

33623

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ \*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI

BETON BASINÇ DAYANIMININ ERKEN TAHMİNİNDE KULLANILAN  
STANDART SICAK SU YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

İnş.Yük.Müh. Şirin KURBETCİ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde

"Doktor"

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 15.01.1993

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 04.05.1993

Tezin Danışmanı :Prof.Dr. İlhan SUNGUR

Jüri Üyesi :Prof.Dr. Süheyl AKMAN

Jüri Üyesi :Prof.Dr. Ahmet DURMUŞ

Enstitü Müdürü :Prof.Dr. Temel SAVAŞKAN

Ocak - 1993

TRABZON

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖNSÖZ

Bu çalışma KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda, doktora tezi olarak sunuldu.

Beton basınç dayanımının erken tahmininde kullanılan standart sıcak su yönteminin geliştirilmesi'ni içeren bu tezin deneysel kısmı KTÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirildi.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof.Dr. İlhan SUNGUR'a teşekkür ederim.

Çalışmamın konusunu önererek, her aşamasında zaman ayırıp yakın ilgilerini esirgemeyen, değerli düşünce ve deneyimlerinden yararlandığım Sayın Prof.Dr. Erbil ÖZTEKİN'e teşekkürü zevkli bir borç bilirim.

Çalışmamı, jüri üyeliğini kabul ederek inceleyen, yapıcı eleştiri, öneri ve düzeltmeleriyle son şeklini almasında katkıları olan değerli hocalarım Sayın Prof.Dr. Süheyl AKMAN ve Sayın Prof.Dr. Ahmet DURMUŞ'a teşekkür ederim.

Güçlüklerle dolu deneysel çalışma süreci, teknisyen Sabit UZUN ve teknisyen yardımcısı Hayri ÇAKIR'ın özverili katkılarıyla gerçekleşti. Kendilerine içten teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerini gördüğüm laboratuvar arkadaşlarıma, tezin yazım ve çizim aşamasında katkıda bulunan mimar Ömer ÖKTEN'e mimar Taşkın ÖZER'e, Türkün SÜMERKAN'a ve tezi daktilo ederek her aşamasında özveriyle desteğini esirgemeyen Temel TOSUN'a teşekkür ederim.

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışma boyunca desteğini esirgemeyen eşime minnettarım.

Ocak, 1993

Şirin KURBETCİ

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
BİRİM DÖNÜŞÜMLERİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. BETONA UYGULANAN HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ VE ISIL İŞLEMLER-GENEL BİLGİLER	4
2.1 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ	4
2.1.1 İlk Çalışmalar	4
2.1.2 İngiltere'deki Çalışmalar ve Standartlaşma	5
2.1.3 Diğer Avrupa Ülkelerindeki Çalışmalar	8
2.1.4 Kanada'daki Çalışmalar ve Standartlaşma	11
2.1.5 A.B.D.'deki Çalışmalar ve Standartlaşma	14
2.1.6 Diğer Ülkelerdeki Çalışmalar	17
2.1.7 Türkiye'deki Çalışmalar ve Standartlaşma	20
2.2 ISIL İŞLEMLER	22
2.2.1 Isıl İşlemin Fiziksel ve Yapısal Analizi	23
2.2.1.1 Kalıcı Hacim Artışı	23
2.2.1.2 Isıl Gerilmeler	24
2.2.1.3 Su Kaybı	25
2.2.1.4 Yapısal Analiz	25
2.3 ISIL İŞLEMİN MEYDANA GETİRDİĞİ DEĞİŞİMLER AÇISINDAN STANDART HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİNİN ELEŞTİRİSİ	27
2.3.1 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Sağlaması Gereken Koşullar	32
2.4 AMAÇ VE İÇERİK	33
BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
3.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER, ALETLER VE DENEYLERİN YAPILIŞI	35
3.1.1 Kullanılan Malzemeler	35
3.1.2 Kullanılan Aletler	44
3.1.3 Beton Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması	48
3.1.4 Hızlandırılmış Kür Uygulaması	49

	<u>Sayfa</u>
3.1.5 Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi	51
3.2 DENEY PROGRAMI	51
3.2.1 Hızlandırılmış Kür Çevriminin Belirlenmesi	51
3.2.2 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Denenmesi	51
3.2.3 Çevrim Parametrelerindeki Sapmaların Etkisi	52
3.2.4 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Yüksek Dayanımlı Betonlara Uygulanması	52
3.3 DENEY PROGRAMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE DENEY SONUÇLARI	53
3.3.1 Hızlandırılmış Kür Çevriminin Belirlenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları	53
3.3.1.1 Son Bekleme (Soğuma) Süresinin Belirlenmesi	53
3.3.1.2 Hızlandırılmış Kür Sıcaklığının Belirlenmesi	57
3.3.1.3 Ön Bekleme Süresinin Belirlenmesi	60
3.3.2 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Denenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları	61
3.3.3 Çevrim Parametrelerindeki Sapmaların Etkisinin Belirlenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları	63
3.3.4 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Yüksek Dayanımlı Betonlara Uygulanmasına İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları	67
BÖLÜM 4. İRDELEME VE YORUM	70
4.1 HIZLANDIRILMIŞ KÜR ÇEVİRİMİNİN BELİRLENMESİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU	70
4.1.1 Son Bekleme Süresi	70
4.1.2 İşlem Sıcaklığı	71
4.1.3 Ön Bekleme Süresi	71
4.1.4 Belirlenen Hızlandırılmış Kür Çevrimi	72
4.2 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN DENENMESİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU	73
4.2.1 İki Hızlandırılmış Yöntem Arasındaki İlişki	73
4.2.2 Hızlandırılmış Dayanım-Standart Dayanım İlişkisi	77
4.2.3 Bileşim Parametrelerinin İlişkiler Üzerinde Etkisi	84
4.3 ÇEVİRİM PARAMETRELERİNDEKİ SAPMALARIN ETKİSİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU	89
4.4 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARA UYGULANMASINA İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU	91

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5. SONUÇ	98
KAYNAKLAR	101
EKLER	106
EK 1. BETON BİLEŞİM HESABI ÖRNEĞİ	107
EK 2. HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN DENENMESİNE İLİŞKİN AYRINTILI SONUÇLAR	110
EK 3. YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARLA İLGİLİ DENEYLERE İLİŞKİN AYRINTILI SONUÇLAR	114
EK 4. VARYANS ANALİZİ HESABI	116
EK 5. GÜVEN ARALIKLARININ EĞRİSEL OLARAK HESABI	118
ÖZGEÇMİŞ	122

## BİRİM DÖNÜŞÜMLERİ

TEKİL YÜK			
kN	N	kgf	lbf
1	$10^3$	100	224.82
$10^{-3}$	1	0.1	0.22
$10^{-2}$	10	1	2.25
$4 \times 10^{-3}$	4.45	0.45	1

BASINÇ VE GERİLME		
MPa (N/mm <sup>2</sup> )	kgf/cm <sup>2</sup>	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
1	10	145.04
0.1	1	14.22
$7 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-2}$	1

## ÖZET

Günümüzün en yaygın yapı malzemelerinden biri olan betonun kalitesi, genel olarak 28 günlük basınç dayanımıyla belirlenir. Fakat günümüzde betonun basınç dayanımının sınıf dayanımına uygunluğunu belirlemek için geçen 28 günlük süre içinde binlerce metreküp beton dökülebilmekte, onlarca kat inşa edilebilmektedir. Bu nedenle üretilen beton kalitesinin en kısa sürede belirlenmesi gereği ortaya çıkmış ve "sıcak su", "kaynar su" ve "otojen kür" gibi yöntemler geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır.

Çalışmanın temel amacı ısıtılma işleminin zararlı etkilerini göz önünde bulundurarak en aza indirgeyen, daha etkin ve hassas tahmine olanak sağlayan optimal bir hızlandırılmış kür yöntemi geliştirilmesidir. Bunun için mevcut sıcak su yöntemi esas alınarak geliştirilmesi planlanmış, yöntemin bir ısıtılma işlem sistematikliği içinde ele alınması benimsenmiştir.

Çalışmada önce genel olarak ısıtılma işlemlerinin betonda oluşturduğu değişimler ve hızlandırılmış kür yöntemleri üzerine yapılan yayın taraması özetle verilmiş, ısıtılma işlem yaklaşımı içinde standart hızlandırılmış kür yöntemlerinin eleştirisi yapılarak optimum hızlandırılmış kür yöntemlerinin nitelikleri belirtilmiştir.

DeneySEL çalışmanın ilk aşamasında yöntemin çevrim parametreleri; ön bekleme süresi 1 saat, işlem sıcaklığı 43°C, işlem süresi 21 saat, son bekleme süresi 2 saat, toplam süre 24 saat olarak belirlenmiştir.

İkinci aşamada, "değiştirilmiş sıcak su yöntemi" olarak isimlendirilen bu yöntem, mevcut sıcak su yöntemiyle paralel olarak 49 ayrı betona uygulanarak, hızlandırılmış dayanım değerlerinin dağılımı ve tahminin hassasiyeti karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Üçüncü aşamada, çevrim parametrelerinde olabilecek sapmaların hızlandırılmış dayanımlar üzerindeki etkisi incelenerek tolerans sınırları belirlenmiştir.

DeneySEL çalışmanın son aşamasında ise yöntemin dünyada giderek yaygın uygulama bulan yüksek dayanımlı betonlara uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Sonuç olarak değiştirilmiş sıcak su yöntemi, sıcak su yöntemiyle karşılaştırıldığında, 28 günlük standart basınç dayanımının belirlenmesinde hassasiyeti yaklaşık %25 iyileştirdiği, normal mesai saatleri içinde gerçekleştirilme ve sağlık tehlikesi oluşturmama avantajlarını koruduğu, yüksek dayanımlı betonlara da başarıyla uygulanabildiği sonucuna varılmıştır.

## SUMMARY

Concrete is one of the most common building materials and 28-day compressive strength is usually assumed to give an overall picture of the quality of concrete. However, within a 28-day period, which is necessary to determine the standard compressive strength of the concrete, a lot of concrete elements can be cast and constructed. In this respect, several accelerated curing methods such as warm water, boiling water, and autogenous have been proposed and tested to minimize the time necessary for the determination of the concrete quality.

The primary objective of this study is to determine an optimal accelerated curing method which minimizes the negative effects of the heat treatment on the concrete and gives more accurately the compressive strength. For this, based on the idea lies behind the warm water method, a new method has systematically been tested

In this study, a literature survey on the modifications occurred on concrete due to the high temperature curing and accelerated curing methods of concrete is carried out. The aims and qualities of accelerated curing methods are cited basing on the critics done on this methods.

In the first phase of the experimental program, the optimum parameters of called "modified warm water method" which are pre-curing period, curing temperature, duration of accelerated curing and post curing period were determined as one hour, 43°C, 21 hours and two hours, respectively.

In the second phase of the program, the new method, together with the standard warm water method was applied on 49 concretes having different mix proportions. The range of the compressive strength and the accuracy of the estimated values with the expected ones were evaluated comparatively.

In the third phase of the program, the effects of the possible deviations in the heat treatment parameters on the estimated compressive strength values were determined and the confident limits were discussed.

At the last phase of the program, the applicability of the proposed method on the high strength concretes was also investigated.

The general conclusion of the study may be summarized as follows:

The modified warm water method in the determination of the 28-day standard compressive strength of the concrete increased the estimation accuracy of the 28-day compressive strength of about 25% compared to the standard warm water method. The proposed method can be applied within normal working hours without health hazard. The method is also found applicable to high strength concretes.



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Beton, çimento, agrega ve suyun, gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddelerinin de ilavesiyle uygun oranlarda karıştırılmasından elde edilen bir yapı malzemesidir. Ucuzluk, şekil verilebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal etkilere dayanıklılık gibi özellikleri, betonun günümüzün en yaygın kullanıma sahip taşıyıcı yapı malzemesi olmasını sağlamıştır.

Başlangıçta plastik bir hamur biçiminde olan ve zamanla sertleşerek dayanım kazanan betonun kalitesi, genel olarak 28 günlük standart basınç dayanımıyla belirlenir. Sertleşmiş betonun diğer fiziksel ve mekanik özellikleri de basınç dayanımıyla ilişkili kabul edilir. 28 günlük basınç dayanımının belirlenmesi, standart boyutlardaki numune kalıplarına yerleştirilen betonun yine standart koşullar altında bakım yapılması ve denenmesi ile gerçekleştirilir.

Yıllarca önce basınç dayanımını belirleyebilmek için 28 gün beklemek normal kabul ediliyordu. Çünkü zamanın teknolojiyle üretilen çimentolar günümüzdekilere oranla çok daha kaba öğütülüyor, dolayısıyla dayanım kazanmaları yavaş oluyordu. Bu nedenle inşaatlar yavaş ilerliyor, 28 günlük süre uzun sayılmıyordu. Bunun yanında, betonun bu süre sonunda son dayanımının büyük bir bölümünü kazanıyor olması da 28 günlük sürenin uluslararası alanda benimsenmesinin diğer bir nedeniydi. Fakat günümüzde yapım teknolojisi büyük ilerlemeler kaydetmiş, mevcut yöntemler gelişen teknolojinin gereksinimlerine ayak uyduramaz olmuştur. Üretilen çimentoların kalitesi çok daha iyileştirilmiş, yüksek erken dayanım veren özel çimentolar geliştirilmiştir. Bu günün ekonomik koşulları ve hızlı kentleşme bu alanda sanayileşmenin doğmasına ve prefabrikasyonun gelişmesine sebep olmuştur. Prefabrikasyonda üretim hızını artırmak için kalıba yerleştirilen beton kendi haline bırakılmamakta, çeşitli yöntemlerle (özel çimentolar, katkılar, ısıtma işlemleri)

sertleşme hızlandırılmaktadır. Yüksek kapasiteli hazır beton tesisleri, transmikserler, pompalar, tünel kalıplar, kayar kalıplar, güçlü vibratörler, katkı maddeleri vb. sayesinde saatte 200-300 m<sup>3</sup> beton dökülebilmekte, çok katlı binalar bazen yaklaşık 1 ayda, başka bir deyişle 28 günlük deney sonucunu bekleyene kadar tamamlanabilmektedir.

Açıkça görülmektedirki 28 günlük süre inşaatların kalite kontrol yapılamadan ilerlemesi ve tamamlanması açısından çok sakıncalıdır. Bu nedenle, üretilen betonun kalitesinin mümkün olan en kısa zamanda belirlenmesi gereği ortaya çıkmış, bu amaçla beton dayanımının 28 gün yerine 1-2 gün hatta birkaç saat içinde belirlenebildiği çeşitli hızlandırılmış kür yöntemleri geliştirilmiş ve bazı ülkelerde de standartlaştırılmıştır. Ülkemiz de 1979'da A.B.D.'nin ASTM yöntemlerini benimsemiştir.

Beton dayanımının hızlı ve güvenilir bir biçimde saptanması, beton karışımında gerekli değişikliklerin zamanında yapılmasına olanak sağlayarak hem yapım aşamasının ekonomik biçimde sürdürülmesine imkan verecek, hem de sonradan oluşabilecek can ve mal kayıplarını önleyecektir.

Hızlandırılmış kür yöntemleri beton sertleşmesinin genelde ısı uygulanarak hızlandırılmasına ve 24-48 saat gibi kısa bir süre içinde betona yüksek bir dayanım kazandırılmasına dayanmaktadır. Bu hızlandırılmış dayanım ile 28 günlük standart dayanım arasındaki ilişki belirlenmekte, hızlandırılmış dayanım değerinden itibaren 28 günlük standart dayanım bu ilişki kullanılarak tahmin edilmekte, beton kalitesinin yeterliği konusunda karar verilmektedir.

Yayın taraması bölümünden izlenebileceği gibi bu alanda yapılan araştırmaların hemen tümünde pragmatik yaklaşımlar hakim olmuş, araştırmacılar kendi çalışma koşulları içinde 28 günlük standart basınç dayanımı ile yeterli korelasyon gösteren ve uygulanması nispeten kolay hızlandırılmış kür yöntemlerini benimsemiş ve önermişlerdir.

Hızlandırılmış kür yöntemi özünde betona bir ısı işlem uygulanmasıdır ve hem kimyasal, hem de fiziksel olarak beton bünyesine zarar vermektedir (1). Bu nedenle ısı işlem görmüş betonların nihai dayanımlarının standart kür görmüş olanlara oranla daha düşük kaldığı bilinmektedir. Dolayısı ile hızlandırılmış

kür uygulamasında da bu gerçeğin dikkate alınarak konuya ısıtma işlem sistematiği içinde yaklaşılması ve optimal kür yönteminin belirlenerek benimsenmesi yararlı olacaktır.

Bu çalışmanın temel amacı yukarıda özetlenen çerçevede, ısıtma işleminin zararlı yan etkilerini göz önünde bulundurarak en aza indirgeyen, dolayısı ile daha hassas tahmin imkanı veren bir hızlandırılmış kür yöntemi geliştirilmesidir.



## BÖLÜM 2

### BETONA UYGULANAN HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ VE ISIL İŞLEMLER - GENEL BİLGİLER

Bu bölümde önce, hızlandırılmış kür yöntemleri üzerinde yapılan yayın taraması, zaman içindeki gelişimleriyle birlikte özetlenmiştir. Daha sonra, hızlandırılmış kür yöntemlerinin, esasında birer ısıtma işlemi olmaları nedeniyle ısıtma işlemlerinin temel özelliklere olan etkileri incelenmiş ve bu yaklaşımla, standartlaştırılmış olan hızlandırılmış kür yöntemleri analiz edilmiş, genelde hızlandırılmış kür yönteminin optimum özellikleri belirlenmiştir. Son olarak da bu çerçevede deneysel çalışmanın amacı ve kapsamı belirtilmiştir.

#### 2.1 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİ

##### 2.1.1 İlk Çalışmalar

Hızlandırılmış deneylerle ilgili ilk çalışmalar 1920'lerin sonlarında A.B.D.'de başladı. Bu alandaki ilk yayınlardan biri 1927'de GEREND (2) tarafından yapılan bir araştırma idi. Bu çalışmada, beton dayanımının hızlandırılması, silindirik numunelere 0.5-0.7 MPa basınçta buhar banyosu uygulayarak gerçekleştiriliyordu. Fakat bu yöntem, pratik olmayışı nedeniyle pek uygulama alanı bulamadı (3). Daha sonra BRICKETT (4), NURSE (5), SHIDELER ve CHAMBERLAIN (6), SAUL (7), HIGGINSON (8), WAGNER (9), MERITT (10), HANSON (11), ve BOUNDY (12) gibi birçok araştırmacı, kür ortamı olarak buharın kullanıldığı yöntemler geliştirdiler. Ancak bu yöntemlerin hiçbiri, gerekli ekipmanın karmaşıklığı nedeniyle, yaygın kullanım alanı bulamadı.

Hızlandırılmış deneylerin bilinen ilk uygulaması, 1930'larda Hoover Barajının inşaatı sırasında PATCH'in (13) geliştirdiği

bu yöntemde, özel kalıplara yerleştirilen 150x300mm silindirler 7 saat suda kaynatıldıktan sonra, 1 saat içinde sökülüp başlıkları ve 8 saat sonunda deneniyorlardı. Bu, aynı zamanda kür ortamı olarak kaynar suyun ilk kullanılışıydı. Yöntem, bir müddet kullanıldıktan sonra yapılan tahminler sağlıksız bulunup terkedildi.

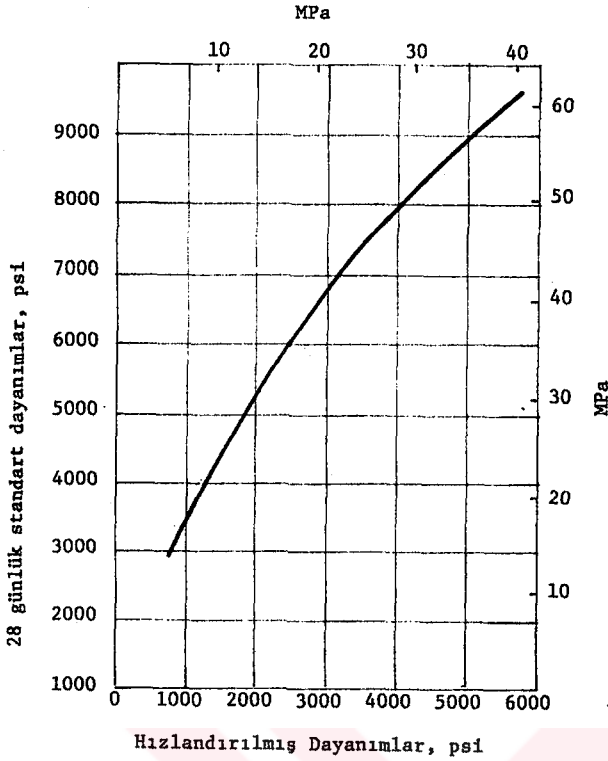
1930'ların sonlarından 1950'lerin başına kadar hızlandırılmış deneylerle ilgili önemli bir gelişme olmadı.

### 2.1.2 İngiltere'deki Çalışmalar ve Standartlaşma

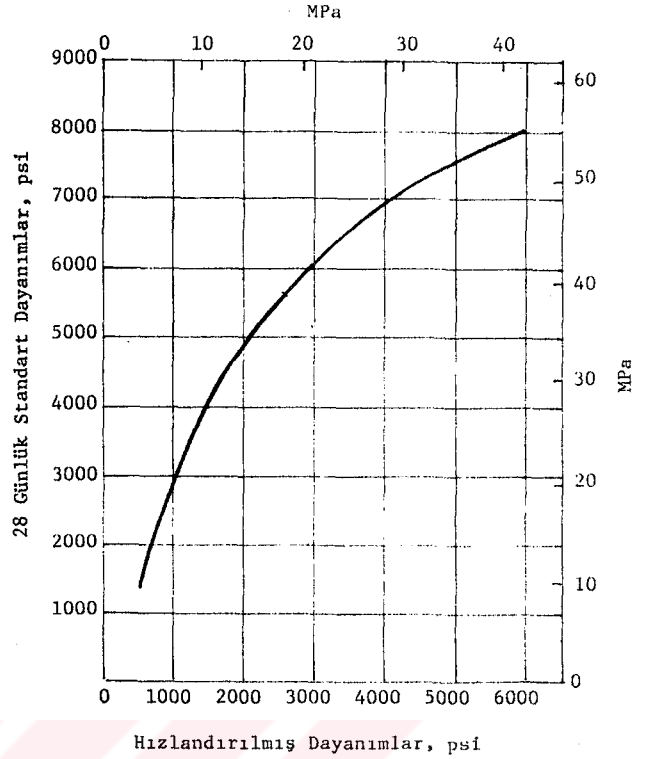
1950'lerde İngiltere'de 2 yöntem geliştirildi. 1953'te KING (14)'in geliştirdiği yöntemde kür ortamı olarak, fırın kullanılıyordu. Numuneler, üretildikten yarım saat sonra soğuk haldeki fırına yerleştiriliyor ve sıcaklık 2 saatte 93 °C'ye getiriliyordu. Bu sıcaklıkta 4 saat kürden sonra fırından çıkarılan numuneler, yarım saat sonra deneniyorlardı.

İngiltere'de geliştirilen diğer yöntem, AKROYD ve SMITH GANDER'a (15) aitti. 1956'da yayınlanan bu yeni hızlandırılmış kür yönteminde, kür ortamı olarak kaynar su kullanılmaktaydı. Numuneler, üretildikten yarım saat sonra 60 °C'deki suya yerleştiriliyor ve su kaynamaya kadar ısıtılıyordu. 7 saat sonra sudan çıkarılıyor ve 1 saat soğuduktan sonra deneniyorlardı. Böylece toplam kür çevrimi  $8 \frac{1}{2}$  saat oluyordu. Yönteme ait belirlenen hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.1'de görülmektedir.

AKROYD (16), 1961'de yayınlanan yeni çalışmasında bu çevrimi değiştirdi. "Değiştirilmiş kaynar su yöntemi" olarak bilinen bu yeni yöntemde numuneler 24 saat standart kür gördükten sonra  $3 \frac{1}{2}$  saat kaynar suda bekletiliyor ve 1 saat sonra da deneniyordu. Bu yöntem, diğerlerine göre daha basit oluşu nedeniyle benimsendi ve uygulama alanı buldu. Hızlandırılmış dayanımlarla 28 günlük standart dayanım arasındaki ilişki Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Kaynar Su Yöntemine Ait H.D.-S.D\* ilişkisi (15)



Şekil 2.2. Değiştirilmiş Kaynar Su Yöntemine Ait H.D.-S.D. ilişkisi (16)

AKROYD'un çalışmasının tartışılması sırasında THOMPSON (17), kür ortamı olarak ılık suyun kullanıldığı yeni bir hızlandırılmış kür yöntemi sundu. Yöntemin esasını, ılık suyun ısı yalıtımı görevi yapması ve hızlandırılmış kürün çimentonun hidrasyon ısısı ile gerçekleştirilmesi oluşturuyordu (3). Bu yeni yöntemde, numuneler üretildikten hemen sonra 35 °C deki suya yerleştiriliyor ve burada 24 saat bekletilip hemen deniyorlardı. Yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.3'te görülmektedir.

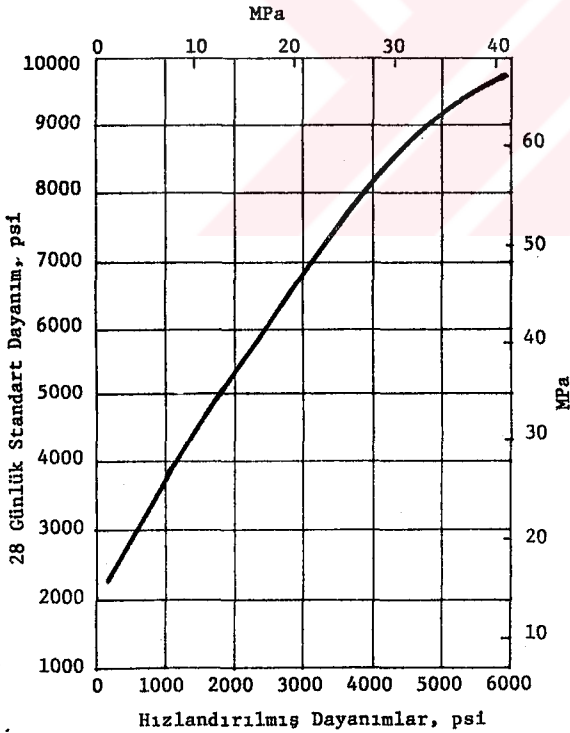
1959'da İngiltere İnşaat Mühendisleri Odası (Institution of Civil Engineers, London) KING'in başkanlığında Hızlandırılmış Deney Komitesini (Accelerated Testing Committee) kurdu. Komitenin amacı, çeşitli kalite kontrol yöntemlerini denemek, karşılaştırmak ve güvenilir, kısa süreli bir standart yöntem geliştirmektir. Komite, ön çalışmalarından sonra 6 laboratuvarın katıldığı geniş kapsamlı bir deneysel program başlattı ve raporunu 1968'de yayınladı (18). Önerdiği yöntemde, numuneler üretildikten  $\frac{1}{2}$  saat sonra 55 °C deki suya yerleştiriliyor, burada 24 saat kürden

\* H.D.-S.D.: Hızlandırılmış Dayanım-28 Günlük Standart Dayanım.

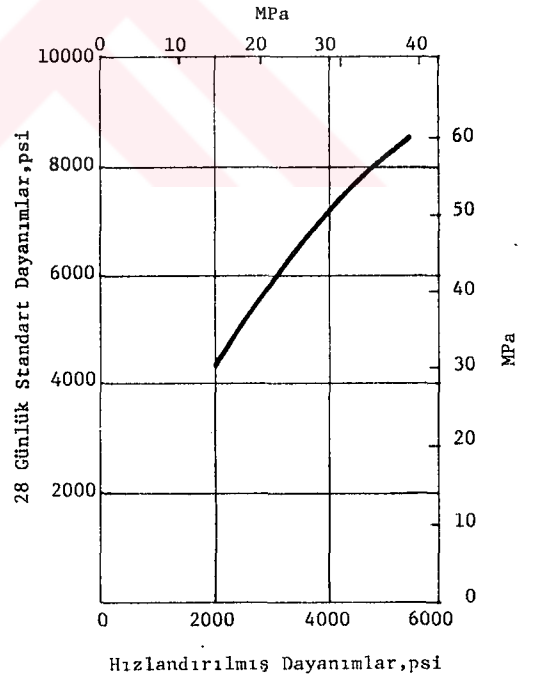
sonra çıkarılıp  $\frac{1}{2}$  saat sonra da deneniyordu. Böylece, toplam çevrim süresi 25 saat oluyordu. Yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.4'te verilmiştir.

Komitenin önerdiği bu yöntem, bazı değişikliklerle 1970'de İngiliz standartlarına girdi (19). Yöntemin son şekli, 2 saat oda sıcaklığında beklemekten sonra 20 saat 55 °C suda hızlandırılmış kür ve 2 saat soğuma süresi olarak belirlendi.

İngiltere'de GRANT tarafından önerilen bir yöntem de, hazır beton endüstrisinde oldukça kabul görmüştü (3). Bu yöntemde, hava koşulları ve bileşime bağlı olarak 1-3 saat bekletilen numuneler, 20 °C'deki suya yerleştiriliyor ve yaklaşık 2 saatte su 82±2 °C'ye kadar ısıtılıyordu. Toplam 16 saat kürden sonra, numuneler 15 dakika bekletilip deneniyordu. Bu yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.5'te verilmiştir.

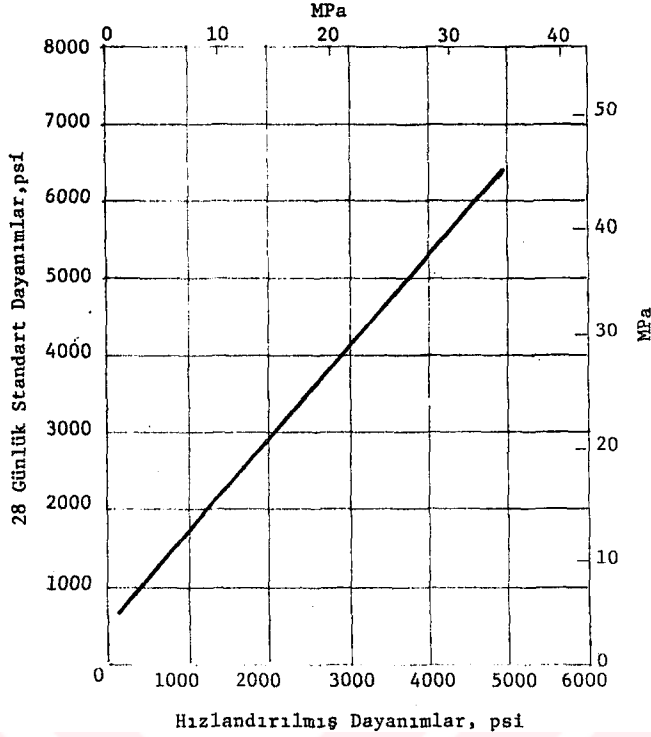


Şekil 2.3. Ilık Su Yöntemine Ait H.D.-S.D. İlişkisi (17)



Şekil 2.4. İngiltere Hızlandırılmış Deney Komitesi'nce Önerilen Yönteme Ait H.D.-S.D. İlişkisi (18)





Şekil 2.5. GRANT'ın Önerdiği Yönteme Ait H.D.-S.D. İlişkisi (3)

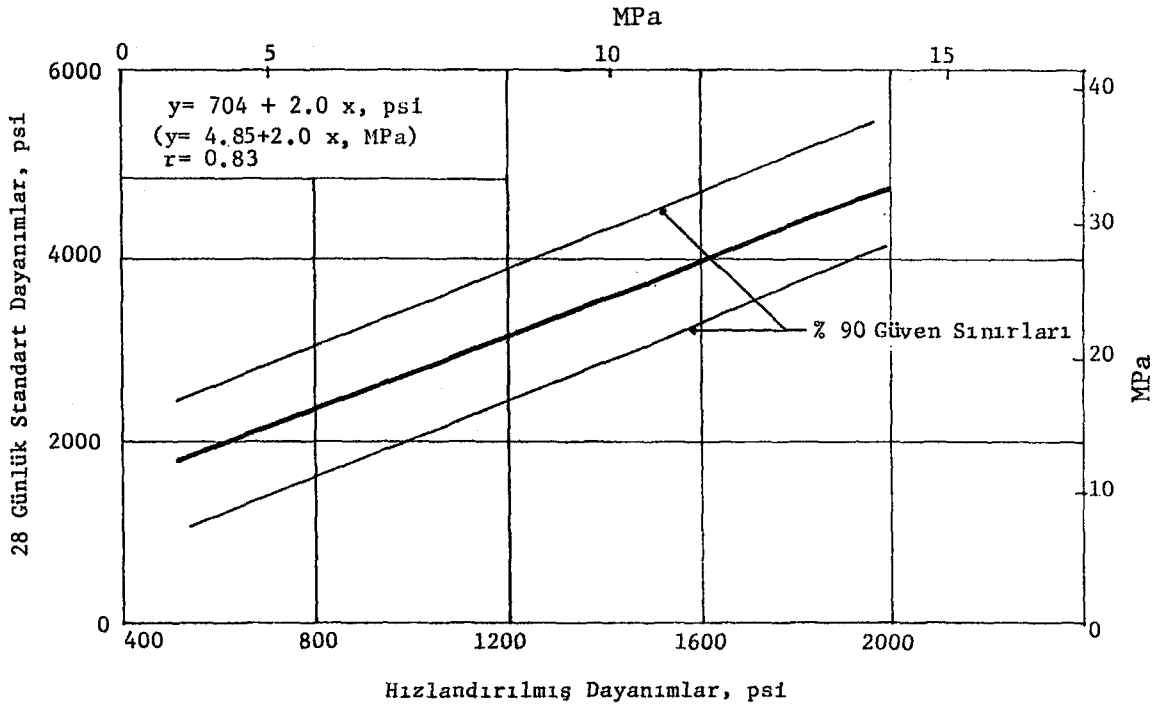
### 2.1.3 Diğer Avrupa Ülkelerindeki Çalışmalar

Avrupa'da beton kalite kontrolünde hızlandırılmış deneyler, 1961'den beri yer almaktadır (3).

Uluslararası Yapı ve Malzeme Araştırmaları Laboratuvarları Birliği (Réunion International des Laboratoires d'Essais et de Matériaux, RILEM), ileriye dönük standartlaşma çalışmalarına yardımcı olmak amacıyla, 1963'de "Hızlandırılmış Deneylerle Beton Sertleşmesinin Hızlandırılması (Accelerated Hardening of Concrete With a View to Rapid Control Test)" isimli uluslararası bir sempozyum düzenlendi. Sempozyumda, 6 ülkeden 9 bildiri yer aldı (20).

MALHOTRA (21) sempozyuma Avustralya'da yapılan bir baraj inşaatı sırasında uygulanan hızlandırılmış kür sonuçlarını sundu. Bu, CORNWELL tarafından araştırılan bir yöntemdi. Toplam 24 saat süren çevrimde, numuneler üretildikten  $\frac{1}{2}$  saat sonra  $74^{\circ}\text{C}$  deki suyun içinde  $21\frac{1}{2}$  saat küre tabi tutuluyordu. Yöntemle  $\pm 15.2-23.6$  arasında değişen doğrulukla standart dayanımın tahmin edildiği belirtiliyordu. Bu yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.6'da verilmiştir.



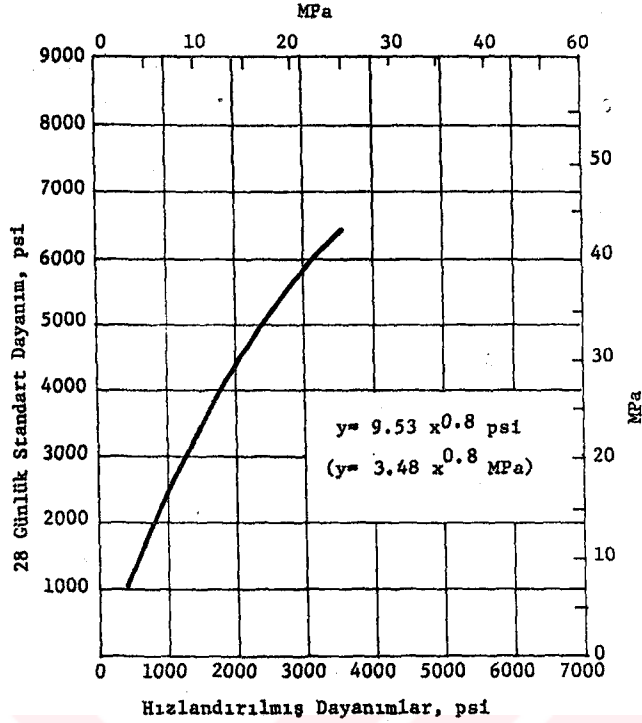


Şekil 2.6. CORNWELL'in Önerdiği Yönteme Ait H.D.-S.D. İlişkisi (21)

JAROCKI (22)'de Polanya'da bir baraj inşaatı sırasında uygulanan hızlandırılmış deney sonuçlarını sempozyuma sundu. Kullandıkları yöntemde 12 saat %100 nem küründen sonra, numuneler  $18 \pm 2$  °C deki suya daldırılıyor ve sıcaklık 1 saatte 90 °C ye çıkarılıyordu. Beş saat sonra sudan çıkarılan numuneler 6 saat soğumadan sonra deneniyordu. JAROCKI'ye göre toplam çevrim süresi 24 saat olan bu yöntemle 28 günlük standart dayanım  $\pm 7-14$  doğrulukla tahmin edilebiliyordu.

Avrupa'da hızlandırılmış yöntemlerin öncülüğünü yapanlardan VOURINEN (23), sempozyuma Finlandiya'da bir hidroelektrik santralin yapımı sırasında uygulanan deney sonuçlarını sundu. Kullandığı yöntemde numuneler 1 saat beklemeden sonra 82 °C deki suya yerleştiriliyor, 20 saat kürden sonra çıkarılıp 24 saatin sonunda deneniyordu. Bu yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.7'de görülmektedir.

Sempozyuma hızlandırılmış kür ortamı olarak sıcak suyun kullanıldığı bu yöntemler yanında MALHOTRA ve ZOLDNERS (24) ile SMITH ve CHOJNACKI (25)'de kaynar suyun kullanıldığı yöntemleri içeren bildiriler sundular.



Şekil 2.7. VOURINEN'in Sunduğu Yönteme Ait H.D.-S.D. İlişkisi (23)

RILEM'in sempozyumunda sunulan bu yöntemlere ek olarak Avrupa'da kullanılan iki yöntem daha vardı. Bunlardan biri LICHTENBERG tarafından geliştirilmişti ve Danimarka'da 1961'den beri kullanılmaktaydı. Bu yöntemde numuneler üretimden hemen sonra 65 °C deki suya yerleştiriliyor ve su, 20 dakikada kaynama noktasına getiriliyordu. İki saat kaynamadan sonra sudan çıkarılan numuneler, kalıplarıyla birlikte 15 dakika oda sıcaklığındaki suda bekletiliyor ve daha sonra sökülüp deneniyorlardı (3,26).

Yöntemlerin diğeri ise İsviçre Ulusal Malzeme Deneyleri ve Araştırmaları Laboratuvarı'nda (Swiss Federal Laboratories on Material Research) geliştirilmişti. Deney 20 cm lik beton küp veya 150x300 mm silindir numuneler üzerinde gerçekleştiriliyordu. Özel bir alete yerleştirilen numuneler, 180 °C sıcaklık ve 0,5 MPa'dan 1,4 MPa'ya kadar artan basınç altında  $4\frac{1}{2}$  saat kür görüyorlar ve yarım saat içinde de sökülüp deneniyordu. Bu yöntemle hızlandırılmış dayanım, 28 günlük dayanıma eşit düzeyde sonuç veriyordu (3,26,27). Benzer şekilde, MEYER (28) de harç numuneleri kullanarak 5 saatlik bir çevrim sonunda 28 günlük standart

dayanıma eşit sonuçlar veren bir yöntem geliştirdi. 11.3 mm yükseklik ve 100 mm<sup>2</sup> yüzey alanlı harç numuneler, 40 °C de 3 saat nem küründen sonra, bir otoklavda 2 saat buhar kürü görüyor ve deneniyordu.

#### 2.1.4 Kanada'daki Çalışmalar ve Standartlaşma

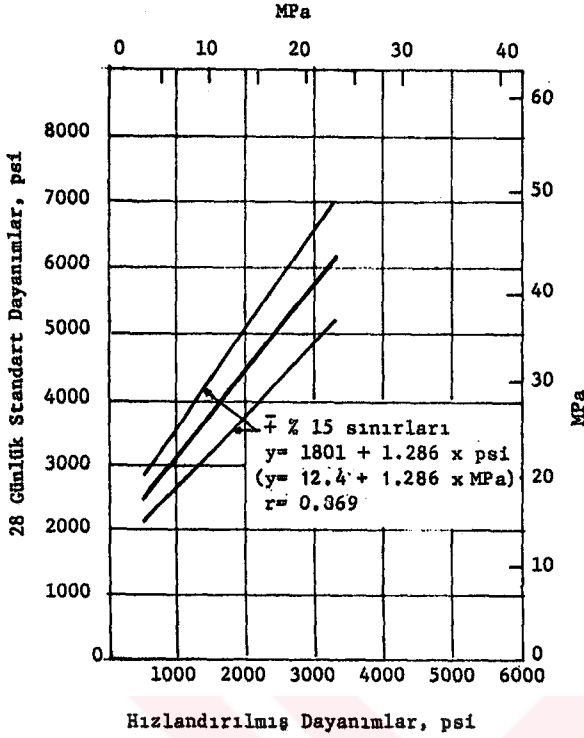
Kanada, hızlandırılmış dayanım deneylerinin gelişiminde önde gelen ülkelerdendir. Bu alandaki çalışmalar, 1962'den beri sürmektedir.

MALHOTRA ve ZOLDNERS (24), AKROYD (16)'un değiştirilmiş kaynar su yöntemini benimseyerek kendi çalışmalarında kullandılar. MALHOTRA, numunelerin kaynar sudan çıkarılmasıyla denenmesi arasındaki sürenin etkisini araştırdı ve bunun sonuçlara pek etkisi olmadığını gözledi. Bu konudaki çalışmalarının yayınlanmasından sonra, değiştirilmiş kaynar su yöntemi Kanada'da benimsendi. Yöntemin benimsenmesinin nedenleri çevrimin diğerlerine göre daha basit ve kolaylıkla kontrol edilebilir oluşuydu (3). Birçok laboratuvarın bu yöntemi kullanarak yaptığı kalite kontrol deneyleri sonuçları Enerji Bölümü Maden Kolu (The Mines Branch of the Department of Energy)'nda değerlendirildi (29). Deney sonuçları, çok farklı alanlarda dökülen betonları, dolayısıyla farklı çimento ve agrega tiplerini içermesine rağmen, analiz sonuçları çok umut vericiydi. 28 günlük dayanım  $\pm 15$  doğrulukla tahmin edilebiliyordu. Regresyon doğrusu Şekil 2.8'de görülmektedir.

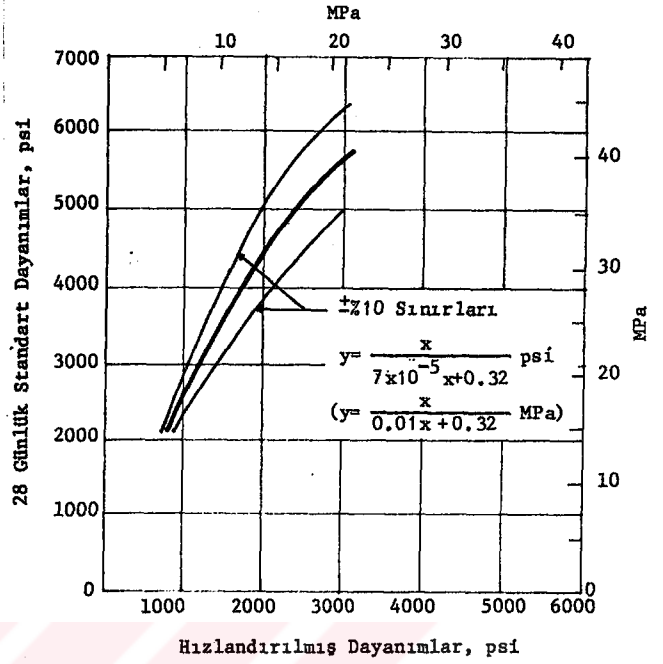
MALHOTRA (30), değiştirilmiş kaynar su yöntemiyle tahmin edilen 91 günlük dayanımın, 3 ya da 7 günlük standart dayanımlara dayanarak yapılan tahminlerden daha hassas olduğunu gösterdi.

WILSON ve arkadaşları, hafif agrega ile üretilen betonlara değiştirilmiş kaynar su yönteminin uygulanabildiğini belirlediler (3). Bu çalışmaya ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.9'da verilmektedir.

1958'de Ontario Karayolları Teşkilatı (Ontario Department of Highways), hızlandırılmış deneylerle ilgili bir çalışma programı başlattı. Çalışmanın sonuçları 1963'te yayınlandı.



Şekil 2.8. 9 Laboratuvarın D.K.S.Y.\*'ni Uygulayarak Elde Ettikleri H.D.-S.D. İlişki (29)

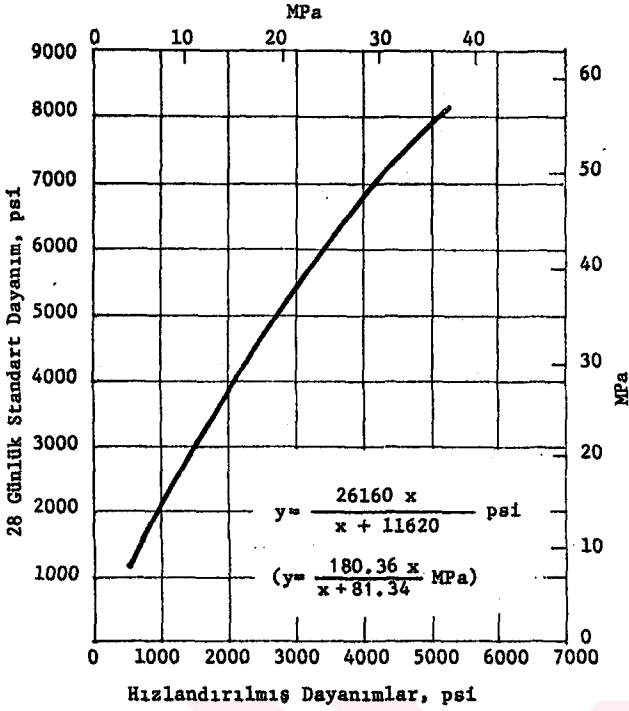


Şekil 2.9. Hafif Betonlara D.K.S.Y. Uygulanarak Elde Edilen H.D.-S.D. İlişkisi (3)

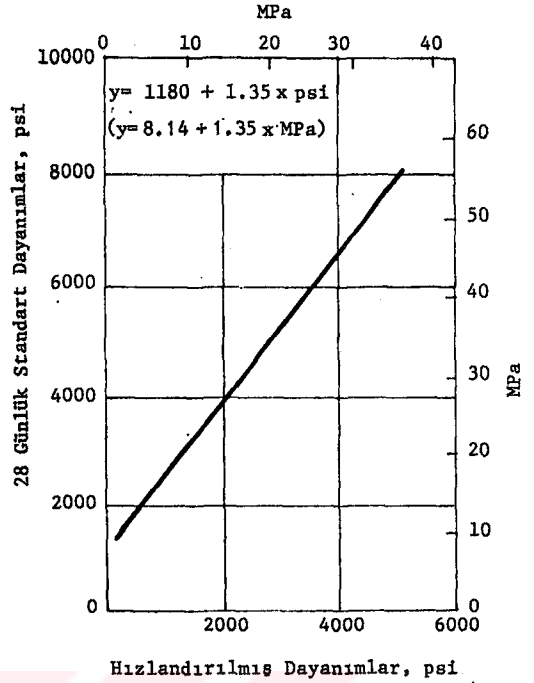
SMITH ve CHOJNACKI'nın geliştirdiği ve Sabit-Priz (Fixed-Set) hızlandırılmış kür yöntemi adı verilen yöntem, toplam 24-26 saatlik bir çevrimden oluşuyordu. Numuneler, beton priz yapmaya başladıktan hemen sonra kaynar suya yerleştiriliyor ve 16 saat sonra çıkarılıp 1 saat beklemeden sonra deneyiyordu. Betonun priz zamanının saptanması zorluğu ve mesai saatleri dışına taşması nedeniyle, yöntem fazla benimsenmedi (3,26). Yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.10'da görülmektedir.

1967'de SMITH ve TIEDE (26) otojen kür adı verilen yeni bir yöntem geliştirdiler. Bu yöntemde beton, üretimden hemen sonra özel yalıtkan kalıplar içine yerleştiriliyor ve kür ortamı olarak hidrasyon ısısından yararlanılıyor, dışarıdan herhangi bir şekilde ısıtma yapılmıyordu. 48 saat sonra kalıplarından çıkarılan numuneler 1 saat sonra deneyiyordu. Yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.11'de görülmektedir. Bu yeni yöntem Kanada'da oldukça benimsendi.

\* D.K.S.Y.: Değiştirilmiş Kaynar Su Yöntemi



Şekil 2.10. Sabit-Priz Yöntemine Ait H.D.-S.D. İlişkisi (3)



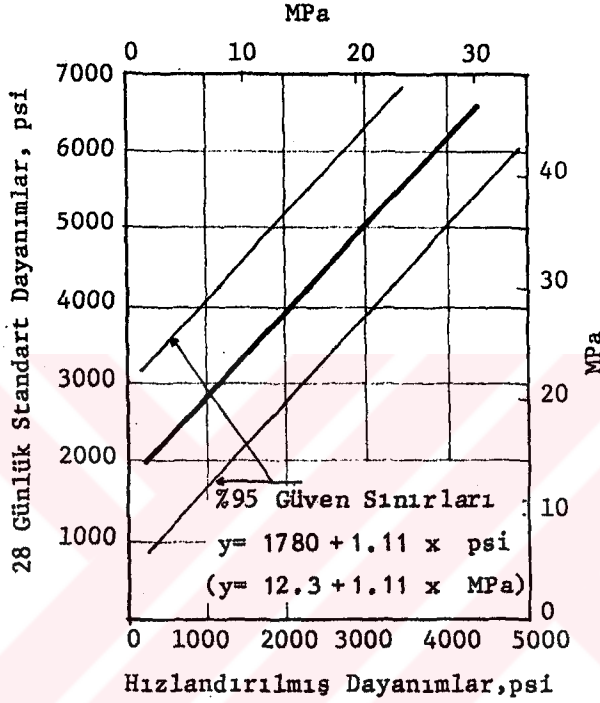
Şekil 2.11. Otojen Kür Yöntemine Ait H.D.-S.D. İlişkisi (26)

1967'de MALHOTRA Kanada Standartlar Birliği'ne (Canadian Standards Association) değiştirilmiş kaynar su yönteminin standartlaştırılmasını önerdi (26). Yapılan çeşitli toplantılardan sonra komite 1970'de değiştirilmiş kaynar su, otojen kür ve sabit-priz hızlandırılmış kür yöntemlerini standartlaştırdı (31). (1973'te yapılan revizyonda sabit-priz hızlandırılmış kür yöntemi standarttan çıkarıldı (3).) Bu, standart hızlandırılmış kür yöntemlerinin benimsenmesinde önemli bir adımdı ve bu konuda çıkarılan ilk ulusal standardı oluşturuyordu.

1978'de NASSER (32) taze betonun özel bir alet içinde sıcaklık ve basınç altında kür edildiği toplam 5 saat süreli yeni bir yöntem geliştirdi. Yöntemde, aletin özel kalıplarına yerleştirilen betona 0.5 MPa basınç uygulanıyor ve sıcaklık  $\frac{1}{2}$  saatte 149 °C ye getiriliyordu. Üç saat kürden sonra 2 saat soğumaya bırakılan numuneler, 5 saatin sonunda deneniyordu.

1980'de NASSER ve BEATON (33) "K-5 Yöntemi" olarak adlandırdıkları bu yöntem üzerinde yaptıkları geniş bir araştırmayı yayınladılar. 340 üretimin yer aldığı çalışmanın sonunda

28 günlük standart dayanımlarla 5 saatlik hızlandırılmış dayanımlar arasında lineer bir ilişkinin bulunduğunu ve bu ilişkinin karışım oranlarına, çimento tipine ve katkı miktarına bağlı olarak değiştiğini belirttiler ve yöntemle  $\pm 13$  doğrulukla 28 günlük dayanımın tahmin edilebileceğini söylediler. Yönteme ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisi Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.12. "K-5" Yöntemine Ait H.D.-S.D. İlişkisi (33)

#### 2.1.5 A.B.D.'de Çalışmalar ve Standartlaşma

ABD'de hızlandırılmış deneylerle ilgili ilk çalışmalar 1920'lerin sonları ve 1930'ların başlarında GEREND (2) ve PATCH (13) tarafından gerçekleştirildi, ancak 1963-64'lere kadar önemli bir gelişme olmadı. 1964'te ASTM (American Society for Testing and Materials) ve ACI (American Concrete Institute) teknik kongrelerine Kanada'dan sunulan bir bildiri (34), konuyu tekrar gündeme getirdi. Aynı tarihlerde ASTM Committee C-9 hızlandırılmış dayanım deneylerini standartlaştırmak üzere bir alt komite oluşturdu (3). Bu alt komite Kanada, Avrupa, ve diğer ülkelerde kullanılmakta olan yöntemlerden en güvenilir olanı seçmek için laboratuvarlar arası bir deney programı başlattı.



Birkaç yıl önce İngiltere Hızlandırılmış Deneyler Komitesi'nin yürüttüğü çalışmaların devamı niteliğinde olan bu programa ABD ve Kanada'dan 10 laboratuvar katıldı. Komite, incelediği çeşitli yöntemler arasında en güvenilir olarak aşağıdaki yöntemleri seçti:

- a) Sıcak su yöntemi,
- b) Değiştirilmiş kaynar su yöntemi,
- c) Sabit-Priz hızlandırılmış kür yöntemi

Bunlara ek olarak bazı laboratuvarlar şu yöntemleri de önerdiler:

- d) 55, 75, 90 °C de 24 saat sıcak su yöntemi,
- e) Otojen kür yöntemi.

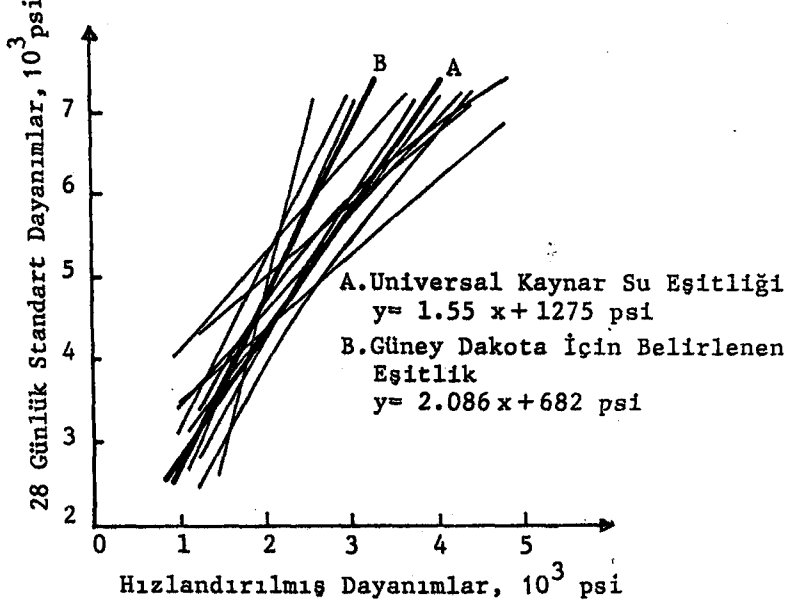
Her bir yöntem için iki tip çimento, üç dozaj (265, 325 ve 385 kg/m<sup>3</sup>), hava sürükleyici ve su indirgeyici katkıları kullanıldı. Laboratuvarların çok farklı yerlerde olmaları dolayısıyla standart bir agrega ve çimento kullanılmadı. Fakat maksimum agrega çapı 25 mm, numuneler 150x300 mm silindir olarak seçildi.

Laboratuvarlar arası program 1970'te tamamlandı. Deney sonuçları 1975'te WILLS (35) tarafından yayınlandı. Sonuçta a, b ve e yöntemleri çok küçük değişikliklerle 1971'de ASTM tarafından standartlaştırıldı.

1989'da NASSER'in "K-5 Yöntemi"de standart kapsamına alındı (36). Böylece "Yüksek sıcaklık ve basınç" adı verilen yöntem ASTM'nin standartlaştırdığı dördüncü hızlandırılmış kür yöntemi oldu.

RAMAKRISHNAN ve DIETZ (37) ASTM'de yer alan hızlandırılmış kür yöntemlerinin uygulandığı geniş kapsamlı bir çalışma yayınladılar. Güney Dakota'da yaygın olarak kullanılan malzemelerle üretilen 21 farklı beton karışımının kullanıldığı çalışmada, çimento tipi, agrega/çimento oranı, su/çimento oranı, kalıp tipi gibi değişkenleri göz önüne aldılar. Başka araştırmacıların çalışmalarından da yararlanarak, kaynar su yöntemiyle 28 günlük dayanımın tahmini için universal bir eşitlik belirlediler. Bu eşitliğin, bir projede farklı çimentolar ya da kalıplar kullanıldığında veya yeni bir projede ilk verilerin yetersiz olduğu durumda kullanılabileceğini belirttiler. Ayrıca kendi deney

sonuçlarından da Güney Dakota için genel bir eşitlik belirlediler (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Kaynar Su Yöntemi İçin Belirlenen H.D.-S.D. İlişkileri (37)

MATHER (38) hızlandırılmış kür yöntemlerinin çimento hamuru üzerindeki etkisini araştırdı. ASTM C-684-74'te tanımlanan hızlandırılmış kür yöntemlerini uyguladığı deneylerinde iki tür portland çimentosu ve ek olarak uçucu kül kullandı. Basınç dayanım deneyleri yanında X ışınları difraksiyonu ve taramalı elektron mikroskopuyla yaptığı araştırmalar sonunda kaynar su yönteminde hidratasyon ürünlerinin normalden çok farklılaştığını, otojen kür yönteminin üniform bir hızlandırma sağlamadığını, sıcak su yönteminin ise standart kürle karşılaştırıldığında hidratasyon ürünleri açısından pek farklılık göstermediğini belirtti.

NAIK (39) çimento tipinin hızlandırılmış basınç dayanımına etkisini araştırdı. Dört tür çimentonun ve hızlandırılmış kür yöntemi olarak değiştirilmiş kaynar su yönteminin kullanıldığı çalışmanın sonunda çimento tipinin hızlandırılmış dayanımlar üzerindeki etkisinin düzenli olmadığı ve bir genelleştirme yapılamayacağı görüldü.



### 2.1.6 Diğer Ülkelerdeki Çalışmalar

Baraj inşaatları büyük miktarlarda beton içerdiğinden hızlandırılmış dayanım deneyleriyle ilgili çalışmalarda oldukça ilgi görmüştür. Avusturalya'da CORNWELL, MALHOTRA (21) ve NICHOL (40) baraj inşaatları sırasında yaptıkları hızlandırılmış deneylerle ilgili çalışmaları yayınladılar. Avusturalya'da geliştirilmiş iki ilginç yöntem daha vardı. Bu yöntemlerin ikisinde de buhar kürü kullanılıyordu. MERCER'in 1952'de yayınlanan yönteminde numuneler 21 saat 177 °C deki otoklavda kür ediliyordu. Sonuçta standart 7 günlük dayanımlarla korelasyon sağlanıyordu. Fakat ileri yaşlarda korelasyon yoktu ve sonuçlar farklı su/çimento oranlarından etkileniyordu (2.6).

BOUNDY ve HONDROS (12), 1964'te numunelerin 6 saat 88 °C de buhar kürü gördükten 1 saat sonra Schmidt çekiciyle sertliklerinin ölçüldüğü bir yöntem geliştirdi. Basınç dayanımını ölçmek için pres gerektirmeyen bu yöntemde Schmidt sayısıyla 28 günlük dayanım arasında

$$R_{28} = 19 R_s^{1.8} \quad (2.1)$$

$R_{28}$  : 28 günlük standart dayanım,

$R_s$  : Schmidt sayısı

şeklinde bir ilişki belirlendi.

Hindistan , hızlandırılmış deneyleri benimseyen ve bu alanda birçok çalışmalar yapılan ülkelerden biridir. 1978'de iki hızlandırılmış kür yöntemi standartlaştırıldı (41). Bunlardan biri "sıcak su" yöntemiydi. 55±1 °C de 20 saat kür gören numuneler 22  $\frac{1}{2}$  - 24  $\frac{1}{2}$  arasında değişebilen saatlerde deneniyordu. Diğer yöntem ise numunelerin 23 saat kaynar suda bırakıldığı ve 26  $\frac{1}{2}$  saat ±15 dakikada denendiği "kaynar su" yöntemiydi. Hindistan standartları her bir yöntem için şu ilişkileri tavsiye ediyordu.

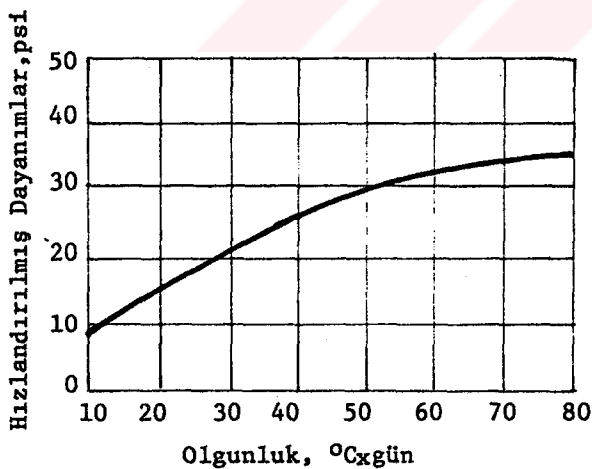
$$f_{28} = f_a + 12.65 \text{ MPa (sıcak su yöntemi için)} \quad (2.2)$$

$$f_{28} = f_a + 8.09 \text{ MPa (Kaynar su yöntemi için)} \quad (2.3)$$

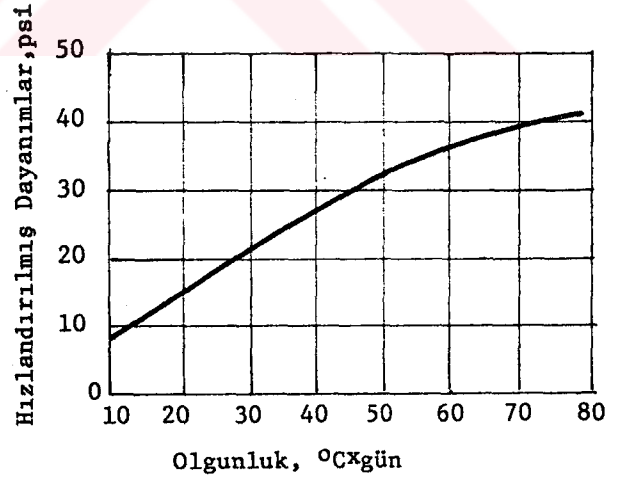
$f_{28}$  : 28 günlük standart dayanım  
 $f_a$  : hızlandırılmış dayanım

SHAH (41) 1986'da yayınlanan çalışmasında ılık su yöntemini kullanarak hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım ilişkisini çıkardı ve Hindistan standardında tavsiye edilen ilişkinin ancak az miktarda beton üretilen küçük projelerde kullanılabileceğini, önemli projelerde ilişkinin mevcut koşullara göre belirlenmesi gerektiğini belirtti.

NAGARAJA ve arkadaşları (42), uçucu kül kullanarak ürettiği betonlara uygun bir yöntem geliştirdi. Bu yöntemde 2 saat bekletilen numuneler, termostat kontrollü bir elektrik fırınına yerleştiriliyor ve 70-80 °C de 8-12 saat kür görüyordu. Nem kaybını önlemek için, fırın içine bir miktar su koyuluyordu. Fırından çıkarılan numuneler, 2 saat soğumadan sonra deneniyordu. Deneyler sonunda olgunluk derecesiyle hızlandırılmış dayanımlar arasında bir ilişki belirleyen yazarlar, 3-4 saatlik kür süresinin numunelerin taşınması açısından yetersiz olduğunu, 100 °C kür sıcaklığının ise numunelere zarar verdiğini belirtiyorlardı (Şekil 2.14 a ve b).



(a)



(b)

Şekil 2.14. İki Ayrı Bileşimde Beton İçin Hızlandırılmış Dayanım-Olgunluk Derecesi İlişkileri (42)

MUZHİR (43) ve arkadaşları, Hindistan koşullarına uygun, ucuz ve basit bir kür çevrimi geliştirdiler. Deneylerinde üç farklı agrega/çimento ve her biri için 5 su/çimento oranı kullanarak 15 tip beton ürettikleri. Geliştirdikleri yöntemde numuneler üretildikten sonra,  $17 \frac{1}{2}$  saat  $26 \pm 2$  °C'deki suda bekletiliyor ve kalıpları sökülüp  $70$  °C'deki suya yerleştiriliyordu. Su sıcaklığı  $\frac{1}{2}$  saat içinde kaynama noktasına getiriliyor, 5 saat kaynamadan sonra çıkarılan numuneler 1 saat soğuyup deneniyordu. Çalışma sonunda

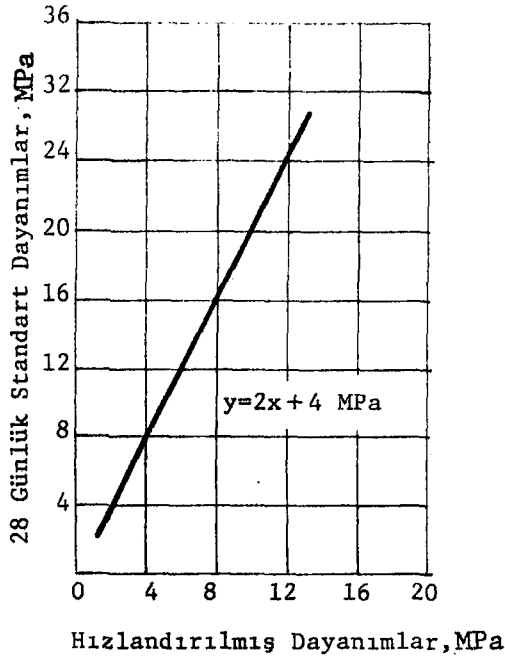
$$y = 2x + 4 \text{ MPa} \quad (2.4)$$

y: 28 günlük standart dayanım

x: hızlandırılmış dayanım

şeklinde basit bir ilişki belirlediler (Şekil 2.15). Fakat bu ilişkinin 30 MPa'ya kadar olan betonlarda geçerli olduğunu, daha yüksek dayanımlı betonlarda kullanılamayacağını vurguladılar.

Avustralya ve Hindistan dışında Japonya, Sovyetler Birliği ve Venezuela'da da hızlandırılmış deneylerle ilgili çeşitli çalışmalar yapıldı. Fakat bunlar da bu konuda geliştirilmiş diğer yöntemlerden çok farklı olmayan çalışmalar olarak kaldılar (3,26).



Şekil 2.15. MUZHİR'in Geliştirdiği Yönteme Ait H.D.-S.D. İlişkisi (43)

### 2.1.7 Türkiye'deki Çalışmalar ve Standartlaşma

Türkiye'de hızlandırılmış yöntemlerle ilgili olarak rastlanan en eski çalışmalar, DSİ'de (44) ve İTÜ'de (45) yapılan araştırmalardır.

DSİ'de 1977-1978 yıllarında yapılan çalışmalarda "mini silindir yöntemi" olarak bilinen yöntem üzerinde bazı değişiklikler yapılmış, numune boyutları ve kür parametreleri yeniden belirlenmiştir. Bu yöntemde kuru ve toz çimentodan boşluk yüzdesi sabit olarak hazırlanan mini silindirler, özel sıcaklık ve basınç koşullarında 22 saat küre tabii tutulmuş, 28 günlük dayanıma oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. 1986'da yapılan çalışmada ise çimento türlerine göre değişen boşluk yüzdeleleriyle hazırlanmış numuneler üzerinde çimentoların standart dayanımları ile mini silindir dayanımlarının karşılaştırması yapılmıştır (46,47)

TAŞDEMİR ve ATAN'ın (45) İTÜ'de yaptıkları çalışmada betonların harç fazı üzerinde kaynatma ve yüksek sıcaklık kürü uygulaması yapılmıştır. Bu yöntemlerde ön bekleme süreleri 0,2 ve 24 saat olarak değiştirilmiştir. Kaynama süreleri 3 ve 3.5 saat alınmıştır. Numuneler 45 dakika kadar soğutulmuş ve kürden sonra 30 dakika içinde basınç dayanımları belirlenmiştir. Deneyler sonunda 24 saat ön bekleme ve çok yüksek sıcaklıkta (80°C) 7 saat kür uygulaması sonucunda en olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

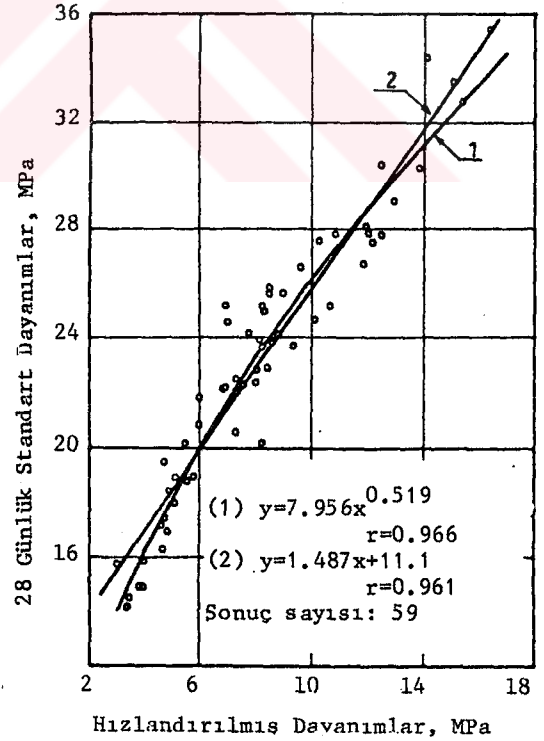
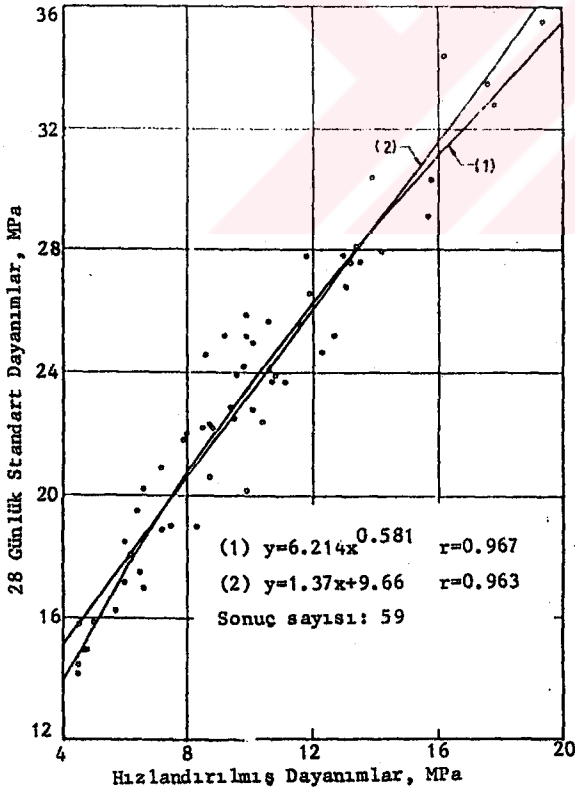
ÖZTEKİN, KALFAZADE ve ÖNOL (48), Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi'ne iki hızlandırılmış kür yöntemi üzerinde İTÜ'de yaptıkları araştırmayı sundular. Yöntemlerden birinde, numuneler 24 saat ön beklemeden sonra 40°C su içinde 21 saat kür ediliyor ve 3 saat son beklemenin ardından deneniyordu. Böylece toplam çevrim süresi 48 saat oluyordu. Diğer yöntemde ise 6 saat ön bekleme yapan numuneler, 60°C suda 15 saat kür görüyor ve 3 saat son beklemeden sonra deneniyordu. Araştırmanın sonunda, her iki yöntemle de 28 günlük standart dayanımların güvenilir olarak belirlenebileceği görüldü.

ÖZTEKİN (49), 1986'da yayınlanan çalışmasında traslı çimento ile üretilen betonlara uyguladığı hızlandırılmış kür sonuçlarını sundu. ASTM C 684-74'te tanımlanan kaynar su yöntemini

kullanarak 59 farklı bileşim üzerinde deney yaptı. Çalışma sonunda 28 günlük dayanımın lineer bir ilişki kullanılarak %90 güven aralığı içinde  $\pm 2.4$  MPa doğrulukla tahmin edilebileceğini belirledi (Şekil 2.16).

ÖZTEKİN (50), daha sonraki çalışmasında ise traslı çimento ile üretilen betonlara ASTM C 684-74'te tanımlanan sıcak su yöntemini uyguladığı deney sonuçlarını sundu. Bu çalışmanın sonunda da 28 günlük dayanımın %95 güven aralığı içinde  $\pm 2.8$  MPa doğrulukla tahmin edilebileceğini belirledi (Şekil 2.17). Dolayısıyla sıcak su ve kaynar su yöntemlerini uyguladığı çalışmaları her iki yöntemin de traslı çimentolu betonlara başarı ile uygulanabildiği sonucuna vardı.

Türkiye, 1979'da ASTM C 684-74'te tanımlanan hızlandırılmış kür yöntemlerini TS3323 standardı (51) ile benimsedi, Böylece sıcak su, kaynar su ve otojen kür yöntemleri Türk Standartları kapsamına alınmış oldu.



Şekil 2.16. ÖZTEKİN'in Kaynar Su Yöntemiyle Elde Ettiği H.D.-S.D. İlişkisi (49)

Şekil 2.17. ÖZTEKİN'in Sıcak Su Yöntemiyle Elde Ettiği H.D.-S.D. İlişkisi (50)

## 2.2 ISIL İŞLEMLER

Artan konut talebini en kısa sürede ve ekonomik biçimde karşılayabilmek amacıyla inşaat teknolojisi sanayileşmeye ve seri üretime yönelmiş, sonucunda prefabrikasyon, tünel kalıp ve benzeri rasyonel yapım yöntemleri geliştirilmiştir.

Çağımızın en yaygın yapı malzemesi olan betonun sertleşmesi ve dayanım kazanması rasyonel yapım yöntemlerinin gereklerine oranla yavaş kalır. Betonun sertleşmesini hızlandırmak ve en kısa sürede istenen dayanım düzeyine ulaştırmak için uzun zamandır çeşitli yöntemler uygulanmakta ve yenileri araştırılmaktadır. Bu yöntemler arasında; ısıtma işlemi uygulamak, kimyasal katkı maddesi kullanmak, özel çimento kullanmak, çimento inceliğini ve dozajını artırma, su/çimento oranını düşürme gibi faktörlerden yararlanmak, karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında özel önlemler almak sayılabilir (1).

Isıtma işlemleri, soğuk iklim koşullarında beton dökümünde kullanılma avantajı yanında, beton sertleşmesinin hızlandırılmasında çok yaygın uygulama bulurlar, değişik koşullara çeşitli biçimlerde uyarlanabilme yeteneğini gösterirler. Isıtma işlemleri bugün, kaldırım taşı üretiminden iki boyutlu pano, üç boyutlu hacim elemanları üretimine; küçük kiriş, kolon eleman üretiminden büyük keson kutu köprü elemanları üretimine kadar her dalda, beton, betonarme ve öngerilmeli beton tüm yapı elemanlarında yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Sıcaklığın dayanım üzerindeki etkisi araştırılmaya başlandığında birçok araştırmacı bunu "olgunluk derecesi" kavramıyla açıklamaya çalışmıştır. Betonun dayanımı yaş ve sıcaklığın her ikisine de bağlı olduğu için dayanımın zaman x sıcaklığın bir fonksiyonu olduğu söylenmiş ve bu kavram "olgunluk derecesi" olarak isimlendirilerek çeşitli şekillerde tanımlanmaya çalışılmıştır.

SAUL (7), atmosfer basıncında buhar küre prensiplerini anlatırken, olgunluk derecesini  $0^{\circ}\text{C}$  nin üzerindeki ortalama sıcaklığın yaşla çarpımı olarak ifade etmiştir.

$$O.D = \int_0^t T \cdot dt$$

O.D : olgunluk derecesi, T: sıcaklık, t: zaman



Daha sonra çeşitli araştırmacılar değişik referans sıcaklıkları önermişler, bazıları da olgunluk derecesini deney sonuçlarına uyum sağlamak amacıyla gittikçe karmaşık biçimde açıklamaya çalışmışlardır.

Isıl işlemlerin sıcaklığı  $100^{\circ}\text{C}$  nin altında kaldığı sürece ısıtma yöntemi ve teknolojisi ne olursa olsun çimentonun hidrasyon reaksiyonları hızlanarak (52) ARRHENIUS denklemine uygun biçimde geliştiği kabul edilir (53).

$$V = A \cdot e^{-E/RT}$$

V: reaksiyon hızı, A: katsayı, E: aktivasyon enerjisi, R: gaz sabiti, T: mutlak sıcaklık ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Sıcaklığı hidrasyon reaksiyonlarına ve ürünlerine etkisinin, olgunluk derecesi kavramının dışında araştırılması daha doğru olacaktır.

Bu arada,  $140-220^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta uygulanan basınçlı buhar kü-rünün yalnız işlem sıcaklığınının yüksekliği nedeniyle değil, aynı zamanda uygulama alanlarının ve hidrasyon ürünlerinin farklılıkları nedeniyle de diğer ısıl işlemlerden ayrıldığı muhtemeldir.

### 2.2.1 Isıl İşlemin Fiziksel ve Yapısal Analizi

Isıl işlem sırasında betonun bünyesinde değişiklik yaratarak genel kalitesini etkileyebilecek unsurların analizi aşağıda sırayla verilmektedir.

#### 2.2.1.1 Kalıcı Hacim Artışı

Isıl işlem sırasında sıcaklık artışına bağlı olarak beton genişir. Taze beton içinde mevcut çimento, agrega, su ve hava boşluğu fazları çok farklı genleşme katsayılarına sahiptir. Katı tanelerin yaklaşık 10 katı bir genleşme katsayısına sahip olan suyun ve 100 katı genleşme katsayısına sahip olan havanın genleşmeleri ısıtma döneminde taze betonda büyük bir hacim artışı yaratır. Özellikle ön bekleme süresinin az olduğu çevrimlerde betonun kohezyonu su ve hava fazlarının genleşmelerini önlemeye yetersizdir. Isıtma ve işlem dönemlerindeki hızlı hidrasyon sonucu beton sertleşir ve soğuma dönemine sertleşmiş beton

olarak girer. Dolayısı ile bu dönemde malzeme katı fazın genleşme katsayısına bağlı sınırlı bir ısıl büzülme yapar. Çevrim başında taze, sonunda ise sertleşmiş bulunan beton, meydana gelen kalıcı hacim artışı sonunda porozitesi yüksek ve ileri yaşlarda düşük kaliteli bir malzeme olarak ortaya çıkar (1,54,55).

Kalıcı hacim artışını önlemek veya en alt düzeye indirmek, ısıtmaya başlamadan önce betona yeterli dayanımı kazandırmakla mümkündür. Ön bekleme süresi ne kadar uzun ve sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, priz ve sertleşme o ölçüde ilerler, hacim artışı azalır. Isıtma hızı ne kadar küçük olursa aşırı genleşmeye maruz kalmadan beton o oranda sertleşip dayanım kazanarak hacim artışına direnç gösterecek, işlem sıcaklığı ne kadar düşük olursa toplam genleşme, dolayısıyla hacim artışı az olacaktır.

Beton ne kadar su/çimento oranı düşük, kompasitesi yüksek, iyi yerleştirilmiş, sıkı bir betonsa su ve hava boşluğu fazları o kadar az olacak, dolayısı ile hacim artışı miktarı da sınırlandırılacaktır. Isıl işlem, beton bütünüyle kapalı ve rijit kalıplar içindeyken uygulanırsa, kalıcı hacim artışı ve getireceği bozukluklar engellenmiş olur (1).

#### 2.2.1.2 Isıl Gerilmeler

Mikrodalga veya Joule etkisiyle ısıtma gibi, ısıl işlem uygulanan yapı elemanının her noktasında yaklaşık aynı sıcaklığı sağlayabilen yöntemlerin dışındaki ısıl işlemlerde, eleman bünyesinde sıcaklık farkları ve sonucunda ısıl gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler özellikle sıcaklık farklarının yüksek olduğu ısıtma ve soğuma dönemlerinde kendilerini gösterir. Sıcaklık farkı ısıtma veya soğutma hızı ve işlem sıcaklığı ile birlikte artar; ayrıca elemanın kalınlığına veya daha genel olarak geometrisine, betonun ısı iletkenlik ve difüzyon katsayılarına, elemanla ortam arasındaki ısı konveksiyon katsayısına bağlıdır.

Sıcaklık farkları altında oluşan farklı genleşmeler elemanda ısıl gerilmeler yaratır. Bir noktada gerilmenin önemi o nokta sıcaklığı ile elemanın ortalama sıcaklığı arasındaki farka, genleşme katsayısına, elastisite modülüne ve Poisson oranına bağlıdır (1).



Isıl gerilmeler sonucu elemanda mikro ve makro çatlaklar oluşabilir. Isıtma döneminde meydana gelebilecek mikro çatlaklar izleyen dönemlerde oluşacak hidrasyon ürünleri ile doldurulup kapatılabilir. Soğuma döneminde oluşabilecek çatlaklar aynı şansa sahip değildir. Bu dönem sonunda hidrasyon potansiyeli azalmış durumdadır ve devamı betonun suyunun korunmasına bağlıdır. Pratikte ısı işleminden çıkmış elemanlar bu açıdan özen görmezler ve genellikle sıcakken işlem yerlerinden alınıp açık hava koşullarına terk edilirler. Bu ihmalkarlık sonucu ısı gerilmelerin olumsuz etkilerine rötre gerilmeleri de eklenir.

#### 2.2.1.3 Su Kaybı

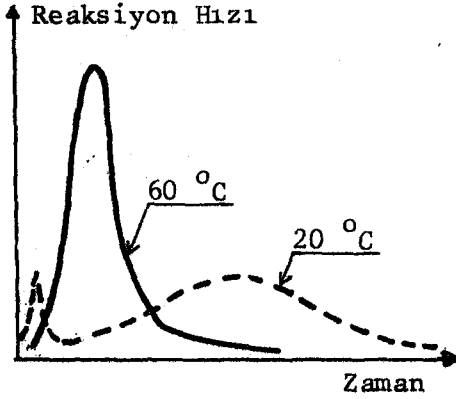
Su kaybı önceki bölümde değinildiği gibi yalnız soğuma döneminde değil tüm çevrim sırasında ve sonrasında önem taşımaktadır. Hidrasyon reaksiyonları için gerekli suyu beton bünyesinde tutmak zorunludur. Halbuki sıcaklığın artması buharlaşmayı büyük ölçüde hızlandırır. Buhar küre uygulamasının en yaygın ısı işlem türü olmasında, basit teknolojisinin yanında, sağladığı nemli ortam sayesinde su kaybını önlemesi de önemli bir etkidir (1).

İleri yaşlardaki dayanım kaybında saklama koşulları da etkilidir. Beton suyunun korunduğu ve sağlandığı saklama koşullarında hidrasyon reaksiyonları devam edebilecek ve beton dayanım kazanabilecektir.

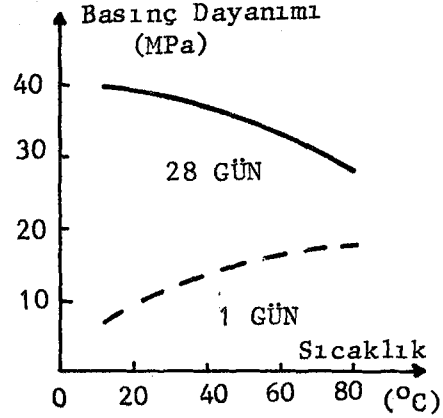
#### 2.2.1.4 Yapısal Analiz

İlk yaşlarda sıcaklığın hidrasyon reaksiyonlarını önemli ölçüde hızlandırdığı bilinen gerçektir. Reaksiyon hızı Şekil 2.21'de izlenen biçimde değişir: artan sıcaklıkla reaksiyon hızının maksimum değeri yükselir ve maksimumdan geçme anı zamanın küçük değerlerine doğru kayar (1,27,56). Hidrasyon derecesine paralel olarak dayanım, elastisite modülü, ultrases hızı gibi özellikler de sıcaklıkla artan bir gelişme gösterirler. Ancak ilk yaşlarda hidrasyon derecesinde ve hemen tüm

diğer özelliklerde sağlanan artışın bedeli olarak ileri yaşlarda (örneğin 28 gün) normal sıcaklığa oranla bir düşme söz konusudur (Şekil 2.22) (1,57).



Şekil 2.21. Reaksiyon Hızının Sıcaklığa Bağlı Olarak Değişimi



Şekil 2.22. Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Araştırmacılar arasında tam fikir birliği olmamakla beraber ısı işlem sonucu oluşan hidrasyon ürünlerinde 20 °C'ye oranla ve işlem sıcaklığı yükseldikçe, kristalleşmiş ürünlerin jel tipi ürünlere oranla arttığı, kristal ürünlerin boyutlarının büyüdüğü, etrenjitin yerini monosülfoalüminata bıraktığı söylenebilir. Kristalleşmiş ürünlerin oran ve boyut olarak artması sonucu hidrasyon ürünlerinin özgül yüzeyleri düşer, taneleri birbirine bağlayan köprü sayıları azalır. Bazı araştırmacılar (1,7) ileri yaşlardaki dayanım kaybını bu etkiye bağladılar. Diğer bazı araştırmacılar (58) yüksek sıcaklıkta hızlı reaksiyon sonucu hidrasyon ürünlerinin çimento tanelerini yoğun bir tabaka oluşturarak kapladıklarını ve geride boşluklar bıraktıklarını, bu şekilde oluşan boşluklu heterojen yapının da dayanım kaybına yol açtığını ileri sürdüler.

Yapısal bozukluğun ölçüsü tabiatıyla çevrim parametreleri dışında çimentonun bileşimi ve inceliği, su/çimento oranı gibi faktörlere bağlı kalacaktır. Önceki bölümlerde incelenen fiziksel bozukluklar uygun koşullar sağlanarak önlenbilse bile yapısal bozukluk nedeniyle ısı işlemiş beton özelliklerinde ileri yaşlarda, düşme beklemek gerekecektir.

Beton sertleşmesinin hızlandırılmasında kullanılan ısı işlemler hakkında mevcut bilgilerin taranması ve sentezi, bu uygulamanın beton yapısı üzerindeki etkisini iki değişik açıdan ele alma gereğini ortaya koyar (1):

- 1- Sertleşmiş çimento hamuru yapısında, yüksek sıcaklıkta hidratasyon sonucu oluşan, kaçınılmaz yapısal bozukluk.
- 2- Kalıcı hacim artışı, ısı gerilme ve su kaybı sonucu oluşan kaçınılabılır fiziksel bozukluk.

Uygun ısı işlem çevrimi seçimiyle, kaçınılmaz yapısal bozukluk derecesi asgariye indirilebilir, ancak giderilemez. Bu bozulma sonucu ileri yaşlarda özelliklerde gözlenen kayıp, ilk yaşlardaki kazancın bedeli olarak değerlendirilir.

### 2.3 ISIL İŞLEMİN MEYDANA GETİRDİĞİ DEĞİŞİMLER AÇISINDAN STANDART HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMLERİNİN ELEŞTİRİSİ

ASTM standardından alınarak Türk Standartlar Enstitüsü tarafından aynen benimsenen hızlandırılmış kür yöntemlerinin karakteristikleri Tablo 2.1'de özetlenmiştir (51).

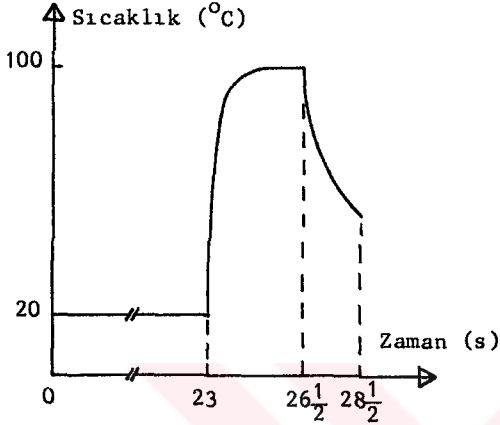
Tablo 2.1. Hızlandırılmış Kür Yöntemleri Karakteristikleri

Yöntem	Hızlandırılmış Kür Ortamı Sıcaklığı (°C)	Hızlandırılmış Küre Başlama Yaşı	Hızlandırılmış Kür Süresi	Basınç Dayanım Deneyi Yaşı
A Yöntemi (Sıcak Su Kürü)	Su (35±3)	Numunenin Dökümünden Hemen Sonra	23½ s ±30 dak	24 s ±15 dak
B Yöntemi (Kaynar Su Kürü)	Su (Kaynama Sıcaklığı)	Numunenin Dökümünden 23 Saat Sonra	3½ s ±5 dak.	28½ s. ±15 dak
C Yöntemi (Otojen Kür)	Hidratasyon Isısından İleri Gelen Beton Sıcaklığı	Numunenin Dökümünden Hemen Sonra	48 s ±15 dak	49 s ±15 dak

Bu yöntemler birer ısıl işlem çevrimi olarak ele alınıp incelenirse aşağıdaki belirlemeleri yapmak mümkün olur.

#### Kaynar Su Yöntemi:

Kaynar su yöntemi gerek çok yüksek ( $\sim 100$  °C) işlem sıcaklığı, gerekse ani ısıtma ve soğuma dönemleri nedeniyle ısıl işlem uygulamalarında hiç karşılaşılmayan türde çok sert bir



Şekil 2.23. Kaynar Su Yöntemi-ne Ait Çevrim Şekli

çevrimdir (Şekil 2.23). İşlem sıcaklığının çok yüksek olması hem beton bünyesinde oluşan hidratasyon ürünlerinin farklılığı ve heterojen dağılımı açılarından sakınca doğurmakta, hem de kalıcı hacim artışı yaratmaktadır. İşlem sıcaklığının yüksekliğine ani ısıtma ve soğuma hızları da eklenince ısıl gerilmeler

de önemli boyutlara ulaşmaktadır. Kür ortamının kaynar su olması su kaybı sorununu çözmekte, numunelerin kapaklı rijit çelik kalıplar içinde tutulması ve 23 saatlik uzun ön bekleme dönemi kalıcı hacim artışı sorununu bir ölçü hafifletmektedir. Bunlara rağmen yöntemin beton bünyesinde yapısal ve fiziksel bozukluklar yaratacak düzeyde çok sert bir ısıl işlem çevrimi olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan yöntemde işlem süresinin  $3 \frac{1}{2}$  saat gibi kısa bir süre olması toleransı  $\pm 5$  dakikaya kadar düşürme zorunluğunu getirmekte, aksi halde hızlandırılmış dayanımlar arasında farklılık artmaktadır. Örneğin 10 dakikalık sapma işlem süresinde, dolayısı ile olgunluk derecesinde ve hızlandırılmış basınç dayanımında  $10/3.5 \times 60 \approx \%5$  dolayında bir fark yaratmakta, aynı sapmanın sıcak su yöntemindeki etkisi ise  $10/23.5 \times 60 \approx \%0.7$  gibi çok düşük bir oranda kalmaktadır.

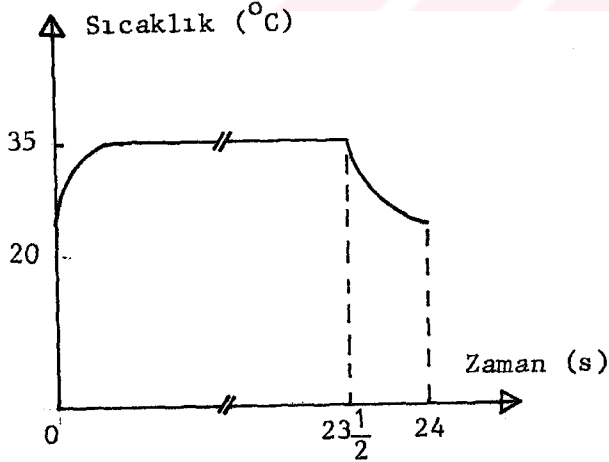
Suyun kaynama sıcaklığı rakıma ve suyun saf olmamasına bağlı olarak değiştiğinden olgunluk derecesi ve hızlandırılmış dayanım değeri de buna bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Yukarıda sayılan nedenlerden dolayı kaynar su yöntemiyle elde edilen hızlandırılmış basınç dayanımı değerlerinin dağılımı (standart sapma veya varyasyon katsayısı olarak) nispeten yüksek olmakta, bu da 28 günlük standart dayanımın tahmin hassasiyetini düşürmektedir. Buna karşılık çevrimin sert olması yüksek bir hızlandırılmış dayanım kazandırmakta, hızlandırılmış dayanımlarla standart dayanım arasında fark azaldığından tahminin hassasiyeti olumlu etkilenmektedir.

Kaynar su yönteminin pratik açıdan iki olumsuz yönü daha vardır. Bunlardan biri numune alma ile basınç deneyi arasında  $28 \frac{1}{2}$  saatlik fark sonucu işlemlerin normal çalışma saatlerinin içine düşmemesidir. Örneğin salı günü 16.00 da alınan ve kaynar suda hızlandırılmış kür gören numunelerin basınç deneyi çarşamba akşamı 20.30'a, mesai saatlerinin çok dışına taşmaktadır. İkinci ve daha önemli husus kaynar suyun ve buharının çalışan teknisyenler için yarattığı tehlikedir.

#### Sıcak Su Yöntemi:

Sıcak su yöntemi gerek 24 saatlik toplam süresi gerekse  $35^{\circ}\text{C}$  lik çok düşük işlem sıcaklığı ile tipik bir yumuşak çevrim niteliğindedir. İşlem sıcaklığının neredeyse yaz aylarında



Şekil 2.24. Sıcak Su Yöntemine Ait Çevrim Şekli

karşılaşılan beton sıcaklıkları kadar düşük bir düzeyde gerçekleşmesi gerek hidrasyon ürünlerinin farklılaşması, gerekse heterojen dağılımları açısından önemli bir sakınca yaratmamaktadır. Kür ortamının sıcak su olması su kaybı sorununu çözmektedir. İşlem sıcaklığının düşüklüğü kalıcı hacim artışı ve ısıl gerilmeler açısından da olumlu bir husus oluşturmaktadır. Her ne kadar ön bekleme dönemi bulunmaması, ısıtma ve soğumanın ani olması

bu açıdan sakınca yaratsa da işlem sıcaklığının düşüklüğü bu sakıncaları kısmen dengelemektedir (Şekil 2.24).

Sıcak su yöntemi işlem süresinin uzunluğu nedeniyle süre sapmalarına az hassas olmakta, bu nedenle  $\pm 30$  dakikalık bir tolerans tanınabilmektedir. Buna karşılık işlem sıcaklığı üzerindeki tolerans  $\pm 3$  °C ile sınırlanmıştır. Bu tolerans bile sıcaklıkta ve olgunluk derecesinde 3/35 =%8-9 gibi bir farklılığa yol açabilecek düzeydedir. Ancak termostatlı kür tanklarında su sıcaklığını  $\pm 1$  °C, hatta  $\pm 0.5$  °C hassasiyetle sabit tutmak rahatlıkla mümkün olmakta, pratikte işlem sıcaklığını sabit tutmak sorun yaratmamaktadır.

Bu nedenlerden dolayı sıcak su yöntemiyle elde edilen hızlandırılmış basınç dayanımı değerlerinde dağılma düşük, 28 günlük standart dayanımın tahmin hassasiyeti yüksek olmaktadır. Buna karşılık işlem sıcaklığının azlığı hızlandırılmış dayanım değerinin düşüklüğüne yol açmakta, bu da tahminin hassasiyetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu konuda ÖZTEKİN'in çalışmaları (49,50) çok yararlı karşılaştırmalı sayısal bilgi üretilmesine olanak vermektedir. ÖZTEKİN hem kaynar su, hem de sıcak su yöntemlerini aynı koşullarda paralel biçimde 59 değişik beton bileşimine uygulamıştır. ÖZTEKİN'in çalışmalarında 28 günlük standart basınç dayanımı değerlerinin ortalaması 23.2 MPa, deney içi standart sapma 0.9 MPa, varyasyon katsayısı %3.9 olmuştur. Hızlandırılmış basınç dayanımları için aynı değerler sırası ile sıcak su yöntemi için 8.2 MPa, 0.32 MPa ve %3.9, kaynar su yöntemi için 9.9 MPa, 0.5 MPa ve %5.1 olarak bulunmuştur. 28 günlük standart basınç dayanımının tahminindeki standart hata sıcak su yöntemi için 1.42 MPa, kaynar su yöntemi için 1.40 MPa olarak aynı düzeyde çıkmıştır. Görüldüğü gibi kaynar su yöntemi daha yüksek hızlandırılmış dayanım kazandırmış buna karşılık sıcak su yönteminde dağılma daha düşük gerçekleşmiş, sonucunda iki unsur birbirini dengeleyerek tahminin hassasiyetinde iki yöntem eşdeğer sonuç vermiştir.

Sıcak su yönteminin uygulamada diğer olumlu yönleri, numune alma ve basınç deneyi işlemlerinin bir gün farkla aynı saatlere gelerek normal mesai saatleri dışına taşmaması, su sıcaklığının çalışan teknisyenler için hiçbir tehlike yaratmayacak düşüklükte kalmasıdır.



### Otojen Kür Yöntemi:

Bu yöntemde bir ısıl işlem çevrimi söz konusu değildir. Üretilen silindir numuneler yalıtılmış özel kaplara yerleştirilmekte, çimentonun hidratasyon ısısı sonucu sıcaklık artmakta, sertleşme hızlanmakta, 20°C de standart küre oranla daha yüksek bir dayanım elde edilmektedir.

Bu yöntemin başlıca avantajları basitliği, can güvenliği açısından tehlike taşımaması (60), kür sırasında kapların taşınabilmesi, dolayısı ile şantiyede laboratuvar gerektirmemesi (26,60) ve kür süresi iki tam günden yalnız bir saat fazla olduğundan basınç deneyinin mesai saatleri içine denk düşmesidir (60).

Buna karşılık yöntemin dezavantajları daha ağırlıklıdır:

1- 48 saatlik kür çevrimi, çok uzun bir süredir. İyi bir hızlandırılmış kür çevriminin 30 saati, tercihen 1 günü aşmaması gerekir (61,62).

2- Çevrim süresinin uzunluğu nedeniyle fazla miktarda özel kalıba ihtiyaç vardır (61,62).

3- Otojen kür, çimentonun hidratasyon ısısından yararlanma esasına dayandığı için sonuçlar numunelerin üretildiği sıradaki beton sıcaklığından çok etkilenir. Bu durum, sıcaklık farklarının fazla olduğu yörelerde daha iyi gözlenmiştir. Beton sıcaklığının kışın 15 °C'nin altına düşmemesi, yazında 32 °C'yi aşmaması istenir (29,62).

4- Özellikle düşük hidratasyon ısıllı çimento kullanıldığında dayanım artışı 48 saat standart kür edilmiş numunelere oranla pek fazla değildir (62).

5- Sonuçlar, priz geciktirici veya hızlandırıcı katkı maddelerinden çok etkilenir (61,62).

6- Çalışma saatleri düzenli olmasına rağmen perşembe ve cuma günleri dökülen numunelerin denenmesi hafta sonuna denk geldiğinden problem yaratır (26,62).

Bu nedenlerle yöntem diğerleri kadar yaygın kullanıma sahip değildir.

### 2.3.1 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Sağlaması Gereken Koşullar

Hızlandırılmış kür uygulamasının temel amacı betonun genel kalite ölçüsü olarak kabul edilen 28 günlük standart basınç dayanımı değerinin en doğru biçimde ve en kısa sürede belirlenmesidir.

1- Hızlandırılmış kür birkaç saate sığdırılarak aynı iş günü içinde hem numune alma, hem de basınç deneyi işlemleri gerçekleştirilemiyorsa, en uygun süre 24 saat olarak belirlenmiştir. Bu süre, işlemleri normal çalışma saatleri içine sığdırılabilen en kısa kür süresi olmaktadır.

2- Hızlandırılmış basınç dayanımı mümkün merteye yüksek olmalıdır. Bu olgu kür sıcaklığının mümkün merteye yüksek olmasını gerektirmektedir.

3- Hızlandırılmış basınç dayanımı değerlerindeki dağılım mümkün merteye düşük olmalıdır. Bu olgu, beton bünyesinde oluşabilecek yapısal ve fiziksel bozukluk derecesini sınırlamak açısından kür sıcaklığının fazla yüksek olmamasını gerektirmektedir, aynı zamanda ısıtma çevriminin ön bekleme süresi, ısıtma hızı, soğuma dönemi gibi unsurlarına da önem verilmesine işaret etmektedir.

4- Benzer koşullarda tekrarlandığında elde edilen hızlandırılmış basınç dayanımı değerleri aynı düzeyde olmalı, yani sonuçlar tekrarlanabilir olmalıdır. Bu husus ancak beton bünyesinde oluşacak yapısal ve fiziksel bozuklukların sınırlandırılmasıyla, yani nispeten düşük bir işlem sıcaklığı ve uygun çevrim parametreleriyle sağlanabilir.

5- Hızlandırılmış dayanımla standart dayanım arasında yüksek korelasyonlu basit bir ilişki bulunmalı, bu ilişki geniş bir dayanım aralığında geçerli olabilmeli, beton bileşiminden, kullanılan çimento veya agrega çeşitlerinden, katkı maddelerinden mümkün olduğunca az etkilenmelidir. Bu husus da beton bünyesindeki yapısal ve fiziksel bozuklukları sınırlandıracak uygun bir ısıtma çevrimine işaret etmektedir.



6- Yöntem basit bir ekipmanla kolay uygulanabilir olmalı ve çalışanların sağlığı için tehlike arz etmemelidir.

Yukarıda sayılan bütün koşullar birlikte değerlendirildiğinde optimum nitelikte hızlandırılmış kür yönteminin, sıcak su yönteminin temel özelliklerini koruyan ancak sakıncaları hafifletilmiş bir "değiştirilmiş sıcak su yöntemi" olabileceği görüşüne varılmaktadır. Değiştirilmiş sıcak su yönteminin (DSSY) işlem sıcaklığı biraz daha yüksek olmalı, böylece daha yüksek hızlandırılmış dayanım değeri vermeli, ancak beton bünyesindeki bozuklukları sınırlamak amacıyla da fazla yüksek olmamalıdır. Çalışan teknisyenlerin güvenliği de dikkate alındığında bu sıcaklığın 45 °C ile sınırlanması makul görülmektedir. DSSY'de ön bekleme süresi ve soğuma süresi gibi çevrim parametreleri de özenle seçilmelidir.

#### 2.4. AMAÇ VE İÇERİK

Çalışmanın temel amacı önceki bölümde belirtilen niteliklere sahip daha etkin, daha hassas tahmine imkan veren bir hızlandırılmış kür yönteminin belirlenmesidir. Bunun için mevcut sıcak su yöntemi esas alınarak geliştirilmesi planlanmış, yöntemin bir ısıtma işlem çevrimi sistematiği içinde ele alınması benimsenmiştir. Isıtma işlem çevrimini belirleyen parametreler önceki bölümlerde belirtildiği gibi ön bekleme süresi (ve sıcaklığı), ısıtma hızı (veya süresi), işlem sıcaklığı ve süresi, son bekleme süresidir. Toplam çevrim süresi 24 saat olarak benimsenmiş, işlem sıcaklığı için 43 ve 45 °C lerin, ön bekleme süresi için 0, 1 ve 2 saatlik sürelerin, soğuma süresi için 1, 1  $\frac{1}{2}$  ; 2 ve 2  $\frac{1}{2}$  saatlik sürelerin denenmesi programlanmıştır. Isıtma hızının ayarlanması sıcaklığı programlanabilir karmaşık yapıda ve yüksek maliyetli bir kür tankı gerektirmektedir. Böyle bir kür tankının şantiye laboratuvarlarında yaygın ölçekte kullanılma olasılığı düşük görüldüğünden ısıtma hızının incelenmesinden ve değiştirilmesinden vazgeçilmiş, numunelerin doğrudan işlem sıcaklığındaki (43 veya 45 °C) tanka daldırılması benimsenmiştir.

Bu bölüm deneysel çalışmanın birinci aşamasını oluşturmakta, değiştirilmiş sıcak su yöntemi adı verilen optimum yöntemin parametreleri belirlenmektedir.

İkinci aşamada belirlenen yöntem, sıcak su yöntemi ve standart kür paralel biçimde 49 ayrı betona uygulanmış, hızlandırılmış dayanım değerleri, sonuçlardaki dağılım, tahminin hassasiyeti karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Üçüncü aşamada gerçek çalışma koşullarında çevrim parametrelerinde oluşabilecek sapmaların hızlandırılmış dayanım üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu parametreler için tolerans sınırları önerilmiştir.

Dördüncü ve son aşamada yöntem dünyada giderek yaygın uygulama bulan yüksek dayanımlı betonlara da uygulanmış ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmanın deneysel bölümü dört kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda hızlandırılmış kür yöntemi belirlenmiş, ikinci kısımda, belirlenen hızlandırılmış kür yöntemi tip betonlar üzerinde denenmiş, üçüncü kısımda çevrim parametrelerindeki sapmaların sonuçları ne oranda etkilediği araştırılmıştır. Dördüncü kısımda yöntemin yüksek dayanımlı betonlara uygulanabilirliği ele alınmıştır.

Bu bölümde, önce kullanılan malzemeler, aletler ve deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

#### 3.1 DENEYLERDE KULLANILAN MALZEMELER, ALETLER VE DENEYLERİN YAPILIŞI

##### 3.1.1 Kullanılan Malzemeler

###### Çimento

Birinci kısımda (Hızlandırılmış Kür Yönteminin Belirlenmesi) sınırlı sayıda deneyde kullanılan KPÇ325 çimentosu dışında tüm deneylerde 3 farklı fabrika ürünü PÇ400 portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoların kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1 a,b,c ve d de görülmektedir.

Tüm deneysel çalışma sırasında, üretimlerde hangi çimentoların kullanıldığı Tablo 3.2 de görülmektedir.

###### Agrega

Deneylerde Espiye yöresinden sağlanan doğal dere çakılı ve kumu kullanılmıştır. Fakat tüm deneyler aynı parti malzeme ile sürdürülememiş, bir kısım deneylerde yine aynı yöreden gelen ikinci bir parti malzeme kullanılmıştır.

İri agrega 31.5 mm lik elekten elenerek alta geçen kısım kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı beton üretimlerinde ise agrega 19 mm lik elekten elenmiş ve alta geçen kısım kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Çimentoların Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Tipi : PÇ 400		Kodu: PÇ 400-1	
Üretim Yeri : İthal klinker, STFA'da öğütülmüş			
KİMYASAL ANALİZLER	Analiz Sonuç. (%)	FİZİKSEL DENEYLER	
Magnezyum oksit (MgO)	2.00	Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup>	3.13
Aluminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.57	İNCELİK	Özgül yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr 4788
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	21.56		200 mikron elek üzerinde kalan, % 0.0
Kalsiyum oksit (CaO)	61.28		90 mikron elek üzerinde kalan, % 0.4
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.00	Priz Süresi Saat (Vicat)	Başlangıç 2 <sup>00</sup>
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	3.19		Son 3 <sup>15</sup>
Potasyum oksit (K <sub>2</sub> O)	0.69		
Sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O)	0.27	Hacim sabitliği (Le Chatelier) Toplam genleşme, mm 1	
Kızdırma kaybı	1.23		
MEKANİK DENEYLER			
Serbest Kireç (CaO)	1.18	Gün	Eğilme Dayanımı MPa
Çözünmeyen kalıntı	0.51		
Trikalsiyum silikat (3CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>3</sub> S)	23.59	2	4.4
Dikalsiyum silikat (2CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>2</sub> S)	43.91	3	-
Trikalsiyum alüminat (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>3</sub> A)	12.33	7	5.6
Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>4</sub> AF)	9.13	28	6.9
Not: Potansiyel bileşim Bogue denklemleriyle hesaplanmıştır.			

a) PÇ 400-1 Çimentosunun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Tipi : KPC 325		Kodu: KPC 325	
Üretim Yeri : Ünye			
KİMYASAL ANALİZLER	Analiz Sonuç. (%)	FİZİKSEL DENEYLER	
Magnezyum oksit (MgO)	1.07	Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup>	2.94
Aluminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.77	İNCELİK	Özgül yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr 3326
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	18.81		200 mikron elek üzerinde kalan, % 0.2
Kalsiyum oksit (CaO)	55.48		90 mikron elek üzerinde kalan, % 6.2
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.60	Priz Süresi Saat (Vicat)	Başlangıç 2 <sup>35</sup>
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	2.84		Son 3 <sup>15</sup>
Potasyum oksit (K <sub>2</sub> O)			
Sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O)		Hacim sabitliği (Le Chatelier) Toplam genleşme, mm 10	
Kızdırma kaybı	3.54		
		MEKANİK DENEYLER	
Serbest Kireç (CaO)	1.22	Gün	Eğilme Dayanımı MPa
Çözümeyen kalıntı	8.37		
Trikalsiyum silikat (3CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>3</sub> S)	25.86	2	3.7
Dikalsiyum silikat (2CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>2</sub> S)	34.48	3	-
Trikalsiyum alüminat (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>3</sub> A)	9.21	7	5.1
Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>4</sub> AF)	10.95	28	7.1
Not: Potansiyel bileşim Bogue denklemleriyle hesaplanmıştır.			

b) KPC 325 Çimentosunun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Tipi : PÇ 400		Kodu: PÇ 400-2	
Üretim Yeri : Darıca (Aslan)			
KİMYASAL ANALİZLER	Analiz Sonuç. (%)	FİZİKSEL DENEYLER	
Magnezyum oksit (MgO)	1.87	Özgül Ağırlık	gr/cm <sup>3</sup> 3.15
Aluminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.95	İNCELİK	Özgül yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr 3347
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	21.14		200 mikron elek üzerinde kalan, % 0.2
Kalsiyum oksit (CaO)	63.94		90 mikron elek üzerinde kalan, % 7.3
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.01	Priz Süresi Saat (Vicat)	Başlangıç 2 <sup>30</sup>
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	2.17		Son 3 <sup>15</sup>
Potasyum oksit (K <sub>2</sub> O)	0.76		
Sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O)	0.20	Hacim sabitliği (Le Chatelier) Toplam genleşme, mm 1	
Kızdırma kaybı	1.07		
		MEKANİK DENEYLER	
Serbest Kireç (CaO)	0.11		
Çözürmeyen kalıntı	0.41	Gün	Eğilme Dayanımı MPa Basınç Dayanımı MPa
Trikalsiyum silikat (3CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>3</sub> S)	55.89	2	4.2 19.9
Dikalsiyum silikat (2CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>2</sub> S)	18.44	3	- -
Trikalsiyum alüminat (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>3</sub> A)	8.02	7	6.3 39.1
Tetrakalsiyum alüminoferrit (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>4</sub> AF)	9.16	28	7.1 52.2
Not: Potansiyel bileşim Bogue denklemleriyle hesaplanmıştır.			

c) PÇ 400-2 Çimentosunun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri

Tipi : PÇ 400		Kodu: PÇ 400-3	
Üretim Yeri : Ünye			
KİMYASAL ANALİZLER	Analiz Sonuç. (%)	FİZİKSEL DENEYLER	
Magnezyum oksit (MgO)	1.02	Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup>	3.12
Aluminyum oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	6.21	İNCELİK	Özgül yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr
Silisyum dioksit (SiO <sub>2</sub> )	18.85		200 mikron elek üzerinde kalan, %
Kalsiyum oksit (CaO)	63.21		90 mikron elek üzerinde kalan, %
Demir oksit (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.84	Priz Süresi Saat (Vicat)	Başlangıç
Kükürt trioksit (SO <sub>3</sub> )	3.45		Son
Potasyum oksit (K <sub>2</sub> O)	0.90	Hacim sabitliği (Le Chatelier) Toplam genleşme, mm	
Sodyum oksit (Na <sub>2</sub> O)	0.90	9	
Kızdırma kaybı	1.5		
MEKANİK DENEYLER			
Serbest Kireç (CaO)	1.32	Gün	Eğilme Dayanımı MPa
Çözünmeyen kalıntı	0.91		
Trikalsiyum silikat (3CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>3</sub> S)	51.44	2	4.1
Dikalsiyum silikat (2CaO.SiO <sub>2</sub> )(C <sub>2</sub> S)	15.31	3	-
Trikalsiyum aluminat (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>3</sub> A)	9.96	7	6.0
Tetrakalsiyum aluminoferrit (4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )(C <sub>4</sub> AF)	11.68	28	6.9
Not: Potansiyel bileşim Bogue denklemleriyle hesaplanmıştır.			

d) PÇ 400-3 Çimentosunun Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikleri



Tablo 3.2. Üretimlerde Kullanılan Çimentolar ve Agregalar

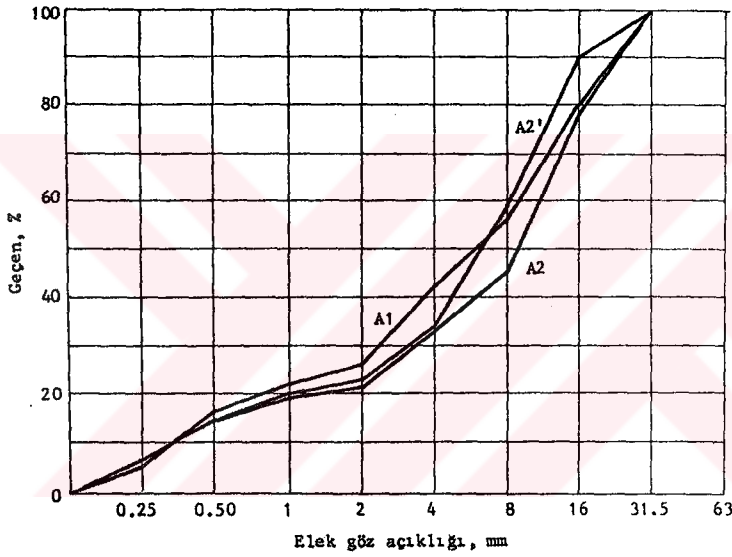
Deney Türü	Üretim No	Çimento	Agrega	Deney Türü	Üretim No	Çimento	Agrega					
Hızlandırılmış Kür Yönteminin Belirlenmesi	A1	PÇ 400-1	A1		B35	PÇ 400-1	A1					
	A2				B36							
	A3				B37							
	A4				B38							
	A5				B39							
	A6				B40							
	A7				B41							
	A8				B42							
	A9				B43							
	A10				B44							
	A11				B45							
	A12				B46							
	A13				B47							
A14	KPÇ 325	A2	Sapma Etkilerinin Belirlenmesi	C1	PÇ 400-3	A2						
A15	PÇ 400-1			C2								
A16	KPÇ 325			C3								
A17	PÇ 400-3			C4								
A18				C5								
A19				C6								
A20	KPÇ 325			C7			Yüksek Dayanımlı Beton	D1	PÇ 400-2	A2'		
A21	PÇ 400-1			D2								
Hızlandırılmış Kür Yönteminin Denenmesi	B1			PÇ 400-2				A2				D3
	B2											D4
	B3											D5
	B4											D6
	B5											D7
	B6	PÇ 400-1	A1	D8								
	B7			D9								
	B8			D10	PÇ 400-3							
	B9			D11	PÇ 400-2							
	B10			D12	PÇ 400-3							
	B11	PÇ 400-2	A2	D13								
	B12			D14								
	B13			D15	PÇ 400-2							
	B14			D16								
	B15			D17								
	B16	PÇ 400-3	A2	D18	PÇ 400-3							
	B17			D19								
B18	PÇ 400-3	A1	D20	PÇ 400-2								
B19	PÇ 400-2		D21									
B20			D22									
B21			D23									
B22			D24									
B23			PÇ 400-1	A1	D25	PÇ 400-3						
B24	PÇ 400-3				A2							
B25						PÇ 400-1	A1					
B26			PÇ 400-3	A2								
B27	PÇ 400-1				A1							
B28						PÇ 400-3	A2					
B29			PÇ 400-1	A1								
B30	PÇ 400-3				A2							
B31		PÇ 400-1				A1						
B32			PÇ 400-3	A2								
B33	PÇ 400-1				A1							
B34		PÇ 400-3				A2						

Agregaların TS706 (63) uyarınca belirlenen granülometri eğrileri Şekil 3.1 de, karışım agregalarının granülometri eğrileri ise Şekil 3.2 de verilmiştir.

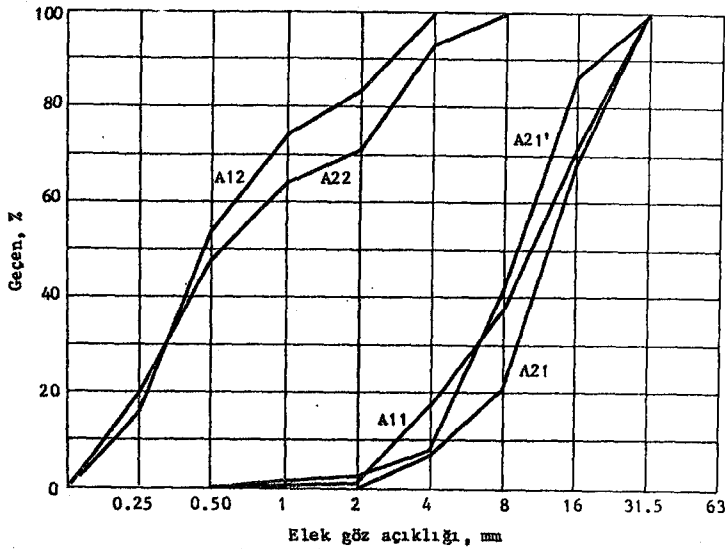
Agregaların TS3526 (64) uyarınca belirlenen fiziksel özellikleri ve granülometrik bileşimleri Tablo 3.3 de, karışım agregalarının granülometrik bileşimleri ise Tablo 3.4 de görülmektedir.

Agregaların minerolojik ve petrografik özellikleri ise Tablo 3.5 de verilmiştir.

Ayrıca tüm deneysel çalışma sırasında üretimlerde hangi parti agregaların kullanıldığı Tablo 3.2 de görülmektedir.



Şekil 3.1. Kullanılan Agregalara Ait Granülometri Eğrileri



Şekil 3.2. Karışım Agregalarına Ait Granülometri Eğrileri

Tablo 3.3. Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri ve Granülometrik Bileşimleri

KULLANILAN AGREGALAR		1. PARTİ		2. PARTİ				
		A11	A12	A21	A22	A21'		
		ÇAKIL	KUM	ÇAKIL	KUM	ÇAKIL (A21 agregası 19 mm den elenerek)		
GRANÜLOMETRİK BİLEŞİM (Geçen %)		Kare Delikli Elek Açıklığı (mm)	63	100	100	100	100	
			31.5	100	100	100	100	
			16	71	100	68	100	86
			8	37	100	21	100	41
			4	17	100	7	93	8
			2	0.9	83	0	71	2.4
			1	0.5	74	0	64	1.6
			0.50	0	54	0	48	0
			0.25	0	16	0	20	0
			FİZİKSEL ÖZELLİKLER		ÖZGÜL AĞIRLIK (D.Y.K) (gr/cm <sup>3</sup> )	2.66	2.63	2.68
SU EMME (%)	1.4	1.9			1.4	1.2	1.4	
DOĞAL NEM (%)	0.77	0.82			0.6	0.9	0.6	

Tablo 3.4. Karışım Agregalarının Granülometrik Bileşimi

ÖZELLİKLER		KARIŞIM AGREGALARI	A1	A2	A2'
			% 70 A11 % 30 A12	% 70 A21 % 30 A22	% 70 A21' % 30 A22'
GRANÜLOMETRİK BİLEŞİM (Geçen %)	Kare Delikli Elek Açıklığı (mm)	63	100	100	100
		31.5	100	100	100
		16	80	78	90
		8	56	45	59
		4	42	33	34
		2	26	21	23
		1	22	19	20
		0.5	16	14	14
		0.25	5	6	6

Tablo 3.5. Agregaların Mineralojik ve Petrografik Özellikleri

	Doğal çakıl (%)	Doğal kum (%)
Bazalt	49.1	15.3
Dasit	31.3	-
Granit	17.7	-
Andezit	1.6	-
Kireç taşı	0.2	-
Kuars	-	79.1
Feldispat	-	5.6

## Beton

Üretilen betonların karışım hesabı TS802 (65)'ye göre doğal su yüzdeleri dikkate alınarak, doyma suları agrega miktarlarından düşülecek şekilde hesaplanmıştır. Örnek bir beton karışım hesabı Ek 1 de verilmiştir.

## Katkı

Yüksek dayanımlı beton üretiminde, süper akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanılmıştır. Yurtdışından ithal edilen bu katkı, melaminformaldehit içeriklidir ve beyaz toz halindedir. Çimento dozajına oranla tavsiye edilen kullanma miktarı %0.2-0.9 dur.

Katkı maddesi, karışım suyuna ilave edilmiştir.

### 3.1.2 Kullanılan Aletler

Bu araştırmada, beton üretimleri 60 litre kapasiteli eğik eksenli 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip NACE marka betoniyerde gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 3.1).

Taze betonun işlenebilirliğinin ölçümünde SOLLTEST marka çökme konisi kullanılmıştır. Kalıplardaki taze betonun sıkılaşması, LOSENHAUSEN-WERK marka 2800 devir/dakika titreşim kapasiteli masa vibratörde gerçekleştirilmiştir (Fotoğraf 3.2).

Numunelerin havada ve suda tartımları BASTER marka 30 kg kapasiteli ve 10 gr hassasiyetli teraziye yapılmıştır. Deneylerde 150x300 mm boyutlu silindir kalıplar kullanılmıştır.

Basınç dayanım deneylerinde kullanılan aletler:

1. LOSENHAUSEN-WERK marka UHP-60 tipi 600 kN kapasite ve 5 ayrı skalaya sahip universal deney aleti. Yük ölçme sistemi pandüllü dinamometre (Fotoğraf 3.3).

2. LOSENHAUSEN-WERK marka WT-300 tipi, 3000 kN kapasiteli 5 kN okuma hassasiyetine sahip hidrolik pres (Fotoğraf 3.4).

Basınç dayanımı 30 MPa'yı aşan numuneler 3000 kN kapasiteli preste denenmiştir.



Fotoğraf 3.1. DeneYlerde Kullanılan Betoniyer



Fotoğraf 3.2. Vibratör ve Çökme Konisi



Fotoğraf 3.3. 600 kN 'lik Üniversal Deney Aleti



Fotoğraf 3.4. 300 kN 'lik Hidrolik Pres



Isıl işlem çevrimleri SOILTEST marka CT-399 tipi hızlandırılmış kür tankında ve ALFA marka hızlandırılmış kür tankında gerçekleştirilmiştir. Bu kür tankları 35°C ve 43°C lik çevrimler için aynı anda kullanılmıştır. Bunun yanında 10 kanallı OMEGA marka sıcaklık kaydedicisinden yararlanılmıştır (Fotoğraf 3.5, 3.6, 3.7).



Fotoğraf 3.5. Sıcak Su Yönteminin Uygulandığı SOILTEST Marka Hızlandırılmış Kür Tankı



Fotoğraf 3.6. Değiştirilmiş Sıcak Su Yönteminin Uygulandığı ALFA Marka Hızlandırılmış Kür Tankı



Fotoğraf 3.7. On Kanallı Dijital Termometre

### 3.1.3 Beton Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması

Üretime başlamadan önce betoniye ıslatılarak süzdürülmüştür. Belirlenen agrega miktarı tartıldıktan sonra betoniye doldurulmuş, biraz karıştıktan sonra doyma suyu ilave edilerek malzeme D.Y.K. (Doymun Yüzei Kuru) hale getirilmiştir. Daha sonra tartılan çimento bu karışıma ilave edilmiş, çimento tanelerinin betoniyein ağzından uçarak kaybolmaması için betoniyein ağzı bir çuvala bir müddet örtülü tutulmuştur. İyice karıştıktan sonra, karma suyu ilave edilmiştir. Yaklaşık 5 dakika karıştıktan sonra beton nemli bir kaba alınmıştır. Taze betonun işlenebilme özelliğini ölçme yöntemlerinden çökme konisi deneyi yapıldıktan sonra beton, önceden vibrasyon masası üzerine yerleştirilen ve üzerlerine farklı titreşimler yapmalarını önleyici bir ızgara takılan kalıplara (fotoğraf 3.8) yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen betonun sıkılması yapılmış ve betonların yüzeyi mala ile düzeltilmiştir.



Fotoğraf 3.8. Vibratör Üzerine Yerleştirilen Kalıplar ve Izgara

#### 3.1.4 Hızlandırılmış Kür Uygulaması

Hızlandırılmış kür yönteminin ve belirlenen yönteme ait çevrim parametrelerindeki sapmaların etkisinin araştırıldığı bölümler dışında çalışmadaki genel ısıl işlem uygulaması şöyledir:

Hızlandırılmış kür yönteminin ve belirlenen yönteme ait tolerans sınırlarının saptandığı bölümler dışında çalışmadaki genel ısıl işlem uygulaması şöyledir:

Beton yerleştirildikten sonra kapakları kapatılan numune kalıpları  $20^{\circ}\text{C}$  deki klimatize odaya getirilmiş (Fotoğraf 3.9), sıcak su yöntemi uygulanacak 3 numune hemen bu odada yer alan ve içinde  $35^{\circ}\text{C}$  su bulunan kür tankına yerleştirilmiştir. Kalan numunelerden değiştirilmiş sıcak su yöntemi uygulanacak 3'ü kür çevrimi uyarınca, bu odada 1 saat ön bekleme yaptıktan sonra  $43^{\circ}\text{C}$  deki diğer tanka yerleştirilmiş, diğer 3'ü ise standart kür uygulanmak üzere odada bekletilmiştir.

Değiştirilmiş sıcak su kürü uygulanan numuneler, 21 saat kür gördükten sonra tanktan çıkarılmış, kalıpları söküldükten sonra nem kaybı olmaması için naylon torbalar içine yerleştirilerek klimatize odada beklemeye bırakılmıştır.

Sıcak su yöntemi uygulanan numuneler ise  $23 \frac{1}{2}$  saat kürden sonra tanktan çıkarılmış, kalıpları sökülüp naylon torbalara yerleştirildikten hemen sonra diğer numunelerle birlikte başlıklarlanmış ve tekrar torbalara yerleştirilip 24 saatin sonunda basınç dayanımı uygulanmak üzere klimatize odada bekletilmişlerdir.

Standart kür görececek olan 3 numune ise kalıpları söküldükten sonra havada ve suda tartılmış ve 28 gün sonunda basınç dayanımı uygulanmak üzere kür odasındaki su dolu havuza yerleştirilmişlerdir.

Kür tanklarının sıcaklığı dijital termometre ile sürekli kontrol edilmiştir. Tankların hassasiyeti  $\pm 1$  °C dir. Pratiklik açısından her bir hızlandırılmış kür uygulaması bittikten sonra tanklar soğutulmamış, sürekli olarak çalışır durumda bırakılmışlardır.



Fotoğraf 3.9. Beton Yerleştirilip Kapakları Kapatılan Silindirik Numune Kalıpları

### 3.1.5 Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Hızlandırılmış kür uygulandıktan sonra kükürt başlık yapılan numuneler 24 saat sonunda deney aletlerinin bulunduğu salona alınmıştır. Bu numunelerin tümüne 60 ton kapasiteli üniversal deney aletinde basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Yükleme hızı 0.25 MPa/saniye olacak şekilde ayarlanmıştır. Standart numunelerden 30 MPa'nın üzerinde dayanım sağlayanların basınç dayanım deneyleri 300 ton kapasiteli deney aletinde gerçekleştirilmiştir.

## 3.2 DENEY PROGRAMLARI

### 3.2.1 Hızlandırılmış Kür Çevriminin Belirlenmesi

Bu kısımda, hızlandırılmış kür yöntemine ait işlem sıcaklığı, işlem süresi, ön bekleme ve son bekleme süresi olarak saptadığımız çevrim parametrelerinin belirlenmesi için bir program düzenlenmiştir.

İlk olarak, son bekleme süresinin belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Daha sonra, seçilen işlem sıcaklıklarının 35°C ile karşılaştırmalı olarak deneneren en uygun işlem sıcaklığının belirlenmesi düşünülmüştür. Üçüncü aşamada ise, belirlenen son bekleme süresi ve işlem sıcaklığı kullanılarak seçilen ön bekleme sürelerinin denenip en uygununun belirlenmesi planlanmıştır.

### 3.2.2. Hızlandırılmış Kür Yönteminin Denenmesi

Hızlandırılmış kür yöntemine ait çevrim parametreleri belirlendikten sonra, bu bölümde yöntem çeşitli bileşimlerde betonlara uygulanarak elde edilen sonuçların dağılımının, 28 günlük dayanımı tahmin etmedeki hassasiyetinin incelenmesi planlanmıştır. Deneylerde, geniş bir dayanım aralığının taranması düşünülmüştür.



Her bir üretimde, belirlenen yeni hızlandırılmış kür yöntemi (değiştirilmiş sıcak su yöntemi) ile TS 3323'te tanımlanan sıcak su kürü yönteminin paralel yürütülmesi, böylece değiştirilmiş sıcak su yönteminin sıcak su yöntemi ile karşılaştırılması, yine her üretimde yöntemlerin 28 günlük standart dayanımı tahmin hassasiyetini belirleyebilmek için 28 günlük şahit numuneler hazırlanması planlanmıştır.

### 3.2.3 Çevrim Parametrelerindeki Sapmaların Etkisi

Bu kısımda, değiştirilmiş sıcak su yönteminin işlem sıcaklığı, ön ve son bekleme süreleri, işlem süresi gibi çevrim parametrelerinde izin verilebilecek sapmaların belirlenmesi planlanmıştır. Denenecek sapma miktarları, sıcak su yönteminde halen mevcut sapma miktarlarıyla aynı düzeyde (işlem süresinde 30 dakika, toplam sürede 15 dakika, işlem sıcaklığında 3°C) seçilmiştir.

### 3.2.4 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Yüksek Dayanımlı Betonlara Uygulanması

Son yıllarda özel kimyasal katkı maddeleri (süper akışkanlaştırıcı) kullanılarak yüksek dayanımlı (yüksek performanslı) betonlar, kimyasal ve mineral katkı maddeleri kullanılarak çok yüksek dayanımlı (çok yüksek performanslı) betonlar üretilerek yapıya girmiştir. Kesin bir sınırlama olmamakla birlikte yüksek dayanımlı betonların 28 günlük karakteristik basınç dayanımları 60-80 MPa, çok yüksek dayanımlı betonlardaki 80-130 MPa olarak tanımlanmaktadır.

Bu kısımda, diğer kısımlarda da kullanılan agrega ve çimentooya ilaveten süper akışkanlaştırıcı bir katkı maddesi kullanılarak üretilen betonlarla, mümkün olduğunca geniş bir yüksek dayanım aralığının taranması ve bu betonlara belirlenen yöntemin uygulanması planlanmıştır.

### 3.3 DENEY PROGRAMLARININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE DENEY SONUÇLARI

#### 3.3.1 Hızlandırılmış Kür Çevriminin Belirlenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları

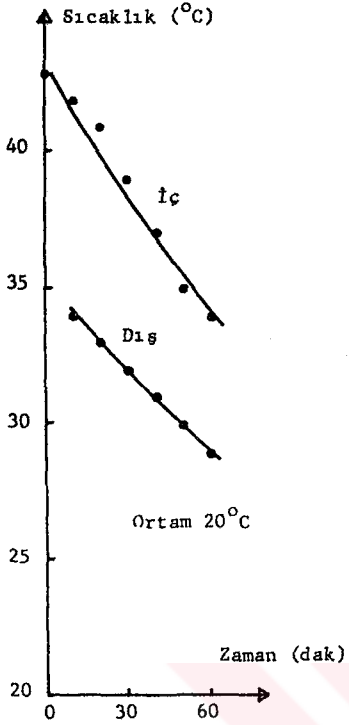
##### 3.3.1.1 Son Bekleme (Soğuma) Süresinin Belirlenmesi

Son bekleme süresi belirlenirken, numunenin iç ve dış yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının oluşturacağı ısıl gerilmelerin, numune dayanımını etkileyeceği gözönünde bulundurulmuştur. Bunun için, çeşitli son bekleme süreleri boyunca belirli zaman aralıklarında, numunenin iç ve dış sıcaklıklarının yer aldığı soğuma diyagramları belirlenmiştir. Denenecek soğuma süreleri  $\frac{1}{2}$ , 1,  $1\frac{1}{2}$ , 2 ve  $2\frac{1}{2}$  saat olarak belirlenmiştir. Bu deneylerde işlem sıcaklığı  $45^{\circ}\text{C}$  olarak seçilmiş, ön beklemesiz olarak  $45^{\circ}\text{C}$  su bulunan tanka yerleştirilen numuneler  $23\frac{1}{2}$  saat sonra çıkarılarak soğuma diyagramları belirlenmiştir.

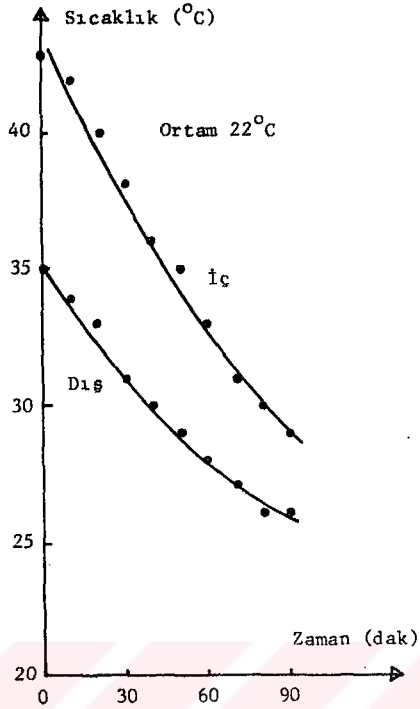
Soğuma diyagramını belirleyebilmek için beton numunenin içine üretilir üretilmez 150 mm uzunluğunda içi boş bir bakır boru bir ucu üst yüzeyde açık kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Hızlandırılmış kür uygulanıp tanktan çıkarılan numune hemen sökülmiş ve borunun içine ısı iletimini sağlamak üzere badem yağı doldurulmuştur. On kanallı dijital termometrenin bir ucu borunun içine sokularak numunenin tam orta noktasına kadar gönderilmiş ve borunun ağzı dış teması kesecek şekilde tıkanmıştır. Termometrenin diğer ucu ise numunenin dışına tam temas edecek şekilde tutturulmuş ve 10 dakika aralıklarla numunenin iç ve dış sıcaklıkları okunmuştur. Bu düzenek Fotoğraf 3.10'da görülmektedir.

1,  $1\frac{1}{2}$ , 2 ve  $2\frac{1}{2}$  saatler için belirlenen diyagramlar Şekil 3.3 a,b,c ve d de görülmektedir.  $2\frac{1}{2}$  saatlik soğuma diyagramında ölçmeler  $3\frac{1}{2}$  saate kadar uzatılarak iç ve dış sıcaklıkların değişimi izlenmiştir.  $\frac{1}{2}$  saat için ayrıca diyagram çıkarılmamıştır. Deneylerde beton bileşimi aynı alınmıştır.

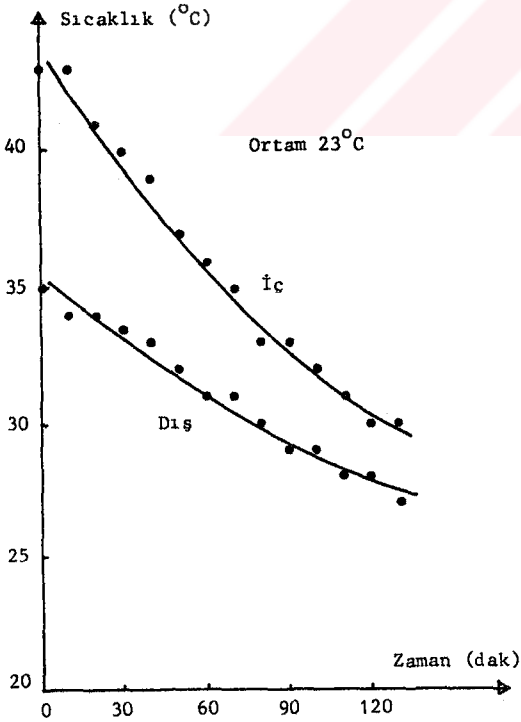




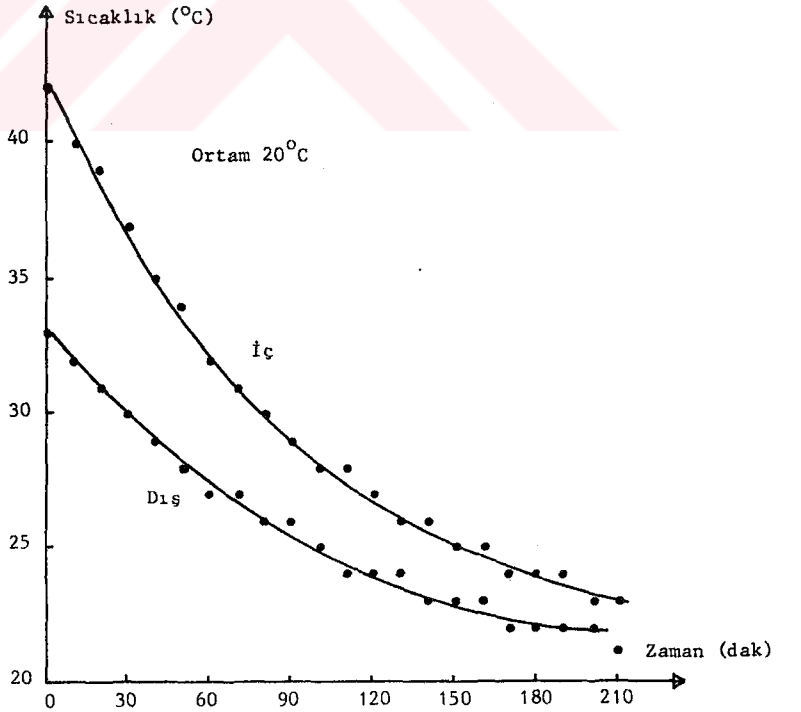
(a)



(b)

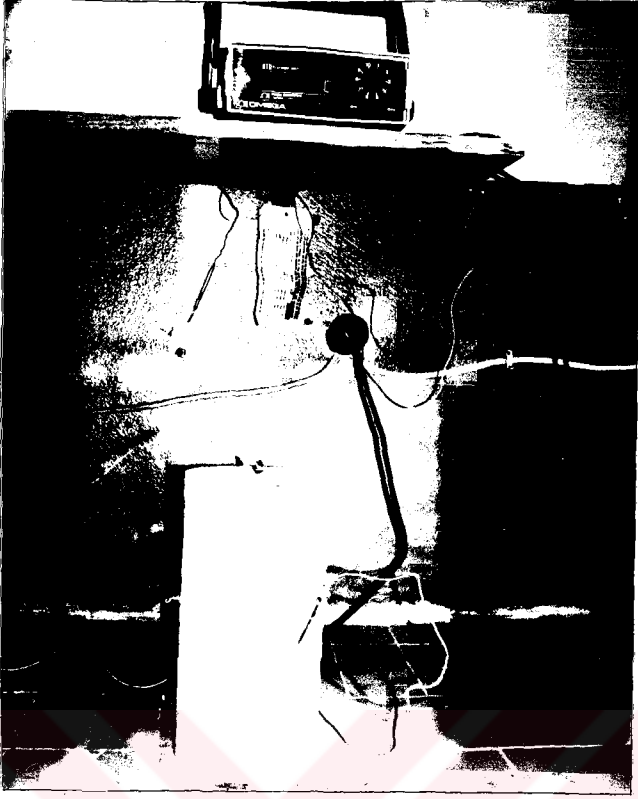


(c)



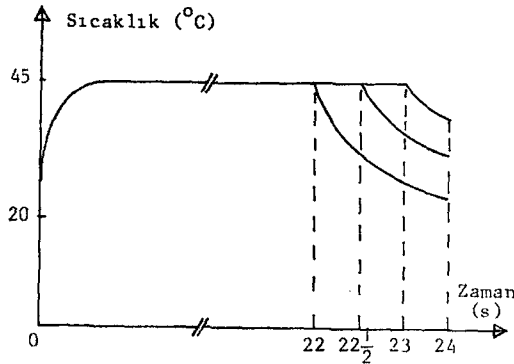
(d)

Şekil 3.3. Sırasıyla 1,  $1\frac{1}{2}$ , 2 ve  $2\frac{1}{2}$  Saatler İçin Belirlenen Soğuma Diyagramları

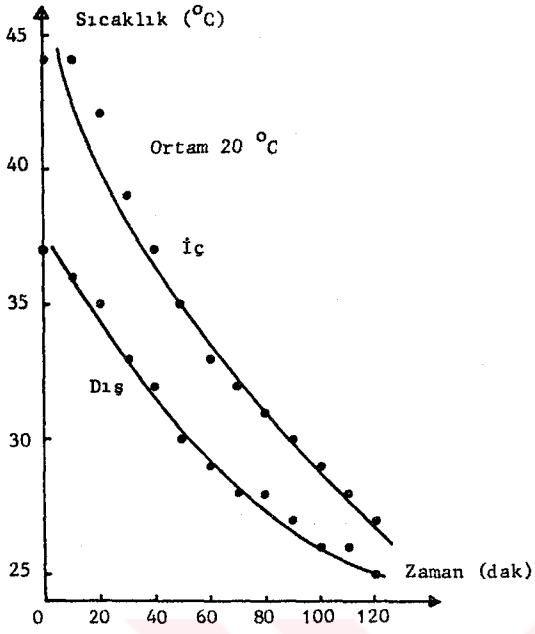


Fotoğraf 3.10. Soğuma Diyagramlarının Belirlemesi İçin Kullanılan Düzenek

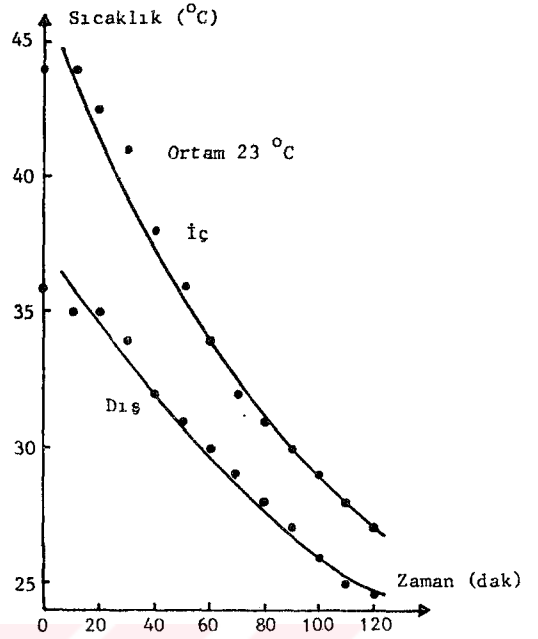
Daha sonraki deneylerde soğuma diyagramları yanında değişik soğuma sürelerine sahip numunelerin dayanımları da belirlenmiştir. Bu deneylerde, çoğunlukla 2 saat ve  $1 \frac{1}{2}$  saat son bekleme süreli numuneler denenmiştir. Sekiz adet üretim yapılmış, beton bileşimleri ve ölçülen kırılma kuvvetleri ile dayanım değerleri Tablo 3.6'da verilmiştir. A4, A6, A7 ve A8 nolu üretimlerde soğuma diyagramları da belirlenmiştir. Bu deneylerde uygulanan çevrim şekli Şekil 3.4'de, soğuma diyagramları da Şekil 3.5 a,b,c ve d de görülmektedir.



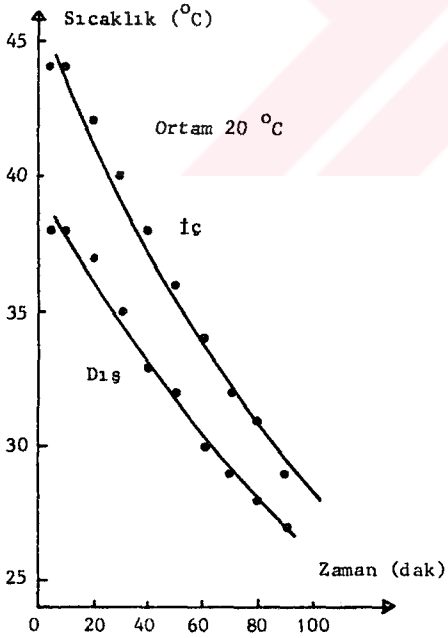
Şekil 3.4. Soğuma Süresinin Belirlenmesinde Uygulanan Çevrim Şekilleri



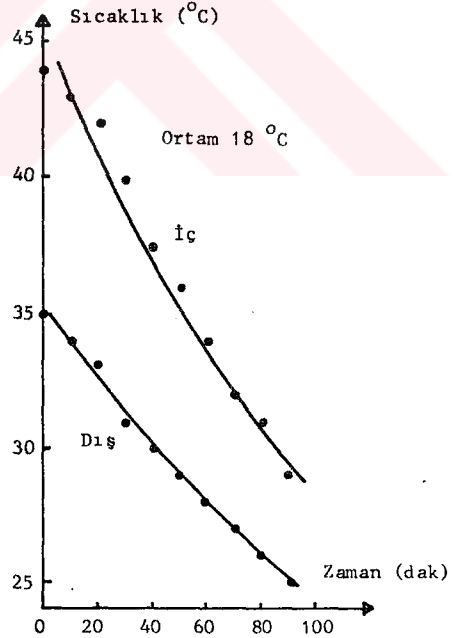
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.5. Sırasıyla A4, A6, A7 ve A8 Nolu Üretimlerde Belirlenen Soğuma Diyagramları

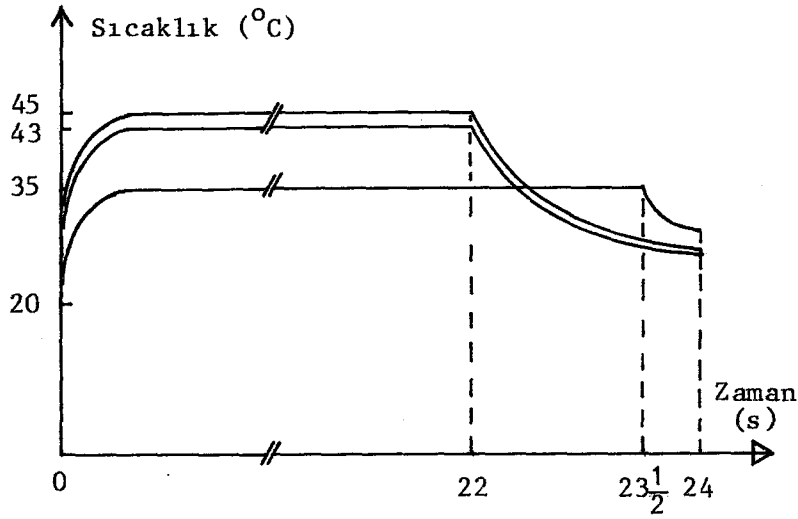
Tablo 3.6. Son Bekleme Süresinin Belirlenmesiyle İlgili Deneylere Ait Beton Bileşimleri ve Deney Sonuçları

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Çimento	Agrega/Çim.	SON BEKLEME SÜRESİ (s)					
				1		1 $\frac{1}{2}$		2	
				Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)
A1*	300	0.55	6.5	74.5	9.2	81.2	10.1	75.0	10.0
				70.0		78.2		82.0	
A2	300	0.55	6.5	168.0	9.3	169.0	9.6	174.0	9.7
				160.0		169.0		168.0	
A3	300	0.55	6.5	-	9.3	176.0	9.9	173.0	9.8
				164.0		174.0		173.0	
A4	400	0.43	4.7			340.0	18.8	325.0	18.0
						326.0		310.0	
A5	400	0.50	4.3			236.0	13.0	224.0	12.6
						225.0		223.0	
A6	400	0.60	4.1			165.0	9.3	166.0	9.5
						164.0		168.0	
A7	300	0.50	6.7			240.0	13.2	232.0	13.2
						225.0		235.0	
A8	250	0.66	8.2			102.0	6.7	130.0	7.2
						136.0		125.0	

\* Bu üretimde 100x200 mm silindir kalıplar kullanılmıştır.

### 3.3.1.2 Hızlandırılmış Kür Sıcaklığının Belirlenmesi

Ön deneylerin ikinci aşaması olan hızlandırılmış kür sıcaklığının belirlenmesi kısmında 43 °C ve 45 °C sıcaklıkların denenmesi planlanmıştır. Yeni hızlandırılmış kür yönteminden beklenen iki özellik "betonun bünyesine az zarar vermesi ve kullanım açısından emniyet" olduğundan seçilen sıcaklıkların 45 °C yi aşmamasına, ancak 35 °C den de yüksek olmasına özen gösterilmiştir. Bu sıcaklıklar iki tip betonda sıcak su (35°C) yöntemi ile karşılaştırmalı olarak denenmiştir (35°C-43°C ve 35°C-45°C). Ön bekleme süresi 0 saat, son bekleme süresi 2 saat, toplam çevrim süresi 24 saat alınmıştır. Uygulanan çevrimler Şekil 3.6'de, deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.6. Kür Sıcaklığının Belirlenmesi İçin Uygulanan Çevrim Şekilleri

Tablo 3.7. İki Tip Betonda 35°C-43°C ve 35°C-45°C Karşılaştırması

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Çimento	Agrega/Çim.	İŞLEM SICAKLIĞI (°C)					
				35		43		45	
				Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)
A9	375	0.40	5.09	329.0	18.5	361.0	21.3		
				302.0		382.0			
				351.0		385.0			
A10	375	0.40	5.09	341.0	18.1		12.5	360.0	20.6
				312.0		370.0			
				307.0		362.0			
A11	300	0.54	6.47	206.0	11.2	215.0	12.5		
				203.0		234.0			
				183.0		213.0			
A12	300	0.54	6.47	196.0	10.7		11.8	197.0	11.8
				176.0		228.0			
				195.0		202.0			

43 ve 45°C sıcaklıkları birbirleriyle karşılaştırma amacıyla da deneyler yapılmış ve deney sonuçları Tablo 3.8 te verilmiştir.

Tablo 3.8. İki Tip Betonda 43°C-45°C Karşılaştırması

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Çimento	Agrega/Çim.	Çimento Tipi	İŞLEM SICAKLIĞI (°C)			
					43		45	
					Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)
A13	375	0.40	5.09	PÇ 400	390.0	22.6	404.0	22.2
				410.0	375.0			
				398.0	400.0			
A14	300	0.54	6.47	KPÇ 325	259.0	14.6	239.0	13.7
				261.0	242.0			
				254.0	246.0			
A15	300	0.54	6.47	PÇ 400	227.0	13.4	257.0	14.0
				235.0	251.0			
				249.0	234.0			
A16	300	0.54	6.47	KPÇ 325	150.0	8.4	146.0	8.5
				145.0	151.0			
				150.0	152.0			

Deneylerin bundan sonraki kısmında belirlenen işlem sıcaklığının beton yapısına vereceği karşılaştırmalı zararı görmek amaçlanmıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi araştırmacılar sıcak su yönteminin ısı işlemi zararlı etkilerinden en az etkilenen yöntem olduğu görüşündedir. MATHER (38) çalışmasında, sıcak su yöntemi uygulanmış numunelerin hidrasyon ürünlerinin, standart kür görmüş numunelerinkine en yakın olduğunu gözlemiştir. 43 °C işlem sıcaklığının betonun uzun süreli dayanımını nasıl etkileyeceğini görmek için hızlandırılmış kür uygulanan numunelerin 28 gün sonunda denenerek standart numunelerle karşılaştırılması planlanmıştır. Bu karşılaştırma üç tip betonda yapılmış, her üretimde 9 numune hazırlanmıştır. Bunların 3'üne sıcak su, 3'üne değiştirilmiş sıcak su yöntemi, 3'üne de standart kür uygulanmıştır. 24 saat sonunda hızlandırılmış kür uygulanan numuneler 28 gün sonunda denenmek üzere standart numunelerle birlikte havuza yerleştirilmiştir. Bu deneylere ait Beton bileşimi ve deney sonuçları Tablo 3.9'da, verilmiştir.

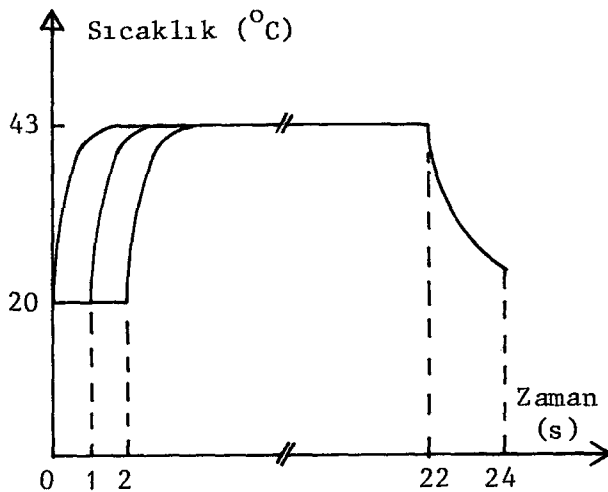
Tablo 3.9. İşlem Sıcaklığının 28 Günlük Dayanıma Etkisi

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç*	A/Ç*	Çökme (mm)	28 GÜNLÜK DAYANIMLAR (MPa)					
					35°C		43°C		Standart	
						%		%		%
A17	250	0.64	7.97	100	20.4	92	20.1	91	22.1	100
A18	300	0.54	6.42	80	26.1	90	25.8	89	28.9	100
A19	350	0.45	5.42	30	37.0	89	35.8	86	41.6	100
ORTALAMA					27.8	90	27.2	88	30.9	100

\* S/Ç: Su/Çimento, A/Ç: Agregat/Çimento

### 3.3.1.3 Ön Bekleme Süresinin Belirlenmesi

Hızlandırılmış kür çevriminin belirlenmesindeki son aşama olan ön bekleme süresi için denenecek süreler 0, 1 ve 2 saat olarak seçilmiştir. İki saatin üzerindeki ön bekleme süreleri işlem süresini çok azaltacağı için denenmemiştir. Üretilen 9 numuneden üçü ön bekleme süresi, üçü 1 saat, üçüde 2 saat ön bekleme süresi olarak tanka yerleştirilmiş, 22 saatin sonunda tüm numuneler tanktan çıkarılmış ve 24 saat sonunda da denenmiştir. Bu çevrim şekli Şekil 3.7'de deney sonuçları da Tablo 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.7. Ön Bekleme Süresinin Belirlenmesi için Uygulanan Çevrim Şekli



Tablo 3.10. Ön Bekleme Süresinin Belirlenmesi İle İlgili Deneylere Ait Beton Bileşimleri ve Deney Sonuçları

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	Su/Çimento	Agrega/Çim.	Çimento Tipi	ÖN BEKLEME SÜRESİ (s)					
					0		1		2	
					Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)	Kırılma Kuvveti (kN)	Ortalama Basınç D. (MPa)
A20	400	0.42	4.57	KPÇ325	318.0	18.0	349.0	20.0	328.0	19.4
					320.0		353.0		362.0	
					315.0		360.0		340.0	
A21				PÇ 400	380.0	20.1	390.0	22.2	367.0	21.0
					356.0		405.0		409.0	
					330.0		380.0		340.0	

### 3.3.2 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Denenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları

Bu kısımda 49 adet üretim yapılmış, 6 farklı çimento dozajında çeşitli su/çimento oranları denenmiştir. Her üretimde:

3 adet : Değiştirilmiş sıcak su yöntemi

3 adet : Sıcak su yöntemi

3 adet : Standart kür

için olmak üzere toplam 9 adet 150x300 mm silindir numune hazırlanmıştır. Böylece 49 üretimde toplam 441 adet numune denenmiş ve yaklaşık 2.5 m<sup>3</sup> beton üretilmiştir.

Tablo 3.11'de basınç dayanım deneyi sonuçları toplu olarak görülmektedir. Ayrıntılı deney sonuçları ise Ek 2 de verilmiştir. Çökme değerleri 0-250 mm arasında, sıcak su yöntemi, değiştirilmiş sıcak su yöntemi ve standart numunelere ait basınç dayanım değerleri sırasıyla 4.3-22.3 MPa, 5.4-24.3 MPa ve 15.6-50.0 MPa arasında değişmiştir. Ortalama dayanımlar ise sıcak su yönteminde 13.6 MPa, değiştirilmiş sıcak su yönteminde 15.6 MPa, 28 günlük standart numunelerde ise 33.3 MPa'dır. Buna göre hızlandırılmış dayanımların 28 günlük standart dayanımlara oranı sıcak su yönteminde 0.41 iken değiştirilmiş sıcak su yönteminde 0.47 olmuştur.

Tablo 3.11,Deney Sonuçları

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Çökme (mm)	Hızlandırılmış Dayanımlar		28 Günlük Standart Dayanım (MPa)
					Sıcak Su Y. (MPa)	D.S.S.Y (MPa)	
B1	200	0.65	10.65	10	8.3	9.8	22.5
B2	200	0.66	10.55	10	7.1	9.0	22.0
B3	200	0.70	10.44	20	6.2	7.8	19.9
B4	200	0.78	10.23	30	4.8	6.2	16.2
B5	200	0.80	10.17	100	4.3	5.4	15.6
B6	250	0.48	8.38	0	15.2	17.9	38.7
B7	250	0.50	8.33	0	15.0	18.7	40.6
B8	250	0.52	8.27	5	13.1	16.2	36.2
B9	250	0.54	8.22	7	12.7	15.5	36.3
B10	250	0.56	8.17	10	12.1	14.9	38.1
B11	250	0.60	8.00	25	9.6	11.5	27.0
B12	250	0.62	8.02	38	9.3	11.1	26.0
B13	250	0.64	7.97	60	8.1	9.8	20.1
B14	250	0.66	7.92	150	8.1	9.0	19.5
B15	280	0.51	7.19	30	12.5	14.9	34.6
B16	280	0.52	7.17	50	11.6	14.2	30.9
B17	280	0.54	7.11	40	10.0	13.3	29.6
B18	280	0.55	7.02	75	9.4	11.7	26.5
B19	280	0.56	7.05	70	10.1	11.5	26.8
B20	280	0.58	7.00	100	9.7	11.7	27.1
B21	280	0.60	6.95	150	9.2	11.8	24.8
B22	280	0.62	6.89	140	8.6	9.7	21.5
B23	300	0.44	6.74	30	18.9	20.1	39.3
B24	300	0.46	6.68	25	17.7	20.3	38.4
B25	300	0.48	6.63	30	16.3	18.2	38.1
B26	300	0.50	6.58	25	15.7	17.4	40.1
B27	300	0.51	6.50	30	15.1	17.4	36.1
B28	300	0.52	6.52	60	14.3	16.3	35.1
B29	300	0.53	6.45	70	12.9	14.3	27.2
B30	300	0.54	6.40	100	13.0	16.5	35.9
B31	300	0.54	6.42	110	10.5	12.8	27.8
B32	300	0.55	6.40	250	8.9	10.4	23.3
B33	300	0.56	6.42	200	12.6	15.2	31.7
B34	300	0.56	6.37	200	9.8	11.3	25.3
B35	350	0.38	5.64	5	22.1	24.3	50.0
B36	350	0.40	5.59	15	21.1	23.0	44.1
B37	350	0.41	5.56	30	16.8	18.6	38.9
B38	350	0.42	5.54	20	20.3	22.5	47.9
B39	350	0.43	5.51	45	16.9	19.3	42.4
B40	350	0.44	5.49	50	19.4	21.9	42.6
B41	350	0.45	5.46	50	18.1	20.6	43.0
B42	350	0.46	5.43	100	18.1	20.1	44.0
B43	350	0.48	5.38	150	16.6	19.3	40.2
B44	350	0.50	5.33	200	14.6	16.9	39.1
B45	400	0.38	4.71	45	22.3	22.6	39.0
B46	400	0.40	4.76	40	20.7	22.1	45.5
B47	400	0.42	4.60	70	21.2	23.1	39.5
B48	400	0.44	4.55	100	19.2	20.6	39.4
B49	400	0.46	4.49	200	16.3	17.6	37.3

Varyans analizi ile hesaplanan ortalama gruplar içi standart sapma sıcak su yönteminde 0.61 MPa, değiştirilmiş sıcak su yönteminde 0.75 MPa, 28 günlük standart numunelerde 1.65 MPa olurken gruplar içi varyasyon katsayısı da sırasıyla %4.52, %4.82 ve %4.95 değerlerini almıştır.

### 3.3.3 Çevrim Parametrelerindeki Sapmaların Etkisinin Belirlenmesine İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları

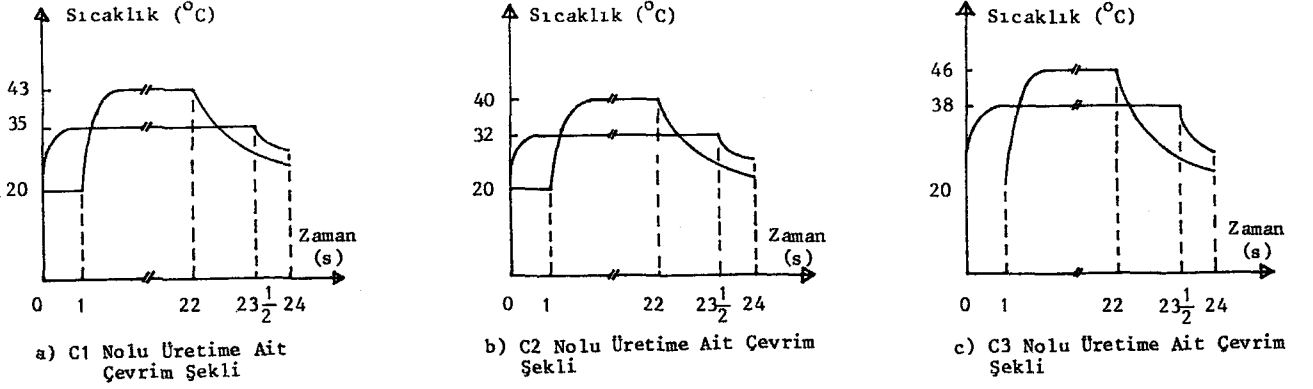
İşlem sıcaklığında olabilecek  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  lik sapmanın etkisi, programda da belirtildiği gibi karşılaştırma amacıyla, deneyler sıcak su yöntemiyle paralel yürütülerek araştırılmıştır. İlk deney hiç sapmasız olarak  $35^{\circ}\text{C}$  ve  $43^{\circ}\text{C}$  de gerçekleştirilmiştir. Üretilen 9 numuneden 3'üne sıcak su, 3'üne değiştirilmiş sıcak su, 3'üne de standart kür uygulanmıştır.

Bu kısmın ikinci deneyinde tank sıcaklıkları 3'er derece azaltılarak numuneler  $32$  ve  $40^{\circ}\text{C}$ 'lerdeki tanklara yerleştirilmiştir. Yöntemlere ait diğer çevrim parametreleri ise aynı kalmıştır. Üçüncü deneyde ise tank sıcaklıkları 3'er derece artırılmış yani deneyler  $38$  ve  $46^{\circ}\text{C}$  lik sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde de 3'er numune 28 günlük standart kür için saklanmıştır. Uygulanan çevrim parametreleri Tablo 3.12'de, çevrim şekilleri Şekil 3.8 a,b ve c de görülmektedir.

Tablo 3.12. İşlem Sıcaklığındaki Sapma Sınırlarının Belirlenmesi İçin Uygulanan Çevrim Parametreleri

Üretim No	Yöntem	İşlem Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ön Bekleme Süresi (s)	İşlem Süresi (s)	Son Bekleme Süresi (s)	Toplam Çevrim Süresi (s)
C1	Sıcak Su	35	0	$23\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	24
	D.S.S.Y.*	43	1	21	2	
C2	Sıcak Su	32	0	$23\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	D.S.S.Y	40	1	21	2	
C3	Sıcak Su	38	0	$23\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	D.S.S.Y.	46	1	21	2	

\* D.S.S.Y.: Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi.



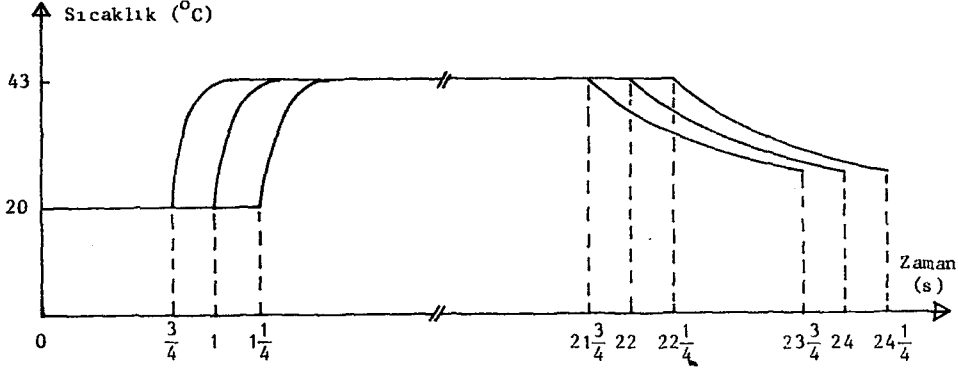
Şekil 3.8. İşlem Sıcaklığındaki Tolerans Sınırlarının Belirlenmesi İçin Uygulanan Çevrim Şekilleri

Yapılan deneylerin 3'ünde de aynı bileşimde beton üretilmiş, beton bileşimleri ve deney sonuçları Tablo 3.13'de verilmiştir.

Tablo 3.13. C1, C2 ve C3 Nolu Üretimlerde Kullanılan Beton Bileşimi ve Deney Sonuçları

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Çökme (mm)	İşlem Sıcaklığı (°C)	Hızlandırılmış Dayanımlar (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
C1				75	35	9.4	26.5
					43	11.7	
C2	280	0.55	6.97	70	32	9.2	27.0
					40	12.1	
C3				60	38	11.7	27.2
					46	14.6	

Ön bekleme süresinde olabilecek  $\pm 15$  dakikalık sapmaların etkisini belirlemek için bir üretimde 9 numune üretilmiştir. Üretilen numunelerden 3'ü  $\frac{3}{4}$  saat, 3'ü 1 saat, 3'ü de  $1\frac{1}{4}$  saat ön bekleme yaparak 43 °C deki hızlandırılmış kür tankına yerleştirilmiştir. Bu numuneler 21'er saat işlem gördükten sonra tanktan çıkarılmış ve 2'şer saat son beklemeden sonra basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Yani her 3 numune için de işlem süresi ve son bekleme süresi sabit, toplam süre değişken olmuştur. Bu üretime ait çevrim şekli Şekil 3.9'da çevrim parametreleri, beton bileşimi ve deney sonuçları Tablo 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.9. Ön Bekleme Süresindeki Sapma Sınırının Belirlenmesi için Uygulanan Çevrim Şekli

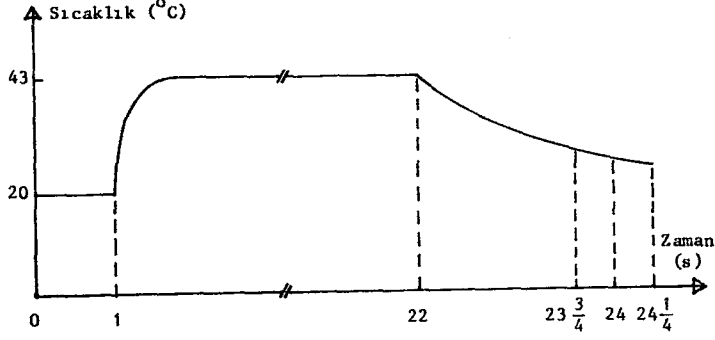
Tablo 3.14. C4 Nolu Üretim Ait Çevrim Parametreleri, Beton Bileşimi ve Deney Sonuçları

Ür. No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Çökme (mm)	Ön B. Süresi (s)	İşlem Sıc. (°C)	İşlem Sür. (s)	Son B. Süresi (s)	Top. Kür Süresi (s)	Hızlandırılmış Dayanım (MPa)
C4	300	0.54	6.46	80	3/4	43	21	2	23 <sup>3</sup> / <sub>3</sub>	12.9
					1				24	12.6
					1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>				24 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	12.4

Son bekleme süresinde olabilecek  $\pm 15$  dakikalık sapmaların etkisini belirlemek için bir üretimde 9 numune üretilmiştir. numunelerin hepsi kür odasında 1 saat ön bekleme yaptıktan sonra 43 °C'deki tanka yerleştirilmiş, 21 saat işlem gördükten sonra çıkarılmıştır. Numunelerden 3'ü 1<sup>3</sup>/<sub>4</sub> saat, 3'ü 2 saat 3'üde 2<sup>1</sup>/<sub>4</sub> saat son beklemeden sonra basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyde de numunelerin işlem süreleri sabit, toplam süre değişken olmuştur. Bu deneye ait çevrim şekli Şekil 3.10'de, çevrim parametreleri, beton bileşimi ve deney sonuçları Tablo 3.15'de verilmiştir.

Tablo 3.15. C5 Nolu Üretim Ait Çevrim Parametreleri, Beton Bileşimi ve Deney Sonuçları

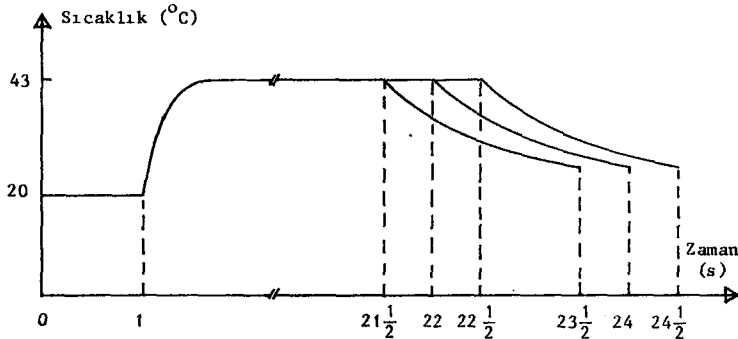
Ür. No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Çökme (mm)	Ön B. Süresi (s)	İşlem Sıc. (°C)	İşlem Sür. (s)	Son B. Süresi (s)	Top. Kür Süresi (s)	Hızlandırılmış Dayanım (MPa)
C5	300	0.54	6.46	70	1	43	21	1 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	23 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	13.4
								2	24	13.8
								2 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	24 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	13.5



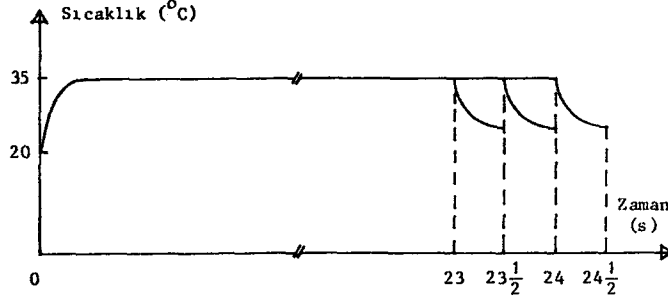
Şekil 3.10. Son Bekleme Süresindeki Sapma Sınırlarının Belirlenmesi İçin Uygulanan Çevrim Şekli

İşlem süresinde olabilecek  $\pm 30$  dakikalık sapmanın etkisini belirlemek için 2 üretim yapılmıştır. Bunlardan birinde sıcak su yöntemine, diğerinde de değiştirilmiş sıcak su yöntemine  $\pm 30$  dakika sapma uygulanarak karşılaştırma sağlanmıştır. Değiştirilmiş sıcak su yönteminin denendiği üretimde 9 numune hazırlanmış, bunların hepsi 1 saat ön bekleme yaptıktan sonra  $43^{\circ}\text{C}$  deki hızlandırılmış kür tankına yerleştirilmiştir. Üç numune  $20\frac{1}{2}$  saat, 3 numune 21 saat, 3 numune de  $21\frac{1}{2}$  saat işlem gördükten sonra tanktan çıkarılmıştır. Numuneler 2'şer saat son bekleme yaptıktan sonra basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Bu üretime ait çevrim şekli Şekil 3.11'de, bileşim ve deney sonuçları Tablo 3.16'da verilmiştir (üretim C6).

Sıcak su yöntemi için ise yine aynı bileşimde betonla 9 numune hazırlanmış, ön bekleme yapmadan  $35^{\circ}\text{C}$  deki hızlandırılmış kür tankına yerleştirilmiştir. Numunelerden 3'ü 23 saat, 3'ü  $23\frac{1}{2}$  saat, 3'ü de 24 saat işlem gördükten sonra basınç dayanım deneyine tabi tutulmuştur. Bu üretime ait çevrim şekli Şekil 3.12'de, beton bileşimi, çevrim parametreleri ve deney sonuçları Tablo 3.16'da verilmiştir (üretim C7).



Şekil 3.11. C6 Nolu Üretime Ait Çevrim Şekli



Şekil 3.12. C7 Nolu Üretime Ait Çevrim Şekli

Tablo 3.16. C6 ve C7 Nolu Üretimlere Ait Çevrim Parametreleri, Beton Bileşimi ve Deney Sonuçları

Ür. No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Çökme (mm)	Ön B. Süresi (s)	İşlem Sıc. (°C)	İşlem Sür. (s)	Son B. Süresi (s)	Top. Kür Süresi (s)	Hızlandırılmış Dayanım (MPa)
C6	300	0.54	6.46	85	1	43	20 $\frac{1}{2}$	2	23 $\frac{1}{2}$	13.6
							21		24	13.9
							21 $\frac{1}{2}$		24 $\frac{1}{2}$	14.2
C7	300	0.54	6.46	85	0	35	23	1 $\frac{1}{2}$	23 $\frac{1}{2}$	10.3
							23 $\frac{1}{2}$		24	10.4
							24		24 $\frac{1}{2}$	10.6

### 3.3.4 Hızlandırılmış Kür Yönteminin Yüksek Dayanımlı Betonlara Uygulanmasına İlişkin Deney Programının Gerçekleştirilmesi ve Deney Sonuçları

Bu kısımda, toplam 25 adet üretim yapılmış, 4 farklı çimento dozajı kullanılmıştır.

Kullanılan toz süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi miktarı, çimento ağırlığının %0.5-%1.3'ü arasında değişmiştir. Bu katkı maddesi, su/çimento oranının 0.23'lere kadar çekilmesini sağlamıştır.

Her üretimde 6 adet 150x300 mm silindir numune üretilmiş, bunların 3'üne değiştirilmiş sıcak su yöntemi, 3'üne de standart kür uygulanmıştır.

Bu kısma ait basınç dayanım deneyi sonuçları Tablo 3.17'de görülmektedir. Yapılan 25 üretime ait ayrıntılı bilgiler Ek 3 de verilmektedir.



Betonların çökme değerleri 30-250 mm arasında değişmiştir.

Hızlandırılmış basınç dayanımı değerleri 25.9-49.0 MPa, standart dayanımlar 41.5-69.0 MPa arasında değişmiştir. Ortalama dayanımlar ise değiştirilmiş sıcak su yönteminde 38.4 MPa, standart numunelerde 55.7 MPa olmuştur.

Değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait hızlandırılmış basınç dayanımlarının standart dayanımlara oranı ise ortalama 0.69 olmuştur. Artık varyans yoluyla hesaplanan standart sapmalar değiştirilmiş sıcak su yönteminde 1.87 MPa, standart numunelerde 2.73 MPa olarak belirlenirken gruplar-içi varyasyon katsayısı her iki grup için %4.9 değerini almıştır.



Tablo 3.17. Yüksek Dayanımlı Betonlara Ait Deney Sonuçları

Üretim No	Dozaj (kg/m <sup>3</sup> )	S/Ç	A/Ç	Katkı (%)	Çökme (mm)	Hızlandırılmış Dayanım (MPa)	28 Günlük Standart Dayanım (MPa)
D1	450	0.240	4.33	1.3	50	37.6	49.8
D2	450	0.245	4.32	1.0	30	45.8	69.0
D3	450	0.250	4.31	1.2	200	33.6	49.6
D4	450	0.260	4.28	1.0	200	29.6	51.5
D5	450	0.280	4.23	1.0	150	26.6	41.5
D6	450	0.300	4.17	1.0	200	26.7	42.3
D7	500	0.260	3.69	1.2	50	47.5	68.3
D8	500	0.270	3.65	1.2	180	36.0	50.2
D9	500	0.280	3.65	1.0	150	39.1	56.9
D10	500	0.290	3.56	1.0	50	29.8	49.9
D11	500	0.300	3.59	1.0	230	31.9	47.0
D12	500	0.310	3.57	1.0	250	25.9	50.8
D13	550	0.250	3.29	1.3	170	43.9	60.0
D14	550	0.254	3.24	1.1	150	46.4	63.9
D15	550	0.260	3.22	1.1	220	40.8	56.2
D16	550	0.270	3.20	1.0	220	41.6	57.6
D17	550	0.280	3.17	0.7	190	40.5	58.0
D18	550	0.285	3.16	0.7	50	38.8	55.7
D19	550	0.290	3.14	0.5	50	32.9	51.5
D20	600	0.230	2.90	1.4	150	48.1	61.7
D21	600	0.240	2.88	1.1	150	49.0	64.3
D22	600	0.250	2.85	0.7	180	46.8	63.8
D23	600	0.250	2.85	0.7	200	42.0	59.8
D24	600	0.260	2.83	0.6	240	43.6	55.0
D25	600	0.270	2.80	0.6	50	36.4	58.4

## BÖLÜM 4

### İRDELEME VE YORUM

#### 4.1 HIZLANDIRILMIŞ KÜR ÇEVİRİMİNİN BELİRLENMESİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU

##### 4.1.1 Son Bekleme Süresi

Şekil 3.3'deki soğuma diyagramlarının incelenmesi aşağıdaki belirlemelere imkan vermektedir:

- . Bütün deneylerde elde edilen soğuma diyagramları birbirine benzer, tutarlı niteliktedir.
- . Numunenin içi ile dışı arasındaki sıcaklık farkı, numune tanktan çıkarıldığında yani sıfır saatlik soğuma sonunda  $8-9^{\circ}\text{C}$ ,  $1\frac{1}{2}$  saat sonunda  $2.5^{\circ}\text{C}$ ,  $2\frac{1}{2}$  saat sonunda  $2^{\circ}\text{C}$  dir.
- . Numunenin dışı ile ortam arasındaki sıcaklık farkı sıfır saat sonunda  $12-13^{\circ}\text{C}$ ,  $\frac{1}{2}$  saatte  $10^{\circ}\text{C}$ , 1 saatte  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $1\frac{1}{2}$  saatte  $5.5^{\circ}\text{C}$ , 2 saatte  $4.5^{\circ}\text{C}$  dir.

Hızlandırılmış dayanım değerlerini ve bu değerdeki dağılımı belirleyen unsurlardan biri ısı gerilmeleridir, bunlar da özellikle numunenin içi ile dışı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Gerek bu fark, gerekse numune ile ortam arasındaki sıcaklık farkı ancak bir saatten sonra  $5^{\circ}\text{C}$  ve altına ineabilmektedir. Dolayısıyla son bekleme süresinin en az bir saat tercihen  $1\frac{1}{2}$  veya 2 saat olması uygun düşecektir. Son bekleme süresinin daha uzun tutulması, sıcaklık farkını fazla azaltmadığı gibi işlem süresini kısaltacağından hızlandırılmış dayanım değerini düşürecektir.

Şekil 3.5'deki soğuma diyagramları da öncekilere benzemekte, iç-dış sıcaklık farkı  $1\frac{1}{2}$  saatte  $3^{\circ}\text{C}$ , 2 saatte  $2^{\circ}\text{C}$  olarak belirlemektedir.

Tablo 3.6'dan hızlandırılmış basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 1 saatlik son bekleme süresi sonunda dayanımın

düşük kaldığı,  $1\frac{1}{2}$  ve 2 saat sonunda ise aynı düzeyde gerçekleştiği görülmektedir. Olgunluk derecesinin daha fazla olmasına rağmen 1 saat son bekleme süreli numunelerin dayanımı, ısıll gerilmelerin olumsuz etkisi nedeniyle daha düşüktür. Soğuma süresi uzadıkça bu olumsuz etki azalmakta, ancak bu kez işlem süresinin kısalması nedeniyle dayanım azalmaktadır.  $1\frac{1}{2}$  ve 2 saatlik hızlandırılmış dayanım değerlerinin eşitliği bu iki zıt etkinin 2 saat sonunda birbirini dengelediğini göstermektedir.

Sonuç olarak seçilen son bekleme süresi 2 saattir.

#### 4.1.2 İşlem Sıcaklığı

Tablo 3.7'nin incelenmesinden  $43^{\circ}\text{C}$  ve  $45^{\circ}\text{C}$ 'lik işlem sıcaklıklarının  $35^{\circ}\text{C}$ 'den daha yüksek,  $43^{\circ}\text{C}$  'nin ise  $45^{\circ}\text{C}$ 'den çok az daha yüksek, hemen hemen eşit dayanımlar verdiği gözlenmektedir.  $43^{\circ}\text{C}$  ve  $45^{\circ}\text{C}$ 'lerin birbirleriyle karşılaştırılmaları amacıyla yapılan deney sonuçlarının yeraldığı Tablo 3.8'den de bu durum görülmektedir.

Deneyler sonunda birbirinden çok farklı sonuçlar vermeyen  $43^{\circ}\text{C}$  ve  $45^{\circ}\text{C}$  işlem sıcaklıkları arasından daha düşük olan  $43^{\circ}\text{C}$ , işlem sıcaklığı olarak seçilmiştir.

İşlem sıcaklığının 28 günlük dayanıma etkisini gözlemek amacıyla yapılan deneylere ait sonuçlar (tablo 3.9) karşılaştırıldığında, çok yumuşak bir ısıll çevrime sahip sıcak su yönteminin bile 28 günlük basınç dayanımında ortalama %10 kayıba neden olacak kadar beton bünyesine zarar verdiği,  $43^{\circ}\text{C}$  işlem sıcaklığının verdiği ek zararın %1-2 gibi çok sınırlı düzeyde kaldığı, dolayısı ile benimsenmesinde bu açıdan da önemli bir sakınca olmadığı görülmektedir.

#### 4.1.3 Ön Bekleme Süresi

Ön bekleme süresinin belirlenmesi ile ilgili deneylere ait sonuçların verildiği Tablo 3.10 incelendiğinde, 1 saatlik ön bekleme süresinin her iki çimentoda da en yüksek dayanımı verdiği görülmektedir. Ön bekleme süresinin 2 saate çıkması

olgunluk derecesini nispeten fazla azalttığından dayanımda da azalmaya yol açmıştır. Yani aslında daha yüksek olması beklenen 2 saat ön bekleme yapmış numunelerin dayanımı, daha kısa süre işlem görmeleri nedeniyle yeterince yüksek sonuç vermemiştir. En düşük dayanımı ise ön bekleme yapmadan  $43^{\circ}\text{C}$  suya daldırılan numuneler vermiştir ve dayanım farkı %10 gibi önemli düzeydedir. Bu fark 1 saat gibi küçük bir ön bekleme süresinin bile hızlandırılmış dayanımı nasıl olumlu etkilediğini, ısıtma işlem sistematigi içindeki yaklaşımın yararını göstermektedir.

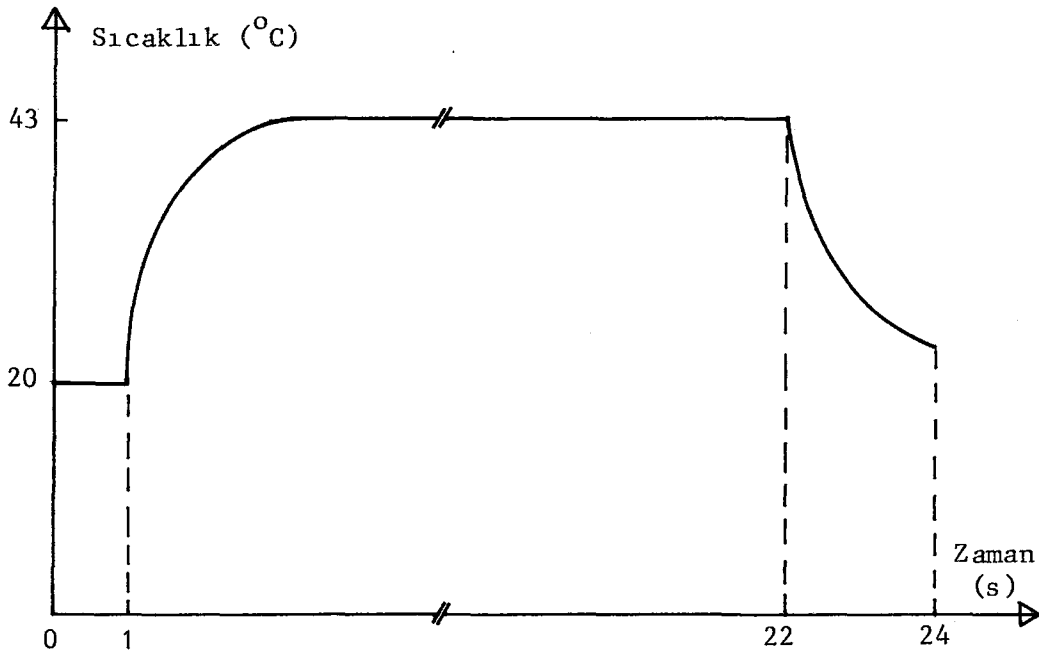
Bu sonuçlara bakarak, en uygun ön bekleme süresi 1 saat olarak seçilmiştir.

#### 4.1.4 Belirlenen Hızlandırılmış Kür Çevrimi (Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi)

Birinci kısmın sonunda belirlenen hızlandırılmış kür yöntemi parametreleri aşağıdaki gibidir.

- . Ön bekleme süresi : 1 saat
- . İşlem sıcaklığı :  $43^{\circ}\text{C}$
- . İşlem süresi : 21 saat
- . Son bekleme süresi : 2 saat

Çevrimin yaklaşık şekli Şekil 4.1 de görülmektedir.



Şekil 4.1. Belirlenen Hızlandırılmış Kür Yöntemine (Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi) Ait Çevrim Şekli

## 4.2 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN DENENMESİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU

Çalışmada çimento dozajı  $200-400 \text{ kg/m}^3$ , su/çimento oranı  $0.38-0.80$  aralığında değiştirilerek geniş bir bileşim spektrumu taranmış, 28 günlük standart basınç dayanımı  $15.6-50.0 \text{ MPa}$  gibi çok geniş bir dayanım aralığında değerler almıştır. Bu aralık neredeyse TS 500 "Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları" (66) standardında belirlenmiş BS 14'ten BS 50'ye kadar tüm beton sınıf dayanımlarını içermektedir. İleri batı ülkelerinde üretilen normal dayanımlı betonlar genelde BS 20-BS 40 aralığında yer almakta, ülkemizde ise ağırlıklı BS 14-BS 25 arasında kalmaktadır. Görüldüğü gibi çalışmada taranan dayanım aralığı hem ülkemiz gerçeklerini dikkate almakta, hem de beton teknolojisinde ileri ülkelerin düzeyleri ile uyumlu kalmaktadır.

Deney içi dağılımın ölçüsü olarak benimsenen varyasyon katsayısı standart dayanımlar için  $\%4.95$ , hızlandırılmış dayanımlar için  $\%4.52-4.82$  olarak  $\%4-5$  aralığında yer almıştır. Bu aralık ACI standartlarına göre (ACI 214-65 "Reccomended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete" (Beton Dayanım Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi için Pratik Tavsiyeler)) (67) şantiye koşullarında "iyi", laboratuvar koşullarında "yeterli" bir kontrol derecesini yansıtmakta, "çok iyi" veya "mükemmel" olmaktan uzak kalmaktadır. Bu husus da çalışmanın uygulanabilirliğini yansıtmakta, gerçek üretim ve şantiye koşullarından uzak, aşırı titiz ve hassas, hayalci bir laboratuvar çalışması olmadığını kanıtlamaktadır.

### 4.2.1 İki Hızlandırılmış Yöntem Arasındaki İlişki

Değiştirilmiş sıcak su yöntemi ile standart sıcak su yönteminin eşdeğerlilikleri ve ilişkileri araştırılmıştır.

Yapılan istatistik analiz, sıcak su yöntemiyle, bu çalışmada geliştirilen değiştirilmiş sıcak su yöntemi arasında yüksek korelasyon katsayılı doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Bu ilişki:

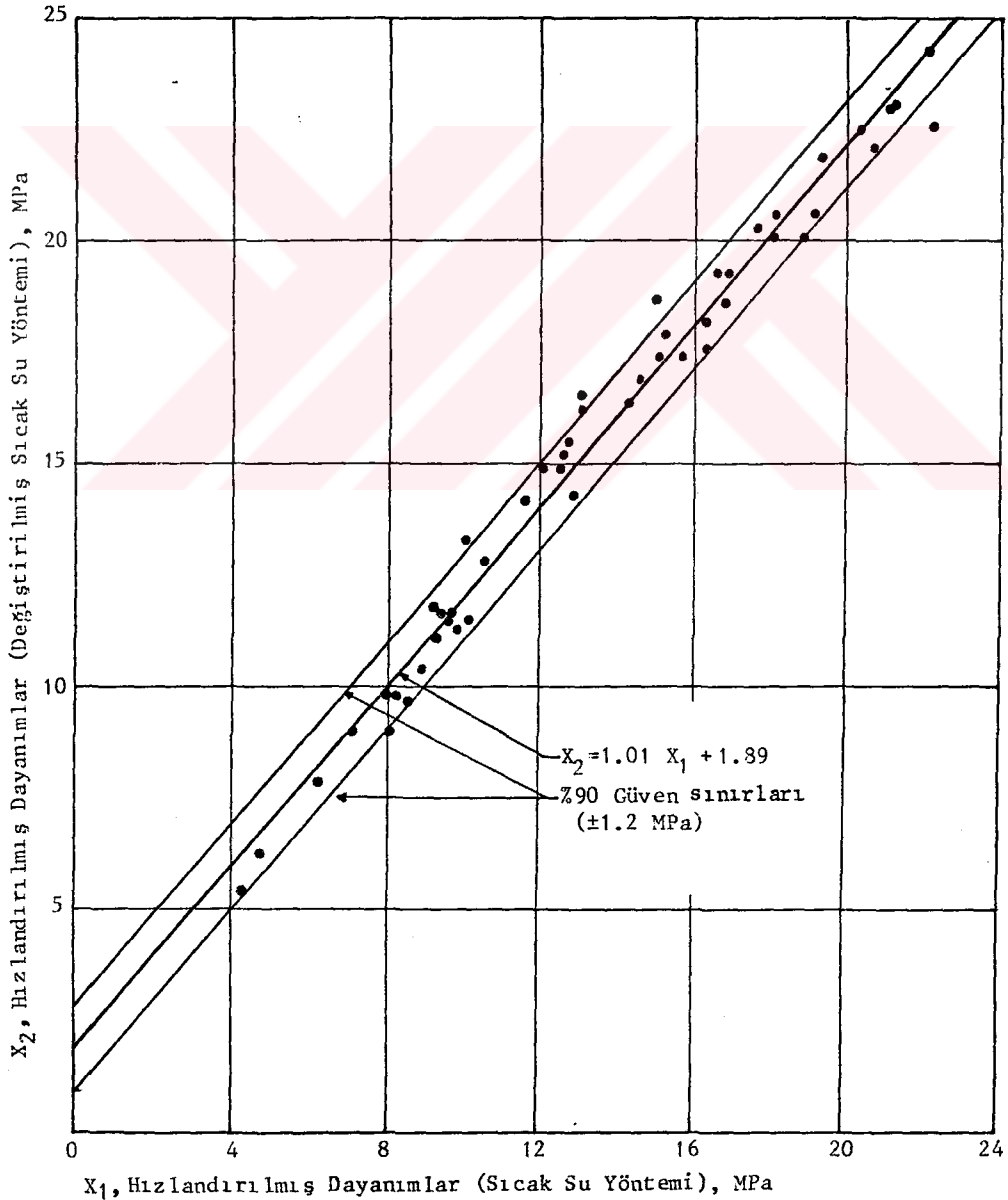
$$X_2 = 1.01 X_1 + 1.89 \text{ MPa} \quad r=0.99 \quad (4.1)$$

$X_2$ : değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait hızlandırılmış dayanımlar

$X_1$ : sıcak su yöntemine ait hızlandırılmış dayanımlar

$r$ : korelasyon katsayısı

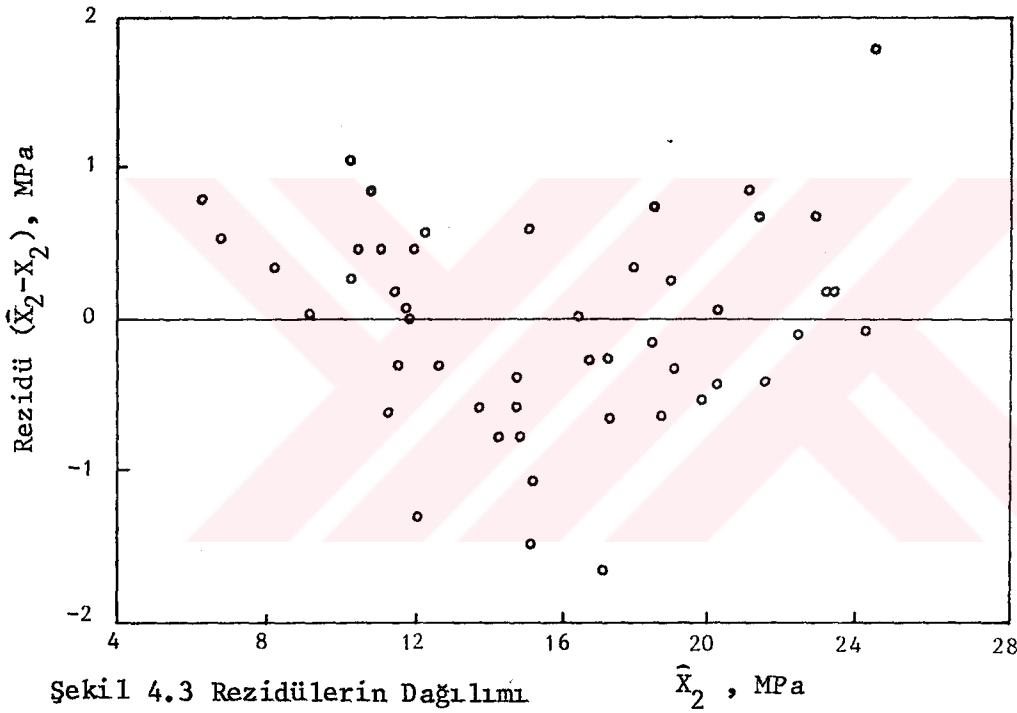
şeklindeki doğrusal denklemle ifade edilmektedir. Korelasyon katsayısı, %1 düzeyinde anlamlıdır. Şekil 4.2 bu doğruyu ve deneysel noktalarla birlikte %90 güven aralığını göstermektedir.



Şekil 4.2. Sıcak Su Yöntemi-Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi ilişkisi



Şekil 4.3 rezidüleri göstermektedir. Yani yukarıdaki regresyon denkleminde hesaplanan  $\hat{X}_2$  değerleri ile ölçülen  $X_2$  değerleri arasındaki farklar (rezidü) hesaplanan  $\hat{X}_2$  değerlerine bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.3'ten rezidülerin rastgele dağıldığı, sıfır çizgisinin altında ve üstünde yaklaşık eşit sayıda ve eşit uzaklıkta nokta bulunduğu gözlenmektedir. Bu bulgu ve çok yüksek korelasyon katsayılı doğrusal ilişki iki hızlandırılmış kür yönteminin eşdeğerliğini ve birbirlerinin yerine kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3 Rezidülerin Dağılımı

Dayanım değerlerinin dağılımı, hızlandırılmış kür yöntemindeki değişimlerden (deney-içi dağılım) veya beton bileşimindeki değişimlerden (bileşimler veya üretimler arası dağılım) kaynaklanır (67). Amacımız hızlandırılmış kür yöntemlerine ait dağılımların karşılaştırılmasıdır. Bu nedenle beton bileşimi ve bileşenlerin farklılıklarından ileri gelen dağılım araştırılmayacaktır.

"Deney-içi" dağılımlar, numunelerin hazırlanması, kürü ve deney koşullarından kaynaklanabilir. Fakat bu çalışmada her bir üretimde üretilen 9 numune de aynı karışımdan alınmış, aynı kalıplar kullanılmış, hazırlanmaları, kür uygulamaları, başlıkla- ma ve basınç deneyleri aynı teknisyenle yapılmıştır. Bu, eğer

dağılımlarda bir fark gözlenirse bunun hızlandırılmış kür yöntemlerinden kaynaklanacağıının göstergesidir.

"Deney-içi" dağılımların ölçüsü, standart sapma ve varyasyon katsayısı olabilir. Hesaplama, varyans analizi uygulanarak artık varyans yoluyla yapılabildiği gibi her bir grubun tek tek varyansları hesaplanıp 49 üretim üzerinden ortalaması alınarakta yapılabilir. Başka bir yöntem de ortalama-değişim aralığı kullanılarak standart sapma ve varyasyon katsayısının hesabıdır (67). Çalışmada istatistik açıdan daha uygun ve kesin sonuç veren yaklaşım olduğu için varyans analizi yöntemi benimsenmiştir. Varyans analizi hesabı (68) Ek 4'de verilmiştir.

Tablo 4.1 a,b ve c de sırasıyla sıcak su yöntemi, değiştirilmiş sıcak su yöntemi ve standart numunelere uygulanan varyans analizi sonuçları ve artık varyans yoluyla hesaplanan standart sapma ve varyasyon katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Varyans Analizi Sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	Standart Sapma ( $\sigma_i$ ) (MPa)	Varyasyon Katsayısı ( $v$ ) (%)
Gruplar arası	48	3327.1	69.3	0.61	4.52
Gruplar içi	98	36.7	0.37		
Genel toplam	146	3363.8			

(a) Sıcak su yöntemine ait varyans analizi sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	Standart Sapma ( $\sigma_i$ ) (MPa)	Varyasyon Katsayısı ( $v$ ) (%)
Gruplar arası	48	3467.9	72.2	0.75	4.82
Gruplar içi	98	55.3	0.56		
Genel toplam	146	3523.2			

(b) Değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait varyans analizi sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	Standart Sapma ( $\sigma_i$ ) (MPa)	Varyasyon Katsayısı ( $v$ ) (%)
Gruplar arası	48	11163.0	232.6	1.65	4.95
Gruplar içi	98	266.7	2.72		
Genel toplam	146	11429.7			

(c) 28 günlük standart numunelere ait varyans analizi sonuçları

Gerek standart sapma, gerekse varyasyon katsayısı değerleri karşılaştırıldığında hızlandırılmış dayanımlardaki dağılımın standart dayanımlardaki dağılımdan daha küçük olduğu görülmekte, bu husus hızlandırılmış kür yöntemlerinin kullanılmasında sakınca bulunmadığına işaret etmektedir. Kendi aralarında karşılaştırıldıklarında değiştirilmiş sıcak su yönteminde dağılım, sıcak su yöntemine oranla biraz daha yüksek değerler almaktadır: standart sapma 0.14 MPa, varyasyon katsayısı %0.3 daha büyüktür.

Dağılımadaki bu çok sınırlı kötüleşmeye karşın değiştirilmiş sıcak su yöntemi hızlandırılmış dayanımda ortalama  $15.6-13.6=2.0$  MPa,  $2.0/13.6=\%15$  artış sağlamaktadır. Bu, kayda değer bir artıştır.

Özetlenirse değiştirilmiş sıcak su yöntemi daha yüksek hızlandırılmış dayanım değerleri sağlayan, ancak dağılmayı biraz artıran, esas itibarı ile sıcak su yöntemine eşdeğer nitelikte bir hızlandırılmış kür yöntemi olarak belirlemekte, bu olgu beklentilerle uyumlu görünmektedir.

#### 4.2.2 Hızlandırılmış Dayanım-Standart Dayanım İlişkisi

Şekil 4.4 'de sıcak su yöntemine, Şekil 4.5 'de değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait hızlandırılmış dayanım-28 günlük standart dayanım doğrusal ilişkisi görülmektedir.

Sıcak su yönteminde doğrusal ilişki:

$$y = 1.714 x_1 + 10.05 \text{ MPa} \quad r=0.935 \quad (4.2)$$

Değiştirilmiş sıcak su yönteminde:

$$y = 1.729 x_2 + 6.32 \text{ MPa} \quad r=0.963 \quad (4.3)$$

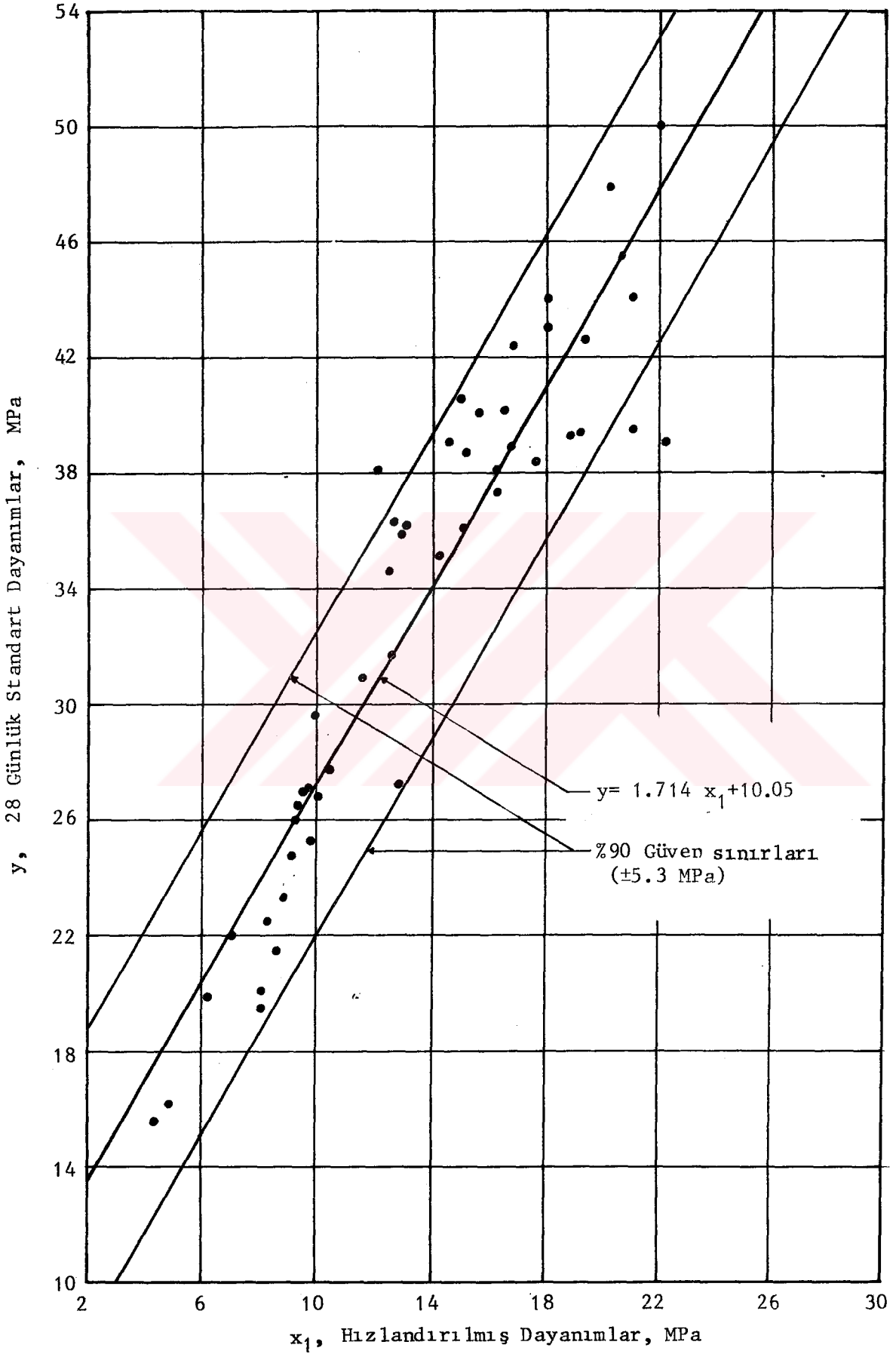
y : 28 günlük standart dayanım

$x_{1,2}$ : Hızlandırılmış dayanımlar

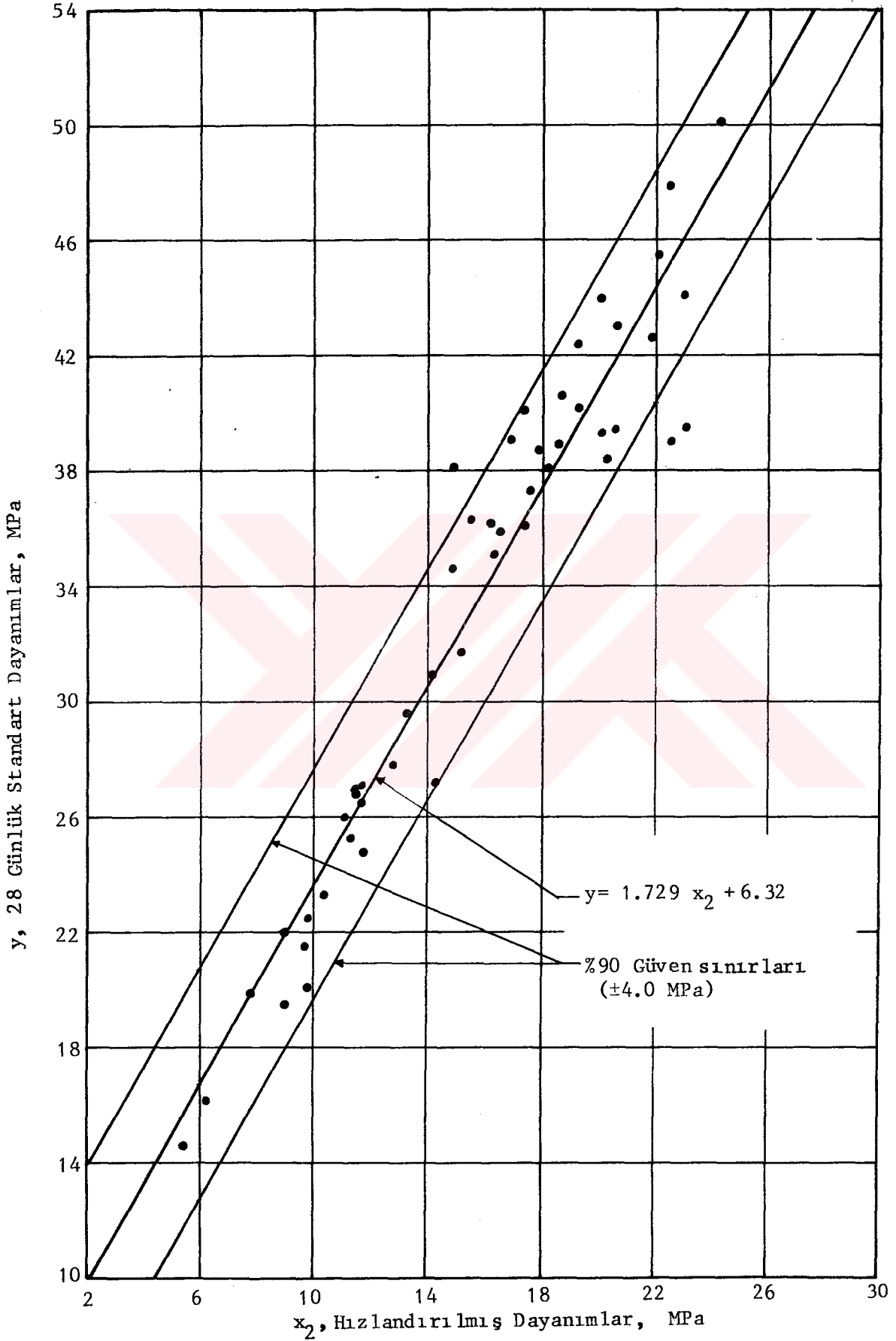
r : korelasyon katsayısı

şeklinde belirlenmiştir.

Hızlandırılmış dayanımlarla standart dayanım arasındaki ilişkiler, her iki yöntem için de doğrusalın dışında değişik



Şekil 4.4. Sıcak Su Yöntemine Ait Hızlandırılmış Dayanım- 28 Günlük Standart Dayanım İlişkisi



Şekil 4.5 . Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemine Ait Hızlandırılmış Dayanım-28 Günlük Standart Dayanım İlişkisi

biçimlerde denenmişler; bu denklemler ve korelasyon katsayıları sıcak su yöntemi için Tablo 4.2. a'da, değiştirilmiş sıcak su yöntemi için Tablo 4.2 b'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Regresyon-Korelasyon Analizi Sonuçları

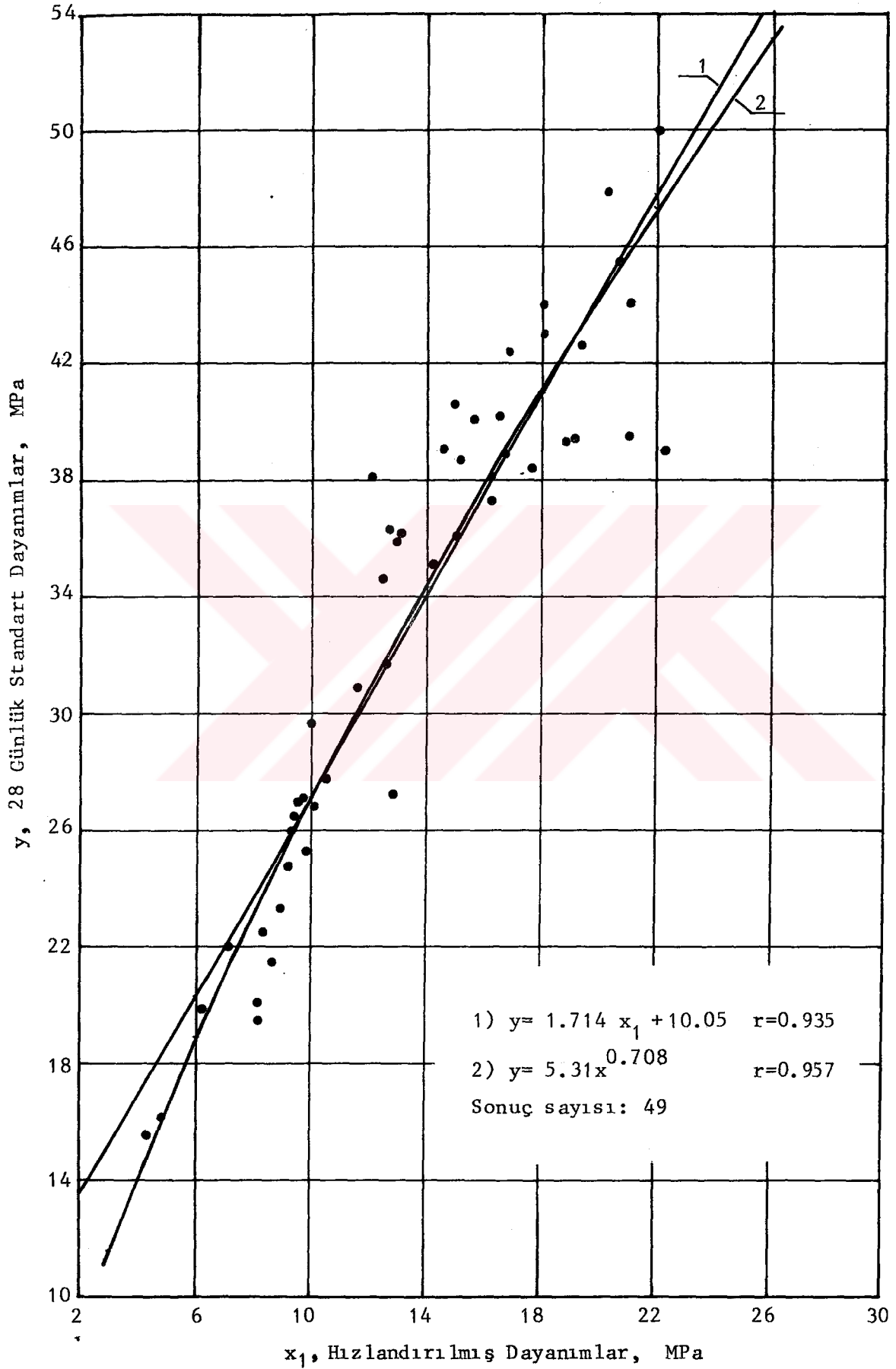
Eşitlik tipi	Regresyon eşitliği	Korelasyon Katsayısı
$y=ax + b$	$y=1.714 x+10.05$	0.935
$y=ax^b$	$y=5.31 x^{0.708}$	0.957
$y=ae^{bx}$	$y=14.98 e^{0.056 x}$	0.920
$y=ax^2+bx+c$	$y= -0.08x^2+4.12x-5.32$	0.946

(a) Sıcak su yöntemi için regresyon-korelasyon analizi sonuçları

Eşitlik tipi	Regresyon eşitliği	Korelasyon Katsayısı
$y=ax + b$	$y=1.729x+6.32$	0.963
$y=ax^b$	$y=3.70 x^{0.8}$	0.974
$y=ae^{bx}$	$y=13.19 e^{0.057x}$	0.954
$y=ax^2+bx +c$	$y= -0.03 x^2+2.78x-0.86$	0.967

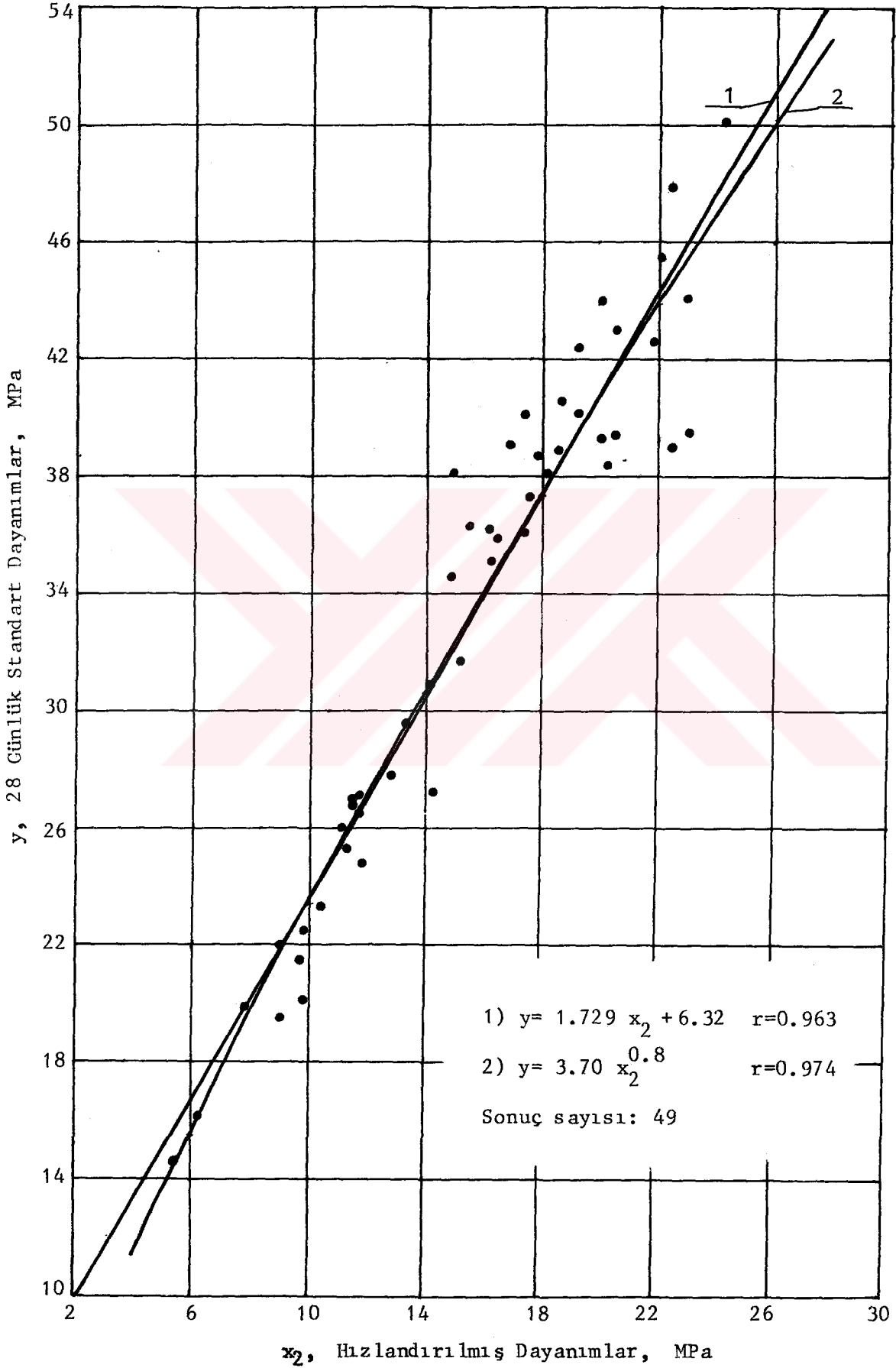
(b) Değiştirilmiş sıcak su yöntemi için regresyon-korelasyon analizi sonuçları

Görüldüğü gibi her iki yöntem için de denenilen ilişkiler içinde, geometrik ve parabolik eğriler doğrusal ilişkiden biraz daha yüksek korelasyon katsayısı vermişlerdir. Şekil 4.6 da sıcak su yöntemine, Şekil 4.7 'de değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait, her iki yöntemde de en yüksek korelasyon katsayısını veren  $y=ax^b$  ilişkisi eğrileri, regresyon doğrusu ile birlikte görülmektedir. Korelasyon katsayıları arasındaki farkların küçüklüğünden ve şekillerde eğriyle doğrunun neredeyse çakışmasından görüleceği gibi eğrisel ilişkiyle doğrusal ilişki arasında çok önemli bir fark bulunmamaktadır.



Şekil 4.6. Sıcak Su Yöntemine Ait Regresyon Doğrusu ve Eğrisi





Şekil 4.7. Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemine Ait Regresyon Doğrusu ve

İstatistik işlemlere de yatkınlığı nedeniyle bundan sonraki analizlerde doğrusal ilişki tercih edilecektir.

Regresyon eşitliği yardımıyla y'nin ne denli iyi tahmin edileceği tahminin standart hatasıyla belirlenir. Bu standart hata (68):

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (4.4)$$

$y_i$  : ölçülen 28 günlük dayanım değerleri

$\hat{y}_i$  : regresyon eşitliği vasıtasıyla hesaplanan 28 günlük dayanım değerleri

n : örnek sayısı

formülüyle belirlenir.

Sıcak su yöntemi için

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 467.39$$

olarak hesaplanır. Standart hata formül (4.4) den,

$$S_e = \sqrt{\frac{467.39}{49-2}} = 3.15 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanmaktadır.

Değiştirilmiş sıcak su yöntemi içinse

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 271.87$$

hesaplanarak, standart hata formül (4.4) den

$$S_e = \sqrt{\frac{271.87}{49-2}} = 2.40 \text{ MPa}$$

olarak bulunmaktadır.

28 günlük dayanımın tahmininde güven aralığı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir\* (68):

$$y = ax + b \pm w \quad (4.5)$$

$$w = S_e t_{(\alpha/2, n-2)} \quad (4.6)$$

\* Güven aralığının hesabında daha komple ve ayrıntılı bir istatistik yaklaşım Ek 5'de verilmiştir. Ancak metni ağırlaştırmamak için, mertebe olarakta yeterli yaklaşım sağladığından, burada daha basit bir yöntemle

$S_e$  : standart hata

$t$  : student dağılımında  $\alpha/2$  ye  $n-2$  serbestlik derecesinde karşılık gelen değer

Sıcak su yöntemi için %90 güven aralığı

$$S_e = 3.15 \text{ MPa}$$

$$t_{(0.05,47)} = 1.679 \quad (\text{Kaynak 68'den})$$

Formül (4.6) dan

$$w = \pm 3.15 \times 1.679 = \pm 5.3 \text{ MPa}$$

olarak bulunur.

Değiştirilmiş sıcak su yöntemi ise %90 güven aralığı:

$$S_e = 2.40 \text{ MPa}$$

$$t_{(0.05,47)} = 1.679 \quad (\text{Kaynak 68'den})$$

Formül (4.6) dan

$$w = \pm 2.40 \times 1.679 = \pm 4.0 \text{ MPa}$$

olmaktadır.

Bu güven aralıkları Şekil 4.4 'e ve 4.5'e işlenmiştir.

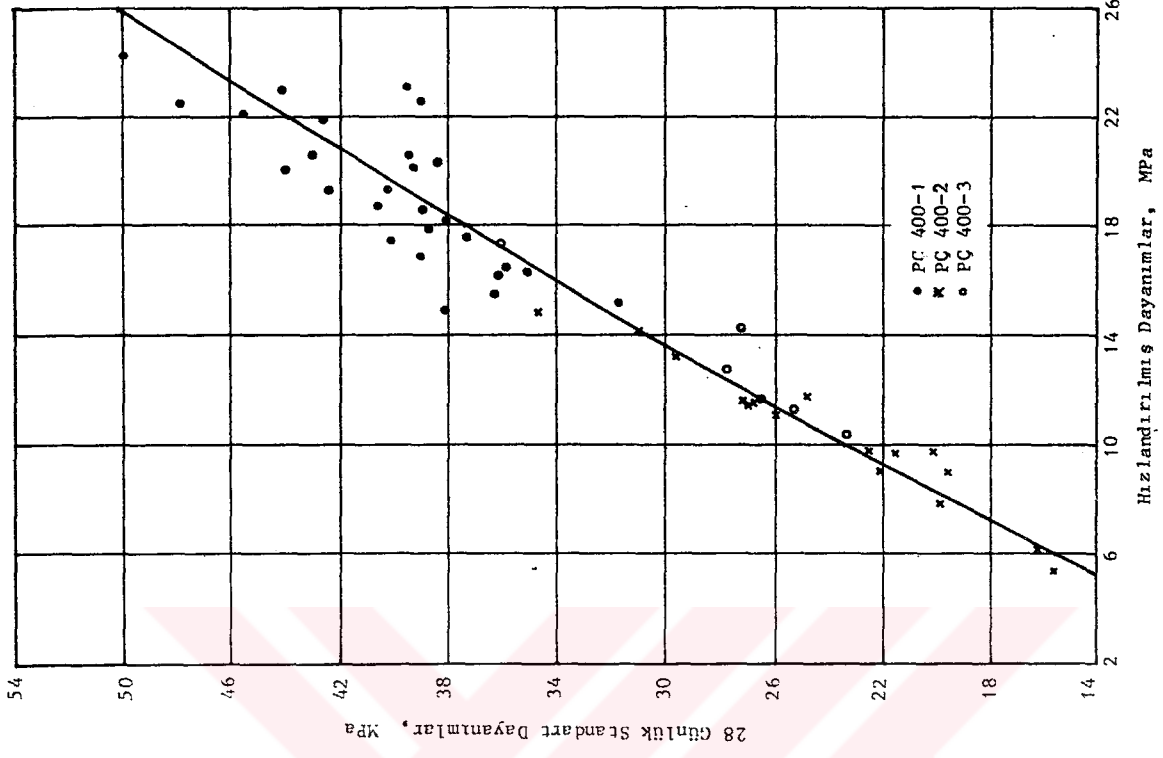
Gerek standart hata, gerekse %90 güven aralığı değerlerinden görüldüğü gibi değiştirilmiş sıcak su yöntemi yanılma payını %25 gibi önemli bir oranda azaltarak daha hassas tahmin imkanı vermektedir.

#### 4.2.3 Bileşim Parametrelerinin İlişkiler Üzerinde Etkisi

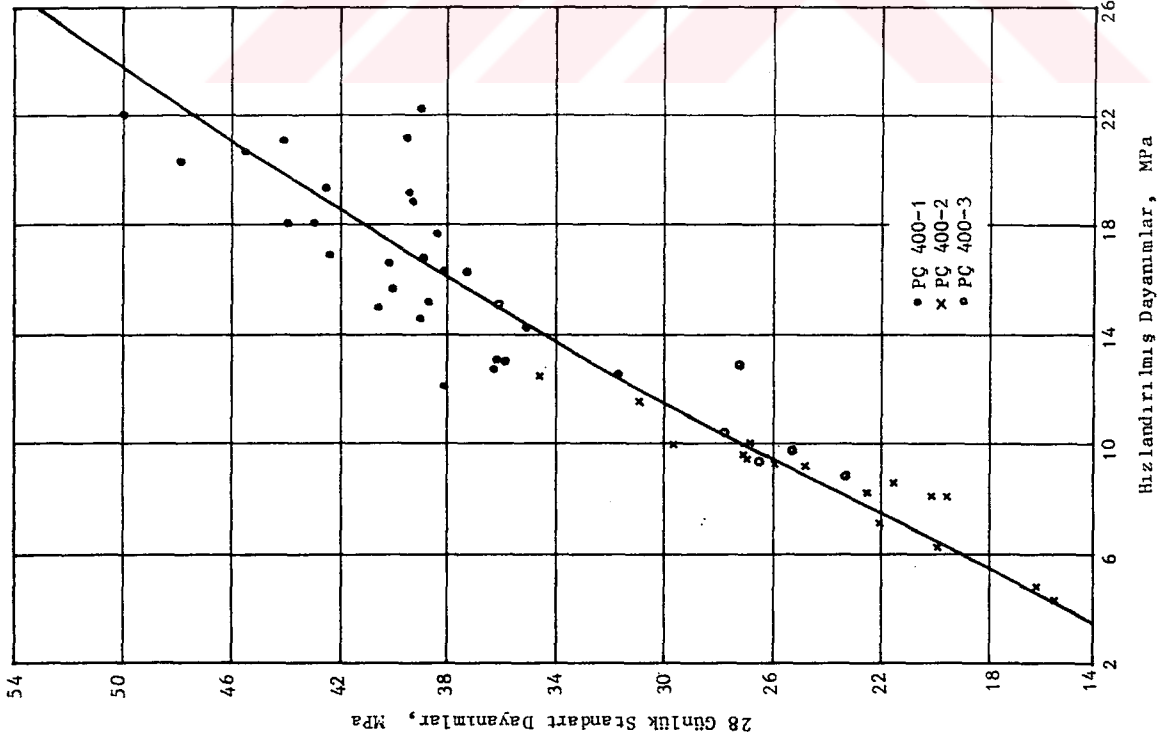
Hızlandırılmış dayanım-standart dayanım ilişkisinin geniş bir dayanım aralığında geçerli olması kadar bileşim oranlarından ve malzeme çeşitlerinden az etkilenmesi, mümkünse bağımsız olması arzu edilir. Zira o taktirde aynı ilişki değişik malzeme, bileşim ve çalışma koşullarında kullanılabilecektir.

Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da bu husus irdelenmiştir. Şekil 4.8 a ve b de hızlandırılmış-standart dayanım ilişkilerinde farklı çimento teslimatlarına ait noktalar ayrı işaretlerle gösterilmiştir. Şekillerden farklı teslimatlara ait noktaların ilişki eğrisinin etrafında rastgele dağıldığı, sistematik bir sapma göstermediği, bu gözlemin her iki yöntem için de geçerli olduğu bilinmektedir.

Aynı gözlem Şekil 4.9 a ve b den farklı çimento dozajları, Şekil 4.10 a ve b den değişik agrega karışımları için yapılabilir. Dolayısı ile bu çalışmanın koşulları içinde söz konusu parametrelerin hızlandırılmış dayanım-standart dayanım ilişkisini anlamlı düzeyde etkilemediği, bu belirlemenin her iki yöntem için de geçerli olduğu söylenebilir.

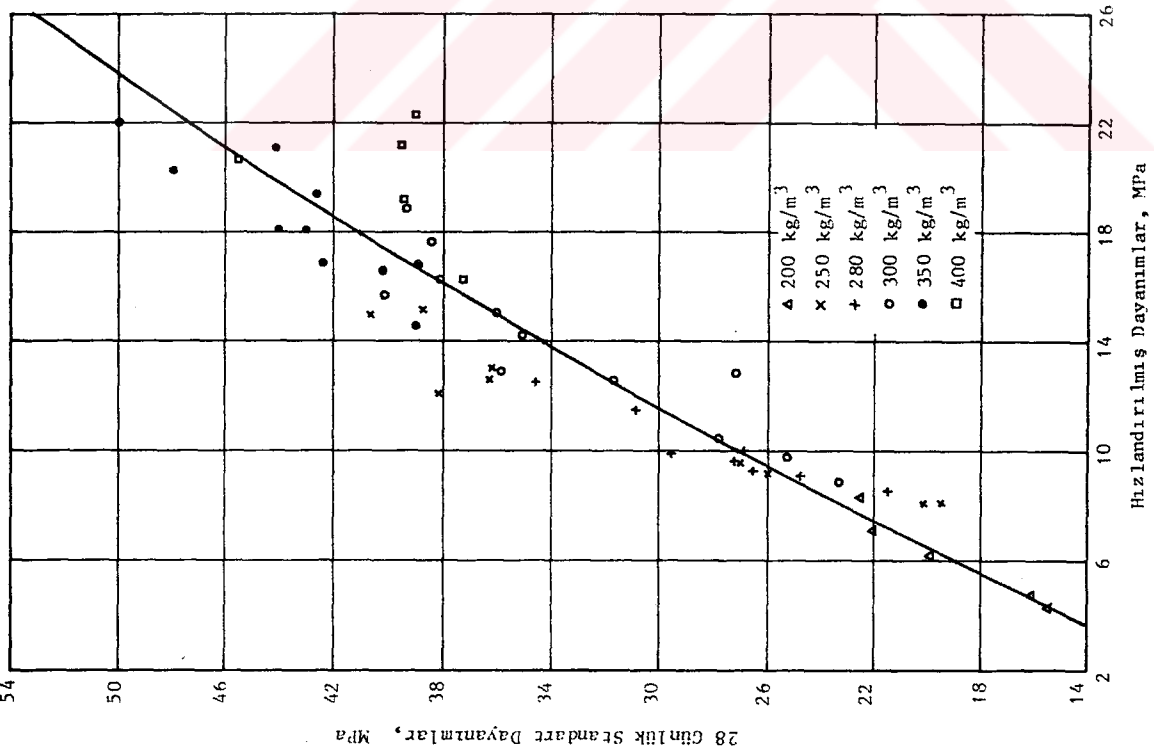
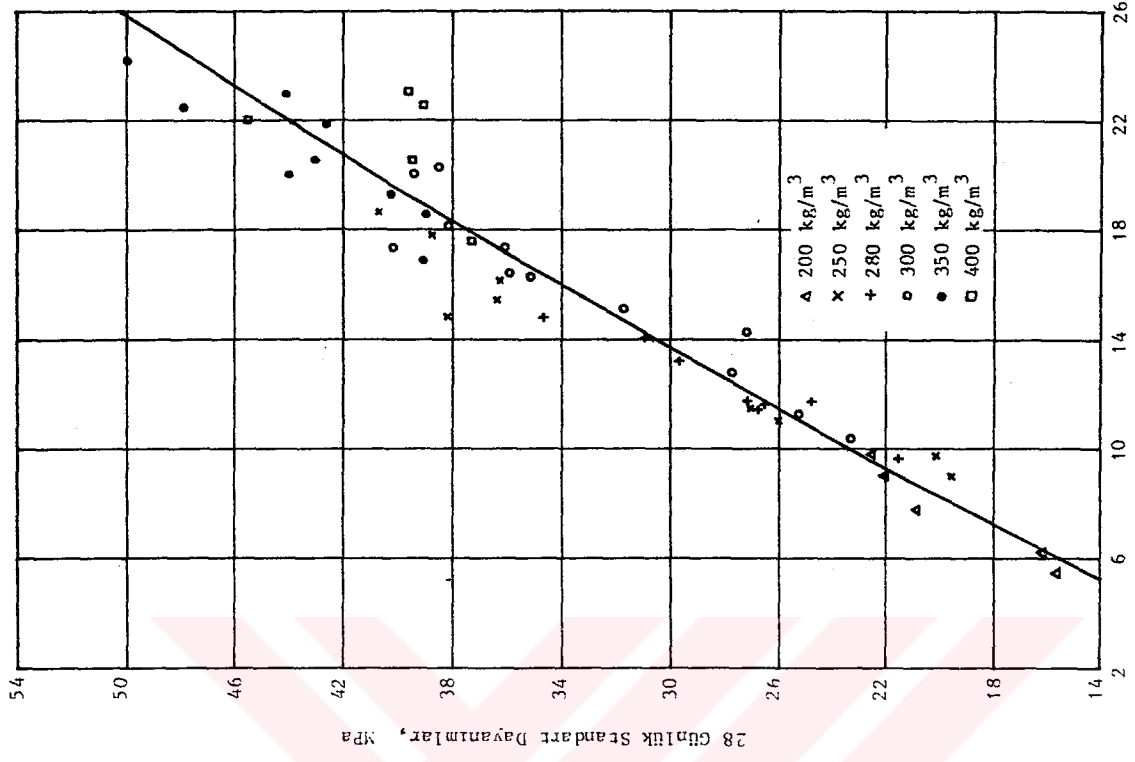


(b) D.S.S.Y.'de Çimento Teslimatına Göre Noktaların Dağılımı



(a) Sıcak Su Yönteminde Çimento Teslimatına Göre Noktaların Dağılımı

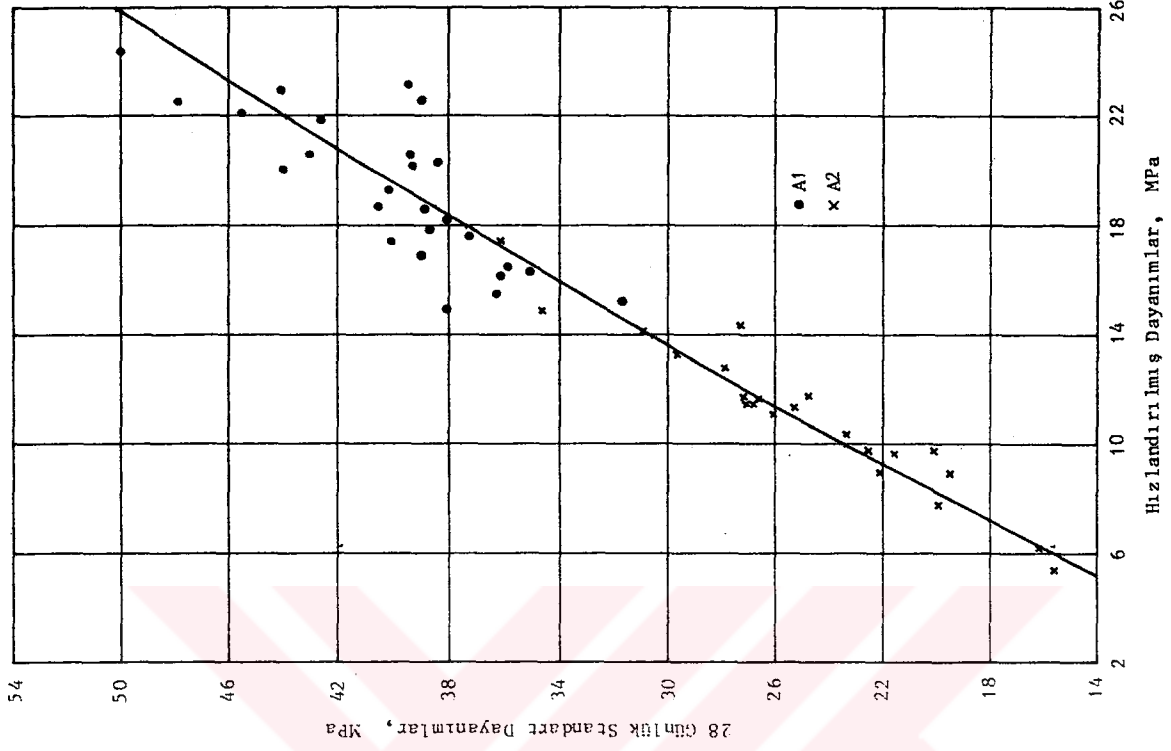
Şekil 4.8. Çimento Teslimatlarına Göre Noktaların Dağılımı



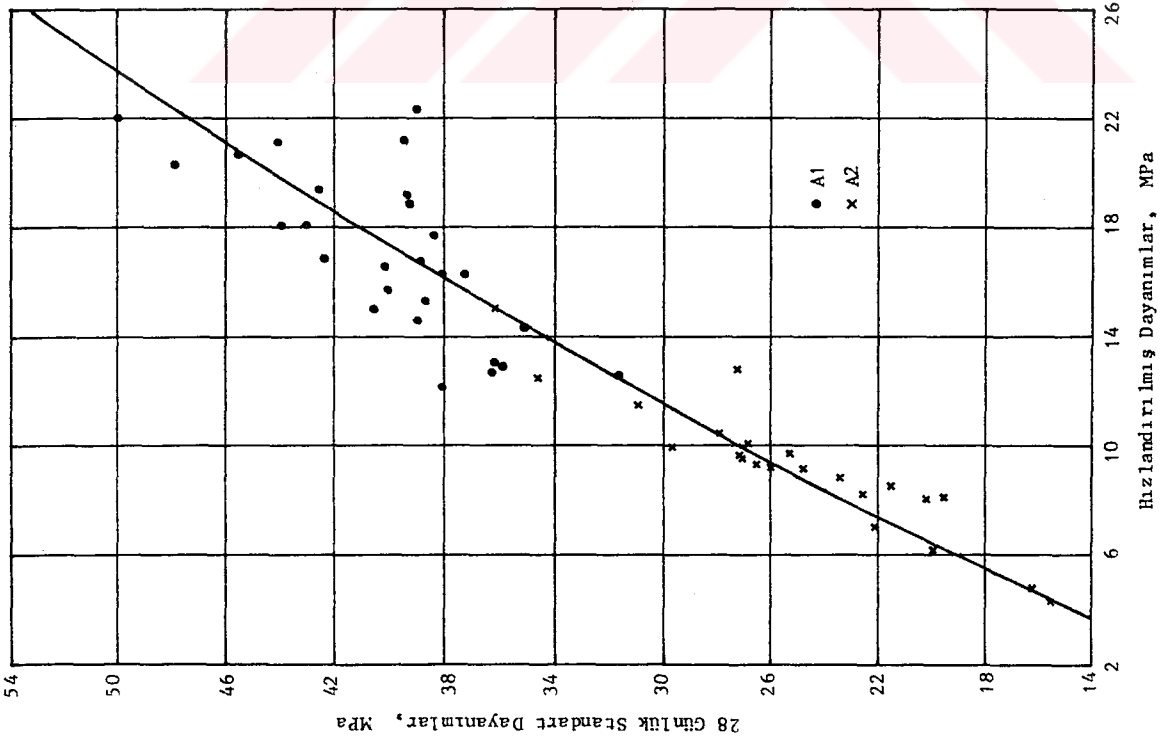
(a) Sıcak Su Yönteminde Çimento Dozajına Göre Noktaların Dağılımı

(b) D.S.S.Y. de Çimento Dozajına Göre Noktaların Dağılımı

Şekil 4.9 . Çimento Dozajına Göre Noktaların Dağılımı



(a) Sıcak Su Yönteminde Agrega Karışımına Göre Noktaların Dağılımı



(b) D.S.S.Y.'de Agrega Karışımına Göre Noktaların Dağılımı



#### 4.3 ÇEVİRİM PARAMETRELERİNDEKİ SAPMALARIN ETKİSİNE İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU

Ön bekleme süresi:

Onbeşer dakika farklı 3 ayrı ön bekleme süresine sahip deneylerde ölçülen hızlandırılmış dayanımlar (12.9, 12.6 ve 12.4 MPa) arasındaki maksimum fark 0.5 MPa, göreceli fark  $\pm 0.25$  MPa ( $\pm 2\%$ ) mertebesinde (Tablo 3.14). Bu fark çok küçüktür. Değiştirilmiş sıcak su yöntemi için hızlandırılmış dayanımda deneyiçi standart sapmanın 0.75 MPa olduğu hatırlanırsa 3 numune için gözlenen  $\pm 0.25$  MPa'lık farkın toplumun standart sapmasının çok altında kaldığı görülür. Dolayısı ile sonuçlarda gözlenen küçük farklar anlamlı değildir, ön bekleme sürelerindeki farklılıktan değil, deney sonuçlarındaki rastgele dağılımdan kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak ön bekleme süresinde  $\pm 15$  dakikalık toleransa rahatlıkla izin verilebilir, bu tolerans da şantiye laboratuvarı bile olsa, her laboratuvarında rahatlıkla uygulanabilecek bir toleranstır.

Son bekleme süresi:

Onbeş dakika 3 ayrı son bekleme süresine ait deneylerde dayanımlar (13.4, 13.8 ve 13.5 MPa) arası, fark  $\pm 0.2$  MPa ( $\pm 1.5\%$ ) mertebesinde kalarak ön beklemeyle oranla daha da düşük düzeyde gerçekleşmiştir (Tablo 3.15). Dolayısı ile ön bekleme süresi için yapılan değerlendirme son bekleme süresi için daha da geçerlidir,  $\pm 15$  dakikalık toleransa rahatlıkla izin verilebilir.

İşlem süresi:

Bu sürede  $\pm 30$  dakikalık sapmalar sonucunda elde edilen dayanımlar; sıcak su küründe 10.3, 10.4 ve 10.6 MPa, değiştirilmiş sıcak su küründe 13.6, 13.9 ve 14.2 MPa olmuş, göreceli fark sırası ile  $\pm 0.15$  MPa ( $\pm 1.5\%$ ) ve  $\pm 0.3$  MPa ( $\pm 2.2\%$ ) olarak gerçekleşmiştir (Tablo 3.16). İşlem süresindeki  $\pm 30$  dakikalık toleransın her iki hızlandırılmış kür yöntemini anlamlı düzeyde etkilemediği, dolayısı ile rahatlıkla kabul edilebilir nitelikte olduğu sonucuna varılmaktadır.

### İşlem sıcaklığı:

İşlem sıcaklığındaki  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  lik sapmaların etkisini görmek için yapılan seri deneylerde artan işlem sıcaklığı ile sıcak su küründe 9.2, 9.4 ve 11.7 MPa, değiştirilmiş sıcak su küründe 12.1, 11.7 ve 14.6 MPa dayanımlar elde edilmiştir. İşlem sıcaklığının  $3^{\circ}\text{C}$  azalması sonuçları anlamlı düzeyde etkilememiş, ancak  $3^{\circ}\text{C}$  artması dayanımların önemli oranda artmasına (sıcak su yönteminde %26, değiştirilmiş sıcak su yönteminde %23) neden olmuştur. Bu fark, diğer parametrelerdeki farklılara oranla önemli ölçüde yüksektir (Tablo 3.13).

Diğer parametrelerin etkileri aynı beton harmanından üretilen numuneler üzerinde incelenmiş, burada ise imkanlar nedeniyle karşılaştırma farklı beton harmanlarından alınan numuneler üzerinde yapılmıştır. Farklılıkta bu unsurun payı da olabilir. Ancak yine de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 'lik sapma yerine daha düşük bir sapmanın benimsenmesinde de yarar görülmektedir. Günümüzde sıcaklığı  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  ile sabit tutulabilen hassas termostatlı su banyolarına ilaç, gıda, kimya sektörlerinde yaygın biçimde rastlanmakta, beton kür tanklarında da  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  veya  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  hassasiyet rahatlıkla sağlanmaktadır. Deneysel çalışmada kullanılan ve seri ticari ürün niteliğindeki kür tankları da yıllardır  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'den iyi bir hassasiyetle hizmet vermiştir. Bu nedenle  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük bir sapmanın öngörülmesinde teknik bir zorluk görülmemekte, buna karşılık sapmada belirgin bir iyileştirme beklenmektedir. Mamafih iki yöntem karşılaştırıldığında değiştirilmiş sıcak su yönteminin standart yönteme oranla dezavantajı olmadığı ortadadır.

### Sonuç:

Günlük çalışma koşullarında hızlandırılmış kür çevriminin parametrelerinde oluşabilecek makul düzeydeki sapmaların (ön ve son bekleme sürelerinde  $\pm 15$  dakika, işlem süresinde  $\pm 30$  dakika, işlem sıcaklığında  $3^{\circ}\text{C}$  den az) hızlandırılmış dayanım değerlerini anlamlı düzeyde etkilemediği, bu hususun her iki yöntem için de geçerli olduğu, önerilen yeni yöntemin bu açıdan hiç bir dezavantaj taşımadığı görülmektedir.

#### 4.4 HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARA UYGULANMASINA İLİŞKİN DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE YORUMU

Yüksek dayanımlı betonlarda hızlandırılmış dayanımlar daha yüksek çıkmakta, hızlandırılmış/standart dayanım oranı artmaktadır. Normal betonlarda ortalama 0.47 olan bu değer, yüksek performanslı betonlarda 0.69'a çıkmıştır. Dayanım düzeyi yükseldikçe oran büyümekte standart dayanım-hızlandırılmış dayanım eğrisi yatıklaşmakta, eğim azalmaktadır.

Sonuçlarda dayanım düzeyi ile beraber standart sapma artmış, ancak varyasyon katsayısı sabit kalmıştır: hızlandırılmış ve standart dayanımlar için sırasıyla; normal dayanımlı betonlarda %4.8 ve %4.95, yüksek dayanımlı betonlar için %4.9 ve %4.9. Bu husus çalışmada aynı yeknesaklığın korunduğunu göstermektedir.

Ortalama deney-içi standart sapma ve varyasyon katsayısı sonuçlara varyans analizi uygulanarak artık varyans yoluyla hesaplanmıştır. Varyans analiz değerleri hızlandırılmış deneyler için Tablo 4.2 a da, standart deneyler için Tablo 4.2 b de görülmektedir.

Tablo 4.2. Yüksek Dayanımlı Betonda Varyans Analizi Sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	Standart Sapma ( $\sigma_i$ ) (MPa)	Varyasyon Katsayısı (v) (%)
Gruplar arası	24	3783.6	157.7	1.87	4.88
Gruplar içi	50	175.8	3.52		
Genel toplam	74	3959.4			

(a) Değiştirilmiş sıcak su yöntemine ait varyans analizi sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Varyans	Standart Sapma ( $\sigma_i$ ) (MPa)	Varyasyon Katsayısı (v) (%)
Gruplar arası	24	3852.7	160.5	2.73	4.9
Gruplar içi	50	371.9	7.44		
Genel toplam	74	4224.6			

(b) 28 günlük standart numunelere ait varyans analizi sonuçları

Standart dayanımla hızlandırılmış dayanım arasındaki ilişkiyi belirlemek için yapılan korelasyon-regresyon analizi, önceki bölümde benimsenen denklem tipleri için Tablo 4.3'de görülen sonuçları vermiştir.

Tablo 4.3 . Regresyon-Korelasyon Analizi Sonuçları

İlişki Tipi	Regresyon Eşitliği	Korelasyon Katsayısı
$y=ax+b$	$y=0.903x + 20.99$	0.895
$y=ax^b$	$y=6.28x^{0.599}$	0.888

Korelasyon katsayıları normal dayanımlı betonlarda elde edilenlerden biraz daha düşüktür. Regresyon doğrusu ve eğrisi Şekil 4.11'de noktalarla birlikte verilmiştir. Gerek korelasyon katsayıları arasındaki farkın azlığı, gerekse doğru ile eğrinin neredeyse çakışması her iki ilişki tipinin geçerli olduğunu göstermektedir. Bundan sonraki analizlerde doğrusal ilişki tercih edilecektir.

Hızlandırılmış dayanımlardan itibaren standart dayanımın tahmininde standart hata (68);

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (4.4)$$

$$n = 25$$

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 256.7$$

hesaplanarak

$$S_e = \sqrt{\frac{256.7}{23}} = 3.34 \text{ MPa}$$

olarak belirlenir. Standart dayanımın %90 güven aralığı

$$y = ax + b \pm w \quad (4.5)$$

$$w = S_e t_{(\alpha/2, n-2)} \quad (4.6)$$

$$t_{(0.05,23)} = 0.714 \quad (\text{Kaynak 68'den})$$

$$w = 3.34 \times 1.714 = 5.7 \text{ MPa} \quad (\text{formül 4.6'dan})$$

olmaktadır.

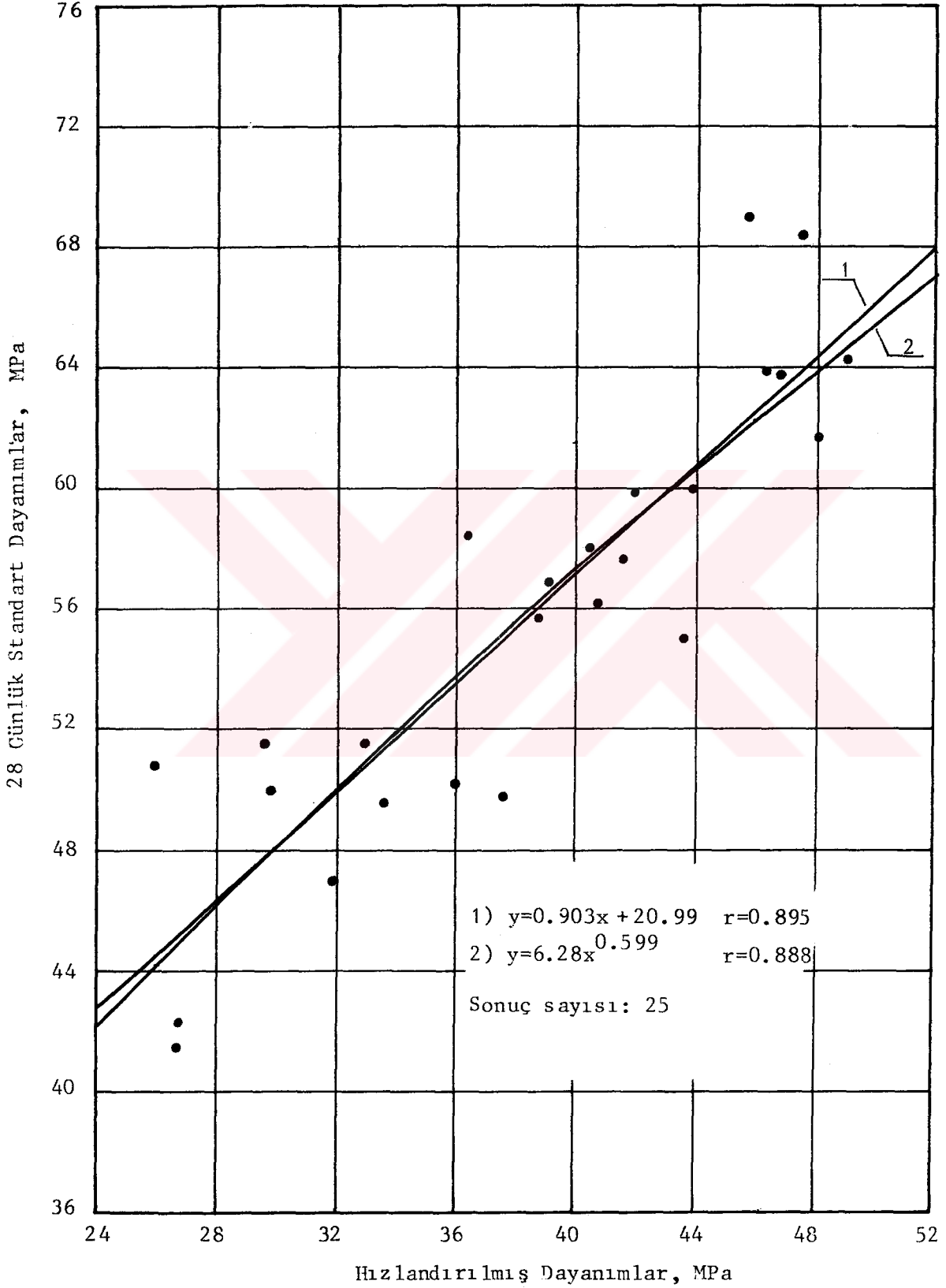
Standart hata ve güven aralığı normal dayanımlı betonlara oranla daha yüksek değerler almış, sıcak su yönteminin sağladığı hassasiyete eşdeğer mertebede kalmıştır.

Standart hata ve güven aralığı değerleri standart dayanımın ortalama değerine oranlanırsa  $3.34/55.7=\%6$  ve  $5.7/55.7=\%10.2$  değerleri elde edilmekte, bu değerler normal dayanımlı betonlardaki  $2.4/33.3=\%7.2$  ve  $4.0/33.3=\%12$  değerlerinden daha düşük kalmaktadır. Dayanım düzeyleri arasındaki fark dikkate alınarak oransal değerler tercih edildiğinde değiştirilmiş sıcak su yönteminin yüksek dayanımlı betonlar için daha da hassas tahmin imkanı tanıdığını söylemek mümkün olmaktadır.

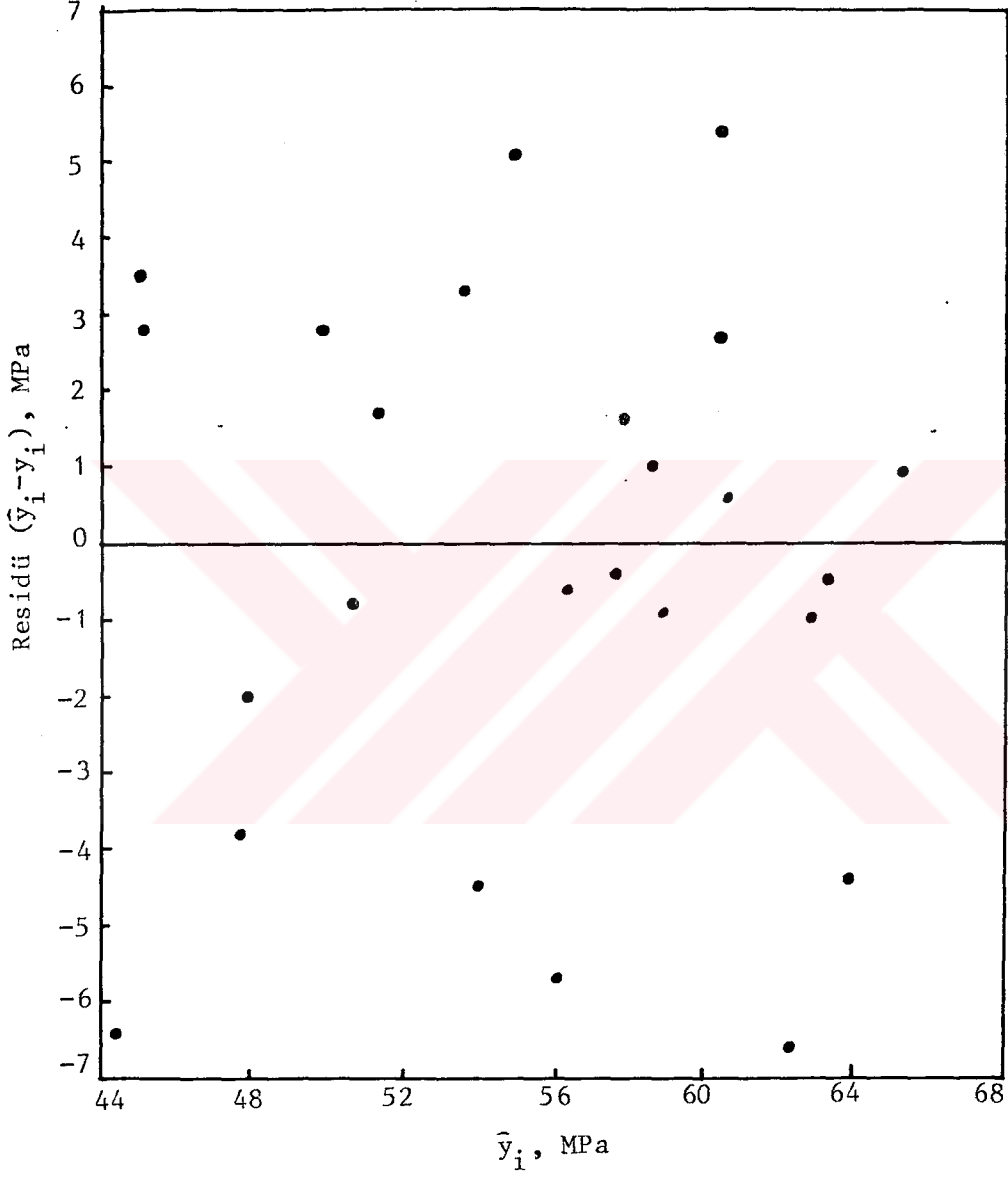
Şekil 4.12 rezidüleri göstermektedir. Rezidülerin rastgele dağıldığı, sıfır çizgisinin altında ve üstünde yaklaşık eşit sayıda ve eşit uzaklıkta nokta bulunduğu gözlenmektedir.

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 gerek çimento kaynağındaki farklılığın, gerekse değişik çimento dozajlarının sistematik bir sapma yaratmadığı izlenimini vermektedir. Nokta sayısı daha az olmakla birlikte söz konusu parametrelerin hızlandırılmış dayanım-standart dayanım ilişkisini normal dayanımlı betonlarda olduğu gibi, anlamlı düzeyde etkilemediği kanısına varmak mümkün olmaktadır.

Özetle değiştirilmiş sıcak su yönteminin yüksek dayanımlı betonlara da aynı başarıyla uygulanabileceğini söylemek olanaklıdır.

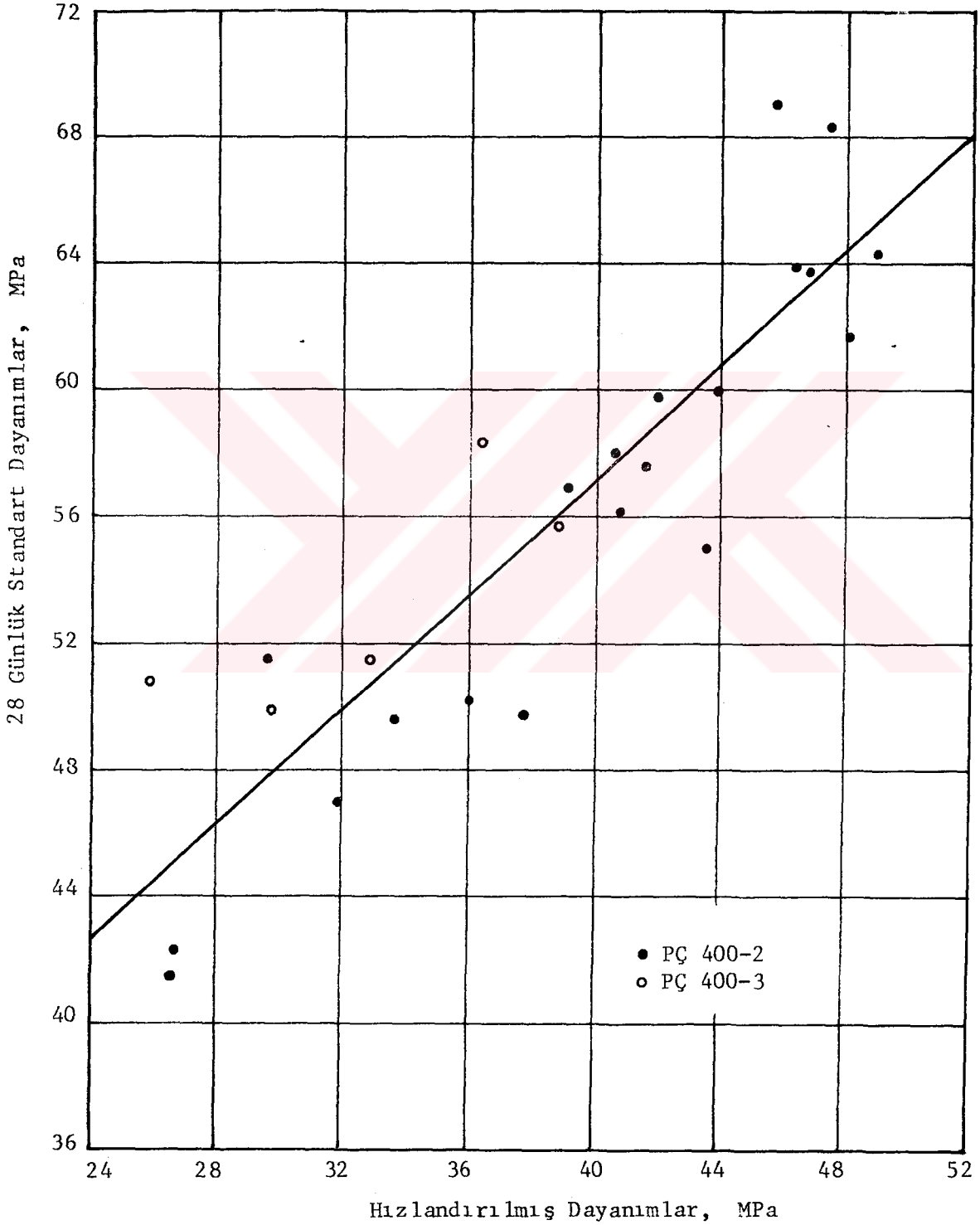


Şekil 4.11. Yüksek Dayanımlı Betonda Hızlandırılmış Dayanım-28 Günlük Standart Dayanım İlişkisi

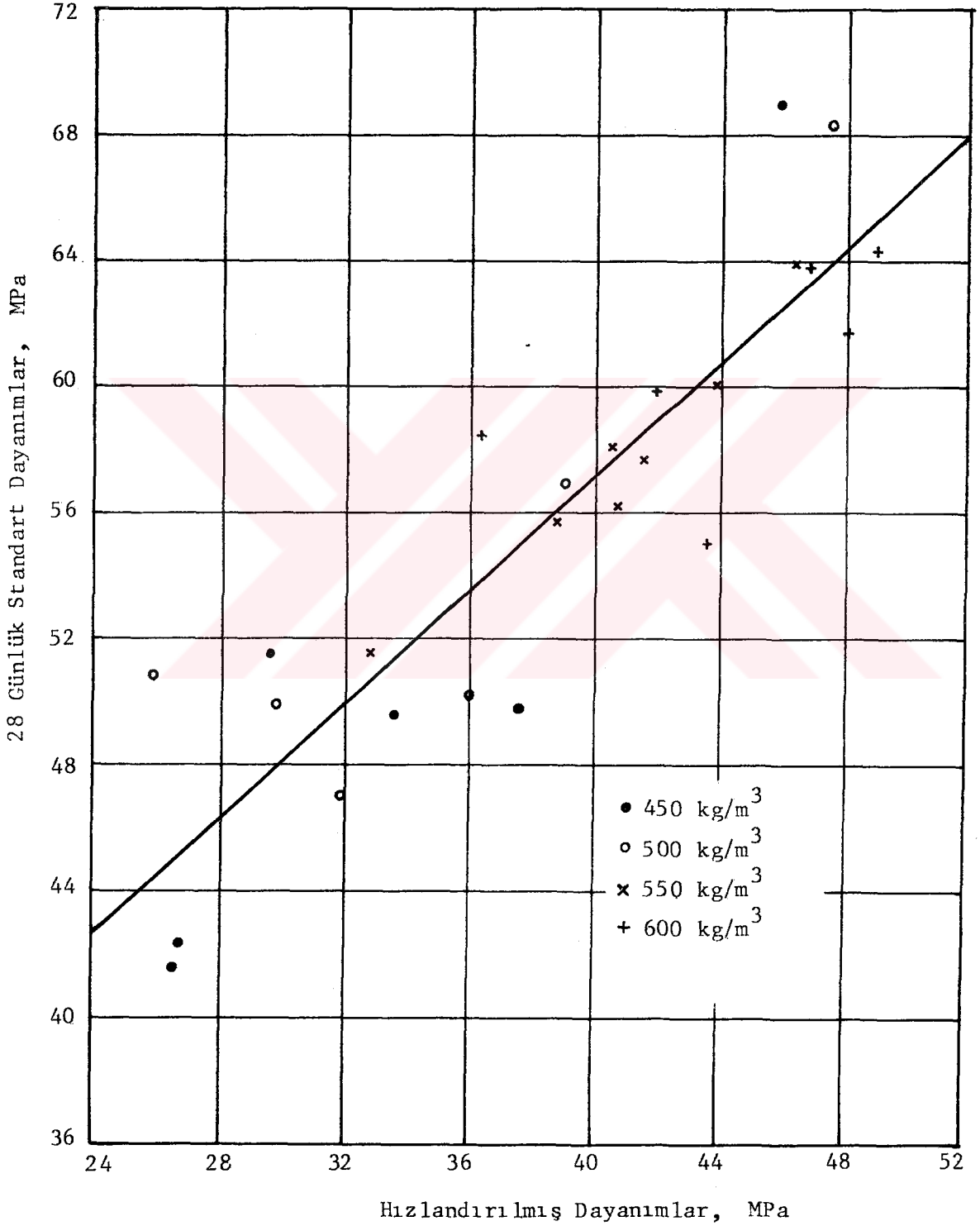


Şekil 4. 12. Yüksek Dayanımlı Betonda Residülerin Dağılımı





Şekil 4.13. Yüksek Dayanımlı Betonda Çimento Teslimatına Bağlı Olarak Hızlandırılmış Dayanımlar-28 Günlük Standart Dayanımlar



Şekil 4.14. Yüksek Dayanımlı Betonda Çimento Dozajına Bağlı Olarak Hızlandırılmış Dayanımlar-28 Günlük Standart Dayanımlar

## BÖLÜM 5

### S O N U Ç

Betonun basınç dayanımının sınıf dayanımına uygunluğunu belirlemek için geçen 28 günlük süre içinde binlerce metre-küp beton dökülebilmekte, onlarca kat inşa edilebilmektedir. Bu süreyi kısaltmak için yoğun araştırmalar yapılarak hızlandırılmış kür yöntemleri geliştirilmiş, bunlardan bazıları çeşitli ülkelerde standartlaşmış, ASTM C684-74 standardından aktarılan üç yöntem, TSE tarafından benimsenerek (TS 3323 "Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi") Türk standardı olarak 1979'da uygulamaya konulmuştur.

Bu çalışmada önce hızlandırılmış kür yöntemleri üzerine geniş kapsamlı ve ayrıntılı bir literatür taraması yapılmış, hızlandırılmış kür yönteminin özünde, bir ısıl işlem çevrimi olduğu saptanarak ısıl işlemlere ve beton bünyesindeki etkilerine ilişkin bir sentez oluşturulmuştur. Bu sentez ışığında hazırlanmış kür yönteminin eleştirisi yapılarak nasıl geliştirilebileceği incelenmiş ve optimize edilmesi gereken parametreler ön bekleme süresi, işlem sıcaklığı ve süresi, son bekleme süresi olarak belirlenmiştir.

Önce, karşılaştırmalı deneylerle hızlandırılmış kür yönteminin parametrelerinin optimum değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. "Değiştirilmiş sıcak su yöntemi" adı verilen çevrimde bu parametreler ön bekleme süresi 1 saat, işlem sıcaklığı 43°C, işlem süresi 21 saat, son bekleme süresi 2 saat, toplam süre 24 saat olarak belirlenmiştir. Önerilen yöntem normal mesai saatleri içinde gerçekleştirilme ve deneyleri yapan operatörler için sağlık tehlikesi oluşturmama avantajlarını korumaktadır.

Önerilen yöntem, mevcut standartlaşmış "sıcak su" yöntemiyle paralel biçimde, çimento dozajı, su/çimento oranı farklı, basınç dayanımı 15.6-50.0 MPa gibi geniş bir aralıkta değişen 49 ayrı betona uygulanarak geçerliliği ve güvenilirliği sınanmış ve aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- \* Önerilen yöntem sıcak su yönteminden daha yüksek erken basınç dayanımı vermektedir. Aradaki fark, ortalama olarak (%15) mertebesinde, kayda değer bir artış olmuştur.
- \* Önerilen yöntemde deney-içi dağılıma varyasyon katsayısı cinsinden %4.8 olarak ölçülmüş, bu değer sıcak su yöntemininkinden (%4.5) biraz daha yüksek, 20°C-28 gün olarak tanımlanan standart küründen (%4.95) biraz daha düşüktür. Dağılımların her 3 kür şeklinde de aynı mertebede kaldığı söylenebilir.
- \* İki hızlandırılmış kür yöntemi arasında çok yüksek korelasyon katsayılı (0.99) doğrusal ilişki bulunmuştur. Rezidülerin incelenmesi de bu bulguyu pekiştirmiştir. Bu bulgu önerilen yöntemin eskisine eşdeğer ve onun yerine kullanılabilir nitelikte olduğunu kanıtlamaktadır.
- \* 20°C-28 günlük standart dayanımın, hızlandırılmış dayanımlardan itibaren tahmininde aşağıdaki istatistik değerler elde edilmiştir.

		STANDART SICAK SU YÖNTEMİ	ÖNERİLEN YÖNTEM
KORELASYON KATSAYISI	DOĞRUSAL	0.935	0.963
	EĞRİSEL	0.957	0.974
TAHMİNİN STANDART HATASI	(MPa)	3.2	2.4
	(%)	9.6	7.2
%90 GÜVEN ARALIĞI	(MPa)	±5.3	±4.0
	(%)	±15.9	±12.0

Bu değerler önerilen yöntemin 28 günlük standart basınç dayanımının tahmininde standart yöntemle oranla daha güvenilir ve duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Duyarlılıkta yaklaşık %25 oranında bir iyileştirme gerçekleşmektedir.

Bütün bu bulgular önerilen yöntemin mevcut sıcak su yönteminin tüm avantajlarını koruduğunu ve ek olarak, özellikle tahminin hassasiyetinde, üstünlükler taşıdığını ve onun yerine ikame edilmesinde yarar bulunduğunu göstermektedir.

Gerçek çalışma koşullarında çevrim parametrelerinde oluşabilecek sapmaların muhtemel etkileri de araştırılmıştır. Standart yöntemde öngörülen tolerans değerlerinin önerilen yöntemde de geçerli olduğu kanıtlanmıştır. Ancak işlem sıcaklığının daha dar bir sınırdaki değişmesine ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ) müsaade edilmesinin gerektiği de anlaşılmıştır.

Bu açıdan da önerilen yöntem basit, esnek, uygulamada zorluk çıkarmayan bir yöntem olarak bilinmektedir.

Önerilen yöntem süper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen ve basınç dayanımı 40-70 MPa arasında değişen 25 ayrı yüksek dayanımlı betona uygulanmış ve normal betonla karşılaştırılmalı olarak aşağıdaki istatistik değerler elde edilmiştir.

Göstergeler yöntemin yüksek dayanımlı betonlara da başarıyla uygulanabileceğini, standart hatanın ve güven aralığının oransal değerleri ele alındığında, yüksek dayanımlı betonlarda tahmin hassasiyetinin normal betonlara oranla daha da iyi olduğunu ortaya koymaktadır.

		NORMAL BETON	YÜKSEK DAYANIMLI BETON
KORELASYON KATSAYISI	DOĞRUSAL	0.963	0.895
	EĞRİSEL	0.974	0.888
TAHMİNİN STANDART HATASI	(MPa)	2.4	3.3
	(%)	7.2	6.0
%90 GÜVEN ARALIĞI	(MPa)	$\pm 4.0$	$\pm 5.7$
	(%)	$\pm 12.0$	$\pm 10.2$

Sonuç olarak; geliştirilen "değiştirilmiş sıcak su yöntemi" 14 MPa'dan 70 MPa'a kadar çok geniş bir dayanım aralığında başarıyla uygulanabilir, standart yöntemle oranla daha hassas, güvenilir, kullanışlı bir hızlandırılmış kür yöntemi olarak belirmektedir. "TS 3323 Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi" standardının revizyonu sırasında önerilen bu yeni yöntemin dikkate alınması yararlı olacaktır. Ancak önerilerin daha kesin biçimde kanıtlanması için farklı üretim koşulları ve farklı malzemelerle üretilen betonlarda da yeni yöntemin geçerliliği, güvenilirliği ve avantajları kapsamlı bir şekilde araştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

1. Öztekin, E., Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Kullanılan Isıl İşlemler-Eğilme Dayanımına Etkileri, Doçentlik Tezi, KÜ, Müh. Mim. Fak., Trabzon, 1983.
2. Gerend, M.S., Steam Cured Cylinders Give 28-day Concrete Strength in 48 Hours, Engineering News Record, 98, 7(1927) 282-283.
3. Malhotra, V.M., Accelerated Strength Testing of Concrete Specimens, Progress in Construction and Technology, Medical and Technical Publishing Co. Ltd, London, 2 (1973) 57-82.
4. Pearson, J.C., ve Brickett, E.M., Studies of High Pressure Steam Curing, ACI Journal, Proceedings, 28 (1932) 537-550.
5. Nurse, R.W. Steam Curing of Concrete, Magazine of Concrete Research, 1, 2(1949) 79-88.
6. Shideler, J.J., ve Chanberlin, W., Early Strength of Concrete as Affected By Steam Curing, ACI Journal, Proceedings, 46, 12 (1949) 273-283.
7. Saul, A.G.A., Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Magazine of Concrete Research, 2, 6(1951) 127-140.
8. Higginson, E.C., The Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete, ACI Journal, Proceedings, 57, 9(1961) 281-298.
9. Wagner, W.K., Accelerated Cement Tests Aid Producer Control, 31 st Annual Conference, National Ready Mixed Concrete Assoc, Miami, 1961.
10. Meritt, R.R., ve Johnson, J.W., Steam Curing of Portland Cement Concrete at Atmospheric Pressure, HRB Bulletin 355, 1962.
11. Hanson, J.A., Optimum Steam Curing Procedures in Precasting Plants, ACI Journal, Proceedings, 60, 1 (1963) 75-100.
12. Boundy, C.A.P., ve Hondros, G., Rapid Field Assessment of Strength of Concrete by Accelerated Curing and Schmidt Rebound Hammer, ACI Journal, Proceedings, 61, 1 (1964) 77-84.
13. Patch, D.G., An 8 Hour Accelerated Strength Test for Field Concrete Control, ACI Journal, Proceedings, 4-5, 2(1933) 318-324.
14. King, J.W.H, Concrete Quality Control-A Technique of Accelerated Test Developed at Queen Mary College for the Port of London Authority, Chartered Civil Engineer, 11 (1955) 46-48.

15. Akroyd, T.N.W., ve Smith Gander, R.G., Accelerated Curing of Concrete Test Cubes, Engineering London, 181 (1956) 153-155.
16. Akroyd, T.N.W., The Accelerated Curing of Concrete Test Cubes, Journal Instituon of Civil Engineering, 19 (1961) 1-22.
17. Kaynak 17'nin tartışması, Thompson, M.S., Cameron, R., King J.W.H., Smith, P., Chojnacki, B., Bate, E.E.H., Bannister, A., Wilson, G.A., Ordman, N.N.B., Journal Instituon of Civil Engineering, 21 (1962) 678-696.
18. King, J.W.H., An Accelerated Test for Concrete, Institute of Civil Engineers, London, 40 (1968) 125-129.
19. British Standards Institution, Method of Accelerating the Curing of Test Specimens, AMD 1948 to BS 1881: Part 3:1970.
20. Rilem, Accelerated Hardening of Concrete with a View to Rapid Control Tests, Rilem Bulletin, 31 (1966) 156-209.
21. Malhotra, V.M., Analyses of Accelerated 24 hour Strengths from Field Tests, Rilem Bulletin, 31 (1966) 174-180.
22. Jarocki, W., The Rapid Control of Concrete Strength on the Base of Specimens Cured in Hot Water, Rilem Bulletin, 31 (1966) 168-173.
23. Vourinen, J., Some Notes on the Use of Accelerated Curing of the Test Specimens for Concrete Quality Control, Rilem Bulletin, 31 (1966) 205-207.
24. Malhotra, V.M., ve Zoldners, N.G., Accelerated Strength Testing of Concrete Using the Modified Boiling Method, Rilem Bulletin, 31 (1966) 181-185.
25. Smith, P. ve Chojnacki, B., Accelerated Strength Testing of Concrete Cylinders in Ontario, Rilem Bulletin, 31 (1966) 199-204
26. Smith, P. ve Tiede, H., Earlier Determination of Concrete Strength Potential, Highway Research Record 210, (1967) 29-61.
27. Ramakrishnan, V., Past and Future of Concrete Quality Evaluation, Journal of the Construction Division, ASCE, Proc Paper 12187, 102 (1976) 263-276.
28. Meyer, A., Testing Method for the Advance Determination of the 28-day Standart Compressive Strength of Concrete in 5 Hours, Zement-Kalk-Gibs, 18, 11(1965) 574-579.
29. Malhotra, V.M., ve Zoldners, N.G., Some Field Experience in the Use of an Accelerated Method of Estimating the 28-day Strength of Concrete, ACI Journal, 66, 11(1969) 894-897.
30. Malhotra, V.M., The Past, Present and Future of Accelerated Strength Testing of Concrete, Indian Concrete Journal, 43, 9(1969) 324-349.



31. Canadian, Standards Association, Concrete Materials and Method of Concrete Construction, CSA Standard A 23.1 and A 23.2.
32. Nasser, K.W., A New Method and Apparatus for Accelerated Strength Testing of Concrete, Accelerated Strength Testing SP-56, ACI, (1978) 249-258).
33. Nasser, K.W. ve Beaton, R.J., K-5 Accelerated Strength Tester, ACI Journal, 77, 3 (1980) 179-188.
34. Smith, P. ve Chojnacki, B., Accelerated Strength Testing of Concrete Cylinders, ASTM, Proceedings, 63 (1963) 1079-1101.
35. Wills, M.H., Early Assessment of Concrete Quality by Accelerating Compressive Strength Development with Heat (Results of ASTM's Cooperative Test Program), JTEVA, 3, 4 (1975) 251-262.
36. ASTM, Standart Test Method for Making, Accelerated Curing and Testing Concrete Compression Test Specimens, ASTM C 684-89, 1989 Annual Book of ASTM Standards, V. 04. 02.
37. Ramakrishnan, V. ve Dietz, J., Accelerated Method of Estimathing the Strangth of Concrete, Transportation Research Record 558, Transportation Research Board, 1975, 29-44.
38. Mather, K., Effects of Accelerated Curing Procedures on Nature and Properties of Cement and Cement-Fly Ash Pastes, Properties of Concrete at Early Ages, SP-95, ACI, (1986) 155-172.
39. Naik, T.R., Effect of Cement Types in Accelerated Compressive Strength Testing of Concrete, Cement and Concrete Research, 9 (1979), 377-386.
40. Nichol, T.B., Warragamba Dam, Instituon of Civil Engineering Proceedings, 27 (1964) 529.
41. Shah, C.B., Estimation of Compressive Strength from Accelerated Strength Tests, Indian Concrete Journal, 60, 3(1986) 75-78.
42. Nagaraja, R., Balavenkata, N. ve Swamy, B.L.P., Quick Assessment of 28-Day Strength of Concretes with Fly Ash Admixtures, Indian Concrete Journal, 55, 11 (1981) 294-296.
43. Muzhir, S.M., Ghani, S., Kazimi, S.M.A., Rasheeduzapar, K. Development of a Field Test for Accelerated Strength Testing of Concrete Cubes, Indian Concrete Journal, 53, 11(1979) 291-293.
44. Kocaçitak, S., Çimento Muayenelerinde Yenilik, Mini Silindirlerle "28 Gün Yerine 24 Saat", Çimento Mecmuası, 1 (1974) .
45. Taşdemir, M.A. ve Atan, Y., Beton Mukavemetinin Hızlı Deneylerle Kontrolü, Türkiye İnşaat Mühendisliği 6. Teknik Kongresi, 1974, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 1-17.
46. Özalp, R., Çimento Standart Dayanımının Kısa Sürede Belirlenmesi (Mini Silindir Yöntemi), DSİ Yayını, Kİ-707, 1980

47. Özalp, R., Halıcı, M., Çimento Standart Dayanımı Değerlerinin Hızlandırılmış Deney Metodları ile Bulunması (Mini Silindir Metodu Rehberi), DSİ Yayını, Ki-784, 1990.
48. Öztekin, E., Kalfazade, H. ve Önel, M., Beton Basınç Dayanımının Belirlenmesinde Hızlandırılmış Deneyler, Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi, Ankara 1978, Bildiriler Kitabı, 519-534.
49. Öztekin, E., Accelerated Strength Test Results with Pozzolanic Cement Concrete, SP-91, ACI, (1986) 231-248.
50. Öztekin, E., Accelerated Strength Testing of Portland-Pozzolan Cement Concretes by the Warn Water Method, ACI Material Journal, 84, 1(1987) 51-54.
51. TSE, Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması, Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi, TS 3323, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1979.
52. Mironov, S.A., Further Development of Electric Curing of Concrete, Rilem International Conference on the Problems of Accelerated Hardening of Concrete in Manufacturing Precast Reinforced Concrete Units, Moscow, 1964.
53. Corino, N.I., Recent Developments in Nondestructive Testing of Concrete, Advances in Concrete Technology, Conf. Proc. CANMET, Athens 1992, 281-328.
54. ACI Committee 517: Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure-State of Art, ACI Journal, Proceedings, 77, 6(1980) 429-448.
55. Hanson, J.A., Optimum Steam Curing Procedure in Precasting Plants, ACI Journal Proceedings, 60, 1(1963) 75-100.
56. Idron, G.M., Hydration of Portland Cement Paste at High Temperature under Atmospheric Pressure, Fifth International Congress on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968
57. Verbeck, G.J. ve Helmut, R.H., Structures and Physical Properties of Cement Paste, Fifth International Congress on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
58. Alexander, K ve Taplin, J.A., Concrete Strength Past, Strength Cement Hydration and the Maturity Rule, Australian Journal of Applied Science, December, (1962) 277-284.
59. ACI Committee 517: Low Pressure Steam Curing, ACI Journal, Proceedings, 60, 7(1963) 953-986.
60. Abdun-Nur, E.A., Accelerated, Early and Immediate Evaluation of Concrete Quality, Accelerated Strength Testing, SP-56, ACI, (1978) 1-12.
61. Bauer, L.A.P. ve Olivian, L.I. Use of Accelerated Tests for Concrete Made with Slag Cement, Accelerated Strength Testing SP-56, ACI, (1978) 117-128.

62. Kaynak 30'un tartışması: Abdun Nur, E.A., Bickley, J.A., Howard, E.L., Lapinans, R., Lopez, G., Banera, Z.S., Mustard, J.N., Rodway, L.E., Riyan, G.J., Smith, P.K., Spratt G.W., ve Malhotra, V.M., ACI Journal, Proceedings, 67, . 5 (1970). 424-434.
63. TSE, Beton Agregaları, TS 706, Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 1980.
64. TSE, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, TS 3526, Türk Standartları Enstitüsü, Aralık 1980.
65. TSE, Beton Karışım Hesap Esasları, TS 802, Türk Standartları Enstitüsü, Ocak 1976.
66. TSE, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, TS 500, Türk Standartları Enstitüsü, Nisan 1984.
67. ACI Committee 214: Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, Proposed Revision of ACI 214-65, ACI Journal, 73, 5 (1976). 265-278.
68. Lipson, C. ve Sheth N.J., Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments, Mc Graw Hill, New York, 1973.



## Ek 1. BETON BİLEŞİM HESABI ÖRNEĞİ

Beton bileşim hesabı (65) bir örnek üzerinde açıklanacaktır:

B12 Nolu üretimde dozaj  $250 \text{ kg/m}^3$ , su/çimento oranı 0.62 olarak seçilmiştir.

Su miktarı:

$$s = \text{Ç} \frac{S}{\text{Ç}} = 250 \times 0.62 = 155 \text{ kg}$$

olarak hesaplanır.

Agrega hacmi:

$$a = 1000 - \left( \frac{\text{Ç}}{\gamma_{\text{Ç}}} + \frac{S}{\gamma_{\text{S}}} + h \right)$$

a : karışıma girecek agrega hacmi

Ç : karışıma girecek çimento kütlesi

S : karışıma girecek su kütlesi

h : karışımdaki toplam hava miktarı

$\gamma_{\text{Ç}}$  : çimento özgül ağırlığı

$\gamma_{\text{S}}$  : su özgül ağırlığı

formülüyle hesaplanır.

$$\gamma_{\text{Ç}} = 3.13 \text{ gr/cm}^3 \quad (\text{Tablo 3.1 a'dan})$$

$$h : 10 \text{ lt} \quad (\text{Kaynak 65 den})$$

$$a = 1000 - \left( \frac{250}{3.13} + 155 + 10 \right) = 755.1 \text{ lt}$$

olarak hesaplanır.

Agrega kütlesi ise

$$A = a \times \gamma_a$$

$$\gamma_a = \text{agrega özgül ağırlığı}$$

formülüyle belirlenir.

Karışımındaki kum ve çakıl oranlarının %30-%70 olduğu daha önce belirlenmişti.

Kum için:

$$\gamma_k = 2.60 \text{ gr/cm}^3 \quad (\text{Tablo 3.3 den})$$

$$A_k = 755.1 \times 2.60 \times 0.3 = 590.0 \text{ kg}$$

Çakıl için:

$$\gamma_c = 2.68 \text{ gr/cm}^3 \quad (\text{Tablo 3.3 den})$$

$$A_c = 755.1 \times 2.68 \times 0.7 = 1416.6 \text{ kg}$$

olarak hesaplanır.

Toplam agregâ miktarı:

$$A = A_k + A_c = 590.0 + 1416.6 = 2006.6 \text{ kg}$$

olur.

Bu hesaplar agregânın DYK olduğu düşünülerek yapılmıştır. Bu nedenle agregaların doyma sularının hesaplanıp agregâ miktarlarından düşülmesi gerekmektedir.

Kumun doğal nemi ve su emmesi:

$$DN_k = \%0.9, \quad SE_k = \%1.2 \quad (\text{Tablo 3.3 den})$$

Çakılın doğal suyu ve su emmesi:

$$DN_c = \%0.6, \quad SE_c = \%1.4$$

olarak belirlenmişti.

Bu durumda,

$$DS = A (SE - DN)$$

formülünden, kum için gerekli doyma suyu:

$$DS_k = 590.0 (0.012 - 0.009) = 1.8 \text{ kg}$$

Çakıl için gerekli doyma suyu:

$$DS_c = 1416.6 (0.014 - 0.006) = 11.3 \text{ kg}$$

olarak belirlenir.

Doyma suları agregâ miktarlarından düşülürse:

$$A_k = 590.0 - 1.8 = 588.2 \text{ kg}$$

$$A_c = 1416.6 - 11.3 = 1405.3 \text{ kg}$$

olarak hesaplanır.

Karışıma girecek toplam doyma suyu miktarı:

$$DS = 1.8 + 11.3 = 13.1 \text{ kg}$$

agrega miktarı ise

$$A = 588.2 + 1405.3 = 1993.5 \text{ kg}$$

olarak belirlenir.



EK 2. HIZLANDIRILMIŞ KÜR YÖNTEMİNİN DENENMESİNE İLİŞKİN  
AYRINTILI SONUÇLAR

Öretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar				28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
	Sıcak Su Yöntemi (MPa)		Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi (MPa)			
		Ortalama		Ortalama		Ortalama
B1	8.3 8.7 7.9	8.3	9.7 9.5 10.2	9.8	23.0 22.0 22.5	22.5
B2	6.9 7.1 7.2	7.1	8.6 9.1 9.2	9.0	23.4 21.6 21.0	22.0
B3	6.1 6.1 6.4	6.2	7.9 8.0 7.4	7.8	19.5 19.4 20.8	19.9
B4	4.9 4.9 4.7	4.8	6.3 6.1 6.1	6.2	15.6 15.8 17.0	16.2
B5	4.2 4.2 4.4	4.3	5.3 5.7 5.1	5.4	15.8 15.4 15.7	15.6
B6	15.1 14.3 16.1	15.2	18.4 17.4 17.9	17.9	39.6 38.5 37.9	38.7
B7	15.0 14.7 15.2	15.0	19.4 18.8 17.8	18.7	40.2 41.3 40.2	40.6
B8	13.1 12.6 13.5	13.1	16.1 16.2 16.2	16.2	34.8 37.6 36.2	36.2
B9	12.9 12.6 12.6	12.7	15.0 15.3 16.1	15.5	39.0 34.8 35.1	36.3
B10	12.4 11.7 12.3	12.1	15.8 14.0 14.8	14.9	38.5 37.3 38.5	38.1
B11	9.2 9.7 10.0	9.6	11.4 11.9 11.2	11.5	27.2 27.0 27.7	27.0
B12	9.8 9.1 8.9	9.3	11.2 10.9 11.1	11.1	23.8 28.1 26.1	26.0
B13	7.9 8.7 8.0	8.1	9.6 10.1 9.7	9.8	17.4 21.8 21.2	20.1

## EK 2 (devam)

Oretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar				28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
	Sıcak Su Yöntemi (MPa)		Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi (MPa)			
		Ortalama		Ortalama		Ortalama
B14	8.2 8.3 7.8	8.1	9.0 9.1 9.0	9.0	20.3 19.8 18.5	19.5
B15	12.0 12.5 13.1	12.5	15.5 14.8 14.3	14.9	33.4 35.4 35.1	34.6
B16	10.6 11.9 12.3	11.6	14.3 14.7 13.5	14.2	31.7 29.4 31.7	30.9
B17	8.4 10.8 10.9	10.0	13.1 13.6 13.0	13.3	30.2 28.8 29.7	29.6
B18	9.5 9.7 9.1	9.4	12.1 11.0 11.1	11.7	25.7 26.2 27.6	26.5
B19	10.8 10.7 8.8	10.1	11.5 11.7 11.4	11.5	30.6 23.2 26.7	26.8
B20	9.7 9.8 9.6	9.7	11.8 11.3 11.9	11.7	25.8 27.9 27.7	27.1
B21	9.3 8.9 9.3	9.2	11.7 12.0 11.7	11.8	24.4 25.2 24.8	24.8
B22	8.6 8.6 8.5	8.6	8.2 10.9 9.9	9.7	21.3 21.7 21.5	21.5
B23	19.4 18.6 18.7	18.9	19.2 20.7 20.4	20.1	39.6 37.9 40.5	39.3
B24	17.5 17.7 18.2	17.7	21.0 19.2 20.8	20.3	37.3 39.1 38.8	38.4
B25	15.9 16.4 16.6	16.3	18.2 18.6 17.8	18.2	38.2 39.9 36.2	38.1
B26	15.8 15.2 16.1	15.7	16.8 17.7 17.7	17.4	42.2 35.7 42.4	40.1

## EK 2 (devam)

Üretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar				28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
	Sıcak Su Yöntemi (MPa)		Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi (MPa)			
	Ortalama		Ortalama			
B27	15.4	15.1	17.6	17.4	35.7	36.1
	15.5		17.5		36.5	
	14.5		17.0		36.2	
B28	14.4	14.3	15.7	16.3	36.5	35.1
	14.0		16.5		34.5	
	14.4		16.8		34.2	
B29	13.0	12.9	14.5	14.3	27.8	27.2
	12.9		14.3		25.3	
	12.8		14.2		26.9	
B30	14.0	13.0	16.6	16.5	35.4	35.9
	13.8		15.7		34.8	
	11.3		17.1		37.6	
B31	10.7	10.5	12.8	12.8	26.9	27.8
	10.2		12.8		27.7	
	10.7		12.8		28.9	
B32	8.4	8.9	11.4	10.4	24.6	23.3
	9.4		9.3		22.6	
	8.8		10.6		22.7	
B33	12.6	12.6	14.9	15.2	32.3	31.7
	13.0		15.4		31.1	
	12.1		15.4		31.7	
B34	9.7	9.8	11.2	11.3	24.6	25.3
	10.1		10.9		26.4	
	9.6		11.8		25.0	
B35	22.8	22.1	22.7	24.3	49.8	50.0
	22.3		24.5		49.2	
	21.2		25.6		50.9	
B36	20.1	21.1	21.2	23.0	45.3	44.1
	21.2		23.9		44.1	
	21.9		23.8		43.0	
B37	17.3	16.8	17.7	18.6	38.5	38.9
	17.7		19.4		37.4	
	15.4		18.7		40.7	
B38	20.0	20.3	21.5	22.5	48.1	47.9
	20.2		23.2		49.2	
	20.8		22.9		46.4	
B39	17.3	16.9	18.9	19.3	40.7	42.4
	16.8		19.8		43.6	
	16.5		19.2		43.0	

## EK 2 (devam)

Üretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar				28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
	Sıcak Su Yöntemi (MPa)		Değiştirilmiş Sıcak Su Yöntemi (MPa)			
		Ortalama		Ortalama		Ortalama
B40	19.4 19.6 19.2	19.4	21.8 22.9 21.2	21.9	41.3 45.3 41.3	42.6
B41	17.7 18.4 18.2	18.1	19.4 21.7 20.6	20.6	42.4 41.9 44.7	43.0
B42	18.6 17.6 18.1	18.1	18.7 20.5 21.2	20.1	43.6 42.4 45.8	44.0
B43	17.0 16.5 16.4	16.6	19.2 19.1 19.5	19.3	39.6 41.3 39.6	40.2
B44	14.5 14.3 15.1	14.6	17.1 16.8 16.7	16.9	39.6 39.0 38.5	39.1
B45	21.7 22.4 22.7	22.3	23.7 21.2 22.8	22.6	41.9 37.6 37.6	39.0
B46	20.5 22.5 19.2	20.7	19.9 22.4 23.9	22.1	45.8 45.3 45.3	45.5
B47	21.0 21.6 20.9	21.2	23.2 24.2 22.1	23.1	38.5 39.9 40.2	39.5
B48	18.6 19.2 19.5	19.2	19.6 20.9 21.2	20.6	41.3 36.5 40.5	39.4
B49	15.8 16.8 16.3	16.3	17.2 17.7 18.0	17.6	31.4 40.7 39.9	37.3

EK 3. YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARLA İLGİLİ DENEYLERE İLİŞKİN AYRINTILI SONUÇLAR

Üretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar (MPa)		28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
		Ortalama		Ortalama
D1	39.0 36.2 37.6	37.6	46.4 53.2 49.8	49.8
D2	47.0 45.8 44.7	45.8	66.8 73.6 66.8	69.0
D3	34.0 32.8 34.0	33.6	49.2 48.1 51.5	49.6
D4	33.4 28.3 27.2	29.6	48.1 54.9 51.5	51.5
D5	27.7 24.9 27.2	26.6	40.7 41.9 41.9	41.5
D6	28.3 26.9 24.7	26.7	44.4 39.0 43.6	42.3
D7	49.2 48.1 45.3	47.5	66.8 67.9 70.2	68.3
D8	35.7 35.7 36.8	36.0	49.5 52.1 49.0	50.2
D9	40.7 34.0 42.7	39.1	53.8 62.0 54.9	56.9
D10	30.0 27.4 31.9	29.8	47.5 50.9 51.2	49.9
D11	30.3 32.5 32.8	31.9	44.7 49.2 47.0	47.0
D12	27.7 24.1 26.0	25.9	51.2 52.3 49.0	50.8
D13	44.7 45.0 41.9	43.9	58.9 65.1 56.0	60.0

## EK 3 (devam)

Üretim No:	Hızlandırılmış Dayanımlar (MPa)		28 Günlük Standart Dayanımlar (MPa)	
		Ortalama		Ortalama
D14	46.1 45.3 47.8	46.4	66.8 63.4 61.7	63.9
D15	40.2 40.5 41.9	40.8	56.9 59.4 52.3	56.2
D16	41.3 41.6 41.9	41.6	57.2 59.4 56.3	57.6
D17	40.2 40.7 40.5	40.5	59.4 59.4 55.2	58.0
D18	37.3 39.1 39.9	38.8	57.4 54.3 55.5	55.7
D19	32.8 31.7 34.2	32.9	52.1 50.9 51.5	51.5
D20	48.1 48.1 48.1	48.1	62.2 57.7 65.1	61.7
D21	48.4 50.1 48.7	49.0	66.2 60.0 66.8	64.3
D22	47.5 45.8 47.0	46.8	64.5 64.0 62.8	63.8
D23	37.6 42.2 46.1	42.0	62.2 61.1 56.0	59.8
D24	43.6 44.7 44.4	43.6	57.4 53.8 53.8	55.0
D25	35.1 37.6 36.5	36.4	57.7 57.7 59.7	58.4

## Ek 4. VARYANS ANALİZİ HESABI

Bireyleri rastgele farklılık gösteren ve bu nedenle normal bir dağılım oluşturan N bireyli bir toplum düşünelim. Bu toplumu çeşitli etmenlere göre analiz ederken, toplum her birisi n bireye sahip k gruba ayrılmış olsun.

	GRUPLAR						
	1	2	....	i		....	k
	$x_{11}$	$x_{21} \dots$	$x_{i1} \dots$	$x_{k1}$			
	$x_{12}$	$x_{22} \dots$	$x_{i2} \dots$	$x_{k2}$			
	.	.	.	.			
	.	.	.	.			
	.	.	.	.			
	$x_{1n}$	$x_{2n} \dots$	$x_{in} \dots$	$x_{kn}$			
Toplamlar	$t_1$	$t_2$	....	$t_i$	....	$t_k$	T
Ortalamalar	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	....	$\bar{x}_i$	....	$\bar{x}_k$	$\bar{X}$
Veri Sayısı	$n_1$	$n_2$	....	$n_i$	....	$n_k$	N

Tabloda,  $t$  : her gruptaki değerlerin toplamı

$n$  : her gruptaki sonuç sayısı

$\bar{x}$  : her gruptaki değerlerin ortalaması

T : tüm ölçüm değerlerinin toplamı

$\bar{X}$  : ölçümlerin tümünün ortalaması

Herhangi bir birey için

$$x_{ij} - \bar{X} = (x_{ij} - \bar{x}_i) + (\bar{x}_i - \bar{X})$$

denklemini ve bu denklemin karesi alınarak  $ij$  ler üzerinden toplanması sonucu

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{x}_i - \bar{X})^2$$



denklemini yazılabilir. Bu denklem, varyans analizi denklemi olarak adlandırılır.

$$a) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X})^2 \text{ her değerin genel ortalamadan sapmasını}$$

nı yansıtır. "Genel kareler toplamı" adını alır. Serbestlik derecesi  $N-1$  dir.

$$b) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{x}_i - \bar{X})^2 \text{ gruplara ait ortalamalar ile genel orta-}$$

talama arasındaki sapmaları yansıtır. "Gruplar arası kareler toplamı" adını alır.

$$\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (\bar{x}_i - \bar{X})^2}{k-1} = SA^2$$

"gruplar arası ortalama kare"dir.

$$c) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \text{ her deęerin, içinde bulunduğu grubun}$$

ortalamadan sapmasını yansıtır. "Gruplar içi kareler toplamı" adını alır. Serbestlik derecesi  $k(n-1)$  dir.

$$\frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{N-k} = SR^2$$

"artık ortalama kare" veya "artık varyans"tır.

$SR^2$ , ölçülen değerlerin dağılımındaki varyansın ölçüsüdür.

## Ek 5. GÜVEN ARALIKLARININ EĞRİSEL OLARAK HESABI

28 Günlük dayanımın güven aralığı daha hassas bir yaklaşımla aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$y = ax + b \pm w \quad (4.5)$$

$$w = S_e t_{(\alpha/2, n-2)} \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x^* - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\text{Ek 5.1})$$

$S_e$ : standart hata

$t$ : student dağılımında  $\alpha/2$  ye  $n-2$  serbestlik derecesinde karşılık gelen değer

$n$ : örnek sayısı

$\bar{x}$ : hızlandırılmış dayanımların ortalaması

$x^*$ : seçilen bir hızlandırılmış dayanım değeri

$x_i$ : hızlandırılmış dayanım değerlerinin her biri

Sıcak su yöntemi için formül (4.4)'

$$S_e = 3.15 \text{ MPa}$$

olarak belirlenmişti.

$$t_{(0.05, 47)} = 1.679 \quad (\text{Kaynak 68'den})$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 1107.98$$

$$\bar{x} = 13.6 \text{ MPa}$$

%90 Güven aralığı:

$$w = \pm 3.15 \times 1.679 \sqrt{1 + \frac{1}{49} + \frac{(x_1^* - 13.6)^2}{1107.98}}$$

olarak belirlenmektedir.

Değiştirilmiş sıcak su yöntemi için ise formül (4.4)'den

$$S_e = 2.40 \text{ MPa}$$

olarak belirlenmişti.

$$t_{(0.05, 47)} = 1.679 \quad (\text{Kaynak 68'den})$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 1154.35$$

$$\bar{x} = 15.6 \text{ MPa}$$

%90 Güven aralığı ise formül (Ek 5.1 den)

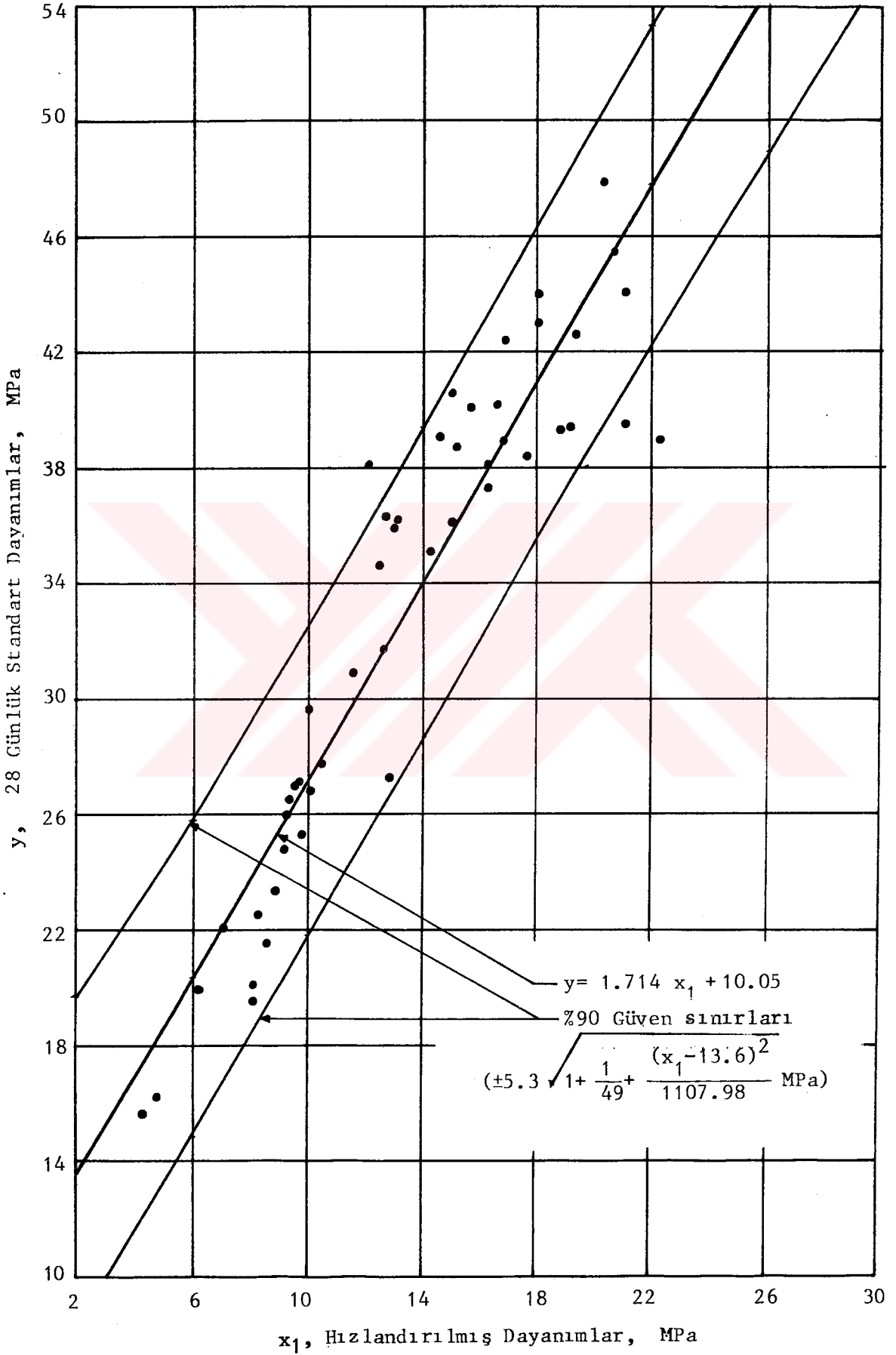
$$w = \pm 2.4 \times 1.679 \times \sqrt{1 + \frac{1}{49} + \frac{(x_2^* - 15.6)^2}{1154.35}}$$

olarak hesaplanmaktadır.

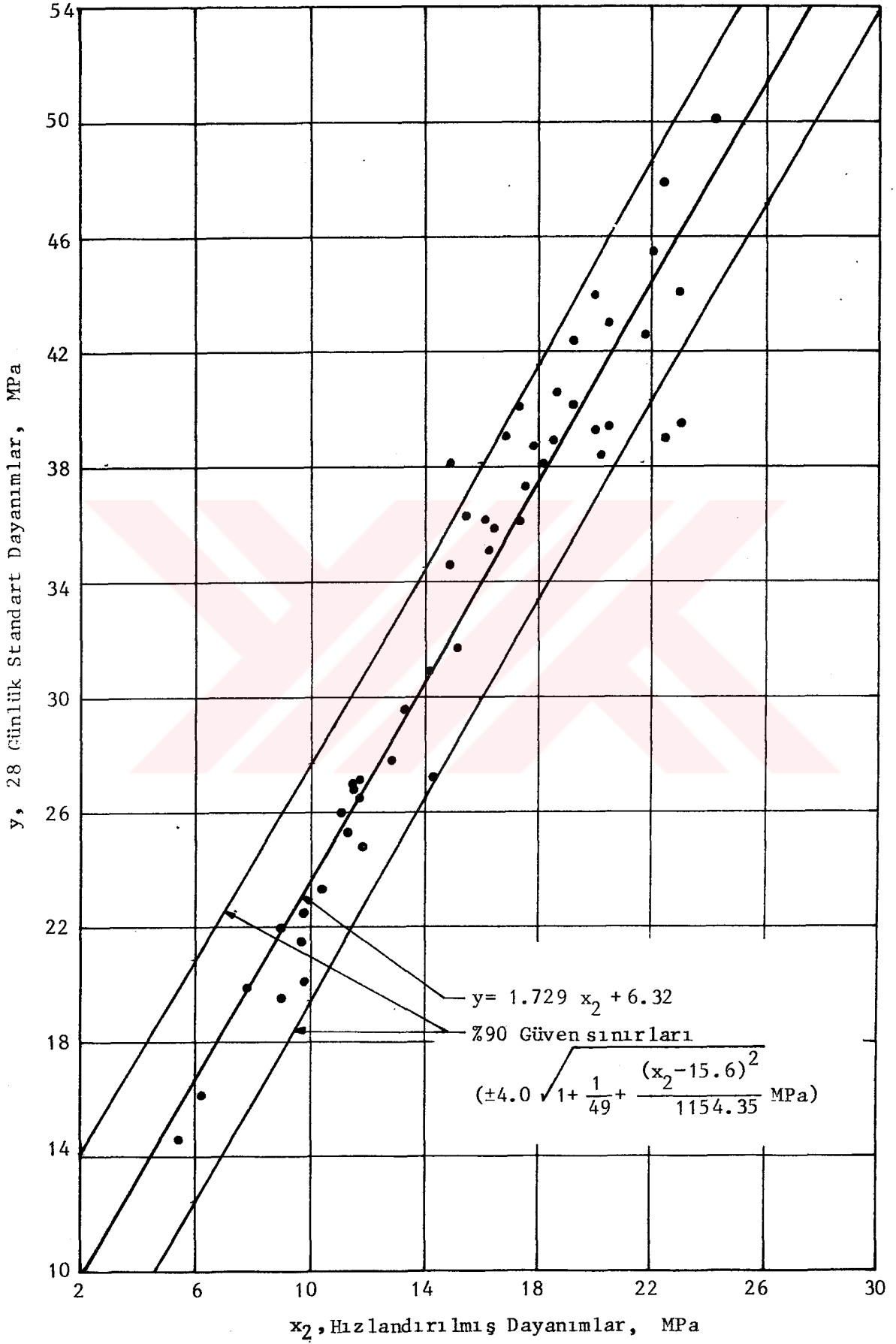
Bu değerler sıcak su ve değiştirilmiş sıcak su yöntemleri için  $x^* = 2$  MPa'dan başlayarak 4'er MPa aralıkla 30 MPa'ya kadar hesaplanmış ve aşağıda verilmiştir.

$x^*$ (MPa)	2	6	10	14	18	22	26	30
Sıcak su Y.	5.65	5.47	5.37	5.34	5.39	5.50	5.70	5.92
D.S.S.Y	4.38	4.23	4.12	4.07	4.08	4.14	4.25	4.39

Hesaplanan bu güven aralıkları sıcak su yöntemi için Şekil Ek 5.1 de, değiştirilmiş sıcak su yöntemi için Şekil Ek 5.2 de verilmiştir.



Şekil Ek 5.1: Sıcak Su Yönteminde Eğrisel Güven Aralıkları



Şekil Ek 5.2: Değiştirilmiş Sıcak Su Yönteminde Eğrisel Güven Aralıkları

## ÖZGEÇMİŞ

Şirin KURBETCİ, 1963 yılında Trabzon'da doğdu. İlkokul, orta okul ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1979 yılında girdiği K.T.Ü. İnşaat ve Mimarlık Fakültesi İnşaat bölümünden 1983 yılında mezun oldu. 1983-1985 yılları arasında KÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. 1985 yılında aynı Anabilim Dalı'nda doktora çalışmasına başladı. Aynı yıl KÜ Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaya başladı.

Mayıs 1991'de İstanbul'da yapılan 2. Ulusal Beton Kongresi kapsamındaki "Yüksek Dayanımlı Beton" yarışmasında 6. olarak teşvik ödülü alan KURBETCİ İngilizce bilmektedir.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ