$ olup; s/ç =0,75 olan silindirler için: $fcu_{st} = 14,515UPV - 43,270$ (MPa), $R^2 = 0,992$ ve aynı s/ç ye sahip küpler için: $fcu_{kt} = 12,618UPV - 34,114$ (MPa), $R^2 = 0,852$ elde edilmiştir.

Yukarıda ki bağıntılarda $f_{cu_{st}}$ ve $f_{cu_{kt}}$ sırasıyla silindir ve küp basınç dayanımları (MPa) olup, UPV ultrasonik ses hızı (km/s) ve R^2 ise determinasyon katsayısıdır.

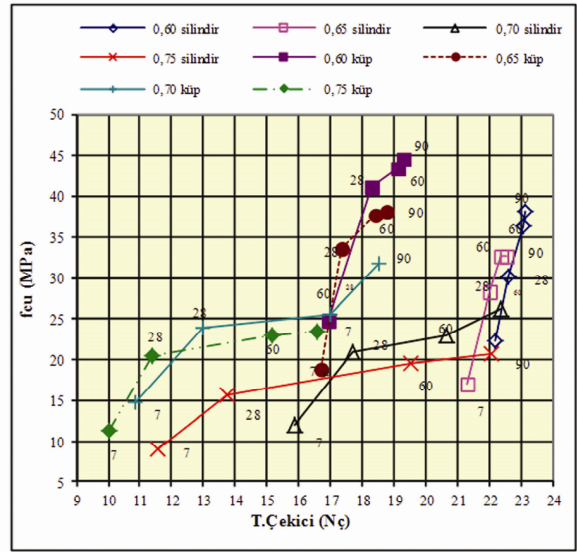
Görüldüğü üzere R^2 değerlerinin çoğu 0,90 değerinin üzerindedir. Buradan hareketle muhtelif s/ç oranları için beton yaşına bağlı olarak basınç dayanımı ile UPV arasında özellikle silindir numuneler için oldukça doğrusal bir ilişki bulunduğu görülmektedir.

Agrega granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-test çekici ilişkisi Şekil 2 de gösterilmiştir. Şekil 2 de verilen f_{cu} -test çekici($N\check{c}$) ilişkisi analiz edilerek aşağıdaki regresyon denklemleri ve R^2 değerleri bulunmuştur.

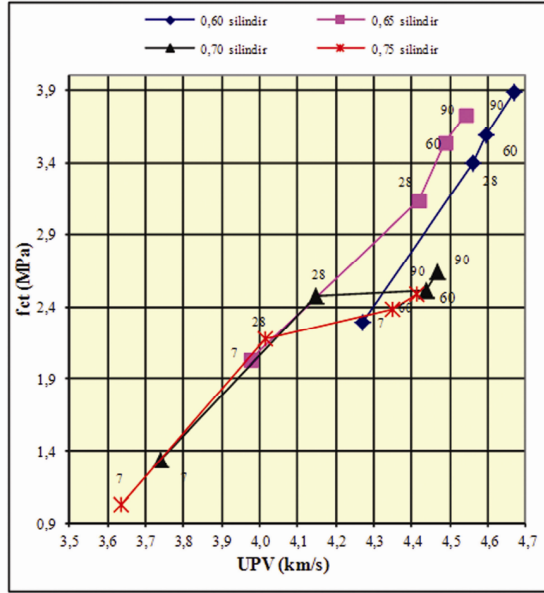
s/ç = 0,60 olan silindir ve küpler için sırasıyla: $f_{cu_{st}}=15,712N\check{c}-325,850$ (MPa), $R^2=0,996$ ve $f_{cu_{kt}}=8,066N\check{c}-110,000$ (MPa), $R^2=0,926$ olup; s/ç = 0,65 olan silindirler için: $f_{cu_{st}}=13,329N\check{c}-266,400$ (MPa), $R^2=0,964$ ve ayrıca s/ç =0,70 olan küpler için: $f_{cu_{kt}}=2,226N\check{c}-7,552$ (MPa), $R^2=0,916$ elde edilmiştir. Diğer s/ç oranları için hesaplanan regresyon bağıntılarında R^2 değerleri 0,87 ile 0,71 arasında değişmektedir.



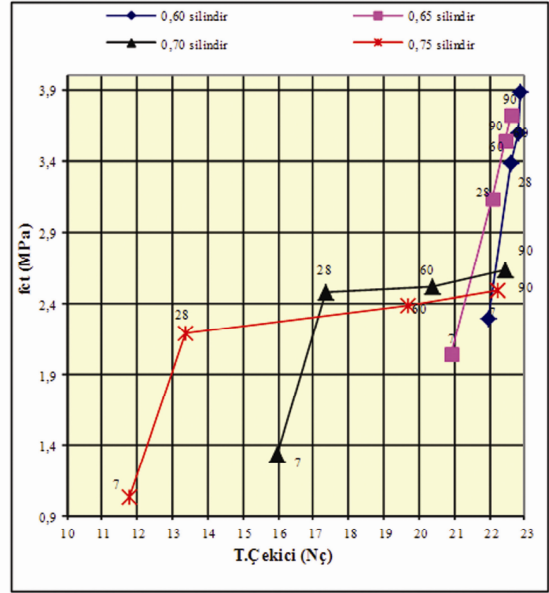
Şekil 1. Agregasyon granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-UPV ilişkisi



Şekil 2. Agregasyon granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-test çekici ilişkisi



Şekil 3. Agrega granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisi



Şekil 4. Agrega granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisi

Yukarıdaki bağıntılarda Nç test çekici değeri, diğerleri ise daha önce tanımlandığı gibidir. Buradan hareketle farklı s/ç oranlarına sahip tüm silindir ve küp numuneler için, beton yaşına bağlı olarak fcu-test çekici(Nç) ilişkisinin doğrusal olmadığı görülmektedir.

Agrega granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 3 de verilmiştir. Şekil 3 de görülen fct-UPV ilişkisi analiz edilerek aşağıdaki regresyon denklemleri ve R² değerleri elde edilmiştir.

s/ç =0,60 olan silindirler için; $f_{ct_y} = 3,957UPV - 14,616$ (MPa), R²=0,997 ve s/ç =0,65 olan silindirler için; $f_{ct_y} = 2,907UPV - 9,553$ (MPa), R²=0,982 olup; s/ç =0,70 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 1,685UPV - 4,829$ (MPa), R²=0,871 ve s/ç =0,75 olan silindirler için; $f_{ct_y} = 1,767UPV - 5,234$ (MPa), R²=0,903

Bu bağıntılarda fct_y silindir yarma dayanımı (MPa) ve diğerleri ise daha önce tanımlandığı gibidir. Görüldüğü üzere farklı s/ç oranlarına sahip olarak silindir yarma dayanımı ile UPV arasındaki ilişkinin yaklaşık olarak doğrusal olduğu söylenebilir.

Agrega granülometrisi A16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisi Şekil 4 de görülmektedir. Şekil 4 de verilen fct-test çekici ilişkisi analiz edilerek bulunan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

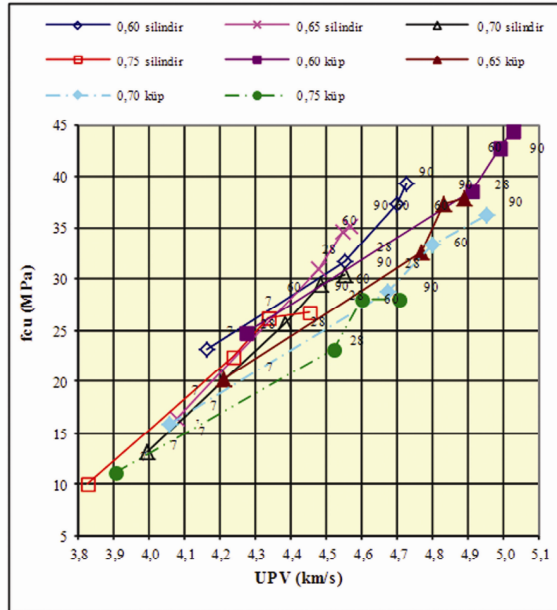
s/ç = 0,60 ve s/ç =0,65 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 1,707Nç - 35,234$ (MPa), R²=0,975 ve $f_{ct_y} = 0,994Nç - 18,767$ (MPa), R²=0,997 dir. Diğer s/ç oranları için R² değerleri 0,63 ile 0,58 arasında olduğundan, sadece

s/ç oranı 0,60 ve 0,65 olan silindir numuneler için, f_{ct} - N_c (test çekici) arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir.

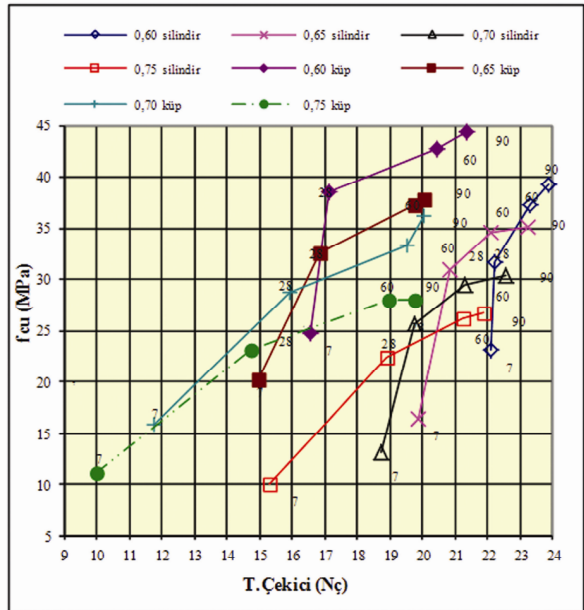
Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip farklı beton yaşlarındaki küp ve silindir numunelerin basınç dayanımı ile UPV ve test çekici ilişkisi sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6 da; Silindir yarma dayanımı ile UPV ve test çekici ilişkisi ise sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8 de gösterilmiştir. Agreg a granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 5 de verilmiştir. Şekilde görülen f_{cu} -UPV ilişkisinin istatistiksel analizi sonucu elde edilen regresyon denklemleri ve R^2 değerleri aşağıda verilmiştir.

s/ç = 0,60 olan silindirler için: $f_{cu_{st}}=27,270UPV-90,896$ (MPa), $R^2=0,972$ ve s/ç = 0,60 olan küpler için: $f_{cu_{kt}}=24,802UPV -81,515$ (MPa), $R^2=0,980$ olup; s/ç = 0,65 olan silindirler için: $f_{cu_{st}}=38,211UPV -139,590$ (MPa), $R^2=0,997$ ve s/ç = 0,65 olan küpler için: $f_{cu_{kt}}=25,750UPV -88,368$ (MPa), $R^2=0,976$ olarak bulunmuştur. s/ç = 0,70 olan silindirler için: $f_{cu_{st}}=32,003UPV -114,700$ (MPa), $R^2=0,995$ ve s/ç = 0,70 olan küpler için: $f_{cu_{kt}}=22,746UPV -76,527$ (MPa), $R^2=0,994$ olup; s/ç =0,75 olan silindirler için: $f_{cu_{st}}=28,085UPV-96,967$ (MPa), $R^2=0,978$ ve s/ç = 0,75 olan küpler için: $f_{cu_{kt}}=21,846UPV -74,254$ (MPa), $R^2=0,973$ olarak elde edilmiştir.

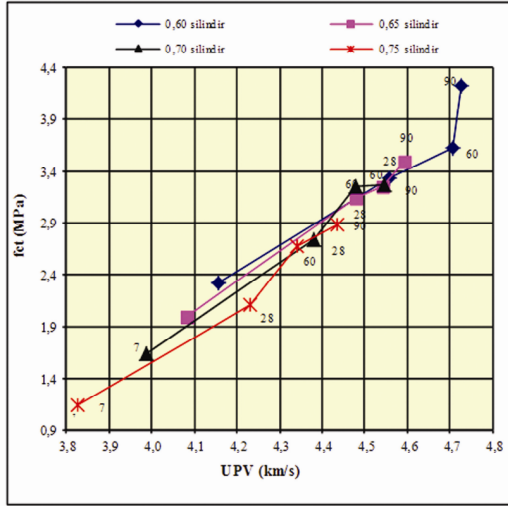
Yukarıdaki denklemlerden görüldüğü üzere R^2 değerleri 0,97'nin üzerinde olup, silindir ve küp numuneler için f_{cu} -UPV ilişkisi oldukça doğrusal bir değişim sergilemektedir.



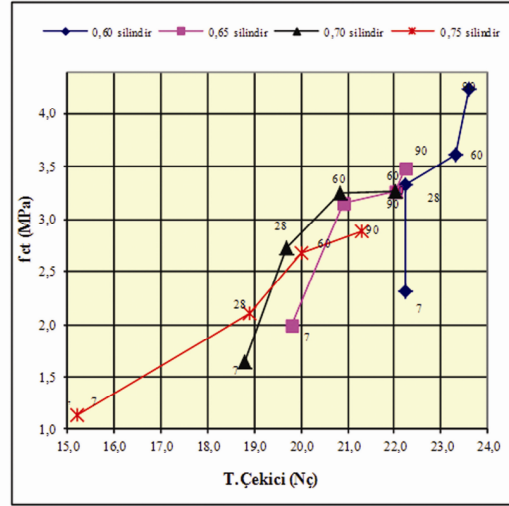
Şekil 5. Agreg a granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-UPV ilişkisi



Şekil 6. Agreg a granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-test çekici ilişkisi



Şekil 7. Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisi



Şekil 8. Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisi

Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip küp ve silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için basınç dayanımı-test çekici ilişkisi Şekil 6 da gösterilmiştir. Şekilde verilen f_{cu} -test çekici ilişkisi analiz edilerek aşağıdaki bağıntılar elde edilmiştir.

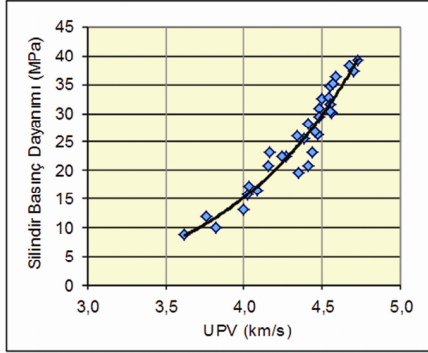
s/ç = 0,70 olan küpler için: $f_{cu_{kt}} = 2,300N_{ç} - 10,053$ (MPa), $R^2 = 0,967$ ve s/ç = 0,75 olan silindirler için: $f_{cu_{st}} = 2,574N_{ç} - 28,392$ (MPa), $R^2 = 0,960$ olup; s/ç = 0,75 olan küpler için: $f_{cu_{kt}} = 1,735N_{ç} - 4,929$ (MPa), $R^2 = 0,949$ Diğer s/ç oranları için ilgili regresyon bağıntılarında R^2 değerleri 0,87 ile 0,47 arasında bulunmaktadır. Bu nedenle sadece s/ç oranı 0,70 ve 0,75 olan küp numuneler ile s/ç oranı 0,75 olan silindir numuneler için beton yaşına bağlı olarak f_{cu} - $N_{ç}$ (test çekici) ilişkisinin doğrusal bir karaktere sahip olabileceğinden söz edilebilir.

Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 7 de görülmektedir. Şekil 7 de verilen f_{ct} -UPV ilişkisinin analizi sonucu elde edilen regresyon denklemleri ve R^2 değerleri ise aşağıdaki gibidir.

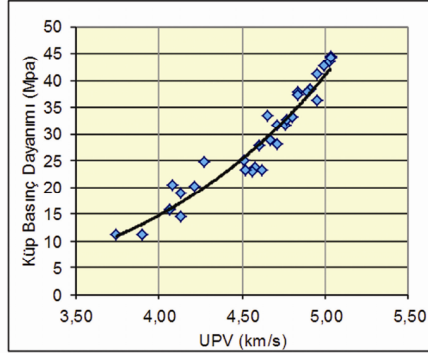
s/ç = 0,60 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 2,902UPV - 9,792$ (MPa), $R^2 = 0,916$ ve s/ç = 0,65 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 2,844UPV - 9,606$ (MPa), $R^2 = 0,997$ olup; s/ç = 0,70 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 3,022UPV - 10,416$ (MPa), $R^2 = 0,983$ ve son olarak s/ç = 0,75 olan silindirler için: $f_{ct_y} = 2,874UPV - 9,891$ (MPa), $R^2 = 0,978$ dir. Görüldüğü üzere yukarıdaki regresyon denklemlerinden hareketle tüm s/ç oranları için beton yaşına göre silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisinin doğrusal olduğu söylenebilir.

Agrega granülometrisi B16 olan muhtelif s/ç oranlarına sahip silindir numunelerde beton yaşı 7, 28, 60 ve 90 gün için silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisi Şekil 8 de verilmiştir. Şekilde görülen f_{ct} -test çekici ilişkisinin analizi sonucunda sadece aşağıdaki doğrusal regresyon denklemi ve buna ilişkin R^2 değeri elde edilmiştir.

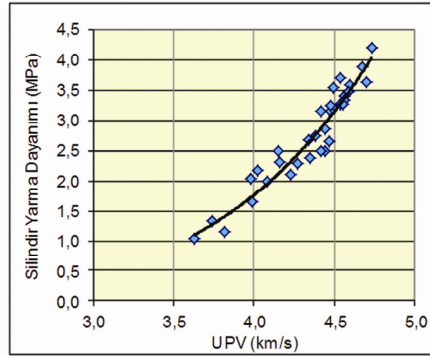
$s/\phi = 0,75$ olan silindirler için: $f_{ct,y} = 0,295 N\phi - 3,364$ (MPa), $R^2 = 0,982$. Diğer s/ϕ oranları için R^2 değerleri 0,86 ile 0,70 arasında değişmekte olup, doğrusal ilişki göstermemektedir. Buradan farklı s/ϕ oranları için silindir numunelerde beton yaşına bağlı silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisinin doğrusal olmadığı söylenebilir.



Şekil 9. Silindir basınç dayanımı - UPV ilişkisi



Şekil 10. Küp basınç dayanımı - UPV ilişkisi



Şekil 11. Silindir yarma dayanımı - UPV ilişkisi

Tüm deney grupları dikkate alınarak silindir basınç dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 9’da gösterilmiştir. Benzer şekilde küp basınç dayanımı-UPV ilişkisi Şekil 10’da ve silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisi de Şekil 11’de verilmiştir.

Öte yandan tüm deney grupları göz önüne alınarak; silindir basınç dayanımı ile UPV, küp basınç dayanımı ile UPV ve silindir yarma dayanımı ile UPV değerleri arasında ayrı ayrı yapılan istatistik analizler sonucunda aşağıda verilen üstel denklemler ve R^2 değerleri elde edilmiştir.

$$f_{cyt} = 0,0058V^{5,6816}, R^2 = 0,9316 \quad \dots \quad (1)$$

$$f_{cut} = 0,0259V^{4,5773}, R^2 = 0,9268 \quad \dots \quad (2)$$

$$f_{ctt} = 0,0019V^{4,9130}, R^2 = 0,9198 \quad \dots \quad (3)$$

Burada: f_{cyt} silindir basınç dayanımı (MPa), f_{cut} küp basınç dayanımı (MPa), f_{ctt} silindir yarma dayanımı (MPa), V ultrasonik ses hızı (km/s) ve R^2 determinasyon katsayısıdır.

Çizelge 3. Deneysel sonuçların 1, 2 ve 3 denklemlerinden bulunan Silindir basınç, küp basınç ve silindir yarma dayanım değerleri ile karşılaştırılması

Silindir basınç dayanımı				Küp basınç dayanımı				Silindir yarma dayanımı				
Hız (km/s)	f _{cu} (MPa)	f _{cyt} denk1 (MPa)	f _{cu} /f _{cyt} denk1	Hız (km/s)	f _{cu} (MPa)	f _{cut} denk2 (MPa)	f _{cu} /f _{cut} denk2	Hız (km/s)	f _{ct} (MPa)	f _{ctt} denk3 (MPa)	f _{ct} /f _{ctt} denk3 (MPa)	
4,27	22,37	22,08	1,013	4,51	24,95	25,60	0,975	4,27	2,29	2,43	0,942	
4,56	30,18	32,07	0,941	4,95	41,09	39,20	1,048	4,56	3,39	3,36	1,009	
4,59	36,43	33,28	1,095	5,02	43,44	41,80	1,039	4,60	3,59	3,50	1,026	
4,67	38,25	36,72	1,042	5,03	44,61	42,18	1,058	4,67	3,89	3,77	1,032	
4,03	17,14	15,89	1,079	4,13	18,79	17,11	1,098	3,98	2,04	1,72	1,186	
4,41	28,32	26,52	1,068	4,65	33,57	29,44	1,140	4,42	3,14	2,88	1,090	
4,50	32,61	29,74	1,097	4,83	37,81	35,03	1,079	4,49	3,54	3,11	1,138	
4,54	32,73	31,27	1,047	4,90	38,11	37,42	1,018	4,54	3,70	3,29	1,125	
3,76	11,89	10,72	1,109	4,13	14,66	17,11	0,857	3,74	1,33	1,27	1,047	
4,15	20,84	18,77	1,110	4,58	23,82	27,47	0,867	4,15	2,48	2,11	1,175	
4,44	23,07	27,56	0,837	4,71	31,76	31,22	1,017	4,44	2,49	2,94	0,847	
4,47	26,34	28,63	0,920	4,76	31,76	32,77	0,969	4,47	2,64	3,04	0,868	
3,62	8,90	8,64	1,030	3,74	11,21	10,87	1,031	3,63	1,03	1,09	0,945	
4,02	15,76	15,67	1,006	4,08	20,53	16,18	1,269	4,02	2,18	1,81	1,204	
4,35	19,54	24,53	0,797	4,56	22,97	26,92	0,853	4,35	2,38	2,66	0,895	
4,41	20,73	26,52	0,782	4,62	23,37	28,58	0,818	4,42	2,49	2,88	0,865	
4,16	23,17	19,03	1,218	4,27	24,76	19,93	1,242	4,16	2,31	2,14	1,079	
4,55	31,67	31,67	1,000	4,91	38,51	37,77	1,020	4,56	3,33	3,36	0,991	
4,70	37,24	38,08	0,978	4,99	42,70	40,67	1,050	4,70	3,62	3,89	0,931	
4,73	39,23	39,48	0,994	5,03	44,39	42,18	1,052	4,73	4,19	4,02	1,042	
4,08	16,39	17,04	0,962	4,21	20,28	18,68	1,086	4,08	2,00	1,94	1,031	
4,48	30,92	29,00	1,066	4,77	32,66	33,09	0,987	4,48	3,15	3,08	1,023	
4,55	34,67	31,67	1,095	4,83	37,34	35,03	1,066	4,54	3,26	3,29	0,991	
4,57	35,12	32,47	1,082	4,89	37,79	37,07	1,019	4,59	3,46	3,47	0,997	
4,00	13,11	15,23	0,861	4,06	15,92	15,82	1,006	3,99	1,64	1,74	0,943	
4,38	25,61	25,51	1,004	4,67	28,78	30,03	0,958	4,38	2,73	2,75	0,993	
4,48	29,49	29,00	1,017	4,80	33,37	34,05	0,980	4,48	3,25	3,08	1,055	
4,55	30,47	31,67	0,962	4,95	36,24	39,20	0,924	4,55	3,26	3,32	0,982	
3,82	10,02	11,73	0,854	3,90	11,12	13,16	0,845	3,82	1,14	1,41	0,809	
4,24	22,47	21,21	1,059	4,52	23,19	25,86	0,897	4,23	2,10	2,32	0,905	
4,34	26,14	24,21	1,080	4,60	27,98	28,02	0,999	4,34	2,68	2,63	1,019	
4,45	26,71	27,91	0,957	4,71	28,06	31,22	0,899	4,44	2,85	2,94	0,969	
Aritmetik Ortalama			1,005					1,005				
Standart Sapma			0,0994					0,1046				
Varyasyon Katsayısı			9,89%					10,41%				

En küçük kareler yöntemine göre, her üç denklemde de hız ile basınç ve yarma dayanımı datsı için en iyi regresyon modeli $y=ax^b$ veya $\log(y)=\log a + b\log(x)$ şeklindedir. Bir başka ifade ile bu modeller log-log eksenlerinde doğrusal forma sahiptir. ANOVA tekniği kullanılarak; (1) denklemdeki a ve b katsayılarının %95 güven aralıkları $0,0025 < a < 0,0134$ ve $5,11 < b < 6,26$ iken (2) denklemdeki a ve b katsayılarının %95 güven aralıkları $0,0125 < a < 0,0539$ ve $4,10 < b < 5,06$ ve son olarak (3) denklemdeki a ve b katsayılarının %95 güven aralıkları ise $0,0009 < a < 0,043$ ve $4,37 < b < 5,45$ olarak bulunmuştur.

Sırasıyla (1) ve (2) denklemlerinden elde edilen silindir ve küp basınç dayanımları ile (3) denkleminden elde edilen silindir yarma dayanımları deneysel olarak bulunan değerlerle Çizelge 3 de karşılaştırılmıştır.

Deneysel silindir basınç dayanımının (1) denkleminden bulunan silindir basınç dayanımına oranının aritmetik ortalaması, standart sapma ve varyasyon katsayısı sırasıyla 1,005, 0,0994 ve 9,89% iken deneysel küp basınç dayanımının (2) denkleminden elde edilen küp basınç dayanımına oranının aritmetik ortalaması, standart sapma ve varyasyon katsayısı ise 1,005, 0,1046 ve 10,41% olarak Çizelge 3 de görülmektedir. Öte yandan deneysel silindir yarma dayanımının (3) denkleminden elde edilen silindir yarma dayanımına oranının aritmetik ortalaması, standart sapma ve varyasyon katsayısı sırasıyla 1,005, 0,0979 ve 9,74% olarak elde edilmiştir. Çizelge 3 den görüldüğü gibi deneysel değerlerle (1), (2) ve (3) denklemlerinden elde edilen teorik değerler birbirleriyle iyi uyum içindedir.

5. SONUÇLAR

Farklı agrega granülometrisi, farklı s/ç oranı ve farklı beton yaşına sahip silindir ve küp numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1-Agrega granülometrisi A16 ve B16 olan numunelerin s/ç oranı arttıkça betonun dayanım değerleri azalırken UPV ve test çekici değerleri de azalmaktadır. Buradan dayanım değeri ile UPV ve test çekici değerleri arasında s/ç oranı ile ters orantılı bir ilişki olup, ayrıca ultrasonik test yönteminin deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu görülmüştür. Öte yandan, aynı s/ç oranına sahip numunelerin beton yaşı arttıkça beton dayanımı, UPV ve test çekici değerleri de artmaktadır. Bu nedenle s/ç oranı sabit iken dayanım, UPV ve test çekici değerleri ile beton yaşı arasında doğru orantılı bir ilişkinin var olduğu tespit edilmiştir.

2-Deneysel sonuçların regresyon analizleri sonucu elde edilen R^2 determinasyon katsayıları incelendiğinde, agrega granülometrisi A16 ve B16 olan ve farklı s/ç oranlarına sahip silindir ve küp numuneler için basınç dayanımı-UPV ilişkisi doğrusal olup, bu durum granülometrisi B16 olan numuneler için daha belirgindir. Öte yandan, aynı granülometri ve aynı s/ç oranlarına sahip numunelerin basınç dayanımı-test çekici ilişkisinin ise doğrusal olmadığı ortaya çıkmıştır.

3-Agrega granülometrisi A16 ve B16 olan beton silindir deney sonuçlarına ilişkin R^2 determinasyon katsayılarının incelenmesinden, farklı s/ç oranları için silindir yarma dayanımı-UPV ilişkisinin doğrusal olduğu görülmüştür. Ancak aynı granülometri ve aynı s/ç oranları için silindir yarma dayanımı-test çekici ilişkisi ise doğrusal değildir.

4-Ultrasonik ses hızı ile silindir basınç dayanımı, küp basınç dayanımı ve silindir yarma dayanımı arasında üstel bir ilişki olup; bu ilişkiler sırasıyla 1, 2 ve 3 denklemleri ile verilebilir. Bu denklemlerden hesaplanan silindir basınç dayanımı, küp basınç dayanımı ve silindir yarma dayanımı değerleri, deneysel olarak elde edilmiş değerlerle iyi uyum içindedir.

5-En büyük tane büyüklüğü 16 mm olan kırma taş agrega ile üretilen ve yaşı 90 gün ve daha küçük olan betonların silindir ve küp basınç dayanımları ile silindir yarma dayanımları sırasıyla 1, 2 ve 3 denklemlerinden makul bir yaklaşımla tahmin edilebilir. İstenildiğinde aynı agrega granülometrisi fakat farklı s/ç oranı ve farklı beton yaşlarında üretilen silindir ve küp numuneler üzerinde UPV okumaları yapıldıktan sonra bulunan silindir ve küp basınç dayanımları ile silindir yarma dayanımı değerleri yukarıda verilen denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir ve ne ölçüde uyumlu oldukları görülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] J. Krautkramer , Krautkramer, M., Ultrasonic testing of materials, Berlin, Springer, 1990
- [2] V. Malhorta(Ed), Testing Hardened Concrete: Non-destructive Methods, ACI, monograph No.9, Detroit, US, 1976
- [3] S.A. Abo-Qudais, Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves, Construction and Building Materials, Vol. 19, p.257-263, 2004.
- [4] S.R.M. Khan, Noorzaeei, J., Kadir, M.R.A., Waleed, A.M.T., Jaafar, M.S., UPV method for strength detection of high performance concrete, Journal:Structural Survey, Publisher:Emerald Group Publishing Limited, Vol.25, Issue:1 p.61, 2007.
- [5] P. Turgut, O.F. Küçük, Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity nauka/İnterperiodica distributed exclusively by Sprinder Science+business Media LLC., pp.745-751, 2007
- [6] G.F. Kheder, December A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing, University of Mustansiriya, Bagdad, Iraq, pp. 410-417, 1998.
- [7] H.Y. Qasrawi, Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted, Cement and Concrete Research, Vol. 30, Issue 5, pp.739-746, 2000.
- [8] L.M. del Rio, A. Jimenez, F. López, I.J. Rosa, M.M. Rufo, J.M. Paniagua, Ultrasonic characterization of granites obtained from industrial quarries of Extremadura (Spain), Ultrasonics, Vol.44, pp.-1057-1061, 2006.
- [9] B.Hobbs, M.T. Kebir, Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings, Forensic Science International, Vol. 167, pp.167-172, 2007.
- [10] R. Demirboğa. İ.Türkmen., M.B Karakoç, Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete, Elsevier, Oxford, ROYAUME-UNI, Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Atatürk University, 25240-Erzurum, TURQUIE, pp. 2329-2336, 2004.
- [11] H.M.A. Al-Mattarneh, D.K. Ghodgaonkar, W.M.B.W.A. Majid, Microwave Conference Asia-Pacific Volume, Issue, 2001 Page (s):679 - 682 vol.2 Digital Object Identifier 10.1109/APMC.2001.985463, 2001.
- [12] J. Bungey, The testing of Concrete in structures, London, UK: Surrey University Press, 1989.
- [13] J. Rakuše, Determination of concrete quality in a structure by combination of destructive and non-destructive methods, Faculty of Civil Engineering, Gradevinski Institut, 1, 41000 Zagreb, Yugoslavia, Springer Netherlands, pp:65-69, 2006.
- [14] TS 706 EN 12620+A1, Beton Agregaları, 2009
- [15] M.A. Tanrıkulu, Tahribatsız Test Yöntemleri ile Beton Kalitesinin Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, DPÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010
- [16] TS 3529, 1980, Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini.
- [17] TS 802, Beton Karışım Tasarımı Hesapları, 2009.
- [18] TS EN 12390, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-
Bölüm 1:Deney Numunesi ve Kalıpların Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, 2002.
Bölüm 2:Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi, 2002.
Bölüm 3:Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, 2003.
Bölüm 4:Basınç Dayanımı- Deney Makinelerinin Özellikleri, 2002.
Bölüm 6:Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, 2002.
- [19] TS EN 12504-2, Yapılarda Beton Deneyleri-Bölüm 2:Tahribatsız Deneyler-Geri Sıçranma Sayısının Tayini, 2004.
- [20] TS EN 12504-4, Beton Deneyleri-Bölüm 4:Ultrases Geçiş Hızının Tayini, 2004.