

691.32:620.17

T 646 y

Dno: 19996

MFN: 6216



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

1997-152

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN
MALZEME ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

TÜRKİYE BİLİMSEL ve
TEKNİK ARAŞTIRMA
KURUMU KÜTÜPHANESİ

PROJE NO: İNTAG-601

İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu

Construction Technologies Research Grant Committee

691.32:620.17
T 646 y



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

1997-152

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN
MALZEME ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA
KURUMU KÜTÜPHANESİ
PROJE NO: İNTAG-601

Scab, 1996

19996

İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu

Construction Technologies Research Grant Committee

TÜRKİYE BİLİMSEL VE TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU
İNŞAAT TEKNOLOJİLERİ ARAŞTIRMA GRUBU

YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN
MALZEME ÖZELİKLERİNİN BELİRLENMESİ

1997-152

PROJE NO: İNTAG-601

(35)

ODTÜ İnşaat Müh.

1 - 116

Doç. Dr. Mustafa TOKYAY

1995
Ankara

ÖNSÖZ

İNTAG-601, "Yüksek Dayanımlı Betonların Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi" Projesi 1991 yılı için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından belirlenmiş olan Öncelikli Alan Projeleri kapsamında değerlendirilmiş ve desteklenmesi kararlaştırılmıştır.

Proje 1991 yılı Ekim ayında başlamış olup, deneysel çalışmaları 1995 Nisan'ına kadar sürdürülmüştür. Bu süre içinde, Yüksek Dayanımlı Betonların malzeme özellikleri sekiz ana başlık altında incelenmiştir. Yapılan deney ve analizlerin hemen hemen tamamına yakın bölümü O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. 1992 yılından bu yana, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'nda İNTAG-601 kapsamında ele alınan konulardan (i) değişik agrega tiplerinin etkileri, (ii) değişik bakım yöntemlerinin etkileri ve hızlandırılmış bakım yöntemleri, (iii) numune boyut ve geometrisinin etkileri ve (iv) maksimum agrega boyutunun etkilerini ele alan dört Yüksek Lisans tezi tamamlanmıştır. Yine proje kapsamında bulunan Yüksek Dayanımlı Betonlarda Rötne konusuna ilişkin bir Yüksek Lisans tezi ise tamamlanma aşamasına gelmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, TÜBİTAK'ın mali desteği ile, iki hızlandırılmış kür kabini, çok sayıda kalıplar, numune başlıklama düzeneği gibi ekipman ve gerekli sarf malzemeleri alınmıştır.

İNTAG-601 Projesi Doç. Dr. Mustafa Tokyay tarafından yürütülmüştür. Projede Dr. Kambiz Ramyar Araştırmacı, Cuma Yıldırım ve Nurhan Ertürk Teknisyen, Korkmaz Akay ve Ali Sümbüle de Teknisyen yardımcısı olarak görev almışlardır. Araştırmaların çeşitli bölümlerinde YKS Yapkim A.Ş., Çorum Çimento Sanayii A.Ş., Tamtaş A.Ş., Etibank Elektrometalurji Müessesesi ve Nurol İnşaat gerekli malzemelerin temininde katkıda bulunmuşlardır.

ÖZ

Bir çok ulusal ve uluslararası standart ve şartnamelerde beton sınıfları BS 14 ile BS 50 arasındadır. Oysa, artık Dünyada ve ülkemizde BS 100, BS 120 olarak nitelendirilebilecek betonlar üretilmeye başlanmıştır. Yüksek dayanımlı betonların yalnızca dayanımları yüksek olmakla kalmayıp genel performansları da yüksektir.

Yüksek dayanımlı betonların kullanılacağı yapıların hesap esaslarının ve yapım kurallarının sağlıklı biçimde oluşturulabilmesi bu betonların malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi ile mümkün olacaktır. Bu nedenle, araştırmanın amacını yüksek dayanımlı betonların malzeme özelliklerinin belirlenmesi oluşturmuştur. Bu amaç çerçevesinde, deneysel çalışmalar yedi ana bölümde gerçekleştirilmiştir: (1) Beton bileşenlerinin özelliklerinin belirlenmesi; (2) akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıların, (3) mineral katkıların, (4) agrega özelliklerinin, (5) numune boyut ve geometrisinin, (6) değişik bakım yöntemlerinin yüksek dayanımlı betonların çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerine etkilerinin belirlenmesi ve (7) yüksek dayanımlı betonların dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi.

Böylece, yüksek dayanımlı betonlar için uygun matzemelerin seçilmesi, karışım oranlarının belirlenmesi, çeşitli parametrelerin (kullanılan malzeme cinsi, numune geometrisi, bakım koşulları v.b.) bu betonların performanslarına etkileri, gerilme-gerinim ilişkileri, basınç, çekme ve eğilme dayanımları, zaman-dayanım kazanma ilişkileri, donma-çözülme ve karbonatlaşma dirençleri, rötre özellikleri, v.b. yapılan çok sayıda deneylerin sonuçları irdelenerek belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Yüksek dayanımlı beton, akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıları, mineral katkıları, mekanik özellikler, bakım koşulları, hızlandırılmış bakım, numune boyut ve geometrisi, agrega tipi, maksimum agrega boyutu, dayanıklılık.

İçindekiler
Özgeçmiş
Sözleşme

- 1. Giriş
- 1.1. Genel
- 2. Araştırma Konusu
- 2.1. Giriş
- 2.1.1. Genel
- 2.1.2. Amaçlar
- 2.1.3. Yöntem
- 2.1.4. Bulgular
- 2.2. Yorumlar
- 2.3. Sonuçlar
- 2.4. Öneriler

ABSTRACT

In most of the national and international standards and specifications, concrete classes are specified between 14 and 50 MPa characteristic strength. However, recent developments in concrete technology have led to the production of concretes with strengths exceeding 100-120 MPa, in many countries including Turkey. Besides their high strength, these concretes have high overall performance, too.

In order to establish appropriate design and construction rules for structures made of high-strength concrete, the properties of this material must be well understood. Thus, the object was taken as the determination of the material properties of high-strength concrete. Within this perspective, the experimental work was carried out in seven major steps: (1) Determination of the properties of high-strength concrete ingredients; determination of the effects of (2) plasticizing and superplasticizing chemical admixtures, (3) mineral admixtures, (4) aggregate properties, (5) specimen size and geometry and (6) different curing methods and (7) determination of the durability characteristics of high-strength concretes.

Thus, how to choose appropriate materials and mix proportioning, determination of the effects of various parameters (type of materials used, specimen size, curing methods, etc.) on the performance of high-strength concretes were understood. Stress-strain relations, compressive, tensile, and flexural strengths, age-strength development relations, freeze-thaw and carbonation resistances, shrinkage properties, etc. of high-strength concretes were determined.

Key Words: High-strength concrete, plasticizing and superplasticizing admixtures, mineral admixtures, mechanical properties, curing methods, accelerated curing, specimen size and geometry, aggregate type, maximum aggregate size, durability.

İçindekiler

	Sayfa
	vii
Çizelge Listesi	
Şekil Listesi	ix
1. Giriş	1
1.1. Genel	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
1.2.1. Uygun Malzemelerin Seçilmesi	2
1.2.1.1. Çimento	2
1.2.1.2. Kimyasal Katkılar	2
1.2.1.3. Mineral Katkılar	3
1.2.1.4. Agregalar	3
1.2.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi	3
1.2.3. Bakım Koşullarının Etkileri	3
1.2.4. Mekanik Özellikler, Dayanım ve Dayanıklılık	4
1.3. Projenin Yöntemi	
2. Deneylerde Kullanılan Beton Bileşenlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi	5
2.1. Çimento	6
2.2. Agregalar	9
2.3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkılar	10
2.4. Mineral Katkılar	
3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi	13
3.1. Genel	18
3.2. Mevcut Bilgi Birikimi	18
3.2.1. Su Azaltıcı Katkıların Su-Çimento Sistemine Etkileri	18
3.2.2. Su Azaltıcı Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkileri	23
3.2.2.1. Hava Miktarı	23
3.2.2.2. İşlenebilirlik	23
3.2.2.3. İşlenebilirlik Kaybı	23
3.2.2.4. Beton Karışım Suyunda Meydana Gelen Azalma	30
3.3. Deneysel Çalışma	30
3.3.1. Beton Karışım Oranları	31
3.3.2. Yapılan Deneyler	31
3.3.3. Deney Sonuçları	31
3.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	
4. Mineral Katkı Maddelerinin Etkilerinin Belirlenmesi	50
4.1. Genel	50
4.2. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi	50
4.3. Mikrosilisin Beton Özelliklerine Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi	51
4.4. Deneysel Çalışma	51
4.4.1. Beton Karışım Oranları	51

	Sayfa
4.4.2. Yapılan Deneyler	52
4.4.3. Deney Sonuçları	54
4.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	54
4.5.1. Karışım Suyu ve Dayanımlar	55
4.5.2. Elastisite Modülü	55
5. Agregata Özelliklerinin Etkilerinin Belirlenmesi	66
5.1. Giriş	66
5.2. Agregata Özelliklerinin Betona Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi	66
5.3. Deneysel Çalışma	67
5.3.1. Agregata Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları	67
5.3.2. Maksimum Agregata Boyutunun Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları	68
5.3.3. Yapılan Deneyler	68
5.3.3.1. Agregata Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler	68
5.3.3.2. Maksimum Agregata Boyutunun Etkilerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler	69
5.4. Deney Sonuçları	69
5.4.1. Agregata Cinsinin Etkileri Deney Sonuçları	69
5.4.2. Maksimum Agregata Boyutunun Etkileri Deney Sonuçları	70
5.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	70
5.5.1. Agregata Cinsinin Etkileri	70
5.5.1.1. Basınç Dayanımları	70
5.5.1.2. Yarımada Çekme Dayanımları	74
5.5.1.3. Eğilme Dayanımları	74
5.5.1.4. Elastisite Modülü	74
5.5.1.5. Yükleme-Boşaltma Gerilme-Gerinim Eğrileri (Histeresis Çevrimleri)	78
5.5.2. Maksimum Agregata Boyutunun Etkileri	78
6. YDBIlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Basınç Dayanımına Etkileri	84
6.1. Geçmiş Araştırmaların Gözden Geçirilmesi	84
6.2. Deneysel Çalışma	88
6.3. Deney Sonuçları	90
6.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	90
6.4.1. Silindirik ve Küp Numunelerde Boyut Etkisi	90
6.4.2. Silindirik Numunelerde Boy-Çap Oranının Etkileri	95
7. Değişik Bakım Yöntemlerinin Dayanıma Etkileri	98
7.1. Kullanılan Beton Karışım Oranları	98
7.2. Deneysel Çalışma	98
7.3. Deney Sonuçları	99
7.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	99
7.4.1. Değişik Bakım Koşullarında Yaş-Dayanım İlişkisi	99
7.4.2. Hızlı Bakım Yöntemlerine İlişkin Sonuçların İrdelenmesi	102
8. YDBIların Dayanıklılık Özellikleri	107
8.1. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyleri	107
8.2. Donma-Çözülme Deneyleri	107
8.3. Sülfat Direnci Deneyleri	108

8.4. Rötre Deneyleri	Sayfa 108
8.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar	113
9. Genel Sonuçlar	114
Kaynaklar	115

Çizelge Listesi

Çizelge	Sayfa
2.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler, Sağlandığı Yerler ve Miktarları	5
2.2. Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	6
2.3. Kullanılan Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu	6
2.4.a. Kumun Özellikleri	7
2.4.b. Çakılın Özellikleri	7
2.4.c. Kireçtaşının Özellikleri	8
2.4.d. Granitin Özellikleri	8
2.4.e. Diabazın Özellikleri	9
2.5. Kullanılan Kimyasal Katkıların Özellikleri	9
2.6. Mineral Katkıların Kimyasal Kompozisyonları	10
2.7. Mineral Katkıların Fiziksel Özellikleri	10
3.1. Su Azaltıcı Katkıların Betonun Hava Miktarına Etkileri	23
3.2. SAKların Su Azaltıcı Özeliğinin Çökme Değeri İle Değişimi	30
3.3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi	30
Deneylerinde Kullanılan Kontrol Betonlarının Karışım Oranları	
3.4. AK ve SAKların Etkilerinin Belirlenmesi Aşamasında Yapılan Deneyler ve İlgili Türk Standartları	31
3.5. Çökme, Birim Ağırlık ve Hava Miktarı Deney Sonuçları	37
3.6. AK ve YAK Kullanımıyla Beton Karışım Suyunda Meydana Gelen Azalma	38
3.7. 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	39
4.1. Mineral Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi Deneylerinde Kullanılan Beton Karışım Oranları	52
4.2. Kullanılan Betonların Taze Haldeki Özellikleri	53
4.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	54
4.4. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Değerleri	54
5.1. Agrega Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları ve Bazı Taze Beton Özellikleri	67
5.2. Dmaks Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları	68
5.3. Değişik Agregalarla Elde Edilen Basınç Dayanımları	69
5.4. Değişik Agregalarla Elde Edilen Yarmada Çekme Dayanımları	69
5.5. Değişik Agregalarla Elde Edilen Eğilme Dayanımları	69
5.6. Değişik Agregalarla Elde Edilen Elastisite Modülleri ve Poisson Oranları	69
5.7. Dmaks'ın Farklı Beton Sınıflarının Karışım Suyu Miktarına Etkileri	70
5.8. Dmaks'ın Farklı Beton Sınıflarının Basınç Dayanımlarına Etkileri	70
6.1. Küp ve Silindir Numuneler İçin Dayanım Çevirme Katsayıları [Held,1990]	88
6.2. Değişik Dayanım Düzeylerindeki Betonlar İçin Küp-Silindir Çevirme Katsayıları [Smeplass,1989]	88
6.3. YDBlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları	88
6.4. YDBlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Numune Boyutları	90
6.5. Değişik Boyutlardaki Numunelere Uygulanan Sıkıştırmalar	90
6.6. Boy-Çap Oranı 2.00 Olan Değişik Boylardaki Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları	91
6.7. Değişik Boy-Çap Oranlarındaki Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları	91
6.8. Değişik Boyutlardaki Küp Numunelerin Basınç Dayanımları	94
6.9. Numunelerin Yanal Yüze Alanı-Hacim Oranları	94
7.1. Değişik Bakım Yöntemlerinin Karşılaştırılmasında Kullanılan Beton Karışımları	98

	sayfa
7.2. Standart, Buhar ve Düşük Sıcaklıkta Bakımı Yapılan YDBların Değişik Yaşlardaki Basınç Dayanımları	99
7.3. Hızlandırılmış Bakım Yöntemleri Sonucunda Elde Edilen Basınç Dayanımları	99
7.4. Değişik Bakım Koşullarının, YAK ve Mineral Katkı Kullanımının YDBların 7 ve 28 Günlük Dayanımlarının 28 Günlük Dayanıma Oranlarına Etkileri	102
7.5. Olgunluk-Dayanım İlişkileriyle İlgili İstatistiksel Bilgiler	102
7.6. Standart Bakım Dayanımlarıyla Hızlı Bakım Dayanımları Arasındaki İlişkilere Ait İstatistiksel Bilgiler	102
8.1. Karbonatlaşma, Donma-Çözülme ve Sülfat Direnci Deneğinde Kullanılan Beton Karışımları	107
8.2. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları	107
8.3. Donma-Çözülme Deney Sonuçları	108
8.4. Rötire Deneğinde Kullanılan Harç Karışımları	108

Şekil Listesi

Şekil	Sayfa
2.1. SB ve TB uçucu küllerinin X-Işınları difraktogramları	11
2.2. MS'nin X-Işınları difraktogramı	12
3.1. Su azaltıcı katkıların betonun dayanım ve işlenebilmesine etkileri	14
3.2. Lignosülfonat molekülünü oluşturan birim (mer)	15
3.3. SAK üretiminde kullanılan hidroksikarboksilik asitler	15
3.4. Hidroksile polimer	16
3.5. Naftalin formaldehid sülfonik asit	16
3.6. Melamin formaldehid sülfonat	17
3.7. SAKların su azaltmaya neden olan ayırıcı etkisi	18
3.8. Değişik S/Ç oranlarındaki taze çimento hamurlarının kayma gerilmesi-kayma gerinimi ilişkileri	19
3.9. Değişik su azaltıcı katkıları içeren çimento hamurlarının kayma gerilmesi-kayma gerinim ilişkileri	20
3.10. Su azaltıcı katkıların dozajının çimento hamuru viskozitesine etkileri	21
3.11. Değişik su-çimento oranlarındaki çimento hamurlarında su azaltıcı katkıların viskoziteye etkileri	22
3.12. Katkısız ve Su azaltıcı katkı içeren betonların çökme değerlerinin karşılaştırılması	24
3.13. Su azaltıcı katkı dozajının betonun çökmesine etkisi	25
3.14. Su azaltıcı katkı içeren betonlarda zamanla çökme kaybı	26
3.15. Su azaltıcı katkı dozajının çökme kaybına etkileri	27
3.16. Agrega-çimento oranının SAKların su azaltmasına etkisi	28
3.17. Yüksek akışkanlaştırıcı katkıların dozajının su azaltmaya etkisi	29
3.18. Akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıların etkilerinin belirlenmesinde kullanılan agrega granülometrisi	32
3.19. Katkı miktarıyla (a)K1, (b)K2 ve (c)K3 betonlarının karışım suyunda meydana gelen azalma	33
3.20. K1 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi	34
3.21. K2 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi	35
3.22. K3 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi	36
3.23. ML1 katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi	41
3.24. ML2 katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi	42
3.25. MK katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi	43
3.26. LB katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi	44
3.27. ML1 katkısı için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi	45
3.28. ML2 katkısı için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi	46
3.29. MK katkısı için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi	47
3.30. LB katkısı için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi	48
3.31. Deneysel ve hesaplanmış su azalması-dayanım artışı ilişkilerinin uyumuna örnek: (a)K1,ML1 ve (b) K2,ML2	49
4.1. SB'nin su-çimento oranına etkisi	57
4.2. TB'nin su-çimento oranına etkisi	58
4.3. MS'nin su-çimento oranına etkisi	59
4.4. SB'nin YDBların basınç dayanımlarına etkisi	60
4.5. TB'nin YDBların basınç dayanımlarına etkisi	61
4.6. MS'nin YDBların basınç dayanımlarına etkisi	62
4.7. Mineral katkılı YDBlarda basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi	63
4.8. Bu araştırmada bulunan, mineral katkılı YDBlarda basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin CEB tarafından önerilenle karşılaştırılması	64
4.9. Mineral katkılı YDBlarda dinamik ve statik elastisite modülleri arasındaki ilişki	65

	sayfa
5.1. Agregada cinsinin etkilerinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan tane dağılımı eğrileri	71
5.2. Değişik agregalarla üretilen betonların yaş-basınç dayanımı ilişkileri	72
5.3. Değişik agregalarla üretilen betonların çekme dayanımı-basınç dayanımı ilişkilerinin literatürle karşılaştırması	73
5.4. Agregada yüzeyinde oluşan zayıf bölgelerin şematik gösterimi	74
5.5. Değişik agregalarla üretilen betonların basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi	75
5.6. Değişik agregalar kullanılarak bulunan basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin CEB tarafından önerilenle karşılaştırılması	76
5.7. Değişik agregalarla üretilen betonlarda statik ve dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki	77
5.8.a. Da kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi	79
5.8.b. Kt kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi	80
5.8.c. Gt kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi	81
5.8.d. Dz kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi	82
5.9. Dmaks'ın 28 günlük basınç dayanımına etkisi	83
6.1. Boy-çap oranı 2.00 olan değişik boyutlardaki silindir numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması [Neville, 1993]	85
6.2. Silindir boyutlarının dayanıma etkileri [DSI, 1977]	86
6.3. Küp boyutlarının dayanıma etkileri [DSI, 1977]	87
6.4. $l/d < 2.00$ olan silindir numuneler için kullanılması önerilen dayanım düzeltme katsayıları	89
6.5. Bu araştırmada elde edilen $l/d = 2.00$ olan silindir numunelerde çap-dayanım ilişkisinin literatürle karşılaştırılması	92
6.6. Bu araştırmada elde edilen küp numuneler için boyut-dayanım ilişkisi	93
6.7. ASTM C42, BS 1881 ve Murdock&Kesler'a göre l/d -dayanım ilişkileri	96
6.8. Bu araştırmada elde edilen l/d -dayanım ilişkileri	97
7.1. Değişik bakım koşulları için 7 ve 90 günlük dayanımların 28 günlük dayanıma oranları	100
7.2. 7/28 ve 90/28 dayanım oranlarının analizi	101
7.3. Değişik bakım koşullarında üretilen betonların olgunluk-dayanım ilişkisi	103
7.4. Hızlı bakım dayanım sonuçlarının 28 günlük standart dayanımlarla karşılaştırılması	104
7.5. Hızlı bakım dayanımları ile 28 günlük standart dayanımlar arasındaki ilişkiler	105
8.1. YAK içeren karışımlarda rötre	109
8.2. SB içeren karışımlarda rötre	110
8.3. TB içeren karışımlarda rötre	111
8.4. MS içeren karışımlarda rötre	112

1. Giriş

1.1 Genel

Son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmeler büyük ölçüde ivme kazanmıştır. Gerek malzemeler gerekse yapım tekniklerinde meydana gelen bu gelişmeler betonun bir yapı malzemesi olarak yerini gitgide güçlendirmektedir. Beton teknolojisi artık ampirik niteliğini yavaş yavaş bırakarak bir yüksek teknoloji niteliğine bürünmektedir.

Bir çok ulusal ve uluslararası standart ve şartnamede beton sınıfları için üst sınır 65MPa olarak belirlenmiştir. Örneğin TS 500 "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları" standardında beton sınıfları, 28 günlük silindirik basınç dayanımlarına göre, BS 14 ile BS 50 arasındadır. Bugüne kadar yalnızca Norveç standartlarında [NS 3473, 1989] 105 MPa basınç dayanımına kadar olan betonlar tanımlanmıştır. Oysa, artık beton teknolojisindeki mevcut gelişmeler standart ve şartnamelerde belirtilen ve yapısal tasarımlarda kullanılanların çok üstündeki basınç dayanımlarında betonların üretilmesini mümkün kılmaktadır.

Beton teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak yüksek dayanımlı betonların tanımı da zaman içinde değişmiştir. 1950'lerde 35 MPa yüksek dayanım olarak kabul edilirken 1960'larda bu rakam 40-50 MPa'a, 1970'lerde ise 60 MPa'a yükselmiştir. Basınç dayanımının numune boyutu ve betonun yoğunluğu ile ilişkili olduğu göz önünde bulundurulursa, 50 MPa'ın üstünde basınç dayanımına sahip betonlar Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) olarak nitelendirilebilirler.

YDB konusunda yapılan yayınlarda da son on yıl içinde büyük artışlar görülmüştür. 1984'de ACI [ACI Committee 363, 1984], 1985'de yine ACI [ACI SP-87, 1985] ve Materials Research Society [MRS, 1985] konuyla ilgili kapsamlı raporlar yayınlamışlardır. 1987 yılında YDBlerin kullanımı konusunda ilk sempozyum [Utilization of High Strength Concrete, 1987] düzenlenmiş, bunu 1990'da ikincisi [ACI SP-121, 1990] 1993'de de Lillehammer'da yapılan üçüncüsü izlemiştir. Dördüncü sempozyum ise 1996'da Paris'te düzenlenecektir. Bunların yanısıra, 1988'de British Cement Association [Parrot, 1988] ve 1990'da da FIP-CEB [State-of-the Art Report, 1990] YDBlerin özellikleri konularında yayınlar yapmışlardır.

Ülkemizde de araştırma safhasında ve laboratuvar koşullarında 150 MPa basınç dayanımlarına ulaşan YDB üretimi yapılmaktadır. 1991 yılında düzenlenen 2. Ulusal Beton Kongresinin ana temasını YDB oluşturmuştur. Yine bu kongre kapsamında yapılan yüksek dayanımlı beton numune üretimi yarışmasında 28 günlük küp basınç dayanımı 190 MPa'ya varan betonlar elde edilmiştir [2. Ulusal Beton Kongresi, 1991].

1991 yılında TÜBİTAK İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu (o dönemde Yapı Araştırma Grubu) Yüksek Dayanımlı Beton konusunu desteklenecek araştırma projeleri arasında öncelikli alanlardan birisi olarak belirlemiştir.

1.2. Amaç ve Kapsam

YDBlerin yalnız dayanımı yüksek olmakla kalmamaktadır. Bu malzemelerin genel performansları da yüksektir. Bugüne kadar yapılan araştırmaların ışığında, bunların normal dayanımlı betonlara göre boşluk oranlarının, porozitelerinin ve geçirimsizliklerinin düşük olduğu ve dolayısıyla sülfat, asit v.b zararlı maddelere karşı dirençlerinin, diğer bir deyişle, dayanıklılıklarının da yüksek olduğu söylenebilir. Basınç dayanımlarının yanı sıra, eğilme ve çekme dayanımları da yüksektir. Bu nedenle, yapılarda aynı yükü daha küçük kesitlerle ve dolayısıyla daha az malzemeyle taşımak; daha büyük açıklıklar, daha geniş uygulama alanları ve daha hafif elemanlar mümkün gözükmektedir. Dolayısıyla, YDBlerin kullanılacağı yapıların hesap esaslarının ve yapım kurallarının yakın gelecekte oluşturulması kaçınılmaz olarak gündeme gelecektir. Bu hesap esasları ve yapım kuralları ise YDBlerin malzeme özelliklerine bağlı olmak durumundadır. Bu nedenle, YDBlerin bir takım "egzotik" malzemeler (örneğin, polimer ve epoksi gibi) kullanılmadan üretilmesi, teknik olabilirliği ve malzemenin mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi projenin ana amacını meydana getirmiştir. Bu amaç doğrultusunda,

1. Uygun malzemelerin (çimento, kimyasal ve mineral katkıları, agregalar) seçilmesi;
2. Karışım oranlarının belirlenmesi ve karışım hesap esaslarının oluşturulması;
3. Çeşitli bakım koşullarının YDBların performanslarına etkileri;
4. Basınç altında gerilme-gerinim ilişkilerinin, basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının, dayanım kazanma-zaman ilişkilerinin, birim ağırlıklarının, donma-çözünme ve sülfat dirençlerinin, rötre özelliklerinin, numune boyut ve geometrisinin dayanıma etkilerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde gerek normal dayanımlı betonlar ve gerekse YDBlar için mevcut olan bilgi birikimi ile karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

1.2.1. Uygun Malzemelerin Seçilmesi

YDBların gerek işlenebilirlik gerekse dayanım şartlarını birlikte yerine getirebilmesi beton malzemelerinin seçiminde normal dayanımlı betonlara göre daha özenli davranılması gerektiğini ortaya çıkartmaktadır. Başka bir deyişle, YDBlarda kalitesi yüksek malzemeler kullanılmalıdır.

1.2.1.1. Çimento

YDBlar için çimento seçiminde kimyasal ve mineralojik kompozisyon ve incelik en önemli parametrelerdir. Çimento tipi, dayanım özelliklerinin yanı sıra, karışımın su gereksinmesi ve işlenebilirliğini de etkilediğinden, dikkat edilmesi gerekli olan bir husustur. Öte yandan, YDBlarda su-çimento oranının mümkün olduğu kadar düşük tutulmaya çalışılması akışkanlaştırıcı veya yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanımını hemen hemen kaçınılmaz kılar. Kullanılacak katkı maddeleriyle çimentonun uyumluluğu çimento seçiminde üzerinde durulması gerekli olan bir diğer konudur.

Öngerme veya songerme uygulamaları gibi erken yüksek dayanımların zorunlu olduğu durumlar dışında erken yüksek dayanımlı çimento kullanımına gerek yoktur.

Yukarıda belirtilen noktalar ve halen ülkemizde en fazla miktarda üretilen ve kullanılan çimento olması göz önünde bulundurularak bu araştırmada TS 19 "Potland Çimentoları" standardına uygun KPÇ 325'in kullanılması kararlaştırılmıştır.

1.2.1.2. Kimyasal Katkılar

YDB üretiminde bir çok değişik kimyasal katkı kullanılabilir. Ancak, şüphesiz ki bunlardan en önemlisi, beton karışımının su gereksinmesini istenilen oranda azaltabilecek ve buna karşılık yeterli işlenebilmeyi de sağlayacak olan yüksek akışkanlaştırıcı katkılarıdır. Ticari olarak bir çok değişik isim altında bulunan yüksek akışkanlaştırıcı katkıların esasını (a) lignosülfonat, (b) formaldehid naftalin sülfonat ya da (c) formaldehid melamin sülfonatlar oluşturmaktadır. Araştırmanın başlangıç aşamasında bu üç grup katkı ayrı ayrı kullanılarak taze ve sertleşmiş YDBlar üzerindeki etkileri incelenmiş ve diğer deneysel bölümlerde kullanılacak optimum miktarlar belirlenmiştir.

1.2.1.3. Mineral Katkılar

Portland çimentolarının suyla tepkimesi (hidratasyon) sonucunda, kaçınılmaz olarak, önemli miktarda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), ya da çimento kimyasında kullanılan kısaltmayla, CH) hem agrega-çimento hamuru arayüzeyinde hem de çimento hamurunun kendisinde zayıf bölgeler oluşturur. CH'in ne dayanıma ne de dayanıklılığa olumlu bir etkisi söz konusu değildir. Betonda puzolanik özelliğe sahip mineral katkıları kullanılması sonucunda CH ile bu malzemeler arasında meydana gelen tepkimeler daha fazla çimentolaşabilen malzemenin ortaya çıkmasına ve dolayısıyla daha yoğun bir yapıdaki betonların elde edilmesine yarar. Bu nitelikleriyle, uçucu kül ve mikrosilis gibi malzemeler YDBlarda sıkça kullanılan mineral katkı malzemeleridir.

Araştırmada ülkemizde mevcut olan biri yüksek kireçli diğeri düşük kireçli iki tip uçucu kül ve bir mikrosilis mineral katkı olarak kullanılmış ve YDBların çeşitli özelliklerine olan etkileri belirlenmiştir.

1.2.1.4. Agregalar

Agregalar, hacimce betonun yaklaşık 3/4'ünü oluşturduğundan, YDB üretiminde dikkatle üzerinde durulması gereken malzemelerdir. Kullanılan düşük su-çimento oranları nedeniyle çimento hamuru matriksin oldukça yüksek bir dayanıma sahip olması, YDB larda agrega dayanımının daha kritik olmasına neden olabilir. Agregaların tane boyutu, mineralojik özellikleri, tane şekli, su emme kapasiteleri v.b üretilecek betonların hemen hemen tüm özelliklerini etkileyen parametrelerdir.

Bu araştırmada agrega cinsinin etkilerini saptamak maksadıyla kireçtaşı, granit, diabaz ve dere agregası olmak üzere dört değişik agrega kullanılmıştır. Ayrıca hem kireçtaşı hem de dere agregasıyla maksimum tane boyutunun etkileri belirlenmiştir.

1.2.2. Karışım Oranlarının Belirlenmesi

YDBleri karışım oranlarının belirlenmesi normal dayanımlı betonlarınkine göre daha güç ve kritik bir işlemdir. Kullanılan kimyasal ve mineral katkı malzemeleri optimum karışım oranlarının tesbitinde çok sayıda deneme yapmayı zorunlu hale getirmektedir. Çeşitli standart ve şartnamelerde verilen beton karışım hesap esasları genellikle katkı içermeyen normal dayanımlı betonlar için hazırlanmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesi

- istenilen dayanım değeri;
- dayanımın belirleneceği yaş;
- su-çimento oranı;
- çimento miktarı ve tipi;
- agrega miktarı ve ince agrega-kaba agrega oranları;
- katkı tipi ve miktarı;
- işlenebilirlik özellikleri gibi bir çok parametreyi içermektedir.

Proje kapsamında hazırlanan çok sayıda beton karışımından elde edilen tüm sonuçlar istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak irdelenmiş ve karışım hesap esaslarına temel oluşturacak veriler elde edilmiştir.

1.2.3. Bakım Koşullarının Etkileri

Gerekli dayanıma sahip, geçirimsizliği düşük, boyutları zaman içinde kararlı ve dış etkilere dayanıklı bir beton üretilmesi için gerekli koşullardan en önemlilerinden birisi de bakım sıcaklığının ve ortam neminin uygun olmasıdır. Betonun dayanım kazanmasına neden olan çimento hidratasyonu ortam sıcaklığına, nemine ve zamana bağlı bir olaydır. Hidratasyon, tüm kimyasal tepkimelerde olduğu gibi, artan ortam sıcaklığıyla hızlanır ve zamanla gelişir. Bu araştırmada (a) standart bakım, (b) atmosferik basınçlı buhar bakımı ve (c) düşük sıcaklıkta bakım olmak üzere üç değişik bakım yöntemi birbirleriyle karşılaştırmalı olarak kullanılmış elde edilen sonuçlar normal dayanımlı betonlarla da kıyaslanmıştır.

Bunun yanı sıra, beton dayanımlarının erken tahmininde kullanılan ve normal betonlar için standartlaşmış olan üç değişik hızlı bakım yöntemi sonucunda YDBlerin davranışları da bu kapsam içinde değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar literatürde normal dayanımlı betonlar için verilenlerle kıyaslanmıştır.

1.2.4. Mekanik Özellikler, Dayanım ve Dayanıklılık

YDBlerin yapılarda kullanımı maksadıyla gerekli hesap esaslarının belirlenmesi için bu betonların gerilme-gerinim ilişkilerinin, elastik modüllerinin, Poisson oranlarının, basınç, çekme ve eğilme dayanımlarının bilinmesi gerekmektedir. Araştırmanın değişik aşamalarında kullanılan değişik malzemeler ve bunlarla üretilen değişik beton sınıfları için bu özellikler belirlenmiştir.

Bunun yanı sıra, beton dayanımlarının tesbitinde kullanılan farklı numune boyutları ve şekillerinin etkileri de bu kapsam içinde ele alınmış ve değişik boyutlardaki silindir ve küp numunelerin basınç dayanımları arasındaki ilişkiler belirlenmiştir.

Ayrıca, pratikte kullanım açısından önem taşıyan zaman-dayanım ilişkileri yine araştırmanın hemen hemen her aşamasında üretilen betonlar üzerinde belirlenmiş; seçilen bazı karışımlar üzerinde de sülfat direnci, donma-çözünme direnci, karbonasyon ve rötre deneyleri uygulanmış ve YDBIann bu etkiler altındaki davranışları araştırılmıştır..

1.3. Projenin Yöntemi

Araştırmanın deneysel çalışma programı altı ana evreye ayrılmıştır:

- (A) Deneylerde kullanılacak beton bileşenlerinin özelliklerinin belirlenmesi,
- (B) Akışkanlaştırıcı katkıların etkilerinin belirlenmesi,
- (C) Mineral katkıların etkilerinin belirlenmesi,
- (D) Agrega tipi ve maksimum agrega boyutunun etkilerinin belirlenmesi,
- (E) Mekanik özelliklerin belirlenmesi,
- (F) Dayanıklılık özelliklerinin belirlenmesi.

Bu altı evre birbirinden tam olarak bağımsız değildir. Burada her bir evrenin ana amacı belirtilmiştir. Ancak, bir bölümde ana amacın yanı sıra ikincil amaçlar da bulunmaktadır. Bunlar raporda ilgili bölümlerde ayrı ayrı verilmiş olmakla birlikte zaman zaman tekrarlar kaçınılmaz olmuştur.

Bütün deneysel çalışmalar sırasında uygulanan test ve analizler mümkün olduğunca ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, sülfat direnci, karbonasyon v.b dayanıklılık deneyleri için beton ölçeğinde standartlaştırılmış deneyler olmadığından bazı pratik deney yöntemleri uygulanmıştır.

Çok geniş kapsamlı olarak planlanmış bu araştırmada kullanılan tüm deneysel yöntemler hakkındaki ayrıntılı bilgiler raporun ilgili bölümlerinde verilmiştir.

2. Deneylerde Kullanılan Beton Bileşenlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi

YDBların gerek işlenebilirlik ve gerekse dayanım koşullarını yerine getirebilmesi bu betonları meydana getiren bileşenlerin seçiminde özenli davranılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, araştırmanın başlangıcında, ilk olarak deneylerde kullanılacak olan malzemelerin temini ve bunların özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarına girilmiştir. Araştırmanın çeşitli bölümlerinde kullanılan malzemeler ve bunların temin edildiği yerlerle miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler, Sağlandığı Yerler ve Miktarları

Malzeme	Sağlandığı Yer	Miktar (kg)
Çimento (KPÇ 325)	Çorum Çimento Fabrikası	10000
Kırma kireçtaşı	Elmadağ	50000
Kırma diabaz	Adapazarı	5000
Kırma granit	Gemlik	5000
Çakıl	Kızılırmak	10000
Kum	Kazan	25000
Akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkılar	YKS firması	
Melment L 10/20		35
Melment L 10/33		105
Lubrikon 200		35
Melkret 500		35
Mikrosilis	Etibank Antalya Elektrometalurji Tesisleri	1500
Yüksek kireçli uçucu kül	TEK Soma-B Termik Santrali	800
Düşük kireçli uçucu kül	TEK Tunçbilek Termik Santrali	800

2.1. Çimento

Araştırmanın tüm aşamalarındaki deneysel çalışmalarda, ülkemizde bugün en fazla üretilen çimento durumundaki, KPÇ 325 kullanılmıştır. TS 19 "Portland Çimentoları" Standardında "Portland çimentosu klinkeri, alçıtaşı ve puzolanik maddenin birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen, 28 günlük basınç dayanımı en az 325 kgf/cm² olan" şeklinde tarif edilen bu çimento Çorum Çimento Fabrikasından sağlanmıştır.

Kullanılan çimentonun özellikleri TS 24 "Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Deney Yöntemleri" ve TS 687 "Çimento Kimyasal Analiz Yöntemleri" standartlarında belirtilen yöntemlerle saptanmıştır. Elde edilen deney ve analiz sonuçlarının güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından her özellik araştırmanın her ana bölümünde en az bir kez ve en az üç numune kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan KPÇ 325 çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de, kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.3'de, TS 19 sınırlarıyla birlikte, verilmiştir. Her iki çizelgeden de görüleceği gibi, çalışmada kullanılan KPÇ 325 çimentosu TS 19'a uygundur. Çimentonun özelliklerini belirlemek için farklı zamanlarda yapılan deney ve analizlerde varyasyon katsayılarının yüksek olmaması deneylerin tekrarlanabilirliğini ve dolayısıyla sonuçların güvenilirliğini göstermektedir.

2. Deneylerde Kullanılan Beton Bileşenlerinin Özelliklerinin Belirlenmesi

YDBların gerek işlenebilirlik ve gerekse dayanım koşullarını yerine getirebilmesi bu betonları meydana getiren bileşenlerin seçiminde özenli davranılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, araştırmanın başlangıcında, ilk olarak deneylerde kullanılacak olan malzemelerin temini ve bunların özelliklerinin belirlenmesi çalışmalarına girilmiştir. Araştırmanın çeşitli bölümlerinde kullanılan malzemeler ve bunların temin edildiği yerlerle miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler, Sağlandığı Yerler ve Miktarları

Malzeme	Sağlandığı Yer	Miktar (kg)
Çimento (KPÇ 325)	Çorum Çimento Fabrikası	10000
Kırma kireçtaşı	Elmadağ	50000
Kırma diabaz	Adapazarı	5000
Kırma granit	Gemlik	5000
Çakıl	Kızılırmak	10000
Kum	Kazan	25000
Akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıları		
Melment L 10/20	YKS firması	35
Melment L 10/33		105
Lubrikon 200		35
Melkret 500		35
Mikrosilis	Etibank Antalya Elektrometalurji Tesisleri	1500
Yüksek kireçli uçucu kül	TEK Soma-B Termik Santrali	800
Düşük kireçli uçucu kül	TEK Tunçbilek Termik Santrali	800

2.1. Çimento

Araştırmanın tüm aşamalarındaki deneysel çalışmalarda, ülkemizde bugün en fazla üretilen çimento durumundaki, KPÇ 325 kullanılmıştır. TS 19 "Portland Çimentoları" Standardında "Portland çimentosu klinkeri, alçıtaşı ve puzolanik maddenin birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen, 28 günlük basınç dayanımı en az 325 kgf/cm² olan" şeklinde tarif edilen bu çimento Çorum Çimento Fabrikasından sağlanmıştır.

Kullanılan çimentonun özellikleri TS 24 "Çimentoların Fiziksel ve Mekanik Deney Yöntemleri" ve TS 687 "Çimento Kimyasal Analiz Yöntemleri" standartlarında belirtilen yöntemlerle saptanmıştır. Elde edilen deney ve analiz sonuçlarının güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği açısından her özellik araştırmanın her ana bölümünde en az bir kez ve en az üç numune kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan KPÇ 325 çimentosunun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.2'de, kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.3'de, TS 19 sınırlarıyla birlikte, verilmiştir. Her iki çizelgeden de görüleceği gibi, çalışmada kullanılan KPÇ 325 çimentosu TS 19'a uygundur. Çimentonun özelliklerini belirlemek için farklı zamanlarda yapılan deney ve analizlerde varyasyon katsayılarının yüksek olmaması deneylerin tekrarlanabilirliğini ve dolayısıyla sonuçların güvenilirliğini göstermektedir.

Çizelge 2.2. Kullanılan Çimentonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 19 Sınırları
σ_{c7} (MPa)	7 (42)	20.10	22.55	4.53	21.43	21.00
σ_{c28} (MPa)	7 (42)	29.00	34.50	6.99	31.88	32.50
σ_{f7} (MPa)	7 (21)	4.30	5.10	7.24	4.73	
σ_{f28} (MPa)	7 (21)	5.60	6.52	7.02	5.94	
ilk priz (min)	7 (21)	230	260	4.65	251.67	min. 60
son priz (min)	7 (21)	420	460	3.25	438.67	maks. 600
incelik (Blaine) (m^2/kg)	7 (14)	299	320	2.49	312.33	min. 260
özgül ağırlık (kg/m^3)	7 (21)	2900	2990	1.26	2955	

Çizelge 2.3. Kullanılan Çimentonun Kimyasal Kompozisyonu

Oksit (%)	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 19 Sınırları
CaO	5 (15)	49.05	51.69	2.07	50.05	
SiO ₂	5 (15)	26.07	27.76	2.53	27.29	
Al ₂ O ₃	5 (15)	8.15	8.91	3.54	8.59	
Fe ₂ O ₃	5 (15)	3.38	4.07	8.32	3.70	
MgO	5 (15)	1.29	1.41	3.66	1.36	maks. 5.00
SO ₃	5 (15)	1.79	1.98	4.00	1.91	maks. 3.50
Kızdırma Kaybı	5 (15)	1.16	1.47	10.24	1.33	maks. 4.00
Çözünmeyen Kalıntı	5 (15)	5.44	5.89	2.96	5.62	maks. 10.00

2.2. Agregalar

Araştırmada agrega cinsinin YDBların davranışlarına olan etkilerini araştırmak amacıyla 3-7 ve 7-15 mm boyutlarında kırma kireçtaşı, granit ve diabaz ve doğal dere çakılı kullanılmıştır. Maksimum agrega boyutunun etkilerinin belirlenmesinde ise kireçtaşı ve dere çakılı kullanılmıştır. Gerek her iki deneysel bölümde gerekse çalışmanın diğer evrelerinde ince agrega olarak Kazan kumu kullanılmıştır. Diğer tüm deneylerde agrega olarak kireçtaşı ve kum kullanılmıştır. Dolayısıyla, granit ve diabaz agregaların özellikleri bir defaya mahsus olmak üzere üç numune kullanılarak, dere çakılının özellikleri iki kez üçer numune kullanılarak, kum ve kireçtaşının özellikleri ise beş kez yine üçer numune kullanılarak saptanmıştır. Agregaların özellikleri Çizelge 2.4'de TS 706 "Beton Agregaları" standardında öngörülen sınırlarla birlikte verilmiştir.

Çizelge 2.4.a. Kumun Özellikleri

Özelik	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Özgül Ağırlık (kg/m ³)	5 (15)	2440	2470	0.53	2450	
DYK Özgül Ağırlık (kg/m ³)	5 (15)	2500	2580	1.02	2540	
Su emme (%)	5 (15)	3.08	3.73	7.07	3.55	
Na ₂ SO ₄ 'le Dona dayanıklılık (%Ağ. Kay.)	5 (15)	3.80	4.20	5.12	4.08	maks. 12.00
Yıkanabilir Madde (%)					ihmal edilebilir	maks. 4.00
Organik Madde (Sodyum Hidroksit deneyi)					çok açık sarı renk	koyu sarı

Çizelge 2.4.b. Çakılın Özellikleri

Özelik	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Özgül Ağırlık (kg/m ³)	2 (6)	2435	2520	2.07	2475	
DYK Özgül Ağırlık (kg/m ³)	2 (6)	2490	2590	1.35	2540	
Su emme (%)	2 (6)	2.27	2.76	8.17	2.56	
Bilyalı tamburla Aşınma dayanıkl. (%Ağ. Kay.)	2 (6)	28.6	30.8	6.33	30.2	maks. 50.00
Na ₂ SO ₄ 'le Dona dayanıklılık (%Ağ. Kay.)	2 (6)	3.5	4.2	10.03	3.77	maks. 10.00

Çizelge 2.4.c. Kireçtaşının Özellikleri

Özelik	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Özgül Ağırlık (kg/m ³)	5 (15)	2650	2680	0.68	2676	
DYK Özgül Ağırlık (kg/m ³)	5 (15)	2670	2730	0.77	2697	
Su emme (%)	5 (15)	0.25	0.33	0.48	0.29	
Bilyalı tamburla Aşınma dayanıkl. (%Ağ. Kay.)	5 (15)	23.6	28.0	9.87	24.4	maks. 50.00
Na ₂ SO ₄ 'le Dona dayanıklılık (%Ağ. Kay.)	5 (15)	0.80	1.20	6.38	1.08	maks. 10.00
Yıkanabilir Madde (%)	5 (15)	0.29	0.54	5.47	0.38	maks. 0.50

Çizelge 2.4.d. Granitin Özellikleri

Özelik	Yapılan Deney Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Özgül Ağırlık (kg/m ³)	1 (3)	2630	2690	0.85	2653	
DYK Özgül Ağırlık (kg/m ³)	1 (3)	2650	2710	1.06	2675	
Su emme (%)	1 (3)	0.78	0.81	1.37	0.80	
Bilyalı tamburla Aşınma dayanıkl. (%Ağ. Kay.)	1 (3)	40.0	44.0	3.97	42.5	maks. 50.00
Na ₂ SO ₄ 'le Dona dayanıklılık (%Ağ. Kay.)	1 (3)	0.80	1.15	13.66	0.98	maks. 10.00
Yıkanabilir Madde (%)	1 (3)				ihmal edilebilir	maks. 0.5

Çizelge 2.4.e. Diabazın Özellikleri

Özelik	Yapılan Deneş Sayısı (ve mumune sayısı)	Minimum Değer	Maksimum Değer	Varyasyon Katsayısı (%)	Ortalama Değer	TS 706 Sınırları
Kuru Özgöl Ağırlık (kg/m ³)	1 (3)	2740	2810	0.94	2780	
DYK Özgöl Ağırlık (kg/m ³)	1 (3)	2765	2850	1.92	2805	
Su emme (%)	1 (3)	0.76	0.86	4.44	0.82	
Bilyalı tamburla Aşınma dayanıkl. (%Ağ. Kay.)	1 (3)	21.8	23.2	2.59	22.4	maks. 50.00
Na ₂ SO ₄ 'te Dona dayanıklılık (%Ağ. Kay.)	1 (3)	1.28	1.35	2.07	1.31	maks. 10.00
Yıkanebilir Madde (%)	1 (3)				ihmal edilebilir	maks. 0.5

Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi araştırmada kullanılan tüm agregalar, TS 706'ya göre, beton yapımında kullanılmaya elverişlidir. Araştırmanın değişik evrelerinde kullanılan agregaların eleme analizleri, boyları ve oranları raporun ilgili bölümlerinde ayrı ayrı verilmiştir.

2.3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkılar

Projenin başlangıç aşamasında betonların su-çimento oranını düşürmek amacıyla dört değişik kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu katkılar, standartlara uygunlukları üretici firma tarafından garanti edildiğinden ve kimyasal analizlerin güçlüğünden dolayı, deneşsel çalışmalar sırasında ayrıca bir analize tabi tutulmamışlardır. Kullanılan akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıların özellikleri Çizelge 2.5'de verilmiştir.

Araştırmada kullanılan katkılardan melamin formaldehid sülfonat esaslı olanlar MELMENT L 10/20 ve MELMENT L 10/33 ticari isimli katkılardır. Raporun bundan sonraki bölümlerinde ML1 ve ML2 olarak anılacaklardır. Bu iki katkının aktif maddeleri aynı olmakla birlikte konsantrasyonları farklıdır. ML1 ve ML2'deki aktif madde oranları, sırasıyla, %20 ve %33'tür. Lignosülfonat esaslı katkının ticari adı LUBRIKON 200, formaldehid naftalin sülfonat esaslı olanı ise MELKRET 500'dür. Bu katkılar raporda LB ve MK olarak anılacaktır. Bu katkılardan ML1, ML2 ve MK, TS 3452 "Beton Kimyasal Katkı Maddeleri" standardına göre "YA" sınıfına, LB ise "A" sınıfına girmektedir.

Çizelge 2.5. Kullanılan Kimyasal Katkıların Özellikleri

Özelik	ML1	ML2	MK	LB
Görünüm	şeffaf sıvı	şeffaf sıvı	kahverengi sıvı	kahverengi sıvı
Katı madde oranı (%)	20	33	-	-
Çözücü	Su	Su	-	-
Yoğunluk (g/cm ³)	1.1	1.2	1.2	1.2
pH	7-9	7-9	7-10	7-9

2.4. Mineral Katkılar

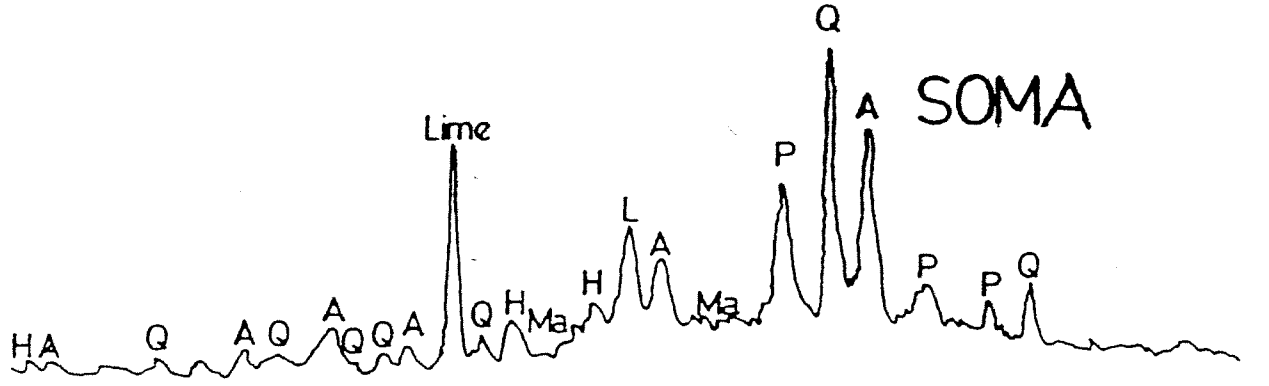
Mineral katkıların YDBların özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla biri yüksek kireçli diğeri düşük kireçli olmak üzere iki uçucu kül ve mikrosilis kullanılmıştır. Yüksek kireçli SOMA-B (SB) ve düşük kireçli TUNÇBİLEK (TB) uçucu küllerinin her ikisi de düşük kalörlü linyit kömürlerinin elektrik üretmek amacıyla termik santralde yakılmasıyla elde edilmektedir. Mikrosilis (MS) ise ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarının yan ürünü olarak elde edilmektedir. MS araştırmanın diğeri bazı bölümlerinde de kullanılmıştır. Bu mineral katkıların fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları, sırasıyla, Çizelge 2.6 ve 2.7'de, TS 639 "Uçucu Küller" standardında belirtilen sınırlarla birlikte, verilmiştir. Bu çizelgelerdeki her bir değer üç numunenin ortalamasıdır. İçerdikleri mineraller X-ışınları Difraksiyonu (XRD) yöntemiyle belirlenmiş olup elde edilen difraktogramlar SB, TB ve MS için sırasıyla Şekil 2.1, ve 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Mineral Katkılarının Kimyasal Kompozisyonları

Oksit (%)	SB	TB	MS	TS 639 sınırları
SiO ₂	39.9	56.0	85.75	
Al ₂ O ₃	23.2	23.4	2.51	
Fe ₂ O ₃	4.1	10.5	2.11	
S+A+F	67.2	89.9	90.37	min. 70.00
CaO	24.5	2.1	1.53	
MgO	1.9	3.3	3.67	maks. 5.00
SO ₃	4.8	0.5	-	maks. 5.00
K ₂ O	0.4	0.3	-	
Na ₂ O	0.1	0.6	-	
TiO ₂	0.6	bakılmadı	-	
Kızdırma Kaybı	0.4	1.1	-	maks. 10.00
C	bakılmadı	bakılmadı	0.84	
S	bakılmadı	bakılmadı	0.34	
Cr ₂ O ₃	-	-	0.89	
Diğeri	-	-	2.63	

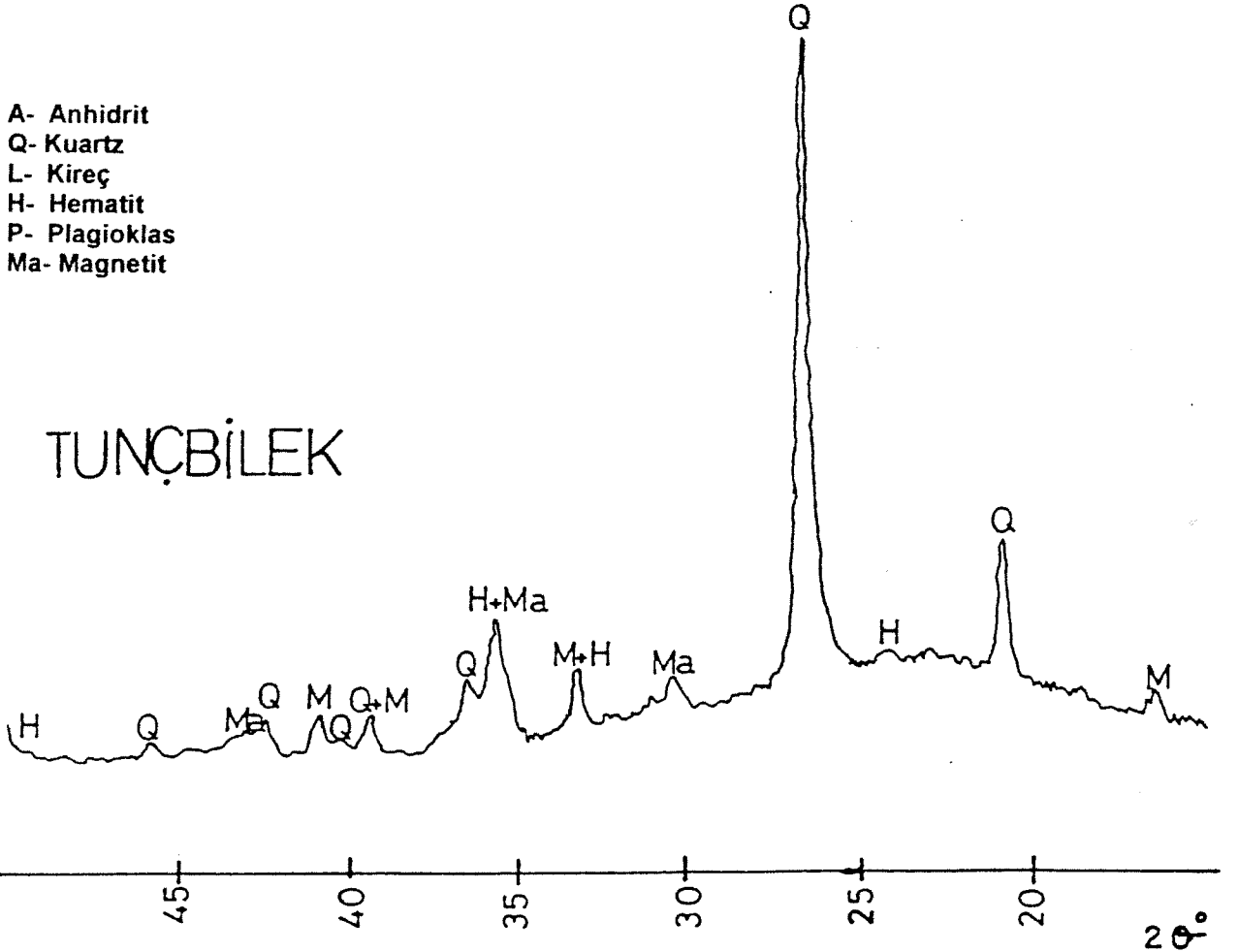
Çizelge 2.7. Mineral Katkılarının Fiziksel Özellikleri

Özellik	SB	TB	MS
incelik (Blaine) (m ² /kg)	321	337	çok ince olduğundan Blaine cihazı ile bulunamadı.
özgül ağırlık (kg/m ³)	2420	1990	2280
Puzolanik Aktivite İndeksi (%)	94.5	72.5	97.0

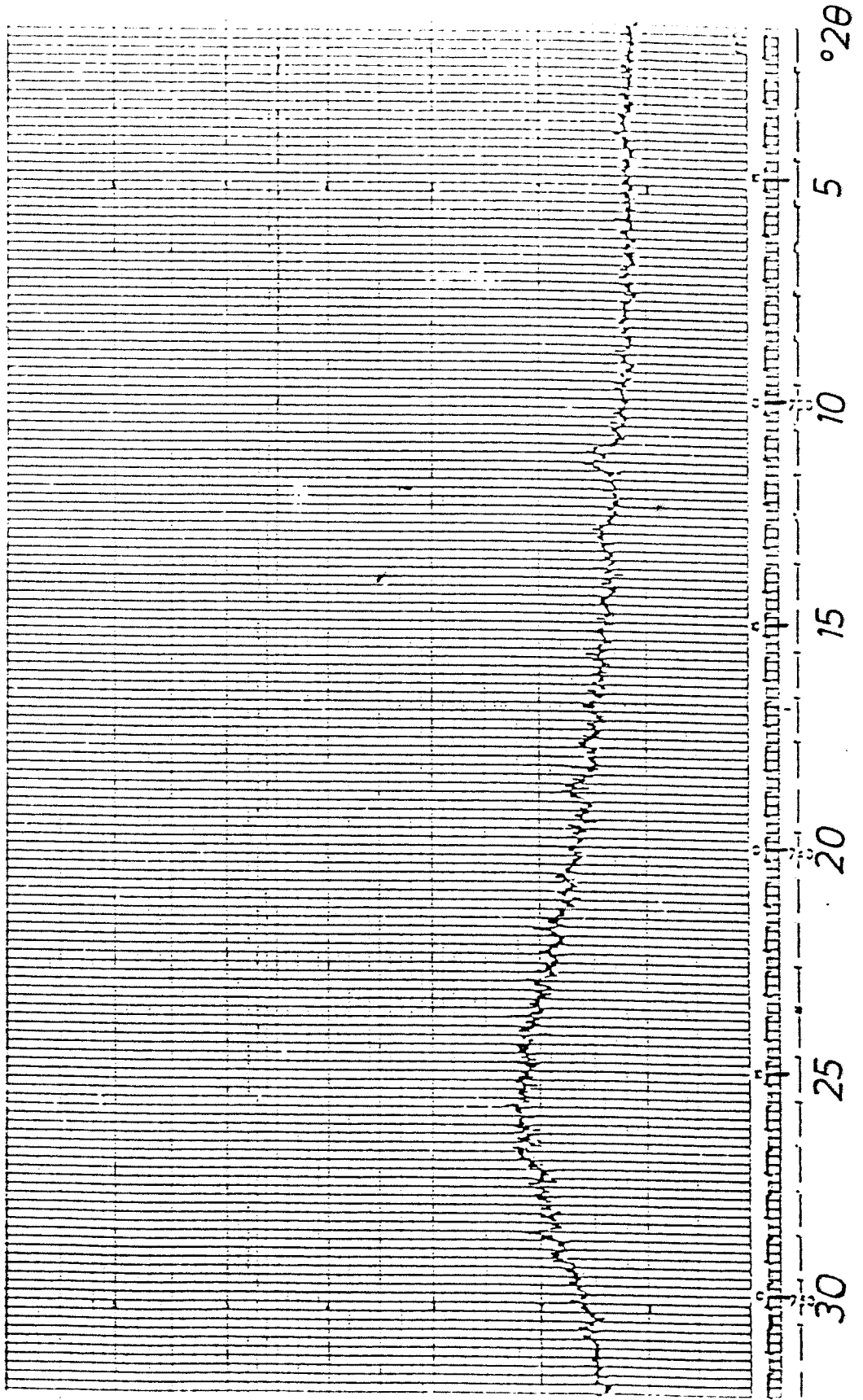


- A- Anhidrit
- Q- Kuartz
- L- Kireç
- H- Hematit
- P- Plagioklas
- Ma- Magnetit

TUNÇBİLEK



Şekil 2.1. SB ve TB uçucu küllerinin X-ışınları difraktogramı



Şekil 2.2. MS nin X-ışınları diffraktogramı

3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi

3.1. Genel

Katki maddeleri beton veya harçların, yapılan işe daha uygun olabilmeleri için, bazı özelliklerinin değiştirilmesi amacıyla veya ekonomik gerekçelerle ya da enerji tasarrufu sağlamak üzere kullanılırlar. Bir çok durumda (örneğin, çok yüksek dayanımlı beton üretimi, betonun donma-gözünme direncinin artırılması, priz süresinin geciktirilmesi ya da hızlandırılması) katkı kullanımı, istenilen sonuçların elde edilemesi bakımından, en uygun gözünüdür [Mindess ve Young, 1981].

Katki maddeleri beton ve harç gibi çimentolu sistemlerin aşağıdaki bir çok özelliğini iyileştirmek için kullanılabılır [ACI Committee 212, 1989; Chemical Admixtures for Concrete, 1993].

Bunları taze haldeki beton için aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

- Sistemdeki su miktarını sabit tutarak işlenebilirliği artırmak veya sabit bir işlenebilirlik için karışımındaki su miktarını azaltmak,
- Betonun pekişmesini geciktirmek ya da hızlandırmak,
- Betonun terleme (taze betonda karışım suyunun bir kısmının kılcal kanallardan yüzeye çıkması) hızını ve veya kapasitesini ayarlamak,
- Veriştirilme sırasındaki olası ayrışmayı (ince ve kaba beton bileşenlerinin birbirinden ayrılmaları) azaltmak,
- Pompalanabilirliği artırmak,
- Zamanla işlenebilirlikte meydana gelecek azalmanın hızını ayarlamak

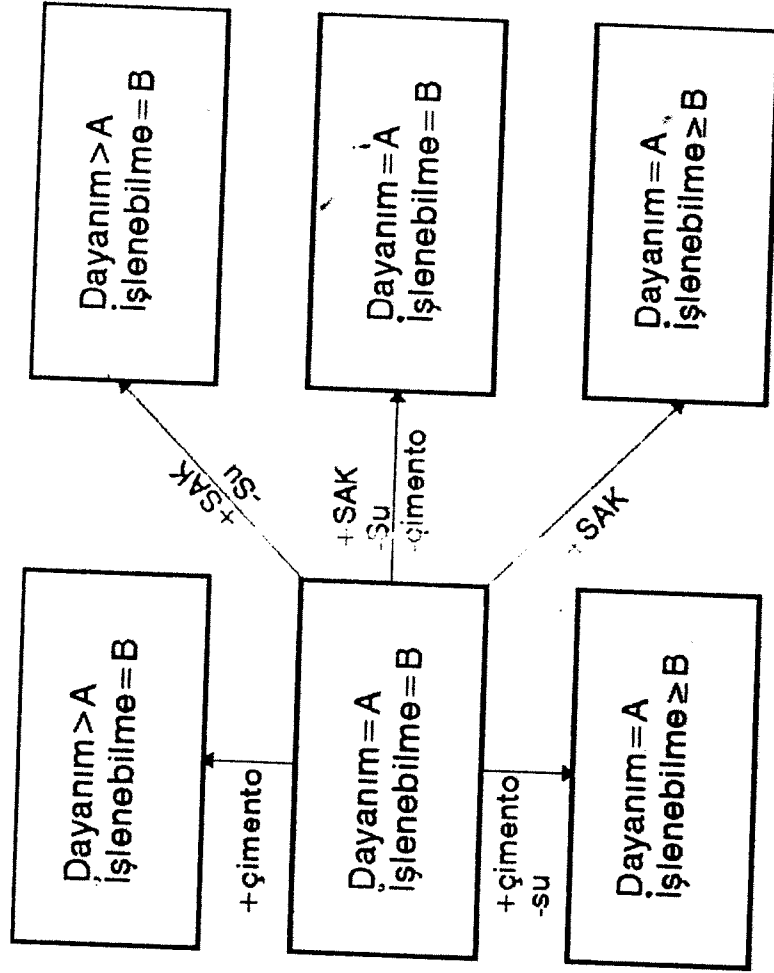
Katkıların sertleşmiş betonlarda kullanımını için ise

- Erken hidratasyon (çimentonun suyla tepkimesi) döneminde ağıra çıkan isminin azaltılması veya geciktirilmesi,
- Erken yaşlarda betonun dayanım kazanma hızının artırılması,
- Basınç, çekme veya eğilme dayanımlarının artırılması,
- Zararlı kimyasal veya fiziksel koşullar altında kalabilecek betonların dayanıklılıklarının artırılması,
- Betonun geçirimliliğinin azaltılması,
- Çimentoların içerdiği alkali oksitlerle bazı agregaların tepkimesi sonucunda ortaya çıkan zararlı genleşmelerin önlenmesi ya da azaltılması,
- Donatılı betonlarda betonla çelik arasındaki bağın güçlendirilmesi,
- Eski ve yeni beton yüzeyleri arasındaki bağın güçlendirilmesi,
- Darbelere ve aşınmaya karşı direncin artırılması,
- Beton içindeki metallerin paslanmasının önüne geçilmesi,
- Renkli beton üretilemesi

gibi gerekçeler sıralanabilir.

Betonda kullanılan kimyasal katkıların genellikle dört ana grup altında toplanır : (1) Su Azaltıcı Katkıları (SAKlar), (2) Geciktirici Katkıları (GKlar), (3) Hızlandırıcı Katkıları (HKlar) ve (4) Hava Süzükleyici Katkıları (HSKlar) [ACI Committee 212, 1989; Chemical Admixtures for Concrete, 1993; Rixom ve Malivaganam, 1986]. Bu araştırmada kullanılan katkıların birinci grubu dahildir. Bu nedenle, bu bölümde yalnızca SAKlar üzerinde yoğunlaşmıştır.

Su Azaltıcı Katkıları (SAKlar), birinci işlevleri herhangisi bir katkı içermeyen betonlara kıyasla aynı işlenebilirlikte daha düşük su-çimento oranı kullanımlarını sağlamak olan malzemelerdir. Bu katkıları daha yüksek dayanımlı beton elde etmek, belirli bir dayanım için daha az çimento kullanmak ya da belirli bir su miktarı için taze halde daha akışkan bir beton elde etmek amacıyla kullanılırlar. Sözü edilen bu üç etki sematik olarak Şekil 3.1'de gösterilmiştir [ACI Committee 212, 1989; Chemical Admixtures for Concrete, 1993; Rixom ve Malivaganam, 1986].



Şekil 3.1. Su azaltıcı katkıların beton dayanımı ve işlenebilirliğine etkileri.

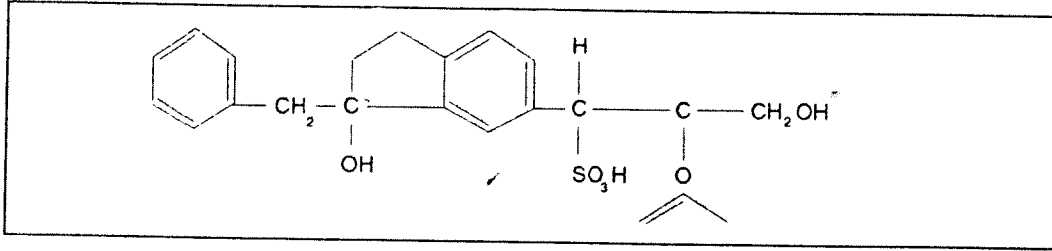
SAKların esasını (a) lignosülfonat, (b) hidroksikarboksilik asit, (c) hidroksile polimer, (d) formaldehit naftalin sülfonat veya (e) formaldehit melamin sülfonat maddelerinden birisi oluşturur [Rixom ve Mailvaganam, 1986]. Bu maddelerin kimyasal yapılarına bakıldığında, (a) Lignosülfonatların kağıt üretimi sırasında ortaya çıkan ve lignin ile selülozun ayrışma ürünleri, ligninin sülfonasyon ürünleri, çeşitli karbonhidratlar (şekerler), serbest sülfüroz asit ve sülfonatlardan oluşan bir sıvı atığın nötralizasyon, çökertme ve fermentasyon işlemlerinden geçirdikten sonra elde edilen polimerik yapıda bir madde olduğu görülür (Şekil 3.2).

(b) Hidroksikarboksilik asit esaslı SAKlar, adlarından da anlaşılacağı gibi, hem hidroksil (OH) hem de karboksil (COOH) gruplarını içeren organik maddeler olup sitrik, tartarik, malik, glukonik, v.b. asitlerin sodyum, amonyum veya trietanolamin tuzlarıdır (Şekil 3.3).

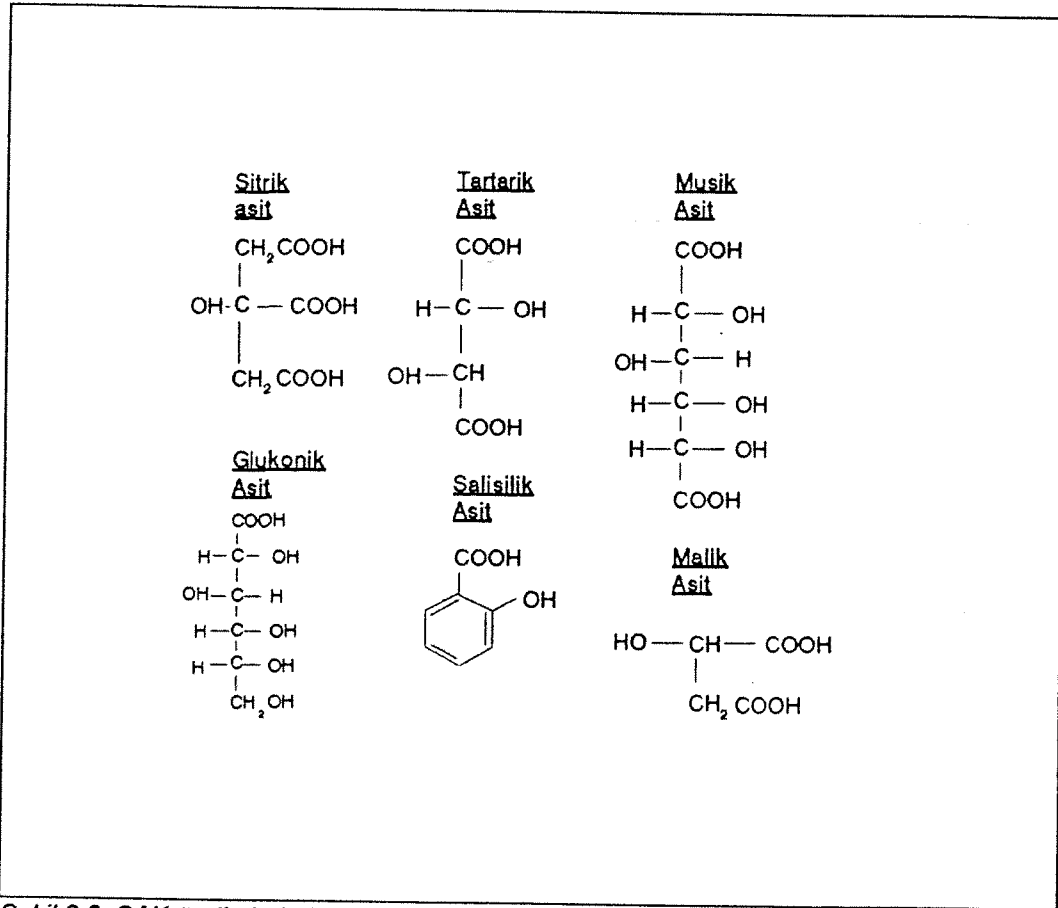
(c) Hidroksile polimerler doğal polisakaritlerden kısmi hidrolizle elde edilen polimerlerdir (Şekil 3.4).

(d) Naftalin formaldehit sülfonik asit tuzları naftalinin oleum veya kükürt trioksit sülfonasyonu ve bunu takip eden formaldehitte tepkime sonucu elde edilir. Sistemdeki sülfonik asit Sodyum hidroksitle nötrale edilir (Şekil 3.5).

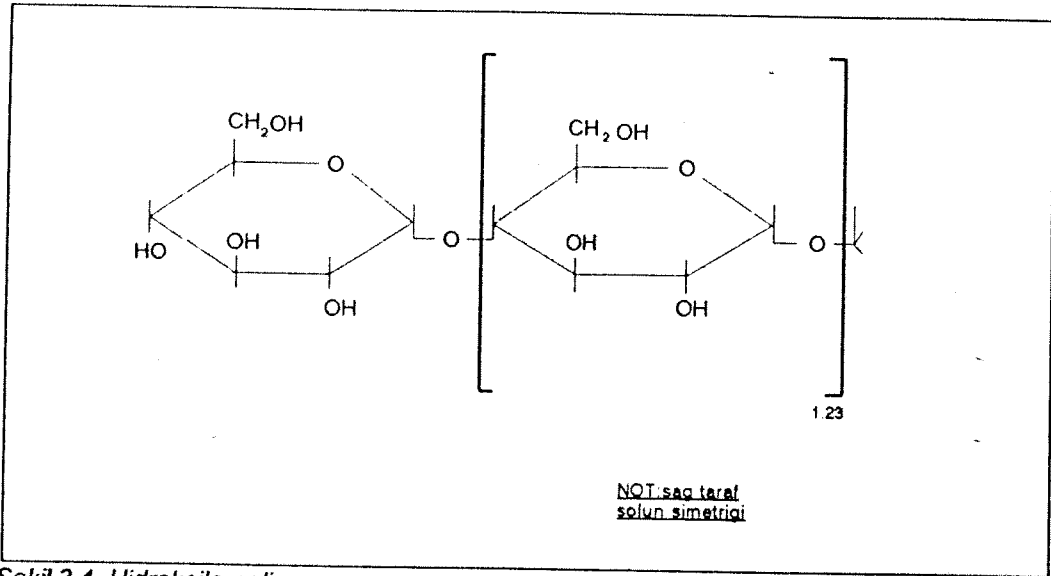
(e) Melamin formaldehit sülfonat tuzları da melaminin sırasıyla, formaldehit ve sodyum bisüfitle tepkimesi sonucunda elde edilen polimerik esaslı maddelerdir (Şekil 3.6).



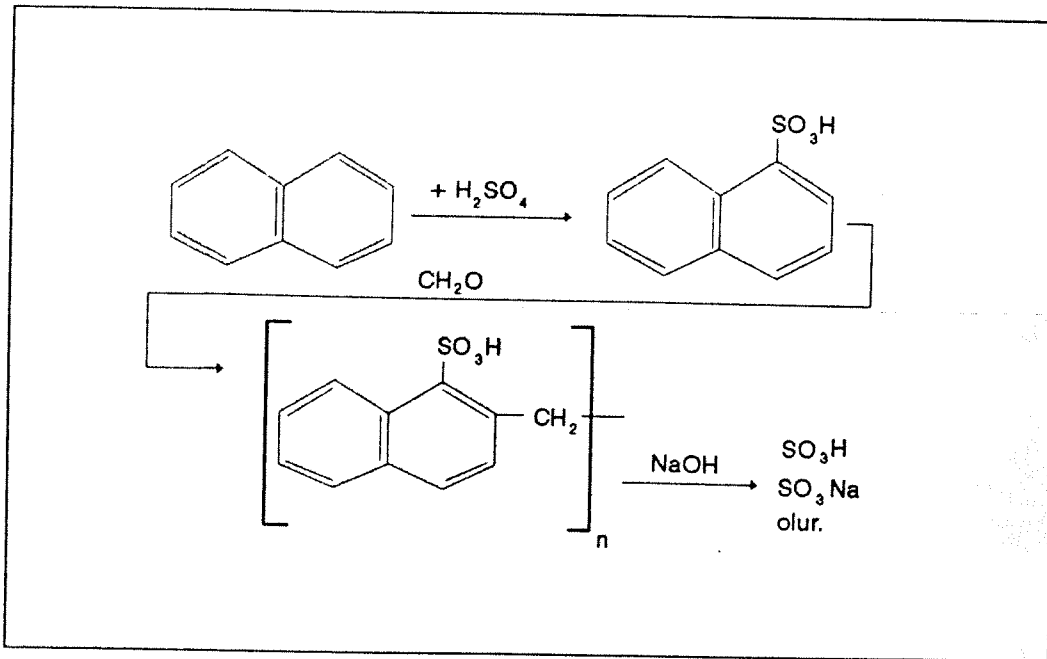
Şekil 3.2. Lignosülfonat molekülünü oluşturan birim (mer).



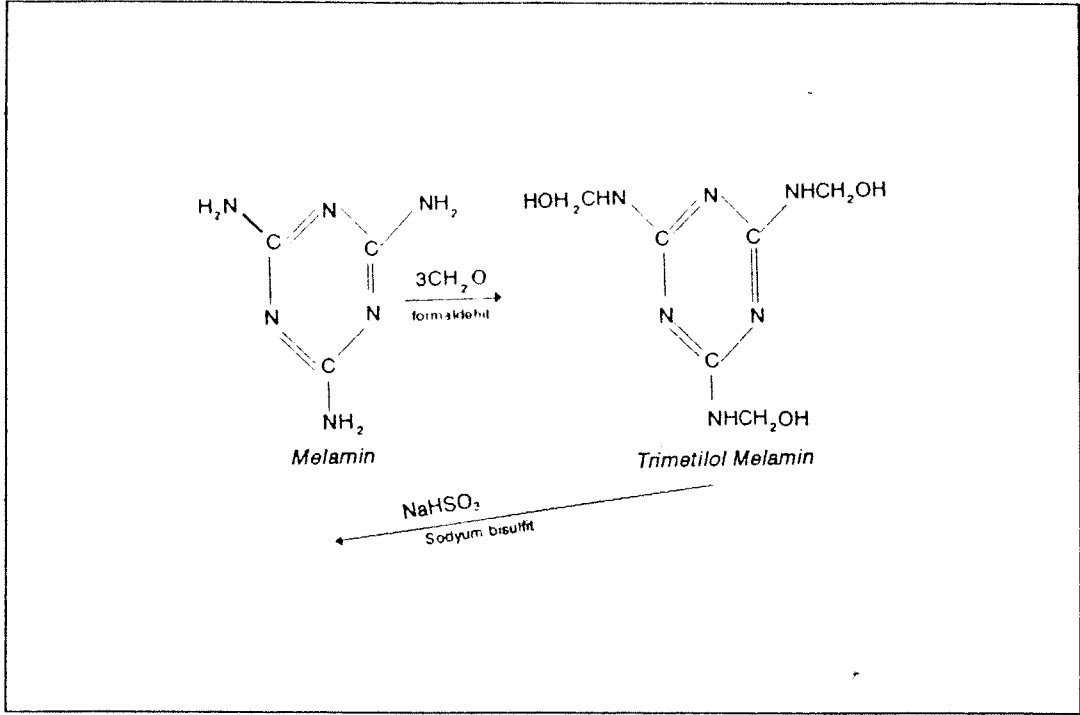
Şekil 3.3. SAK üretiminde kullanılan hidroksikarboksilik asitler.



Şekil 3.4. Hidroksile polimer.



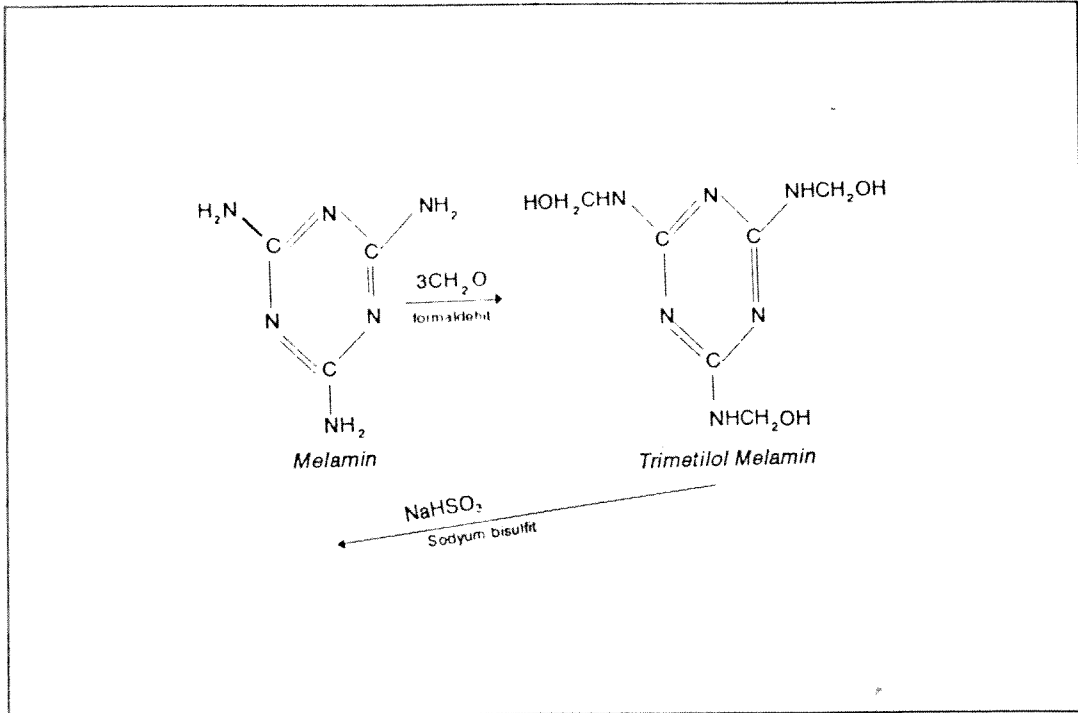
Şekil 3.5. Naftalin formaldehid sülfonik asit.



Şekil 3.6. Melamin formaldehid sülfonat.

Bugün mevcut su azaltıcı katkıların büyük bir çoğunluğu yukarıda kısaca anlatılan bu maddelerden elde edilir. Bu katkıların ana işlevi olan beton karışım suyundaki azalma Şekil 3.7'de şematik olarak gösterildiği biçimde gerçekleşir. Artı ve/veya eksi elektrik yüküyle yüklü olan çimento tanecikleri arasındaki elektrostatik çekme kuvvetleri bunların bir araya gelerek küçük topakçıklar oluşturmasına-neden olur. Sisteme katılan SAK çimento taneciklerinin yüzeylerindeki bu yüklerin nötralize edilmesine ya da her taneciğin aynı yükü almasına neden olurlar. Böylece çimento tanecikleri birbirlerini iterek ayrılırlar.

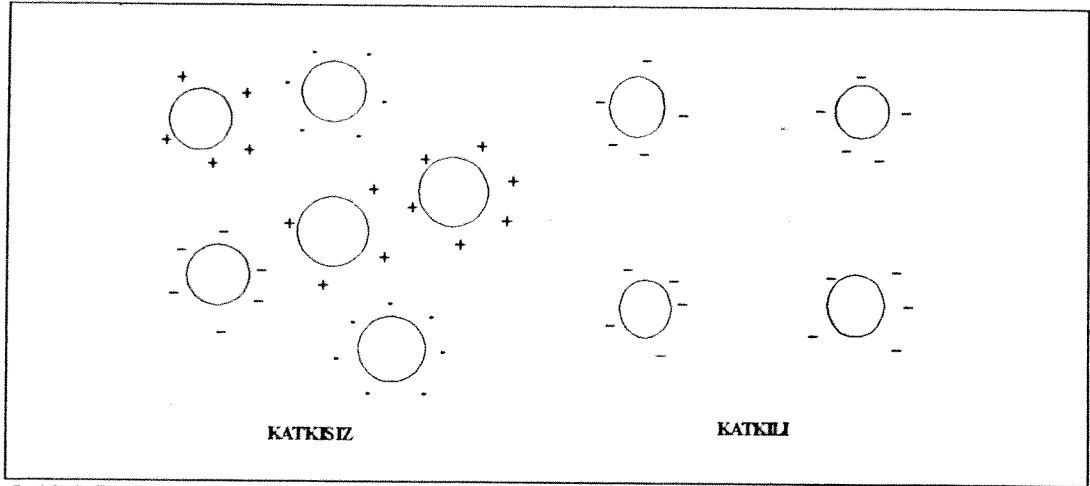
SAKlar iki ana gruba ayrılır: (1) Akışkanlaştırıcılar (AK), (2) Yüksekakışkanlaştırıcılar (YAK). Sabit bir işlenebilirlik için taze betonun su gereksinmesinde % 5-10 azalma sağlayan SAKlar akışkanlaştırıcı olarak adlandırılır. Öte yandan, %15-30 mertebesinde su azaltımını sağlayan katkılar yüksekakışkanlaştırıcılarıdır. Akışkanlaştırıcı katkılar daha önce belirtilen beş ana kimyasal maddeden birisi kullanılarak elde edilir. Buna karşılık, yüksekakışkanlaştırıcılar bir polimer zincirine bağlanmış sülfonik asit gruplarından oluşmuş moleküllerden meydana gelirler. Lignosülfonat esaslı SAKlar betonda bir miktar hava kabarcığı oluşmasına ve içerdikleri şeker nedeniyle, betonun sertleşmesinin gecikmesine neden olurlar. Hidroksikarboksilik ve hidroksile polimer esaslı SAKlarda da benzer şekilde sertleşmenin geciktiği gözlenir. Öte yandan, bu üç tip katkıda görülen yan etkiler naftalin formaldehit ve melamin formaldehit esaslı olanlarda yoktur. Dolayısıyla, ilk üç gruptaki SAKlar akışkanlaştırıcı, diğer iki gruptakiler ise yüksekakışkanlaştırıcı sınıfındadırlar. Bu iki sınıf arasındaki en önemli farklardan birisi de YAKların AKlara oranla çok daha yüksek dozlarda kullanılabilme olanağıdır. AKlardaki geciktirici veya hava sürükleyici yan etkiler YAKlarda ya hiç yoktur ya da en aza indirilmiştir.



Şekil 3.6. Melamin formaldehid sülfonat.

Bugün mevcut su azaltıcı katkıların büyük bir çoğunluğu yukarıda kısaca anlatılan bu maddelerden elde edilir. Bu katkıların ana işlevi olan beton karışım suyundaki azalma Şekil 3.7'de şematik olarak gösterildiği biçimde gerçekleşir. Artı ve/veya eksi elektrik yüküyle yüklü olan çimento tanecikleri arasındaki elektrostatik çekme kuvvetleri bunların bir araya gelerek küçük topakçıklar oluşturmasına-neden olur. Sisteme katılan SAK çimento taneciklerinin yüzeylerindeki bu yüklerin nötrale edilmesine ya da her taneciğin aynı yükü almasına neden olurlar. Böylece çimento tanecikleri birbirlerini iterek ayrılırlar.

SAKlar iki ana gruba ayrılır: (1) Akışkanlaştırıcılar (AK), (2) Yüksekakışkanlaştırıcılar (YAK). Sabit bir işlenebilirlik için taze betonun su gereksiniminde % 5-10 azalma sağlayan SAKlar akışkanlaştırıcı olarak adlandırılır. Öte yandan, %15-30 mertebesinde su azaltımını sağlayan katkılar yüksekakışkanlaştırıcıdır. Akışkanlaştırıcı katkılar daha önce belirtilen beş ana kimyasal maddeden birisi kullanılarak elde edilir. Buna karşılık, yüksekakışkanlaştırıcılar bir polimer zincirine bağlanmış sülfonik asit gruplarından oluşmuş moleküllerden meydana gelirler. Lignosülfonat esaslı SAKlar betonda bir miktar hava kabarcığı oluşmasına ve içerdikleri şeker nedeniyle, betonun sertleşmesinin gecikmesine neden olurlar. Hidroksikarboksilik ve hidroksile polimer esaslı SAKlarda da benzer şekilde sertleşmenin geciktiği gözlenir. Öte yandan, bu üç tip katkıda görülen yan etkiler naftalin formaldehit ve melamin formaldehit esaslı olanlarda yoktur. Dolayısıyla, ilk üç gruptaki SAKlar akışkanlaştırıcı, diğer iki gruptakiler ise yüksekakışkanlaştırıcı sınıfındadırlar. Bu iki sınıf arasındaki en önemli farklardan birisi de YAKların AKlara oranla çok daha yüksek dozlarda kullanılabilme olanağıdır. AKlardaki geciktirici veya hava sürükleyici yan etkiler YAKlarda ya hiç yoktur ya da en aza indirilmiştir.



Şekil 3.7. SAKların su azaltmaya neden olan ayırıcı etkisi.

3.2. Su Azaltıcı Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi

SAKların çeşitli beton özelliklerine etkileri konusunda 1930ların ilk yıllarından başlayan çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda elde edilen bilgi birikimi taze çimento hamuru fazından başlayarak sertleşmiş betona kadar adım adım ele alınmıştır.

3.2.1. Su Azaltıcı Katkıların Su-Çimento Sistemine Etkileri

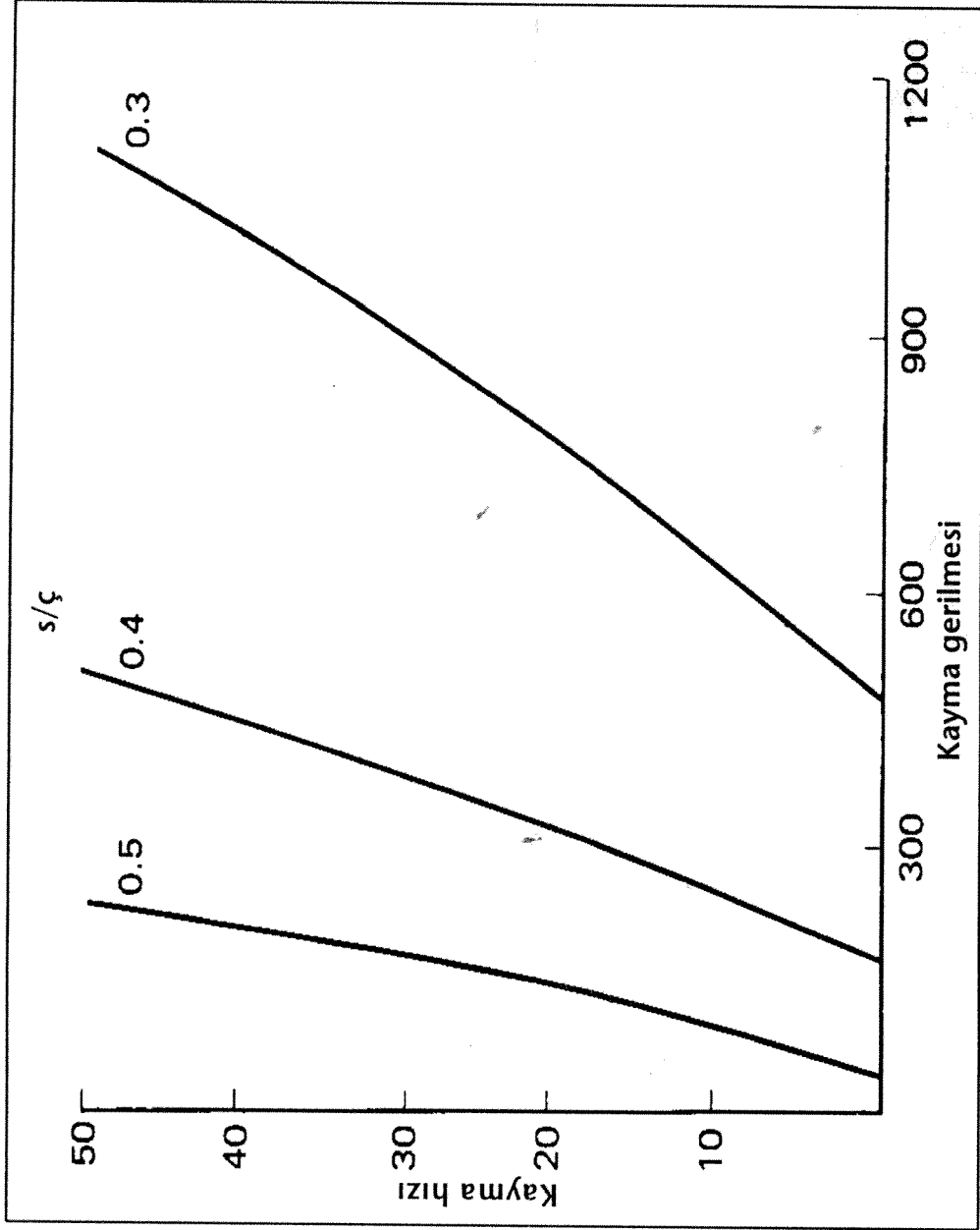
Taze betonun plastik haldeki reolojik özellikleri agrega tipi, şekli, geometrisi; çimento miktarı ve özellikleri gibi bir çok parametreye bağlı olmakla birlikte bunların sabit olduğu kabulüyle yalnız betonun çimento hamuru fazını ele alarak, oldukça karmaşık olan davranışı daha pratik olarak açıklamak mümkün olabilir. Su-çimento oranı yüksek olan bir betondaki çimento hamuru su-çimento oranı düşük olanıkinden daha akışkandır. Söz konusu durumu Şekil 3.8'deki gibi göstermek mümkündür. Taze çimento hamurunun bir Bingham Cismi gibi davrandığı göz önünde bulundurulursa, Şekil 3.8'deki Kayma gerilmesi, τ , değerleri "akma sınırı" olarak kabul edilebilir. Öte yandan, sistemin viskozitesi ise τ -($d\gamma/dt$) eğrisinin eğimidir. Yukarıda yapılan betondaki diğer parametrelerin sabit olduğu varsayımıyla, betonun akışkanlığının çimento hamurunun viskozitesinin, kohezyonunun ise yine hamurun akma sınırının birer fonksiyonu olduğu söylenebilir [Rixom ve Mailvaganam, 1986].

SAKların çimento hamurunun reolojisine etkisine bakıldığında (Şekil 3.9), bu malzemelerin su-çimento sistemlerine eklenmesi τ -($d\gamma/dt$) eğrisinin şeklini değiştirmedeği ancak daha düşük bir düzeye kaydırıldığı görülür. SAK tipi ve miktarının çimento hamurunun viskozitesine etkileri Şekil 3.10 ve 3.11'de gösterilmiştir.

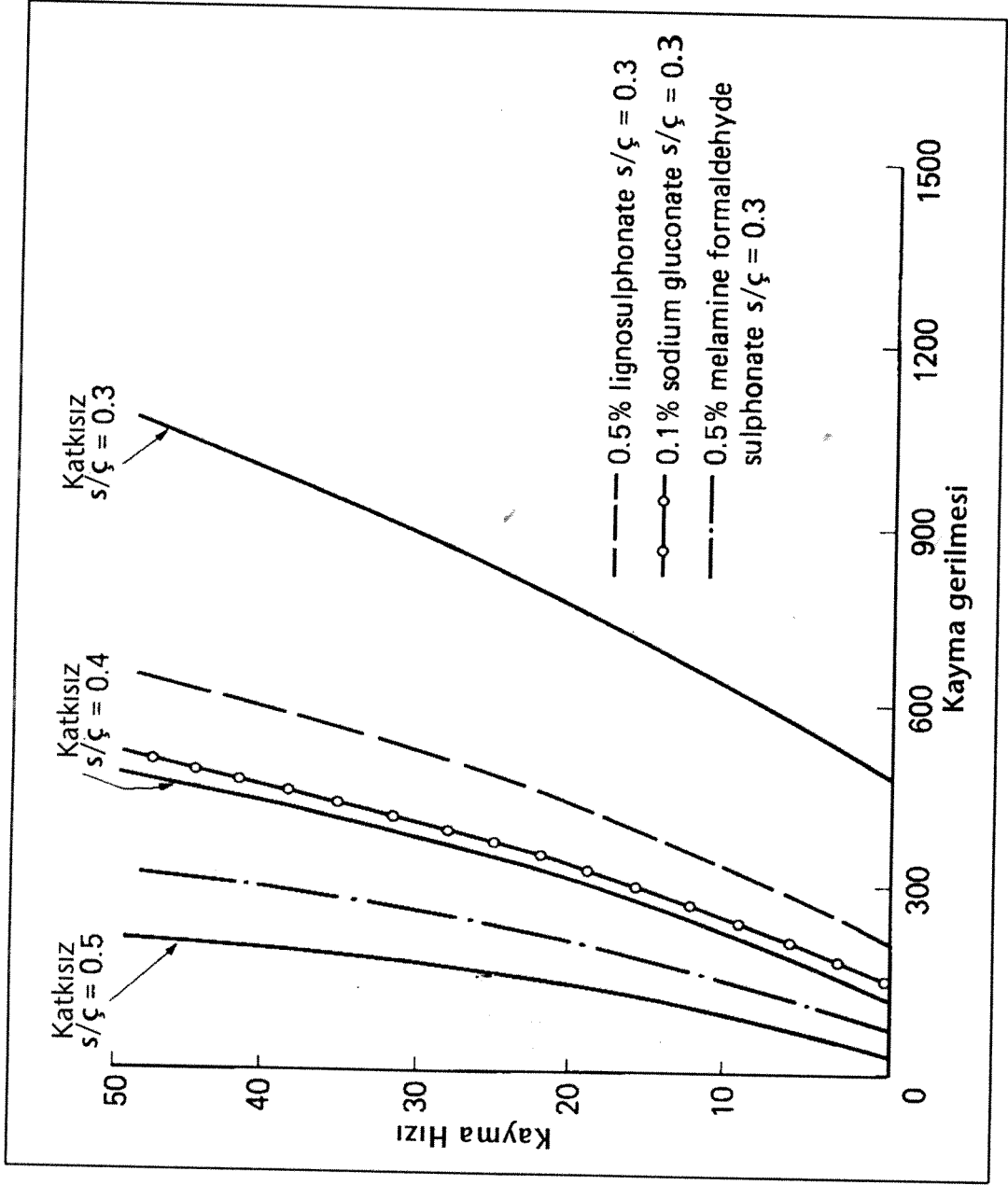
Normal çimento hamurlarında tanecikler arasındaki van der Waals kuvvetleri bu tanecikleri bir arada tutarak küçük topraklar oluşmasına neden olur. SAKların tanecikler arası çekme kuvvetlerini ve kanşımındaki su miktarını nasıl azalttığı ve buna karşın çimento hamurunun reolojik özelliklerini nasıl koruyabildiği konusunda çok sayıda deneysel araştırma yapılmıştır [Rixom ve Mailvaganam, 1986]. Sonuç olarak ortaya çıkan ve genel kabul gören durum Şekil 3.7'de basit olarak gösterilmiştir.

3.2.2. Su Azaltıcı Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkileri

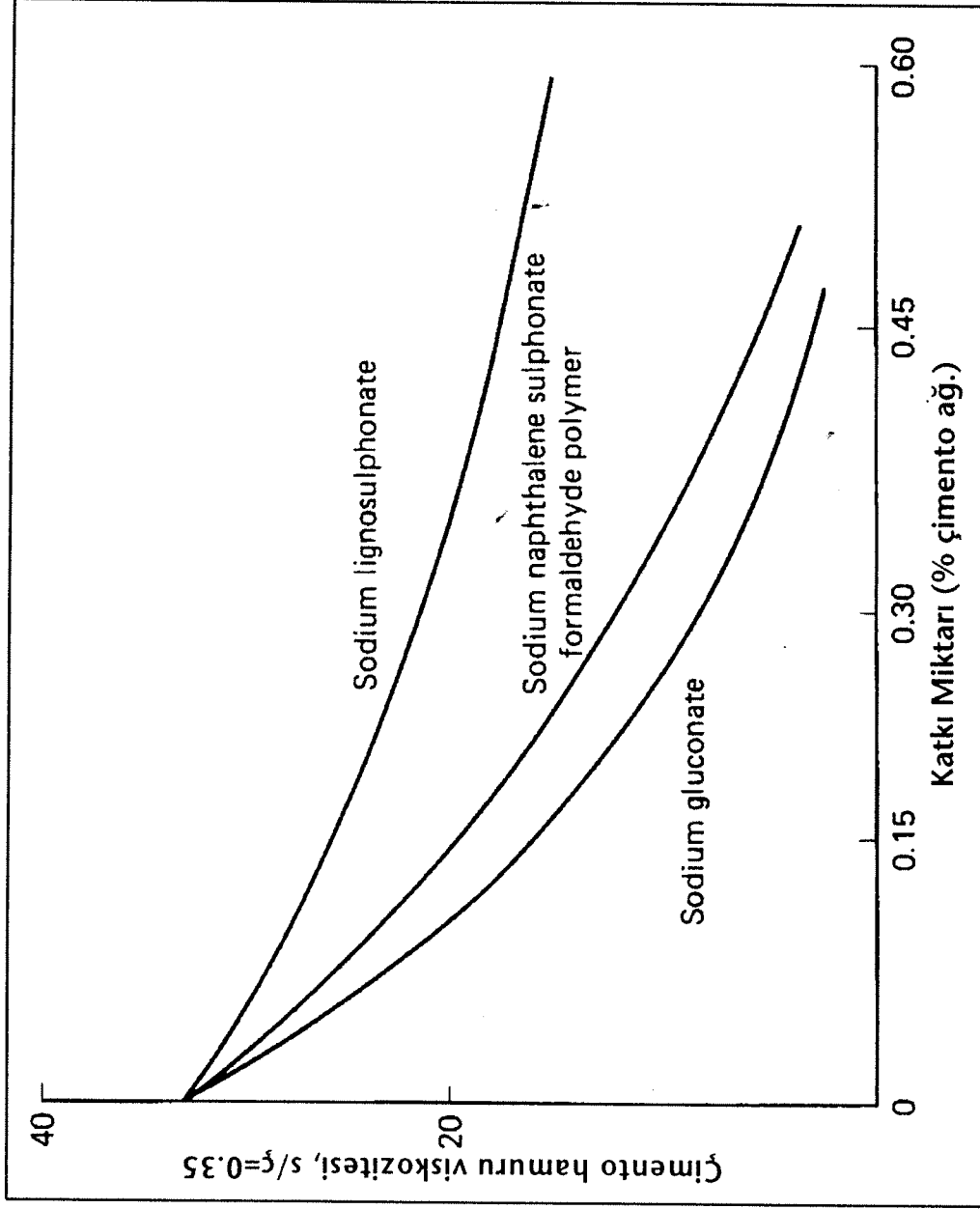
Taze betonların özelliklerini iki evrede ele almak mümkündür: (1) Erken plastik evre ve (2) Geç plastik evre. Bunlardan birincisi karma işleminin hemen sonrasında standart deneylerle belirlenen (a) hava miktarı ve (b) işlenebilme gibi özellikleri içerir. İkincisi ise taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sırasında önem kazanan işlenebilmedeki değişiklikler ve ayrışma ve terlemeye karşı direnç gibi hususları kapsar.



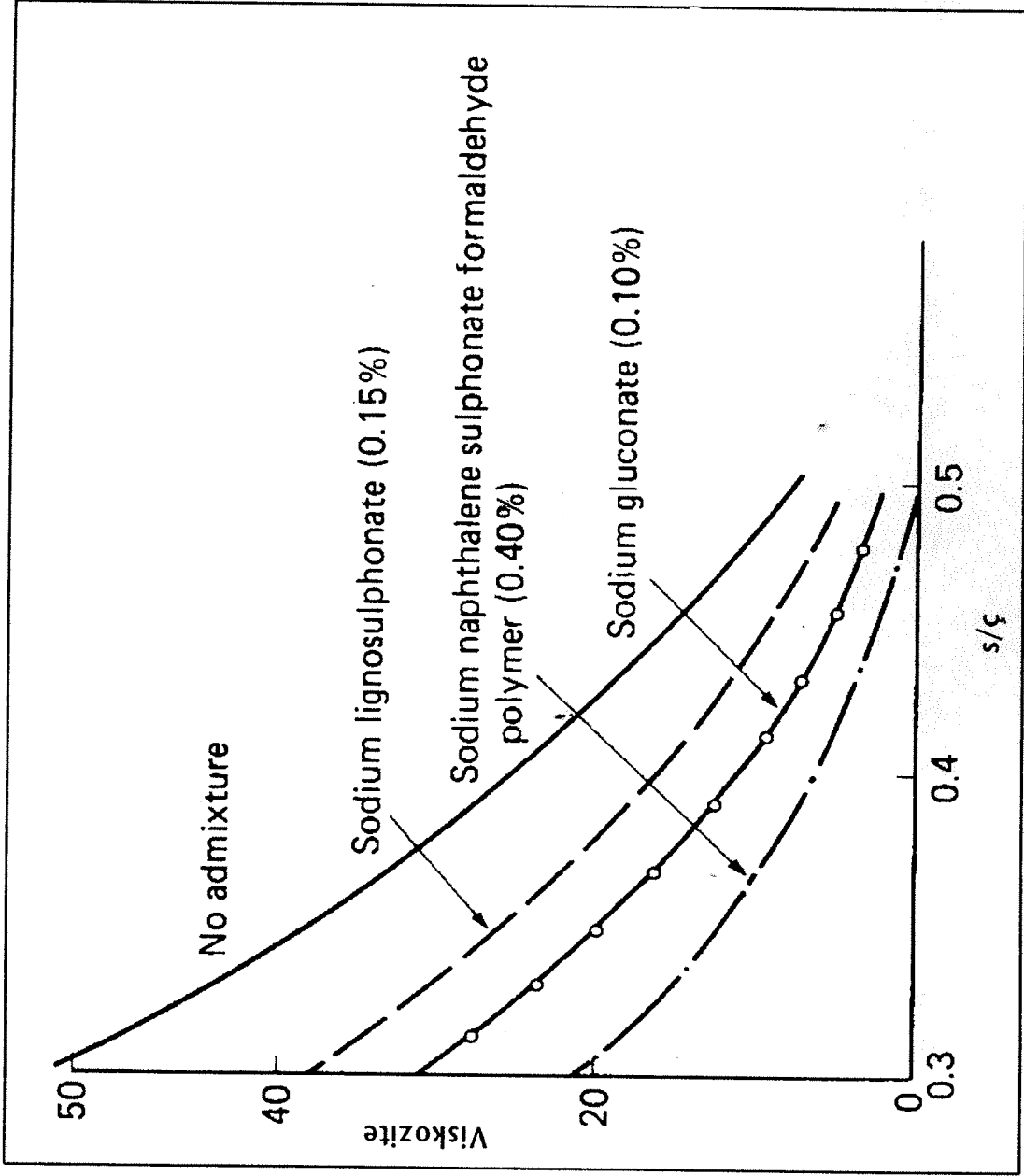
Şekil 3.8. Değişik S/Ç oranlarındaki taze çimento hamurlarının Kayma gerilmesi-Kayma gerinim hızı ilişkisi



Şekil 3.9. Değişik su azaltıcı katkıları içeren çimento hamurlarının Kayma Gerilimi-Kayma Gerilimi ilişkileri



Şekil 3.10. Su azaltıcı katkıların dozajının çimento hamuru viskozitesine etkileri



Şekil 3.11. Değişik su-çimento oranlarındaki çimento hamurlarında su azaltıcı katkıların viskoziteye etkileri

3.2.2.1. Hava Miktarı

Karma işlemleri sırasında, kaçınılmaz olarak, taze betonda yaklaşık %1.5 (hacimce) oranında hava kabarcıkları oluşur. SAKların kullanılması betonun hava miktarında, ya isteyerek (örneğin, hava sürükleyici SAKlar) ya da katkının bir yan etkisi olarak, bazı değişikliklere neden olurlar. Bu değişiklikler kullanılan katkının tipi ve miktarına bağlıdır. Farklı SAKların taze betonun hava miktarına etkileri Çizelge 3.1'de verilmiştir [Rixom ve Mailvaganam, 1986].

Çizelge 3.1. Su Azaltıcı Katkıların Betonun Hava Miktarına Etkileri

SAK Sınıfı	Ana Kimyasal Maddesi	Hava Miktarındaki Değişiklik (% hacim)
Normal	Lignosülfonat	0.4-2.7
	Lignosülfonat+tribütüil fosfat	0.3-0.6
	Hidroksikarboksilik asit	(-0.2)-0.3
Hılandırıcı	Lignosülfonat+CaCl ₂	0.3-0.5
	Hidroksikarb. asit+CaCl ₂	0.8-1.6
Geciktiricili	Yüksek şekerli ligns.	1-2
	Hidroksikarboksilik asit	0
	Hidroksile polimer	(-0.2)-0
Hava Sürükleyicili	Lignosülfonat+hava sürükl.	0.9-2.6
	Hidroksikarb. asit+hava sür.	3-5
Yüksek akışkanlaştırıcı	Modifiye lignosülfonat	1-2
	Naftalin formaldehid sülfonat	1-1.5
	Melamin formaldehid sülfonat	(-0.25)-(-0.1)

3.2.2.2. İşlenebilme

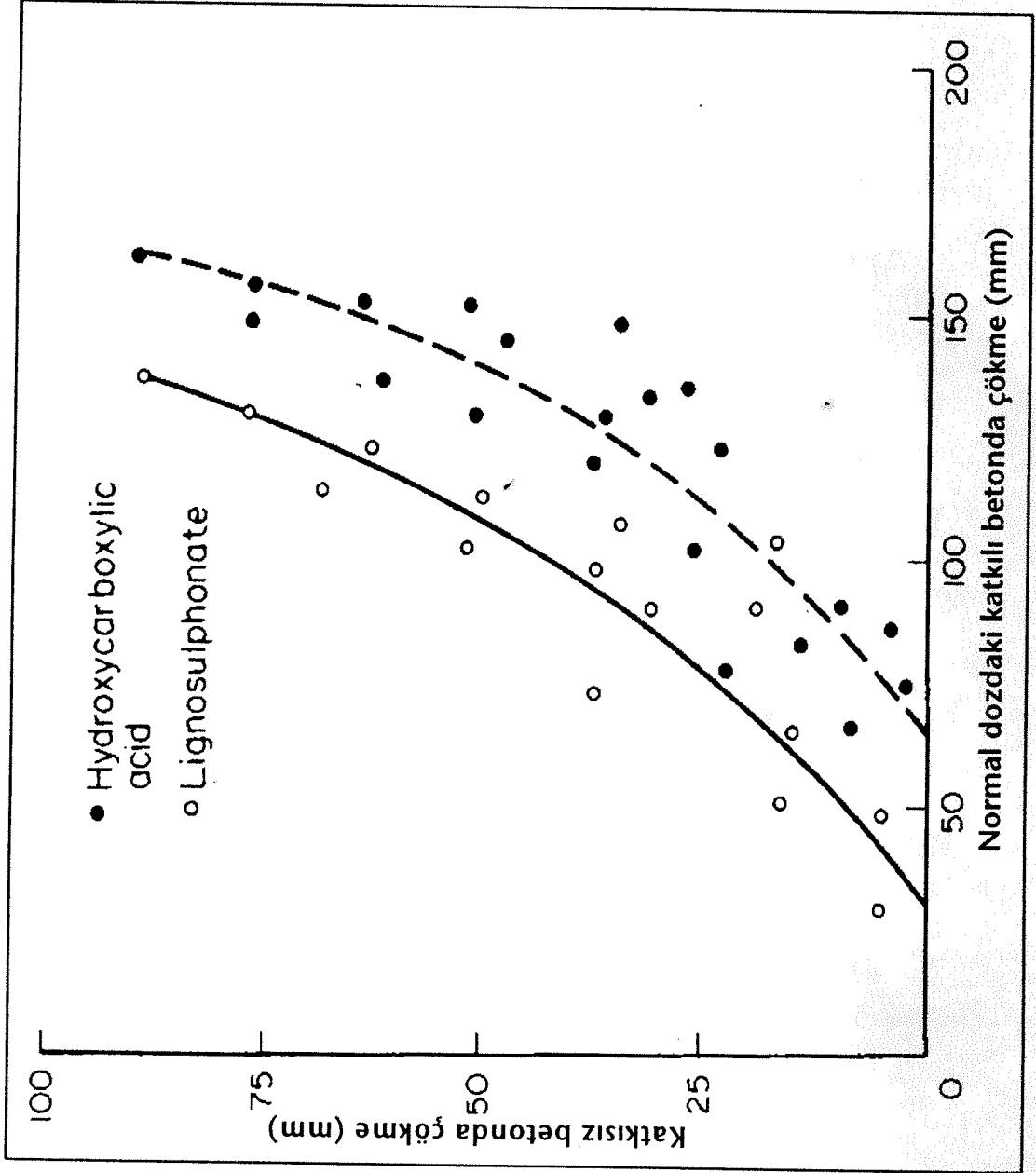
İşlenebilme taze betonda, uygulanan gerilmeler altında, deformasyon oluşmasının kolaylığı olarak tariflenirse, sabit çevre koşulları içinde bu deformasyonun büyüklüğü, esas olarak, kullanılan agrega hacmine ve çimento hamurunun viskozitesine bağlıdır. Her hangi bir SAK betonun diğer bileşenlerinin miktarlarında bir değişiklik yapılmadan kullanıldığında katkısız betona göre daha fazla çökme gösterir. Çökme değerindeki artış kullanılan katkı miktarı ile orantılıdır [ACI Committee 212, 1989; Rixom ve Mailvaganam, 1986]. Çökmede meydana gelen söz konusu değişiklikler, sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13'de gösterilmiştir.

3.2.2.3. İşlenebilme Kaybı

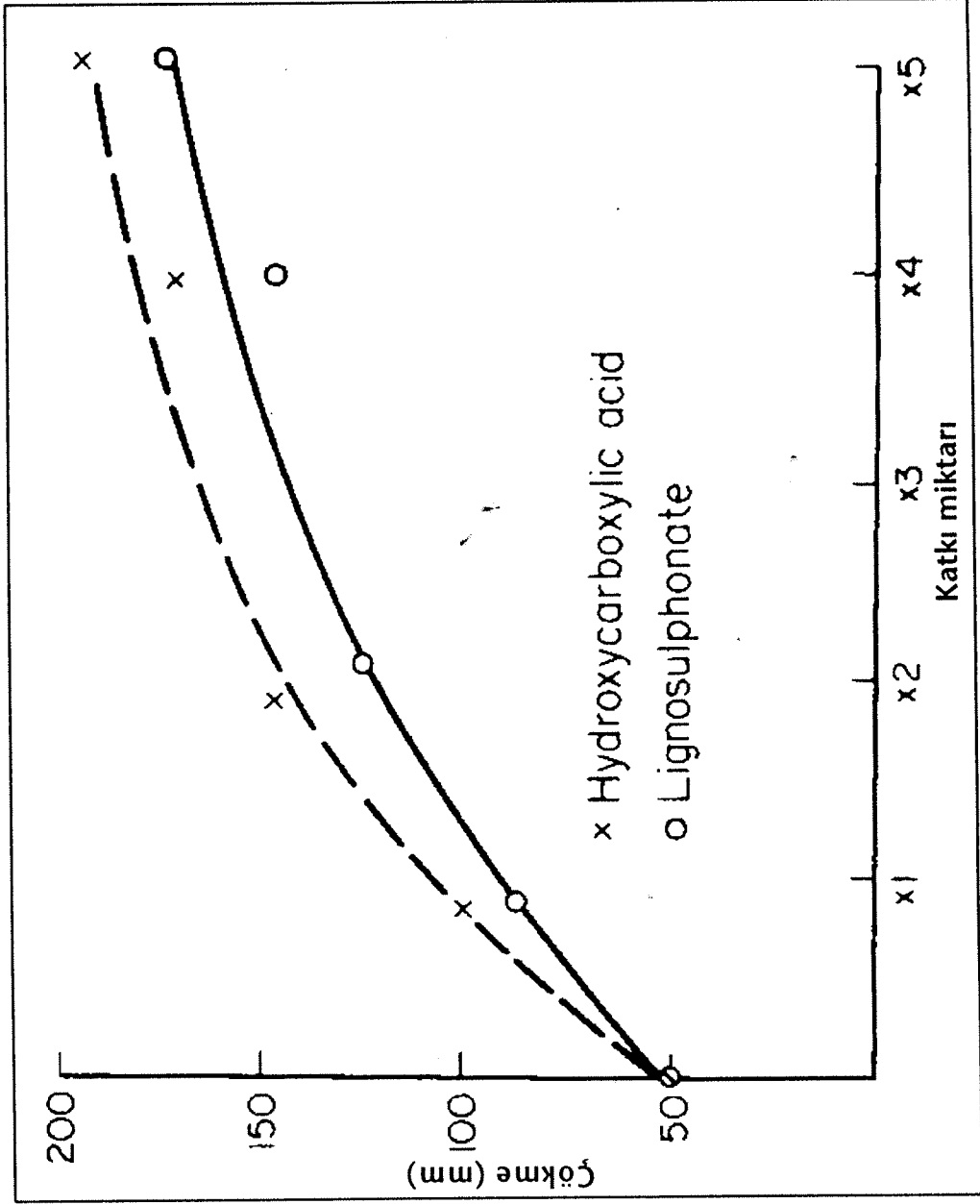
Betondaki işlenebilme özeliği, çimentonun hidratasyonunun sürmesi nedeniyle zaman içinde önemli ölçüde azalır. Söz konusu azalma taze betonun taşıma, yerleştirme, sıkıştırma işlemleri sırasında çeşitli sorunlara neden olabilir. Genel olarak bakıldığında, taze betonlardaki çökme kaybı SAK içeren betonlarda daha belirgindir. Ancak SAK dozajındaki artış zaman içindeki çökme kaybını azaltır [Rixom ve Mailvaganam, 1986]. Bu etkiler SAK içeren hazır betonlarda, sırasıyla, Şekil 3.14 ve 3.15'de gösterilmiştir.

3.2.2.4. Beton Karışım Suyunda Meydana Gelen Azalma

SAKların beton karma suyunda meydana getirecekleri azalma (a) Şekil 3.16'da gösterildiği gibi, karışımın agrega-çimento oranına, (b) Çizelge 3.2'de verilen örnekte olduğu gibi, karışımın belirlenmiş olan işlenebilirliğine, (c) Şekil 3.17'de gösterildiği gibi, kullanılan SAK miktarına ve (d) çimento özelliklerine bağlıdır.

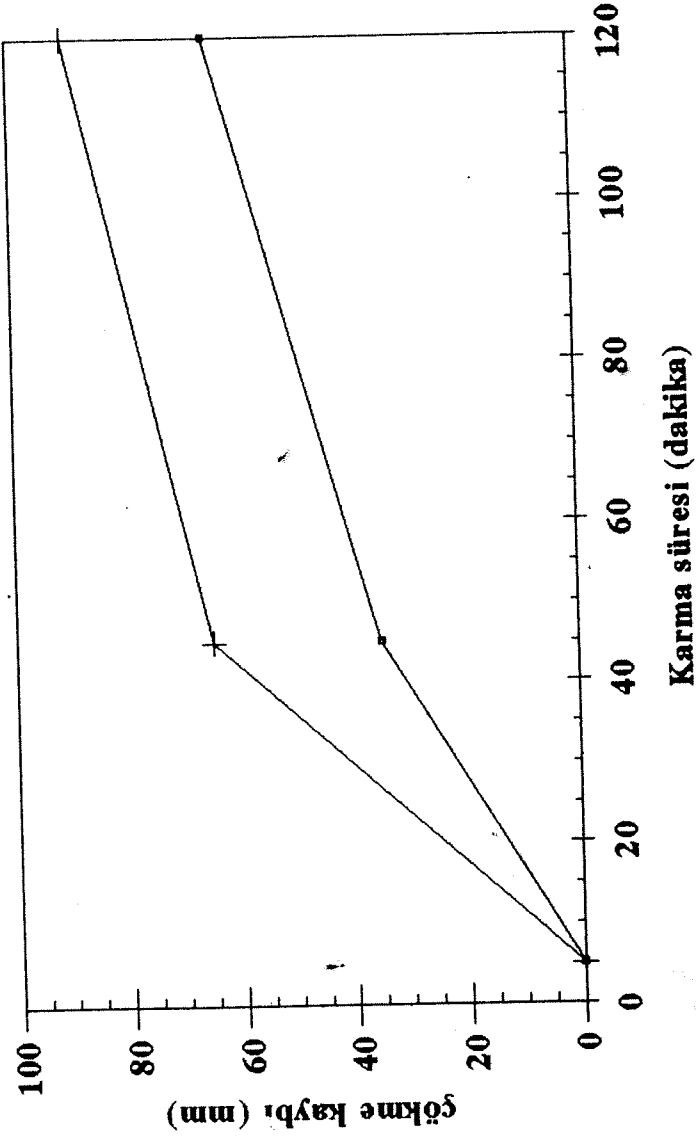


Şekil 3.12. Katkısız ve su azaltıcı katkı içeren betonların çökme değerlerinin karşılaştırılması

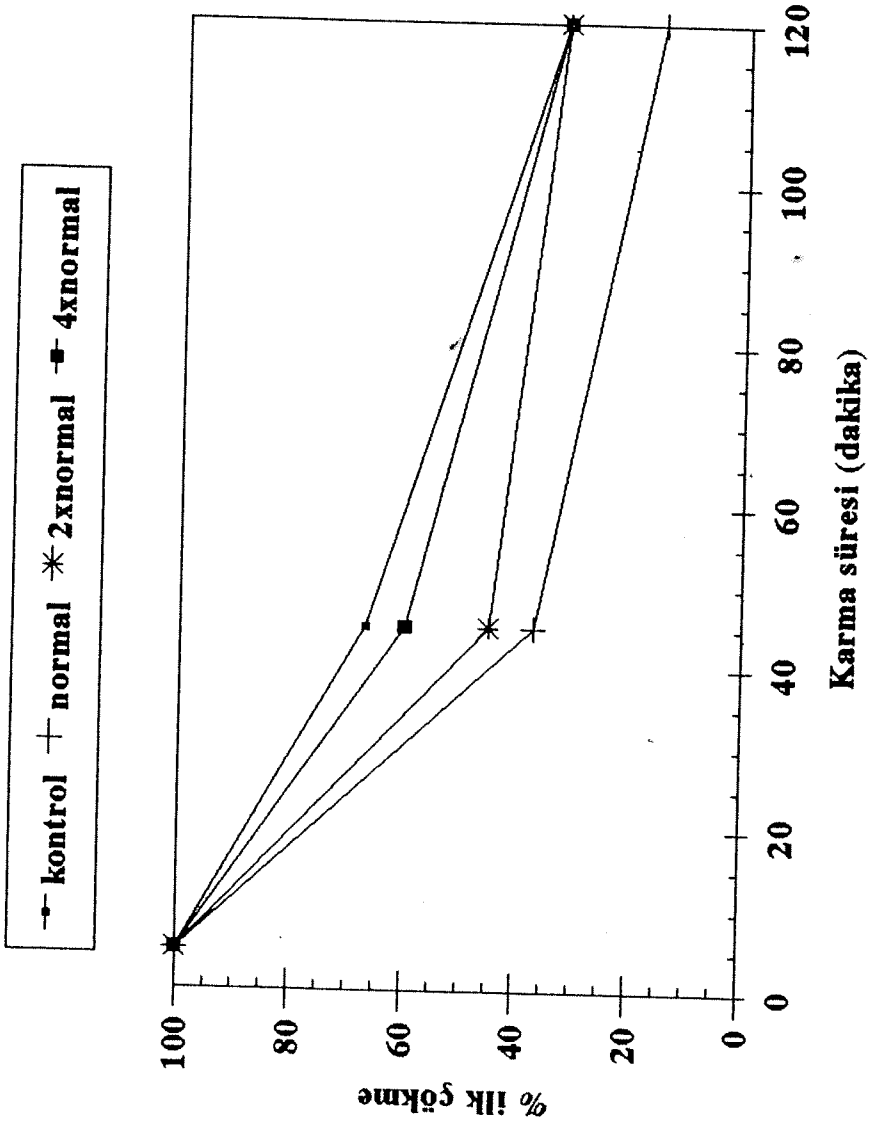


Şekil 3.13. Su azaltıcı katkı dozajının betonun çökmesine etkisi

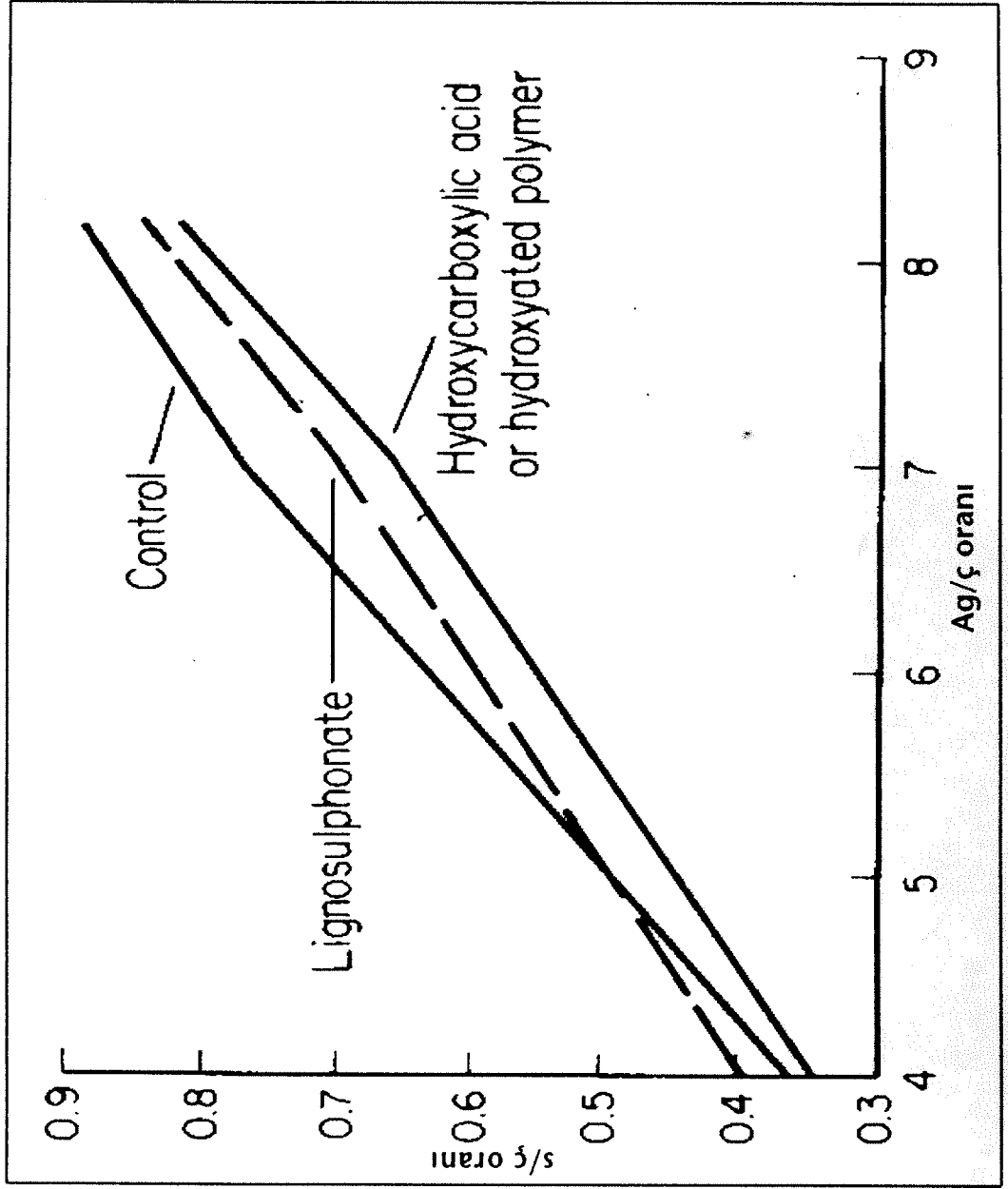
—+ kontrol + SAK li



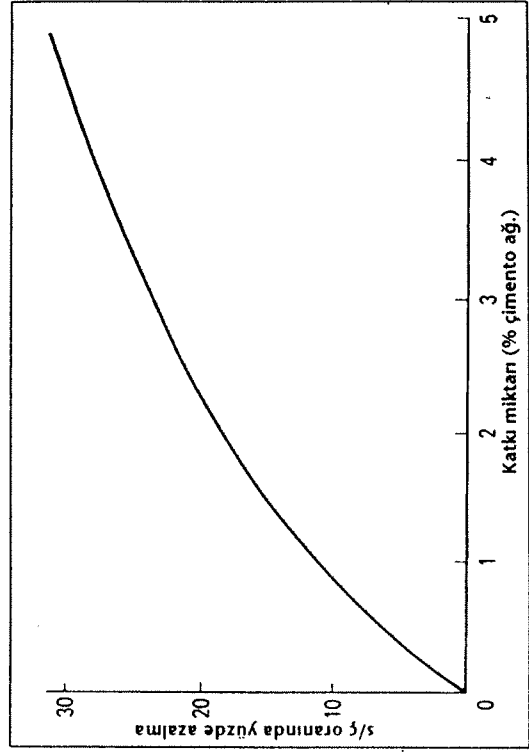
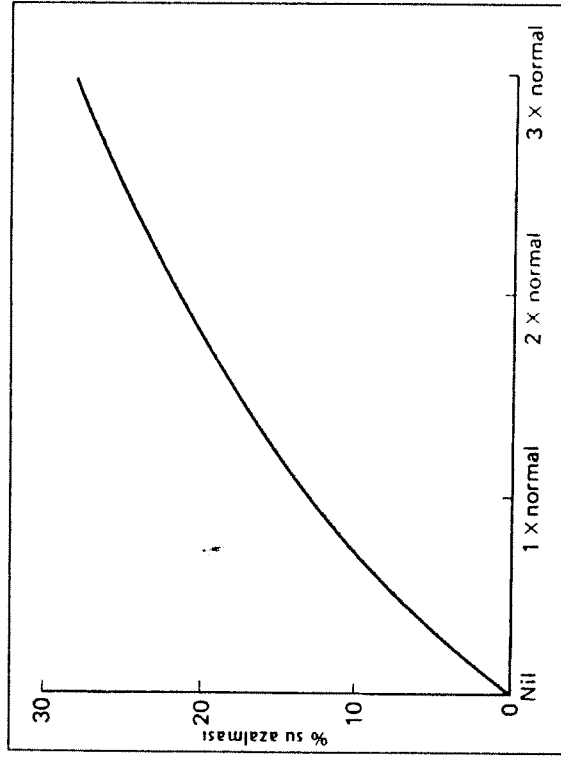
Şekil 3.14. Su azaltıcı katkı içeren betonlarda zamanla çökme kaybı



Şekil 3.15. Su azaltıcı katkı dozajının çökme kaybına etkileri



Şekil 3.16. Agregat-Çimento oranının SAKların su azaltmasına etkisi



Şekil 3.17. Yüksek akışkanlaştırıcı katkıların dozajının su azaltmaya etkisi

TÜRKİYE MİMARLIK VE
TEKNİK KURUMU
KURUM KÜTÜPHANESİ

Çizelge 3.2. SAKların Su Azaltıcı Özelliğinin Çökme Değeri ile Değişimi*

Belirlenmiş Çökme Değeri (mm)	S/Ç oranındaki azalma (%)
50	5-8
75	8-10
100	10-12
150	12-15

*Kullanılan SAK lignosülfonat esaslıdır

3.3. Deneysel Çalışma

Akışkanlaştırıcı ve Yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların YDBların dayanım özelliklerine etkileri Projenin başlangıcında ele alınmıştır. Bu bölümden elde edilen sonuçların araştırmanın ileriki evrelerinde kullanılması ve daha sonraki deneysel çalışmalarda parametre sayısını azaltacak şekilde optimum katkı tipi ve miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu evrede, üç ana grupta toplanan su azaltıcı katkıları temsilen YKS firmasından sağlanmış olan dört kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır:

1. ML1 (formaldehit melamin sülfonat esaslı),
2. ML2 (formaldehit melamin sülfonat esaslı),
3. MK (formaldehit naftalin sülfonat esaslı) ve
4. LB (lignosülfonat esaslı).

Bu malzemelerin özellikleri Raporun 2. Bölümünde Çizelge 2.5'de verilmiştir.

3.3.1. Beton Karışım Oranları

0/3mm kum, 3/7mm ve 7/15mm kırma kireçtaşı agregaların granülometri eğrileri tek tek belirlendikten sonra, bu üç boy agreganın TS 706 "Beton Agregaları" standardında en büyük tane boyutu (D_{maks}) 16mm için verilen tane dağılım eğrisi sınırlarına uygun bir karışımı elde edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan bu agrega kombinasyonunun granülometri eğrisi, TS 706 sınırlarıyla birlikte, Şekil 3.18'de verilmiştir.

Başlangıçta, her hangi bir kimyasal katkı kullanmadan 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck28}) 40 MPa olacak şekilde üç değişik karışım için hesaplar yapılmıştır. Beton karışım hesaplarında bir başka belirleyici unsur da taze betonun çökme değeri olmuştur. Kullanılan katkıların etkinliği ile betonun işlenebilmesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla bu aşamadaki karışımların çökme değerleri 10-30mm (K1 Betonu), 50-70mm (K2 Betonu) ve 100-120mm (K3 Betonu) olarak belirlenmiştir. K1, K2 ve K3 karışımlarının kontrol numuneleri için kullanılan malzemelerin miktarları Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Akışkanlaştırıcı ve Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi Deneysinde Kullanılan Kontrol Betonlarının Karışım Oranları

Kullanılan Malzeme (kg/m ³ beton)	Karışımlar		
	K1	K2	K3
Çimento	487	526	553
0/3mm kum (DYK)	521	505	481
3/7mm kırmataş (DYK)	252	240	234
7/15mm kırmataş (DYK)	934	894	867
Su (net)	184	210	224

Belirtilen üç katkısız kontrol karışımı esas alınarak, dört katkıyı ayrı ayrı ve üreticinin öngördüğü minimum, maksimum ve bunlar arasında iki değer olmak üzere dört ayrı dozajda kullanmak suretiyle katkılı numuneler üretilmiştir. Katkılı numunelerde de yukarıda belirtilen çökme değerleri sabit tutulmuş buna karşılık karışımlardaki su miktarı ayarlanmıştır.

3.3.2. Yapılan Deneyler

Kullanılan her katkı dozajı için altı tanesi 7 günlük altı tanesi de 28 günlük basınç dayanımı deneylerinde kullanılmak üzere 12 adet numune hazırlanmıştır. Deney sonuçlarının tekrarlanabilirliğinin kontrolü bakımından, her karışım ayrı günlerde olmak üzere, iki kez dökülmüştür. Dolayısıyla, bir karışım için, her dökümden 7 ve 28 günlük üçer numune alınmıştır. Numuneler, TS 3068 "Laboratuarda Beton Test Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı" standardına uygun olarak, $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %95 BN ortamında deney zamanına kadar tutulmuşlardır.

Ayrıca, her dökümde birer kez olmak üzere, her karışım için ikişer kez (i) çökme, (ii) birim ağırlık ve (iii) hava miktarı deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve ilgili standartlar Çizelge 3.4'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.4. AK ve SAKların Etkilerinin Belirlenmesi Aşamasında Yapılan Deneyler ve İlgili Türk Standartları

Deney	Standart
Çökme	TS 2871 "Taze Beton Kıvam Deneyi (Çökme Hunisi Metodu ile)"
Birim Ağırlık	TS 2941 "Taze Betonda Birim Ağırlık Tayini"
Hava Miktarı	TS 2901 "Taze Betonda Hava Miktarının Basınç Metoduyla Tayini"
Basınç Dayanımı	TS 3114 "Beton Basınç Dayanımı Deney Metodu"

3.3.3. Deney Sonuçları

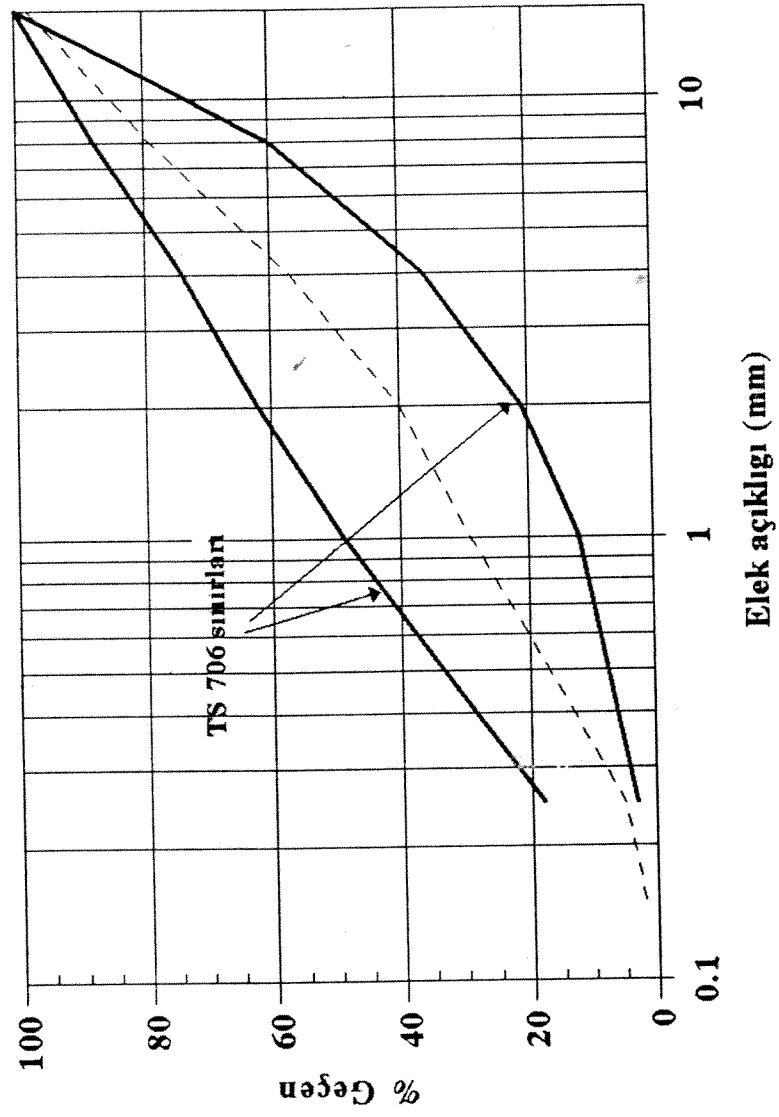
Araştırmanın bu aşamasında yapılmış olan deneylerden elde edilen (a) çökme, birim ağırlık ve hava miktarı sonuçları Çizelge 3.5'de; (b) katkı ilavesiyle karışım suyu miktarında meydana gelen değişiklikler Çizelge 3.6'da ve (c) 7 ve 28 günlük basınç dayanım değerleri Çizelge 3.7'de verilmiştir.

3.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

Çizelge 3.5'de verilen sonuçlara göre akışkanlaştırıcı veya yüksek akışkanlaştırıcı katkı kullanılmasıyla taze betonun birim ağırlığında, kontrol betonlarına göre, %5'e varan artışlar görülmüştür. Dolayısıyla, bu katkılar birim hacimde daha yoğun beton elde edilmesine neden olmaktadır. Öte yandan, AK veya YAK içeren betonların sıkıştırılmış hava miktarları ile katkı içermeyen kontrol betonlarının hava miktarları arasında gözle görülür farklar bulunmamaktadır.

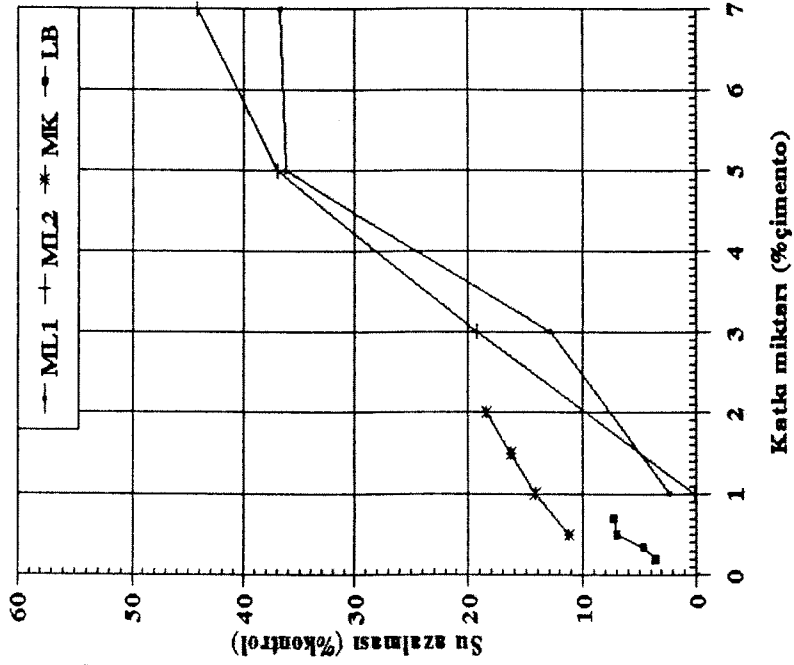
Çizelge 3.6 incelendiğinde, beton karışım suyundaki azalmanın kullanılan katkı dozajıyla orantılı olduğu görülmektedir. Melamin formaldehid esaslı katkıların (ML1 ve ML2) naftalin sülfonat (MK) ve lignosülfonat (LB) esaslılara göre daha fazla su azalttıkları belirlenmiştir. Aktif madde konsantrasyonları farklı iki melamin formaldehid esaslı katkı olan ML1 (%20 aktif madde) ve ML2 (%33 aktif madde) karşılaştırıldığında ML2'nin su azaltma açısından daha etkin olduğu ancak bu etkinliğin minimum ve maksimum değerlere göre, bunlar arasındaki dozajlarda daha belirgin olduğu görülmektedir.

Şekil 3.19'de araştırmanın bu bölümünde kullanılan her üç beton karışımı için dört değişik katkıyla elde edilen karışım suyu azalma oranları gösterilmiştir. Karışım suyundaki azalmayla orantılı olarak, katkılı betonlarda kontrol betonlarına göre, önemli dayanım artışları sağlanmıştır. Şekil 3.20, 3.21 ve 3.22'de, sırasıyla, K1, K2 ve K3 karışımlarında katkı miktarı-dayanım artışı ilişkileri grafik olarak gösterilmiştir.

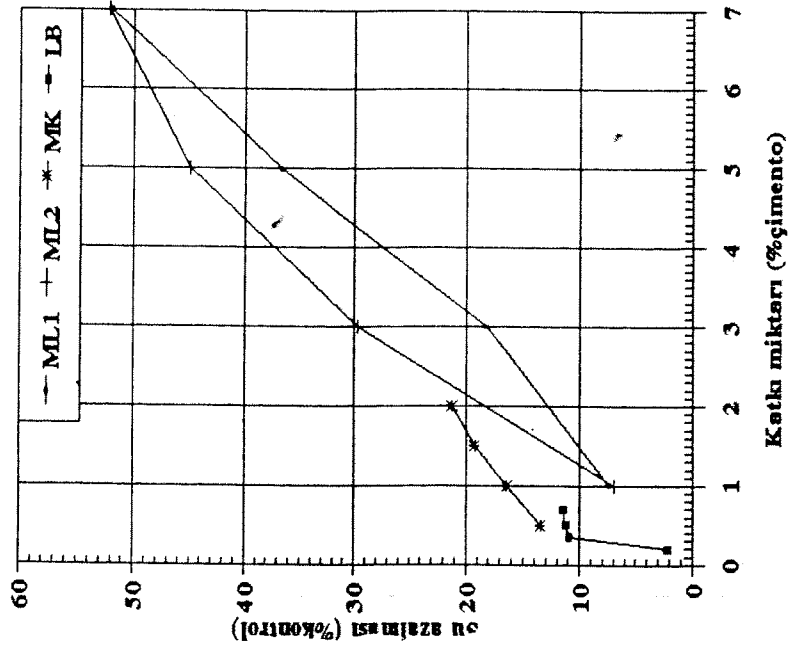


Şekil 3.18. Akışkanlaştırıcı ve yüksek akışkanlaştırıcı katkıların etkilerinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan agrega granulometrisi

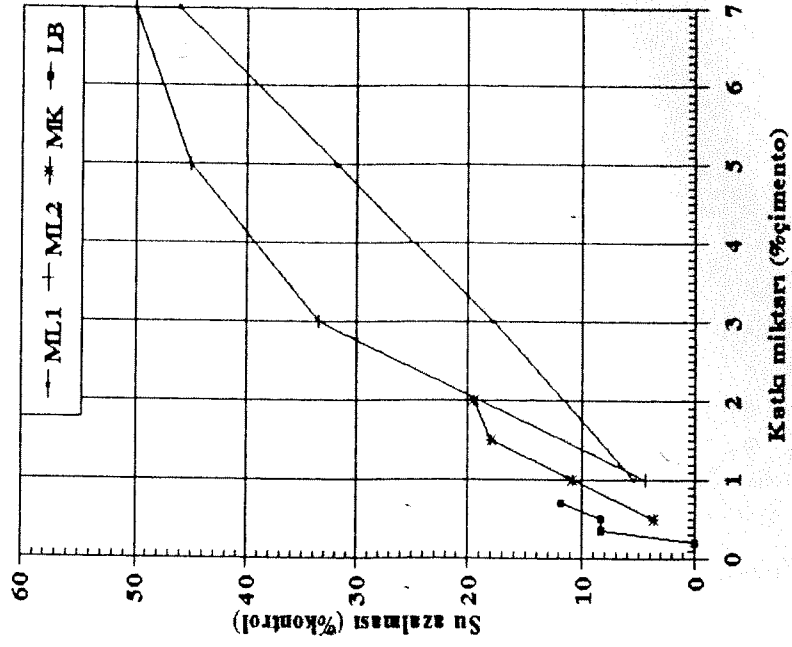
(a)



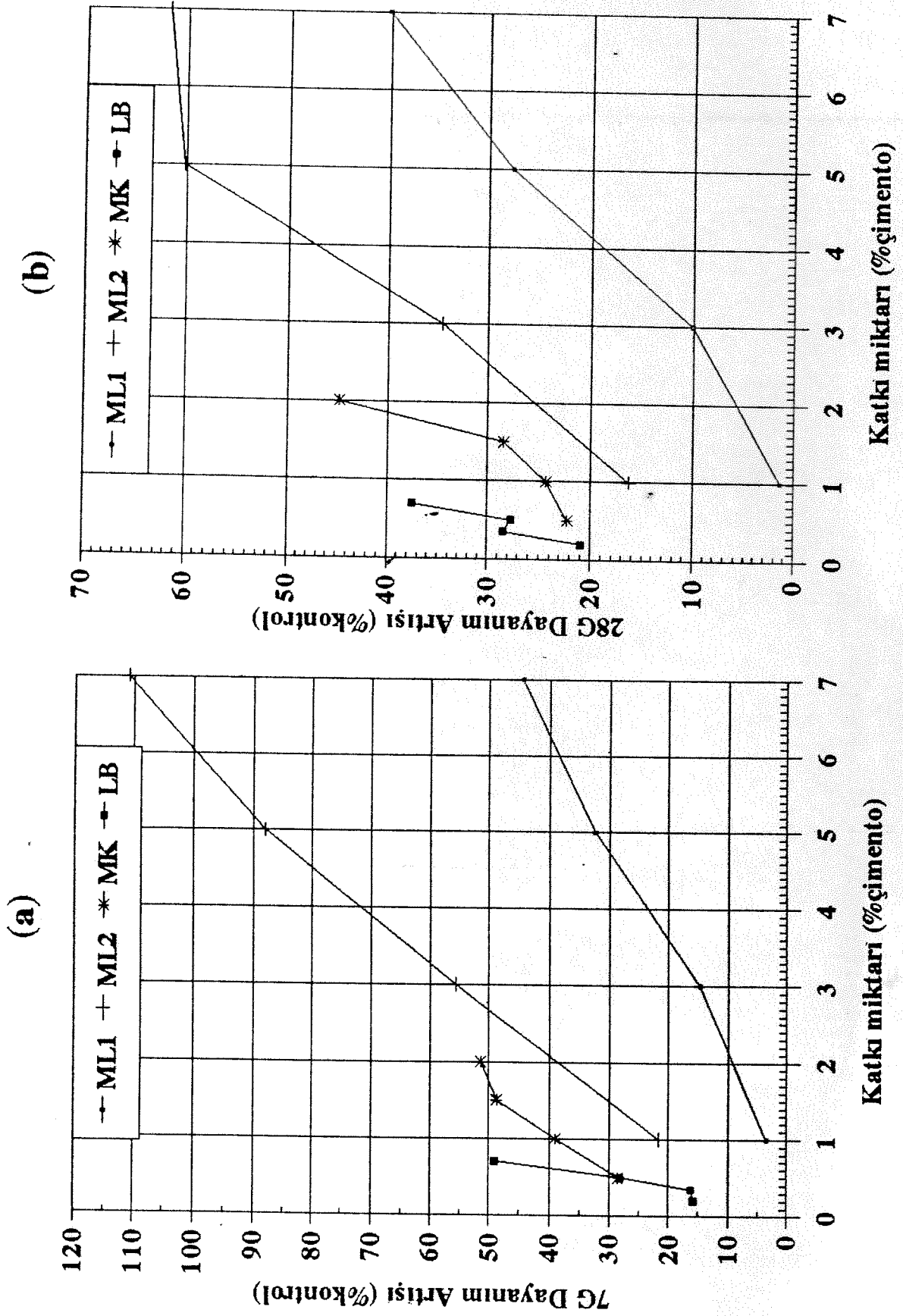
(b)



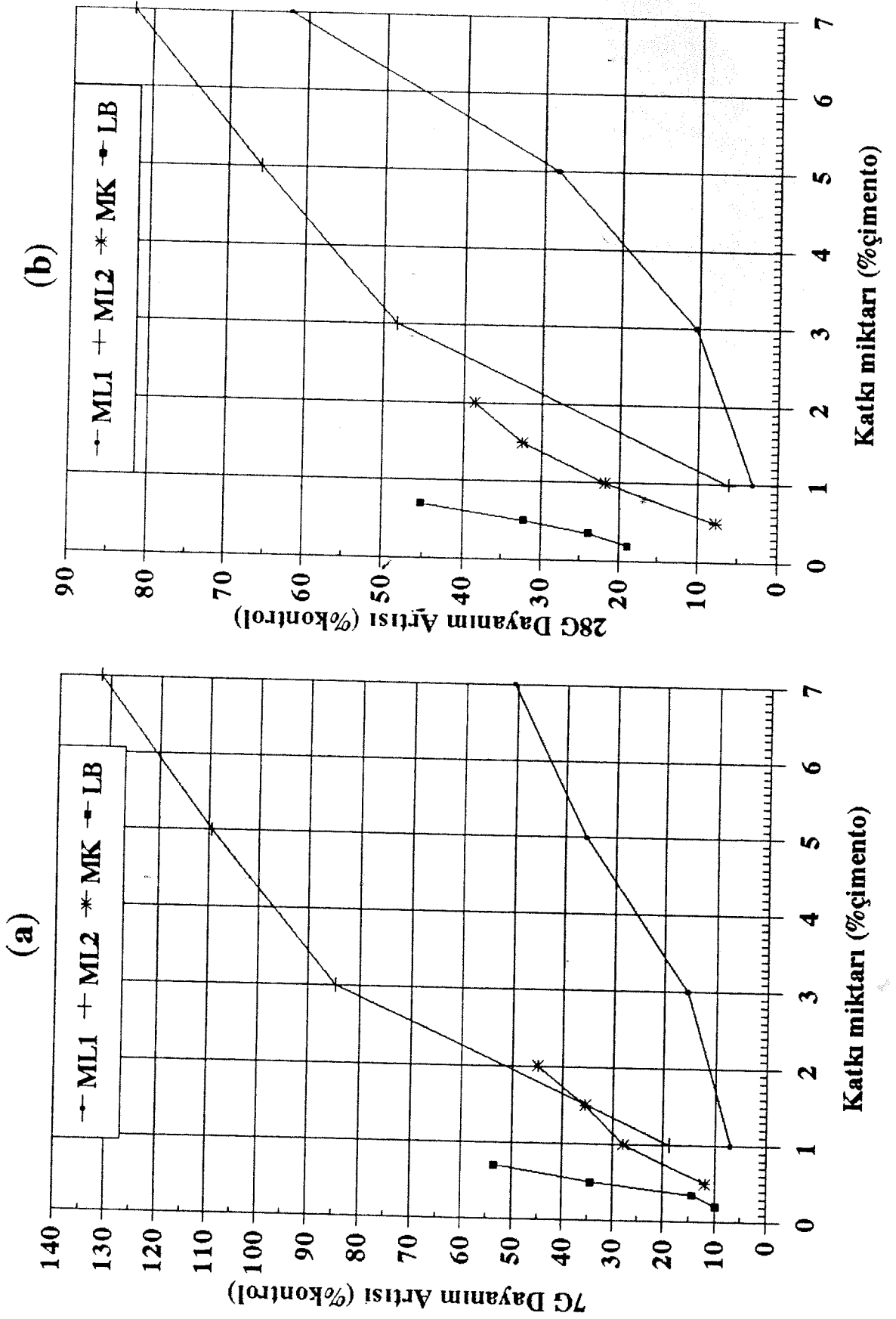
(c)



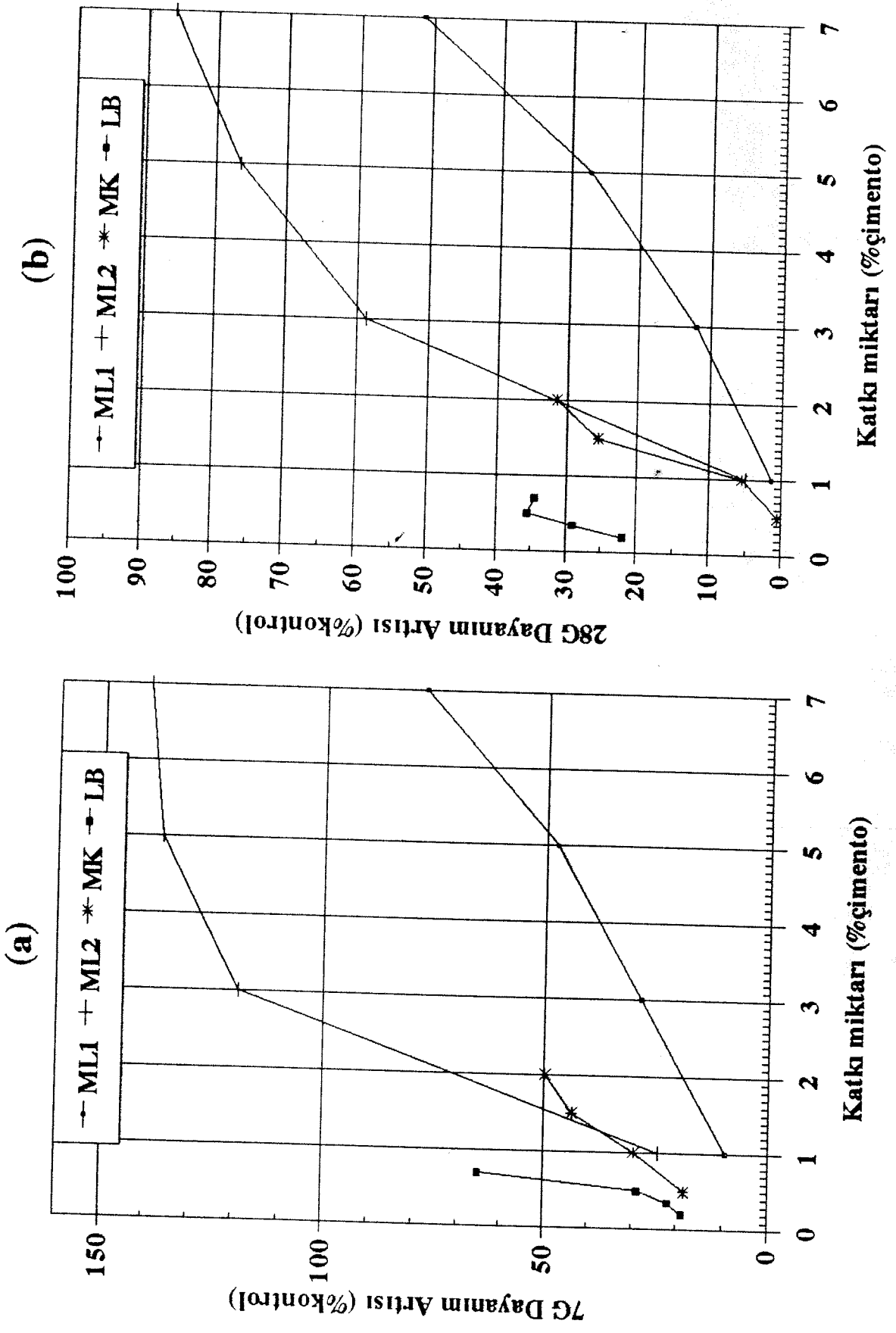
Şekil 3.19. Katkı miktarıyla (a) K1, (b) K2 ve (c) K3 betonlarının karışım suyunda meydana gelen azalma



Şekil 3.20. K1 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 3.21. K2 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 3.22. K3 betonlarında katkı miktarıyla (a) 7 günlük ve (b) 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi

Çizelge 3.5. Çökme, Birim Ağırlık ve Hava Miktarı Deney Sonuçları

Karışım	Katkı	Katkı Miktarı (% Çim.Ağ.)	Çökme (mm)	- Birim Ağ. (kg/m ³)	Hava miktarı (%)
K1	Kontrol	-	10	2343	1.2
	ML1	1.00	15	2357	1.4
		3.00	15	2371	1.5
		5.00	10	2386	1.5
		7.00	10	2407	1.6
	ML2	1.00	10	2357	1.3
		3.00	10	2400	1.5
		5.00	10	2443	1.5
		7.00	15	2429	1.3
	MK	0.50	10	2386	1.4
		1.00	15	2371	1.5
		1.50	15	2357	1.5
		2.00	15	2371	1.5
	LB	0.20	10	2360	1.4
		0.35	10	2357	1.5
		0.50	10	2386	1.4
0.70		10	2386	1.3	
K2	Kontrol	-	50	2329	1.3
	ML1	1.00	50	2343	1.3
		3.00	50	2364	1.2
		5.00	50	2371	1.4
		7.00	50	2400	1.3
	ML2	1.00	50	2350	1.4
		3.00	60	2400	1.4
		5.00	60	2429	1.4
		7.00	50	2429	1.3
	MK	0.50	50	2357	1.3
		1.00	60	2364	1.3
		1.50	55	2350	1.4
		2.00	65	2357	1.5
	LB	0.20	50	2339	1.3
		0.35	60	2336	1.2
		0.50	55	2357	1.4
0.70		60	2357	1.4	
K3	Kontrol	-	115	2314	1.3
	ML1	1.00	100	2329	1.0
		3.00	100	2357	1.0
		5.00	100	2357	1.2
		7.00	120	2421	1.2
	ML2	1.00	100	2336	1.0
		3.00	110	2421	1.2
		5.00	115	2429	1.2
		7.00	120	2429	1.2
	MK	0.50	105	2336	1.3
		1.00	100	2329	1.3
		1.50	105	2329	1.4
		2.00	105	2343	1.5
	LB	0.20	100	2339	1.1
		0.35	110	2343	1.0
		0.50	105	2357	1.2
0.70		105	2343	1.3	

Çizelge 3.6. AK ve YAK Kullanımıyla Beton Karışım Suyunda Meydana Gelen Azalma

Karışım	Katkı	Katkı Miktarı (% Çim.Ağ.)	Net Karışım Suyu (kg/m ³)	net S/Ç	Su azalması (% kontrol)
K1	Kontrol	-	183.3	0.376	-
	ML1	1.00	179.2	0.368	2.24
		3.00	159.7	0.328	12.88
		5.00	116.9	0.240	36.22
		7.00	115.9	0.238	36.77
	ML2	1.00	183.1	0.376	0.11
		3.00	148.0	0.304	19.26
		5.00	115.4	0.237	37.04
		7.00	102.3	0.210	44.19
	MK	0.50	162.7	0.334	11.24
		1.00	157.3	0.323	14.18
		1.50	153.4	0.315	16.31
		2.00	149.5	0.307	18.44
	LB	0.20	176.8	0.353	3.55
		0.35	174.8	0.359	4.64
		0.50	170.5	0.350	6.98
		0.70	170.0	0.349	7.26
K2	Kontrol	-	210.3	0.400	-
	ML1	1.00	194.6	0.370	7.47
		3.00	172.0	0.327	18.21
		5.00	133.1	0.253	36.71
		7.00	101.0	0.192	51.97
	ML2	1.00	195.7	0.372	6.94
		3.00	147.8	0.281	29.72
		5.00	115.7	0.220	44.98
		7.00	100.5	0.191	52.21
	MK	0.50	182.0	0.346	13.46
		1.00	175.7	0.334	16.45
		1.50	169.9	0.323	19.21
		2.00	165.7	0.315	21.21
	LB	0.20	205.7	0.391	2.19
		0.35	187.3	0.356	10.94
		0.50	186.7	0.355	11.22
		0.70	186.2	0.354	11.46
K3	Kontrol	-	223.9	0.405	-
	ML1	1.00	211.8	0.383	5.40
		3.00	184.1	0.333	17.78
		5.00	152.6	0.276	31.84
		7.00	120.6	0.218	46.14
	ML2	1.00	214.0	0.387	4.42
		3.00	148.8	0.269	33.54
		5.00	122.8	0.222	45.15
		7.00	111.7	0.202	50.11
	MK	0.50	215.7	0.390	3.66
		1.00	199.6	0.361	10.85
		1.50	183.6	0.332	18.00
		2.00	180.3	0.326	19.47
	LB	0.20	223.9	0.405	0.00
		0.35	205.2	0.371	8.35
		0.50	205.2	0.371	8.35
		0.70	197.4	0.357	11.84

Çizelge 3.7. 7 ve 28 Günlük Basınç Dayanım Deney Sonuçları

Karışım	Katkı	Katkı Miktarı (% Çim.Ağ.)	7G Basınç Dayanımı, σ_7 (MPa)				28G Basınç Dayanımı, σ_{28} (MPa)			
			min.	maks.	V (%)	ort.	min.	maks.	V (%)	ort.
K1	Kontrol	-	25.10	27.35	3.20	26.40	38.33	40.67	3.85	39.45
	ML1	1.00	26.53	28.46	2.37	27.32	38.19	41.03	3.62	39.96
		3.00	29.70	32.10	4.56	30.28	42.20	45.15	3.38	43.43
		5.00	33.27	35.47	2.93	34.96	48.34	50.95	3.47	50.36
		7.00	37.45	39.15	3.17	38.12	54.16	56.34	3.26	55.25
	ML2	1.00	31.67	32.74	2.86	32.11	44.71	47.42	3.34	45.87
		3.00	40.53	41.67	3.04	41.08	52.30	55.03	3.71	53.11
		5.00	49.05	50.18	2.12	49.64	62.18	64.45	3.08	63.20
		7.00	55.10	56.32	2.29	55.66	62.39	65.00	3.17	63.81
	MK	0.50	32.50	34.87	3.14	33.94	47.00	50.17	3.12	48.22
		1.00	35.47	37.50	3.07	36.70	47.94	51.65	3.26	49.03
		1.50	38.11	40.54	3.65	39.25	48.67	52.97	4.04	50.66
		2.00	39.07	41.03	2.98	39.96	55.60	58.85	3.91	57.08
	LB	0.20	29.73	31.34	2.71	30.58	45.40	49.00	3.54	47.71
		0.35	30.08	31.87	2.63	30.68	49.17	52.14	3.03	50.66
		0.50	32.17	34.75	2.79	33.84	49.25	51.57	3.09	50.36
0.70		38.77	40.63	2.87	39.35	52.87	56.67	3.11	54.23	
K2	Kontrol	-	23.87	25.70	3.05	24.97	37.77	39.42	3.22	38.33
	ML1	1.00	25.63	27.43	3.27	26.71	38.17	42.72	4.15	39.55
		3.00	28.05	29.67	2.59	28.85	41.73	44.05	3.11	42.30
		5.00	32.57	34.50	3.14	33.94	47.87	52.27	3.28	49.13
		7.00	36.87	37.90	2.31	37.61	60.68	63.67	3.19	62.18
	ML2	1.00	28.67	30.15	2.72	29.66	39.11	42.14	3.46	40.67
		3.00	45.33	46.87	2.47	46.08	55.50	59.07	3.42	56.88
		5.00	51.27	53.00	2.29	52.29	61.87	64.82	3.25	63.51
		7.00	57.00	58.63	2.94	57.90	68.04	71.67	3.94	69.93
	MK	0.50	27.13	28.17	3.13	27.93	39.67	43.17	3.76	41.28
		1.00	30.65	33.05	3.51	31.91	45.00	49.33	4.12	46.69
		1.50	32.17	35.23	3.68	33.84	48.85	52.67	4.03	50.76
		2.00	35.43	37.17	3.12	36.19	51.17	55.67	4.27	53.11
	LB	0.20	26.33	28.00	2.31	27.42	44.53	46.67	3.21	45.57
		0.35	27.70	29.20	2.16	28.54	45.47	49.00	3.16	47.50
		0.50	32.33	34.17	3.13	33.54	49.27	52.63	3.17	50.66
0.70		37.90	38.67	2.62	38.33	54.34	58.00	3.12	55.66	
K3	Kontrol	-	20.76	23.67	4.05	22.73	36.33	40.33	4.40	37.31
	ML1	1.00	22.67	25.50	3.87	24.87	36.25	41.00	4.20	37.82
		3.00	28.00	30.03	3.76	29.15	39.67	44.05	4.16	41.79
		5.00	32.33	34.73	4.33	33.54	45.96	51.33	4.15	47.40
		7.00	38.76	40.87	3.57	40.47	55.67	58.67	3.18	56.47
	ML2	1.00	26.57	31.33	4.13	28.24	38.33	42.33	3.71	39.14
		3.00	48.63	52.00	4.04	49.75	57.87	63.00	4.55	59.23
		5.00	52.17	55.63	4.16	53.72	63.33	69.08	4.36	65.85
		7.00	52.67	57.00	4.21	54.43	68.00	71.47	3.79	69.43
	MK	0.50	25.35	27.67	3.74	26.91	36.33	40.17	3.63	37.51
		1.00	27.85	32.00	3.40	29.46	38.25	41.83	3.33	39.34
		1.50	32.00	34.33	3.62	32.62	45.67	48.67	3.16	46.79
		2.00	32.50	35.87	3.47	34.05	47.50	52.33	4.76	49.03
	LB	0.20	26.13	28.33	3.54	27.01	44.36	48.91	4.19	45.46
		0.35	26.45	30.00	3.77	27.73	46.53	52.67	4.14	48.11
		0.50	28.33	32.67	3.59	29.26	47.87	53.33	4.11	50.56
0.70		35.70	38.67	3.28	37.51	48.95	53.75	3.65	50.15	

Kullanılan katkıların sağladıkları su azaltma ve buna koşut olarak dayanım artışı bakımından en çoktan en aza göre sıralanması ML2, ML1, MK ve LB olarak ortaya çıkmıştır. Örneğin, ML2'nin su azaltma oranı en çok %52.21 ve buna karşı gelen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı artışları (% kontrol), sırasıyla, %131.88 ve %82.44 olurken LB'de bu değerler, sırasıyla, %11.84, %65.02 ve %34.41 olmuştur.

Çizelge 3.7'de ortalama basınç dayanım değerleriyle birlikte minimum ve maksimum değerlerle varyasyon katsayıları verilmiştir. Bu değerler, istatistiksel olarak az sayıda (altı) numune üzerinden elde edilmiş olmakla birlikte, farklı günlerde yapılan iki beton dökümünün sonuçları olduğu göz önünde bulundurulduğunda, anlamlıdır. Görüldüğü gibi, %5'i aşmayan varyasyon katsayıları (V), deney sonuçlarının tekrarlanabilir niteliğini ortaya koymaktadır.

Kullanılan AK ve YAKların sağladığı karışım suyundaki azalma ve dayanım artışlarının matematiksel olarak ifade edilebilirliğinin belirlenmesi amacıyla istatistiksel analizler yapılmış, uygun regresyon eğrileri saptanmıştır. Kullanılan dört katkı için logaritmik regresyon sonucunda elde edilen katkı miktarı-su azaltma ilişkileri Şekil 3.23- 3.265'da gösterilmiştir. Aynı şekilde, katkı miktarı- dayanım ilişkileri de Şekil 3.27-3.30'da verilmiştir. Kullanılan katkı miktarıyla karışım suyunda meydana gelen azalma veya dayanımda meydana gelen artış logaritmik bağıntılarla elde edilebilmektedir. Genel olarak bu bağıntı

$$Y = A \ln X + B$$

olarak gösterilebilir. Burada, X: katkı miktarı,

Y: su azalması veya dayanım artışı

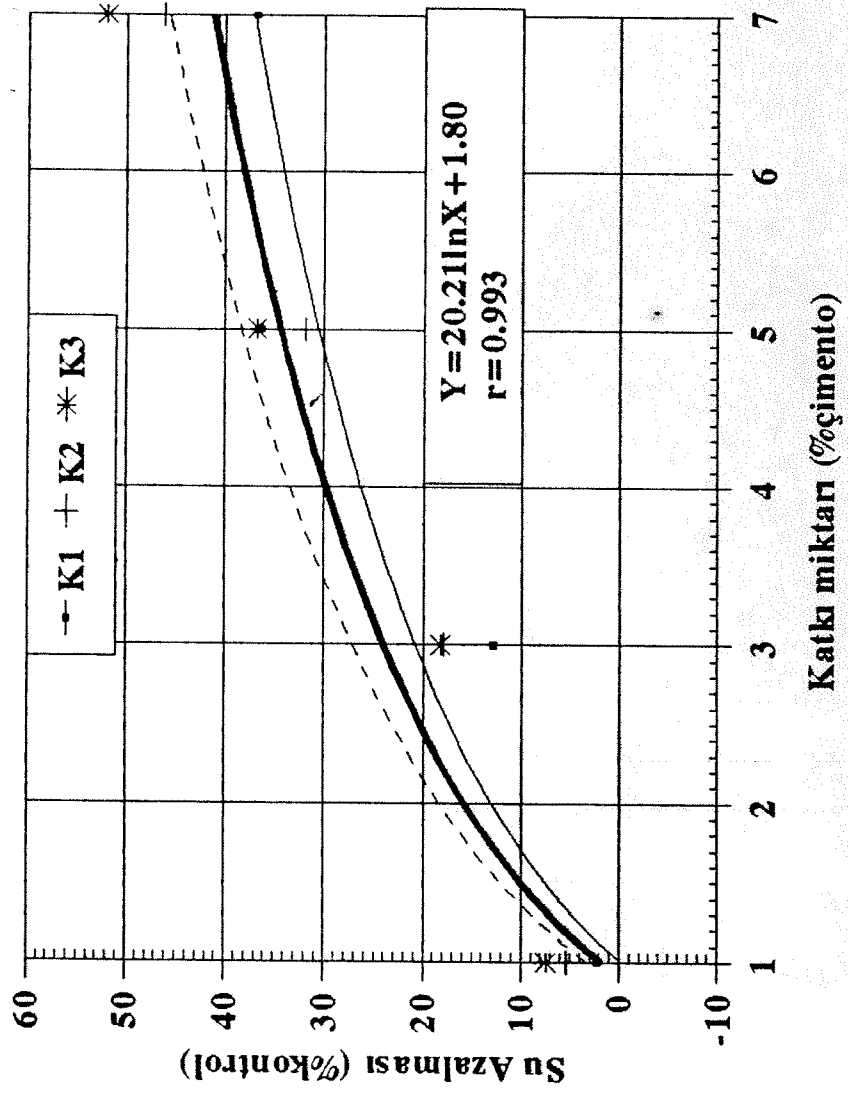
A ve B: katkı tipine bağlı sabitlerdir.

Şekil 3.23 ve 3.24'de ML1 ve ML2 katkıları için katkı miktarı-su azalması ilişkisini ifade eden (3.1) bağıntısının, akışkanlıkları farklı olan üç karışımın (K1, K2 ve K3) ortalaması olarak, oldukça yüksek korelasyon katsayılarıyla (sırasıyla, 0.993 ve 0.968) ifade edilebildiği gösterilmiştir. Aynı etken maddenin farklı konsantrasyonlarda kullanıldığı bu iki katkının davranışları birbirine çok benzemektedir.

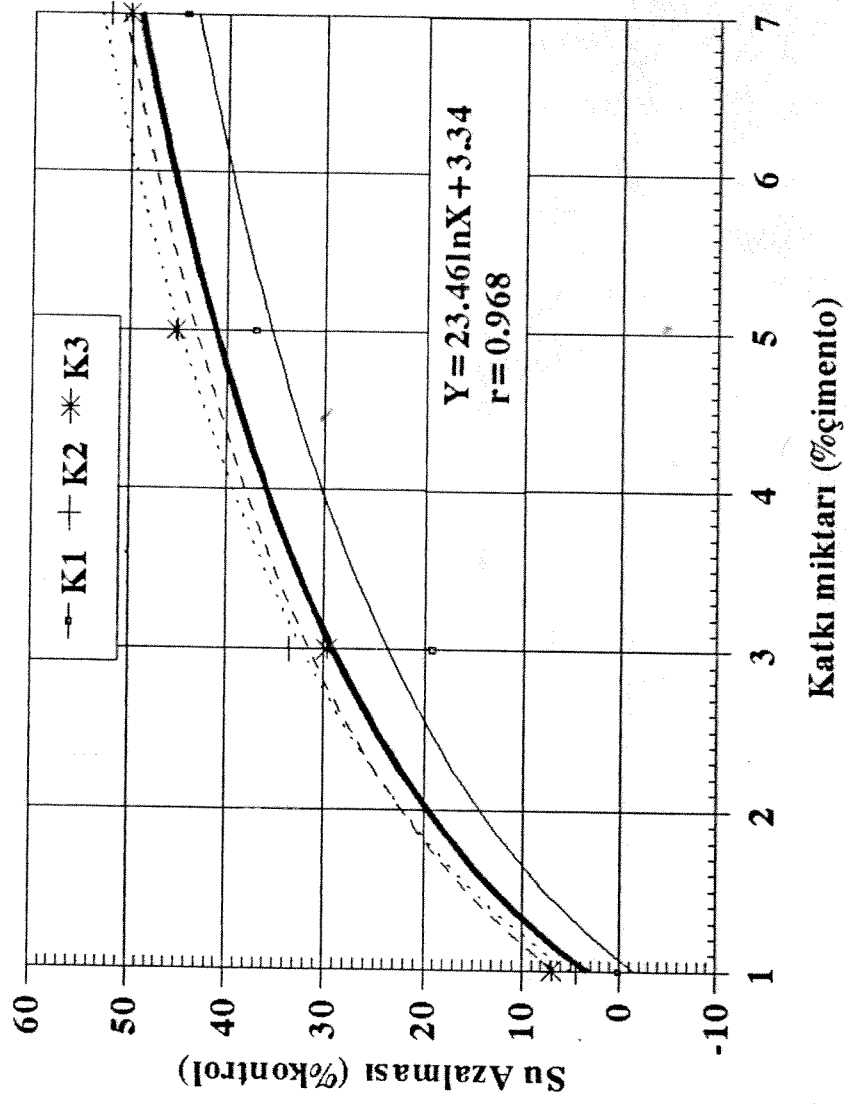
Diğer iki katkının neden olduğu su miktarındaki azalmalar da yine, genel olarak, aynı bağıntıyla verilebilmektedir. Ancak, Şekil 3.25'de de görüldüğü gibi, akışkanlığı yüksek betonlarda naftalin sülfonat esaslı MK katkısının etkisinin, minimum dozda kullanıldığında, daha az akışkan olan betonlardakine göre düşük olduğu, buna karşılık katkı dozajındaki artışla karışım suyunda meydana gelen azalmanın daha hızlı olduğu belirlenmiştir. Lignosülfonat esaslı LB katkısı için ise durum, Şekil 3.26'da görüldüğü gibi, bunun tam tersinedir. Dolayısıyla, Melamin formaldehid esaslı ML1 ve ML2 katkıları için ortalama olarak verilebilen bir tek logaritmik bağıntının varlığı MK ve LB için geçerli değildir. MK katkısı kullanıldığında, düşük (10-20mm) ve orta (50-60mm) çökme değerlerindeki betonlar için, ortalama olarak bir; yüksek (≥ 100 mm) çökme değerlerindeki betonlar içinse bir başka logaritmik bağıntı söz konusudur. LB katkısı kullanıldığında ise orta ve yüksek akışkanlıktaki betonlar için ortalama olarak bir; düşük akışkanlıktaki betonlar için ise bir başka logaritmik bağıntı ortaya çıkmıştır.

Dayanım artışlarında ise, ML1, ML2 ve MK katkılarının miktarları ile 7 ve 28 günlük dayanım artışları paralellik gösterirken (Şekil 3.27, 3.28 ve 3.29) LB katkısında farklı eğimlere sahip iki bağıntı söz konusudur (Şekil 3.30).

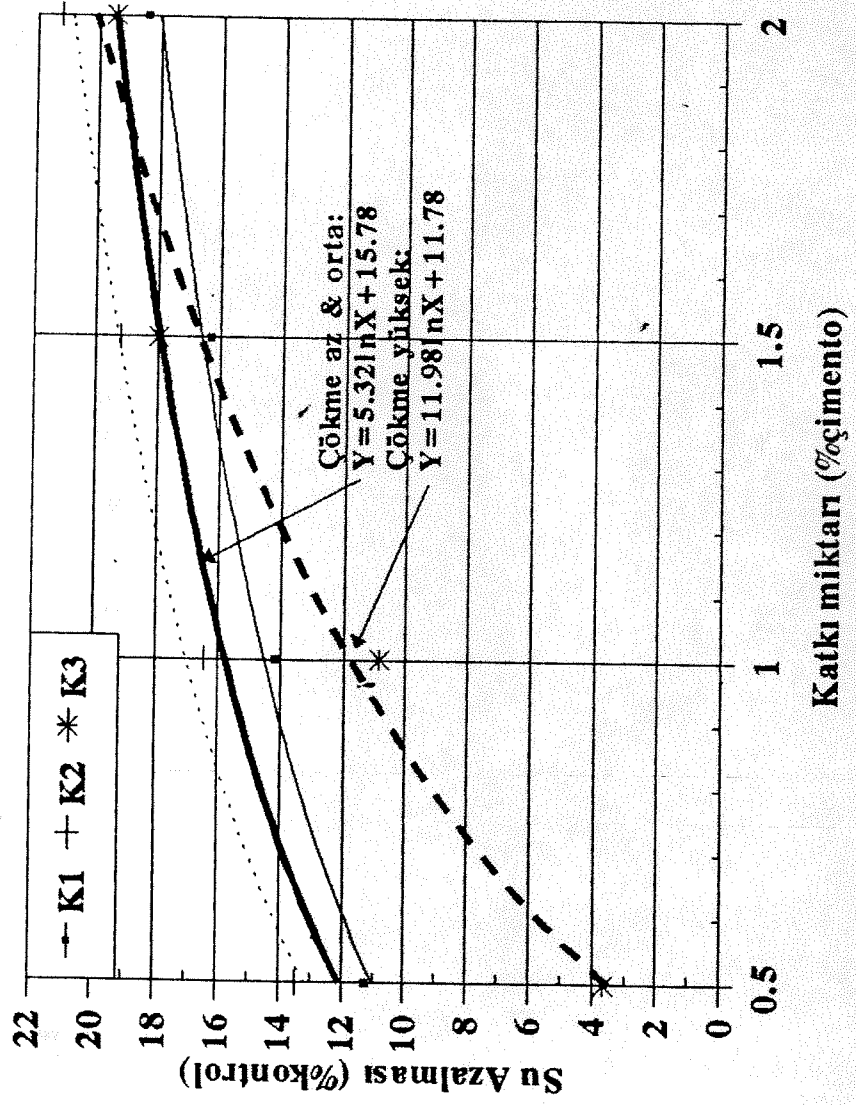
Şekil 3.22 - 3.29'da gösterilmiş olan ilişkilerin geçerliliği Şekil 3.31'de örnek olarak verilen (a) ML1 için K1 karışımında ve (b) ML2 için K2 karışımında deneysel ve hesaplanan su azalması-dayanım artışı karşılaştırmalı grafiklerinde de görülmektedir.



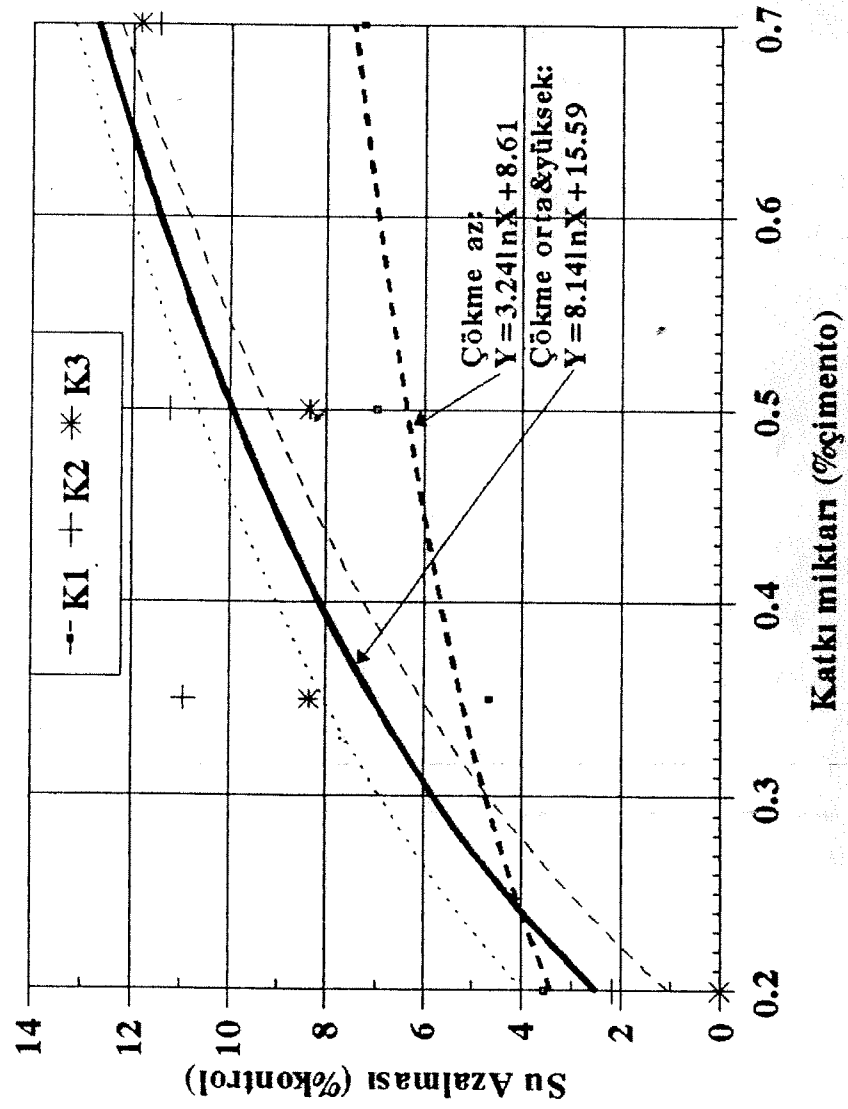
Şekil 3.23. ML1 katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi



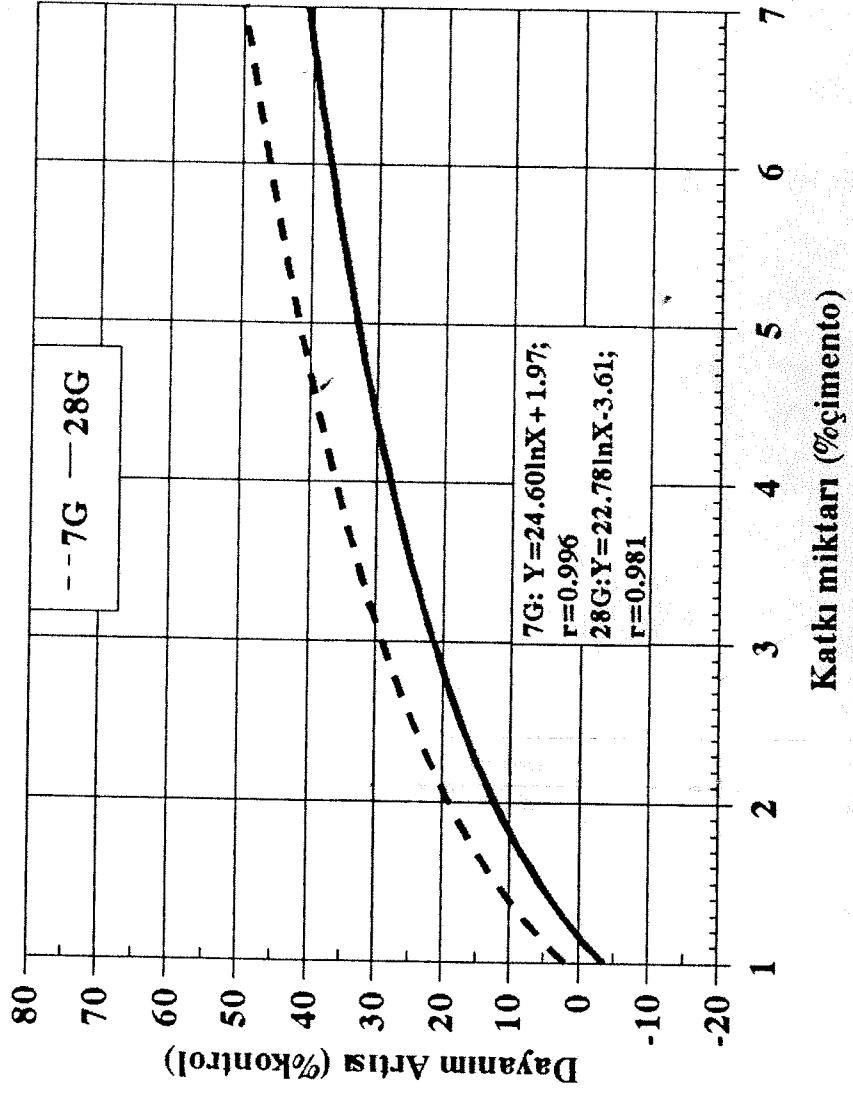
Şekil 3.24. ML2 katkıları için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi



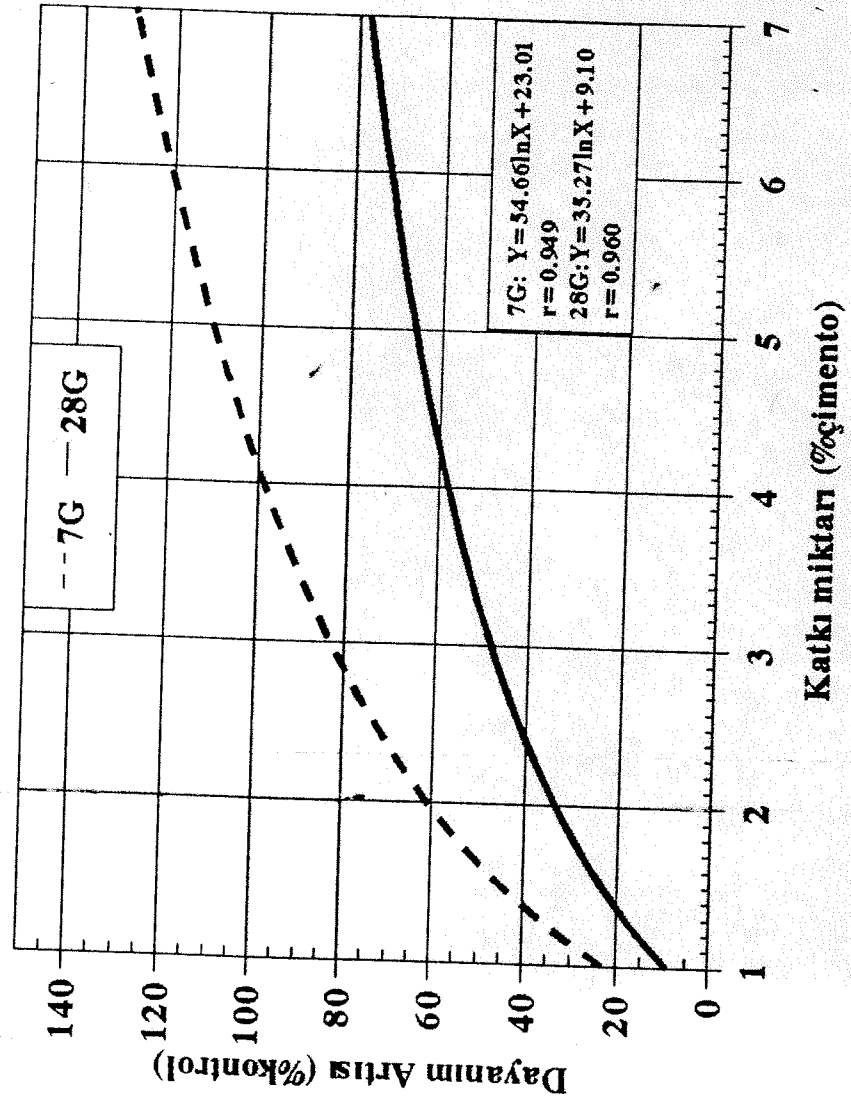
Şekil 3.25. MK katkısı için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi



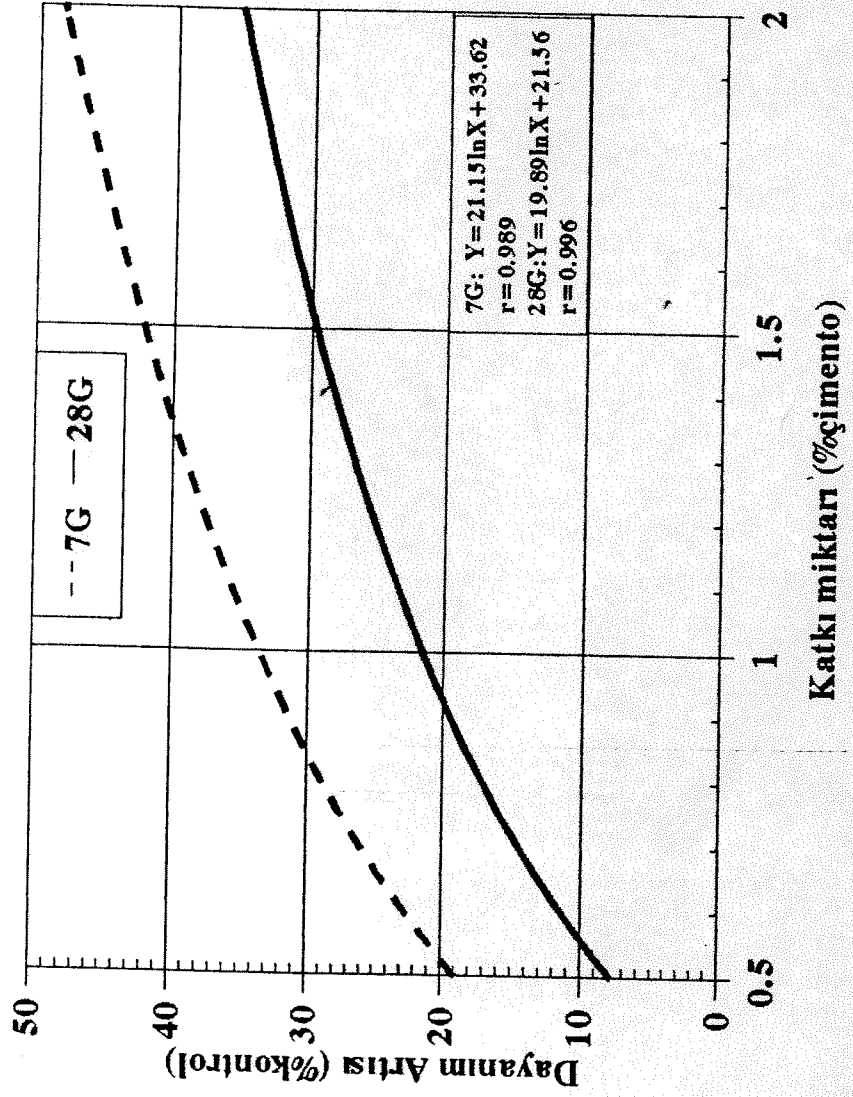
Şekil 3.26. LB katkıları için katkı miktarı-su azalması ilişkisinin logaritmik ifadesi



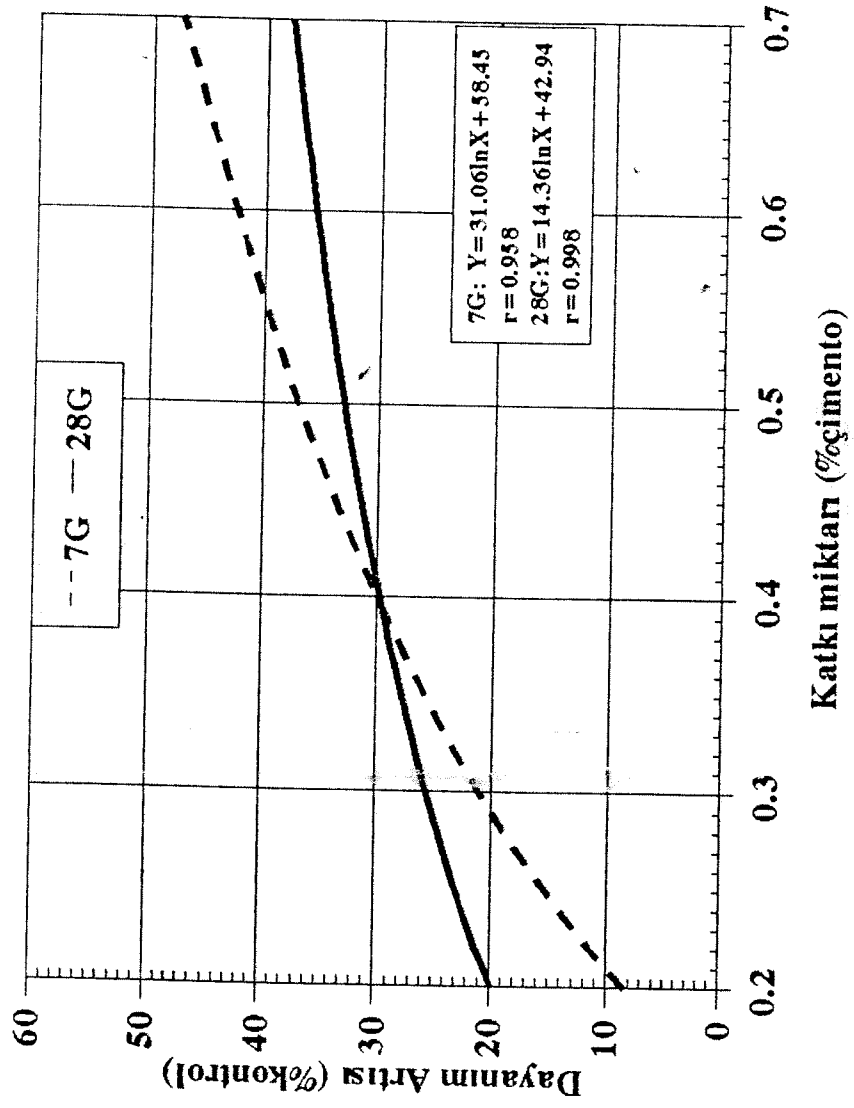
Şekil 3.27. ML1 katkıları için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi



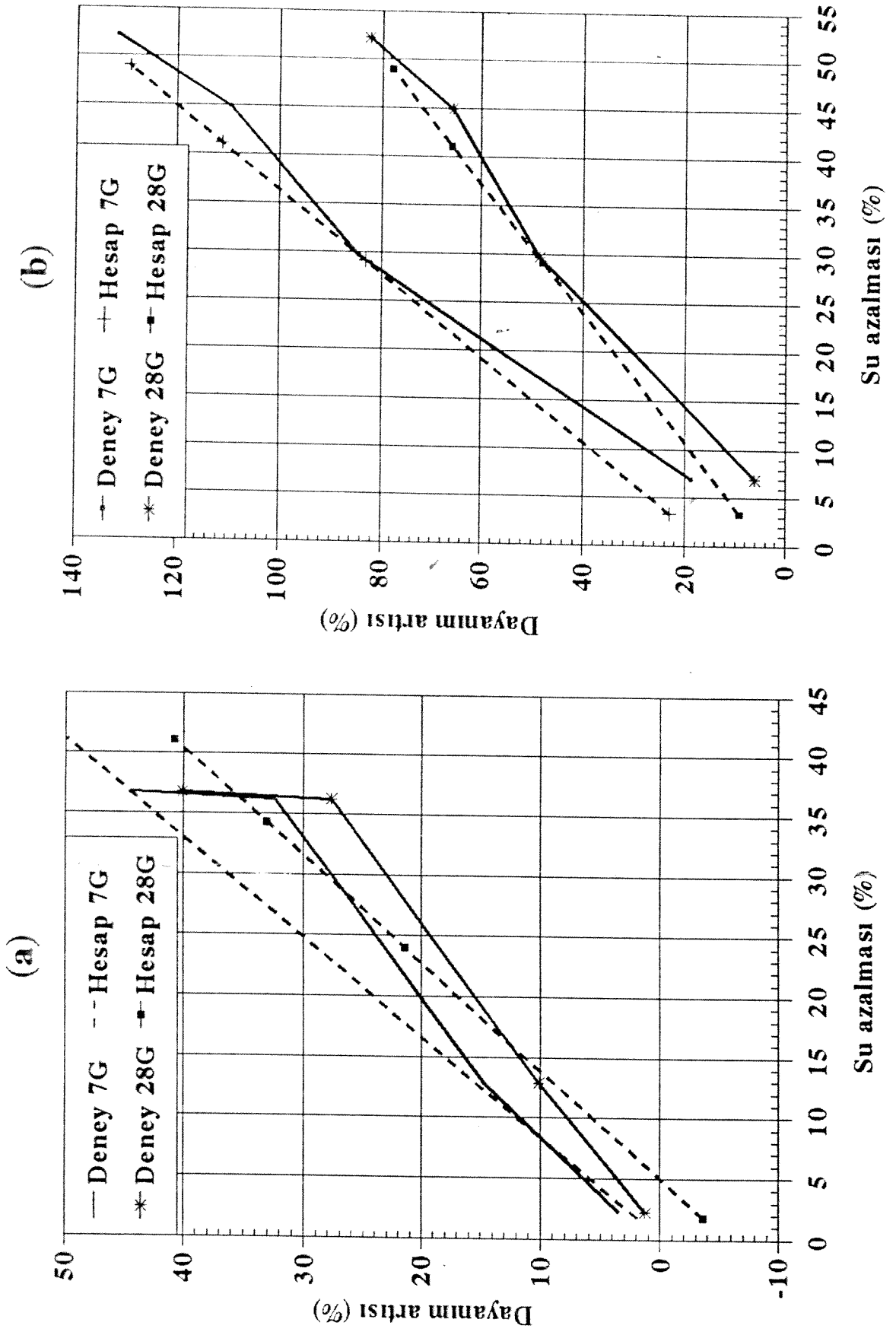
Şekil 3.28. ML2 katkıları için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi



Şekil 3.29. MK katkısı için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi



Şekil 3.30. LB katkıları için katkı miktarı-dayanım ilişkilerinin logaritmik ifadesi



Şekil 3.31. Deneysel ve hesaplanmış su azalması-dayanım artışı ilişkilerinin uyumuna örnek: (a) K1, ML1 ve (b) K2, ML2

4. Mineral Katkı Maddelerinin Etkilerinin Belirlenmesi

4.1. Genel

Uçucu kül ve mikrosilis gibi endüstriyel atıklar YDB üretiminde sıkça kullanılan malzemelerdir. Bunlardan uçucu kül kömüre dayalı termik santrallardan elde edilir. Mikrosilis ise silikon metal, ferrosilikon, ferrokrom-silikon veya kalsiyum silikon alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarından elde edilir. Her iki malzeme de, mineral katkı olarak kullanıldıklarında, betonların hemen tüm özelliklerini etkilerler. YDBlardaki etkilerini iki ana grupta ele almak mümkündür:

- (1) Fiziksel etki: İnce mineral katkı tanecikleri çimentolu sistem içindeki gözenekleri doldurarak daha yoğun bir yapı oluşmasını sağlarlar.
- (2) Kimyasal etki: Çimentonun hidrasyonu ile ortaya çıkan CH'le puzolanik tepkimeye giren bu malzemeler daha fazla çimentolaşabilen malzeme oluşmasına neden olurlar [de Larrard, 1992].

4.2. Uçucu Küllerin Beton Özelliklerine Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi

1914 yılında kömür küllerinin kimyasal kompozisyonlarını inceleyen bir makalede bu malzemenin doğal puzolanlarla olan ilgi çekici benzerliği ortaya konmuştur [Dhir, 1988]. 1930larda düşük kalorili toz kömür yakılarak elektrik enerjisi üretilmeye başlanmasıyla birlikte, bir termik santral atığı olan uçucu küllerin betonda kullanılabilirliğine dair araştırmalar başlamıştır [Davis, et al., 1937]. Yaklaşık altmış yıldır süregelen bu araştırmaların sonuçlarını aşağıdaki şekilde genel olarak ifade etmek mümkündür [Tokyay, 1987].

(a) Karışım Suyu Miktarı: Belirli bir işlenebilirlik için uçucu kül katkılı betonların ihtiyacı olan karışım suyu miktarı uçucu kül içermeyen kontrol betonlarına göre daha azdır. Uçucu kül taneciklerinin küresel yapısı taze betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkiler. Ancak, kullanılan uçucu külün inceliği, karbon miktarı, camsı fazının karakteri, v.b. karışım suyu miktarında meydana gelecek değişiklikleri etkileyen önemli faktörlerdir.

(b) Terleme ve Ayrışma: Uçucu küller, taze betonun kohezyonunu artırarak ayrışmayı, kılcal kanalları tıkamak suretiyle de terlemeyi azaltırlar.

(c) Priz süresi: Uçucu küllerin betonun prizine ve sertleşmesine etkileri kullanılan miktar, kimyasal ve mineralojik kompozisyon, karışım oranları, incelik, v.b. faktörlere bağlı olarak, bir miktar geciktirici ile bir miktar hızlandırıcı nitelik arasında değişebilmektedir.

(d) Hidratasyon Isısı: Düşük kireçli uçucu küller betonun hidratasyon ısısını azaltır. Yüksek kireçli uçucu küllerle ilgili olarak böyle bir genelleme yapmak mümkün değildir. Bazı yüksek kireçli uçucu küller hidratasyon ısısını artırırken bazıları da azaltmaktadır. Söz konusu farklı davranış uçucu küllerin değişik kimyasal ve mineralojik yapılarından kaynaklanmaktadır.

(e) Hidratasyon Ürünleri: Uçucu kül içeren betonların hidratasyon ürünleri ile diğer betonlarınkiler arasında esas itibarıyla fark yoktur. Bir çok araştırmacı uçucu küllerin çimento hidratasyonunu hızlandırdığı konusunda birleşmişlerdir. Ayrıca, puzolanik tepkimeler daha fazla miktarda bağlayıcı özelliğe sahip bileşen meydana gelmesine neden olmaktadır.

(f) Dayanım: Çimento ikame malzemesi olarak kullanıldıklarında, uçucu küller genel olarak erken dayanımların düşmesine yol açarlar. Ancak, uygun beton karışım oranları kullanıldığında bu dezavantajı ortadan kaldırmak mümkündür.

(g) Rötne ve Sünme: Uçucu küllerin betonun karışım suyunda azalmaya ve hidratasyon ısısında düşmeye neden oldukları durumlarda rötrenin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, belirli bir dayanım değerindeki betonlardan uçucu kül içerenlerde sünme daha az olmaktadır.

(h) Dayanıklılık: Betonun dayanıklılığının bir çok boyutu geçirimsizlikle ilgilidir. Uçucu küller, gerek fiziksel gerekse kimyasal olarak geçirimsizliği azalttıklarından, betonun dayanıklılığını olumlu yönde etkilerler.

4.3. Mikrosilisin Beton Özelliklerine Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi

Mikrosilisin betonda kullanımına yönelik ilk araştırmalar 1960larda Norveç'te başlamıştır [Dhir, 1988] O tarihten bu yana elde edilen bilgi birikimi aşağıda özetlenmiştir [Malhotra, et.al.,1992].

(a) Karışım Suyu Miktarı: Çok ince taneli olmasından dolayı (tipik bir portland çimentosundan 20-100 kat daha ince) karışım suyu gereksinmesini artırır. Dolayısıyla, mikrosilis hemen hemen her zaman akışkanlaştırıcı veya yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılır.

(b) Terleme ve Ayrışma: Mikrosilis tanecikleri beton içindeki kılcal kanalları tıkayarak terlemeyi ve daha kohesiv bir beton oluşturarak da ayrışmayı önlerler.

(c) Priz Süresi: Betondaki çimento miktarının yaklaşık %10'u mertebesine kadar mikrosilis kullanımı priz süresinde önemli bir değişiklik meydana getirmemektedir. Ancak, daha fazla miktarlarda kullanıldığında, priz süresini uzatmaktadır. Burada unutulmaması gereken bir husus mikrosilisin etkisinin gerçek boyutunun, hemen hemen her zaman akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılma zorunluluğu nedeniyle, maskelendiğidir.

(d) Hidratasyon Isısı: Mikrosilis toplam hidratasyon ısısını azaltır. Ancak, hidratasyonun erken evrelerinde (ilk bir kaç gün) açığa çıkan ısı mikrosilis içeren betonlarda daha fazla olmaktadır.

(e) Dayanım: Mikrosilis hem puzolanik özeliği hem de dolgu etkisi nedeniyle betonun dayanımını artırır. Ayrıca, akışkanlaştırıcı katkı kullanımının zorunluluğu, bu özelliğin ötesinde, dayanımı artırıcı bir faktördür.

(f) Rötne ve Sünme: Mikrosilis içeren betonlarda rötrenin normal betonlardakinden farklı olmadığı gözlenmiştir. Ancak, bu sonuç mikrosilis ve akışkanlaştırıcının birlikte kullanıldığı durumlar için geçerlidir. Yalnızca mikrosilis kullanılmış olan betonlarda rötne artar. Sünme açısından, mikrosilisi betonlar daha düşük deformasyon göstermektedir [Wolsiefer, 1984].

(g) Dayanıklılık: Dayanıklılık konusunda uçucu küller ile ilgili özellikler daha belirgin ve gelişmiş bir şekilde mikrosiliste de mevcuttur. Hem fiziksel hem de kimyasal olarak dayanıklılık mikrosilis kullanımıyla artmaktadır.

4.4. Deneysel Çalışma

Uçucu kül ve mikrosilisin, mineral katkı olarak kullanıldıklarında, YDBların çeşitli özelliklerine etkilerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerde biri yüksek kireçli (SB) diğeri düşük kireçli (TB) iki uçucu kül ve bir mikrosilis (MS) kullanılmıştır. Bu mineral katkıların özellikleri Çizelge 2.6 ve 2.7'de verilmiştir.

4.4.1. Beton Karışım Oranları

0/3mm kum, 3/7mm ve 7/15mm kırma kireçtaşı agregası, çimentonun ağırlıkça %7'si oranında ML2 yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmak suretiyle 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck28}) 60MPa olacak şekilde mineral katkı içermeyen bir kontrol betonu karışım hesabı yapılmıştır. Daha sonra, her üç mineral katkı çimentonun ağırlıkça %10 ve %20'si oranlarında üç değişik şekilde karışıma ilave edilmiştir.

- Doğrudan çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere,
- Doğrudan ince agreganın bir kısmı yerine ve

(c) Toplam agreganın bir kısmı yerine.

Mineral katkı içeren betonlarda da kullanılan yüksek akışkanlaştırıcı (ML2) miktarı toplam çimento+mineral katkı miktarının %7'si olarak kullanılmıştır. Böylece elde edilen 19 değişik beton karışımının hepsinde çökme değeri 30-50mm arasında tutulmuştur. Bu bölümde kullanılan betonların karışım oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgedeki "a" karışımlarında kontrol betonundaki (K) çimento miktarının %10 ya da %20'si ağırlığında mineral katkı kullanılmış ancak elde edilecek toplam beton hacmini sabit tutabilmek amacıyla, çimentodan eksiltme (çimento yoğunluğu/mineral katkı yoğunluğu) x mineral katkı miktarı oranında yapılmıştır.

"b" karışımlarında ince agrega miktarı "c" karışımlarında ise tüm agregadan, kullanılan üç boyun miktarları oranında, azaltma yapılmıştır. Her iki durumda da toplam beton hacminde, kontrol betonuna göre bir farklılık olmaması için agrega-mineral katkı yoğunluk oranları göz önünde bulundurulmuştur.

Böylece hazırlanan beton karışımlarının taze haldeki özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çizelgedeki her bir değer iki deneyin ortalamasıdır.

Çizelge 4.1. Mineral Katkıların Etkilerinin Belirlenmesi Deneylerinde Kullanılan Betonların Karışım Oranları (kg/m³).

Karışım	Çimento	0/3 kum (DYK)	3/7 k.taş (DYK)	7/15k.taş (DYK)	mineral katkı	kimyasal katkı	Su (net)
K	550	645	370	830	-	38.5	140
10SB-a	480	645	370	830	55	37.5	144
10SB-b	550	590	370	830	55	42.4	144
10SB-c	550	625	360	805	55	42.4	146
20SB-a	410	645	370	830	110	36.4	144
20SB-b	550	535	370	830	110	46.2	144
20SB-c	550	605	347	777	110	46.2	150
10TB-a	470	645	370	830	55	36.8	133
10TB-b	550	577	370	830	55	42.4	150
10TB-c	550	620	356	798	55	42.4	159
20TB-a	390	645	370	830	110	35.0	150
20TB-b	550	510	370	830	110	46.2	154
20TB-c	550	595	341	766	110	46.2	162
10MS-a	480	645	370	830	55	37.5	129
10MS-b	550	587	370	830	55	42.4	122
10MS-c	550	623	358	802	55	42.4	126
20MS-a	411	645	370	830	110	36.5	110
20MS-b	550	528	370	830	110	46.2	100
20MS-c	550	602	345	774	110	46.2	104

4.4.2. Yapılan Deneyler

Çizelge 4.1'de malzeme miktarları verilmiş olan ondokuz karışımdan hazırlanan standart silindir numuneler deney zamanına kadar 22±2°C ve %95 BN ortamında tutulmuşlardır. Basınç dayanımı deneyleri 3, 7, 14, 28 ve 90 gün yaşlarında TS 3114 "Beton Basınç Dayanımı Deney Metodu" standardına; statik elastisite modülü ve Poisson oranı deneyleri ise ASTM C469 "Test for Static Moduli of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression" standardında belirtilen yöntemle uygun olarak yapılmıştır. Ayrıca ASTM C517 "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete" e uygun olarak dinamik elastisite modülleri de bulunmuştur. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı deneyleri 7, 28 ve 90 gün yaşlarında yapılmıştır. Bütün deneylerde her yaş için üçer numune kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. Kullanılan Betonların Taze Haldeki Özellikleri

Karışım	S/(Ç+MK) (net)	S/Ç (net)	Çökme (mm)	Birim Ağ. (kg/m ³)	Hava miktarı (%)
K	-	0.255	40	2414	1.3
10SB-a	0.269	0.300	45	2400	1.4
10SB-b	0.238	0.262	40	2414	1.4
10SB-c	0.241	0.265	40	2414	1.3
20SB-a	0.277	0.351	35	2343	1.6
20SB-b	0.218	0.262	50	2300	1.5
20SB-c	0.227	0.273	30	2371	1.6
10TB-a	0.253	0.283	35	2400	1.6
10TB-b	0.248	0.273	40	2400	1.6
10TB-c	0.263	0.289	45	2393	1.6
20TB-a	0.300	0.385	35	2379	1.5
20TB-b	0.233	0.280	40	2393	1.6
20TB-c	0.245	0.295	45	2379	1.6
10MS-a	0.241	0.269	50	2443	1.3
10MS-b	0.202	0.222	50	2429	1.5
10MS-c	0.208	0.229	45	2443	1.4
20MS-a	0.211	0.268	35	2429	1.2
20MS-b	0.152	0.181	40	2429	1.4
20MS-c	0.158	0.189	50	2443	1.6

Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı tesbiti için yapılan deneylerde yükleme hızı ~ 250KPa/s olarak tutulmuş ve numune üzerine yerleştirilmiş iki düşey deformasyon ölçer ve iki yanar deformasyon ölçerden okumalar alınmıştır. Daha sonra aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$E = (S_1 - S_2) / (\epsilon_2 - 0.0005)$$

$$\mu = (\alpha_2 - \alpha_1) / (\epsilon_2 - 0.0005)$$

Burada, E: Statik Elastisite Modülü

μ : Poisson Oranı

S₂: Statik basınç dayanımının %40'ına tekabül eden gerilme

S₁: 0.0005 gerinime tekabül eden gerilme

ϵ_2 : S₂'ye tekabül eden gerinim

α_2 : S₂'ye tekabül eden yanar gerinim

α_1 : S₁'e tekabül eden yanar gerinim'dir.

Dinamik Elastisite Modülü deneylerinde ultrasonik deney aleti kullanılarak silindir numunelerin bir ucundan diğerine gönderilen ultrasonik dalganın hızı belirlenmiş ve

$$E = \frac{V^2 D}{g}$$

kullanılarak Elastisite Modülü hesaplanmıştır.

Burada, V: ultrasonik dalganın hızı (m/s)

D: numunenin birim ağırlığı (kg/m³)

g: yerçekimi ivmesi (m/s²)'dir.

4.4.3. Deney Sonuçları

Araştırmanın bu aşamasında yapılmış olan deneylerden elde edilen basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.3'de, Elastisite Modülü ve Poisson Oranı sonuçları ise Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım	σ_3 (MPa)	σ_7 (MPa)	σ_{14} (MPa)	σ_{28} (MPa)	σ_{90} (MPa)
K	25.8	40.8	51.1	60.8	64.4
10SB-a	29.2	46.1	57.2	64.1	70.2
10SB-b	33.0	45.8	53.4	62.3	70.5
10SB-c	33.7	45.7	48.7	62.4	69.8
20SB-a	21.3	32.4	35.2	55.1	61.4
20SB-b	20.7	42.1	47.5	61.2	73.1
20SB-c	29.5	40.9	48.7	60.8	70.9
10TB-a	25.5	39.7	47.4	61.2	69.6
10TB-b	31.7	45.5	47.2	59.1	71.6
10TB-c	26.8	37.1	43.8	53.3	58.4
20TB-a	19.5	31.1	42.1	45.8	56.9
20TB-b	30.4	43.7	49.5	51.4	71.2
20TB-c	27.7	38.4	40.8	48.3	65.4
10MS-a	34.0	42.4	52.0	60.7	73.5
10MS-b	37.5	46.7	58.2	63.5	72.4
10MS-c	42.3	51.4	61.0	70.1	73.7
20MS-a	25.1	38.2	51.3	65.5	71.9
20MS-b	42.7	49.2	57.8	70.7	74.6
20MS-c	44.4	45.0	57.2	65.3	73.5

Çizelge 4.4. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Değerleri

Karışım	Est7 (GPa)	Edn7 (GPa)	ν_7	Est28 (GPa)	Edn28 (GPa)	ν_{28}	Est90 (GPa)	Edn90 (GPa)	ν_{90}
K	30.23	36.84	0.23	39.35	44.68	0.19	42.98	46.95	0.18
10SB-a	28.64	33.12	0.24	34.57	41.86	0.20	40.53	44.62	0.19
10SB-b	32.97	40.52	0.23	38.42	44.94	0.19	46.47	48.37	0.19
10SB-c	31.87	38.69	0.23	38.78	44.22	0.19	44.28	47.64	0.19
20SB-a	26.17	32.63	0.22	34.76	41.08	0.21	41.93	45.44	0.18
20SB-b	30.25	37.40	0.21	38.25	44.80	0.18	45.21	47.68	0.17
20SB-c	30.54	37.26	0.21	36.35	42.82	0.19	45.73	48.19	0.17
10TB-a	28.92	36.33	0.22	37.48	44.75	0.18	44.92	47.85	0.17
10TB-b	31.42	39.04	0.21	37.18	43.93	0.18	45.75	50.07	0.17
10TB-c	28.31	35.48	0.23	33.86	39.50	0.18	39.88	47.67	0.16
20TB-a	26.33	33.26	0.24	31.45	37.67	0.19	39.02	46.95	0.17
20TB-b	31.59	38.47	0.22	31.88	38.25	0.19	45.35	49.67	0.17
20TB-c	29.54	36.83	0.23	31.09	37.43	0.20	43.39	47.25	0.18
10MS-a	30.16	37.73	0.23	39.32	46.20	0.18	45.73	49.63	0.16
10MS-b	32.05	39.64	0.22	40.29	46.77	0.18	46.01	50.17	0.16
10MS-c	35.18	42.34	0.21	43.72	48.63	0.17	45.68	50.25	0.16
20MS-a	29.35	37.08	0.23	41.75	46.77	0.18	46.34	50.50	0.16
20MS-b	33.28	40.24	0.21	42.63	48.97	0.18	46.73	50.03	0.17
20MS-c	31.29	38.32	0.23	41.08	47.03	0.17	45.87	50.33	0.16

4.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

Çizelge 4.2'de verilen sonuçlara bakıldığında, mineral katkı kullanıldığında (bu araştırmada uçucu kül ve mikrosilis) taze betonların birim ağırlığında, kontrol betonuna göre, önemli farklılıklar çıkmadığı görülmektedir. Ancak, mikrosilisin diğer iki mineral katkıya oranla bir miktar daha yoğun beton elde edilmesine neden olduğunu söylemek mümkündür. Taze betondaki sıkıştırılmış hava miktarlarına bakıldığında ise kullanılan mineral katkıların bariz bir etkisi olmadığı görülmektedir.

4.5.1. Karışım Suyu ve Dayanımlar

Öte yandan, yine aynı çizelgede verilmiş olan su-çimento oranı değerleri ele alındığında, kullanılan her iki uçucu külün YDBların su gereksinmesine olan etkilerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Gerek yüksek kireçli SB gerekse düşük kireçli TB, her üç kullanım tarzında da, kontrol betonuna göre, su gereksinmesinin artmasına neden olmuşlardır. Artışın en belirgin olduğu karışımlar mineral katkıların doğrudan çimentonun bir kısmını ikame ettiği "a" karışımları olarak ortaya çıkmıştır. Bu karışımlarda su gereksinmesindeki artışın kullanılan uçucu kül miktarıyla orantılı olduğu gözlenmiştir. Kullanılan çimentoyla hemen hemen aynı inceliğe sahip olan uçucu küllerin bu etkisine karşın, çok daha ince olan mikrosilisin etkisi daha ilginçtir. MS de "a" karışımlarında su gereksinmesini artırmıştır. Ancak, örneğin "20-a" karışımlarında SB ve TB uçucu külleri, sırasıyla, %37.6 ve %50.98 su artışına neden olurken, MS yalnızca %5.1'lik bir artış meydana getirmiştir. Ayrıca, Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3 kıyaslandığında görüleceği gibi, MS diğer iki kullanım biçiminde su gereksinmesini azaltırken uçucu küller artırmıştır. Burada unutulmaması gereken husus, tüm betonların YAK kimyasal katkı içerdiğiidir.

Mineral katkıların karışım suyu miktarında ve dolayısıyla s/ç ya da s/(ç+mk) oranlarında meydana getirdiği değişiklikleri elde edilen basınç dayanımı değerleriyle ilişkilendirmek mümkün olmamıştır. Çizelge 4.3'de verilen basınç dayanımı değerleri grafiksel olarak yorumlandığında (Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6) mikrosilisin diğer iki mineral katkıya oranla çok daha etkin olduğu görülmektedir. Bu etkinlik özellikle erken yaşlarda kendisini daha fazla belli etmiştir. Örneğin, 3 günlük dayanım değerlerine bakıldığında, MS ile %72'ye varan dayanım artışları elde edilirken, SB ve TB kullanımıyla elde edilen maksimum artışlar, sırasıyla, ancak %30.6 ve %22.9 olmuştur. Ayrıca, uçucu küllerin gerek kullanım biçimleri ve gerekse miktarları ile elde edilen dayanımlar arasında açık bir bağıntı kurulamazken, mikrosilisin etkisinin, araştırmada ele alınan her koşul için, benzer nitelikte olduğu gözlenmiştir.

4.5.2. Elastisite Modülü

Yukarda dayanım için yapılmış olan açıklamalar mineral katkılı YDBların Elastisite Modülleri için de geçerlidir. Bunun yanısıra, bu betonlar üzerinde yapılan dayanım, statik elastisite modülü ve dinamik elastisite modülü deneylerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilmiş, bu özellikler arasında bazı bağıntılar elde edilmeye çalışılmış ve bu bağıntılar literatürdeki benzerleriyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.7'de gösterilmiş olan basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi, mineral katkılı YDBlar için

$$E = 2.16f_c^{0.705}$$

olarak saptanmıştır. Deneysel olarak bulunan bu bağıntıda korelasyon katsayısı, $r=0.97$ çıkmıştır. Öte yandan, Dhir [*16] uçucu kül katkılı ve mineral katkı içermeyen betonlar için (4.1)'e benzer bir bağıntı vermektedir.

$$E = 3.18\sqrt{f_c}$$

Ayrıca, CEB tarafından betonun elastisite modülünün hesaplanması için önerilen [Mindess ve Young, 1981]

$$E = 9.5(f_c + 8)^{1/3}$$

bağıntısının bu araştırmada bulunanla uyumluluğu Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Ultrasonik yöntemle (ASTM C 517'ye göre) bulunan dinamik elastisite modülleri ile statik elastisite modülleri (ASTM C 469) arasındaki ilişki 0.97'lik bir korelasyon katsayısıyla, Şekil 4.9'da görüldüğü gibi,

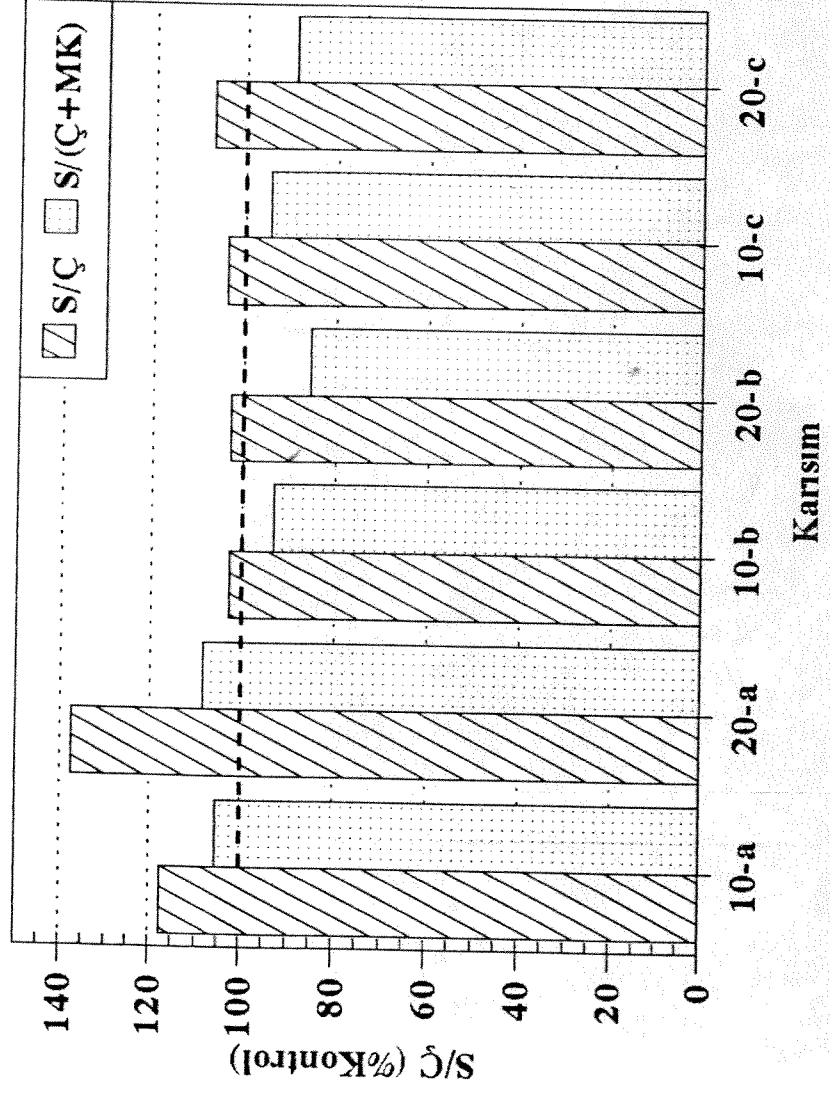
$$E_{st} = 1.21E_{dn} - 14.7$$

olarak belirlenmiştir. Bu araştırmada bulunan Est-Edn ilişkisi BS Code of Practice 110 "The Structural Use of Concrete" [Mindess ve Young, 1981] de verilen

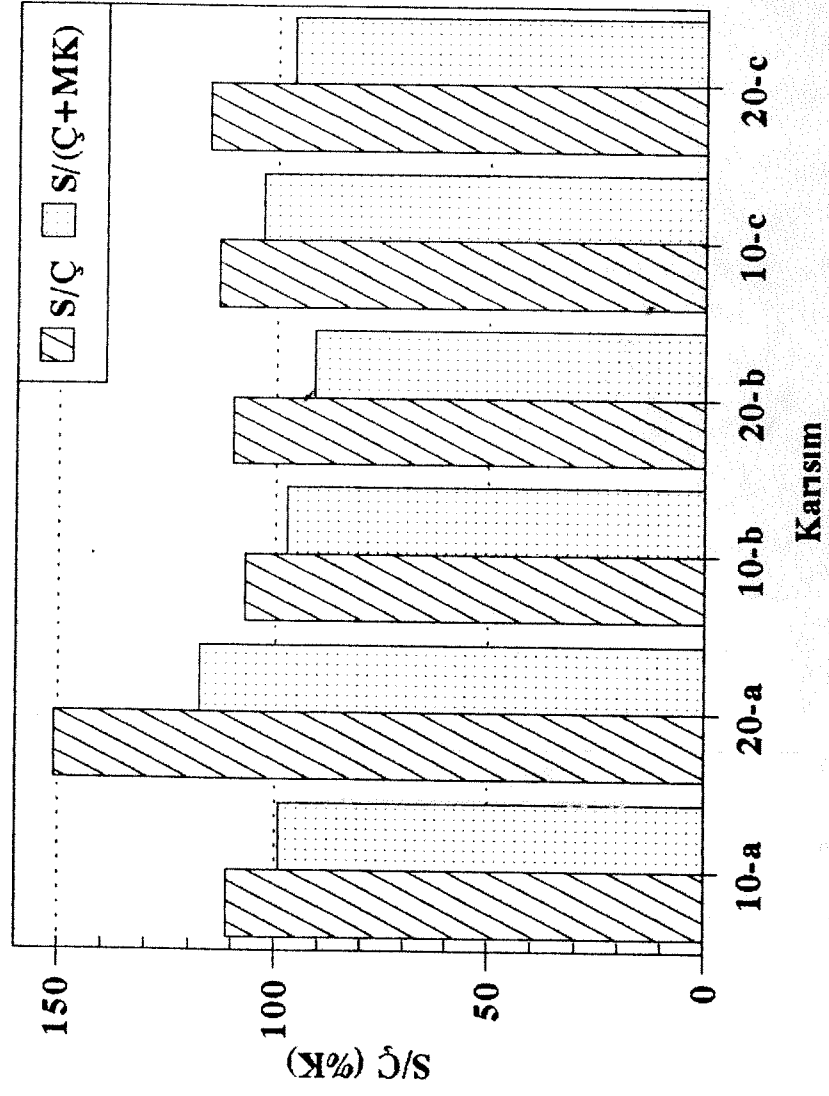
$$E_{st} = 1.25E_{dn} - 19$$

bağıntısına çok benzemektedir.

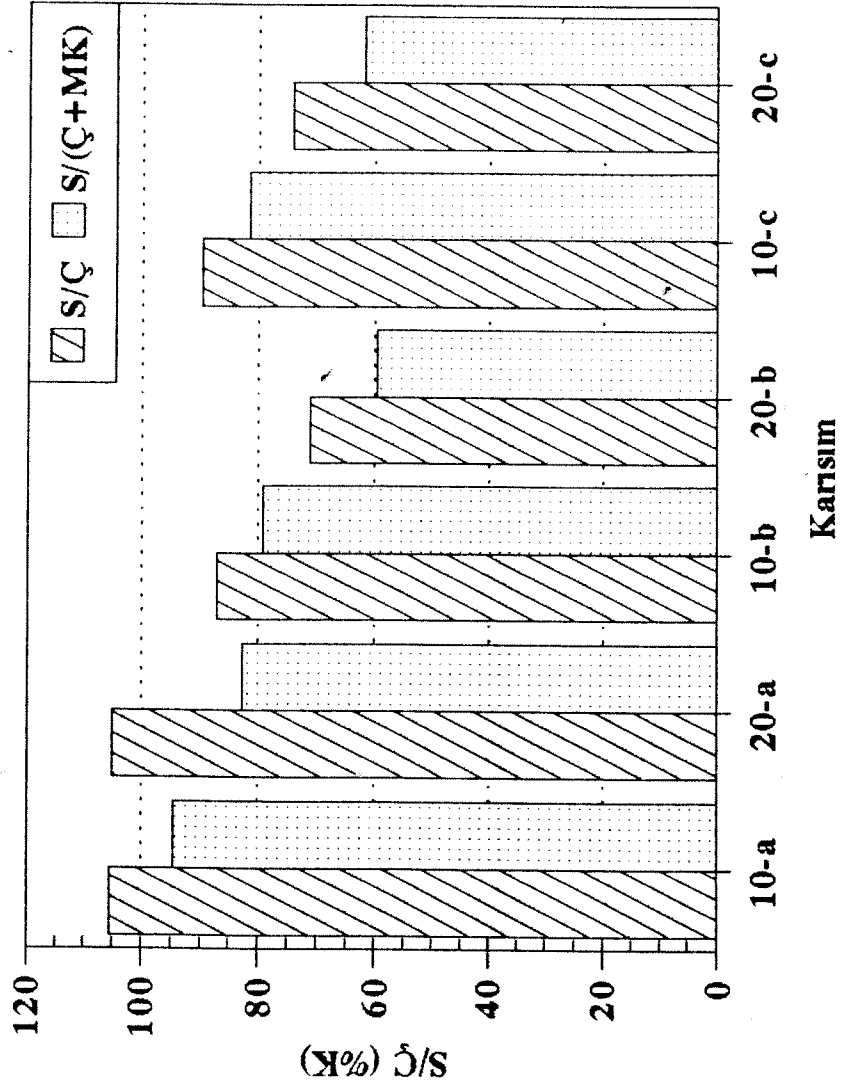
Yukarıda belirtilen benzerlikler göz önüne alındığında, mineral katkılı YDB'ların elastisite modüllerinin tahmininde literatürde mevcut denklemlerin kullanılabilceği anlaşılmaktadır.



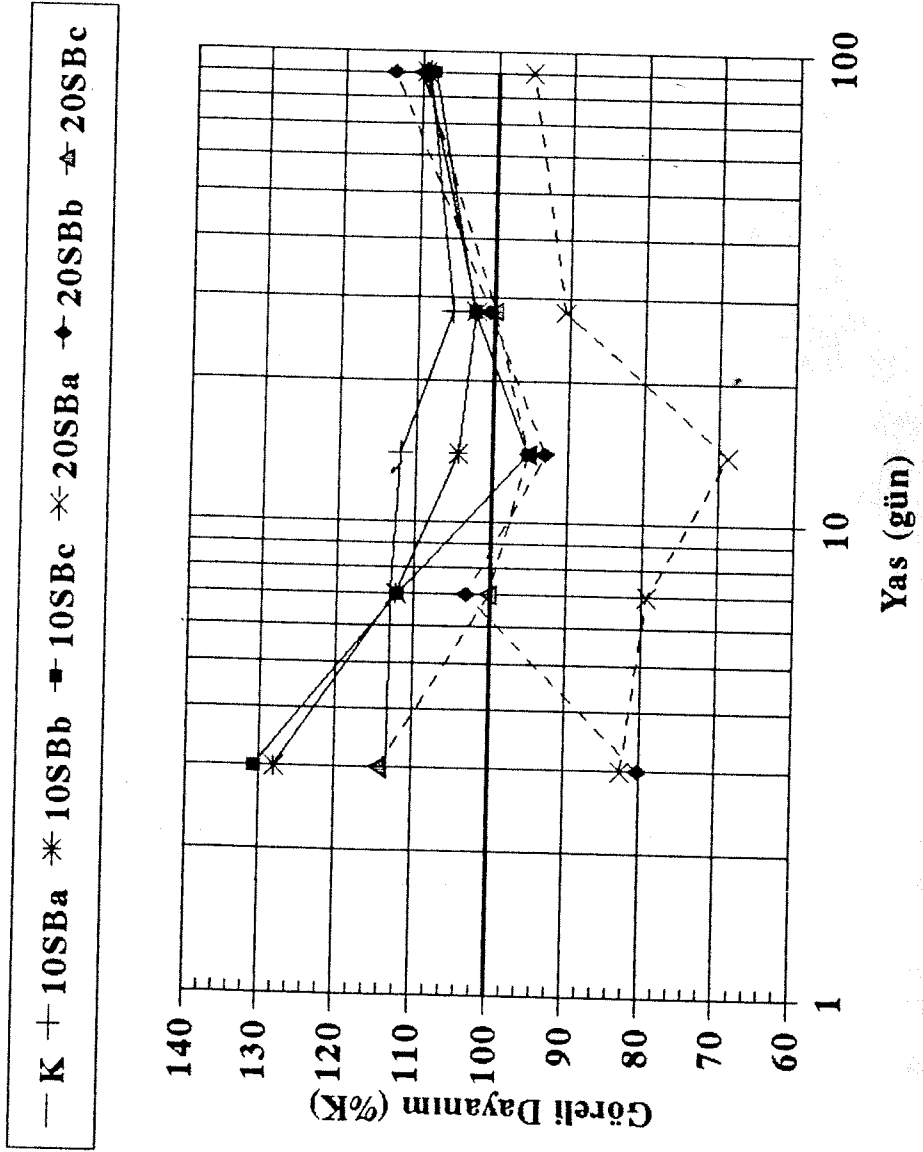
Şekil 4.1. SB'nin su-çimento oranına etkisi



Şekil 4.2. TB'nin su-çimento oranına etkisi

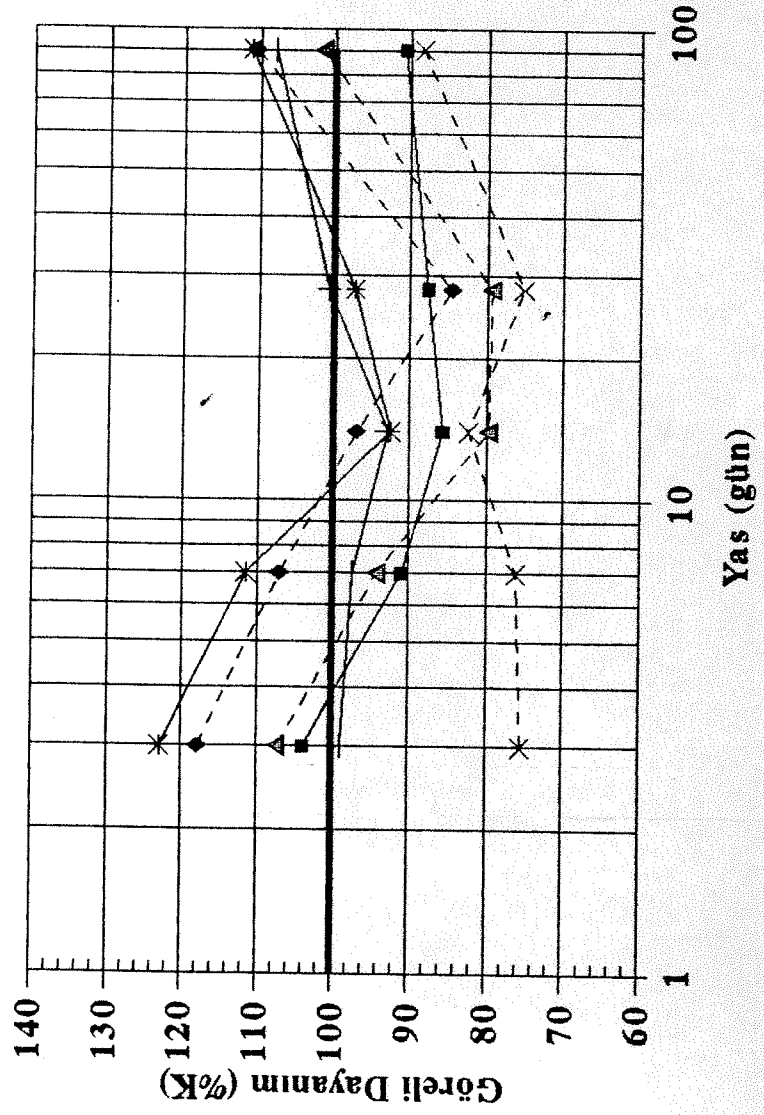


Şekil 4.3. MS'nin su-çimento oranına etkisi



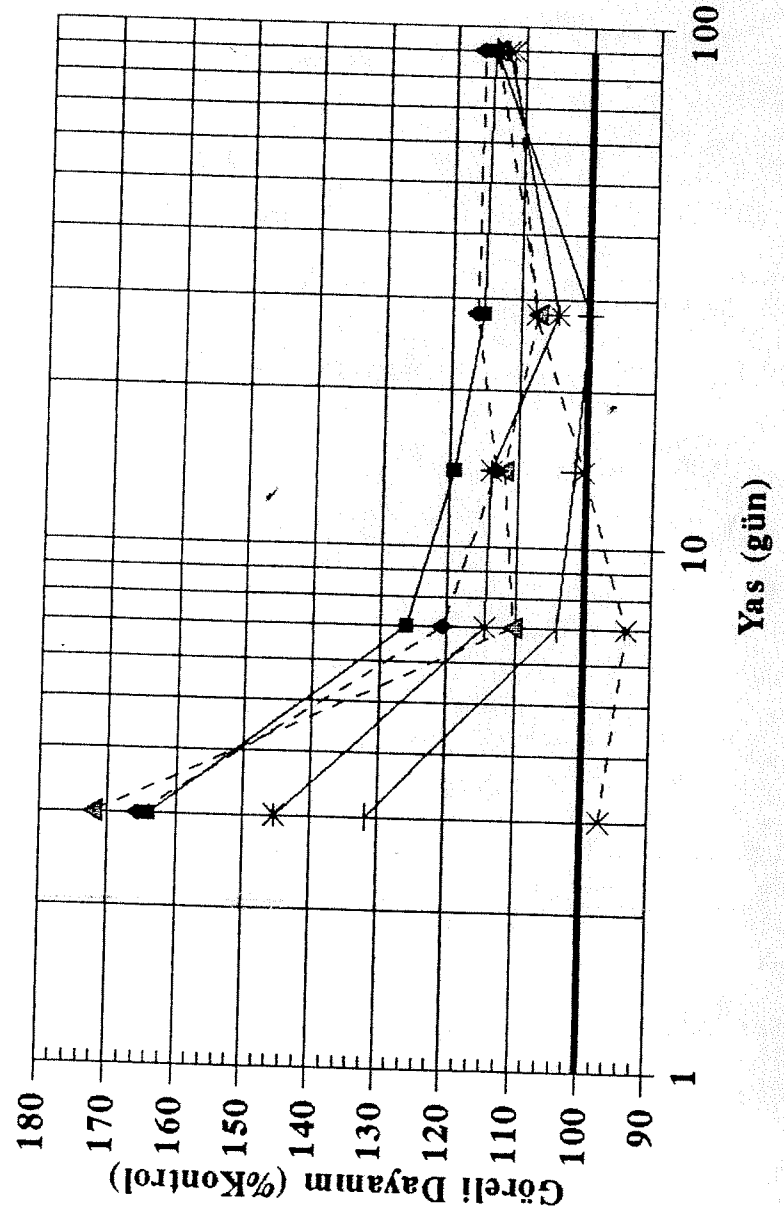
Şekil 4.4. SB'nin YDBlerin basınç dayanımlarına etkisi

— K + 10TBa * 10TBb -■- 10TBc * 20TBa ◆ 20TBb ▲ 20TBc



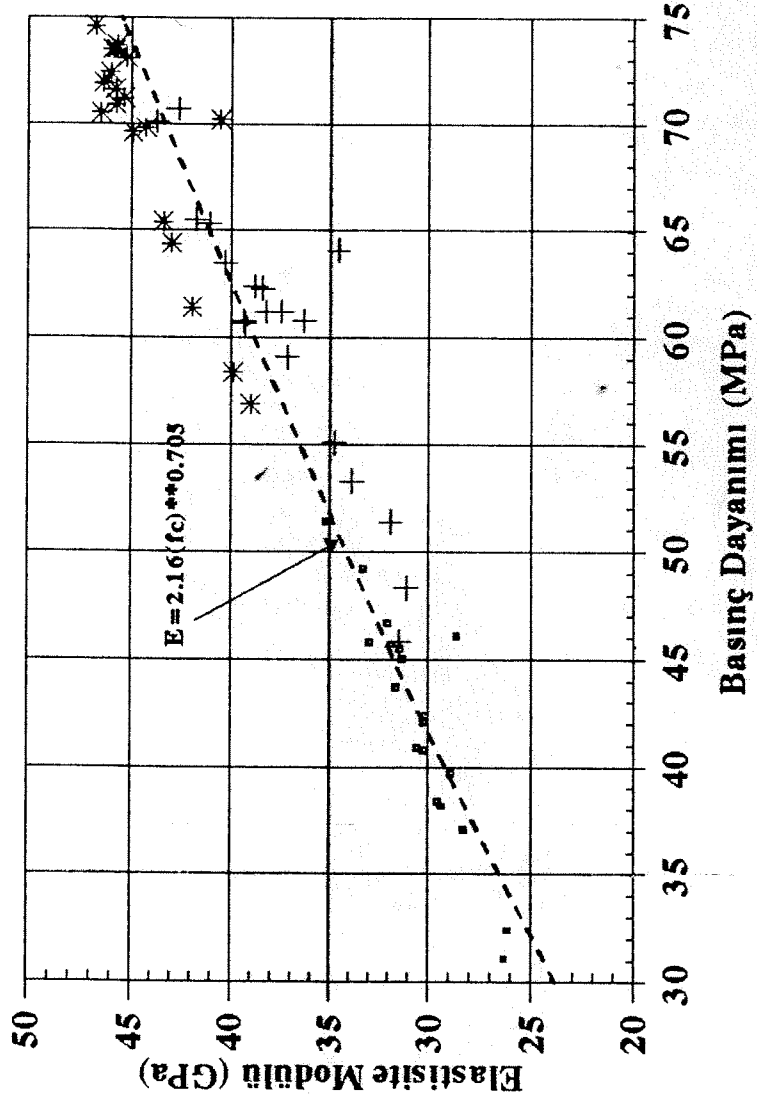
Sekil 4.5. TB'nin YDBIların basıncı dayanımlarına etkisi

+ 10MSa * 10MSb ■ 10MSc × 20MSa ◆ 20MSb ▲ 20MSc

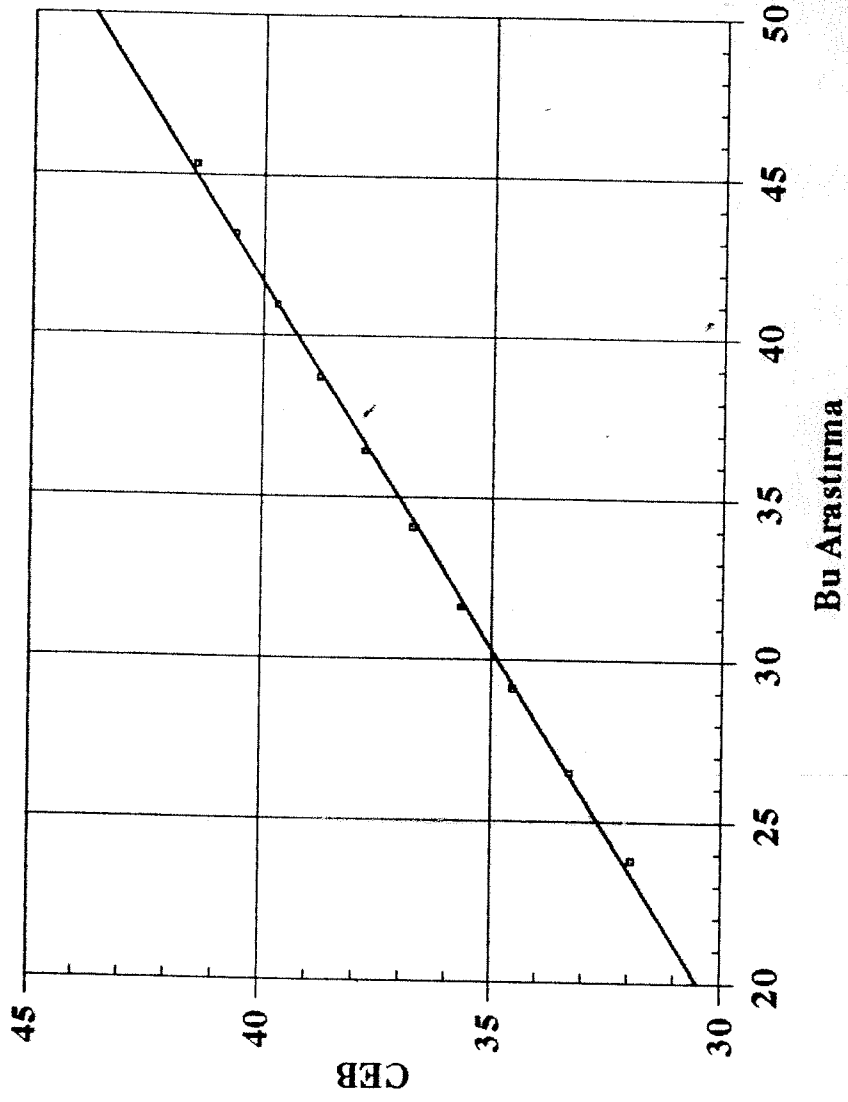


Şekil 4.6. MS'nin YDBIların basınç dayanımlarına etkisi

• 7G + 28G * 90G

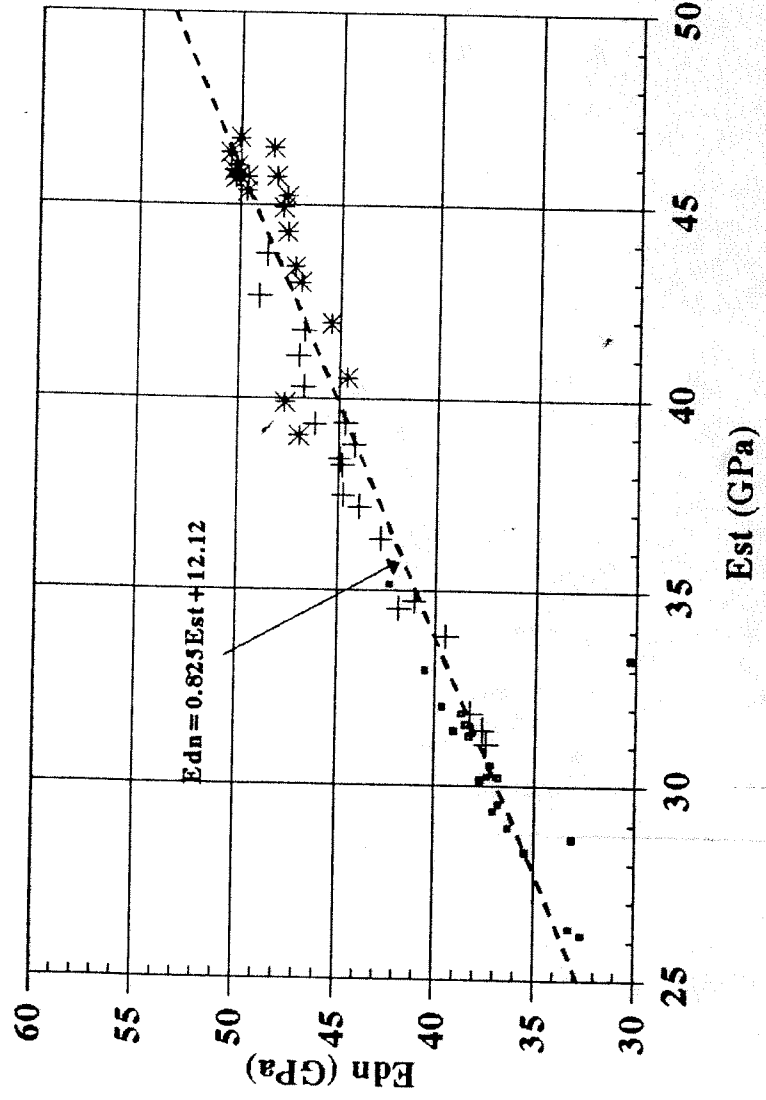


Şekil 4.7. Mineral katkıli YDBlerde basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi



Şekil 4.8. Bu araştırmada bulunan, mineral katkılı YDBlerde basınç dayanımı-Elastisite Modülü ilişkisinin CEB tarafından önerilenle karşılaştırılması

• 7G + 28G * 90G



Şekil 4.9. Mineral katkıli YDBIlerde dinamik ve statik Elastisite Modülleri arasındaki ilişki

5. Agregada Özelliklerinin Etkilerinin Belirlenmesi

5.1. Giriş

Betonun hacimce yaklaşık %60-80'ini oluşturan agregaların nitelikleri taze ve sertleşmiş haldeki betonların bir çok özelliklerini etkiler. Beton kalitesiyle agrega arasındaki ilişkiler agreganın mineralojisi, tane dağılımı, tane boyutu ve şekli, agrega reaktivitesi gibi bir çok özellik nedeniyle önem taşımaktadır.

Normal dayanımlı betonlarda ($\sigma_c < 40\text{MPa}$) normal kaba agreganın özellikleri genellikle betonun dayanımını etkileyici önemli bir faktör değildir. Bu betonların su-çimento oranları 0.4-0.7 arasındadır. Dolayısıyla, normal dayanımlı betonlarda dayanım sertleşmiş çimento hamurunun matriks-agrega arayüzeyindeki aderansın dayanımları tarafından kontrol edilir. Oysa, YDBlarda daha yüksek kaliteli çimentolar, su azaltıcı kimyasal katkılar ve düşük su-çimento oranları kullanılması nedeniyle çok kuvvetli matriks elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu nedenle, agregalar ve özellikle kaba agrega, YDBlarda dayanımı sınırlayıcı bir faktör durumuna gelmektedir [Gjörv, 1992].

YDBların, agrega özellikleri bakımından irdelendiği araştırmaların sayısı oldukça azdır [Sarkar ve Aitcin, 1989; Aitcin ve Mehta, 1990; Gioccio, 1992; Baalbaki, 1991]. Araştırmanın bu bölümünde kırma kireçtaşı, diabloz ve granit ve doğal dere çakılının YDBların çeşitli mekanik özelliklerine olan etkileri ve bunlardan kireçtaşı ile dere agregasının maksimum tane boyutlarının (D_{maks}) basınç dayanımına etkileri belirlenmiştir.

5.2. Agregada Özelliklerinin Betonun Etkileri Konusundaki Mevcut Bilgi Birikimi

YDB konusunda yazılmış olan tüm geniş kapsamlı raporlarda agrega konusunda uyulması gereken koşullar için ilgili ulusal ve uluslararası standart sınırları önerilmektedir. Ancak, aşağıda sözü edilen bazı hususların da göz önünde bulundurulması gerekmektedir:

YDBlarda optimum agrega gradasyonu, karışımın yoğunluğundan daha çok, su-çimento oranına olan etkileri bakımından önemlidir. ACI Komite 363'ün raporunda da belirtildiği gibi İncelik Modülünün (İ.M.) çok düşük olduğu durumlarda karışım suyu gereksinmesi artmaktadır. Aksi halde, taze beton çok yapışkan bir özellik arz ederek yerleştirmeyi ve sıkıştırmayı güçleştirmektedir.

Ayrıca, YDBlarda gerek çimento miktarının fazla olması ve gerekse mikrosilis ve uçucu kül gibi ince mineral katkıların mevcudiyeti ince agreganın İ.M.'nün bir miktar yükseltilmesini gerekli kılmaktadır. Dolayısıyla, İ.M. ≈ 3.00 ince agrega için uygun bir değer olarak belirtilmektedir. Ayrıca, ince agrega dışındaki ince malzemelerin (çimento ve mineral katkılar) miktarının YDBlarda fazla olması dolayısıyla 300 μm ve 150 μm boyutlu eleklerden geçen agrega miktarın azaltılmasının yararlı olacağı hatırlatılmaktadır [ACI Committee 363, 1984].

Yukarda belirtilen ACI raporunda, Perenchio'ya atıfta bulunularak, ince agrega gradasyonunun YDBların davranışına çok önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir [ACI Committee 363, 1984].

Kaba agrega boyutlarının mümkün olduğu kadar küçültülmesinin YDBlarda daha yüksek dayanım elde edilmesine yol açtığı kabul edilmektedir. Söz konusu dayanım artışını iki nedene dayandırmak mümkündür. (1) Agregada özgül yüzeyinin artmasıyla agrega-matriks arayüzeyindeki aderansın artması ve (2) agrega ile matriksin elastik modülleri arasındaki farktan doğan gerilme yoğunlaşmalarının küçük agrega boyutlarında daha az olması.

Agregada tane şekli dayanımı etkileyen bir diğer faktördür. Yapılan çok sayıda araştırma kırma taş agreganın doğal dere agregasına göre daha yüksek beton dayanımları sağladığını ortaya koymuştur. Bu durumun en olası nedeni kırma taş agregalarla matriks arasındaki mekanik aderansın daha yüksek olmasıdır. Ancak bu tür agregalarla su gereksinmesinin

artabileceği veya işlenebilirliğin azalabileceği de göz önünde bulundurulması gereken hususlardır [ACI Committee 363, 1984; FIP/CEB, 1990].

Klinker ve pişirilmiş boksit gibi bazı yapay agregalar kullanılarak çok yüksek dayanımlar elde etmek mümkündür [ACI Committee 363, 1984; FIP/CEB, 1990]. Ancak, bilinen konvansiyonel agregalar kullanıldığında, agreganın mineralojik özelliklerinin dayanıma etkisi bu agregaların içerdikleri safsızlıkların neden olabileceği zayıflık ve agrega-matriks arayüzeyinde oluşabilecek kimyasal bağın kuvvetine bağlıdır. Ayrıca, YDB üretiminde yüksek dayanımlı agrega kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği de bilinen bir gerçektir.

5.3. Deneysel Çalışma

Agrega tipi ve D_{maks} 'ın YDBların çeşitli özelliklerine etkilerinin belirlenmesi iki ayrı deney programı çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Birinci kısımda dört ayrı agrega cinsi (kireçtaşı, diabaz, granit ve doğal dere agregası) kullanılarak üretilen betonların değişik yaşlardaki basınç, çekme ve eğilme dayanımları ile statik ve dinamik elastisite modülleri, $\sigma-\epsilon$ ilişkileri ve 28 günlük Poisson oranları belirlenmiştir. İkinci kısımda ise kırma kireçtaşı ve doğal dere agregası kullanılarak D_{maks} 'ın dayanıma olan etkileri araştırılmıştır.

5.3.1. Agregası Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları

Bu bölümdeki betonlarda, araştırmanın tüm diğer bölümlerinde olduğu gibi, KPÇ 325 çimentosu kullanılmıştır. Bütün karışımlarda aynı 0/3mm kum kullanılırken 3/7 ve 7/15 mm boyutlarında dört değişik agrega parametre olarak belirlenmiştir. Yüksek akışkanlaştırıcı kimyasal katkı olarak ML2 kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri Raporun 2. Bölümünde verilmiştir.

Beton karışımları, kullanılan agrega cinsine göre, Da (dere agregası), Kt (kireçtaşı), Gt (granit) ve Dz (diabaz) olarak belirtilmiştir. Sözü edilen tüm karışımlarda agrega granülometrisi TS 706'da $D_{maks}=16\text{mm}$ için verilen granülometri sınırlarına uygundur. Granülometri etkisinin bir parametre olmasını önlemek bakımından, beton karışımlarının agrega tane dağılımları, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, birbirine çok yakın tutulmuştur.

28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck28}) 70 MPa ve çökme değeri 60-80mm olacak şekilde yapılmış olan karışım hesapları sonucunda elde edilen beton karışım oranları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Agregası Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları ve Bazı Taze Beton Özellikleri

Malzeme	Miktar (kg/m ³ beton)			
	Da	Kt	Gt	Dz
Çimento	550	550	550	550
0/3mm kum (DYK)	645	645	645	645
3/7mm k.taş (DYK)	310	310	310	310
7/15mmk.taş (DYK)	750	750	750	750
Su (net)	126	147	146	154
YAK	38.5	38.5	38.5	38.5

Çökme (mm)	70	65	60	60
Hava (%)	1.4	1.2	1.1	1.1
Bir.Ağ. (kg/m ³)	2397	2430	2427	2443

5.3.2. Maksimum Agregası Boyutunun Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları

Maksimum agrega boyutunun etkilerinin belirlenmesinde parametre olarak 8, 16, 32 ve 63mm'lik maksimum tane boyları seçilmiştir. Araştırmanın bu bölümünde, kıyaslama imkanı bulabilmek amacıyla, YDBla birlikte bir düşük bir de normal dayanımlı beton hazırlanmıştır. Burada hem doğal dere agregası hem de kırmataş agregası kullanılmış ve söz konusu etki ayrı ayrı bu malzemeler üzerinde araştırılmıştır.

28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımları (f_{ck28}) 10, 25 ve 65 MPa ve çökme değerleri 50-70mm olacak şekilde yapılmış olan tüm beton karışımlarında TS 706'da $D_{maks}=8, 16, 32, 63$ mm için verilen granulometri sınırlarına sadık kalınmıştır. Bu bölümde kullanılan çimento, agrega, ve kimyasal katkılarla ilgili bilgiler Raporun 2. Bölümünde verilmiştir. Beton karışım oranları ise Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. D_{maks} Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları

Malzeme	Miktar (kg/m ³ beton)											
	Doğal Agregası											
	BS10				BS25				BS65			
	8mm	16mm	32mm	63mm	8mm	16mm	32mm	63mm	8mm	16mm	32mm	63mm
Çimento	200	200	200	200	300	300	300	300	600	600	600	600
0/3 (DYK)	1496	1113	942	948	1444	1055	895	904	1198	861	731	776
3/7 (DYK)	263	557	377	189	254	528	358	181	210	430	292	155
7/15 (DYK)	-	186	280	210	-	176	260	203	-	143	215	150
15/30 (DYK)	-	-	285	355	-	-	280	339	-	-	223	260
30/60 (DYK)	-	-	-	290	-	-	-	240	-	-	-	210
Su (net)	212	194	172	148	204	168	150	141	156	138	132	126
YAK	-	-	-	-	-	-	-	-	42	42	42	42
Malzeme	Kırma taşı											
	BS65											
	BS10				BS25				BS65			
	8mm	16mm	32mm	63mm	8mm	16mm	32mm	63mm	8mm	16mm	32mm	63mm
Çimento	210	210	210	210	310	310	310	310	610	610	610	610
0/3 (DYK)	969	678	581	581	929	650	557	557	800	560	480	480
3/7 (DYK)	969	387	387	387	929	372	372	378	800	320	320	320
7/15 (DYK)	-	872	581	387	-	836	557	377	-	720	480	320
15/30 (DYK)	-	-	387	387	-	-	372	377	-	-	320	320
30/60 (DYK)	-	-	-	194	-	-	-	186	-	-	-	160
Su (net)	220	195	176	149	211	195	164	158	140	146	159	146
YAK	-	-	-	-	-	-	-	-	42.7	42.7	42.7	42.7

5.3.3. Yapılan Deneyler

Agrega özelliklerinin YDBların davranışına etkilerinin belirlenmesinde agrega cinsi ve maksimum agrega boyutu ayrı ayrı ele alınmıştır.

5.3.3.1. Agregası Cinsinin Etkilerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

Bu bölümde, dört değişik agrega kullanılarak üretilen betonlardan elde edilen standart (150x300mm) silindir numuneler üzerinde

a) 3, 7, 14, 28, 56 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı (TS3114),

b) aynı yaşlarda yarıda çekme dayanımı (TS 3129),

c) 7, 28 ve 90 gün yaşlarında eğilme dayanımı (TS 3129),

d) yine 7, 28 ve 90 gün yaşlarında statik ve dinamik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı deneyleri yapılmıştır (ASTM C-469 ve ASTM C-517).

Ayrıca, beton numunelerin basınç altında yüklem-boşaltma eğrileri, 250kPa/s yüklem (boşaltma) hızında numunenin dayanımının %70'ine kadar yük uygulamak suretiyle, elde edilmiştir.

5.3.3.2. Maksimum Agregaya Boyutunun Etkilerinin Belirlenmesi İçin Yapılan Deneyler

Bu bölümde doğal dere çakılı ve kırmataş ayrı ayrı ele alınmıştır. Dmaks'ın taze betonun karışım suyu ihtiyacına, çökme değerine, birim ağırlığına ve hava miktarına; sertleşmiş betonun 3, 7, 28, 56 ve 90 gün yaşlarındaki basınç dayanımlarına etkileri belirlenmiştir.

5.4. Deney Sonuçları

Araştırmanın bu aşamasında yapılmış olan deneylerin sonuçları yine agregaya cinsinin etkileri ve maksimum agregaya boyutunun etkileri bakımından ayrı ayrı ele alınmıştır.

5.4.1. Agregaya Cinsinin Etkileri Deney Sonuçları

Bu bölümde elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 5.3'de, yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge 5.4'de, eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 5.5'de statik ve dinamik elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir. Çizelge 5.3 ve 5.4'deki değerler altışar Çizelge 5.5 ve 5.6'daki değerler ise üçer numunenin ortalamasıdır.

Yükleme-boşaltma eğrileri, sonuçların irdelenmesi kısmında verilmiştir.

Çizelge 5.3. Değişik Agregalarla Elde Edilen Basınç Dayanımları

Agrega	Basınç Dayanımı (MPa)					
	3G	7G	14G	28G	56G	90G
Da	25.6	34.1	44.0	47.5	53.1	56.0
Kt	37.4	52.6	62.3	71.2	75.3	79.8
Gt	29.5	40.2	51.2	52.5	60.6	64.1
Dz	31.9	43.0	47.3	55.4	58.2	64.0

Çizelge 5.4. Değişik Agregalarla Elde Edilen Yarmada Çekme Dayanımları

Agrega	Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)					
	3G	7G	14G	28G	56G	90G
Da	2.8	3.1	3.7	4.2	4.2	4.3
Kt	4.1	4.4	5.3	5.6	5.8	6.3
Gt	2.3	3.2	3.5	3.7	3.8	4.5
Dz	3.2	3.9	4.4	4.5	4.7	5.0

Çizelge 5.5. Değişik Agregalarla Elde Edilen Eğilme Dayanımları

Agrega	Eğilme Dayanımı (MPa)					
	7G	28G	90G	7G	28G	90G
Da	4.6	6.8	7.9			
Kt	6.4	10.2	10.5			
Gt	4.9	7.0	8.2			
Dz	6.3	8.6	9.6			

Çizelge 5.6. Değişik Agregalarla Elde Edilen Elastisite Modülleri ve Poisson Oranları

Agr.	Est (GPa)			Edn (GPa)			μ		
	7G	28G	90G	7G	28G	90G	7G	28G	90G
Da	28.69	34.75	38.73	41.75	43.71	45.86	0.19	0.18	0.17
Kt	38.43	44.35	47.01	48.84	50.55	54.40	0.17	0.17	0.16
Gt	29.34	41.80	44.31	37.85	44.34	47.28	0.19	0.18	0.18
Dz	40.52	45.62	47.18	45.45	49.98	53.75	0.18	0.17	0.18

5.4.2. Maksimum Agrega Boyutunun Etkileri Deney Sonuçları

Kırma taş ve doğal dere agregası kullanılarak elde edilen D_{maks} -karışım suyu ihtiyacı ilişkileri Çizelge 5.7'de, 3, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları ise Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. D_{maks} 'ın Farklı Beton Sınıflarının Karışım Suyu Miktarına Etkileri

Beton Sınıfı	D_{maks} (mm)	S/Ç (net)	
		Kırma taş (Kt)	Dere agregası (Da)
BS10	8	1.05	1.06
	16	0.93	0.97
	32	0.84	0.86
	63	0.71	0.74
BS25	8	0.68	0.68
	16	0.63	0.56
	32	0.53	0.50
	63	0.51	0.47
BS65	8	0.23	0.26
	16	0.24	0.23
	32	0.26	0.22
	63	0.24	0.21

Çizelge 5.8. D_{maks} 'ın Farklı Beton Sınıflarının Basınç Dayanımlarına Etkileri

B.S.	D_{maks} (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)									
		Kırma taş (Kt)					Dere agregası (Da)				
		3G	7G	28G	56G	90G	3G	7G	28G	56G	90G
BS10	8	1.59	2.89	5.94	7.17	7.64	0.71	1.83	3.67	7.03	7.65
	16	3.13	4.76	9.29	10.47	11.36	0.87	3.36	8.15	10.60	11.20
	32	4.12	6.67	10.89	13.86	13.89	1.02	4.69	9.28	12.23	12.74
	63	4.81	7.44	13.15	15.73	16.16	3.31	6.32	11.01	12.44	13.15
BS25	8	4.19	7.20	13.25	16.35	16.51	2.65	5.40	10.50	16.72	18.55
	16	7.16	11.01	20.22	23.74	24.67	5.10	8.36	16.92	22.12	25.08
	32	8.17	12.32	26.46	26.52	27.83	5.86	10.50	20.80	25.79	26.20
	63	10.61	15.98	29.05	29.58	31.30	7.54	11.52	21.10	26.10	28.03
BS65	8	18.06	50.59	67.39	68.49	76.34	13.05	34.66	44.63	50.14	58.73
	16	20.03	50.91	65.94	72.67	75.07	14.37	38.94	49.14	53.21	58.22
	32	20.07	52.18	67.56	73.59	74.30	16.31	36.70	47.26	51.09	55.63
	63	16.72	56.66	63.21	63.50	65.18	17.33	36.04	46.19	49.89	55.32

5.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

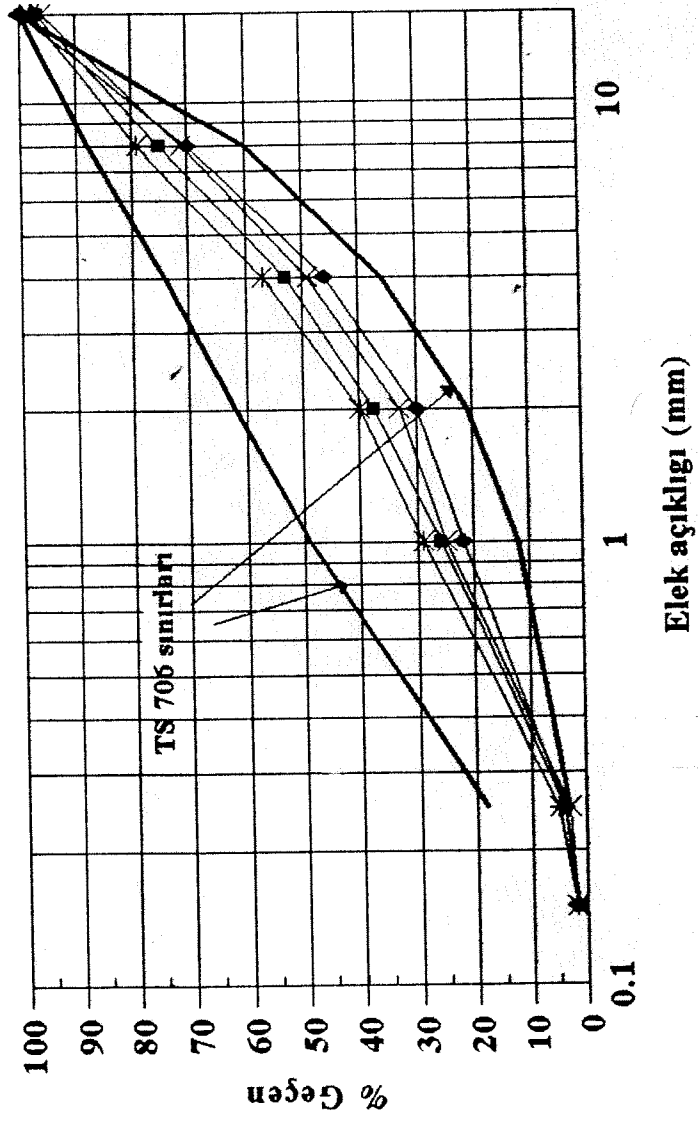
5.5.1. Agrega Cinsinin Etkileri

Agrega cinsi ve mineralojisi betonun dayanımını ve diğer mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Kullanılan dört değişik agreganın dayanımlara ve Elastisite Modülüne etkileri aşağıda irdelenmiştir. Ayrıca, betonların yükleme-boşaltma eğrileri deneysel olarak elde edilmiş ve bunlar yorumlanarak agrega cinsinin YDBLarın davranışıyla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

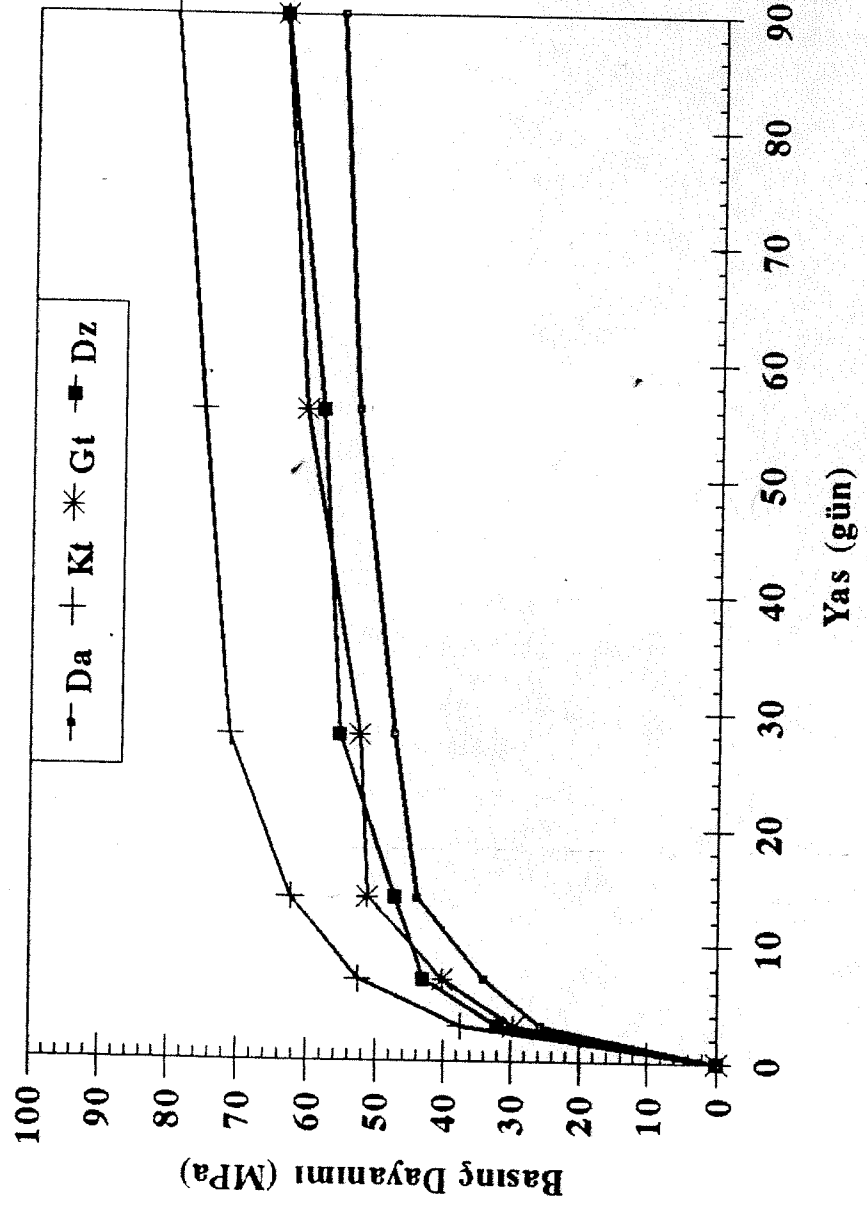
5.5.1.1. Basınç Dayanımları

Çizelge 5.3'de verilen basınç dayanım değerlerine bakıldığında, kireçtaşının kullanılan diğer agregalardan bariz bir şekilde üstün olduğu görülmektedir. Araştırmanın bu bölümünde kullanılan agregaların performansları, en yüksek beton basınç dayanımından en düşüğe göre sıralandıklarında, (1) kireçtaşı, (2) diabaz ve granit ve (3) dere agregası olarak ortaya çıkmıştır. Değişik agregalar kullanılarak üretilen YDBLarın yaş-basınç dayanımı ilişkileri Şekil 5.2'de gösterilmiştir. ACI Komite 363 raporunda [ACI Committee 363, 1984] silisli agregaların çimento hamuru ile kimyasal bağ oluşturup daha kuvvetli bir arayüzey meydana

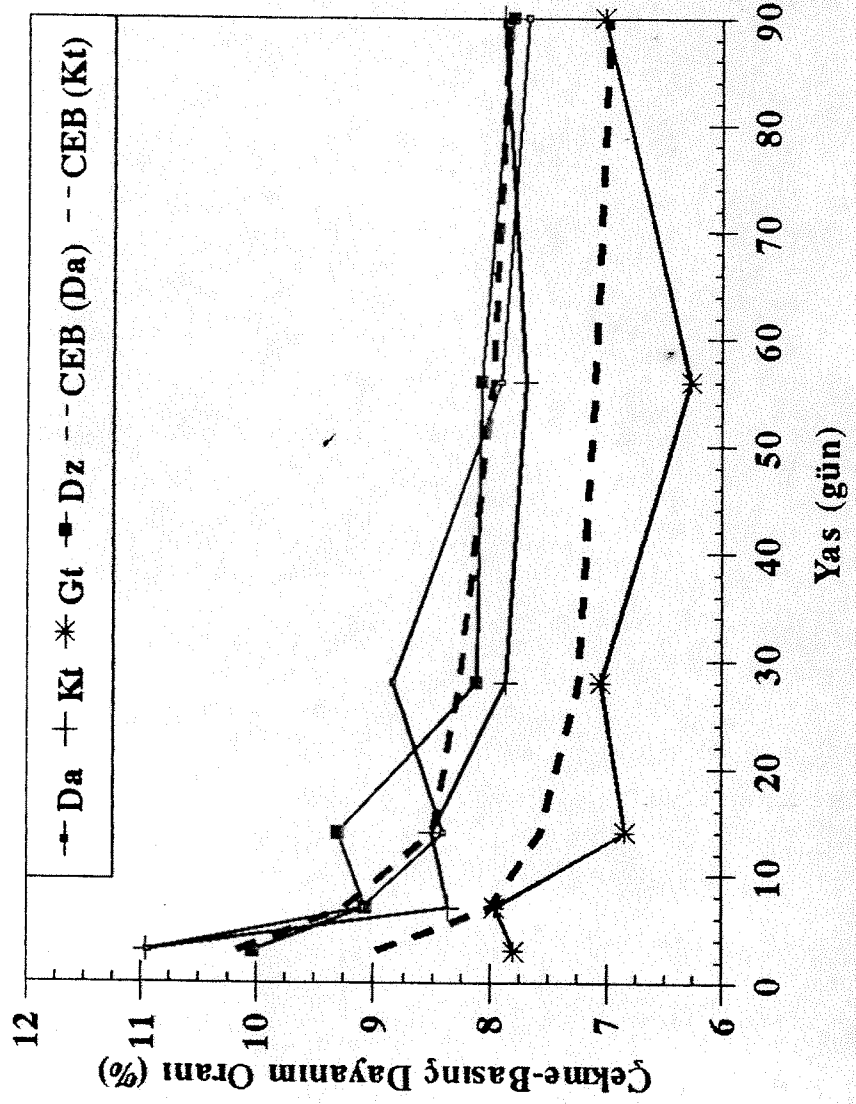
* Kt ■ Di * Da ◆ Gt



Şekil 4. Arazenin alfilerinin belirlenmesi deneylerinde kullanılan tane dağılımı eğrileri



Şekil 5.2. Değişik agregalarla üretilen betonların yaş-basınç dayanımı ilişkileri



Şekil 5.3. Değişik agregatlarla üretilen betonların çekme dayanımı-basınc dayanımı ilişkilerinin Literatürde karşılaştırılması

getirebileceği belirtilmiş olmakla birlikte bu araştırmada aksine bir sonuç ortaya çıkmıştır. Ancak, söz konusu durumun agrega mineralojisinden çok kırılma elde edilirken çeneli konkasörde özellikle granitin yüzeyinde meydana geldiği düşünülen mikro çatlaklardan kaynaklandığı sanılmaktadır. Bununla ilgili açıklama 5.5.1.3. "Eğilme Dayanımları" Bölümünde yapılmıştır.

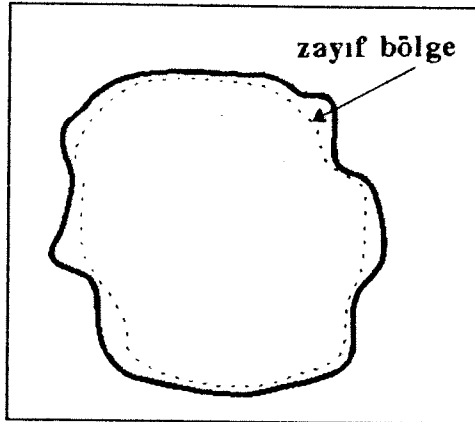
5.5.1.2. Yarımada Çekme Dayanımları

Bir önceki bölümde basınç dayanımı için belirtilen hususların Çizelge 5.4'de verilmiş olan çekme dayanımları için de geçerli olduğu anlaşılmıştır.

Öte yandan, çekme-basınç dayanımı oranları, erken yaşlar hariç, %6-9 arasında değişmektedir. Bu oranlar, değişik yaşlar için, Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Literatürde normal dayanımlı betonlar için verilmiş olan çekme-basınç dayanımı oranları %8-14 arasında değişmektedir. Dolayısıyla, YDBlar için sözü edilen oran biraz daha düşük çıkmıştır. Ancak, deneysel sonuçlar CEB tarafından önerilen $\sigma_t = 0.3(\sigma_c)^{2/3}$ bağıntısı ile karşılaştırıldığında, bu bağıntının YDBlarda da kullanılabilirliği görülmüştür. D_a ve K_t agregaları ile üretilen beton numuneler için CEB tarafından önerilen bağıntı kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

5.5.1.3. Eğilme Dayanımları

Basınç ve çekme dayanımı deneylerinde olduğu gibi, eğilme dayanımı deneyleri sonucunda da kırılma taş agregaların yuvarlak dere agregasına göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Ancak, bu deneylerde granit ve dere agregasının performanslarının birbirine yakın oluşu dikkat çekmiştir. Söz konusu durum granitin kırılması sırasında yüzeyde meydana gelen zayıf bölge ile açıklanabilir (Şekil 5.4). Çizelge 2.4'e bakıldığında da Los Angeles Aşınma deneyi sonucunda en fazla ağırlık kaybı gösteren agreganın granit olduğu görülmektedir. Granitin aşınmasının yüksek oluşunu da aynı gerekçeye bağlamak mümkündür. Dolayısıyla, agrega yüzeyinde oluşan söz konusu zayıf bölge agrega-matriks aderansının zayıf ve dayanımların düşük olmasına yol açmaktadır.



Şekil 5.4. Agreganın yüzeyinde oluşan zayıf bölge şematik gösterimi.

Bu araştırmada eğilme-basınç dayanımı oranları %12-16 arasında değişmiştir.

5.5.1.4. Elastisite Modülü

Şekil 5.5'de gösterilmiş olan basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi, kullanılan dört değişik agrega birlikte değerlendirildiğinde

$$E = 3.55f_c^{0.605}$$

olarak elde edilmiştir. Bu bağıntıda korelasyon katsayısı, $r=0.89$ 'dur.

Ayrıca CEB tarafından betonların elastisite modüllerinin hesaplanması için önerilen

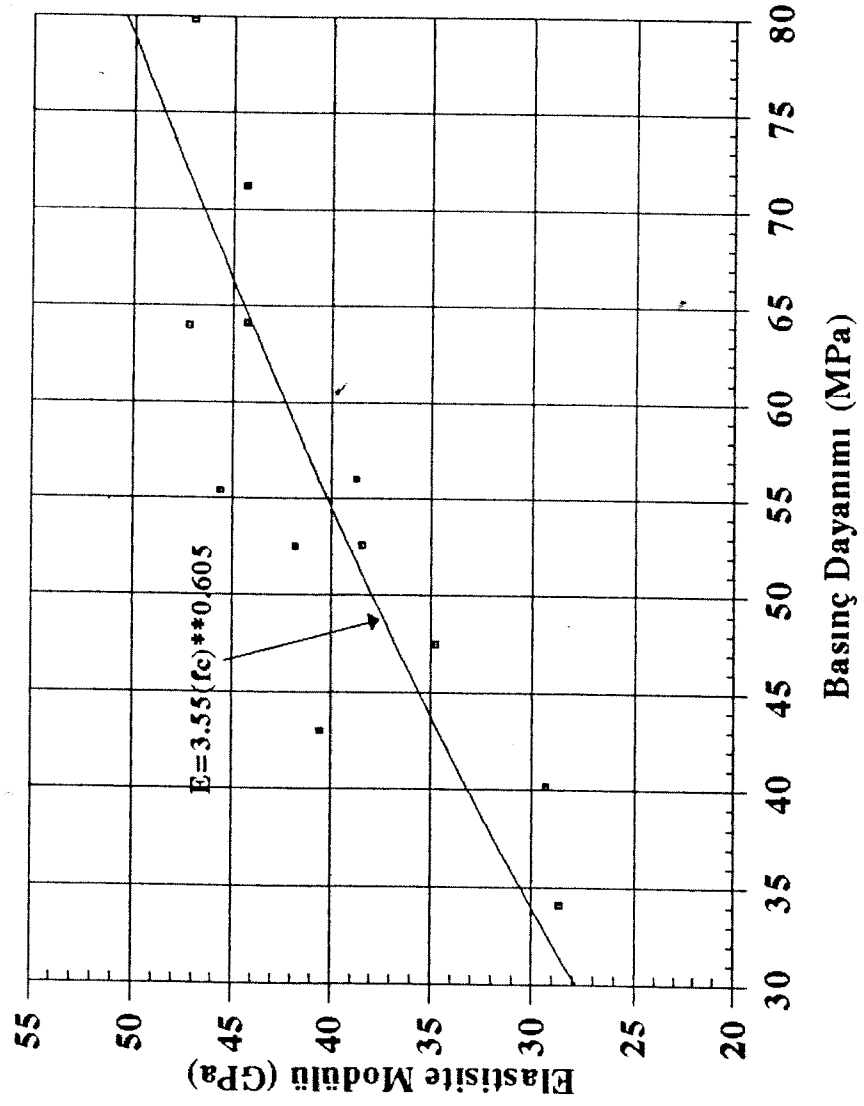
$$E = 9.5(f_c + 8)^{\frac{1}{3}}$$

bağıntısının bu bölümde elde edilen deney sonuçlarının istatistiksel analizi sonucunda bulunan bağıntıyla olan uyumluluğu Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

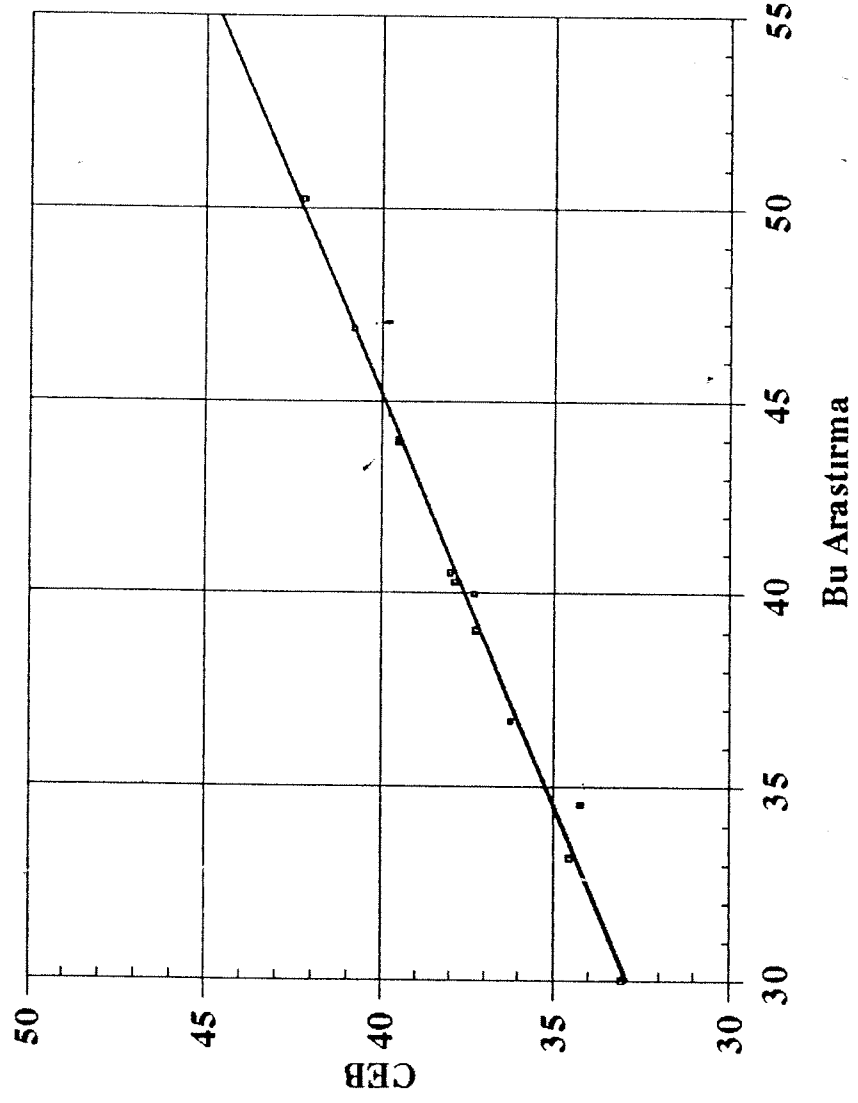
Deneysel olarak bulunan statik ve dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki ise

$$E_{st} = 1.48E_{dn} - 29.64$$

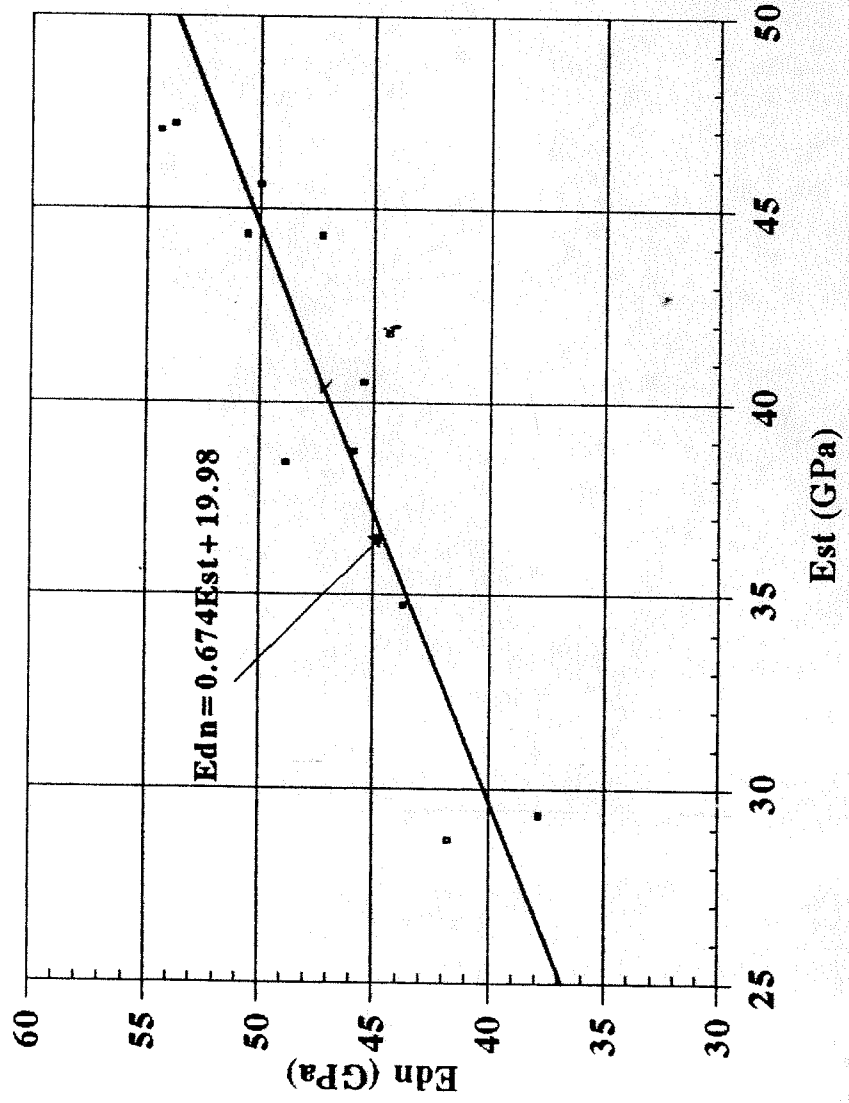
olarak, $r=0.90$ korelasyon katsayısıyla, bulunmuştur (Şekil 5.7).



Şekil 5.5. Değişik agregalara üretilen betonların basınç dayanımı-elasticite modülü ilişkisi



Şekil 5. 6. Değişik agregatlar kullanılarak bulunan basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinin CEB tarafından önerilenle karşılaştırılması



Şekil 5.7. Değişik agregalarla üretilen betonlarda statik ve dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki

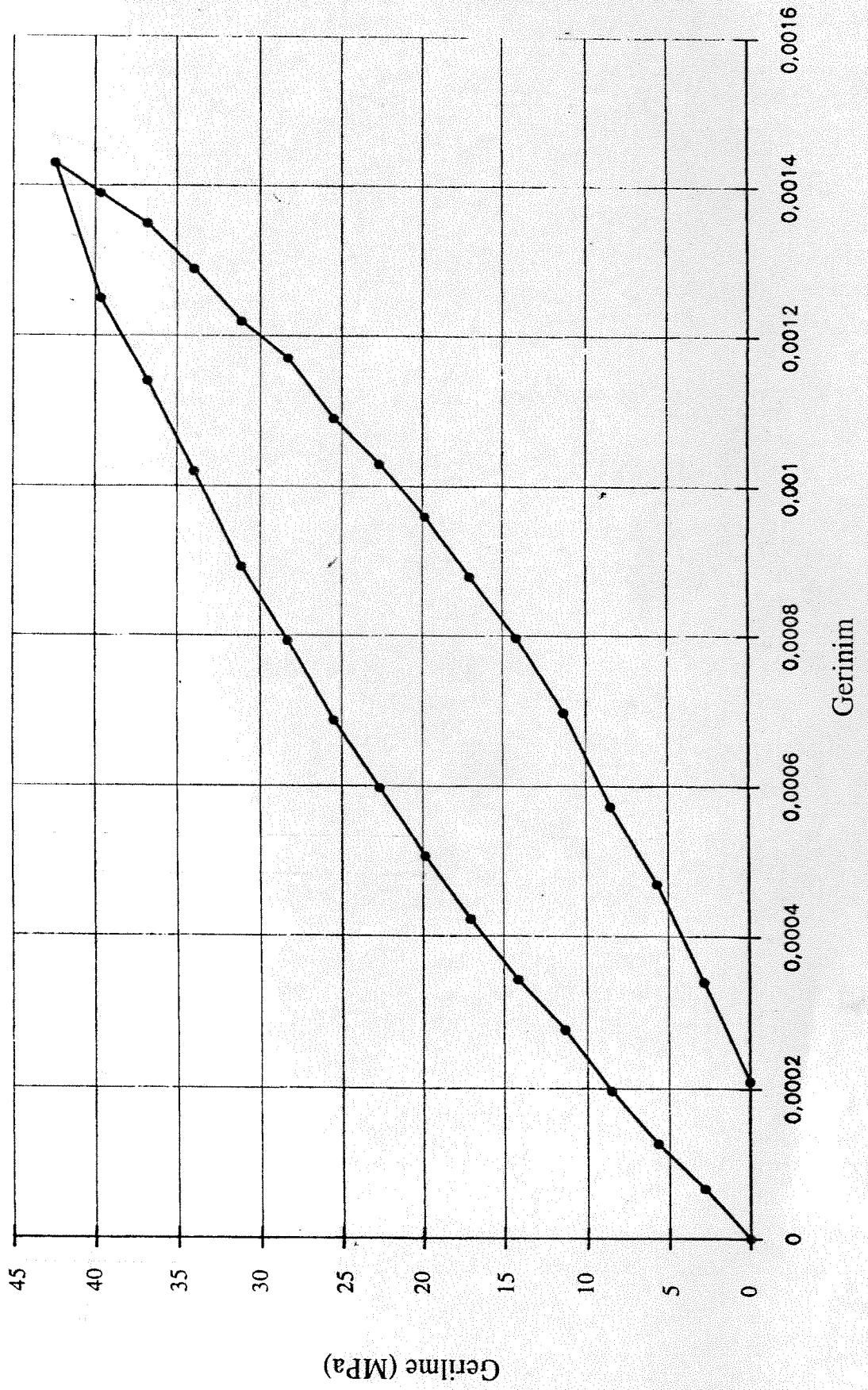
5.5.1.5. Yükleme-Boşaltma Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri (Histeresis Çevrimleri)

Daha önceki bölümlerde verilmiş olan dayanım ve elastisite modülü deney sonuçlarından anlaşıldığı gibi kireçtaşı ve diabaz, granit ve dere agregasına oranla daha iyi sonuçlar vermiştir. Aitcin ve Mehta'ya göre [Mehta ve Aitcin, 1990] histeresis çevrimlerinin genişliği agrega-matriks arayüzeyindeki aderans hakkında bir fikir vermektedir. Bu çevrim ne kadar dar olursa aderans o kadar kuvvetli olmaktadır. Ayrıca, çevrimin yük tamamıyla boşaltıldıktan sonra kapanmayan kısmı da aynı konuda fikir sahibi olunmasını sağlamaktadır. Şekil 5.8'de Da, Kt, Gt ve Dz betonlarının yükleme-boşaltma altında elde edilen 28 günlük Gerilme-Birim deformasyon eğrileri (histeresis çevrimleri) gösterilmiştir. Bu şekilde, Kt ve Dz betonlarının birbirine Gt ve Da betonlarının da birbirine benzer davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle, Kt ve Dz betonlarının basınç altındaki histeresis çevrimlerinin Gt ve Da betonlarınıninkine göre daha dar olması ve kapanmayan kısımlarının daha az olması kireçtaşı ve diabaz kullanılarak üretilen betonlarda agrega-matriks arayüzeyindeki aderansın daha kuvvetli olduğunu göstermektedir. Böylece, agrega matriks arayüzeyinin daha kuvvetli olması YDBların hem dayanımlarını hem de elastisite modüllerini olumlu yönde etkilemektedir.

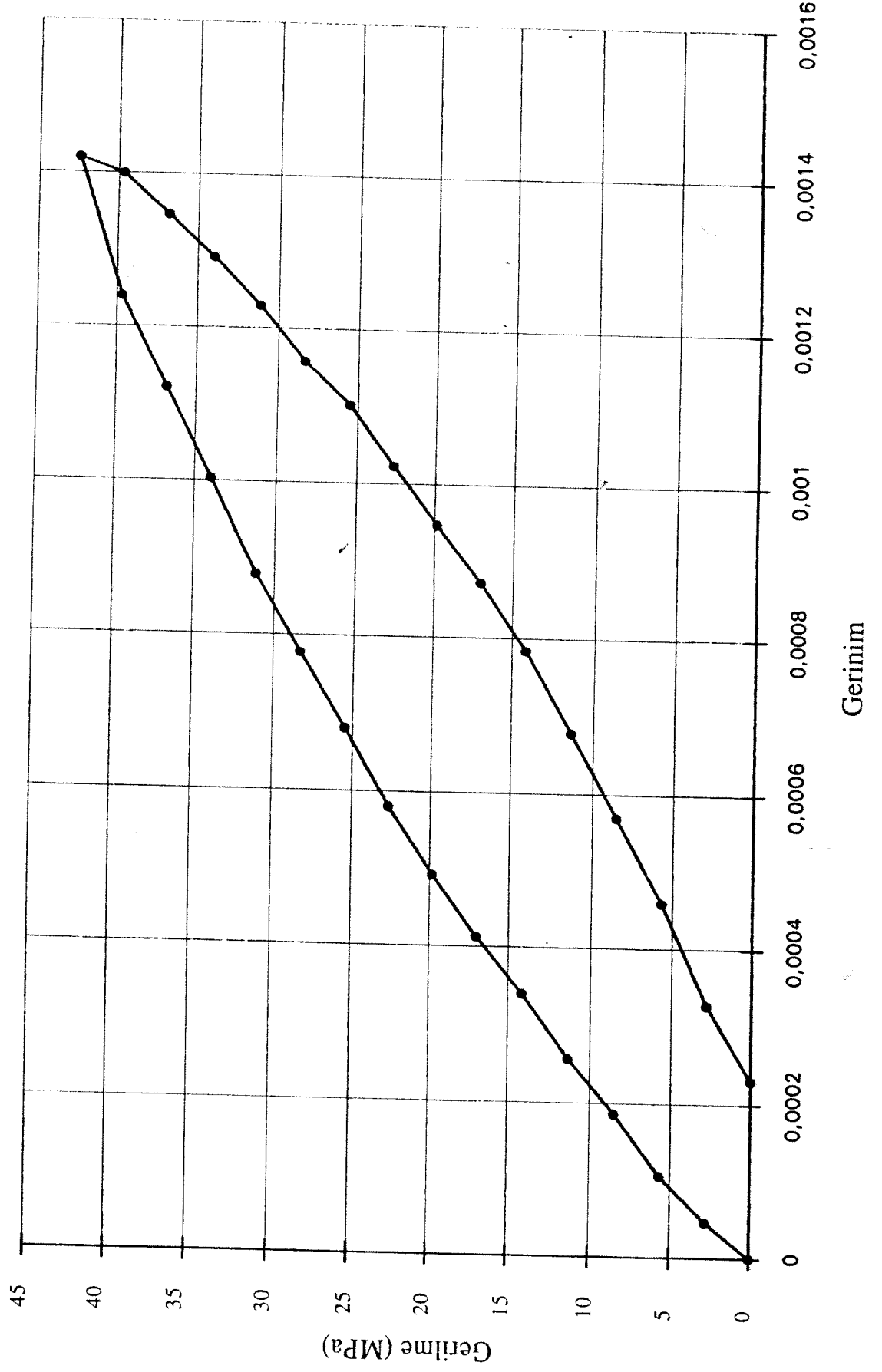
5.5.2. Maksimum Agregat Boyutunun Etkileri

Sabit işlenebilirlik değerlerindeki düşük ve normal dayanımlı betonlarda maksimum agregat boyutunun (D_{maks}) büyümesinin, özgül yüzeyin azalmasına bağlı olarak su gereksinmesinin düşmesi nedeniyle, dayanımların artmasına yol açtığı bilinmektedir [Neville, 1973]. Söz konusu durum bu araştırmada da gözlenmiştir.

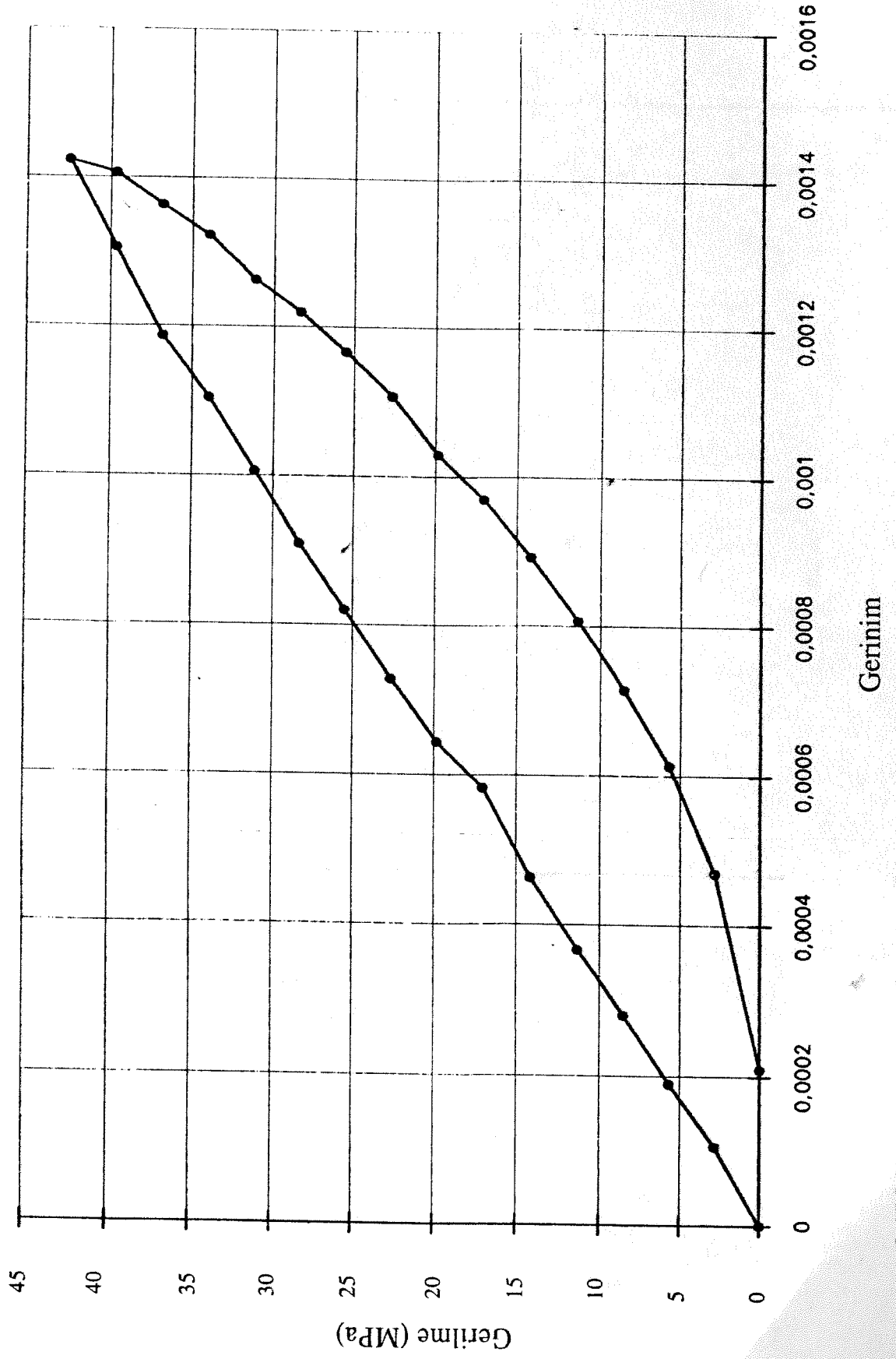
Ancak, YAK kullanılarak su miktarı çok azaltılmış olan YDBlarda durum biraz farklıdır. Agregat boyutundaki değişiklikler, Çizelge 5.8'de görüldüğü gibi, karışım suyu miktarında önemli sayılabilecek azalma veya artmaya neden olmamıştır. Buna karşılık, 16mm'nin üstündeki D_{maks} değerleri için YDB dayanımlarında bir azalma söz konusudur. Bu durum Şekil 5.9'da gösterilmiştir. YDBlarda D_{maks} 'ın yükselmesinin spesifik yüzeyin azalması nedeniyle agrega matriks arayüzeyindeki mekanik aderansın azalmasına yol açtığı ve dolayısıyla su-çimento oranında fazla bir değişiklik olmamasına karşın, dayanımları düşürdüğü sonucuna varılmıştır.



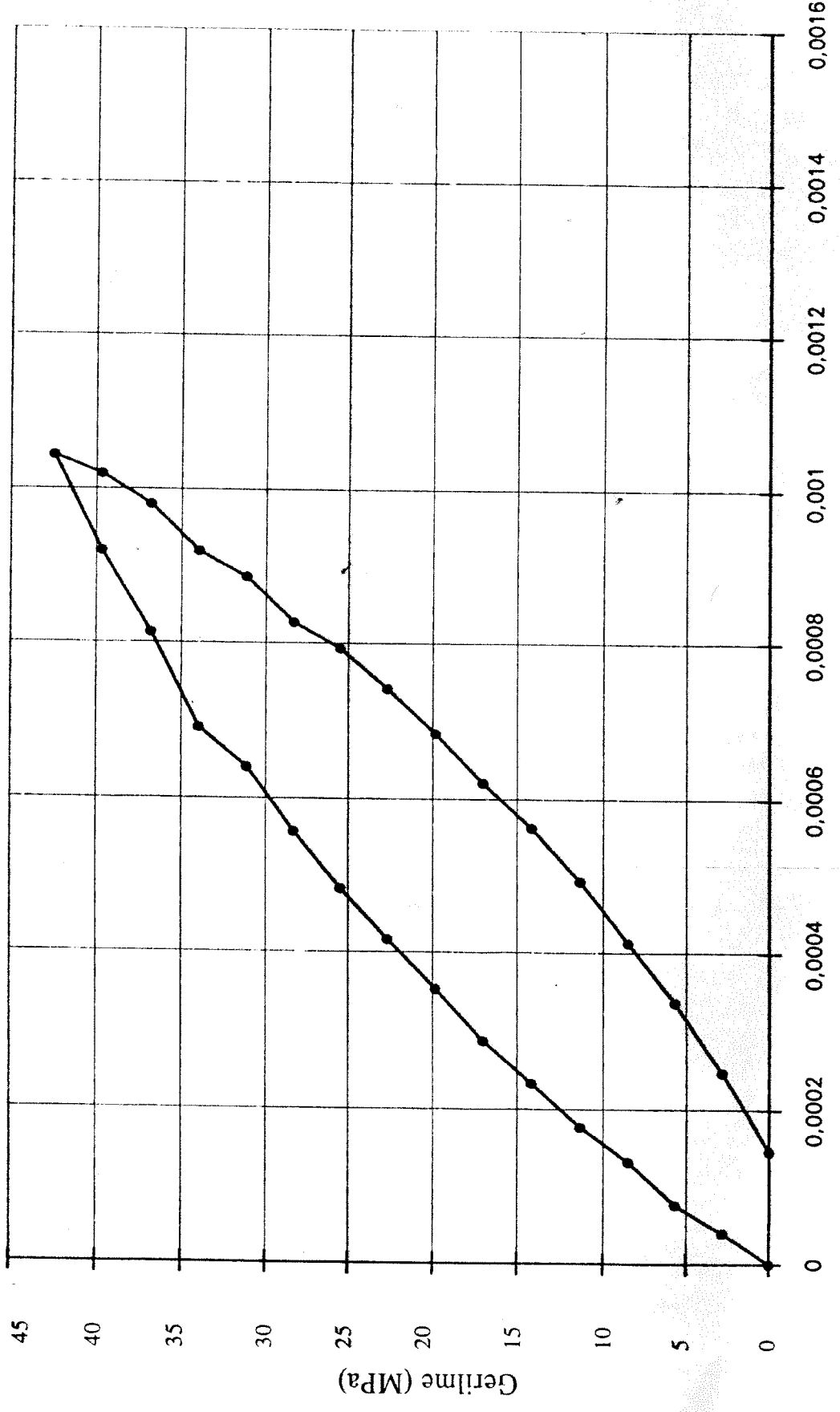
Şekil 5.8a. Da kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 öñn vasındaki histeresis çevrimini



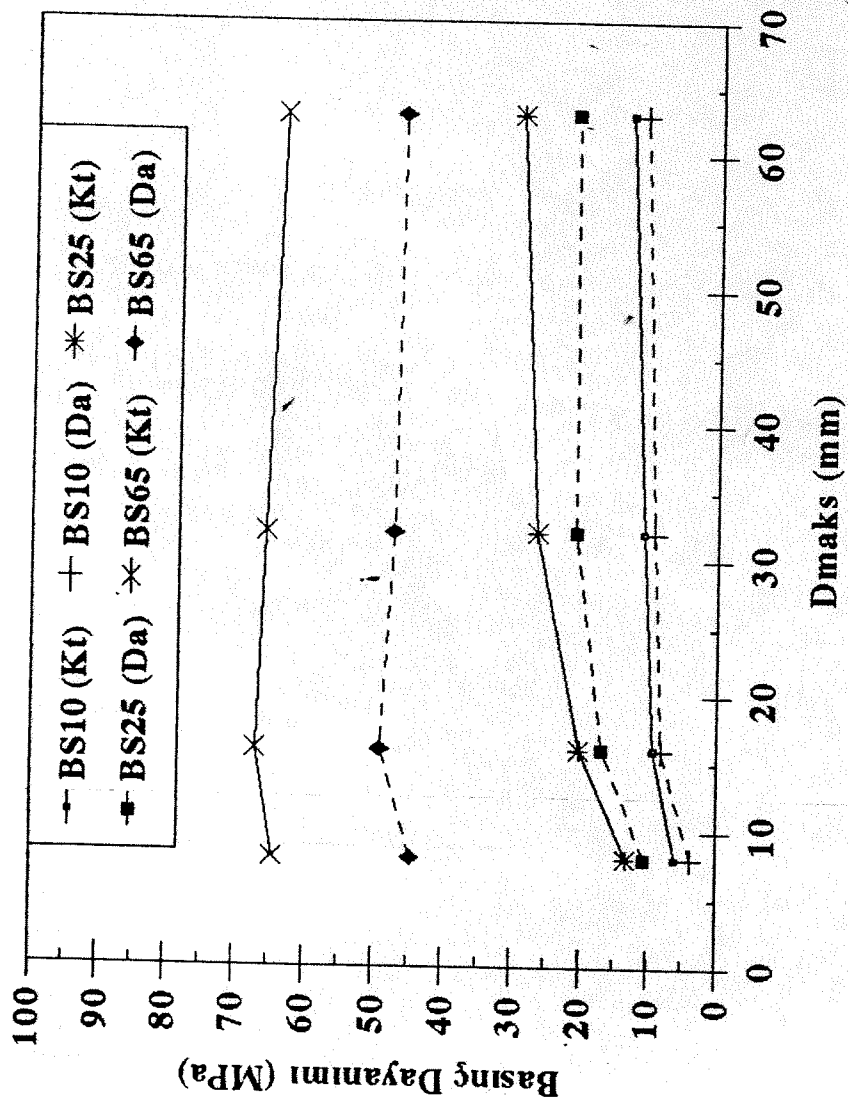
Şekil 5.8b. K1 kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi



Şekil 5.8c. Gt kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi



Şekil 5.8d. Dz kullanılarak üretilmiş olan YDBun 28 gün yaşındaki histeresis çevrimi



Sekil 5.9. Dmaks'in 28 günlük basıncı dayanımına etkisi

6. YDBIlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Basınç Dayanımına Etkileri

YDBIların basınç dayanımlarına numune boyutlarının ve şeklinin etkilerinin araştırıldığı bu bölümde üç ayrı dayanım düzeyindeki betonlardan değişik boyutlarda küp ve silindir numuneler hazırlanmış ve değişik yaşlardaki basınç dayanımları belirlenmiştir.

Çeşitli ülkelerde YDBIların basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan numuneler birbirinden farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Norveç'te 100mm küp, 100x200mm ve 100x300mm silindir; Fransa'da 160x320mm silindir; ABD'de 152x305mm veya 100x200mm silindir, İngiltere'de 150mm küp numuneler kullanılmaktadır [FIP/CEB, 1990].

Normal dayanımlı betonlar için, değişik boyutlardaki küp ve silindir numunelerle standart numuneler arasındaki bağıntıyı veren katsayılar bir çok araştırmacı tarafından tesbit edilmiş olmasına karşın bunların YDBIlarda geçerli olup olmadığı bilinmemektedir.

Ayrıca, betonun dayanımının artmasıyla numunelerin dayanım testlerinin yapılacağı deney makinelerinin kapasitelerinin yükselmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, pratik zorunluluklar açısından, küçük numune kullanılması zaman zaman kaçınılmaz hale gelebilmektedir.

Bu ve benzeri gerekçelerle YDBIlarda numune boyut ve geometrisinin basınç dayanımına etkileri araştırılmıştır.

6.1. Geçmiş Araştırmaların Gözden Geçirilmesi

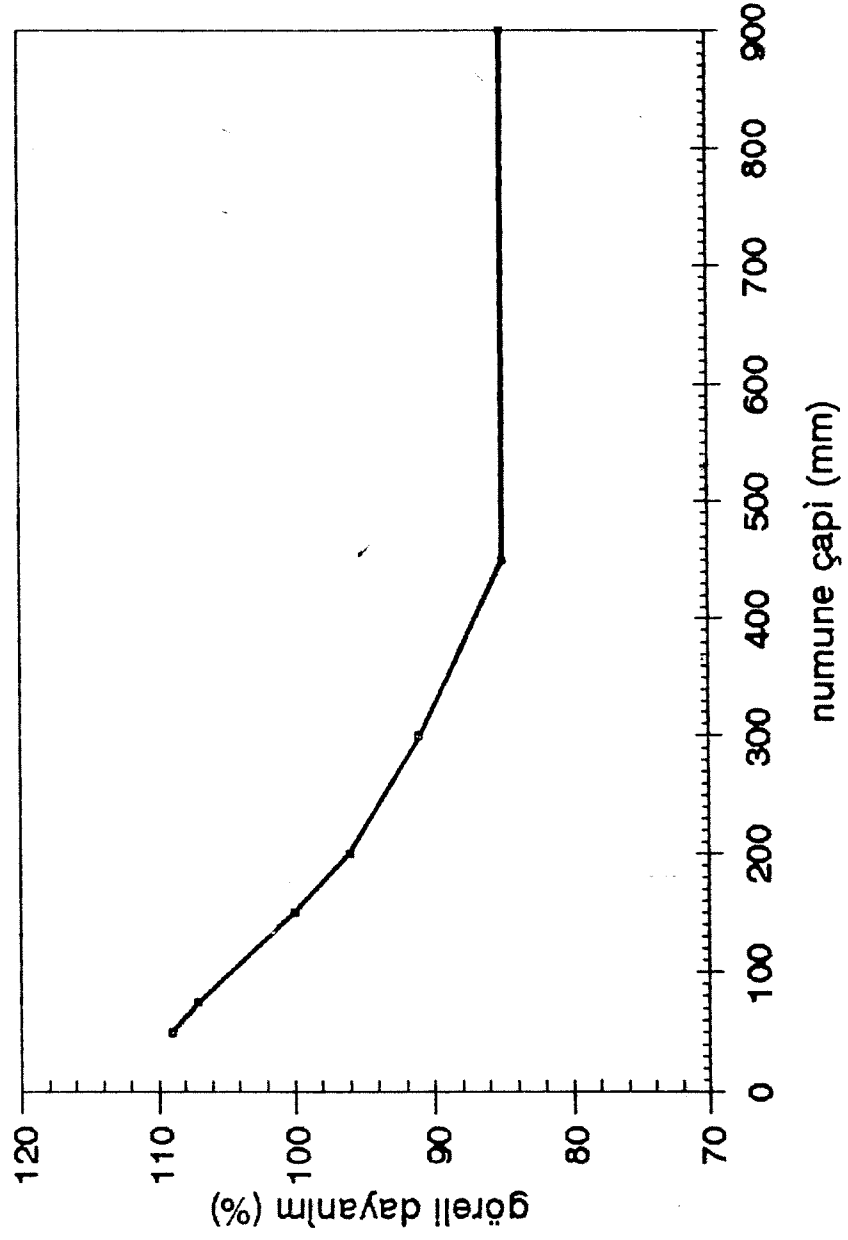
Literatürde numune boyut ve geometrisinin beton basınç dayanımına etkileri konusundaki çalışmaların büyük bir çoğunluğu normal dayanımlı betonlar üzerinde yapılmıştır.

Betonun dayanımı ve dayanımdaki değişkenlik numune boyutlarının büyümesiyle azalır. Diğer bir deyişle, numune boyutları büyüdükçe betondaki hata olasılığı da arttıpından elde edilen görünür dayanım azalır. Öte yandan, numunedeki hataların dağılımı daha homojen olacağından, değişkenlik de azalır. Örneğin, US Bureau of Reclamation'da yapılan deneysel çalışmalar sonucunda çapı 460mm'den büyük silindir numunelerde boyut etkisinin sabit kaldığı anlaşılmıştır [Özdemir, 1994]. Silindir numunelerde boyut etkisi Şekil 6.1'de gösterilmiştir [Neville, 1973].

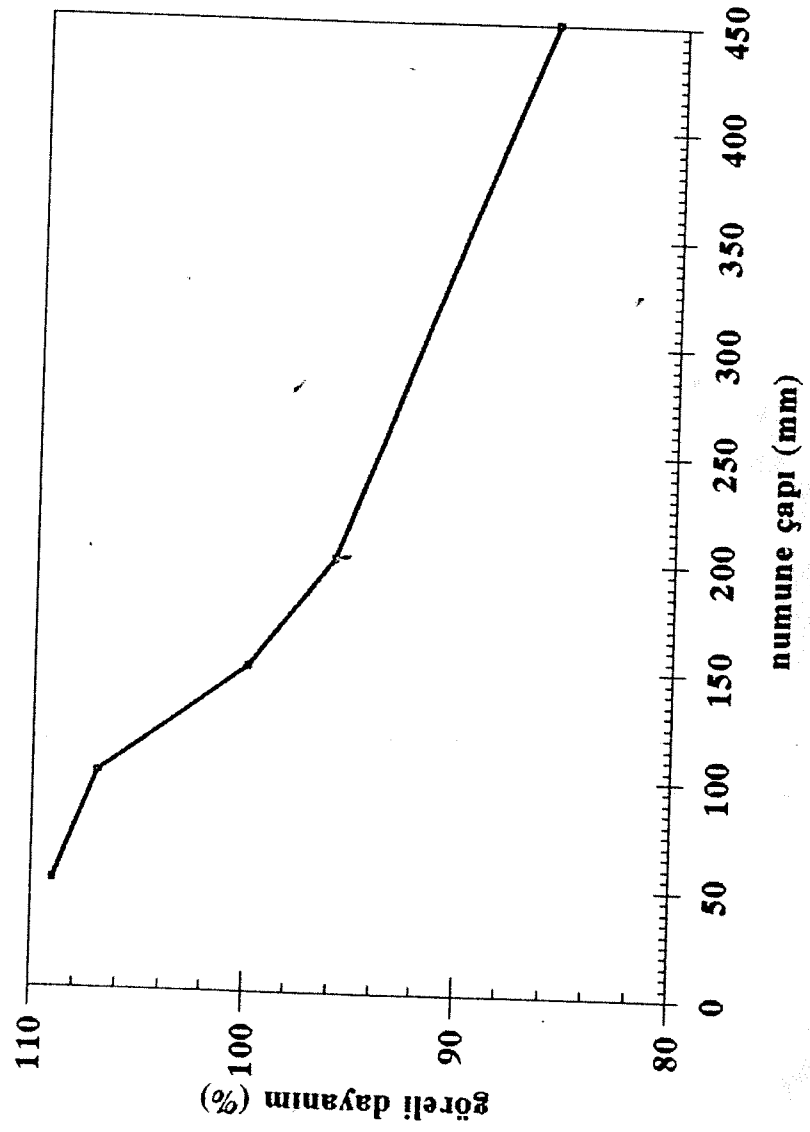
Silindir ve küp numuneler üzerinde US Bureau of Reclamation'inkine benzer bir çalışma da DSI'de gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar grafik olarak Şekil 6.2 ve 6.3'de gösterilmiştir [DSI, 1977].

YDBIlar üzerinde yapılan iki ayrı deneysel çalışmadan birbiriyle çelişik sonuçlar alınmıştır [Lessard ve Aitcin, 1993; Malhotra, 1976]. 100x200mm silindir numune dayanımının 150x300mm standart silindir numune dayanımına oranını, 48-80MPa basınç dayanımına sahip betonlarda, Carasquillo ve Carasquillo %93 bulurken Université de Sherbrooke'ta yapılan deneylerde 35-122MPa basınç dayanımına sahip betonlar için bu oran %106 olarak belirlenmiştir. Malhotra ise 8-46MPa basınç dayanımındaki betonlarda 100x200-150x300mm basınç dayanım oranını %75 ile %120 arasında bulmuştur [Malhotra, 1976].

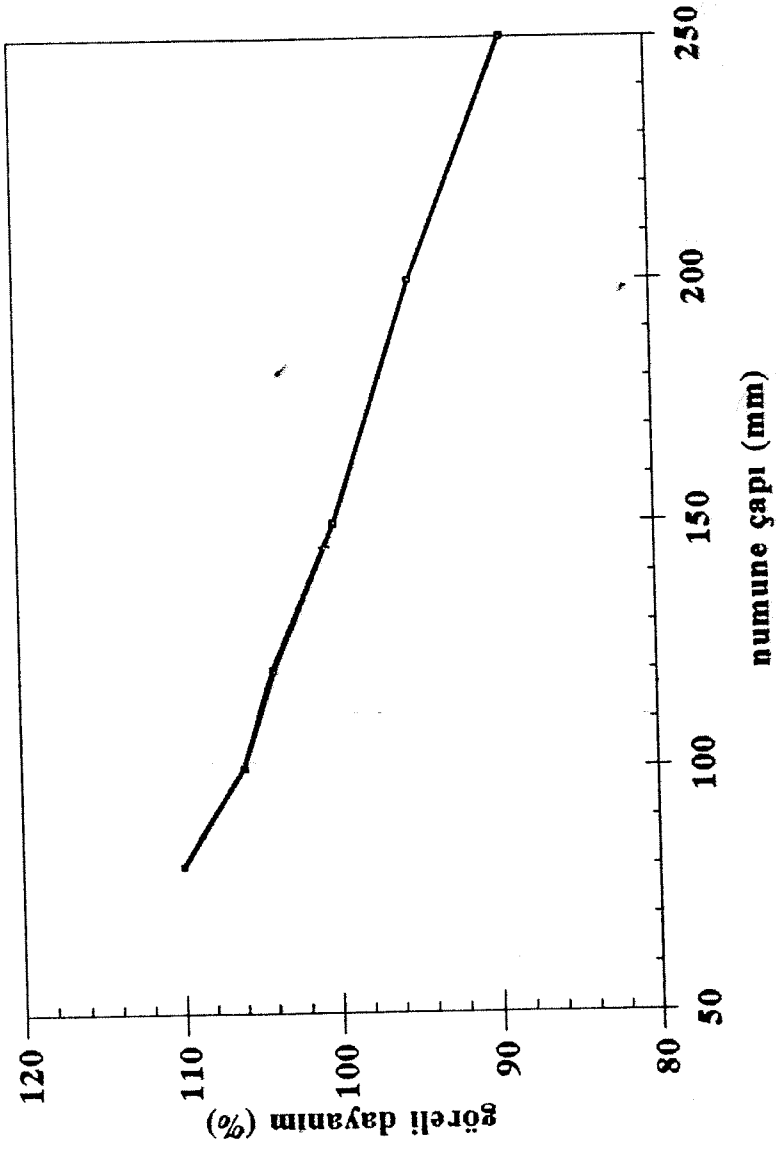
Küp ve silindir numunelerden elde edilen dayanım sonuçlarının bir diğerine çevrilmesi için yapılan çalışmalardan [Held, 1990; Smeplass, 1989] elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1 ve 6.2'de verilmiştir. Ayrıca, numune boyutu ve şeklinin dayanıma olan etkisiyle ilgili olarak



Şekil 6.1. Boy-çap oranı 2.00 olan değişik boyutlardaki silindirik numunelerin basınç dayanımlarının karşılaştırılması [Neville, A.M., 1973]



Şekil 6.2. Silindir Boyutlarının dayanıma etkileri (DSİ, 1977)



Şekil 6.3. Küp boyutlarının dayanıma etkisi [DSİ, 1977]

$P/P_6=0.56+0.697)(d/[(V/6h)+h])$ bağıntısı önerilmiştir. Burada, P: herhangi bir numunenin dayanımı; P₆: standart silindir numunenin dayanımı; d: numunenin en küçük yanal boyutu; V: numunenin hacmi ve h: numunenin boyudur.

Çizelge 6.1. Küp ve Silindir Numuneler İçin Dayanım Çevirme Katsayıları [Held, 1990].

Numune	100mm küp	150mm küp	200mm küp	150x300mm sil.
100mm küp	1	0.99	0.95	0.82
150mm küp	-	1	0.96	0.83
200mm küp	-	-	1	0.87

Çizelge 6.2. Değişik Dayanım Düzeylerindeki Betonlar İçin Küp-Silindir Çevirme Katsayıları [Smeplass, 1989].

100mm küp basınç dayanımı (MPa)	100x300mm silindir	150x300mm silindir
66	0.73	0.75
80	0.73	-
97	0.77	0.77
115	0.82	0.83

Silindir numunelerde göz önünde bulundurulması gereken bir başka husus da boy-çap oranıdır (l/d). Söz konusu etki için ASTM C 42 ve BS 1881 standartlarında önerilen düzeltme katsayıları grafik olarak Şekil 6.4'de verilmiştir.

6.2. Deneysel Çalışma

Araştırmanın bu bölümünde deneysel çalışma iki ana kısımda yürütülmüştür. 28 günlük karakteristik basınç dayanımları (f_{ck}) 40, 60 ve 70MPa olan betonlar kullanılarak

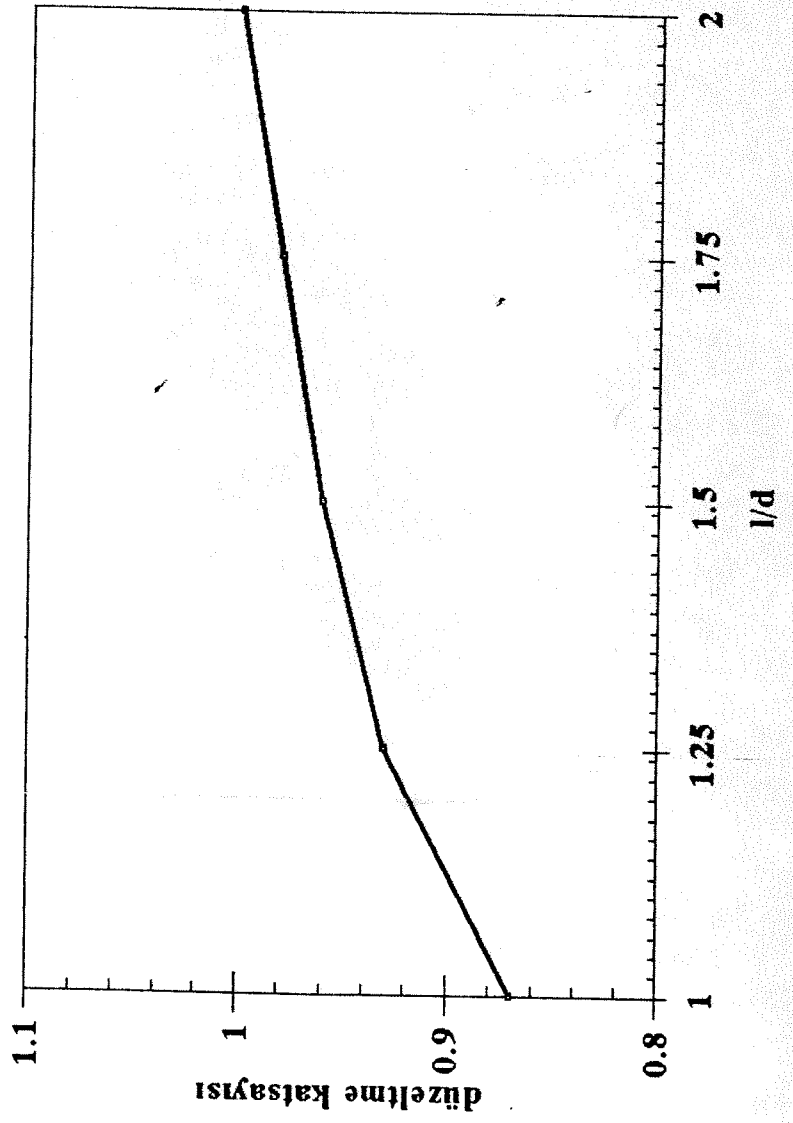
a) l/d=2.00 olan değişik çaplardaki silindir numuneler ve değişik boyutlardaki küp numuneler üzerindeki boyut etkisi ve

b) silindir numunelerde l/d oranının değişmesinin etkileri araştırılmıştır.

Bu bölümde kullanılan beton karışım oranları Çizelge 6.3'de verilmiştir. Tüm karışımlarda çökme değeri 50-70mm arasında tutulmuştur. Kullanılan malzemelerin özellikleri Raporun 2. Bölümünde verilmiştir.

Çizelge 6.3. YDBlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Beton Karışım Oranları (kg/m³)

Malzeme	Beton Sınıfı		
	BS40	BS60	BS70
Çimento	555	555	555
Su (net)	212	126	109
0/3mm kum (DYK)	466	466	623
3/7mm k.taş (DYK)	232	232	358
7/15mm k.taş (DYK)	864	864	802
YAK (ML2)	5.55	28	42.4
Mikrosilis	-	-	55
S/Ç (net)	0.38	0.23	0.20



Çizelge 6.3'de verilmiş olan karışımlardan değişik boyutlarda silindir ve küp numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan numune boyutları Çizelge 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. YDBlarda Numune Boyut ve Geometrisinin Etkilerinin Belirlenmesinde Kullanılan Numune Boyutları

Numune	l/d	boyutlar (mm)
silindir	0.67	100x150
	1.00	150x150
	1.33	150x200
	1.67	150x250
	2.00	150x300
silindir	2.00	75x150
		100x200
		150x300
		200x400
küp	-	75
		100
		150
		200

Çizelge 6.4'de verilen değişik l/d oranındaki numuneler standart (150x300mm) numuneler kesilerek elde edilmiştir. Tüm numuneler üzerinde eşdeğer sıkıştırma uygulanmıştır. TS 3068 "Laboratuarda Beton Test Numuneleri Yapım ve Bakımı"nda belirtilen şişleme yöntemiyle yapılan sıkıştırma ile ilgili bilgiler Çizelge 6.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.5. Değişik Boyutlardaki Numunelere Uygulanan Sıkıştırmalar

Silindir çapı veya küp boyutu (mm)	Şişleme çubuğu çapı (mm)	Tabaka sayısı	Her tabakada şişleme sayısı
75	10	3	25
100	10	3	25
150	16	3	25
200	16	4	50

Tüm numuneler %95+5 BN ve $23 \pm 2^\circ\text{C}$ koşullarında deney zamanına kadar sürekli rutubetli bakıma tabi tutulmuşlardır. Daha sonra, 3, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

6.3. Deney Sonuçları

Yapılan deneylerde beton basınç dayanımı, silindir numunelerin boy-çap oranı (l/d) ve numune boyutu parametre olarak alınmıştır. Boy-çap oranı standart (2.00) olan numunelerde boyut etkisi ile ilgili deney sonuçları Çizelge 6.6'da, standart çapta (150mm) ve değişik boyutlardaki silindir numunelerle ilgili deney sonuçları Çizelge 6.7'de ve küp numunelerde boyut etkisi ile ilgili deney sonuçları Çizelge 6.8'de verilmiştir. Bu çizelgelerdeki her bir değer altı numunenin ortalamasıdır.

6.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

6.4.1. Silindir ve Küp Numunelerde Boyut Etkisi

Çizelge 6.6 incelendiğinde, silindir numunelerde, boyut standart numune boyutunun (150x300mm) üstünde olduğunda görünür dayanım standart numune dayanımından daha düşük olmaktadır. Bu sonuç literatüre uygundur. Beton numune boyutunun büyümesi, numunedeki hatalı eleman olasılığını artırdığından, dayanımın azalmasına yol açmaktadır.

Öte yandan, bu araştırmada standart boyutlardan küçük olan numunelerde elde edilen sonuçlar literatürde verilenlerle tam uyum içinde değildir. Şekil 6.5'de bu araştırmadan elde edilen sonuçlar ile literatürde normal dayanımlı betonlar için verilmiş olan değerler karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. BS40, BS60 ve BS70 için ayrı ayrı belirlenen numune çapı-dayanım ilişkisi bir de her üç sınıf betonun ortalaması olarak gösterilmiştir.

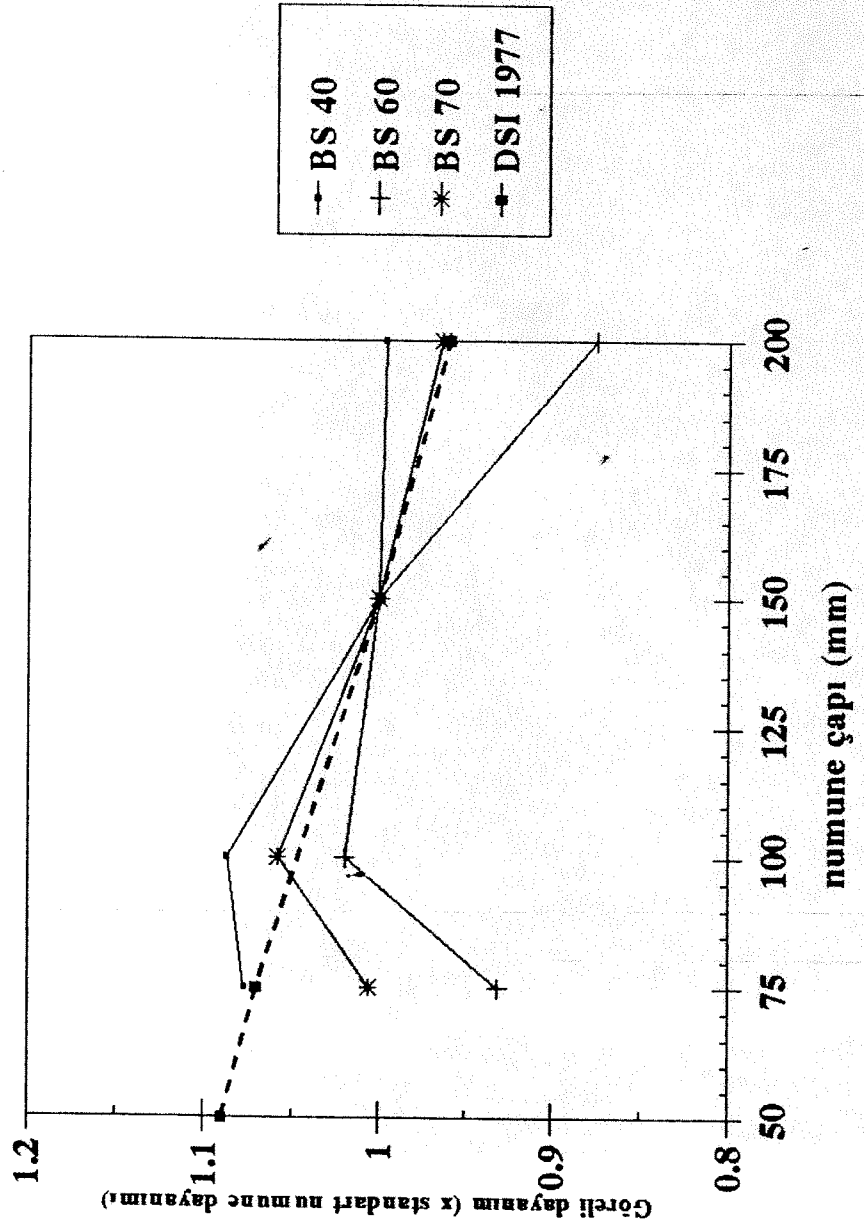
Çizelge 6.6. Boy-Çap oranı 2.00 Olan Değişik Boylardaki Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları

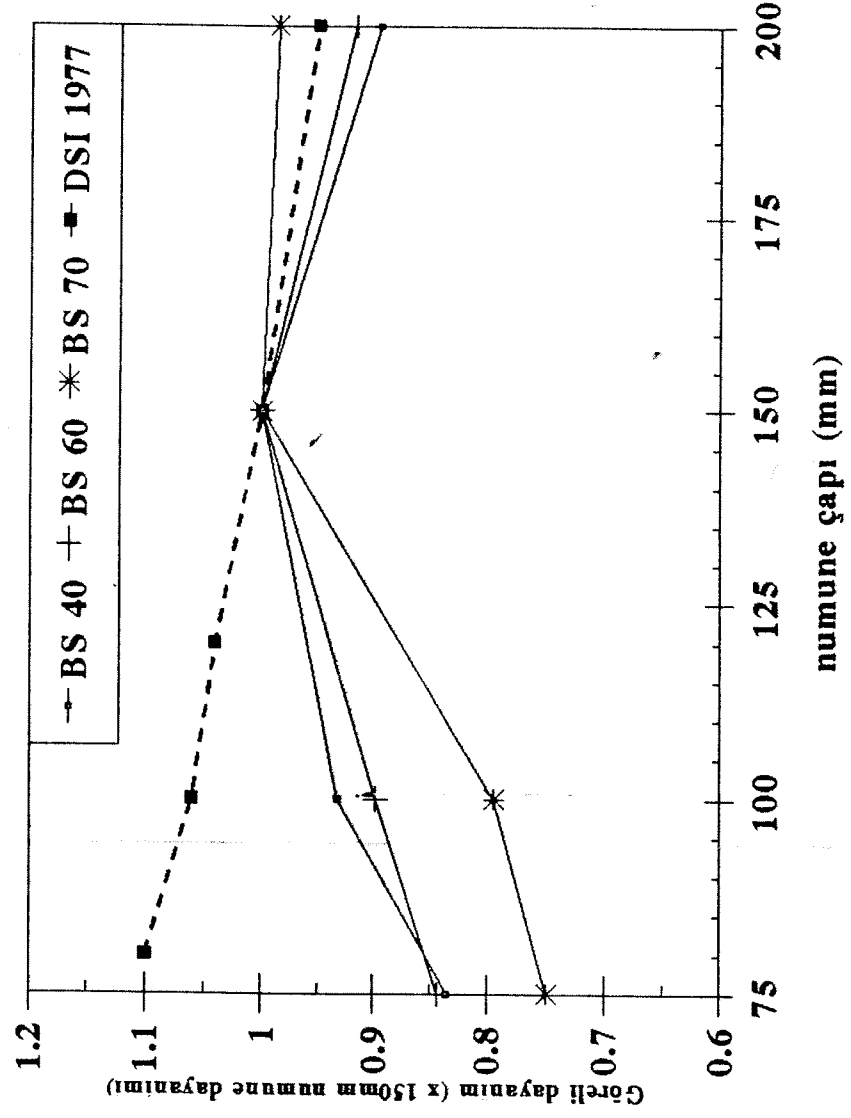
Beton Sınıfı	Numune Boyutları (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)			
		3G	7G	28G	90G
BS40	75x150	18.69	31.80	40.77	45.63
	100x200	19.17	33.70	41.14	49.31
	150x300	20.17	31.29	37.85	40.47
	200x400	20.47	28.00	37.72	40.16
BS60	75x150	32.31	44.16	53.62	68.39
	100x200	35.49	45.26	58.77	71.93
	150x300	32.68	43.46	57.60	65.68
	200x400	29.65	39.61	50.39	58.83
BS70	75x150	40.92	56.19	72.13	77.17
	100x200	42.12	57.36	75.82	84.41
	150x300	40.54	56.14	71.67	83.29
	200x400	38.14	51.23	69.06	71.85

Çizelge 6.7. Değişik Boy-Çap Oranlarındaki Silindir Numunelerin Basınç Dayanımları

Beton Sınıfı	l/d	Basınç Dayanımı (MPa)			
		3G	7G	28G	90G
BS40	0.67	23.00	34.95	46.92	57.96
	1.00	23.15	35.95	46.19	57.06
	1.33	23.84	35.04	45.99	56.40
	1.67	23.08	34.61	45.92	56.15
	2.00	21.61	32.80	45.76	54.80
BS60	0.67	36.08	43.36	61.35	69.66
	1.00	32.65	47.19	63.92	69.92
	1.33	30.50	46.84	62.15	69.07
	1.67	29.60	45.45	61.22	68.53
	2.00	29.50	43.97	60.52	66.53
BS70	0.67	36.15	51.54	73.80	79.98
	1.00	37.53	53.15	79.92	81.69
	1.33	37.77	52.61	74.62	80.46
	1.67	37.23	51.61	72.88	77.77
	2.00	37.16	51.15	70.44	74.99

Şekil 6.5'de deneysel çalışmadan elde edilen sonuçların küçük silindir numunelerde (75x150mm) olması gerekenden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, 75mm'lik küp numunelerde de, Şekil 6.6'da görüldüğü gibi literatürde belirtilenin aksine sonuçlar elde edilmiştir. 100x200mm boyutlu silindir numunelerde dayanım, beklendiği gibi, standart numune dayanımından yüksek çıkmıştır. Benzeri bir durum, 150mm küp numunelerde görülmüştür.





Şekil 6.6. Bu araştırmada elde edilen kúp numuneler için boyut-dayanım ilişkisi

Çizelge 6.8. Değişik Boyutlardaki Küp Numunelerin Basınç Dayanımları

Beton Sınıfı	Numune Boyutu (mm)	Basınç Dayanımı (MPa)			
		3G	7G	28G	90G
BS40	75	4.54	10.85	42.61	51.38
	100	16.65	27.62	47.60	55.56
	150	17.60	29.66	51.04	55.15
	200	16.31	24.97	45.67	49.75
BS60	75	6.47	27.12	58.11	63.71
	100	18.48	40.06	61.77	65.24
	150	28.24	47.81	68.81	78.59
	200	28.03	47.69	63.10	71.05
BS70	75	7.41	30.48	62.33	64.52
	100	20.42	43.83	66.06	69.72
	150	30.84	54.30	83.21	86.44
	200	30.45	53.72	82.06	84.51

Numune boyutları küçüldükçe daha yükselmesi beklenen dayanım değerlerinin 75mm küp ve 75x150mm silindir numunelerde literatürde belirtilenin aksine çıkmasını iki açıdan açıklamak mümkündür:

1. Duvar Etkisi: Beton numunelerin üretiminde, boyut sınırını "duvar etkisi" (wall effect ya da l'effet de paroi) denilen ekiden kaynaklanabilmektedir [Neville, 1973]. Kalıp duvarı ile agregalar arasında kalan boşlukların doldurulması için gerekli çimento hamuru miktarı betonun iç kısımlarında agregalar arasındaki boşlukları doldurmak için gerekenden daha fazladır. Dolayısıyla, bir beton karışımındaki harç ya da çimento hamuru miktarı kalıp yüzeyine yakın yerlerde yeterli olamayabilmektedir. Bu etki numunelerin taze haldeyken iyi sıkıştırılabilmelerini engellemektedir. Duvar etkisi, numunenin yanal yüzey alanı-hacim oranı arttıkça daha fazla kendisini göstermektedir.

Araştırmanın bu bölümünde kullanılan numune boyutlarının yanal yüzey alanı-hacim oranları Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Numunelerin Yanal Yüzey Alanı-Hacim Oranları (A_y/V)

Numune Boyutları (mm)	A_y/V
75x150 (silindir), 75 (küp)	0.53
100x200 (silindir), 100 (küp)	0.40
150x300 (silindir), 150 (küp)	0.27
200x400 (silindir), 200 (küp)	0.20

Çizelge 6.9'da görüldüğü gibi, YDBIlarda 100x200mm'den küçük silindir ya da 100mm'den küçük küp numunelerin kullanılması durumunda "duvar etkisi"nin kendisini gösterdiğini söylemek mümkündür.

2. Rötire Etkisi: Yüzey alanı-Hacim oranının etkili olduğu bir başka durum da rötredir. Araştırmanın bu bölümünde kullanılan bütün numuneler kür odasında 95 ± 5 BN ortamında bakıma tabi tutulmuş olmakla birlikte bu yükseklikte bir rutubet oranında dahi rötire söz konusu olmaktadır [Neville, Dilger ve Brooks, 1983].

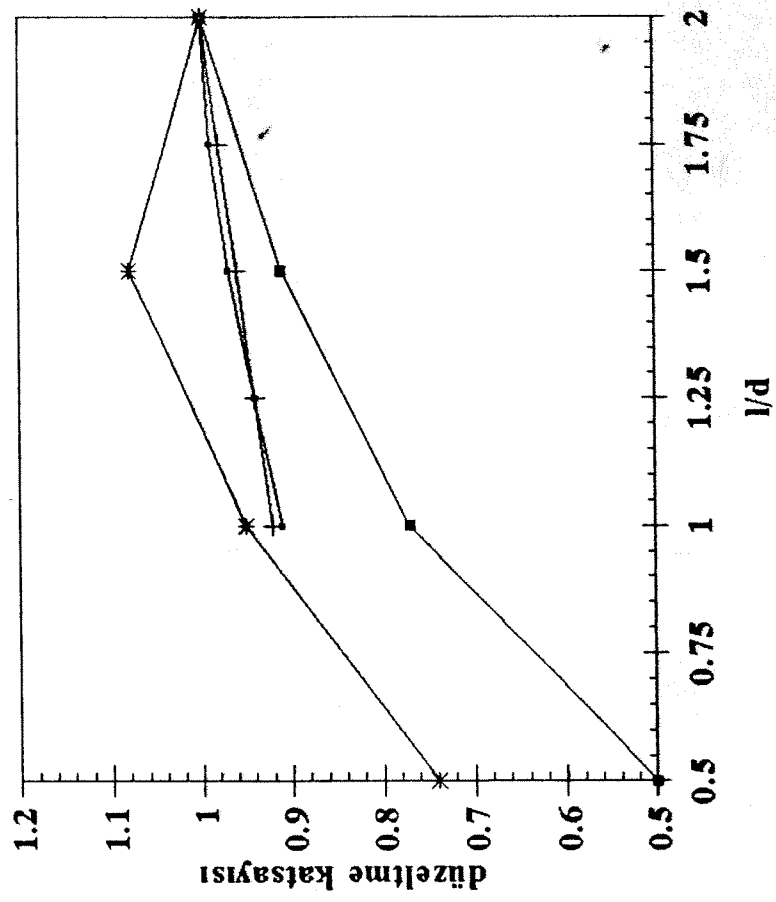
Numunenin boyutları (A/V oranı) numuneden su kaybını ve dolayısıyla rötreyi etkileyen önemli bir parametredir. Bazant ve Panula'nın [Neville, Dilger ve Brooks, 1983] önerdiği rötire modeli uygulandığında 75x150mm'lik silindir numunelerin, standart numunelere oranla, 3 gün içinde, yaklaşık iki kat daha fazla rötire deformasyonu gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, küçük numunelerde görülen daha yüksek rötire de bunların dayanım bakımından literatürde belirtilenin tesine bir davranış göstermesinin nedeni olarak düşünülebilir.

"Duvar etkisi" kp numunelerde silindir numunelerle aynı mertebede olurken (Ay/V oranları aynı) rötre etkisi küplerde daha belirgindir (3 günlük rötre 75mm'lik kp numunelerde standart 200mm'lik numuneye göre 2.5 kat daha fazladır).

6.4.2. Silindir Numunelerde Boy-Çap Oranının Etkileri

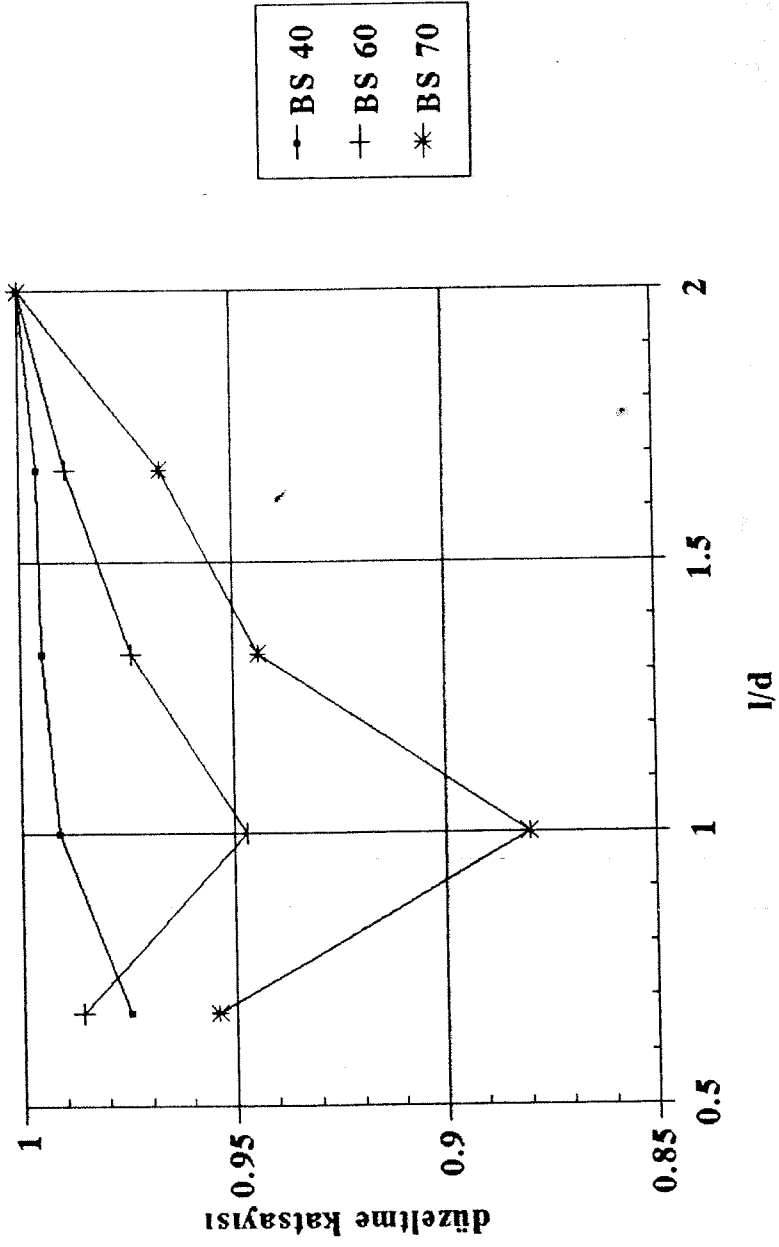
Standart silindir numunelerde boy-çap oranı (l/d) 2.00'dir. Ancak, özellikle beton karot numunelerde bu oran her zaman sağlanamadığından, değişik l/d değerleri söz konusu olabilmektedir. Bu çeşit numunelerden elde edilen basınç dayanımlarının standart numune dayanımına çevirimi için çeşitli bağıntılar bulunmaktadır. ASTM C 42 ve BS 1881'de verilen ve Murdock ve Kesler'in araştırma sonuçlarından elde edilen grel dayanımlar Şekil 6.7'de verilmiştir [Murdock ve Kesler, 1957].

Bu araştırmada elde edilen l/d-dayanım ilişkileri ise Şekil 6.8'de verilmiştir. Grldğu gibi, l/d etkisi YDB'larda çok belirgin değildir. Dolayısıyla, Murdock ve Kesler tarafından belirtilen "yüksek dayanımlı betonların l/d oranındaki değişimlerden fazla etkilenmediği" [Murdock ve Kesler, 1957] bu deneyler sonucunda da gözlenmiştir.



- - ASTM C42
 + BS 1881
 * [17] 52MPa
 - [17] 14MPa

Şekil 6.7. ASTM C 42, BS 1881 ve Murdock ve Kesler'a göre l/d - dayanım ilişkileri



Şekil 6.8. Bu araştırmada elde edilen l/d - dayanım ilişkileri

7. Değişik Bakım Yöntemlerinin Dayanıma Etkileri

YDBIlarda standart rutubetli bakımla buhar bakımı ve düşük sıcaklıkta bakım sonucunda elde edilen basınç dayanım değerlerinin karşılaştırmasını yapmak üzere % 0, 3, 5, 7 yüksek akışkanlaştırıcı katkı ve % 10 SB, % 10 TB ve % 10 MS mineral katkıları içeren beton numunelerin a) 23°C ve % 95 BN, b) 6 saat 70°C buhar bakımını takip eden standart bakım ve c) 5°C ve % 95 BN ortamlarında bakım yapılmış ve 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir.

Ayrıca, YDBIlarda 28 günlük basınç dayanımlarının kısa sürede tahmin edilebilirliği, aynı betonlarda a) kendi kendine bakım (autogeneous curing), b) sıcak su bakımı ve c) kaynar su bakımı yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır.

7.1. Kullanılan Beton Karışım Oranları

Değişik bakım yöntemlerinin etkilerinin belirlenmesinde kullanılan beton karışımları Çizelge 7.1'de verilmiştir. Bu karışımlardan, her bakım koşulu için, 7, 28 ve 90 gün yaşlarında basınç dayanımı deneyine tabi tutulmak üzere altışar standart silindirik numune hazırlanmıştır. Aynı şekilde, sıcak su ve kaynar su hızlandırılmış bakım yöntemleri için de altışar numune kullanılmıştır. Kendi kendine bakım yönteminde ise, bakım kabının boyutlarının getirdiği kısıt nedeniyle dörder numune kullanılmıştır.

Çizelge 7.1. Değişik Bakım Yöntemlerinin Karşılaştırmasında Kullanılan Beton Karışımları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	Su (net) (kg/m ³)	0/3mm kum (DYK) (kg/m ³)	3/7mm k.taş (DYK) (kg/m ³)	7/15mm k.taş (DYK) (kg/m ³)	YAK (kg/m ³)	Mineral Katkı (kg/m ³)
K	550	224	645	370	830	-	-
3Y	550	184	645	370	830	16.5	-
5Y	550	159	645	370	830	27.5	-
7Y	550	155	645	370	830	38.5	-
10SB	550	144	590	370	830	42.4	55
10TB	550	159	577	370	830	42.4	55
10MS	550	122	587	370	830	42.4	55

Çizelge 7.1'de belirtilen karışımlardan K, kontrol karışımı, $f_{ck28} = 40\text{MPa}$ olacak şekilde hesaplanmıştır. Y karışımlarında ML2 yüksekakışkanlaştırıcı katkı çimento miktarının %3, 5 ve 7'si oranında (sırasıyla 3Y, 5Y ve 7Y) kullanılmıştır. Diğer üç karışımda ise çimentonun ağırlıkça %10'u oranında mineral katkı (SB ve TB uçucu külleri ve MS), özgül ağırlıkları oranında ince agregadan eksiltmek suretiyle, kullanılmıştır. Mineral katkı içeren karışımlarda ayrıca çimento ağırlığının %7'si kadar ML2 kullanılmıştır. Tüm karışımlarda çökme değeri 50-70mm arasında tutulmuştur.

7.2. Deneysel Çalışma

Bu bölümde uygulanan standart bakım, buhar bakımı ve düşük sıcaklıkta bakım şematik olarak Şekil 7.1'de gösterilmiştir. Adı geçen bakım koşullarında deney zamanına kadar tutulan numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Hızlandırılmış bakım yöntemleri TS 3323 "Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

7.3. Deney Sonuçları

Standart, buhar ve düşük sıcaklıkta bakımı yapılan YDB numunelerinin değişik yaşlardaki basınç dayanımları Çizelge 7.2'de verilmiştir. Hızlandırılmış bakım sonucunda elde edilen dayanım değerleri ise Çizelge 7.3'de verilmiştir. Bu değerler kendi kendine bakım yöntemi için $49h \pm 15min$, sıcak su yöntemi için $26h \pm 15min$ ve kaynar su yöntemi için $28.5h \pm 15min$ yaşlarında elde edilmiş sonuçlardır.

Çizelge 7.2. Standart, Buhar ve Düşük Sıcaklıkta Bakımı Yapılan YDBların Değişik Yaşlardaki Basınç Dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)								
	23°C, %95 BN			6h buhar+standart bakım			5°C, %95 BN		
	7G	28G	90G	7G	28G	90G	7G	28G	90G
K	27.5	39.1	45.3	30.1	38.6	42.9	21.5	28.9	33.5
3Y	44.2	47.8	53.0	47.3	48.2	51.7	36.6	45.9	50.9
5Y	52.8	59.5	66.8	55.6	60.0	65.6	45.1	54.5	62.4
7Y	53.8	60.4	67.2	55.8	60.7	66.1	44.9	54.7	65.3
10SB	45.4	60.3	71.0	48.7	63.9	72.8	41.7	52.9	65.3
10TB	45.5	58.2	68.9	46.2	60.6	71.3	32.6	43.7	64.0
10MS	49.7	65.5	73.8	52.6	66.2	74.4	39.5	51.8	65.7

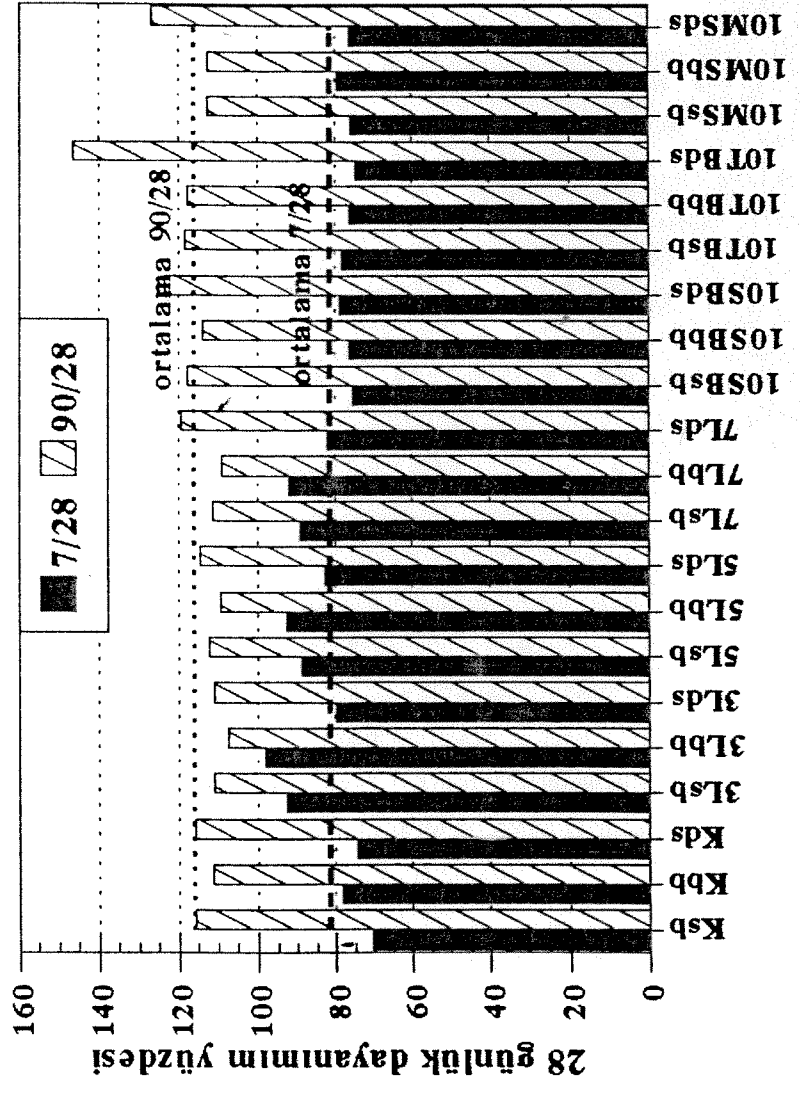
Çizelge 7.3. Hızlandırılmış Bakım Yöntemleri Sonucunda Elde Edilen Basınç Dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)		
	Kendi kendine bakım	Sıcak su bakımı	Kaynar su bakımı
K	12.7	15.8	12.5
3Y	20.0	19.7	15.7
5Y	26.0	24.8	18.5
7Y	29.5	29.6	21.3
10SB	18.7	18.9	15.9
10TB	16.3	16.8	14.5
10MS	18.9	19.1	16.4

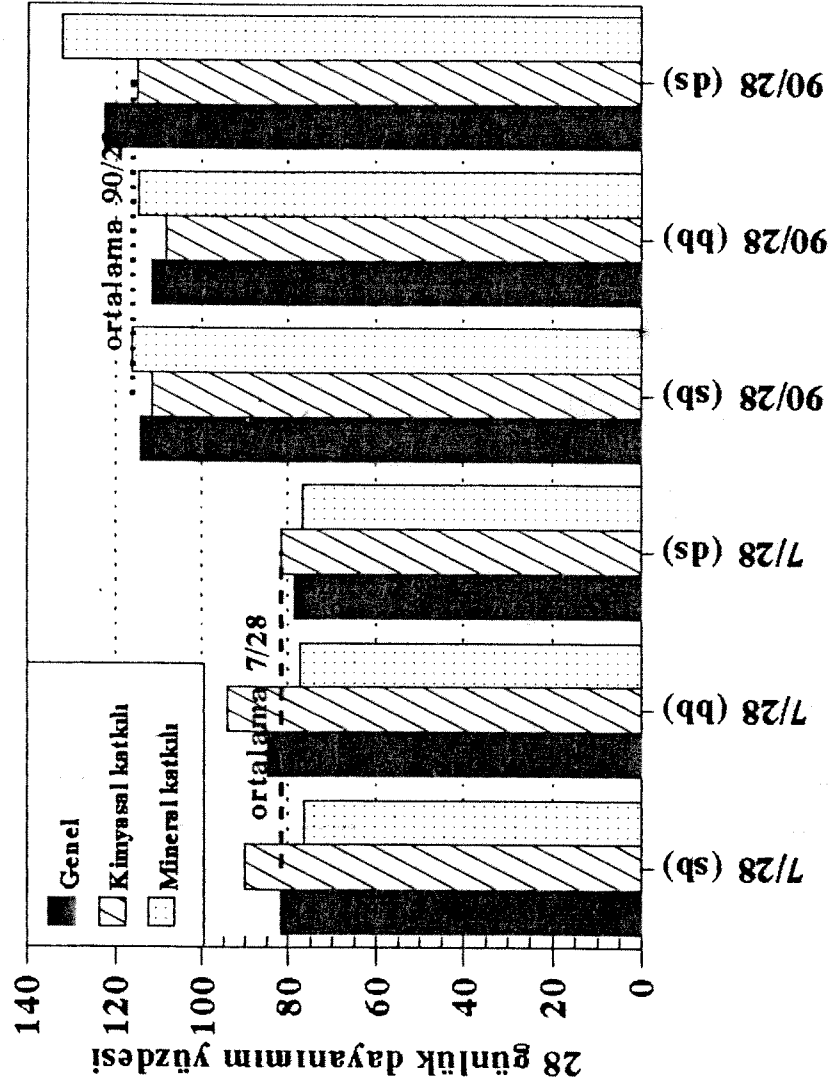
7.4. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

7.4.1. Değişik Bakım Koşullarında Yaş-Dayanım İlişkisi

7 ve 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük dayanıma oranları, üç değişik bakım koşuluna, kullanılan YAK miktarına ve mineral katkı cinsine göre farklılıklar göstermiştir. Bu oranlar, kullanılan her karışım için, Şekil 7.1'de gösterilmiştir. 7 gün-28 gün dayanım oranları (7/28) % 70.33 ile % 98.13 arasında bulunmuş olup ortalama % 81.49'dur. 90 gün-28 gün dayanım oranları için ise bu değerler sırasıyla, %107.26, %146.45 ve %116.05 olarak bulunmuştur. Bakım koşullarının ve YAK ya da mineral katkı kullanımının etkileri tek tek incelendiğinde elde edilen sonuçlar Çizelge 7.4'de özetlenmiştir. Bu Çizelgede göze çarpan bir kaç önemli noktaya değinmek gerekmektedir. (1) Kullanılan kimyasal katkının aynı zamanda bir miktar hızlandırıcı etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle 7/28 oranları genel ortalamanın üstünde çıkmıştır. Söz konusu hızlandırıcı etki bakım sıcaklığı arttıkça daha belirginleşmektedir. (2) Mineral katkı kullanımında 7/28 oranlarında bakım koşullarının fazla bir etkisi bulunmamaktadır. (3) YAK kullanıldığında buhar bakımı, diğer bakım koşullarına göre, daha düşük 90/28 oranına neden olmaktadır. Diğer bir deyişle, buhar bakımı YAK içeren betonlarda geç yaşlarda görece dayanım düşüşlerine yol açmaktadır. (4) Düşük sıcaklık koşulunda mineral katkılı betonlarda elde edilen çok yüksek 90/28 oranı bu katkıların geç yaşlarda kendisini gösteren puzolanik etkilerine bağlanabilir. Çizelge 7.4'de verilen sonuçlar şematik olarak Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Beton karışımları



Şekil 7.2. 7/28 ve 90/28 dayanım oranlarının analizi

Çizelge 7.4. Değişik Bakım Koşullarının, YAK ve Mineral Katkı Kullanımının YDBların 7 ve 90 Günlük Dayanımlarının 28 Günlük Dayanıma Oranlarına Etkileri

Bakım	7/28 Dayanım Oranı			90/28 Dayanım Oranı		
	Tüm numuneler	YAKlı numuneler	MKlı numuneler	Tüm numuneler	YAKlı numuneler	MKlı numuneler
Standart	81.42	90.09	76.45	114.15	111.47	116.26
Buhar+St.	84.66	94.24	77.30	111.52	108.50	114.66
Düşük sıcaklık	78.38	81.52	76.56	122.49	114.92	132.24

Araştırmanın bu bölümünde kullanılan üç değişik bakım koşulu altında elde edilen dayanım değerleri ile "olgunluk derecesi" arasındaki ilişkilerin üstsel bağıntılarla ifade edilebileceği belirlenmiştir. Olgunluk hesaplamalarında $M = \Sigma(\theta + 10) \Delta t$ formülü kullanılmıştır. Burada, M: olgunluk ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{gün}$); Δt : süre (gün); θ : Δt süresindeki sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) tir.

Katkısız kontrol betonu için bulunan bağıntı ile mineral katkı ve YAK içeren betonlar için bulunan bağıntıların birbirine benzemesine karşın yalnızca YAK içeren betonlarda durum daha farklıdır. Şekil 7.3'de gösterilmiş olan olgunluk-dayanım ilişkileri için belirlenen üstsel regresyonlarla ilgili bilgiler Çizelge 7.5'de verilmiştir.

Çizelge 7.5. Olgunluk-Dayanım İlişkileriyle İlgili İstatistiksel Bilgiler

Karışım	Üstsel Regresyon Denklemi	Korelasyon Katsayısı, r
K	$\sigma = 9.46 M^{0.194}$	0.863
3Y	$\sigma = 27.19 M^{0.084}$	0.770
5Y	$\sigma = 29.99 M^{0.101}$	0.865
7Y	$\sigma = 29.58 M^{0.105}$	0.833
10SB	$\sigma = 18.93 M^{0.170}$	0.900
10TB	$\sigma = 13.30 M^{0.213}$	0.876
10MS	$\sigma = 18.73 M^{0.176}$	0.870

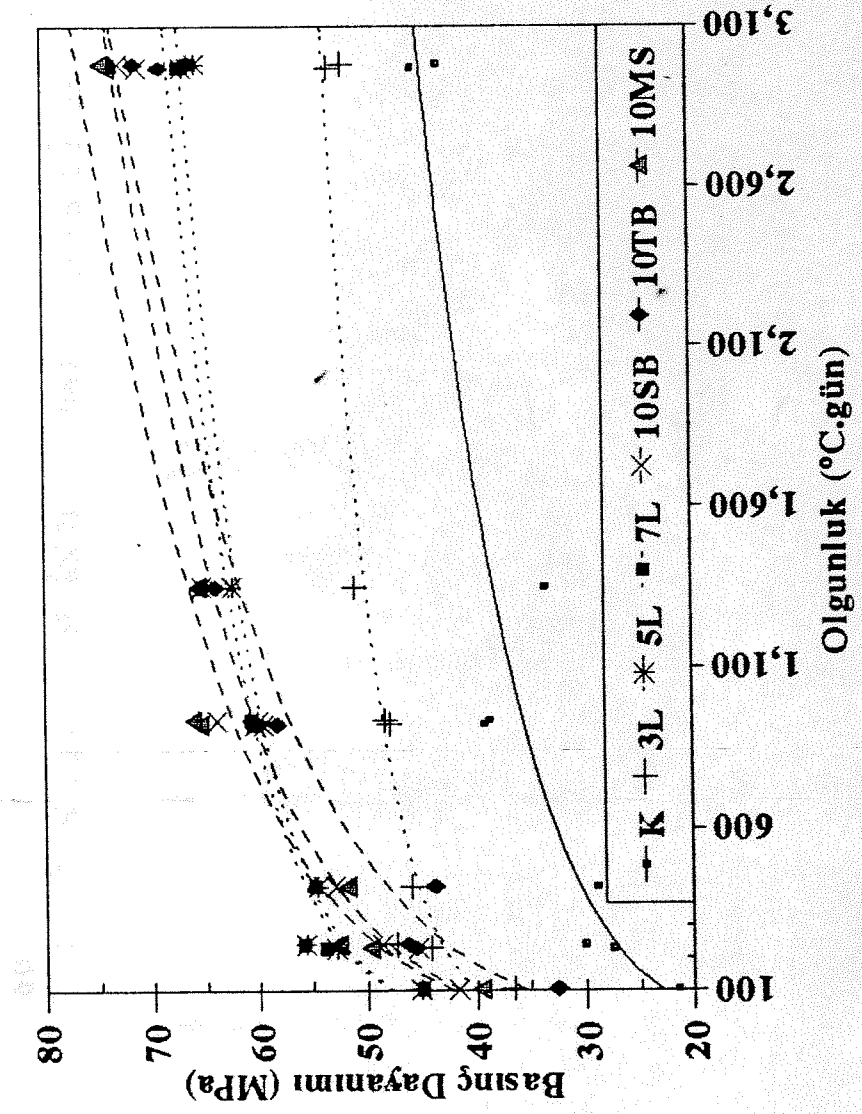
7.4.2. Hızlı Bakım Yöntemlerine İlişkin Sonuçların İrdelenmesi

Mineral katkı ve/veya kimyasal katkı içeren YDBların hızlı bakım yöntemleri kullanılarak elde edilen erken dayanımları ile 28 günlük standart bakım koşulundaki dayanımların karşılaştırılması Şekil 7.4'de verilmiştir. Bu ilişkilerin matematiksel olarak ifade edilebilirliği araştırılmış ve istatistiksel analizler sonucunda 28 günlük dayanımlarla hızlı bakım dayanımları arasındaki ilişkilerin üstsel olarak ifade edilebileceği belirlenmiştir. Ancak, yalnızca kimyasal katkı içeren betonlarla mineral ve kimyasal katkı içeren betonların davranışları farklı olmuştur. Mineral katkılı betonlarda elde edilen sonuçlar doğrusal regresyona çok yakın olduğundan, pratik açıdan, birer doğru denklemiyle ifade edilmeleri uygun bulunmuştur. Yapılan regresyon analizlerine ilişkin bilgiler Çizelge 7.6'da, böylece elde edilen grafikler ise Şekil 7.5'de verilmiştir.

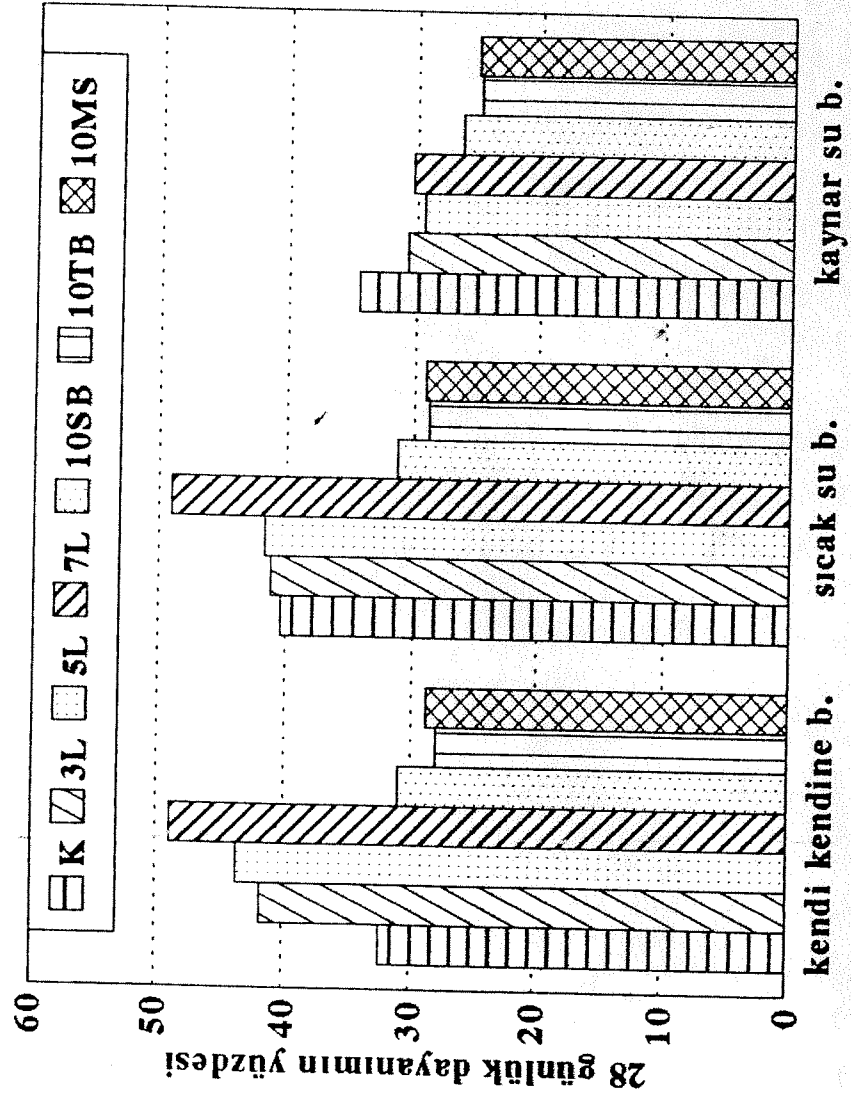
Çizelge 7.6. Standart Bakım Dayanımlarıyla Hızlı Bakım Dayanımları Arasındaki İlişkilere Ait İstatistiksel Bilgiler*

Bakım Yöntemi	Kimyasal Katkılı Betonlar		Mineral Katkılı Betonlar	
	Regresyon Denklemi	r	Regresyon Denklemi	r
kbb	$\sigma_{hb} = e^{0.036\sigma + 1.19}$	0.99	$\sigma_{hb} = 0.24\sigma + 3.21$	0.96
ssb	$\sigma_{hb} = e^{0.026\sigma + 1.73}$	0.95	$\sigma_{hb} = 0.12\sigma + 10.86$	0.87
ksb	$\sigma_{hb} = e^{0.022\sigma + 1.68}$	0.96	$\sigma_{hb} = 0.10\sigma + 9.22$	0.91

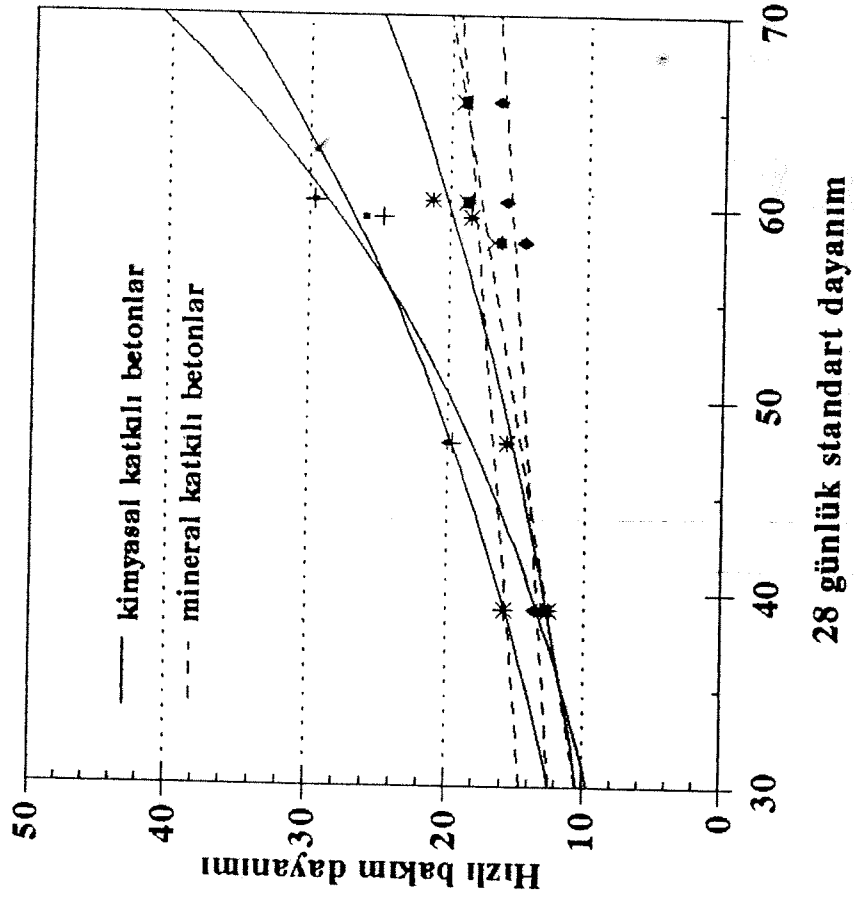
* Dayanımlar MPa cinsindedir.



Şekil 7.3. Değişik bakım koşullarında üretilen betonların olgunluk-dayanım ilişkisi



Şekil 7.4. Hızlı bakım dayanım sonuçlarının 28 günlük standart dayanımlarla karşılaştırılması



Şekil 7.5. Hızlı bakım dayanımları ile 28 günlük standart dayanımlar arasındaki ilişkiler

Hızlı bakım dayanımlarının 28 günlük dayanıma oranları, yalnız kimyasal katkı kullanılan betonlarda, ortalama olarak kendikendine bakım için 0.41, sıcak su bakımı için 0.43 ve kaynar su bakımı için 0.33 olarak belirlenmiştir. Mineral katkı içeren betonlarda ise bu oranlar, sırasıyla, 0.29, 0.30 ve 0.25 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.6'da verilen üstel regresyon ifadeleri daha düşük korelasyon katsayıları ile doğrusal regresyon olarak da verilebilir. Benzer bir yaklaşım Akman [Akman, 1993] tarafından benimsenmiştir. Ancak aynı makalede belirtildiği gibi, YDBların hızlı bakım sonucunda elde edilen dayanımları ile 28 günlük standart dayanımları arasındaki ilişkiler için henüz genel ifadeler vermek mümkün değildir.

8. Yüksek Dayanımlı Betonların Dayanıklılık Özellikleri

Bilindiği gibi, YDBların yalnız dayanımları yüksek olmakla kalmayıp, genel performansları da yüksektir. Bu durumun araştırmada kullanılan bazı karışımlardan elde edilen numuneler üzerinde tesbiti için 1) Hızlandırılmış Karbonatlaşma, 2) Donma-Çözülme, 3) Sülfat Direnci ve 4) Rötire deneyleri yapılmıştır. Deney yöntemleri ve elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerde verilmiştir.

İlk üç deneyde kullanılan beton karışımları Çizelge 8.1'de verilmiştir. Rötire deneylerinde ise beton numuneler yerine karışımların harç bölümünü temsil eden numuneler kullanılmıştır.

Çizelge 8.1. Karbonatlaşma, Donma-Çözülme ve Sülfat Direnci Deneylerinde Kullanılan Beton Karışımları (kg/m³ beton)

Karışım	Açıklama	Çimento	Su	0/3mm kum	3/7mm k.taş	7/15mm k.taş	YAK	MK
K	Kontrol	550	224	645	370	830	-	-
3L	%3 YAK	550	184	645	370	830	16.5	-
5L	%5 YAK	550	159	645	370	830	27.5	-
7L	%7 YAK	550	155	645	370	830	38.5	-
10SB	%10 SB	550	144	590	370	830	42.4	55
10TB	%10 TB	550	159	577	370	830	42.4	55
10MS	%10 MS	550	122	587	370	830	42.4	55

8.1. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyleri

Hazırlanan silindir numuneler 7, 28 ve 90 gün sürelerle standart rutubetli bakıma tabi tutulduktan sonra içindeki CO₂ konsantrasyonu %4 olan 20±2°C sıcaklık ve %55±5 BN deki karbonatlaşma kabineine konulmuşlardır. Daha sonra, 4, 8 ve 16 hafta burada tutulan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri, numuneler ortadan ikiye yarıldıktan sonra, fenolftalein uygulaması sonucunda ortaya çıkan renk değişikliğinin boyunun mikroskopla beş değişik yerde belirlenmesiyle ölçülmüştür. Bu deneylerde, her yaş için dörder numune kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları

Karışım	Karbonatlaşma Derinliği (mm)								
	7gün bakımdan sonra			28gün bakımdan sonra			90gün bakımdan sonra		
	4hafta	8hafta	16hafta	4hafta	8hafta	16hafta	4hafta	8hafta	16hafta
K	0.5	1.8	2.7	0.3	1.0	2.0	-	0.5	0.7
3L	-	1.4	2.1	-	0.7	1.2	-	0.2	0.2
5L	-	1.0	2.0	-	0.4	0.9	-	-	0.2
7L	-	0.9	2.0	-	0.5	0.9	-	-	0.2
10S	-	1.0	2.0	-	0.5	1.0	-	0.2	0.3
10T	-	0.8	2.0	-	0.5	0.9	-	0.3	0.3
10SF	-	0.8	1.8	-	0.3	0.7	-	-	0.2

8.2. Donma-Çözülme Deneyleri

Hazırlanan standart silindir numunelerin üç adedi 28 günlük standart rutubetli bakımdan sonra ayrıca 28 gün süreyle -20°C'deki derin dondurucu içinde 8 saat tutulduktan sonra çıkarılıp 16 saat süreyle su içinde bekletilmişler ve 56 gün yaşında basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Ayrıca, her karışımdan üçer numune 28 günlük üçer numune de 56 günlük standart bakımdan sonra basınç altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 8.3'de verilmiştir.

Çizelge 8.3. Donma-Çözülme Deney Sonuçları

Karışım	28 günlük dayanım σ _{28st} (MPa)	56 günlük dayanım σ _{56st} (MPa)	Donma-Çözülme sonrasında 56 günlük dayanım σ _{56dç} (MPa)
K	38.3	41.7	31.9
3L	49.7	52.3	44.7
5L	60.7	63.3	58.4
7L	61.3	63.7	59.6
10S	59.6	62.1	49.5
10T	60.1	62.0	47.4
10SF	66.8	70.5	64.9

8.3. Sülfat Direnci Deneyleri

Çizelge 8.1'de verilmiş olan karışımlardan hazırlanan 150mm'lik küp numuneler %10 Na₂SO₄ içeren eriyik içine batırılmış ve agregalar için uygulanan dona dayanıklılık deneyine benzer şekilde 16 saat eriyikte, 8 saat 110°C sıcaklıktaki etüvde tutulmuşlardır. 4 ay süreyle her gün bu işlem tekrarlanmış olmakla birlikte numunelerde bir değişiklik meydana gelmemiştir. Bu deneyler Na₂SO₄ konsantrasyonu artırılarak sürdürülmektedir.

8.4. Rötire Deneyleri

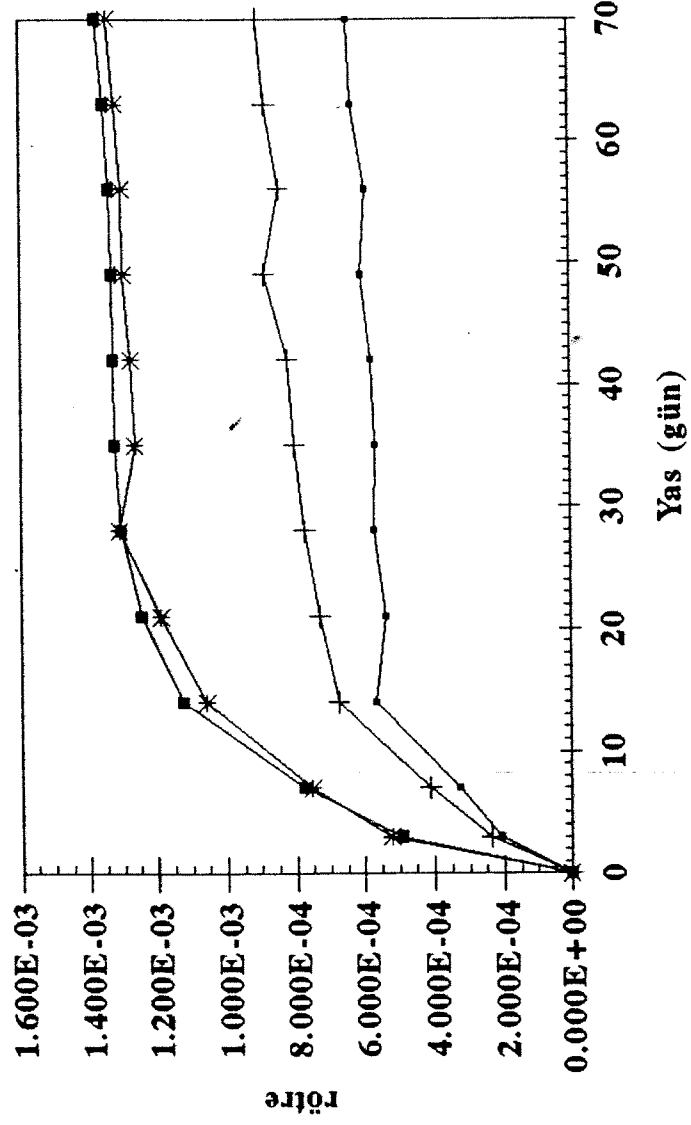
Rötire deneyleri için 25x25x285mm harç prizmalar hazırlanmıştır. Numuneler 7 gün süreyle rutubetli bakıma tabi tutulduktan sonra ilk boyları ölçülmüş ve 3, 7, 14, 21, 28, 35 ve 42 gün sonra tekrar boy ölçümleri yapılmıştır. Rötire ölçümleri 20°C ve %55 BN ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan karışımlar Çizelge 8.4'de verilmiştir.

Çizelge 8.4. Rötire Deneylerinde Kullanılan Harç Karışımları (4 numune için)

Karışım	Çimento (g)	Kum (g)	Min. Katkı (g)	Kim. Katkı (g)	Su (g) (%110 akma için)
K	500	1375	-	-	267
3L	500	1375	-	15	183
5L	500	1375	-	25	176
7L	500	1375	-	35	167
10S	450	1375	40	-	227
20S	400	1375	78	-	227
10T	450	1375	35	-	235
20T	400	1375	65	-	243
10SF	450	1375	37	-	239
20SF	400	1375	74	-	269

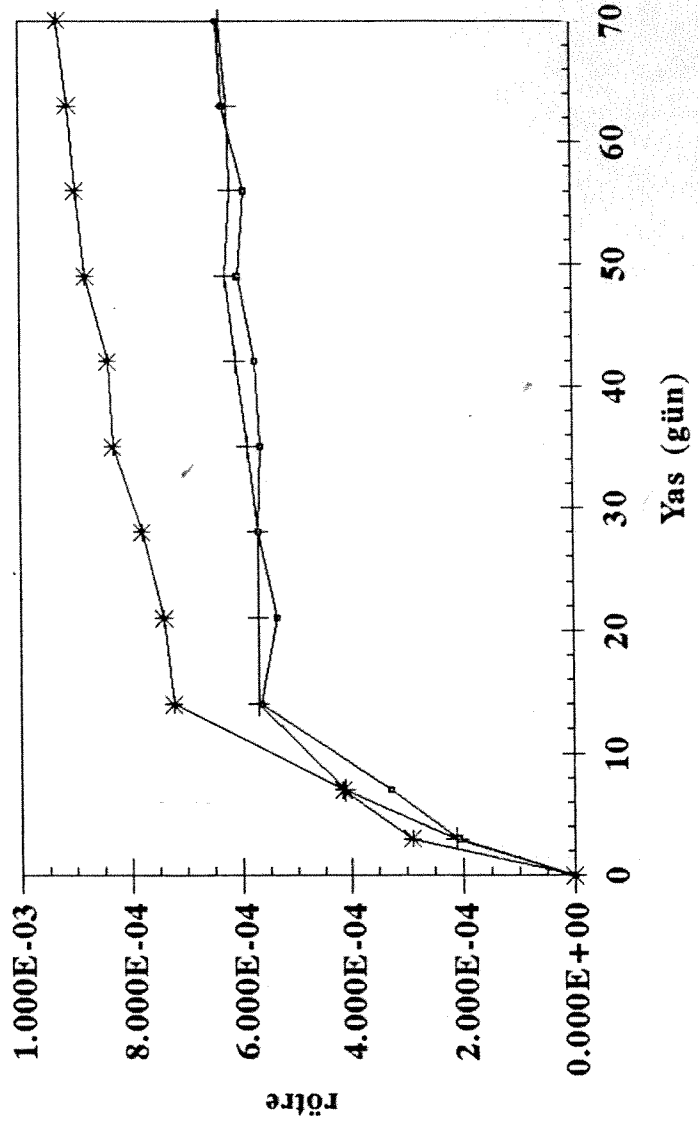
Elde edilen deneysel sonuçlar grafik olarak, sırasıyla, YAK içeren karışımlar (3L, 5L ve 7L), yüksek kireçli uçucu kül içeren karışımlar (10S ve 20S), düşük kireçli uçucu kül içeren karışımlar (10T ve 20T) ve mikrosilis içeren karışımlar (10SF ve 20SF) için, kontrol numuneleriyle karşılaştırılmalı olarak Şekil 8.1, 8.2, 8.3 ve 8.4'de gösterilmiştir.

— K + 3L * 5L — 7L



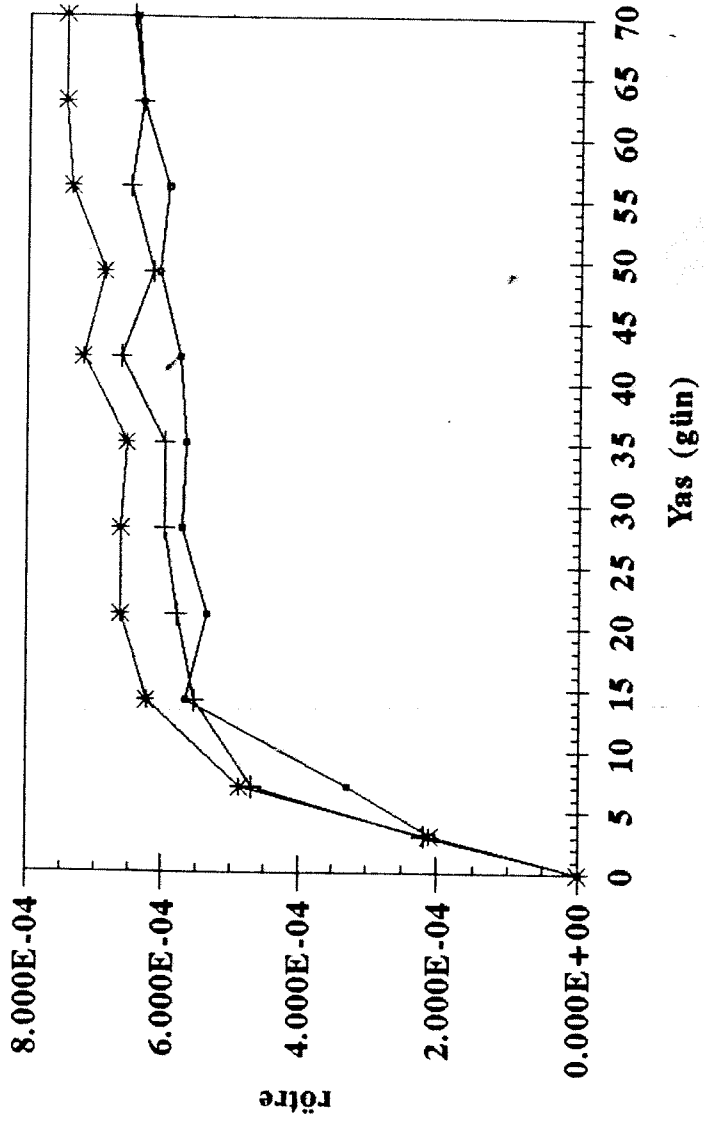
Şekil 8.1. YAK içeren karışımlarda rötre

— K + 10S * 20S

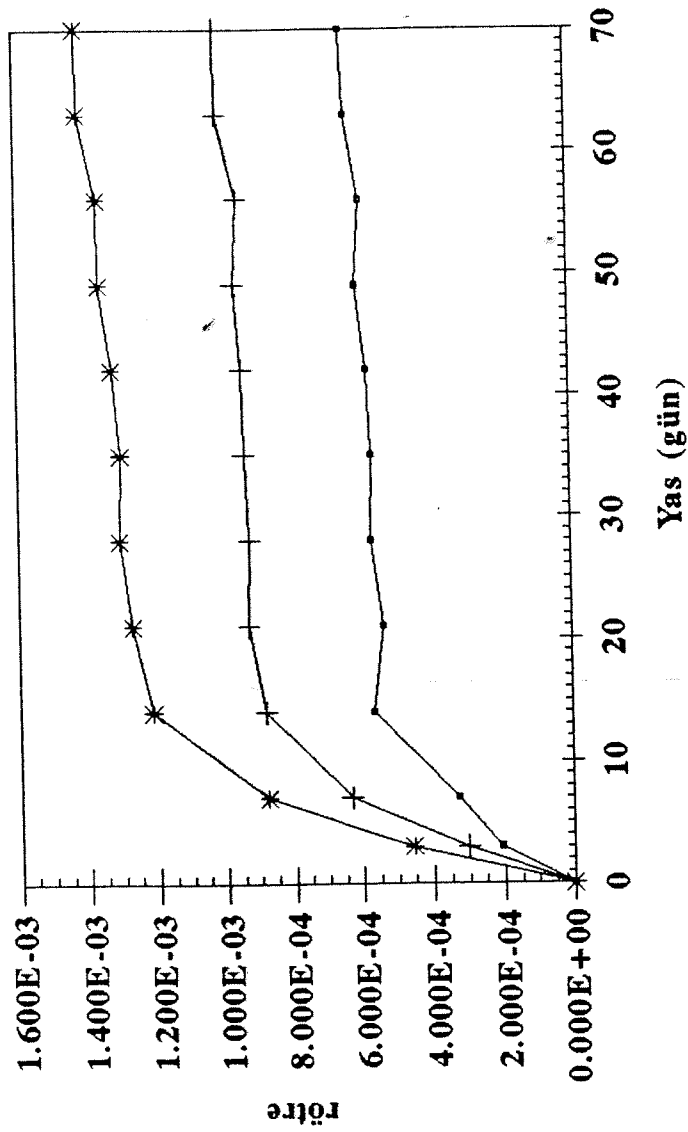


Şekil 8.2. SB içeren karışımlarda rölre

→ K + 10T * 20T



—K + 10MS * 20MS



Şekil 8.4. MS içeren karışımlarda rötre

8.5. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi ve Yorumlar

Gerek su azaltıcı gerekse mineral ve su azaltıcı katkı kullanımı betonların karbonatlaşma direncini artırmaktadır. Donma-Çözülme deneyleri sonucunda da düşük kireçli uçucu kül kullanımı dışında, benzer bir iyileşme söz konusudur. Her iki durumda da en önemli etken karışımların azalan su miktarı ve dolayısıyla daha düşük geçirimsiliğe sahip olmasıdır. Öte yandan, rötre hem YAK hem de MK kullanımıyla artış göstermektedir. Ancak, erken yaşlarda hızlı olan bu artış daha sonra hemen hemen asimptotik bir durum arz etmektedir.

9. Genel Sonuçlar

Proje kapsamında yapılan tüm deneylerden elde edilen sonuçların irdelenmesi ve yorumlar Raporun ilgili bölümlerinde ayrıntılı olarak verilmiş olmakla birlikte, çıkarılan bazı genel sonuçlar bu bölümde verilmiştir.

1. Kullanılan su azaltıcı katkıları arasında en olumlu sonuçlar melamin formaldehid esaslı olanlarla elde edilmiştir. Katkı miktarı-Su azalması ve Katkı miktarı-Dayanım ilişkilerini logaritmik denklemlerle ifade etmek mümkündür.
2. YDB'larda yüksek akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanılmış olmalarına karşın, sabit bir işlenebilirlik için, uçucu küller karışım suyu gereksinmesini artırmaktadır. Bu etki en bariz şekilde uçucu küllerin çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere kullanıldığı durumlar ve düşük kireçli uçucu küllerde gözlenmiştir. Öte yandan, mikrosilis, YAKlarla kullanıldığı takdirde, su gereksinmesini azaltmaktadır.
3. Dayanımlar açısından, mikrosilis uçucu küllere göre daha etkindir. Bu etkinlik özellikle erken yaşlarda daha belirgindir.
4. Mineral katkı içeren YDB'larda dayanım-elastisite modülü ilişkisi literatürde normal dayanımlı betonlar için verilmiş olan formüllerle uyum göstermektedir. Statik ve dinamik elastisite modülleri arasındaki ilişki için de aynı durum söz konusudur.
5. Araştırmada kullanılan dört değişik agrega arasında en yüksek dayanımlar kireçtaşı ile elde edilmiştir. Söz konusu durum, histeresis çevrimlerinin daha dar ve kapanmayan kısımlarının daha az olması ve dolayısıyla agrega-matriks ara yüzeyinin daha kuvvetli olmasıyla açıklanmıştır.
6. Elastisite Modülünün basınç dayanımından tahmini için literatürde verilen formüller değişik agregalar kullanılarak üretilen YDB'lar için de geçerlidir.
7. Maksimum agrega boyutunun 16mm'nin üstünde olduğu durumlarda, su-çimento oranında önemli bir değişiklik olmamakla birlikte, agregaların spesifik yüzeyindeki azalma ve dolayısıyla agrega-matriks ara yüzeyi dayanımının azalması nedeniyle YDB'ların basınç dayanımları bariz şekilde düşmektedir.
8. YDB'ların basınç dayanımı deneylerinde numune boyutlarının silindirler için 100x200mm, küpler için 100mm'nin üstünde olması daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Numune boyutlarının bunların altında olması "çeper etkisi" ve olası rötre etkisi nedeniyle görünür dayanımlarda, literatürün aksine, azalmaya neden olmaktadır.
9. Silindir numunelerin basınç deneylerinde, boy-çap oranı YDB'larda belirgin değildir.
10. Değişik bakım koşulları altında elde edilen basınç dayanımları ile olgunluk derecesi arasındaki ilişkiler YDB'lar için üstsel denklemlerle ifade edilebilir. Mineral katkı ve YAK'ı birlikte içeren YDB'larla katkısız kontrol betonlarında bu ilişki benzer şekildedir. Ancak, yalnız YAK içeren betonlarda üstsel denklemin katsayıları farklıdır.
11. Gerek YAK gerekse mineral katkı içeren YDB'ların hızlı bakım sonucunda elde edilen dayanımlarının standart bakım sonucunda bulunanlarla ilişkisi üstsel denklemlerle ifade edilebilmektedir. Ancak, mineral katkılı betonlarda bu ifade doğrusal denklemlere çok yakındır.
12. YDB'ların normal betonlara göre dayanıklılık bakımından daha iyi performans gösterdikleri bilinmektedir. Ancak, kendi içlerinde kıyaslandıklarında, YDB üretiminde mineral katkı olarak düşük kireçli uçucu kül kullanımı, su gereksinmesini ve dolayısıyla geçirimsizliği artırdığından, bir miktar performans düşüklüğüne neden olmaktadır.

Kaynaklar

1. ACI Committee 212, Chemical Admixtures for Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 86, 297-325, (1989).
2. ACI Committee 363, State-of-the-Art Report on High Strength Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 81, 4, 364-411, (1984).
3. Akman, M.S., Yüksek Performanslı Betonların Basınç Dayanımlarının Erken Tahmini, *Teknik Dergi*, 4, 2, 675-680, (1993).
4. Baalbaki, et.al., Influence of Coarse Aggregate on Elastic Properties of High Performance Concrete, *ACI Materials Journal*, 88, (1991).
5. Carasquillo, P.M. ve Carasquillo, R.C., Evaluation of the Current Concrete Practice in Production of High Strength Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 85, 1, 49-54, (1988).
6. Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W. ve Davis, H.E., Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash, *ACI Journal, Proceedings*, 33, 577-612, (1937).
7. de Larrard, F., Ultrafine Particles for Making very High Performance Concretes, *High Performance Concrete*. ed: Malier, Y., E&FN Spon, Londra, (1993), s. 34-47.
8. Dhir,
9. Giocchio, G. et.al., High Strength Concrete Incorporating Different Types of Coarse Aggregates, *ACI Materials Journal*, 90, (1992).
10. Gjorv, O.E., High Strength Concrete, *Advances in Concrete Technology*. ed: Malhotra, V.M., CANMET, (1992), s. 21-78.
11. Held, M., Research Results Concerning the Properties of High Strength Concrete, *Darmstadt Concrete*, 5, (1990).
12. Lessard, M. ve Aitcin, P.C., Testing High Performance Concrete, *High Performance Concrete*. ed: Malier, Y., E&FN Spon, Londra, (1993), s. 196-213.
13. Malhotra, V.M., Are 4x8 Inch Concrete Cylinders As Good As 6x12 Inch Cylinders for Quality Control of Concrete?, *Journal of American Concrete Institute*, 73, 1, 33-36, (1976).
14. Malhotra, V.M., Carette, G.G. ve Sivasundaram, V., Role of Silica Fume in Concrete, *Advances in Concrete Technology*. ed: Malhotra, V.M., CANMET, (1992), 73s.
15. Mehta, P.K. ve Aitcin, P.C., Effect of Coarse Aggregate Characteristics on the Mechanical Properties of Concrete, *ACI Materials Journal*, 103, (1990).
16. Mindess, S. ve Young, J.F., *Concrete*, Prentice Hall Inc., New Jersey, (1981).
17. Murdock, J.W. ve Kesler, C.E., Effect of Length to Diameter Ratio of Specimen on Apparent Compressive Strength of Concrete, *ASTM Bulletin*, Nisan, 68-73, (1957).
18. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, Halstead Press, NewYork, (1973).
19. Neville, A.M., Dilger, G. ve Brooks, J., *Creep of Plain and Structural Concrete*,

20. Özdemir, M., Specimen Size and Shape Effect on Compressive Strength of High Strength Concrete, (Y. Lisans Tezi), O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, (1994).
21. Parrot, L.J., *A Literature Review of High Strength Concrete*, British Cement Association, Londra, (1988). 87s.
22. Rixom, M.R. ve Mailvaganam, N.P., *Chemical Admixtures for Concrete*, E&FN Spon, Londra, (1986).
23. Sarkar, S.L. ve Aitcin, P.C., The Importance of Petrological, Petrographical and Mineralogical Characteristics of Aggregates in Very High Strength Concrete, *ASTM Symposium on Petrography Applied to Concrete and Concrete Aggregates*, St. Louis, (1989), 16s.
24. Smeplass, W., *High Strength Concrete*, Trondheim, (1989).
25. Tokyay, M., Effect of a High-calcium Fly Ash and a Low-calcium Fly Ash on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars, (Doktora Tezi), O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, (1987).
26. Wolsiefer, J., Ultra High-Strength Field Placeable Concrete With Silica Fume Admixtures, *Concrete International*, 6, 4, 25-31, (1984).
27. *Betonda İd İndeksine Göre Basınç Mukavemeti Tahmini Esasları*, D.S.İ, (1977).
28. Chemical Admixtures for Concrete, *Concrete International*, 15, 10, 48-53, (1993).
29. *Yüksek Dayanımlı Beton*, 2. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, (1991), 454s.
30. *High Strength Concrete*, ACI SP-87, (1985), 278s.
31. *High Strength Concrete*, ACI SP-121, (1990), 786s.
32. *High Strength Concrete*, State-of-the-Art Report, FIP/CEB, (1990), 61s.
33. N.S. 3473, *Concrete Structures and Design Rules* (Norveç Standardı), (1989).
34. *Utilization of High Strength Concrete*, Stavanger, (1987), 688s.
35. *Very High-strength Cement-based Materials*, Materials Research Society Proceedings, 42, (1985), 688s.