

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BETONUN GEVREKLİĞİNİN ÇİMENTO HAMURUNUN  
BOŞLUK YAPISINA DUYARLILIĞI**

142940

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**İnş.Müh. Mehmet Serkan YATAĞAN**  
**(501021071)**

142940

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16 Ocak 2003**  
**Tezin Savunulduğu Tarih: 23 Ocak 2003**

**Tezin Danışmanı :**  
**Diğer Jüri Üyeleri**

**Dr. Osman Nuri Oktar**  
**Prof.Dr. Mehmet Ali Taşdemir**  
**Prof.Dr. Turan Özturan (B.Ü.)**

*Osman Nuri Oktar*  
*Mehmet Ali Taşdemir*  
*Turan Özturan*

**OCAK 2003**

## **ÖNSÖZ**

Özellikle 1999 Marmara depreminden sonra yapı malzemeleri seçimin önemi anlaşılmıştır. Artık beton oluştururken daha dikkatli davranılmaya başlandı. Beton kompozit bir malzeme olduğu için onu oluşturan malzemelerin özellikleri betonun özelliklerini belirlemede önemli bir yer tutmaktadır. Bu sebepten dayanımı yüksek beton elde etmek için betonu oluşturan malzemeleri dikkatli bir şekilde seçmeli ve beton bileşim hesaplarında dikkatli davranmalıyız.

Betonun,deprem gibi dinamik etkiler altındaki performansını belirleyen en önemli özellikleri,dayanımı ve gevrekliğidir. Bu çalışmada betondaki agrega karışımının granülometrisinin ve sertleşmiş çimento hamuru fazındaki boşluk yapısının gevreklikle ilişkisi araştırılmış; gevrekliği belirleyen büyüklüklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık dereceleri belirlenmiş; bu büyüklükler arasındaki bağıntılar bulunmuş; ayrıca bu bağıntıların korrelasyon katsayılarını belirleyen etkenler araştırılmıştır.

Bu tezi hazırlamamda bana destek olan hocam Dr.Osman Nuri Oktar'a ve katkılarından dolayı Mehmet Ali Taşdemir hocaya, yardımlarından dolayı da Araştırma Görevlileri Özkan Şengül, Hakan Atahan ve Anıl Doğan ile teknisyen Murat Meydan'a teşekkürlerimi sunarım.

**Ocak, 2003**

**Mehmet Serkan Yatağan**

## İÇİNDEKİLER

<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>ix</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>x</b>
<b>1.GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Betonun İç Yapısı</b>	<b>4</b>
1.1.1 Çimento Hamurunun İç Yapısı	4
1.1.2 Agrega-Çimento Ara Yüzeyinin İç Yapısı	6
1.1.3 Agrega-Çimento Hamuru Bağı	7
<b>1.2 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Boşluk Yapısı</b>	<b>8</b>
1.2.1 Sertleşmiş Çimento Hamurunda Suyun Durumu	10
1.2.2 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Hacimsel Bileşimi	12
1.2.3 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Özellikleri	14
<b>1.3 Betonun Yarı Gevrek Davranışı</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi</b>	<b>16</b>
1.4.1 Su/Çimento Oranının Yüksek Mukavemetli Betona Etkisi	18
1.4.2 Su/Çimento Oranının Rolü	27
1.4.3 Abrams Kuralı	29
1.4.4 Su/Çimento Oranındaki Değişikliklerin Diğer Sonuçları	31
<b>1.5 Beton Özelliklerinin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı</b>	<b>32</b>
1.5.1 Betonun Çimento Hamuru Yapısına Duyarlı ve Duyarsız Özellikleri	32
1.5.2 Taze Betonun Yapısı	32
1.5.3 Taze Betonun Çimento hamuru yapısına Duyarlı ve Duyarsız Özellikleri-Duyarlılık Katsayısı	33
1.5.4 Sertleşmiş Betonun Yapısı	34
1.5.5 Duyarlılık Katsayısı	35
1.5.6 Çimento Hamuru Yapısına Duyarlılığın Birim Ağırlığa Kıyasla Saptanması	36
1.5.7 Özelliklerin Çimento Hamuru Yapısına 1.Tip Duyarlılık Derecesi	38
1.5.8 Özelliklerin Çimento Hamuru Yapısına 2.Tip Duyarlılık Derecesi	39
<b>1.6 Beton Özellikleri Arasındaki Korelasyonları Belirleyen Etkenler</b>	<b>40</b>
1.6.1 Duyarlılık Yakınlığı Katsayıları	40
1.6.2 Bileşim Etkenlerinden Etkilenme Yakınlığı Katsayıları	40

<b>2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>43</b>
<b>2.1 Kullanılan Malzemeler</b>	<b>43</b>
2.1.1 Çimento	43
2.1.2 Agregası	43
2.1.3 Su	44
<b>2.2 Agregası Karışım Oranları</b>	<b>44</b>
<b>2.3 Beton Karışımları</b>	<b>45</b>
2.3.1 Yapılan Varsayımlar	45
2.3.2 Beton Bileşim Hesabı	46
2.3.3 Beton Üretimi	46
2.3.4 Üretilen Numuneler	46
<b>2.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri</b>	<b>47</b>
<b>3. DENEY SONUÇLARI</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Taze Beton Özellikleri</b>	<b>50</b>
<b>3.2 Yarma Deneyleri</b>	<b>50</b>
<b>3.3 Elastisite Modülleri</b>	<b>51</b>
<b>3.4 Gevreklik İndisleri</b>	<b>51</b>
<b>3.5 Basınç Dayanımları</b>	<b>52</b>
<b>3.6 Betonların Birim Ağırlıkları</b>	<b>52</b>
<b>4.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ</b>	<b>53</b>
<b>4.1 Birim Ağırlıklar</b>	<b>53</b>
<b>4.2 Yarma Dayanımları</b>	<b>53</b>
<b>4.3 Gevreklik İndisleri</b>	<b>54</b>
<b>4.4 Basınç Dayanımları</b>	<b>55</b>
<b>4.5 Elastisite Modülleri</b>	<b>56</b>
<b>4.6 Gevrekliğin Basınç Dayanımına Göre Değişimi</b>	<b>56</b>
<b>4.7 Basınç Dayanımı/Yarma Dayanımı Oranının Basınç Dayanımına Göre Değişimi</b>	<b>57</b>

<b>4.8 Özelliklerin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı</b>	<b>58</b>
<b>4.9 Çeşitli Yaklaşımlarla Elde Edilen (SD1)i ve (SD2)i'lerin Karşılaştırılması</b>	<b>60</b>
<b>4.10 Özellikleri İfade Etmede Kullanılan Fonksiyonların Karşılaştırılması</b>	<b>61</b>
<b>4.11 Özellikler Arasındaki Korrelasyonları Belirleyen Etkenler</b>	<b>62</b>
4.11.1 Özellikler Arasındaki Bağıntılar ve Korelasyon Katsayıları	62
4.11.2 Çimento Hamuru Yapısına Duyarlılık Bakımından Benzeşimin Özellikler Arasında Korrelasyonlara Etkisi-Duyarlılık Benzeşim Katsayısı	63
4.11.3 (tij)'lerle (rij)'ler Arasındaki Korelasyonlar	64
4.11.4 Bileşim Faktörlerinin Değişiminden Etkilenme Bakımından Benzeşimin Özellikler Arasındaki Korrelasyonların Etkisi	65
<b>5.GENEL SONUÇLAR</b>	<b>68</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>69</b>
<b>EKLER</b>	<b>72</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>76</b>

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

Tablo 1.1 Betonun avantajları ve dezavantajları.....	2
Tablo 2.1 Kullanılan agregaların özgül ağırlıkları.....	43
Tablo 2.2 Kullanılan agregaların elek analizi değerleri .....	44
Tablo 3.1 Disk numunelerde yarma deney sonuçları (MPa) .....	51
Tablo 3.2 Üretilen betonların elastisite modülleri .....	51
Tablo 3.3 Su/çimento değişimine göre gevreklik indisi.....	52
Tablo 3.4 Silindir numuneler üzerinde basınç deneyi sonuçları (MPa) .....	52
Tablo 3.5 Küp numunelerin birim ağırlıkları (kg/cm <sup>3</sup> ) .....	52
Tablo 4.1 Özelliklerin (4.1)'e göre $k_i^*$ , (SD1) <sub>i</sub> , $R(k_i^*)$ , $R(k_o)$ ve (SD2) <sub>i</sub> değerleri ....	58
Tablo 4.2 Özelliklerin (4.2)'ye göre $k_i^*$ , (SD1) <sub>i</sub> , $R(k_i^*)$ , $R(k_o)$ ve (SD2) <sub>i</sub> değerleri .	59
Tablo 4.3 Özelliklerin (4.3)'e göre $k_i^*$ , (SD1) <sub>i</sub> , $R(k_i^*)$ , $R(k_o)$ ve (SD2) <sub>i</sub> değerleri ....	59
Tablo 4.4 Özelliklerin (4.4)'e göre $k_i^*$ , (SD1) <sub>i</sub> , $R(k_i^*)$ , $R(k_o)$ ve (SD2) <sub>i</sub> değerleri.....	60
Tablo 4.5 Özellikleri beton bileşimine bağlayan en yüksek korrelasyon katsayılı bağıntı.....	61
Tablo 4.6 Özellikler arasındaki bağıntılar ve korrelasyon katsayıları .....	62
Tablo 4.7 Dört çeşit fonksiyon ve (SD1) <sub>i</sub> duyarlılık derecesini göz önüne alınarak hesaplanan $t_{ij}$ benzeşim katsayıları.....	63
Tablo 4.8 Dört çeşit fonksiyon ve (SD) <sub>i</sub> duyarlılık derecesi göz önüne alınarak hesaplanan $t_{ij}$ benzeşim katsayıları.....	63
Tablo 4.9 (SD1) <sub>i</sub> 'lerden bulunan $t_{ij}$ 'lerle rij'ler arasındaki lineer bağıntılar ve korrelasyon katsayıları .....	64
Tablo 4.10 (SD) <sub>i</sub> 'lerden bulunan $t_{ij}$ 'lerle rij'ler arasındaki lineer bağıntılar ve korrelasyon katsayıları .....	64
Tablo 4.11 (1.33) bağıntıları ve korrelasyon katsayıları .....	65
Tablo 4.12 Özellik çiftlerinin T(A) <sub>ij</sub> , T(B) <sub>ij</sub> ve T(C) <sub>ij</sub> değerleri .....	66
Tablo 4.13 T(A) <sub>ij</sub> -rij, T(B) <sub>ij</sub> -rij, T(C) <sub>ij</sub> -rij bağıntıları ve korrelasyon katsayıları.....	66
Tablo A.1 A16-B16 granülometri eğrisi için beton bileşimleri.....	73
Tablo A.2 B16 granülometri eğrisi için beton bileşimleri.....	74
Tablo A.3 B16-C16 granülometri eğrileri için beton bileşimleri .....	75

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 1.1	Agrega ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyi etkileşimlerinin şematik gösterimi .....	9
Şekil 1.2	Betondaki çatlak gelişimi ve şematik gösterimi .....	10
Şekil 1.3	Değişik granülömetrilerin aynı su/çimento oranlarında histerisis eğrileri ..	15
Şekil 1.4	Değişik tipte agreganın değişik su/çimento oranına göre 7 günlük dayanımları .....	18
Şekil 1.5	Su/çimento oranının bir fonksiyonu olarak değişik yaşlardaki betonun basınç dayanımları .....	19
Şekil 1.6	Boşlukların kümülatif hacimleri belirli boşluk çaplarından su/çimento oranı 0,45 olduğu ve sıcaklığın 20 <sup>0</sup> C olduğu zaman büyük olması.....	20
Şekil 1.7	Dayanım ve su/çimento oranının ilişkisi(kompaksiyon = sıkıştırma,kuru kıvamdan akıcı kıvama doğru artış olunca beton dayanımı azalmaktadır.) .....	21
Şekil 1.8	7 günlük dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	22
Şekil 1.9	Şekil 1.8'teki datalardan su/çimento oranına karşı dayanımının grafiği ....	23
Şekil 1.10	Temiz çimento hamurunun hesaplanmış dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki (Maksimum hidratasyon olduğu varsayılırsa).....	24
Şekil 1.11	Rölatif dayanımının logaritmik yüzdesi ile su/çimento oranındaki ilişki .....	25
Şekil 1.12	Çatlamadaki basınç kuvveti ile eğilme arasındaki ilişki .....	26
Şekil 1.13	Basınç dayanımı ile değişik agrega ile yapılmış (w/c = 0,50) betonun yaşı arasındaki ilişki .....	28
Şekil 1.14	Çimento hamurunun dayanımı ile jelin yüzey alanı $V_m$ 'nin $w_o$ karıştırma suyunun hacmi oranının ilişkisi .....	29
Şekil 1.15	$P_{fi}$ taze beton özellikleri ile $n_i.w + a$ arasındaki ilişki .....	33
Şekil 1.16	$P_{hi}$ sertleşmiş beton özellikleri ile $n_i^*(w - 1,06.a.c) + a$ arasındaki ilişki ..	35
Şekil 1.17	$\Delta$ birim ağırlık ile $(1-1,06.a.c/w).w + a$ arasındaki ilişki .....	37
Şekil 1.18	$\Delta$ birim ağırlık ile $ko.w + a$ arasındaki ilişki .....	37
Şekil 1.19	$\Phi$ sertleşmiş özellikleri ile $ki^*.w + a$ arasındaki ilişki .....	38
Şekil 2.1	Granülometri eğrilerinin topluca gösterimi .....	45
Şekil 2.2	Tek eksenli basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....	48
Şekil 2.3	Betonun tekrarlı yükleme halinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi .....	49
Şekil 4.1	Birim ağırlık ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	53
Şekil 4.2	Yarma dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki .....	54
Şekil 4.3	Gevreklik indisi ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.4	Basınç dayanımları ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	55
Şekil 4.5	Elastisite modülü ile su/çimento oranı arasındaki ilişki.....	56
Şekil 4.6	Gevrekliğin basınç dayanımına göre değişimi .....	57
Şekil 4.7	Basınç dayanımları/yarma dayanımlarının oranının basınç dayanımlarına göre değişimi.....	57

## SEMBOL LİSTESİ

$w_g$	:Jel suyunun ağırlığı (gram)
$V_m$	:Jel suyu için katsayı
$w_n$	:Buharlaşmayan suyun ağırlığı (gram)
$k$	:Katsayı ( $\approx 0.25$ )
$c$	:Belirlenen hacimdeki çimento ağırlığı (gram)
$w_c$	:Kapiler suyun ağırlığı (gram)
$V_c$	:Çimentonun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )
$V_d$	:Kapiler ve jel suyunun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )
$V_n$	:Buharlaşmayan suyun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )
$w_0$	:Orijinal karma suyunun ağırlığı (gram)
$V_n$	:Çimento hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )
$c_h$	:Hidrate olmuş çimentonun ağırlığı (gram)
$w_n^0$	:Buharlaşmayan suyun toplam hidrate hamurdaki ağırlığı (gram)
$w$	:Suyun ağırlığı (gram)
$a$	:Beton içindeki hava miktarı (%)
$ko$	:Birim ağırlık için en büyük korrelasyon katsayısı
$ki^*$	:Sertleşmiş beton özellikleri için en büyük korrelasyon katsayısı
$n_i^+$	:Duyarlılık katsayısı
(SD1) $i$	:1.tip duyarlılık derecesi
(SD2) $i$	:2.tip duyarlılık derecesi
$t_{ij}$	:Benzeşim katsayısı
$m$	:Granülometri incelik modülü
$E$	:Elastisite modülü
$\Delta$	:Birim ağırlık ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ )
$T_s$	:Yarma dayanımı (MPa)
$B$	:Gevreklik indisi
$f_{cs}$	:Silindir basınç dayanımı (MPa)

## BETONUN GEVREKLİĞİNİN ÇİMENTO HAMURUNUN BOŞLUK YAPISINA DUYARLILIĞI

### ÖZET

Beton ve betonarme yapıların deprem gibi dinamik etkiler karşısında performansını belirleyen en önemli etkenlerden biri, aslında “yarı-gevrek” bir malzeme olan betonun bu etkiler altında ne ölçüde gevrek davranış gösterdiğidir. Betonun gevrekliğini doğrudan doğruya dinamik deneylerle incelemek mümkün olduğu gibi, statik deneyler ile de gevrekliği sayısal olarak belirten büyüklükler elde etmek kabildir. Bu çalışmada bu ikinci yol izlenmiş, betonun gevrekliği basınç dayanımı/yarma dayanımı oranı ve gevreklik indisiyle ifade edilmiştir.

Çalışmada gevrekliğin betondaki agrega karışımının granülometriyle ve sertleşmiş çimento hamuru fazındaki boşluk yapısıyla ilgisi araştırılmış; gevrekliği belirleyen büyüklüklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık dereceleri belirlenmiş; bu büyüklükler arasındaki bağıntılar bulunmuş; ayrıca bu bağıntıların korrelasyon katsayılarını belirleyen etkenler araştırılmıştır.

Üretilen betonlarda agreganın en büyük tane boyutu 16 mm alınmış, granülometri uygulamada müsaade edilen sınırlar içinde tutulmuş, çimento dozajı  $350 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit tutulmuş, su/çimento oranı 0,50 ile 0,70 arasında değişmiştir. Kullanılan agrega normal beton agregası, çimento PÇ 32,5 çimentosudur.

Araştırmanın sınırları içinde başlıca şu sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Su/çimento oranının artmasıyla birim ağırlık, yarma ve basınç dayanımları, gevreklik indisi ve elastisite modülü azalmıştır.
- 2) Agreganın granülometrik bileşimi birim ağırlığı ve gevreklik indisini pratik olarak etkilememiştir. Buna karşı yarma ve basınç dayanımları ile elastisite modülü granülometrinin B16-C16 arasında olması halinde diğerlerinden bir miktar daha düşük değerler almaktadır. Bu durumu B16-C16 granülometrisi halinde hava boşluğunun biraz daha fazla olmasına bağlamak yerinde olacaktır.
- 3) Basınç dayanımı arttıkça gevreklik indisi ve basınç dayanımı/yarma dayanımı oranı yükselmiştir. Bu durum dayanım arttıkça betonun daha gevrek bir hale geldiğini göstermiştir.
- 4) Özellikler arasındaki korelasyonların güçlü olmasında, çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkların birbirine yakın olmasının en önemli husus olduğu anlaşılmıştır.

## **SENSITIVITY OF BRITTLINESS OF CONCRETE TO THE PORE STRUCTURE OF THE CEMENT PASTE**

### **SUMMARY**

One of the essential factors which affects the performance of the concrete and reinforced concrete buildings under earthquake loads is the degree of brittleness shown by the concrete, essentially a quasibrittle material, against these effects. It is possible to investigate the brittleness of the concrete directly by dynamic experiments, as well as the static experiments which make it possible to get some numerical values for brittleness. In this work, the second way is chosen and the brittleness of the concrete is expressed as the ratio between the compressive strength and the tension strength of the concrete and the brittleness index.

In this work, the relationship between the brittleness and the grading of the aggregate mixture and the pore structure of the cement paste is investigated; the degree of sensitivity of the values determining the brittleness to the pore structure of the cement paste is also determined; then the relations between these values are found, and the factors determining the correlation constants of these relations are investigated.

The maximum size of aggregate used in concrete is 16 mm. The grading is held within the permitted limits. The cement content is constant as  $350 \text{ kg/m}^3$ , whereas water/cement ratio changes between 0,50 and 0,70. Aggregate is normal concrete aggregate and the cement is Portland Cement 32,5.

These results are obtained from the investigation:

- 1) While the water/cement ratio increases, the unit weight, the tensile strength, the compressive strength, the brittleness index and the modulus of the elasticity decreases.
- 2) The grading of the aggregate does not effect the unit weight and the brittleness index practically. On the other hand, the tensile strength and the compressive strengths and the modulus of the elasticity have the lowest values compared to the others when the grading is between B16-C16. This situation is probably due to increased air content.
- 3) While the compressive strength increases, the brittleness index and the ratio between the compressive strength and the tensile strength increases. It is said that while the strength increases, the concrete becomes more brittle.
- 4) The correlations between properties are strong because the sensitivities of these properties to the pore structure of the cement paste are close.

## 1.GİRİŞ

Beton,modern toplumun temelini tam anlamıyla oluşturan bir malzemedir. Hemen hemen,günlük yaşantımızın her türlü durumu direkt veya indirekt olarak betona bağlıdır.

Üzerinde araba sürdüğümüz yollar ve köprülerden,içinde yaşadığımız,çalıştığımız oyun oynadığımız her yer beton yapılardır. İhtiyaçlarımızın taşındığı tırlar betondan otoyollar üzerinde gitmekte,trenler beton çaprazlar tarafından desteklenen raylar üzerinde gitmekte,gemilerin limanda halatla bağlandığı iskeleler ve onları koruyan beton dalgakıranlar,uçakların inip kalktıkları beton pistler,betonu yaşamımız için vazgeçilmez olduğunu gösteren örneklerdir [1].

İçme ve tarım için gerekli su,büyük beton barajlarda tutulmakta ve beton kanallar ve borular sistemiyle dağıtılmaktadır. Ayrıca tutulan su,elektrik enerjisini üretmekte de kullanılmaktadır. Alternatif olarak beton enerji santrallerinde yanan kömürden elektrik enerjisi elde edilmekte veya büyük güçlendirilmiş beton basınç kanalları yardımıyla atom enerjisinden yararlanarak da elektrik enerjisi elde edebiliriz [1].

Betonu günlük aktivitelerimizde kullanıyoruz ve teknolojinin çok büyük etkileriyle betonu hayatımıza yerleştiriyoruz. Ancak gerçek olarak modern yaşamımızın nerdeyse tüm başarıları betona dayanmaktadır. Bu görüşü eski çağlarda Romalılar yaşamlarına adapte ederek başarıları ulaşılarak modern betonun temelini kurmuşlardır.İngilizce betonun karşılığı olan “concrete” Latince olan birlikte büyüme anlamına gelen “concretus” kelimesinden gelmektedir.

Kısacası geçmişten günümüze dek beton insanlığın ayrılmaz parçası olmuştur. Bu sebepten insanlık bu mucizevi yapı elemanını sürekli araştırarak daha başka ne yapabilirim sorusuna cevap aramaktadır. Beton kompozit bir malzeme olduğu için

içindeki malzemelerin özellikleri de dikkate alınarak betonu daha iyi tanıyıp,nasıl geliştirebiliriz diye araştırmalar sürekli yapılmaktadır.

Yapı malzemesi olarak betonun avantajları ve dezavantajları Tablo 1.1'de gösterilmiştir [2].

Tablo 1.1 Betonun avantajları ve dezavantajları

Avantajları Kolay şekillendirme,ekonomik,dayanıklı,yangına karşı dayanıklı, enerji etkili,yapımı kolay,aestetik özelliklere sahip
Dezavantajları Düşük gerilmeli malzeme,sünekliği düşük,hacim sabitliği yok, Ağırlık oranına göre düşük mukavemet

Betonun istenen şekle ve konfigürasyona girme özelliği,eksikliklerini tamamlayan önemli karakteristiğidir. Limanlarda ve barajlarda bulunan yüksek kemerler,kolonlar,hiperbolik kabuklar veya büyük monolitik bölümler içine rahatça dökülebilirler [3].

İnşaatlarda lokal maddeler büyük miktarlarda kullanılarak fiyat indirilmesi sağlanır. Bunun yanında,yerinde yapılan beton sayesinde kesin uygulamalar için yeni özellikler kazandırılabilir. Deneyimli veya yarı deneyimli fazla işçilerin çalışabileceği ve buna bağlı olarak karmaşık olmayan araçların gerekmesinden dolayı beton ekonomiktir. Diğer taraftan,yerinde üretim karışımı yapılması halinde betonun kalitesi dikkatlice kontrol edilmelidir. Çevre koşulları etkili olduğundan iş sırasında betonun prosesini düzgün elde etmek zordur. Kurucu malzemelerin istenmeyen yüksek değişik değerlere sahip olmasından dolayı daha az karakterize olurlar. Deneyimsiz veya yarı deneyimli işçi gücünün anlamı ise iş mahalinde süpervizörün yokluğunda istenmeyen olayların kabul edilip yok edilmesidir. Beton dökümü fabrika kontrollü olarak da yapılır. Hazır döküm yapı elemanları standart,düşük maliyetli yapı sistemleri için Avrupa'da çok yaygındır ve ayrıca Amerika Birleşik Devletlerinde de gelişmeye başlamıştır. Hazır döküm blok çok popüler bir yapı elemanı olmakta ve hazır döküm beton borular ise drenajda,kanalizasyonda ve su destekli projelerde çok sık kullanılmaktadır. Yerinde döküm betonlara oranla hazır

döküm betonlar istenen daha üniform toleranslı bir şekilde üretilir ancak fazla deneyimli iş gücüne ve genellikle çok fazla karmaşık araçlara ihtiyaç vardır. İyi kaliteli beton dayanıklı bir malzemedir ve servis koşullarına uygun dizayn edildiği ve düzgünce yerleştirildiği zaman yıllarca mukavemetini sürdürür.

Çok özel çevre koşulları dışında çelik gibi beton için koruyucu palto gerekmez. Ayrıca yangına dayanıklılığı yönünden mükemmel bir malzemedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalınca ciddi bir şekilde zarar görmesine rağmen yapı bütünlüğünü korur. Uzun süreli devrede yüksek sıcaklığa maruz kalan çelik yapılarda tamir edilemez zararlar oluşur.

Hızlı bir şekilde artan enerji maliyetlerinden dolayı, çok fazla hesap malzemenin enerji maliyetine çıkarılmaktadır. Diğer taraftan, beton enerji maliyetine göre birçok yapı malzemesinden daha ucuzdur. İlk özelliği, beton çelik üretiminden daha az enerjiyle üretilir çünkü çelik yüksek sıcaklık prosesleriyle üretilirken betonun en ufak elemanından çimento pyro proseslerle üretilir. Betonun büyük enerji maliyetini güçlendirilmiş çelik ve çimento karşılar ama enerji tüketimi dengeli çelik yapı elemanından daha fazladır. İkinci özellik olarak beton yapılar betonun termal özelliklerinden dolayı aktive olmak için enerji etkilidir. Beton sıcaklıkla yavaşça etkileşir ve gerekli ısı miktarını yavaşça depolar ve çevreden de gerekli ısı miktarını depolar ve bunu ılık periyotlarda dışarı bırakır. Bu termal hareketsizlik avantajını kullanarak yapıları dizayn etmek mümkündür. Son olarak çok az olmakla renk yapısının kullanılması özelliği olan estetik özelliklere de sahiptir. Bütün bu avantajlar betonu çok yönlü ve kabul edilebilir bir hale sokmaktadır [2].

Ancak beton bazı kesin uygulamalarda kullanımı sınırlanan ve yapıları dizayn ederken izin verilen bir zayıflığa sahiptir. Beton çok düşük gerilme dirençli gevrek malzemedir. Bundan dolayı betona gerilmeye genellikle yükleme yapılmaz (düşük burkulma kuvveti takviyesiz dereceli betonlarda kullanılması hariç ) ve takviyeli demir gerilme direncini taşıması için kullanılır. Dikkatsizce yapılan gerilme yüklemeleri çatlaklara sebep olurlar. Betonun düşük duktilitesinden dolayı metallere oranla beton, basınç gücüne ve sertliğe sahip değildir [2].

Basınçta bile beton diğer oranlara nispeten düşük dirence sahiptir ve yüksek yükleme kapasitesi, betonun yüksek oranlı ağırlığına ihtiyaç duymasına rağmen beton maliyeti düşük olduğundan daha ekonomik olmaktadır. Betonun hacim sabitsizliği bazı

dizaynlar ve inşaatlarda izin verilmektedir. Hacim sabitliği betonun en önemli karakteristik özelliği olup, esas servis yükleri altında hacim sabitliğini koruyan çelikle benzer özellik göstermektedir.

Çevre sıcaklıklarından dolayı oluşan nem kaybından oluşan geri dönülmez rötreyle beton maruz kalır ve ayrıca normal servis koşulları altında uygulanan yük altında bile beton belli bir şekilde sünme yapar. Bu problemlerin varlığıyla birlikte beton hepsine imkan vererek uygun dizaynlar için kendini kompeze edebilir ve bazı maddelerin uygun seçimi ve uygun inşaat yapımı yardımıyla bu problemler kontrol edilebilir. Yüksek sayıda yapılan araştırmalar bu problemleri yok etmek için yapılmaktadır. Betonun yeni tiplerinin (lifli beton, pahalı çimentolu beton, lateks modifeli beton) üretimine önderlik etmektedir. Çok fazla üretim gelecekte artacağı umulmaktadır.

## **1.1 Betonun İç Yapısı**

Betonun iç yapısı ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır [4]. Beton özellikleri, iç yapıyla yakından ilgilidir. Malzemelerin iç yapıları daha iyi anlaşıldıkça beton özelliklerinde büyük gelişmeler sağlanacaktır. İç yapının beton özelliklerine etkisi, betonu oluşturan malzemelerin iç yapıyı nasıl değiştirdikleri, bu malzemeler arasındaki ara yüzeylerin özellikleri anlaşıldıkça istenen şartları sağlayacak malzemeler üretmek daha kolay olacaktır ve böylece çimento esaslı malzemelerin kullanım sahaları genişleyecektir [4].

### **1.1.1 Çimento Hamurunun İç Yapısı**

Çimento iç yapısı, hidratasyon reaksiyonları ve betonun özellikleri bakımından önemli bir yer tutar. Geçmişten günümüze, teknolojinin gelişmesinin yardımıyla çimento iç yapısı sürekli bir biçimde incelenmiştir. Bulunan sonuçların hala günümüzde geçerli olduğu ve yeni bir keşif için uğraşlar devam etmektedir [5].

Çimento iç yapısını ilk incelemede ilk önemli adım Le Chatelier'nin kristalizasyon ve Michealis kolloidal teoremleri ile atılmıştır. Teoriler sonucunda çimento hamurunun fiziksel yapısının kalitatif bir tanımı yapılmıştır [6].

Powers ve arkadaşlarının çalışmalarında çimento hidratasyonu sonucu Labermant benzeri lif yapılarının doğduğunu, bunların kolodial boyutunda olduklarını, son derece büyük bir iç yüzeye sahip oldukları ve teşkil ettikleri sistemin bir jel olduğu, su ile karıştırılmış ve sertleşmeye bırakılmış çimento hamuru içinde hidrasyondan doğan bu jelden başka kalsiyum hidroksit kristalleri, bazı ikinci derecede bileşenler, hidrate olmamış çimento taneleri ve başlangıçta su tarafından işgal edilmiş boşluklar da vardır. Bu dolu hacimlerden arta kalan bu boşluklar sertleşmiş jel tarafından sarılmış münferit boşluklar halindedir. Bunların boyutları kapiler büyüklükte olduğu için adlarına kapiler boşluklar denir. Jel boşluklarına göre daha büyük boyuttadır [5].

Çimentolarda 4 ana bileşen vardır:  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  ve  $C_4AF$ .

Çimento ve suyun birleşmesiyle ortaya çıkan ve hidrasyon adı verilen kimyasal reaksiyon sonucunda bu bileşenler hidrate bileşenlere dönüşürler. Kalsiyum silikatların hidrasyon reaksiyonları sonucunda C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) ve CH (Kalsiyum Silikat) oluşur. Çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran malzeme C-S-H'dır [7].

Çimento hamurunun boşluklu bir iç yapısı vardır [8]. Hidrasyon sonunda oluşan ürünler aralarında çeşitli türde boşluklar oluşur. Bu boşluklar kapiler ve jel boşlukları olarak sınıflandırılabilirler. Kapiler boşluklar, beton taze halde iken su ile dolu olan ancak sertleşmiş betonda hidrasyon sonucunda oluşan ürünlerle dolmamış boşluklardır. Çimento hamurunun kapiler porozitesi karışımın su/çimento oranına ve hidrasyon derecesine bağlıdır. Hidrasyon derecesi arttıkça hidrasyon ürünleri boşlukları doldurur ve kapiler boşluklar azalır. Su/çimento oranı arttıkça hidrasyon ürünlerinin bu boşlukları doldurması zorlaşır. Çok yüksek su/çimento oranlarında çimento tamamen hidrate olsa bile boşlukların tamamen dolması imkansız olur. Jel boşlukları ise hidrasyon ürünleri içinde bulunan, hidrasyonla birlikte sayıları ve toplam hacimleri artan boşluklardır. Jel boşluklarının boyutları kapiler boşluklardan çok daha küçüktür [9].

Bunların yanında büyüklükleri milimetre boyutunda olan hava boşlukları da betonda mevcuttur. Hava boşlukları betonun yetersiz yerleştirilmesinden veya bazı katkıları kullanıp hava sürüklemesinden oluşabilir.

### 1.1.2 Agregat-Çimento Ara Yüzeyinin İç Yapısı

Beton agregat ile çimento hamurundan oluşan iki fazlı bir kompozit malzeme olarak göz önüne alındığında malzeme özellikleri sadece bileşenlerin özelliklerine bağlı değildir.

Heterojen bir malzeme olan betonun dayanımı 3 faktörden etkilenir [10]. Bunlar:

- i. Matrisin dayanımı (çimento hamurunun dayanımı)
- ii. Agreganın dayanımı
- iii. Ara yüzeyin dayanımı

Bu faktörlerden her birinin çeşitli sınıflardaki betonların dayanımlarındaki etkileri farklıdır. Ancak agregat-çimento ara yüzeyi betondaki en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. Çimento hamuru ile agregat arasındaki temas yüzeyi, çimento hamurundan farklılıklar gösterir. Bu ara yüzeyler betonun mekanik davranışında oldukça etkilidir.

İri agreganın hemen yanındaki hidrate olmuş çimento hamurunun iç yapısı agregadan uzaktaki çimento hamurunun iç yapısından farklıdır [8]. Ara yüzey temas bölgesi veya geçiş bölgesi adı verilen bu bölgenin mikro yapısı ile ilgili çeşitli modeller öne sürülmüştür.

Barnes'a göre geçiş bölgesinin iç yapısı şöyledir:

- i. Agregat yüzeyine dik doğrultuda CH filminin birikmesi
- ii. Saç fırçasını andıran uzamış C-S-H tanelerinden oluşan bir film ile örtülmesi
- iii. Agregat yüzeyinde paralel doğrultuda geniş CH kristallerinin birikmesi
- iv. Temas yüzeyinde CH ile dolu hacim formasyonu

Zimbelmann'a göre ise ara yüzeyin mikro yapısı şöyledir [11]:

Çimento su ile karıştırıldıktan birkaç dakika sonra agregat yüzeyinde etrenjit iğneleri görülür. Agregat yüzeyine dik doğrultuda CH kristalleri etrenjit iğnelerini kaplar. CH kristal tabakası kalınlığı 2-3 mikron kadardır. Bu tabakadan sonra büyük hegzagonal biçimli CH kristalleri gelişmeye başlar. Bu panellerin boyutu 10 ile 30 mikron kadardır.

Ara yüzeyde su/çimento oranı porozite daha yüksektir. Hidratasyon ürünlerinden CH daha büyük kristal taneli ve hacim olarak daha fazladır. Bunların sonucu olarak da ara yüzey çimento hamuruna göre daha zayıf ve geçirimlidir. Ara yüzeyin kalınlığı 10 ile 50 mikron arasında değişir.

Temas bölgesi ince olduğu halde betonun önemli bir bölümünü kaplar. Çimento hamuru hacminin % 25 - % 35'ini bu temas yüzeyi oluşturur. Bu sebepten ara yüzeyin sertleşmiş beton özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olması doğaldır.

Ara yüzeyin boşluklu iç yapısının oluşum sebebiyle ilgili çeşitli görüşler vardır. Karıştırma sırasında,agrega taneleri birkaç mikron kalınlığında su filmiyle kaplanırlar. Hidratasyon başladığında hidratasyon ürünleri su tabakasıyla birleşirler,böylece buradaki su/çimento oranı orijinal su/çimento oranından yüksek olur.

Ara yüzeydeki yüksek porozitenin oluşumuyla ilgili olası bir mekanizma da iki faktörün birleşmesiyle ortaya çıkabilir.

Bu faktörler;

- i. Çeper etkisi;çimento taneleri nispeten büyük agrega tanesi yanında boş bir hacimdeki kadar yakın sıkışamazlar.
- ii. Tek taraflı gelişim etkisi;hidratasyon ürünleri sadece çimento tarafından gelir,agrega tarafından gelmez [10].

### **1.1.3 Agrega-Çimento Hamuru Bağı**

Agrega ve çimento hamuru arasındaki bağı 3 farklı mekanizmaya bağlı olduğu kabul edilmektedir [12].

#### **1) Fiziksel Etkileşim**

Yüzeyi çok iyi parlatılmış agregalar için matris ile kimyasal etkileşim yoksa,matris kuvvetli olsa da bağ kuvveti ihmal edilebilir. Agrega matris ara yüzeyi sistemde en zayıf halka haline gelir.

#### **2) Fiziko-kimyasal Etkileşim**

Eğer çimento hamuru matrisi ile kimyasal etkileşime sahip agregalar kullanılıyorsa,çimento hamuru ile agrega arasındaki kuvvetli bir bağ gelişebilir.

### 3) Mekanik Kenetlenme

Bu tip aderans agregâ yüzeyinin pürüzlülüğü ve temas yüzeyindeki kusurlar ile ilgilidir. Boşluklu agregalar veya yüzeyi pürüzlü agregalarda çimento hamuru veya çimentonun hidrasyon ürünleri agregâ yüzeyindeki boşluklara girebilir. Bunlar agregâ ile matrisi birbirlerine bağlayan çoklu kamalar gibi davranırlar Pürüzlülük ne kadar çoksa ve kusurlar ne kadar az ise kenetlenme o kadar büyük olur. Ayrıca çimento taneleri ne kadar inceyse bunlar agregâ yüzeylerine o kadar iyi yerleşeceklerinden mekanik aderans o derece artar.

Agreganın çimento ile bağı, agreganın yüzey özelliklerine bağı olduğu kadar agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleriyle, mineralojik bileşimiyle ve tane yüzeyinin elektrostatik durumuyla da ilgilidir [13].

Tasong [14] incelemelerinde kayaç-çimento hamuru arasındaki bağı dayanımlarını belirledi. Tasong'un sonuçlarına göre tek başına yüzey karakteristikleri bağı dayanımını tahmin etmede yeterli değildir. Agreganın mekanik dayanımı, iç yapı, kimyasal reaksiyonları bağı kuvvetine etki eden faktörlerdir. Betonda rijit bileşen olarak kabul edilen agregâ aslında böyle bir rol oynamaz ve bazen kimyasal özellikleri de beton performansına etki eder.

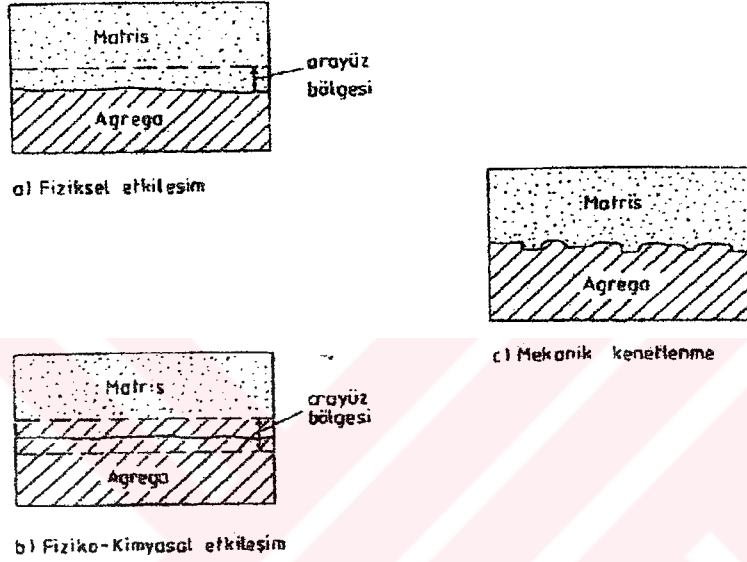
Normal dayanımlı bir betonun kırılma yüzeyleri incelendiğinde çok sayıda yerlerinden çıkmış agregâ tanesi, az sayıda da kırılmış agregâ görülür. Bu durum agregâ-çimento arasındaki bağı zayıf olduğunu gösterir. Sonuç olarak normal ve düşük dayanımlı betonda kırılmış agregâ tanelerinin azlığı agregâ tane dayanımının çok az olduğunu gösterir. Ancak yüksek dayanımlı betonlarda ise çatlaklar agregâ içinden geçer, kırılmış agregâ taneleri daha fazladır [15].

### 1.2 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Boşluk Yapısı

Taze durumda, Portland çimento hamuru akıcı çimento tanelerinden oluşur. Sertleşmiş hamurda, katı reaksiyon ürünleri ve su tarafından doldurulmuş yerler bulunmaktadır. Hidrasyon ürünleri çimento hamuru içinde karakteristik poroziteye sahip yoğun kütleler oluşturur (jel boşlukları). Bu boşluklar çimento jeli olarak adlandırılır çünkü büyük iç yüzey alanına sahip katı partiküllerden mesela kolloidal

jeller karakteristiğine sahip oluşur. Kimyasal yönden bakılırsa çimento jeli esas olarak kalsiyum silikat hidrate (CSH) sahiptir [16].

Çimento hamurunda su tarafından doldurulan boşluklar tamamıyla çimentonun jeli tarafından doldurulamaz. Bu boşluklara kapiler boşluk denir. Böylece sertleşmiş çimento hamuru, çimento jeli, kapiler boşluklar ve reaksiyona girmeyen çimento tanelerinden oluşur.



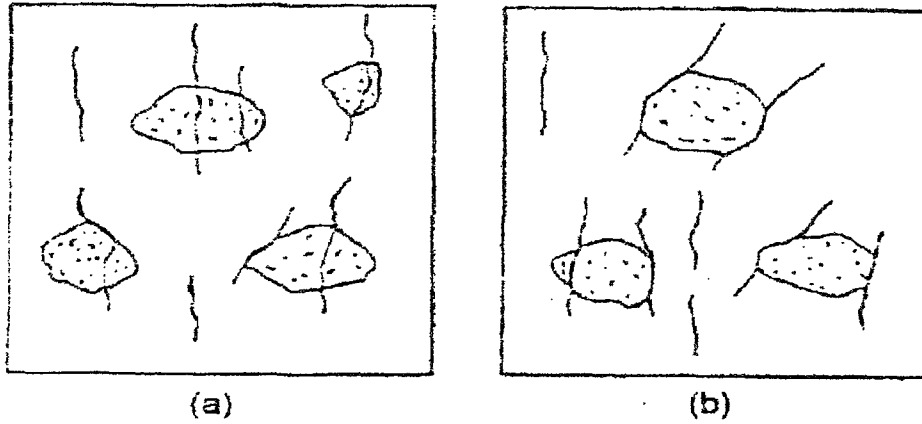
Şekil 1.1 Agregat ile çimento hamuru arasındaki temas yüzeyi etkileşimlerinin şematik gösterimi

Toplam porozite, kapiler boşlukları ve jel boşluklarını içerir. Boşluklar genellikle mikroskopik boyuttadır ve jel boşlukları kapiler boşluklardan ufaktır.

Çimento hamurları arasındaki fiziksel fark, kapiler boşluklardaki farklılıklarından oluşur. Kimyasal bileşim çok önemli değildir çünkü çimento hamuru jelinin fiziksel karakteristikleri, kimyasal bileşim farklılıklarından çok az etkilenir. Çimento hamurunun yapısını bilmek beton özelliklerinin teknik önemini anlamak için önemlidir.

T.C Powers ve arkadaşlarının oluşturduğu modelde, su katı fazlarla kemisorpsiyon sırasında güçlü bir şekilde etkileşime girmesi, sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısı H<sub>2</sub>O-buhar emilmesi deneylerinde sabit olmaz. Değişik sınıftaki suyun arasındaki bağlama enerjisi aşırı miktarda olup, kapiler boşluklar, jel boşlukları ve jel

partikülleri arasındaki boşluklar arasında oluşan farkı yaratmaktadır. Powers modeli sertleşmiş çimento hamurunun fiziksel özelliklerini en iyi açıklayan modeldir.



Şekil 1.2 Betondaki çatlak gelişimi ve şematik gösterimi

a) Yüksek mukavemetli betonda      b) Normal mukavemetli betonda

### 1.2.1 Sertleşmiş Çimento Hamurunda Suyun Durumu

Genelde, hamurdaki su 3 ayrı duruma ayrılır: Kimyasal olarak bağlanmış, fiziksel olarak emilmiş ve serbest durumda.

*Kimyasal olarak bağlanmış su;* çimento jelinin integral parçası haline gelmiş sudur. Bu suyun çimento ile kimyasal olarak reaksiyona girip, suya veya çimentoya benzemeyen yeni bir faz oluşmaktadır. Bu suya buharlaşmayan su denmektedir.

*Fiziksel emilmiş su;* [17],[18],[19] jel partiküllerinin yüzeyinden emilmiş sudur. Emilme, jelin yüzey reaktivitesinin sonucudur. Fiziksel emilen su jel boşluklarını doldurur.

*Serbest su;* doymuş hamurda kalan sudur. Kapiler boşlukları doldurur.

Fiziksel emilen su ve serbest su buharlaşabilen sudur.

#### 1) Buharlaşmayan Su

Hidratasyon suyudur. Miktarı, granüller  $1000^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar ısıtılıp ağırlık kaybı belirlenerek bulunur. Bu ısıtma tutuşturma olarak adlandırılır.

## 2) Toplam Buharlaşan Su

Toplam buharlaşan su,doygun örnekte kapiler ve jel boşluklarında tutulan su miktarıdır. Test granüllerinin bir kısmı bir kavanozda tutulup,yavaşça su ekleyerek doygun hale getirilir. Doygun granüller tekrar hidrate olup,tekrar kurutulur. Bu ikinci hidratasyon sırasında kaybolan su toplam buharlaşan sudur.

## 3) Jel Suyu ve Kapiler Su

Buharlaşan suyun bir kısmı,jel ve kapiler boşlukların bir kısmında tutulmaktadır. Miktarlarını bilmek önemlidir. Buharlaşan suyun miktarındaki değişimlerin incelenmesi,çevresel buhar basıncı ile değişimlerin yapılması sağlanır.

Sonuç olarak fiziksel yapı ve özelliklere göre Portland çimentosu yaklaşık olarak hidratasyon ürünlerini aynı oranlarda,hidratasyon prosesinin herhangi bir devresinde çimentonun kimyasal bileşimine göre oda sıcaklığında üretir. Başka bir deyişle,oda sıcaklığının fiziksel özellikleri Portland çimento hamurunu korur. Bu işlem hamurun kapiler porozitesini belirleyen orijinal su/çimento oranına ve hidratasyonun herhangi bir devresinde oluşan hidratasyon ürünlerinin miktarını belirleyen hidratasyon derecesine bağlıdır. Orijinal su/çimento oranı ve hidratasyon derecesindeki farklılıklar hariç bütün sertleşmiş çimento hamurlarının fiziksel yapı ve özellikleri aynıdır.

Sertleşmiş çimento hamurunun jel suyu miktarını ve kimyasal bağlanmış suyun miktarını  $V_m$  fonksiyonu olarak hesaplamak mümkündür [20].

$$w_g = a \cdot V_m \quad (1.1)$$

$w_g$  : Jel suyunun ağırlığı

$a$  : Katsayı ( $\approx 3.3$ )

$V_m$  : Örnek için katsayı

$$V_m = k \cdot w_n \quad (1.2)$$

$w_n$  : Buharlaşmayan suyun ağırlığı

$k$  : Katsayı ( $\approx 0.25$ )

Bütün ana bileşenlerinin oransal hacimleri herhangi oda sıcaklığında, hamurun orijinal su/çimento oranı ve hamurun ulaştığı hidratasyon derecesinin fonksiyonları olarak Portland çimento hamurunu korur.

Bu görüşler çok önemlidir çünkü sertleşmiş çimento hamurunun hacimsel bileşimin bilmek, kompozit maddeler için geliştirilmiş teorilerin temelini dayanarak sertleşmiş çimento hamurlarının fiziksel özelliklerini ve betonun dayanımını, elastisite modülünü, sünmesini, rötresini, geçirgenliğini ve termal özelliklerini analiz etmek mümkündür.

## 1.2.2 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Hacimsel Bileşimi

### 1. Sertleşmiş çimento hamurunun birim hacmi [20]

$$V_{total} = c \cdot V_c + w_n \cdot V_n + (w_g + w_c) \cdot V_d \quad (1.3)$$

$c$  : Belirlenen hacimdeki çimento ağırlığı (gram)

$w_n$  : Buharlaşmayan suyun ağırlığı (gram)

$w_c$  : Kapiler suyun ağırlığı (gram)

$w_g$  : Jel suyunun ağırlığı (gram)

$V_c$  : Çimentonun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )

$V_d$  : Kapiler ve jel suyunun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )

$V_n$  : Buharlaşmayan suyun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )

Çimento hamurunun toplam hacmi hidratasyon sırasında değişmez, çimento ve karma suyunun orijinal hacmine eşittir [20].

$$V_{total} = c \cdot V_c + w_0 \cdot V_d \quad (1.4)$$

$w_0$  : Orijinal karma suyunun ağırlığı (gram)

$V_d$  : Karma suyunun spesifik hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )

## 2.Çimento jelinin oransal hacmi [20]

$$V_B = m.c.V_c + w_n.V_n + w_g.V_d \quad (1.5)$$

$V_B$  : Çimento hacmi ( $\text{cm}^3/\text{gram}$ )

$m$  : Hidrate olmuş çimento ağırlık oranı (Hidratasyon derecesi)

(1.1) denklemini (1.2) denklemine yerleştirirsek [20];

$$w_g = a.k.w_n \quad (1.6)$$

(1.6) denklemini (1.5) denklemine yerleştirirsek [20];

$$V_B = m.c.V_c + (V_n + a.k).w_n \quad (1.7)$$

(1.7) denklemini (1.5) denklemine bölersek çimento hamurundaki çimento jelinin oransal hacmi bulunur [20].

$$V_n/V_{\text{total}} = [m.c.V_c + (V_n + a.k).w_n/c]/[(w_0/c) + V_c] \quad (1.8)$$

## 3.Jel suyunun oransal hacmi

(1.7) denklemini (1.5) denklemine bölersek [20];

$$w_g/V_{\text{total}} = [a.k.w_n/c]/[(w_0/c) + V_c] \quad (1.9)$$

## 4.Kapiler boşlukların oransal hacmi

(1.5) denklemini (1.4) denklemine yerleştirirsek ve  $w_c$ 'ye göre çözersek [20];

$$w_c = w_0 - (V_c + a.k).w_n \quad (1.10)$$

$$w_c/V_{\text{total}} = [(w_0/c) - (V_n + a.k.(w_n/c))] \quad (1.11)$$

## 5.Çimento hidratasyon derecesi

$$m = c_h/c \quad (0 \leq m \leq 1) \quad (1.12)$$

$c_h$  : Hidrate olmuş çimentonun ağırlığı

$$m = c_h/c = w_n/w_n^0 \quad (1.13)$$

$w_n^0$  : Buharlaşmayan suyun toplam hidrate hamurdaki ağırlığı

6.Hidrate olmamış çimentonun oransal hacmi

$$c_{uh} \cdot V_c = (1-m) \cdot c \cdot V_c \quad (1.14)$$

$c_{uh}$  : Hidrate olmamış çimentonun ağırlığı (gram)

$$c_{uh} \cdot V_c / V_{total} = (1-m) \cdot V_c / (w_0/c) + V_c \quad (1.15)$$

### 1.2.3 Sertleşmiş Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Özellikleri

Toplam porozite,bütün su/çimento oranları için hidrasyon süresindeki artışta azalır. Hidrasyonun ilk devrelerinde azalma oranı büyüktür,ancak 3 aylık hidrasyon devresinde yaklaşık lineer olmaktadır. Ayrıca toplam porozite artan su/çimento oranı ile artar çünkü hidrate olmamış partiküller arasındaki suda bir artış olmasıdır [20].

Toplam boşluk hacmi cıva ile doldurulursa,artan hidrasyonla azalır,artan çimento oranıyla artar.

Kuru yoğunluk ve hidrasyon derecesi yüksek dayanımlı betonlar için artan hidrasyon süresince artar.

Genel boşluk boyutu dağılımı artan hidrasyon devresinde sola doğru artar,yani boşluk yaşla iyi duruma gelir.

Bütün boşluklar silindirik,yüzeysel alanları düzgündür.

### 1.3 Betonun Yarı Gevrek Davranışı

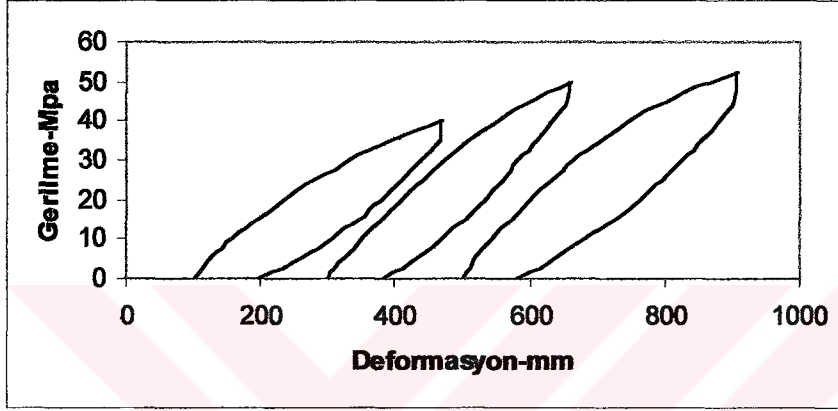
Yükleme boşaltma histerisis diyagramlarını inceleyerek hem çimento hamurunun agrega ile arasındaki bağın ve agreganın özelliklerini ve kusurlarını belirlemek için bir metot olarak kullanılabilir.

Aitcin ve Mehta'ya [21] göre histerisis eğrilerinin kalınlıkları agrega ile çimento hamuru ara yüzeyinin dayanımıyla yakından ilgilidir.

Çeşitli su/çimento oranlı ve 3 ayrı granülometriyle hazırlanmış beton karışımlarının aynı su/çimento oranlı fakat farklı granülometrilere sahip beton karışımlarının belirgin derecede farklı davranış gösterdikleri,elastisite modüllerinin ve basınç

dayanımlarının A16-B16 granülometrisinin en büyük, B16-C16 granülometrisinin de en düşük değere sahip olduğu görülmüştür. Şekil 1.3'te görüldüğü gibi histerisis eğrilerinin farklı granülometriye ve aynı su/çimento oranına sahip beton karışımlarının değişikliklerini göstermektedir.

Histerisis eğrisinin kalınlığının artması agrega-çimento hamuru arasındaki bağın ve/veya agrega tanelerinin zayıf olduğunu gösterir. Aynı zamanda yük boşaltma eğrisinde görülen geri dönmeyen şekil değiştirmelerin miktarı da bu duruma işaret eder.



Şekil 1.3 Değişik granülometrelerin aynı su/çimento oranında histerisis eğrileri (1.eğri B16-C16 2.eğri B16 3.eğri A16-B16)

Histerisis eğrileriyle elde edilen sonuçlardan birisi de basınç dayanımının artmasıyla birlikte gevreklik indisi de artmaktadır, yani betonun gevrekliği artmaktadır. Bu durum Taşdemir [22] ve Şengül'ün [23] bulduğu sonuçlarla uyum içindedir. Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonların gevreklik indislerinde hızlı bir artış görülmektedir.

Ayrıca histerisis eğrilerinde görüldüğü gibi yüksek dayanımlı betonlarda elastik uyum ve azalan mikro çatlaklar sonucu daha lineer bir azalan kol elde edilmekte ve en yüksek gerilmedeki deformasyon miktarı artmaktadır. Beton basınç dayanımının artmasıyla birlikte tersinmez deformasyon enerjisi azalmakta, bu da gevrekliğin arttığına işaret etmektedir.

Yükleme ve boşaltma eğrileri arasındaki kalınlık ve boşaltma eğrileri arasındaki kalınlık ve boşaltma eğrisindeki kalıcı deformasyon miktarı agrega-çimento ara yüzeyinin durumu hakkında bilgi verir. Kalınlığın ve kalıcı deformasyonun azalması ara yüzeyin daha kuvvetli bir hale geldiğini göstermektedir. Beton sınıfının

yükselmesiyle birlikte temas yüzeyi daha boşluksuz ve homojen hale gelir. Bunun sonucu gevreklik indisi de artar.

Eğer betonların histerisis çevrimleri darsa kullanılan agregaya ile çimento ara yüzeyinin iyi olduğunu işaret eder çünkü iyi agregaya çimento hamuruyla elastik uyum gösterir ve emdiği fazla su ara yüzeydeki çimento hamurunun hidrasyonu için kullanılarak bu bağı güçlendirilebilir. Ayrıca agregaların yüzey yapıları da bu sonuçlarda etkili olabilir. Ayrıca çimento hamuru ile en iyi aderansı sağlayan agregalar (kalker) kullanılırsa, çimentonun hidrasyonu sırasında bazı kristal yapıları bileşenler  $[Ca(OH)_2]$  ilk önce çökelerek agregaya yüzeyini ince bir tabakanın kristal yapısı ile agreganın kristal yapısının kafes sistemleri birbirlerine uygunsu, bu yapılar arasında süreklilik oluşturarak bir aderans meydana gelir [24].

Fakat iyi ara yüzey oluşturan agregalı betonlarda basınç dayanımları düşüktür yani düşük dayanımlı agregalar, çimento hamuruyla iyi bir ara yüzey oluştursa bile, yüksek basınç dayanımlı beton oluşturamaz.

#### **1.4 Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Porozite, betonun dayanımını belirlemede en önemli faktördür. Çapı 10nm'den ufak boşlukların porozitesi betonun dayanımını azaltmaktadır. Çapı 10nm ile 100 nm arasındaki ve 100 nm'den büyük porozitenin etkisi benzerdir ve 10 nm'den ufak çaplı boşlukların porozitesinden önemli derecede büyüktür. Toplam porozite ve dayanım arasındaki ilişki herhangi bir hidrasyon sıcaklığında lineer denklem formunda en iyi şekilde açıklanabilir. Denklemdaki sabit terimler eğimi ve değişik hidrasyon sıcaklıkları ile değişen grafiğin şeklini, mesafeyi, bu sıcaklıklarda oluşan hidratların esas özelliklerindeki yakın spesifik olmayan değişimleri belirler [25].

Sabit porozitede, çimento hamurunun dayanımı oluşan hidratların miktarının artmasıyla artar. Bu etki, porozitenin etkisinden daha azdır.

Oluşan hidratların spesifik yüzey alanlarındaki değişimlerin dayanımında hiçbir etkileri yoktur.

Basınç dayanımı ve gerilme dayanımı arasındaki oran değişik çimento hamurlarına göre değişir. Artan toplam poroziteyle azalır ve ayrıca hidrasyon derecesiyle de bir

ilişki vardır. Hidratasyon süresince ve oluşan hidratasyon ürünlerinin bileşimi kullanılan su/çimento oranına bağlıdır. Düşük su/çimento oranlarında hidratasyon derecesi yavaşça azalır ve hidrat fazları düşük su muhtevalı yüksek C/S oranlarında oluşur.

Dökülerek ve presle oluşturulan hamurlar yapılarına ve bileşimlerine göre değişim gösterirler, eşit başlangıç su/çimento oranlarında bu değişimler görülenbilir.

Porozite başlangıç su/çimento oranını veya hidratasyon derecesine karşın betonun basınç dayanımını belirlemede en önemli faktördür. Basınç dayanımı ile porozite arasındaki var olan ilişki lineer bir grafikte en iyi şekilde açıklanabilir [26].

Basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişkinin grafikleri değişik şekillerde üretilen çimento hamurlarında aynı değildir. Eşit porozitelerde dökülerek yapılan betonların dayanımlarının presle yapılan betonların dayanımlarından genellikle daha büyüktür.

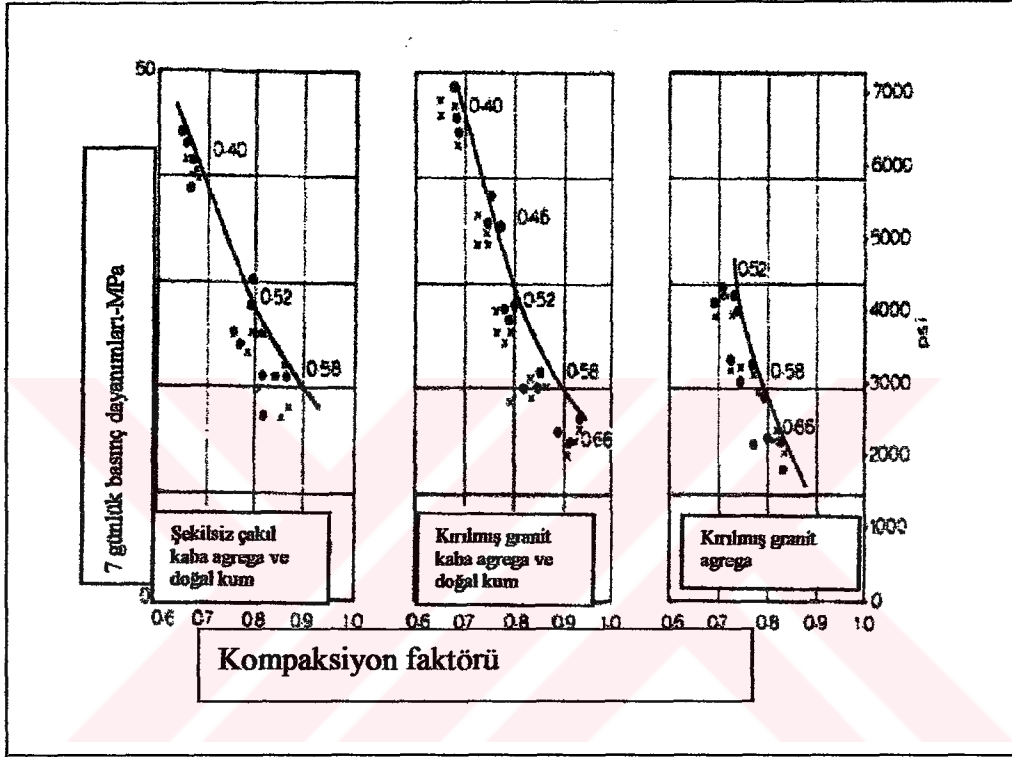
Sandor Popovics'in [27] çalışmasında dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişki beton mukavemetini belirlemede taze betonun hava miktarı sabit kaldığı zaman uygundur. Bu tür çalışmalar ilk olarak Feret tarafından yapılmış olup, hava miktarının değiştiği durumlar için formüller geliştirilmiştir. Ancak oluşturulan bu formüller çok güvenilir değildir. Bundan dolayı Abrams formülünden kombinasyon edilmiş ve taze betonun hava miktarını içeren modifiye faktörlerden yeni formüller geliştirilmiştir.

Deneysel sonuçlar da Abrams'ın formüllerini betonun değişik yaşlarda basınç ve eğilme dayanımları hem su/çimento oranı hem de hava miktarı değiştiği zaman desteklemektedir. Sadece basit bir yaklaşım olarak, porozitenin iki tipi; kapiler boşluklar ve hava boşlukları betonun dayanımını etkilemektedir. Yeni formüllerin analizi, kapiler porozitenin miktarındaki değişimin çimento içeriğine bağlı aynı miktardaki hava boşluk hacmindeki değişime göre beton dayanımında daha yüksek veya daha düşük değişimler oluşturur.

Spesifik olarak, minimum kabul edilebilir hava miktarı yüksek çimento içerikli betonlar için önerilmektedir ve yüksek çimento içerikli betonlar için de maksimum kabul edilebilir hava miktarı önerilmektedir.

#### 1.4.1 Su/Çimento Oranının Yüksek Mukavemetli Betona Etkisi

Mühendislik çalışmasında, verilen yaşta ve tavsiye edilmiş sıcaklıkta suda bekletilen betonun dayanımı esas olarak su/çimento oranı ve kompaksiyon derecesi olan 2 faktöre dayanmaktadır [28].

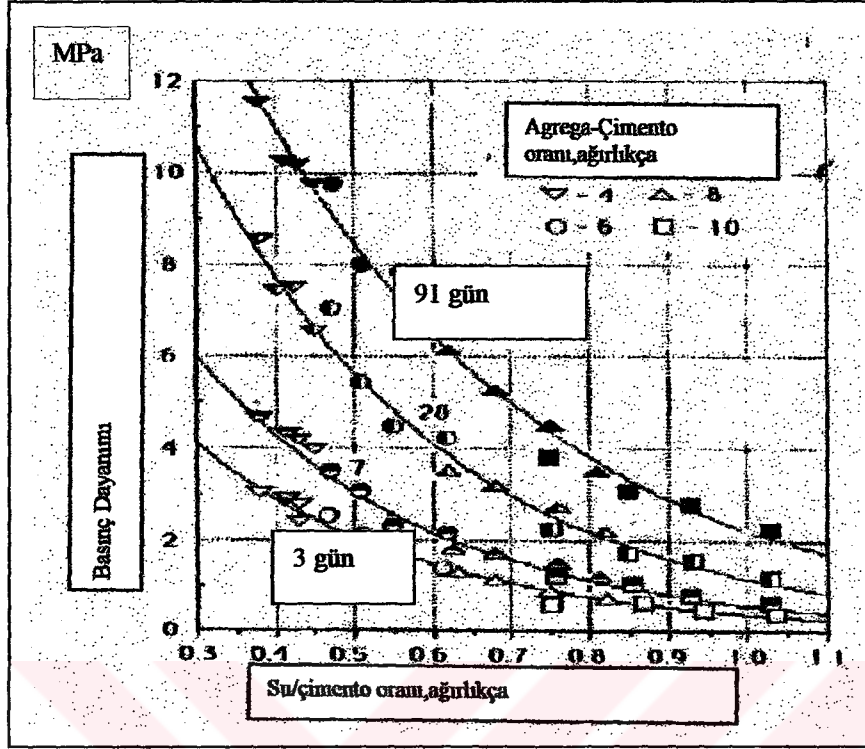


Şekil 1.4 Değişik tipte agreganın değişik su/çimento oranına göre 7 günlük dayanımları

Beton tamamen basınca uğrarsa, onun dayanımı su/çimento oranıyla ters orantılıdır. Bu durum, bir kanun olarak nitelendirilir fakat gerçekte Duff Abrams tarafından 1919'da kurulmuş bir kuraldır. Dayanımı şöyle hesaplamıştır [28]:

$$f_c = K_1 / K_2^{(w/c)} \quad (1.16)$$

Burada w/c karışımın su/çimento oranını temsil etmektedir ve  $K_1$  ile  $K_2$  ampirik sabitlerdir. Dayanımın genel durumunun su/çimento oranıyla eğrisi aşağıdaki Şekil 1.7'de gösterilmiştir. Abrams'ın Rene Feret'in 1896'da oluşturduğu kurala benzerlik gösterse de bağımsız şekilde yapılmış olup, her ikisi de betonun dayanımının su ve çimento hacmi ile ilişkisi olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 1.5 Su/çimento oranının bir fonksiyonu olarak değişik yaşlardaki betonun basınç dayanımları

Feret'in kuralı aşağıdaki gibidir:

$$f_c = K (c/c + w + a)^2 \quad (1.17)$$

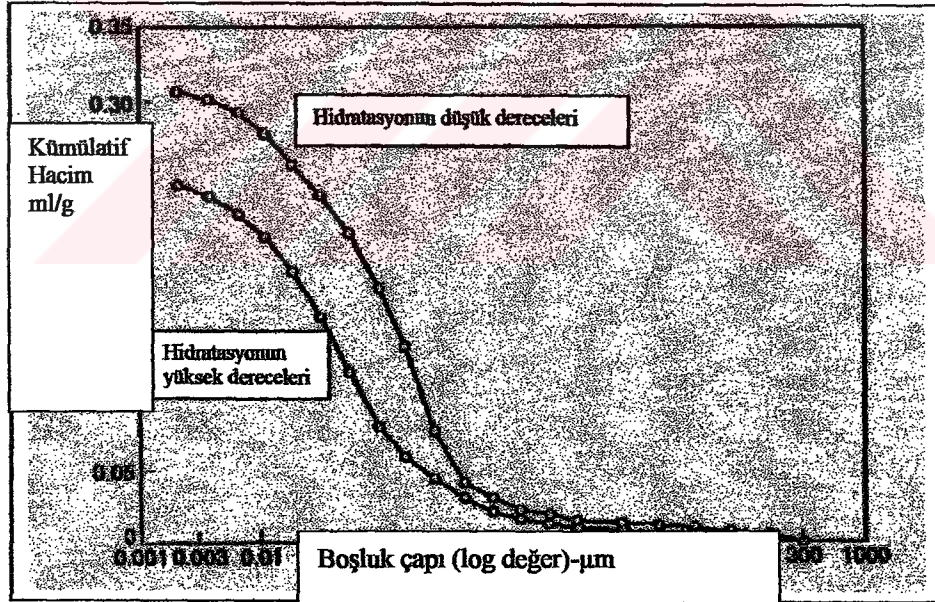
Burada  $f_c$ , betonun dayanımı;  $c, w$  ile  $a$  çimentonun, suyun, havanın sırasıyla mutlak hacimsel oranları ve  $K$  bir sabittir. Hidratasyonun herhangi bir devresinde, su/çimento oranı sertleşmiş çimento hamurunun porozitesini etkiler. Böylece, hem su/çimento oranı hem sıkıştırma derecesi, betonun boşluk hacmini etkiler ve böylece havanın hacmini etkiler ve böylece havanın hacmi Feret'in anlatımlarında Şekil 1.7'de su/çimento oranı kuralının boşluk derecesi limite edilmiştir.

Su/çimento oranının düşük değerlerinde, eğri tamamen kompaksiyonun mümkün olmadığı yerlerde sona ermektedir. Bölümün noktasının şimdiki pozisyonu ulaşılabilen kompaksiyon değerine dayanmaktadır. Düşük su/çimento oranlı karışımlar ve aşırı yüksek çimento içeriği (özellikle  $530 \text{ kg/m}^3$  üstü) büyük boyutlu agrega kullanıldığı zaman dayanımın gerilemesine sebep olmaktadır. Böylece, geç yaşlarda bu tip karışımlarda düşük su/çimento oranı yüksek dayanıma sebep olmaz.

Rötreden dolayı oluşan bu davranışta agrega partikülleri tarafından engellenmesi, çimento hamurunun çatlamasına veya çimento-agrega bağının kaybına sebep olmaktadır. Zaman geçtikçe, su/çimento oranı kuralı yeterli esasta açıklanmamıştır. Buna rağmen pratikte su/çimento oranı tam kompasite olmuş betonun dayanımında en büyük tek faktördür. Bu durum en iyi şekilde Gilkey aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

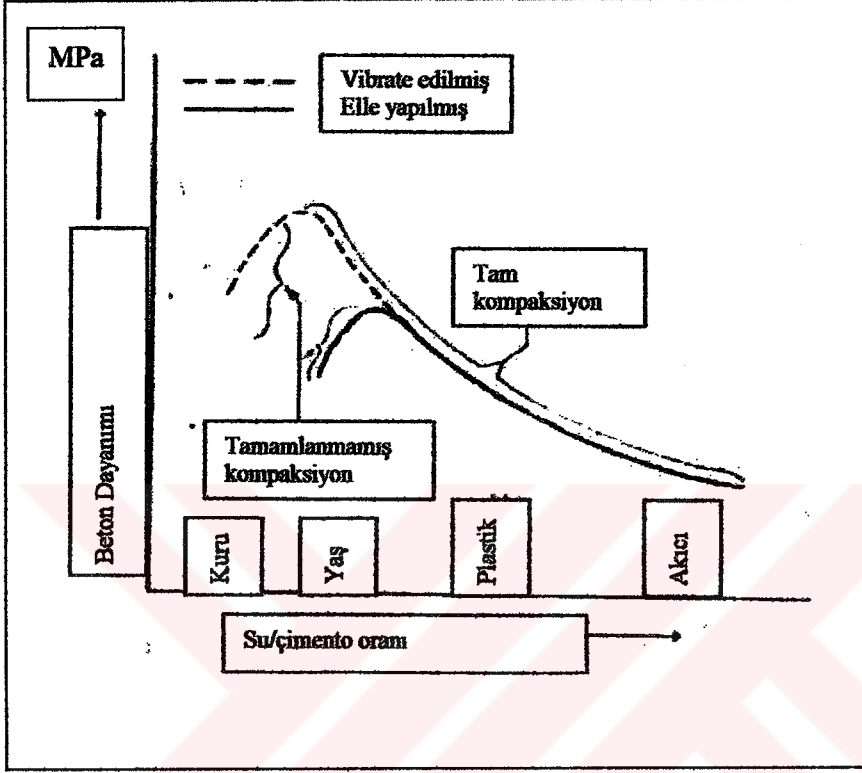
Verilen çimento ve kullanılan agregalar için çalışabilir, iyi derecede yerleşmiş çimento, agrega ve su karışımı tarafından geliştirilmiş (aynı karışım, kür ve test durumları altında) dayanım şunlardan etkilenir:

- Karışımındaki çimento oranı
- Agrega çimento oranı
- Agrega partiküllerinin derecesi, yüzey yapısı, şekli, dayanımı ve sertliği
- Agreganın maksimum boyutu



Şekil 1.6 Boşlukların kümülatif hacimleri belirli boşluk çaplarından su/çimento oranı 0,45 olduğu ve sıcaklığın 20°C olduğu zaman büyük olması

b ve d faktörleri, maksimum boyutu 40 mm'ye kadar olan agrega kullanıldığı zaman a faktörü için çok önemli değildir. Bu faktörler, Walker ve Bloem tarafından ele alınmıştır ve betonun dayanımının aşağıdakilere bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.



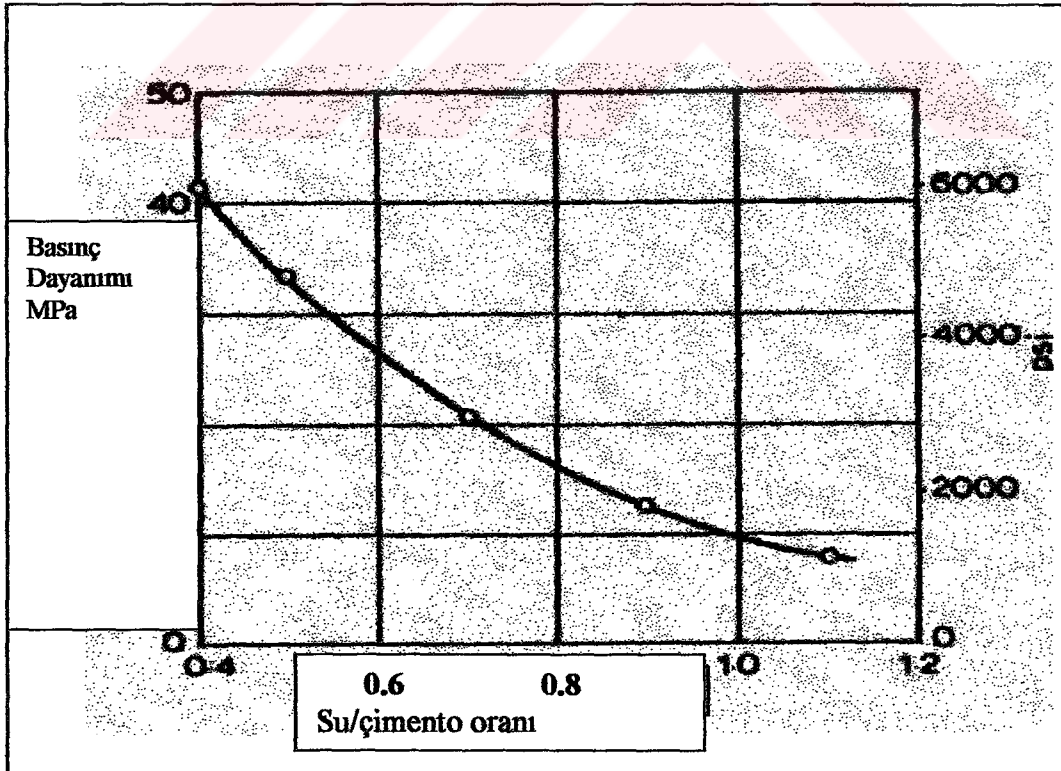
Şekil 1.7 Dayanım ve su/çimento oranının ilişkisi (kompaksiyon = sıkıştırma; kuru kıvamdan akıcı kıvama doğru artış olunca beton dayanımı azalmaktadır.)

- 1) Harcın dayanımı
- 2) İri agrega ve harç arasındaki bağ
- 3) İri agrega partiküllerinin dayanımı (ona etkiyen gerilmelere karşı direnci)

Şekil 1.8 ise dayanım grafiğinin su/çimento oranıyla ilişkisinin yaklaşık olarak hiperbolik bir eğri olduğunu göstermektedir. Herhangi bir yaştaki ve herhangi bir tipte agregayla yapılan betonlar için bu şekil uygulanır. Bu şekil  $y = k/x$  hiperbolik özelliğini taşır, ancak  $y, 1/x$ 'e karşılık gelirse bir düz çizgi olur. Böylece, dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişki su/çimento oranının 1.2 ile 2.5 arasında olduğu zaman, yaklaşık olarak lineerdir. Bu lineer ilişki Alexander, Iyemusec ve Kaluzaki tarafından doğrulanmıştır. Su/çimento oranı eğrisini interpolasyon istendiği zaman kullanmak uygun olmaktadır. Şekil 1.9, Şekil 1.8'in datalarının su/çimento oranıyla

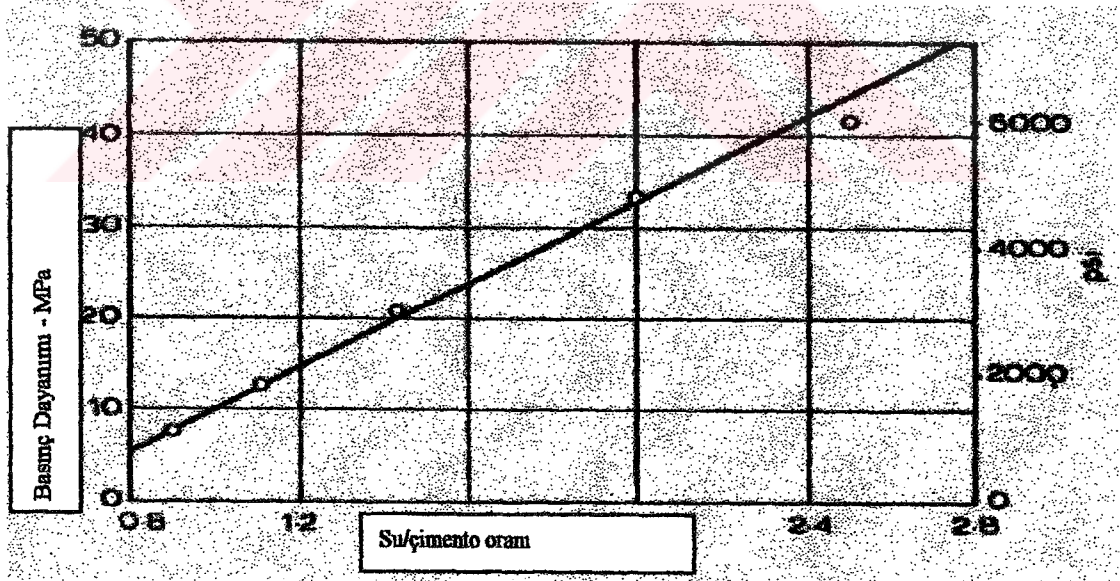
karşılaştırılmasıdır. Bu değerler kullanılan çimento içindir ve herhangi bir pratik durumda dayanım su/çimento oranı arasındaki ilişki belirlenebilir.

Dayanım ile su/çimento oranı arasındaki lineerlik 2.6'ya kadar olan su/çimento oranına kadar gelişmez buna karşılık esas su/çimento oranı 0.38'e tekabül eder. Gerçekte, 2.6'dan büyük su/çimento oranları için, bir değişiklik oluşur, hala lineerdir, bu ilişki Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Maksimum hidrasyonu gerçekleştiren çimento hamurları için hesaplanmış değerleri belirtir. 0.38'ten ufak su/çimento oranları için maksimum hidrasyon % 100'den azdır. Bunun sonunda eğrinin eğimi yüksek değerli su/çimento oranları için değişmektedir. Bu çalışma, 0.38'ten büyük ve küçük su/çimento oranlarıyla yapılmış karışımların kullanılmasını belirtir. Yüksek alüminli çimentolu betonun dayanımı Portland çimentosuyla yapılan betonunkinden farklıdır, böylece dayanım su/çimento oranıyla sürekli azalan bir şekilde artmaktadır. Burada bahsedilen ilişkiler tam doğru değildir ve diğer yaklaşımlar yapılmalıdır. Mesela, bir yaklaşım olarak, dayanımın logaritması ile su/çimento oranının doğal değerleri arasındaki ilişkinin lineer olduğu varsayılmaktadır (Abrams Şekil 1.8'in değişik su/çimento oranlı karışımların rölatif dayanımını su/çimento oranı 0.4 birim olarak alınırsa gösterdiğini belirtmiştir) [28].



Şekil 1.8 7 günlük dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

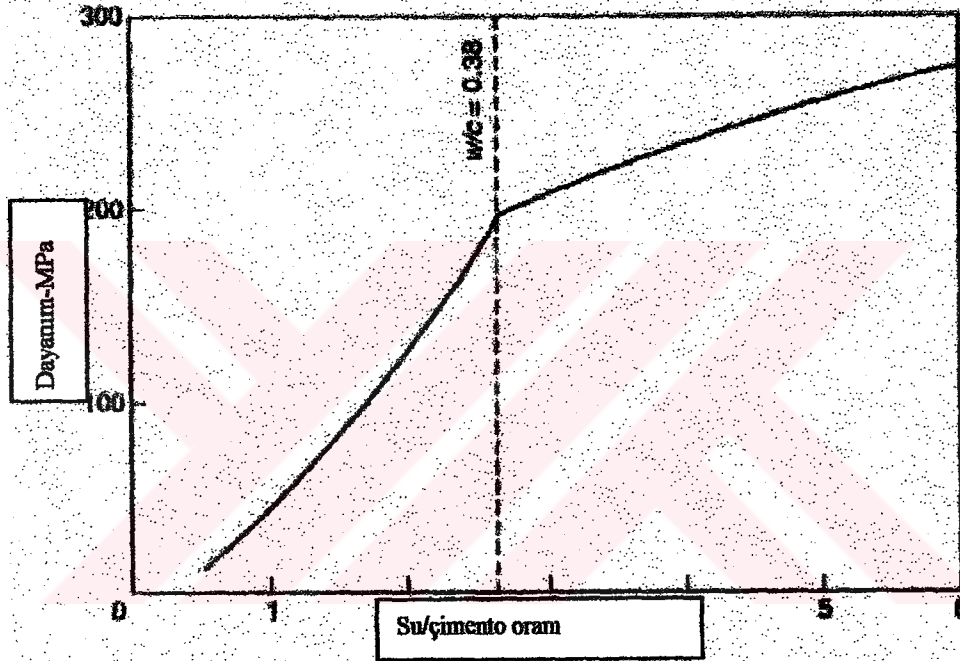
Dayanım ile su/çimento arasındaki ilişki tam olarak belli olmamasına rağmen, iri agrega özelliklerinin dayanıma etkisi diğer faktörlerden bağımsız değildir. Numunedeki düşey çatlak son yüklemenin % 50-75'i kadar bir büyüklükte başlamış tek eksenli basınçla bağlıdır. Beton içinde iletilen sesin hızının ölçülmesiyle belirtilmiştir ve ayrıca ultrasonik atış hızı teknikleri ile de yapılabilir. Çatlakların oluştuğu gerilme, iri agreganın özelliklerine bağlıdır. Pürüzsüz çakıl, sert ve açısız kırılmış kayaya göre düşük gerilmelerdeki çatlaklara sebep olur çünkü mekaniksel bağ, yüzey özelliklerinden ve belli bir dereceye kadar iri agreganın şeklinden etkilenmektedir. Agreganın özellikleri çatlak yükünü etkiler, son yükleme, basınç ve eğilme kuvvetinden farklıdır. Bundan dolayı iki nitelik arasındaki ilişki kullanılan agrega tipinden bağımsızdır. Şekil 1.11, Jones ve Kaplan'ın sonuçlarını göstermektedir. Her sembol iri agreganın değişik tipini temsil etmektedir. Diğer taraftan, eğilme ve basınç kuvveti arasındaki ilişki kullanılan agreganın tipine bağlıdır çünkü (yüksek dayanımlı betonlar hariç) agrega özellikleri özellikle şekli ve yüzey yapısı, basınçtaki son dayanımını çekmedeki ve çatlak kuvvetinin dayanımından daha az etkiler [29].



Şekil 1.9 Şekil 1.8'teki datalardan su/çimento oranına karşı dayanımının grafiği

Bu davranış Knob tarafından incelenmiştir. Deneysel betonda, tam pürüzsüz iri agreganın tipik olarak sert agregadan daha çok % 10'luk düşük basınç dayanımına sebep olmaktadır. İri agreganın tipinin beton dayanımına etkisi büyük bir derecede

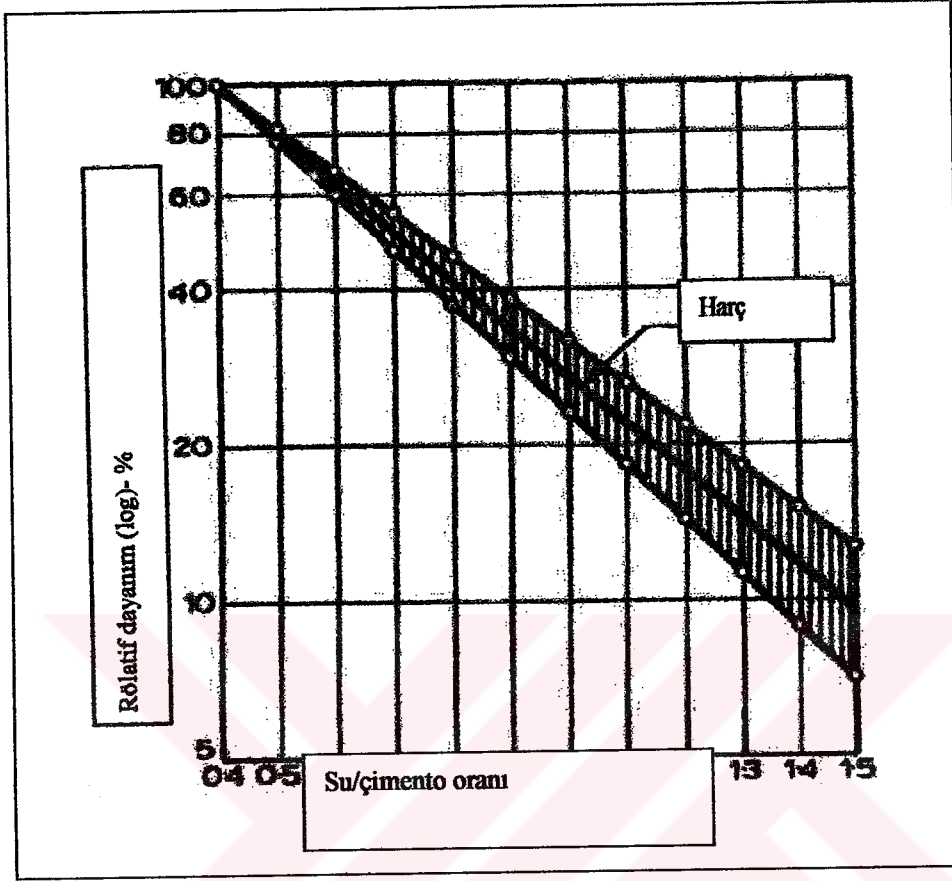
değişir ve karışım su/çimento oranına bağlıdır. 0.4'ten aşağı su/çimento oranları için, kırılmış agrega kullanımı çakıl kullanıldığı zamana göre dayanımın % 38 artmasına sebep olur. 0.5 su/çimento oranının durumu Şekil 1.14'te gösterilmiştir. Su/çimento oranındaki artış, agreganın etkisinin kabul edilir bir şekilde düşmesidir çünkü hidrate olmuş çimento hamurunun dayanımı kendiliğinden en yüksek seviyeye ulaşır ve 0.65 su/çimento oranında, kırılmış kaya veya çakıl ile yapılmış beton dayanımlarında hiçbir değişiklik görülmemektedir. Eğilme dayanımına agreganın etkisi deney süresince betonun nem durumuna bağlıdır.



Şekil 1.10 Temiz çimento hamurunun hesaplanmış dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki (Maksimum hidrasyon olduğu varsayılırsa)

İri agreganın şekil ve yüzey yapısı, betonun vuruş dayanımını eğilme dayanımı kadar etkiler. Kaplan betonun eğilme dayanımının harcın eğilme dayanımından daha düşük olduğunu incelemiştir. Harç, betonun dayanımının en üst limitini oluşturmaktadır ve iri agreganın bulunuşu genellikle dayanımı düşürmektedir. Diğer taraftan, betonun basınç dayanımı Kaplan'ın iri agreganın mekaniksel kenetlenmesi, basınçta betonun dayanımını etkilediği görüşüne göre harcinkinden daha büyüktür. Bu davranış tam olarak yapılamıyor ve agreganın dayanıma etkisinin sorusu daha çok incelenmelidir. İri agrega partikülleri çatlak tutucu olarak hareket ettiğini belirtmek

gerekir. Böylece artan yük altında diğer çatlak oluşur. Yetersizlik aşamalıdır ve çekmede bile gerilme-deformasyon eğrisinin iniş kısmı bulunmaktadır.

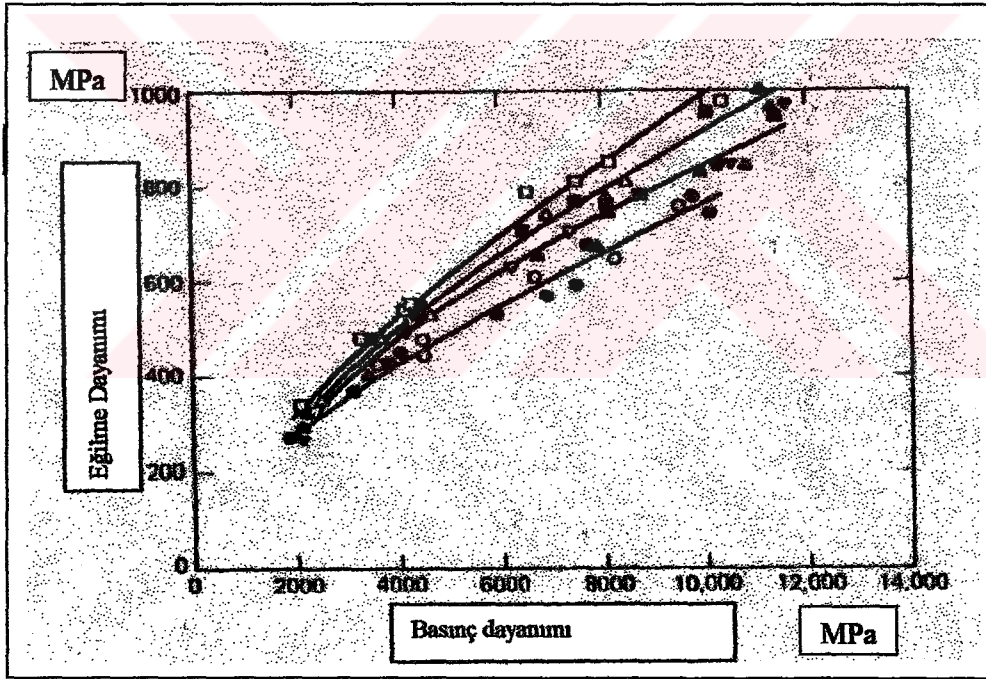


Şekil 1.11 Rölatif dayanımın logaritmik yüzdesi ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

Betonun dayanımı kapiler poroziteye ve jel/boşluk oranına bağlı olduğu olmasına rağmen, bunlar, ölçmek ve tahmin etmek için gerekli nitelikler değildir. Karışım dizayn prosedürlerinde kullanılmaları için uygun değildir. Ancak, iyi sıkışmış durumda betonun kapiler porozitesi hidrasyon herhangi bir devresinde su/çimento oranı ile belirlenebilir. Böylece pratikte iyi sıkışmış durumda betonun dayanımı verilen yaşta su/çimento oranını belirleyerek sağlayabiliriz.

Abrams'ın su/çimento oranı kanunu gerçekte kanun olmamakla birlikte hidrasyon derecesini betonun hava miktarını veya agreganın etkilerini belirleyemez. Genelde pratikte gördüğümüz su/çimento oranları yararlı bir gereç olmaktadır. Ancak su/çimento kanunu olayların gerçek durumunu basitleştirilmiş hali olarak kabul edilmektedir.

Tam olarak sıkışmamış beton,porozitesini arttıran büyük boşluklar içerir. Böylece,düşük su/çimento oranlarında tam sıkışma elde etmek zordur. Abrams'ın kanunu geçerli olmamaya başlar. Bunun meydana geldiği noktada kullanılan sıkışma yöntemleri bağlı olmaktadır. Gerçekte,geliştirilmiş karmaşık yöntemleri (öncelikle tahmini operasyonlarla) ve süperplastikleştirici kullanılması çok yüksek dayanımlı normal çimento kullanılmış betonların üretilmesine imkan vermektedir. Bu da,eğer betona iyi sıkışma yaparsak,Abrams'ın kanunu düşük su/çimento oranlarına uymaktadır. Böylece,su/çimento oranı kanunu Şekil 1.13'te gösterilmiş değişik karışımlar için ilişkin bir topluluğudur. Su/çimento oranı kanunu üniform halden her zamanki çalışır yapıli betonlara (40 mm maksimum boyutlu agregalar kullanılarak) çevirdiğine ait bir genel bir düşünce olmasına rağmen,karışımda maksimum agrega boyutu ve agrega miktarı betondan,temiz hamurdan,harçtan veya kütleli beton karışımlarından farklı olduğunda bu kanun yeterli olmamaktadır [29].



Şekil 1.12 Çatlamadaki basınç kuvveti ile eğilme arasındaki ilişki

Olağandışı beton karışım dizaynlarında bulunanlar,su/çimento oranı bağımlılığı ciddi hatalara yol açtığına dair basit bir görüş belirtmektedir. Karışım dizaynında bir su/çimento oranı belirlememize rağmen,beton yerleştiği zaman gerçek su/çimento oranının ne olduğuna dair büyük şüpheler oluşur. Normal pratikte çökme testi karışımında fazla suyu belirlemek amacıyla yapılır,fazla su agregadan veya betonu elde etmek için belli bir miktar eklenmiş sudur.

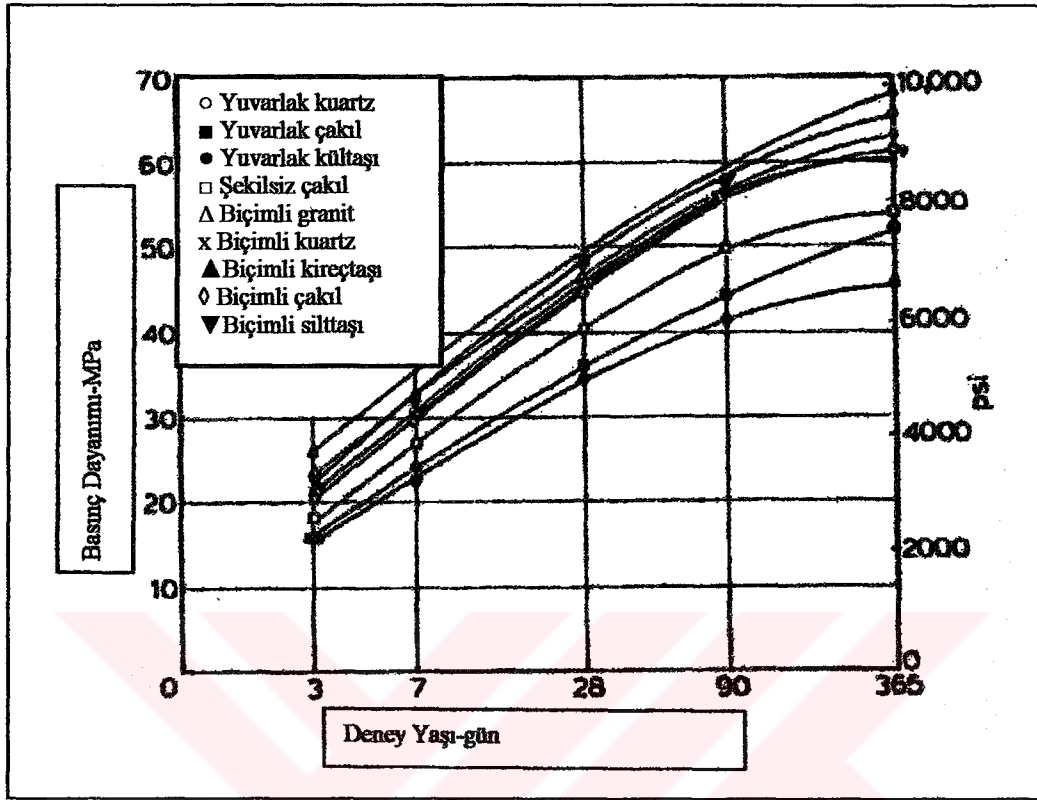
Dayanım standartları temeline göre beton oranlanması,su/çimento oranları belirlenmeden tavsiye edilmektedir. Pratikte dayanım temellerine göre belirlenmiş beton anlamındadır çünkü dayanıklılık testleri çok pahalıdır ve planlı yapılırsa zaman kaybıdır. Maalesef bu gerileyen bir adımdır çünkü dayanımdaki değişiklikler dayanıklılıktaki değişikliklere karşılık gelmeyebilirler. Buna ek olarak iyi çimento kullanılması,kesin karışımlar ve özel kür teknikleri 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımları sağlar ama betonun gerçek kalitesini temsil edemezler. Beton performansını belirleyen birçok güvenilir yöntem geliştirilmesinden dolayı,su/çimento oranı en iyi dayanım ve dayanıklılık sağlar. Taze betonun su/çimento oranını ölçmek için yöntemlerin geliştirilmesi,mesela Kelly-Vail tekniği gibi,asla su/çimento oranını bileceğimiz eleştirisine karşı gelmektedir.

#### 1.4.2 Su/Çimento Oranının Rolü

Efektif su/çimento oranı,serbest suyun miktarının oranının taze betondaki çimento oranına karşılık gelmesidir (Newman 1959). Serbest su,son konsolidasyondan sonra hemen matriste bulunan su miktarıdır. Suyun konsolidasyon öncesi ve sonrası erkenden buharlaşması ve değişik yollarla matriste kaybolması (agreganın emmesi,akma) efektif su/çimento oranından farklıdır. Diğer taraftan, konsolidasyondan sonra hamurda kaybolmuş su efektif su/çimento oranını azaltır ama betonu daha güçlü yapmaz. Son sıkışmadan sonra,emilen su hamur içinde arkasından hava tarafından doldurulacak boşluklar bırakır. Böylece betonun dayanımı,emilmeden önceki durumla aynıdır. Eğer bu boşluklar yok edilirse (mesela tekrar vibrasyona uğrarsa) su/çimento oranındaki azalmaya oranla beton daha güçlü olabilir. Deneysel sonuçlar sıkışma sonrası agrega tarafından suyun emilmesi,beton dayanımında bir artışa sebep olmaktadır fikrini desteklemektedir [29].

Mesela Rléeger (1957) ve Newman (1959) tarafından yapılan deneyler yüksek dayanımlı suya doymuş agregayla yapılan betonların havada kurumuş agregayla yapılan betonlarla karşılaştırıldığında daha yüksek dayanım sağladığını göstermişlerdir. Sonraki tartışmada su/çimento oranı terimi,efektif su/çimento oranı anlamına gelmektedir. Eski çalışmalardan,beton dayanımıyla su/çimento oranı arasındaki ilişkinin temeli,su/çimento oranındaki artış beton hamurunda fazla kapiler boşluk üretmektedir. Bu olay çimento ve/veya su içeriğinde değişikliklere

rağmen, karşılaştırmalı durumlarda hamuru zayıftır (Newman 1959) ve şöyle açıklanmıştır [29]:



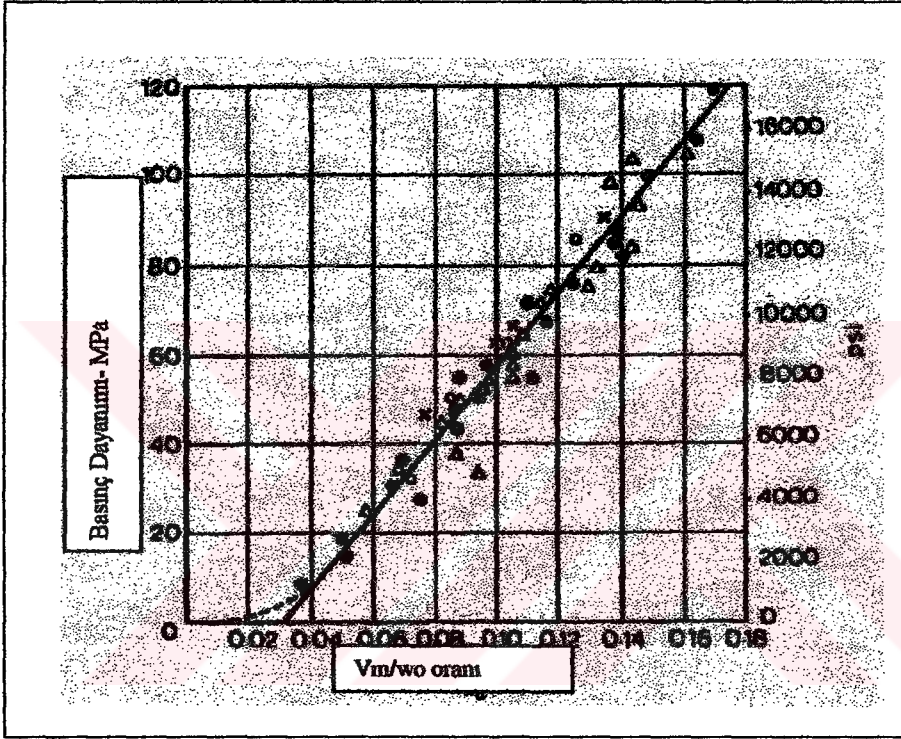
Şekil 1.13 Basınç dayanımı ile değişik agrega ile yapılmış ( $w/c = 0,50$ ) betonun yaşı arasındaki ilişki

Su/çimento oranı ne kadar yüksekse, çimento hamuru o kadar sulandırılmış bir hale gelir, böylece hidrasyonun herhangi bir devresinde daha zayıftır. Çimento ve/veya su içeriğinde ilk yaklaşım değişimleri olarak geniş pratiksel limitler içinde beton dayanımını su/çimento oranı değişirken etkiler. Su/çimento oranı uygun bir özelliktir çünkü tek değişken olarak kullanılabilir ve çimento ile su içeriği olarak iki değişken kullanmaktan daha iyi sonuçlar verir. Beton dayanımı ve su/çimento oranı arasındaki ilişki tek bir yaklaşımdır çünkü ikincil faktörlerden etkilenirler. Bu yaklaşım birçok pratik durumda kabul edilebilir. Su miktarı ve çimento miktarı, su/çimento oranı kütlesi olarak pound veya kg olarak birimlendirilir.

### 1.4.3 Abrams Kuralı

Beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişkinin ilk yaklaşımında mukayese edilen betonlar;

- 1) Yüksek su/çimento oranlı düşük dayanım
- 2) Düşük su/çimento oranlı yüksek dayanım
- 3) Benzer su/çimento oranlı dayanım sağlar.



Şekil 1.14 Çimento hamurunun dayanımı ile jelin yüzey alanı  $V_m$ 'nin  $w_o$  karıştırma suyunun hacmi oranının ilişkisi

Yukarıdaki ifade Abrams kuralı olarak adlandırılır (1918). Abrams kuralı, Portland çimentolu beton basınç dayanımlarına diğer dayanımlı ve diğer bağlayıcılar için de geçerli olmasına rağmen uygulanır. Abrams kuralının esas temeli karşılaştırılan beton dayanımları karışımları olmasına rağmen su/çimento oranına bağlı olduğudur. Karşılaştırılan betonlar aynı miktarda malzemelerle yapılarak hazırlanır, aynı şartlarda test edilir, aynı hava miktarında sıkışma olmaktadır. Literatürde deneysel sonuçlar bu ilişkinin yaklaşımının derecesinin beton karışımı pratiksel limitiyle iyi olduğudur. Sertleşmiş çimento hamuru dayanımı su/çimento oranıyla kontrol edilmesi, Abrams'ın kuralının basit formunu belirtir. Bu ikinci form beton dayanımını

matrisin dayanımı tarafından kontrol edildiğidir. Abrams kuralının üçüncü formu agrega eklenmesi matris dayanımını etkiler,böylece kompoziteye rağmen beton dayanımı beton boyunca mukayese edilir durumdadır. Dayanım ile su/çimento oranı arasındaki üçüncü form bu ilişkinin var olması için kesin sınırlandırmalara sahiptir eğer agrega miktarı ve niteliği betonun dayanımını etkilerse fikrini göstermektedir. Mesela Gilkey geleneksel iri agrega yerine mangal kömürünü beton içinde kullanılmasını denemiş,aynı su/çimento oranına rağmen dayanım düşüklüğüne ulaşmıştır (1961). Diğer başka örneğe göre,çok az çimento hamuru kullanıldığında agrega partikülleri arası boşlukları doldurmada yeterli olmamıştır. Her iki durumda betonlar karşılaştırılmaz,böylece bu örnekler Abrams kuralını tanımlayamazlar. Böylece mukayese edilen terim önemlidir. Bundan dolayı kesin bir tanımlamaya ulaşılır. Dayanımlarına göre,değişik betonların mukayese edilmesi,onarlım matrisi tarafından kontrol edilmesi gerçektir ama Abrams kuralının ikinci formunun tekrar yapılması için çalışmalar vardır. Beton dayanımının su/çimento oranı ilişkisinin var olması için gereken koşulları şöyle listeleyebiliriz:

- 1) Çimentonun dayanımını geliştirme kapasitesi benzerdir.
- 2) Karışımın miktarı ve dayanım etkileri benzerdir.
- 3) Beton numuneler benzer koşullar altında hazırlanmalı,kür edilmeli ve test edilmelidir.
- 4) Betonlarda hava miktarı aynı olmalıdır,hava boşlukları betonda üniform dağılmalıdır ve boşlukların hiçbiri numune boyutu için büyük olmalıdır.
- 5) Agrega partikülleri matristen daha dayanıklı olmalı ki kırılma partiküller içinde olmalıdır.
- 6) Beton içerikleri (çimento,su,agrega partikülleri) betonda üniform olarak dağılmalıdır.
- 7) Agrega yüzeyleri ve hamur arasındaki bağın mukayese edilen beton içinde eşit dayanımlı olmalı ve matriste gerilmenin ilk bölümünden beton kırılmadan önce agrega transferde yeterli olmalıdır.
- 8) Dayanımı etkileyen betondaki fiziksel ve kimyasal özellikleri (kuruma,agrega reaksiyonu) çimento hidratasyonu sırasında çatlak oluşturmaz ve aynıdır.

9) Homojen olmayan betonun kompozit yapısı matris ve agregaya partiküllerinin değişik karakteristiklerine bağlı olduğunda bunların mukayese edilen betonların dayanımları belli bir büyüklüğe kadar etkilediğidir.

10) Agregaya iskeletin dağılımı beton dayanımına yükleme sırasında agregaya partiküllerinin kenetlenmesinden oluşur ve değişik betonlarda aynıdır (Popovics 1971) [30].

Bu şartlar kendiliğinden olursa, aynı su/çimento oranlı betonlar aynı dayanıma sahip olmazlar. Bazen sapmalar pratikte ufak olabilirler.

#### **1.4.4 Su/Çimento Oranındaki Değişikliklerin Diğer Sonuçları**

Betondaki su/çimento oranı şöyle değiştirilebilir:

- 1) Su içeriğini sabit tutarak, çimento içeriğini değiştirmek
- 2) Çimento içeriğini sabit tutarak, su içeriğini değiştirmek
- 3) Her ikisini değiştirmek

Abrams kuralı bu yöntemler arasında ayırt edilememesine rağmen, su/çimento oranının değiştirilme yolu beton özellikleri üzerinde etkilidir. Su/çimento oranı su içeriği azaltılarak düşürüldüğünde çimento hamuru da azaltılır. Su/çimento oranı çimento artırılarak azaltılırsa hamur içeriği artar. Hamur içindeki bu değişikliğin beton dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki üzerine ufak ama kesin bir etkisi vardır.

Çok önemli olarak, çimento içeriği değiştirildiği zaman ve su içeriği sabit tutulursa, beton direnci çok fazla değişmez yani çimento içeriğindeki belli bir limite kadar artış direnci değişmez tutarak dayanımda artış yaratır çünkü su/çimento oranını düşürür.

Diğer bir deyişle, çimento içeriği sabit tutulup su içeriği değiştirilirse beton direnci aşırı derecede değişir (S. Popovics 1982b).

Beton direnci çok yüksek olduğu zaman, sıkışmaya uygun yöntemlere göre çalışması gerekir. Su/çimento oranındaki azalma su içeriğindeki azalmayla olması aşırı kuru

dirence sebep olur. Bunun sonucunda beton dayanımında azalma olur çünkü zarar görmüş çalışırılık tamamlanmamış sıkışmaya sebep olur. Tabi ki hava miktarındaki artış,sıkışmanın en etkin metodu kullanılarak yok edilebilir mesela vibrasyonun el karışımından daha iyi olmasıdır. Bu durumda,azalmış su/çimento oranı yüksek dayanımı Abrams kuralında açıklandığı gibi sağlar. Su/çimento oranı belli yaştaki beton dayanımını etkilemekle kalmaz ayrıca sertleşme proseslerinin kinetiklerini de arttırır.

Düşük su/çimento oranlı beton dayanıma sahip olmakla birlikte yüksek ilk sertleşme oranına ve büyük sertleşme hızına,yüksek çimento oranlı diğer betonlara oranla sahiptir. Düşük su/çimento oranlı beton yüksek erken dayanımlara sahiptir ama yüksek su/çimento oranı betonda düşük dayanımlar sonradan artar. Yüksek su/çimento oranlarının hamurdaki yüksek kapiler porozitesi düşük dayanımlara özellikle sertleşme başlangıcında sebep olur. Ancak,büyük boşluk miktarının elde edilmesi katı hidrasyon ürünlerinin gelişmesine yardımcı olur. Böylece hidrasyon prosesi ve dayanım geliştirilmesi geç yaşlarda yüksek su/çimento oranlı hamurlara oranla daha yoğundur.

## **1.5 Beton Özelliklerinin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı**

### **1.5.1 Betonun Çimento Hamuru Yapısına Duyarlı ve Duyarsız Özellikleri**

Eğer çimento hamuru fazı içindeki boşlukların kılcal boşluklar mı,yoksa hapis olmuş hava boşlukları mı olduğu hususu,bir beton özelliği için önem taşıyorsa;bu özelliğin aldığı değerleri bu boşlukların sadece miktarı belirliyorsa,bu beton özelliği çimento hamuru yapısına duyarsızdır. Bir beton özelliğinin aldığı değerlere,çimento hamuru fazı içindeki boşlukların miktarından başka türü (veya geometrisi) de etkiliyorsa,bu beton özelliği çimento hamuru yapısına duyarlıdır [31].

### **1.5.2 Taze Betonun Yapısı**

Çimento taneleri arasında yer alan karma suyu kılcal boşlukları oluşturur. Agrega taneleri arasında çimento hamurunun girmediği hacimlerde,hapis olmuş hava boşlukları kalır.

1 m<sup>3</sup> yerleşmiş betonda;

Karma suyu hacmi : Kılcal boşluk hacmi : w

Hapis olmuş hava boşluğu hacmi : a

diyelim.

Toplam boşluk hacmi :  $V = w + a$

olur.

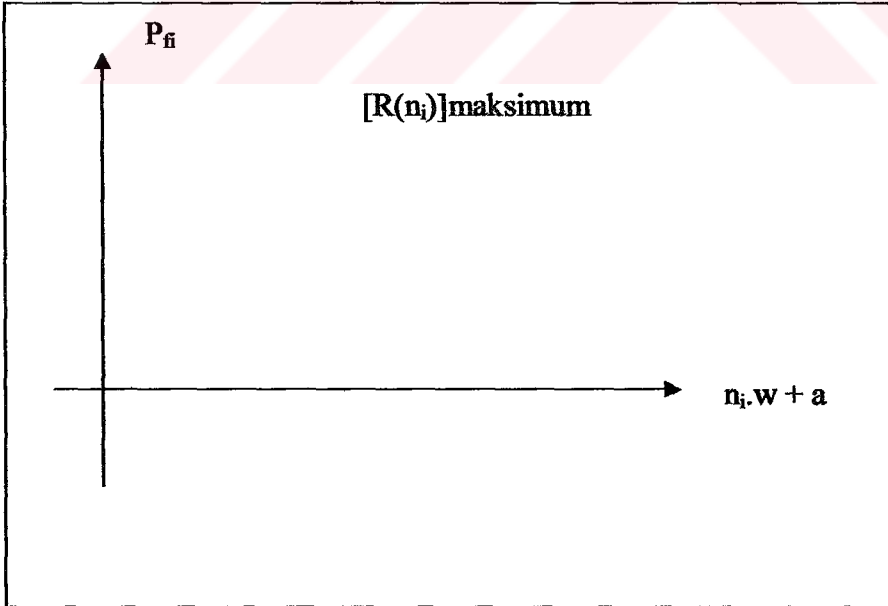
### 1.5.3 Taze Betonun Çimento hamuru yapısına Duyarlı ve Duyarsız Özellikleri- Duyarlılık Katsayısı

$P_{fi}$  bir taze beton özelliği olsun.  $n_i$  bir parametre olmak üzere, yeteri kadar büyük ve çeşitli bir beton grubunda  $P_{fi}$ 'nin aldığı değerleri [31],

$$n_i \cdot w + a \quad (1.18)$$

değişkenine göre ve  $n_i$  parametresine çeşitli değerler vererek inceleyelim.

$n_i = n_i^*$  için  $[R(n_i)]$  maksimum en büyük korelasyon katsayısı elde edilsin (Şekil 1.15)



Şekil 1.15  $P_{fi}$  taze beton özellikleri ile  $n_i \cdot w + a$  arasındaki ilişki

En büyük korrelasyon katsayısının elde edilmesinin,yatay ekseninde kullanılan değişkenin özellik üzerinde çimento hamurunun boşluk yapısının etkisini en iyi biçimde ifade etmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Yani  $n_i^*$  katsayısının özelliğini  $w$  ve  $a$ 'dan etkilenme oranlarını karşılaştırdığımızda,

bu durumda,eğer;

$n_i^* = 1$  ise,kılcal boşlukların hacmi ( $w$ ) ile hapis olmuş hava boşluğu hacmi ( $a$ ),özelliği aynı ağırlıkta etkiliyor demektir. Özellik çimento hamuru yapısına duyarlıdır.

$n_i^* \neq 1$  ise,özelliği boşlukların hacimlerinden başka,niteliği de etkiliyor demektir.Öyleyse hamur yapısına duyarlıdır.

$n_i^*$ ,1'den ne kadar uzak değerse, $w$  ve  $a$ 'nın özellik üzerinde o ölçüde farklı etkilere sahip olduğu anlaşılır. Bu durumda  $n_i^*$  değerine göz önüne alınan beton özelliğinin “çimento hamuru yapısına duyarlılık katsayısı” denebilir.

#### 1.5.4 Sertleşmiş Betonun Yapısı

Çimento tanelerinin yüzeylerinden başlayarak jelleşme olmuştur. Hidratasyona uğrayan her  $1 \text{ cm}^3$  anhidrate çimento  $2,06 \text{ cm}^3$  çimento jeli oluşturmuştur. Çimento taneleri arasındaki kılcal boşluklar,jelleşmeden dolayı daralmıştır. Bu boşluklar kısmen veya tamamen su ile dolu olabileceği gibi,kuru da olabilir.

Şimdi kılcal boşlukların daralmış hacmini hesap edelim.  $1 \text{ m}^3$  taze betonda kılcal boşluk hacmi  $w$ 'dir. Çimento tanelerinin gerçek hacimce  $\alpha$  (Hidratasyon derecesi) oranı hidrate olmuş bulunsun.  $1 \text{ m}^3$  yerleşmiş betonda,anhidrate çimentonun gerçek hacmine  $c$  dersek, $2,06.\alpha.c$  hacminde jel oluşur. Böylece,çimento taneleri hacmindeki artış (kılcal boşluklardaki azalma):

$$2,06.\alpha.c - \alpha.c = 1,06.\alpha.c \quad (1.19)$$

olur.

Kılcal boşlukların yeni hacmi:

$$w - 1,06.\alpha.c \quad (1.20)$$

Çimento hamurundaki toplam boşluk ise:

$$V = (w - 1,06.a.c) + a \quad (1.21)$$

olur.

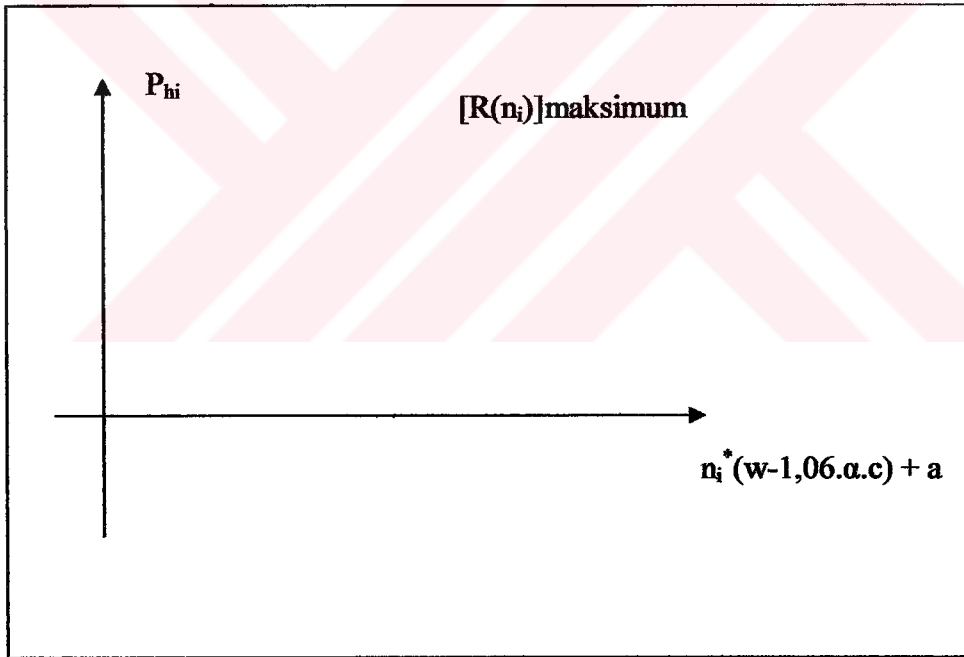
### 1.5.5 Duyarlılık Katsayısı

$P_{hi}$  bir sertleşmiş beton özelliği olsun.  $n_i$  bir parametre olmak üzere,yeteri kadar büyük ve çeşitli bir beton grubunda  $P_{hi}$ 'nin aldığı değerleri [31],

$$n_i (w - 1,06.a.c) + a \quad (1.22)$$

değişkenine göre ve  $n_i$  parametresine çeşitli değerler vererek inceleyelim.

$n_i = n_i^*$  için  $[R(n_i)]$  maksimum en büyük korelasyon katsayısı elde edilsin (Şekil 1.16)



Şekil 1.16  $P_{hi}$  sertleşmiş beton özellikleri ile  $n_i^*(w-1,06.a.c) + a$  arasındaki ilişki

Bölüm 1.5.3'te belirtilen düşünceler hatırlanırsa:

$n_i^* = 1$  ise, özellik hamur yapısına duyarsızdır.

$n_i^* \neq 1$  ise, özellik hamur yapısına duyarsızdır.

$(n_i^*)$ 'a göz önüne alınan beton özelliğinin çimento hamuru yapısına duyarlılık katsayısı denir.

### 1.5.6 Çimento Hamuru Yapısına Duyarlılığın Birim Ağırlığa Kıyasla Saptanması

Uygulamada  $\alpha$  hidrasyon derecesinin bilinmesi pek mümkün olmaz. Bu durumda da, çimento hamuru yapısına duyarlılığın yaklaşık bir yöntemle saptanması mümkündür. Aşağıda bu yöntem açıklanacaktır:

Bölüm 1.5.4'te,  $1 \text{ m}^3$  betonda, çimento hamuru fazındaki kılcal boşluk hacmi  $w - 1,06.\alpha.c$  olarak bulunmuştu.

$$w - 1,06.\alpha.c = \beta.w \quad (0 < \beta < 1) \quad (1.23)$$

diyelim.

Buradan;

$$\beta = 1 - (1,06.\alpha.c)/w \quad (1.24)$$

bulunur.

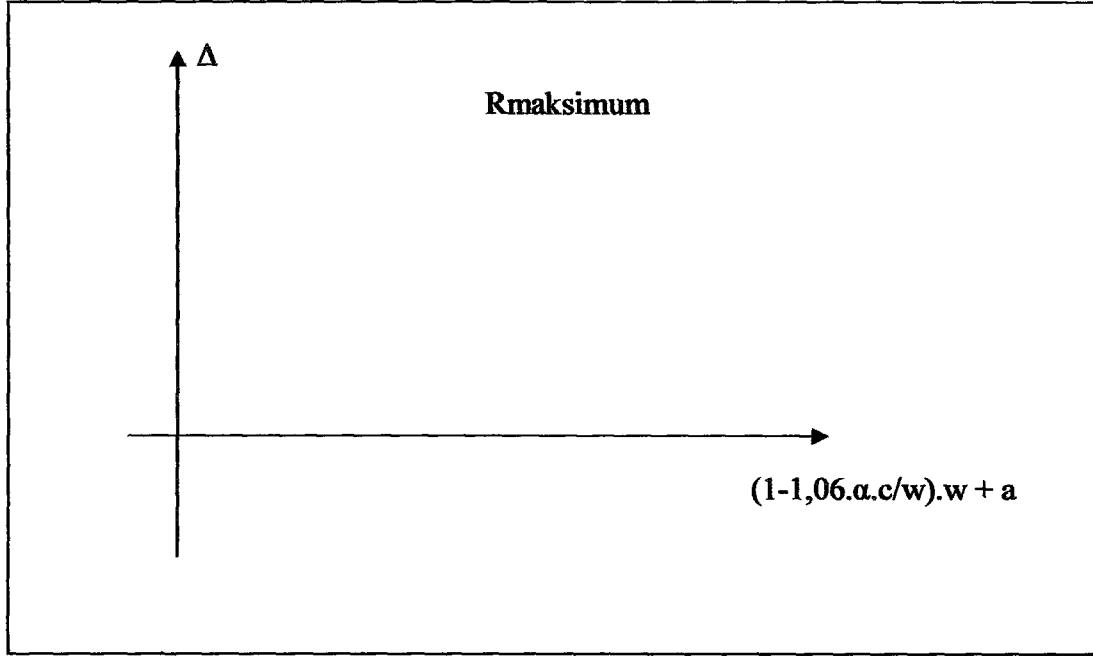
Bu durumda,  $1 \text{ m}^3$  betonda, çimento hamuru fazı içindeki toplam boşluk hacmi:

$$V = (1 - 1,06.\alpha.c/w).w + a \quad (1.25)$$

olur.

Grup içindeki betonların, kılcal boşlukları tamamen kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlık değerlerine  $\Delta$  diyelim.  $\Delta$ 'nın çimento hamuru yapısına duyarsız bir özellik olduğu aşikardır çünkü boşlukların birim ağırlıkta doğurduğu azalma, bunların sadece hacimlerine bağlıdır; şekilleriyle veya boyutlarıyla ilişkili değildir.

Bu durumda, Bölüm 1.5.5'te anlatılan incelemeyi  $\Delta$ 'ya uygularsak  $n_i^* = 1$  bulmamız gerekir.  $\Delta$ 'yı en iyi biçimde toplam boşluk hacmi belirler (Şekil 1.17).

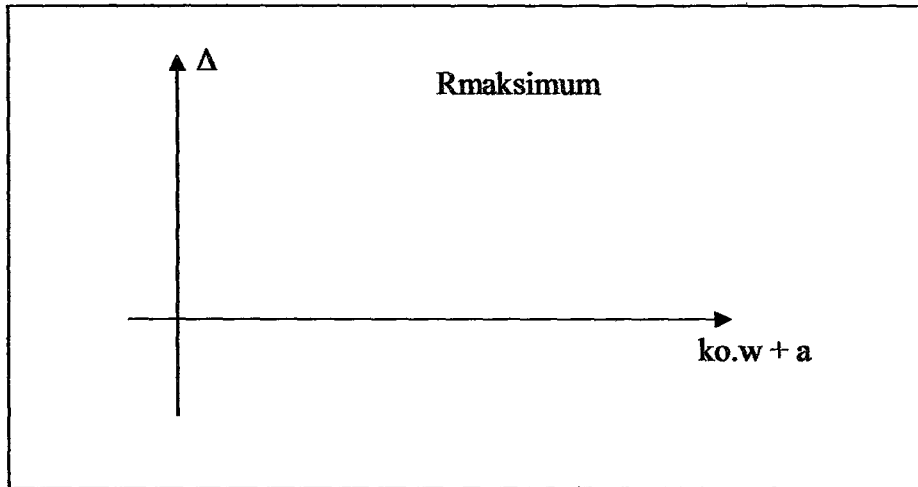


Şekil 1.17  $\Delta$  birim ağırlık ile  $(1-1,06.\alpha.c/w).w + a$  arasındaki ilişki

$(1-1,06.\alpha.c/w).w + a$  değişkeninde  $w$ 'nin önündeki  $(1-1,06.\alpha.c/w)$  çarpanı, serideki her beton için farklı bir değer alır. Diğer taraftan serideki her bir betonun hidrasyon derecesini bilmek gerekir. Bu zorluklardan kurtulmak amacıyla, serideki betonların  $\Delta$ 'larının değişimini  $k$  bir parametre olmak üzere ve  $k$ 'ya çeşitli değerler vererek [31]

$$k.w + a \quad (1.26)$$

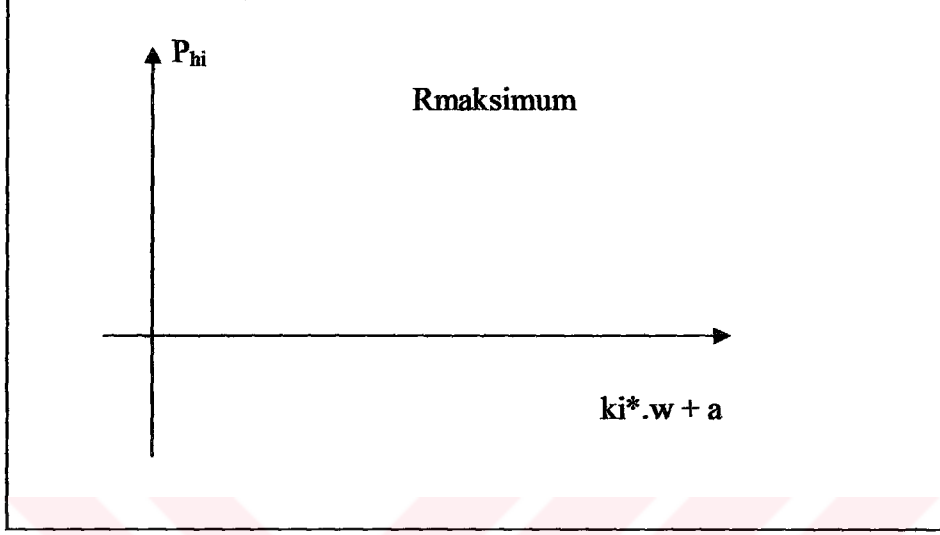
gibi bir değişkene göre inceleyelim.  $k = k_0$  için en büyük korelasyon katsayısını bulmuş olalım (Şekil 1.18).



Şekil 1.18  $\Delta$  birim ağırlık ile  $k_0.w + a$  arasındaki ilişki

Bu şekilde elde edilen  $k_0$  değerine  $(1-1,06.a.c/w)$  değerlerinin bir çeşit “merkezi eğilim parametresi”(Ortalama,medyan gibi) olarak bakılabilir.

Şimdi başka bir  $P_{hi}$  özelliğinin yine  $k.w + a$  değişkenine göre inceleyelim.  $k = k_i^*$  için en büyük korrelasyon katsayısı elde edelim (Şekil 1.19)



Şekil 1.19 Phi sertleşmiş özellikleri ile  $k_i^*.w + a$  arasındaki ilişki

Burada da,yaklaşık şekilde düşünerek  $k_i^*$  değeri  $n_i^*.(1-1,06.a.c/w)$  değerlerinin bir merkezi eğilim parametresi olarak düşünülür.

Eğer, $k_i^* = k_0$  ise, $P_{hi}$  çimento hamuru fazındaki boşluklardan  $\Delta$  gibi etkilenmektedir. Öyleyse çimento hamuru yapısına duyarlıdır.

Eğer, $k_i^* \neq k_0$  ise, $P_{hi}$  çimento hamuru yapısına duyarlıdır.

### 1.5.7 Özelliklerin Çimento Hamuru Yapısına 1.Tip Duyarlılık Derecesi

Herhangi bir ( $P_{hi}$ ) beton özelliği için:

$k_i^*/k_0 : (SD)_i : (P_{hi})$  özelliğinin 1.tip duyarlılık derecesi diyelim.

Bölüm 1.5.6'da  $k_0$ 'ın  $(1-1,06.a.c/w)$  değerlerinin, $k_i^*$ 'in ise  $n_i^*(1-1,06.a.c/w)$  değerlerinin bir merkezi eğilim parametresi olduğu söylenmiştir. ( $n_i^*$ ) duyarlılık katsayıları belirli bir beton özelliği için sabit idi.

$X'$ , bir toplumda,  $X$  değişkenlerinin bir merkezi eğilim parametresi olsun.  $\lambda$  sabit bir katsayı olmak üzere  $\lambda.X'$ ,  $(\lambda.X)$  değerlerinin aynı toplumdaki aynı merkezi eğilim parametresi olursa;

$$\lambda X' = \lambda.X' \quad (1.27)$$

Benzer şekilde, burada da,  $k_o$  ve  $k_i$  arasında [31],

$$k_i^* = n_i^* . k_o \quad (1.28)$$

yapılacağı düşünülebilir.

Ancak burada  $k_o$  ve  $k_i^*$  merkezi eğilim parametreleri tamamen aynı yolfan hesaplanmıştır.  $k_o$ 'ın hesabında düşey eksen  $\Delta$  (Şekil 1.16 ve 1.17),  $k_i^*$ 'ların hesabında ise düşey eksen  $P_{hi}$ 'lerdir (Şekil 1.18). Bu durumda yukarıdaki eşitlikte bir yaklaşıklık olduğu anlaşılır ve;

$$k_i^* \approx n_i^* . k_o \quad (1.29)$$

yazılır. Buna göre [31];

$$(SD)_i = k_i^*/k_o \approx n_i^* \quad (1.30)$$

olduğu görülür.

Buradan, bir  $P_{hi}$  beton özelliğine ait  $(SD1)_i$  1. tip duyarlılık derecesinin, Bölüm 1.5.3'te tanımlanan aynı özelliğe ait  $n_i^*$  duyarlılık katsayısına yaklaşık olarak eşit olduğu anlaşılır.

### 1.5.8 Özelliklerin Çimento Hamuru Yapısına 2. Tip Duyarlılık Derecesi

Herhangi bir  $P_{hi}$  beton özelliğine ait  $(SD2)_i$  ikinci tip duyarlılık derecesi [31]:

$$(SD2)_i = R(k_i^*)/R_i(k_o) \quad (1.31)$$

Burada;

$R(k_i^*)$  :  $P_{hi}$  özelliğinin değişimi,  $(k.w + a)$ 'ya göre,  $k$  parametresine çeşitli değerler vererek incelendiğinde, elde edilen en büyük korrelasyon katsayısı

$R_i(k_0) : P_{hi}$  özelliği için yapılan aynı incelemede,  $k$  parametresine, birim ağırlık için en büyük korelasyon katsayısını veren  $k_0$  değerini vererek elde edilen korelasyon katsayısı

Bu durumda,  $(SD2)_i, P_{hi}$  özelliği  $(k.w + a)$ 'ya göre incelendiğinde, hamur yapısına duyarlılığı göz önüne alınmayıp duyarsız kabul edilse, elde edilen korelasyonun ne kadar bozulduğunun bir ölçüsü olmaktadır.

Ref [31]'de, beton özelliklerinin çimento hamuru yapısına duyarlılıklarının, duyarlılık dereceleriyle niceliksel olarak ifade edilebileceği gösterilmiştir. Tanımlanan iki tip duyarlılık derecesinden, ikincisinin özellikleri iç yapıya göre ifade eden fonksiyondan daha az etkilendiği dolayısıyla daha anlamlı olduğunu anlamak için, beton özellikleri arasındaki korelasyonları da birlikte incelemek gerekecektir.

## 1.6 Beton Özellikleri arasındaki Korelasyonları Belirleyen Etkenler

### 1.6.1 Duyarlılık Yakınlığı Katsayıları

Bir beton özelliğinin çimento hamuru yapısına 1.tip duyarlılık derecesi  $(SD1)_i$  ve 2.tip duyarlılık derecesi  $(SD2)_i$  yukarıda tanımlandı.  $(SD)_i$  herhangi bir beton özelliğinin 1. veya 2.tip duyarlılık derecesini ifade eden daha genel bir sembol olsun. Buna göre:

$$t_{ij} = (SD)_i / (SD)_j \text{ ve } t_{ij} \leq 1 \quad (1.32)$$

ile tanımlanan  $t_{ij}$ 'ye  $P_{hi}$  ve  $P_{hj}$  özelliklerinin çimento hamuru yapısına duyarlılık benzeşim katsayısı diyelim.

Yukarıdaki tanıma göre  $t_{ij}$  katsayıları 0 ile 1 arasında değişen değerler alır.  $t_{ij}$ 'nin 1'e yakın olması,  $P_{hi}$  ve  $P_{hj}$  özelliklerinin çimento hamuru yapısına duyarlılık bakımından benzer olduğunu gösterir.

### 1.6.2 Bileşim Etkenlerinden Etkilenme Yakınlığı Katsayıları

Denklemler (1.28),(1.30) ve (1.31)'de görüldüğü gibi beton özelliklerinin çimento hamuru yapısına duyarlılık bakımından benzeşimi ile bu özellikler arasındaki bağımlıların korelasyon katsayıları arasında güvenilir ilişkiler bulunduğu görüldü. Acaba bu korelasyon katsayıları ile özelliklerin başka açılardan benzerlikleri arasında da ilişkiler var mıdır? Bunu anlamak için,özellikleri bu çalışmada göz önüne alınan bileşim faktörlerindeki değişimlerden etkilenme dereceleri hesaplanmış;bu etkilenme derecelerindeki benzeşim ile,özellikler arasındaki korelasyon katsayıları arasında olan ilişkiler araştırılmıştır.

$$(P_{hi})' = A(c + w + a)' + B(c/k.w + a)' + C(m)' + D \quad (1.33)$$

fonksiyonu göz önüne alalım. Burada üstülü parantez içindeki değişkenler,o değişkenin seri içindeki ortalamasına oranını gösterebilir. Bu durumda A,B ve C katsayıları göz önüne alınan  $P_{hi}$  özelliğinin sırasıyla çimento hamuru hacmindeki,çimento hamuru yapısındaki ve agrega granülümetrisindeki değişimlerden ne ölçüde etkilendiğini ifade eder.

A,B ve C katsayılarına göz önüne alınan doğrusal bağıntının eğimleri olarak bakılabilir. Herhangi iki özellikte bu katsayıların ne ölçüde benzediğini anlamak için bu eğimlerin farklarının mutlak değerlerini hesaplamamızın uygun olacağı düşünülmüştür. Böylece,herhangi farklı iki i ve j özelliği için:

$$T(A)_{ij} = | A_i - A_j | \quad (1.34)$$

$$T(B)_{ij} = | B_i - B_j | \quad (1.35)$$

$$T(C)_{ij} = | C_i - C_j | \quad (1.36)$$

değerleri hesaplanmıştır. T değerleri ne kadar büyükse i ve j özellikleri için göz önüne alına A,B ve C katsayıları da o kadar farklı olur. Bu durumda i ve j özelliklerinin ilgili bileşim faktörlerindeki değişimlerden benzemeyen biçimde etkilendiği anlaşılır.

Ref [32]'de elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1-(SD2)i ikinci tip duyarlılık dereceleri özellikler arasındaki korelasyonları aydınlatmada da (SD1)i birinci tip duyarlılık derecelerinden daha başarılıdır.

2-Beton özellikleri iç yapı faktörlerine bağlayan fonksiyonlar içinde en anlamlı duyarlılık derecelerinin hesabını sağlayanlar,çimento hamuru fazı ile ilgili mümkün olduğunca çok değişken içeren ve sadece bunları içeren fonksiyonlardır.

3-Beton özellikleri arasındaki korelasyonlarının kuvvetli veya zayıf olmasındaki en önemli neden özelliklerin çimento hamuru yapısına duyarlılık derecesidir.

Bileşim faktörlerinden etkilenme bakımından benzeşimler,bu faktörler tek tek ele alındığında özellikler arasındaki korelasyonları aydınlatmada pek başarılı olmamaktadır. Fakat faktörler bir arada ele alındığında bu konuda yeterli bir başarı sağlanmaktadır. Ancak,yine de,çimento hamuruna duyarlılık bakımından benzeşimin başarısına ulaşılamamaktadır.

Beton özellikleri hem çimento hamuru yapısına duyarlılık,hem de bileşim faktörlerinden etkilenme bakımından benzeşimlerin bir arada göz önünde tutulması ise,bu özellikler arasındaki korelasyonların kuvvetli veya zayıf olmasını çok güvenilir derecede açıklamaktadır.

## 2.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde laboratuarda yapılan deneysel çalışmalar açıklanmıştır. Önce,kullanılan malzemeler hakkında kısa bilgiler verildikten sonra üretilen beton numuneleri ile saklama ve deney koşulları anlatılmıştır.

### 2.1 Kullanılan Malzemeler

#### 2.1.1 Çimento

Bütün üretimlerde Akçansa Çimento Fabrikasının üretimi olan PÇ 32,5 çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı  $2.97 \text{ gr/cm}^3$  olarak ölçülmüştür. Bütün beton üretimleri için dozaj  $350 \text{ kg/m}^3$  olarak kabul edilmiştir.

#### 2.1.2 Agregalar

Deneylerde kullanılan agregalar kırmataş 1,kum ve taş tozu kullanılmıştır. Tüm üretimlerde aynı tip agregalar kullanılmış değiştirilmemiştir.

Tablo 2.1 Kullanılan agregaların özgül ağırlıkları

Agrega Türü	Özgül ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ )
Kum	2.60
Kırmataş 1	2.72
Taş tozu	2.70

Üretimlerde kullanılan agregaların temizliğine özen gösterilmiş, beton içinde yabancı maddelerin bulunmamasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, beton içinde kullanılırken yüzeyi kuru suya doymun bir halde olmasına dikkat edildi. Tartımları çok dikkatli yapıldı.

### 2.1.3 Su

Üretimlerde şehir şebeke suyu kullanıldı.

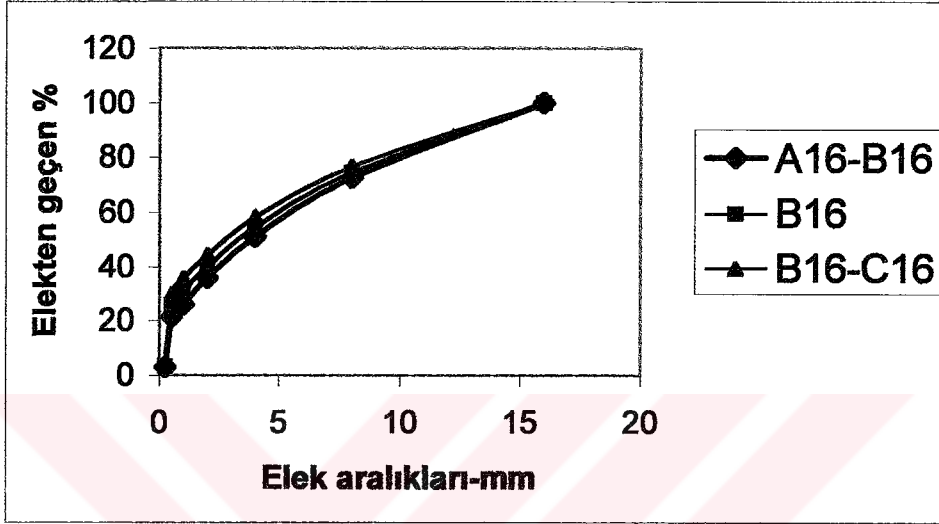
### 2.2 Agregaların Karışım Oranları

Üretilen betonlarda kum, kırmataş 1, taş tozu kullanılmıştır. Bunlara ait elek analizi sonuçları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 Kullanılan agregaların elek analizi değerleri

Elek Boyutları (mm)	% Geçen		
	Kum	Kırmataş 1	Taş tozu
32	-	-	-
16	100	100	100
8	61	100	99
4	31	100	93
2	15	100	52
1	3	100	37
0.5	2.5	86	24
0.25	2	6.4	3.4

Agregaların hacimce karışım oranları A16-B16 granülometri eğrileri arasında kalacak şekilde olduğunda kırmataş 1 % 70,kum % 20,taş tozu % 10 olarak belirlendi. B16 granülometri eğrisi içinde kalacak şekilde olduğunda kırmataş 1 % 65 kum % 25,taş tozu % 10 olarak belirlendi. B16-c16 granülometri eğrileri arasında kalacak şekilde olduğunda kırmataş 1 % 60,kum % 30,taş tozu % 10 olarak belirlendi.



Şekil 2.1 Granülometri eğrilerinin topluca gösterimi

## 2.3 Beton Karışımları

### 2.3.1 Yapılan Varsayımlar

- Üç ayrı granülometri eğrisine göre beton üretildi.
- En büyük agrega boyutu sabit ve 16 mm olarak alındı.
- Aynı cins çimento kullanıldı,hiçbir katkı maddesi kullanılmadı.
- Agregalar yüzeyi kuru suya doygun durumda kullanıldı. Böylece etkin su/çimento oranı sabit tutuldu. Ancak her bir granülometri için 0.50'den başlayıp 0.05 arttırarak 0.70'e kadar 5 ayrı su/çimento oranı kullanılmış olundu.

### 2.3.2 Beton Bileşim Hesabı

Beton karışım hesapları mutlak hacim yöntemine göre yapıldı. Öncelikle her ayrı granülometri eğrisi için önce deneme betonu üretilerek her bir granülometri eğrisi için başlayacağımız su/çimento oranını tespit ettik. Bu oranı VeBe aletinde 7-8 saniye veren taze betonun su/çimento oranı olarak kabul ettik. Ayrıca,taze birim ağırlık ve hava miktarları bulunup asıl üretime geçildi. Asıl üretimde her bir eğri için 0.50'den başlayıp 0.05 artırarak 0.70'e kadar olan su/çimento oranlı betonlar üretilerek toplam 15 beton üretimi yapıldı. Bütün üretimlerde çimento aynı tip olup,dozajı  $350 \text{ kg/m}^3$  olarak sabit tutulmuştur.

### 2.3.3 Beton Üretimi

Betonların üretiminde düşey eksenli cebri karıştırıcı 50 dm<sup>3</sup> kapasiteli betoniyer kullanıldı. Bütün betonlardaki karıştırma bir defada bütün malzemeler bir arada karıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemeler kuru olarak karıştırıldıktan sonra gerekli su miktarı yavaş bir şekilde döküldükten sonra,1,5-2 dakika kadar bir süre karıştırmaya devam edilip beton üretildi.

Taze beton üzerinde 2 defa birim ağırlık debneyi ve çökme deneyi yapıldıktan sonra beton bir süre daha karıştırılıp ardından vibratör yardımıyla kalıplara yerleştirildi.

### 2.3.4 Üretilen Numuneler

Üretilen betonlar üç tip kalıba yerleştirildi. Bunlar 4 adet 150\*150 mm'lik küp,8 adet 150\*300 mm'lik silindir ve 6 adet 60\*150 mm'lik disk numunelerdir. Numuneler 2 defada döküldü. İlk dökülen numunelere A,sonrakilere B işareti konuldu. Her bir deney için A numunelerinin yarısı ile B numunelerinin yarısı kullanılmıştır. 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 21 gün süreyle  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki kirece doymun suda saklandı. 21.günde tüm numuneler havuzdan çıkartılarak havuzların bulunduğu odada bekletildi. Ayrıca silindir numunelere kum-çimento karışımı başlık yapıldı. 28.günde basınç ve yarma deneyleri yapıldı. Küp numuneler 35.günde 4 saat  $105^{\circ}\text{C}$

etüvde tutulup sonra çıkartılıp tartılarak ve boyutları ölçülüp birim ağırlıkları hesaplandı.

#### 2.4 Sertleşmiş Beton Deneyleri

28.günde diskler üzerinde yarma deneyi,silindirler üzerinde şekil değiştirme deneyi ve gevreklik indisi deneyi uygulandı.

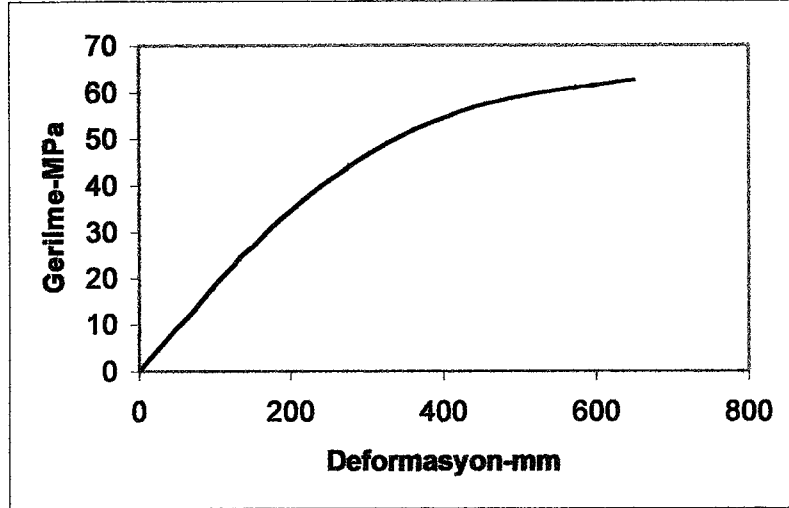
Yarma deneyleri 1000 kN kapasiteli Amsler marka basınç presinde gerçekleştirildi. Yarma deneylerinde uygulanan yükü üniform dağıtmak için numunenin alt ve üst kısımlarına karşılıklı olacak şekilde birer çita yerleştirildi. Silindir üzerindeki deneyler Amsler marka 500 ton kapasiteli preste yapıldı. Yük sabit bir hızda uygulandı ve her bir 2.5 tonda bir bu yüke karşılık gelen boyuna şekil değiştirmeler okundu.

Silindirlerdeki boyuna şekil değiştirmeler numune üzerine takılan ve betonun ekseninde meydana gelen kısalmanın iki katını veren özel bir çerçeve yardımıyla ölçüldü. Bu çerçeve üzerine takılan 1/1000 mm hassasiyetli komparatörle okumalar yapıldı.

Bu bölümde deney sonuçlarının değerlendirilmesi ile ilgili bazı tanımlar ve açıklamalar yapılmıştır. Bulunan sonuçlar ve genel değerlendirmeler bir sonraki bölümlerde açıklanmıştır.

Öncelikle silindir numunelerin yarısında ölçülen şekil değiştirmelerden yararlanılarak elastisite modülü (E) hesaplandı. Elastisite modülü,yüklemenin başlangıç değerlerinde hemen hemen sabittir. Bu durum betonun başlangıçta yaklaşık olarak doğrusal davranış gösterdiği şeklinde yorumlanır. Betonun tek eksenli basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

Basınç dayanımının yaklaşık 1/3'üne kadar gerilmeler ile şekil değiştirme arasındaki bağıntı lineerdir. Elastisite modülü değerleri gerilme-şekil değiştirme eğrisinde basınç dayanımının 1/3'üne kadar,bu yaklaşımdan yararlanarak doğrusal korelasyon eğim hesaplanarak elde edildi. Ölçüm hatalarının önemli olacağı düşünülen bazı lineerlikten sapan ilk noktalar değerlendirmede göz önüne alınmadı.



Şekil 2.2 Tek eksenli basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi

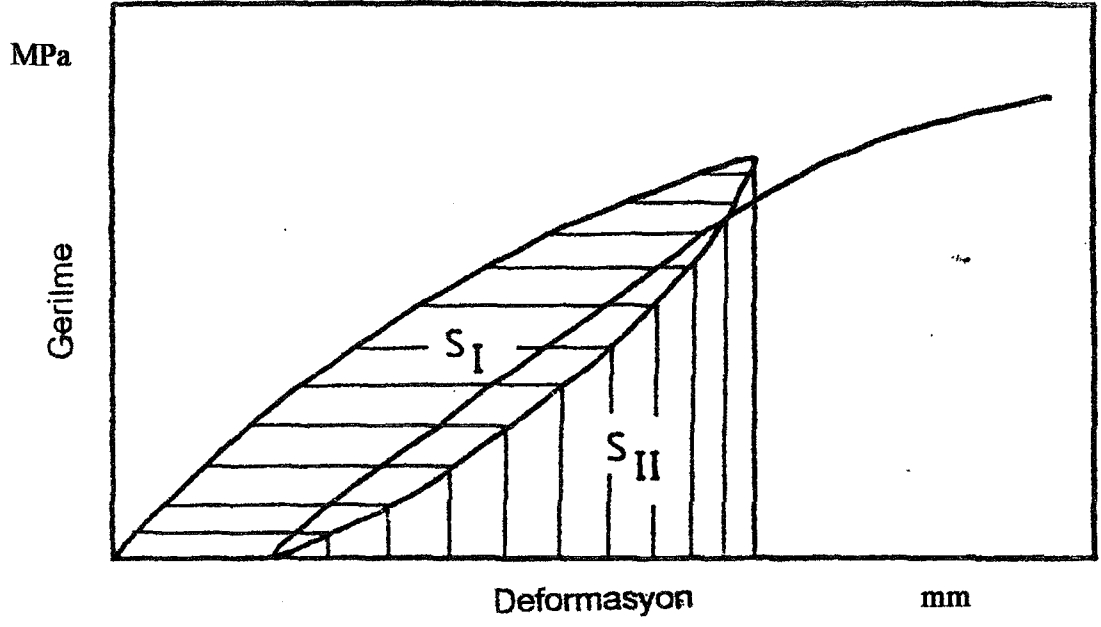
Betonun gevreklik indisleri, silindir numunelerin yarısının basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edildi. Bunun için numunelere bir kez yükleme boşaltma ve ardından kırılana kadar yükleme yapıldı. Tüm bu süreçte numunelerdeki boyuna şekil değiştirmeler ölçüldü. İlk yüklemede uygulanacak maksimum yük miktarı boyuna şekil değiştirmelerin artış oranına göre, deney sırasında belirlendi. Şekil değiştirmelerin önemli derecede arttığı görüldüğünde yük boşaltılmaya başlandı. Tüm numunelerde ilk uygulanan yükün numunenin basınç dayanımına % 80 ile % 90 arasında değişti.

Bu deneyden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu yükleme boşaltma eğrileri histerisis eğrileri veya çevrimleri olarak da adlandırılabilir.

Betonun gevreklik indisi (G.İ) basınç dayanımının % 80-% 100 arasında "tersinir deformasyon enerjisinin tersinmez deformasyon enerjisine oranı" olarak tanımlanır.

$$G.İ = S_2/S_1 \quad (2.1)$$

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi  $S_1$  numunedeki hasara bağlı olarak tersinmez (kalıcı) deformasyon enerjisi,  $S_2$  ise tersinir (elastik) deformasyon enerjisidir.



Şekil 2.3 Betonun tekrarlı yükleme halinde gerilme-şekil değışitirme eğrisi

$S_2/S_1$  oranı sıfıra yaklaştıkça enerjinin tümü tersinmez,  $S_2/S_1$  oranı sonsuza yaklaştıkça enerjinin tümü tersinir olur. Gevreklik indisinin büyümesi malzemenin gevrekliğinin arttığını gösterir.

### **3. DENEY SONUÇLARI**

Bu bölümde deney sonuçlarının irdelenmesi ve değerlendirmesi yapıldı. Farklı su/çimento oranlarının betonun dayanımına ve gevrekliğine ne tür değişiklikler yaptığı üzerinde duruldu.

#### **3.1 Taze Beton Özellikleri**

Agregalar yüzeyi kuru suya doygun olarak kullanıldı. Beton bileşimleri hesaplanırken ayrı granülometriye sahip betonların su/çimento oranları 0.50'den başlayıp 0.05 arttırarak 0.70'e kadar belirlendi. Farklı granülometriye sahip betonların işlenebilmesi su/çimento oranı 0.50 olduğunda biraz daha zor olmakta ancak 0.65-0.70 oranlarında ise kıvam daha akıcı olup işlenbilme daha rahat olmaktadır.

Üretilen betonların VeBe deneylerinde 0.50 oranı 7-8 saniye verirken, oran arttıkça 0.70 oranında 1-1,5 saniye değer vermektedir. Ayrıca su/çimento oranı 0.55'e kadar çökme oluşmamakta fakat bundan sonraki oranlarda ise e1 cm'den başlayıp 2.5 cm'e kadar olmaktadır. Bunun yanında üretilen betonların birim ağırlıkları incelendiğinde ise su/çimento oranı değerlerinin etkisi açıkça görülmektedir. Farklı granülometri eğrilerine sahip betonlarda su/çimento oranındaki artış ile beton birim ağırlıkları artmaktadır.

#### **3.2 Yarma Deneyleri**

Tablo 3.1'de betonların 28.gündeki yarma dayanımları gösterilmiştir. Bu sonuçlar 6'şar değerlerin ortalamasıdır.

Tablo 3.1 Disk numunelerde yarma deney sonuçları (MPa)

Granülometri	Su/Çimento Oranları				
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Eğrisi					
A16-B16	5.00	4.93	4.27	3.80	3.56
B16	5.04	4.86	4.32	3.96	3.32
B16-C16	4.22	3.84	3.20	2.60	1.25

### 3.3 Elastisite Modülleri

Tablo 3.2’de betonlar üzerinde 28.günde yapılan elastisite modülü deney sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlar 4’er değerın ortalamasıdır.

Tablo 3.2 Üretilen betonların elastisite modülleri

Granülometri	Su/Çimento Oranları				
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Eğrisi					
A16-B16	34600	32750	32100	26750	26300
B16	33700	32600	30300	28650	23900
B16-C16	31450	29200	28350	28250	26000

### 3.4 Gevreklik İndisleri

Gevreklik indisi silindir numuneler üzerinde 28.günde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Tablo 3.3’te istenen su/çimento oranlarına göre farklı granülometri eğrileri için bulunan gevreklik indisleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3 Su/çimento değişimine göre gevreklik indisi

Granülümetri Eğrisi	Su/Çimento Oranları				
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
A16-B16	3.65	2.90	2.71	2.40	1.70
B16	3.21	2.56	2.37	2.30	1.93
B16-C16	2.80	2.52	2.36	2.29	1.68

### 3.5 Basınç Dayanımları

Tablo 3.4'te betonlara ait 28.günlük dayanımları gösterilmiştir. Bu sonuçlar 4'er numunenin ortalamasıdır.

Tablo 3.4 Silindir numuneler üzerinde basınç deneyi sonuçları (MPa)

Granülümetri Eğrisi	Su/Çimento Oranları				
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
A16-B16	35.3	33.0	28.6	22.5	18.8
B16	34.3	32.3	25.1	21.4	18.3
B16-C16	26.8	25.2	24.0	21.2	16.7

### 3.6 Betonların Birim Ağırlıkları

Tablo 3.5'te 35.günde 105<sup>0</sup> C'de etüvde tutulmuş küp numunelerin ölçülüp tartılarak elde edilmiş birim ağırlıkları gösterilmiştir.

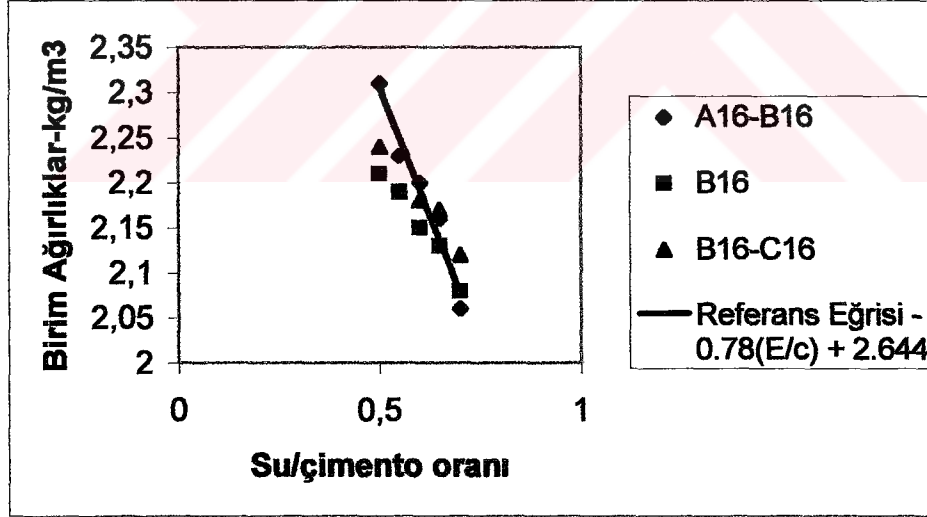
Tablo 3.5 Küp numunelerin birim ağırlıkları (kg/cm<sup>3</sup>)

Granülümetri Eğrisi	Su/Çimento Oranları				
	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
A16-B16	2.31	2.23	2.20	2.16	2.06
B16	2.21	2.19	2.15	2.13	2.08
B16-C16	2.24	2.19	2.18	2.17	2.12

## 4.DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ

### 4.1 Birim Ağırlıklar

Çeşitli granülömetrilere sahip betonların sertleşmiş haldeki birim ağırlıklarının su/çimento oranına göre değişimleri Şekil 4.1’te görülmektedir. Su/çimento oranının artmasıyla birim ağırlıklar azalmaktadır. Şekilde çeşitli granülömetrilere ait sonuçlar birbirinin içine karışmaktadır. Yani granülömetrinin belirgin bir etkisi gözlenmemektedir.

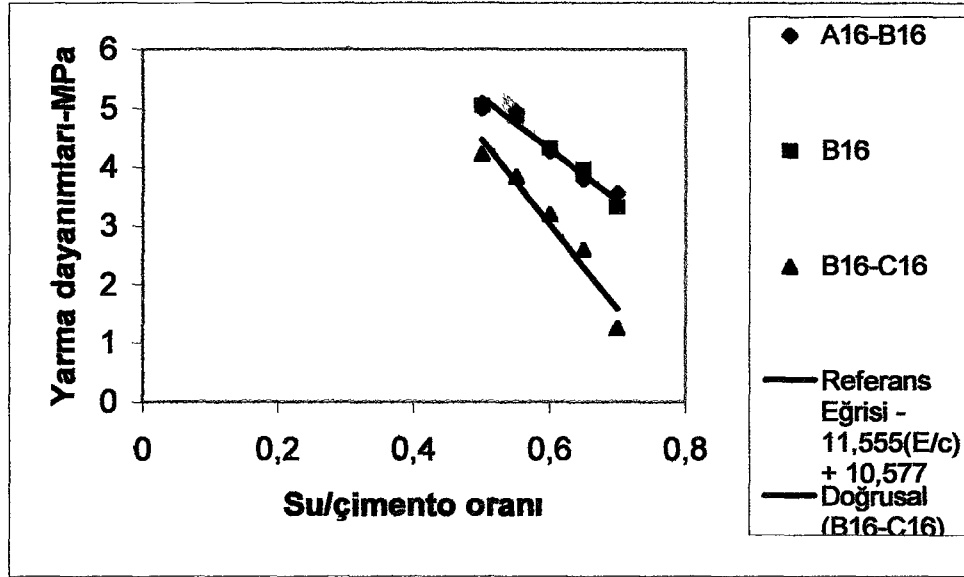


Şekil 4.1 Birim ağırlık ile su/çimento oranına rasındaki ilişki

### 4.2 Yarma Dayanımları

Çeşitli granülömetrilere sahip betonların sertleşmiş haldeki yarma dayanımlarının su/çimento oranına göre değişimleri Şekil 4.2’te görülmektedir. Su/çimento oranının artmasıyla yarma dayanımları azalmaktadır. Şekilde çeşitli granülömetrilere ait

sonuçlar birbirinin içine karışmaktadır. Yani granülömetrilerinin belirgin bir etkisi gözlenmemektedir.



Şekil 4.2 Yarma dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

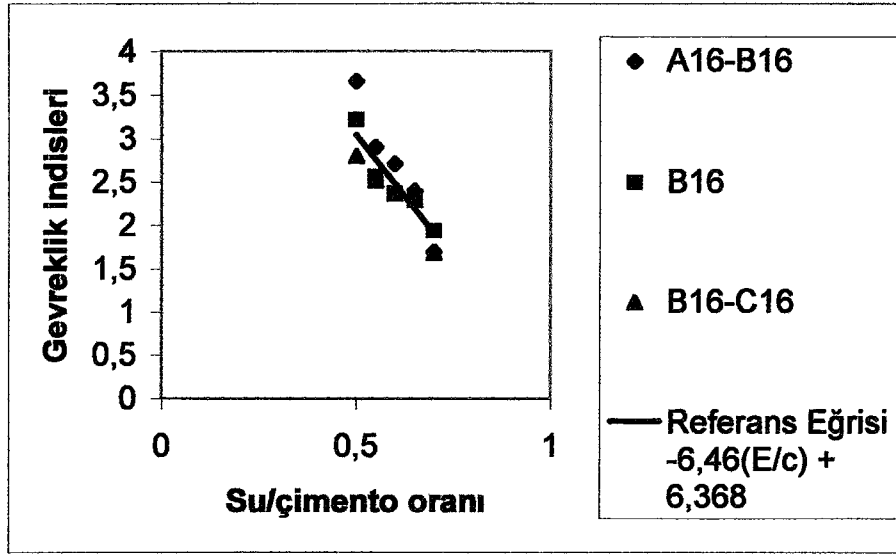
Yarma dayanımı ile su/çimento oranı arasındaki ilişki Şekil 4.2’te incelendiğinde su/çimento oranı arttıkça yarma dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bu davranış bütün granülömetri değerleri içinde aynı olmuştur. Yarma dayanımının çimento hamuru kıvamının akıcı olduğu durumlarda düşük değerler aldığı görülmüştür. Özellikle kum oranı yüksek B16-C16 granülömetrisinde yarma dayanımlarının daha düşük değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bu durumu B16-C16 betonlarında hava boşluğunun daha fazla olmasına bağlamak mümkündür. Genel olarak deneylerde disk numunelerin orta bölgesinde çatlama meydana gelmiştir.

### 4.3 Gevreklik İndisleri

Çeşitli granülömetrilere sahip betonların sertleşmiş haldeki gevreklik indislerinin su/çimento oranına göre değişimleri Şekil 4.3’te görülmektedir. Su/çimento oranının artmasıyla gevreklik azalmaktadır.

Şekil 4.3’te görüldüğü gibi su/çimento oranı düştükçe yani basınç dayanımı arttıkça gevreklik artmaktadır. Bu durum ayrıca düşük su/çimento oranlı betonlarda agrega-çimento ara yüzeyinin kuvvetli olduğunu göstermektedir. Değişik granülömetrilere

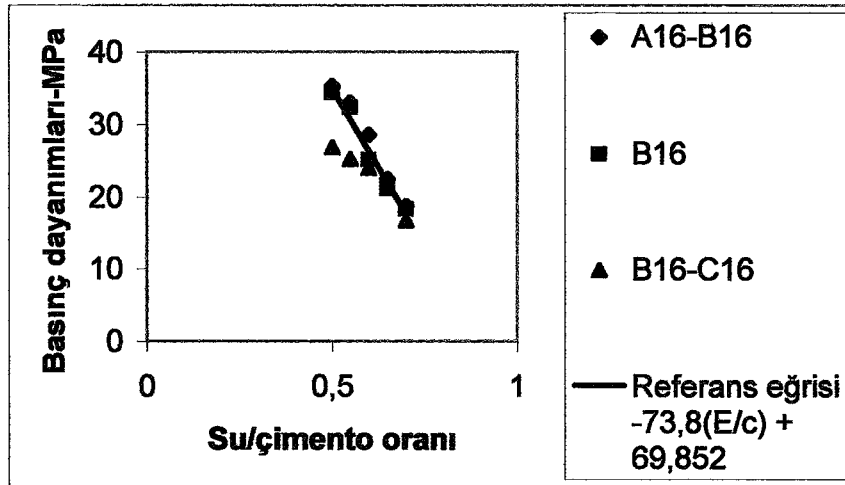
ait sonuçlar birbirinin içine karışmaktadır yani granülömetrilerin gevreklik indisi üzerinde kayda değer bir etkisi gözlenmemiştir.



Şekil 4.3 Gevreklik indisi ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

#### 4.4 Basınç Dayanımları

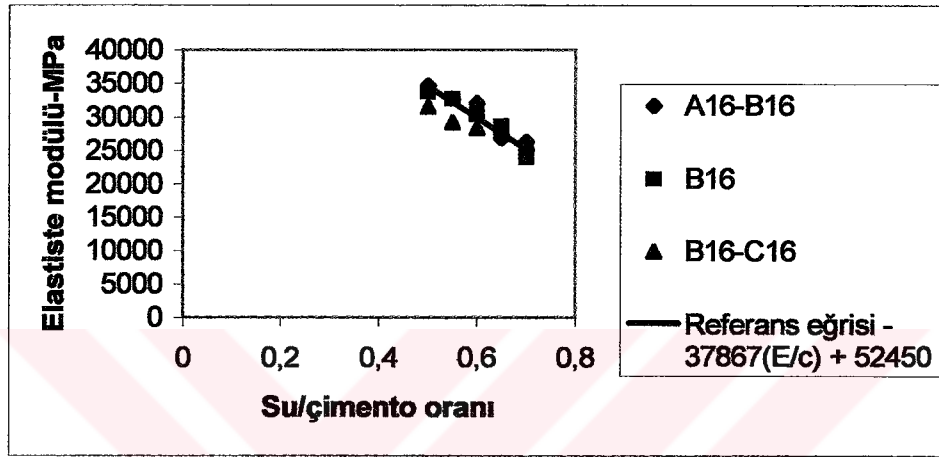
Çeşitli granülömetrilere sahip betonların sertleşmiş haldeki basınç dayanımlarının su/çimento oranına göre değişimleri Şekil 4.4'te görülmektedir. Su/çimento oranının artmasıyla basınç dayanımları azalmaktadır. Şekilde çeşitli granülömetrilere ait sonuçlar birbirinin içine karışmaktadır. Yani granülömetrinin belirgin bir etkisi gözlenmemektedir.



Şekil 4.4 Basınç dayanımları ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

#### 4.5 Elastisite Modülleri

Çeşitli granülömetrilere sahip betonların sertleşmiş haldeki elastisite modüllerinin su/çimento oranına göre değişimleri Şekil 4.5'te görülmektedir. Su/çimento oranının artmasıyla elastisite modülleri azalmaktadır. Şekilde çeşitli granülömetrilere ait sonuçlar birbirinin içine karışmaktadır. Yani granülömetrinin belirgin bir etkisi gözlenmemektedir.

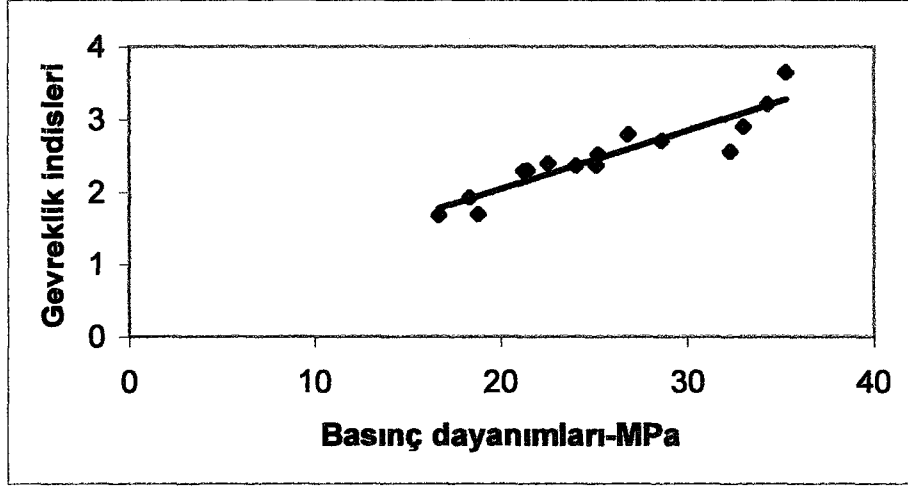


Şekil 4.5 Elastisite modülü ile su/çimento oranı arasındaki ilişki

Şekil 4.5'te görüldüğü gibi su/çimento oranı arttıkça elastisite modülünün azaldığı görülmüştür. Burada da B16-C16 değerleri diğerlerinin biraz altında yer almaktadır. Bunu da hava boşluğunun daha fazla olmasına bağlamak yerinde olur.

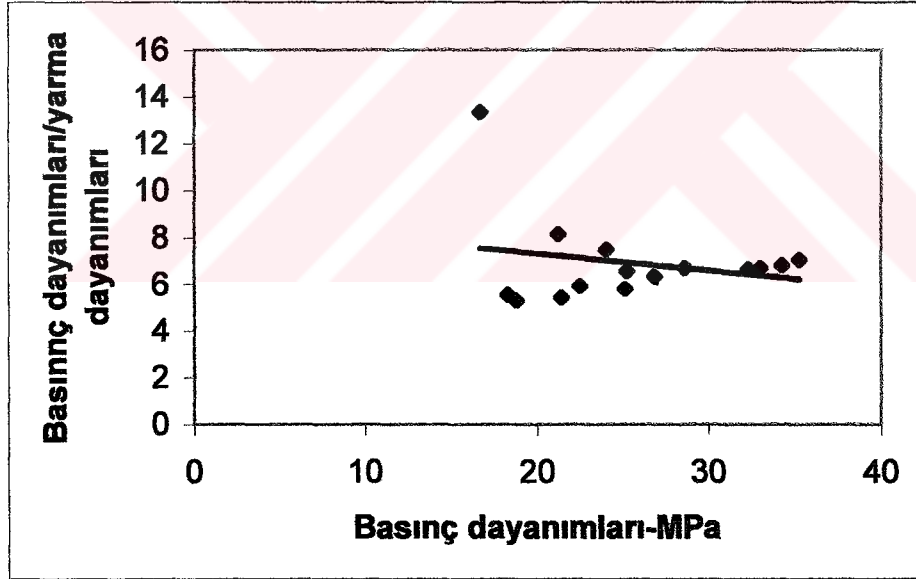
#### 4.6 Gevrekliğin Basınç Dayanımına Göre Değişimi

Şekil 4.6 incelendiği zaman, basınç dayanımı arttığı zaman gevreklik indislerinin de arttığı görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonların gevrekliğinin de yüksek olduğu görüşünü Şekil 4.6 desteklemiştir.



Şekil 4.6 Gevrekliğin basınç dayanımına göre değişimi

#### 4.7 Basınç Dayanımı/Yarma Dayanımı Oranının Basınç Dayanımına Göre Değişimi



Şekil 4.7 Basınç dayanımları/yarma dayanımlarının oranının basınç dayanımlarına göre değişimi

Basınç dayanımları arttıkça basınç dayanımları ile yarma dayanımları arasındaki oran artmaktadır yani beton gevrekleşmektedir.

#### 4.8 Özelliklerin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı

Sertleşmiş beton özelliklerinin;

$$A(k.w + a) + B \quad (4.1)$$

$$A(c/k.w + a) + B \quad (4.2)$$

$$A(c + w + a) + B(c/k.w + a) + C \quad (4.3)$$

$$A(c + w + a) + B(c/k.w + a) + C(m) + D \quad (4.4)$$

Bağıntılarına göre (1.28),(1.30),(1.31) denklemlerinin hesabı Tablo 4.1,4.2,4.3 ve 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Özelliklerin (4.1)'e göre  $ki^*$ ,  $(SD1)_i$ ,  $R(ki^*)$ ,  $R(ko)$  ve  $(SD2)_i$  değerleri

Özellik	$ki^*$	$(SD1)_i$	$R(ki^*)$	$R(ko)$	$(SD2)_i$
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	1,04	0,301	0,9715	0,9321	1,04
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	3,46	1,000	0,8924	0,8924	1,00
Yarma Dayanımı-MPa	0,99	0,286	0,8150	0,7758	1,05
Gevreklik İndisi	1,38	0,399	0,9347	0,9192	1,02
Elastisite Modülü-MPa	1,35	0,390	0,9322	0,9154	1,02

Tablo 4.2 Özelliklerin (4.2)'ye göre  $k_i^*$ ,  $(SD1)_i$ ,  $R(k_i^*)$ ,  $R(k_o)$  ve  $(SD2)_i$  değerleri

Özellik	$k_i^*$	$(SD1)_i$	$R(k_i^*)$	$R(k_o)$	$(SD2)_i$
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	1,78	0,121	0,9634	0,9203	1,05
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	1,14	1,000	0,8766	0,8766	1,00
Yarma Dayanımı-MPa	1,33	0,117	0,7987	0,7605	1,05
Gevreklik İndisi	2,05	0,180	0,9266	0,9102	1,02
Elastisite Modülü-MPa	1,95	0,171	0,9208	0,9022	1,02

Tablo 4.3 Özelliklerin (4.3)'e göre  $k_i^*$ ,  $(SD1)_i$ ,  $R(k_i^*)$ ,  $R(k_o)$  ve  $(SD2)_i$  değerleri

Özellik	$k_i^*$	$(SD1)_i$	$R(k_i^*)$	$R(k_o)$	$(SD2)_i$
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	1,85	1,58	0,9747	0,9716	1,003
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	1,17	1,00	0,9145	0,9145	1,000
Yarma Dayanımı-MPa	1,68	1,44	0,8313	0,8170	1,018
Gevreklik İndisi	1,32	1,13	0,9438	0,9432	1,001
Elastisite Modülü-Mpa	1,34	1,15	0,9369	0,9362	1,001

Tablo 4.3'te değişken olarak çimento hamurunun hacmi de eklenmiştir. Diğer tablolara benzer olarak yine 2.tip duyarlılık derecelerinin dağılımı birbirine yakın çıkmıştır. Ancak burada (SD2)i değerleri diğerlerinden önemli derecede düşüktür.

Tablo 4.4 Özelliklerin (4.+)'e göre  $k_i^*$ , (SD1)i,  $R(k_i^*)$ ,  $R(k_o)$  ve (SD2)i değerleri

Özellik	$k_i^*$	(SD1)i	$R(k_i^*)$	$R(k_o)$	(SD2)i
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	1,29	0,816	0,9763	0,9761	1,000
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	1,58	1,000	0,9379	0,9379	1,000
Yarma Dayanımı-MPa	0,20	0,127	0,9632	0,9010	1,069
Gevreklik İndisi	1,18	0,747	0,9442	0,9417	1,003
Elastisite Modülü-Mpa	1,43	0,905	0,9371	0,9368	1,000

Burada da (SD2)i değerleri düşüktür. Bu durumda bağıntılara giren değişken sayısı arttıkça, çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığının deyim yerindeyse “maskelendiği” anlaşılmaktadır. Buna karşı burada korelasyon katsayıları yüksektir.

#### 4.9 Çeşitli Yaklaşımlarla Elde Edilen (SD1)i ve (SD2)i'lerin Karşılaştırılması

Tablo 4.1,4.2,4.3,4.4'te verilen sonuçlar karşılaştırıldığında herhangi bir özellik için (SD1)i değerlerinin hesaplamada kullanılan fonksiyona göre birbirinden çok fark eden değerler aldığı; buna karşı (SD2)i değerlerindeki dağılımın buna göre çok az olduğu görülmektedir. Buna göre (SD2)i 2.tip duyarlılık derecesinin beton özelliklerinin çimento hamuru yapısına duyarlılığını (SD1)i'den çok daha anlamlı bir şekilde ifade ettiği anlaşılmaktadır.

#### 4.10 Özellikleri İfade Etmede Kullanılan Fonksiyonların Karşılaştırılması

Tablo 4.1,4.2,4.3 ve 4.4'te bulunan  $R(ki^*)$  korelasyon katsayıları incelenip en büyük olanı veren fonksiyonlar bulunmuştur.

Silindir basınç dayanımı,birim ağırlık,yarma dayanımı,gevreklik indisi ve elastisite modülü için en büyük korelasyon katsayılarını Tablo 4.4'te verilen (4.4) denklemi vermektedir.

Tablo 4.5 Özellikleri beton bileşimine bağlayan en yüksek korelasyon katsayılı bağıntı

Özellik	Bağıntı	Korelasyon katsayısı
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	$fcs = -0,393(c + w + a) + 78,2(c/1,29.w + a) + 1,52(m) + 188,8$	0,9763
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	$\Delta = -12,24(c + w + a) -6252,6(c/1,58.w + a) - 55,6(m) + 8722$	0,9379
Yarma Dayanımı-MPa	$Ts = -0,038(c + w + a) -2,07(c/0,20.w + a) + 1,99(m) +14,03$	0,9632
Gevreklik İndisi	$B= -0,05(c + w + a) -13,2(c/1,18.w + a) + 0,07(m) + 24,47$	0,9442
Elastisite Modülü-MPa	$E = -323,2(c + w + a) -126165(c/1,43.w + a) - 518,3(m) +186280$	0,9371

#### 4.11 Özellikler Arasındaki Korrelasyonları Belirleyen Etkenler

##### 4.11.1 Özellikler Arasındaki Bağlılıklar ve Korelasyon Katsayıları

Herhangi iki  $P_{hi}$  ve  $P_{hj}$  özelliği arasında;

$$\log P_{hi} = \log A + B \cdot \log P_{hj}$$

şekline getirilip, bu lineer logaritmik denkleme ait rij korelasyon katsayıları hesaplanmıştır.

Tablo 4.6 Özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Özellik Çifti	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı
E- $\Delta$	$\log E = 3,137 \log \Delta - 5,09$	0,8578
Ts- $\Delta$	$\log Ts = 5,89 \log \Delta - 19,1$	0,4848
B- $\Delta$	$\log B = 6,78 \log \Delta - 22,2$	0,9251
fcs- $\Delta$	$\log fcs = 6,94 \log \Delta - 21,8$	0,8494
E-Ts	$\log E = 0,189 \log Ts + 4,36$	0,6213
E-B	$\log E = 0,436 \log B + 4,30$	0,8741
E-fcs	$\log E = 0,420 \log fcs + 3,88$	0,9375
Ts-B	$\log Ts = 1,21 \log B + 0,101$	0,7266
Ts-fcs	$\log Ts = 1,16 \log fcs - 1,05$	0,777
fs-B	$\log fcs = 1,04 \log B + 0,99$	0,9306

#### 4.11.2 Çimento Hamuru Yapısına Duyarlılık Bakımından Benzeşimin Özellikler Arasında Korrelasyonlara Etkisi-Duyarlılık Benzeşim Katsayısı

Yukarıdaki dört fonksiyondan elde edilen (SD1)i ve (SD2)i değerleri kullanılarak her bir özellik çifti için (1.32) denklemiyle  $t_{ij}$  değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4.7 Dört çeşit fonksiyon ve (SD1)i duyarlılık derecesini göz önüne alınarak hesaplanan  $t_{ij}$  benzeşim katsayıları

Özellik Çifti	(SD1)i'lere göre			
	(1) fonksiyonu	(2) fonksiyonu	(3) fonksiyonu	(4) fonksiyonu
E-Δ	0,390	0,171	0,870	0,905
Ts-Δ	0,286	0,117	0,694	0,127
B- Δ	0,399	0,180	0,885	0,747
fcs-Δ	0,301	0,121	0,633	0,816
E-Ts	0,733	0,684	0,780	0,140
E-B	0,977	0,950	0,983	0,825
E-fcs	0,772	0,708	0,728	0,902
Ts-B	0,717	0,650	0,785	0,170
Ts-fcs	0,950	0,967	0,911	0,156
fcs-B	0,754	0,672	0,715	0,915

Tablo 4.8 Dört çeşit fonksiyon ve (SD2)i duyarlılık derecesi göz önüne alınarak hesaplanan  $t_{ij}$  benzeşim katsayıları

Özellik Çifti	(SD2)i'lere göre			
	(1) fonksiyonu	(2) fonksiyonu	(3) fonksiyonu	(4) fonksiyonu
E-Δ	0,980	0,9804	0,9991	1,000
Ts-Δ	0,952	0,952	0,982	0,935
B- Δ	0,980	0,9804	0,9991	0,997
fcs-Δ	0,961	0,952	0,997	1,000
E-Ts	0,887	0,960	0,9833	0,935
E-B	1,000	1,000	1,000	0,977
E-fcs	0,981	0,971	0,998	1,000
Ts-B	0,971	0,971	0,9833	0,997
Ts-fcs	0,981	1,000	0,9853	0,9355
fcs-B	0,981	0,971	0,957	0,968

#### 4.11.3 (tij)'lerle (rij)'ler Arasındaki Korelasyonlar

Tablo 4.9 (SD1)'lerden bulunan tij'lerle rij'ler arasındaki lineer bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Fonksiyon	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı
(1) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,314 + 0,3931.r_{ij}$	0,225
(2) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,2304 + 0,3653.r_{ij}$	0,160
(3) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,6607 + 0,1724.r_{ij}$	0,2324
(4) fonksiyonu	$t_{ij} = -1,1004 + 2,0925.r_{ij}$	0,851

Tablo 4.10 (SD')i'lerden bulunan tij'lerle rij'ler arasındaki lineer bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Fonksiyon	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı
(1) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,8609 + 0,1334.r_{ij}$	0,640
(2) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,9328 + 0,0513.r_{ij}$	0,448
(3) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,9731 + 0,0192.r_{ij}$	0,213
(4) fonksiyonu	$t_{ij} = 0,8661 + 0,1357.r_{ij}$	0,694

Tablo 4.9 ve 4.10'da verilen korelasyonlar 10 adet değer çifti için hesaplanmıştır. Bu değer çifti sayısı çifti için korelasyon katsayısının değeri, % 95 güvenilirlik derecesi için 0,632, % 99 güvenilirlik derecesi için 0,765'dir. (4) bağıntısını kullanmakla gerek (SD1)i,gerekse (SD2)i'lerden bulunan tij ve rij'lerin arasında % 99 güvenirligin üstünde sahip bağıntılar elde edilmiştir.

#### 4.11.4 Bileşim Faktörlerinin Değişiminden Etkilenme Bakımından Benzeşimin Özellikler Arasındaki Korrelasyonların Etkisi

Tablo 4.11 (1.33) bağıntıları ve korrelasyon katsayıları

Özellik	Bağıntı	Korrelasyon Katsayısı
Silindir Basınç Dayanımı-MPa	$(fcs)' = -0,395(c + w + a)' - 78,6(c/1,29.w + a)' - 1,53(m)' + 190$	0,9763
Birim Ağırlık-kg/cm <sup>3</sup>	$(\Delta)' = -12,35(c + w + a)' - 6308,9(c/1,17.w + a)' - 56,1(m)' + 8879$	0,9379
Yarma Dayanımı-MPa	$(Ts)' = -0,0782(c + w + a)' - 2,08(c/0,20.w + a)' - 1,995(m)' + 14,1$	0,9632
Gevreklik indisi	$(B)' = -0,0782(c + w + a)' - 13,3(c/1,18.w + a)' - 0,071(m)' + 25$	0,9442
Elastisite Modülü-MPa	$(E)' = -334,5(c + w + a)' - 127008(c/1,43.w + a)' - 522(m)' + 187584$	0,9371

Tablo 4.11'de değerleri verilen A,B ve C katsayılarına göre T(A)<sub>ij</sub>,T(B)<sub>ij</sub> ve T(C)<sub>ij</sub> hesaplanmıştır.

Tablo 4.12 Özellik çiftlerinin T(A)<sub>ij</sub>, T(B)<sub>ij</sub> ve T(C)<sub>ij</sub> değerleri

Özellik Çifti	T(A) <sub>ij</sub>	T(B) <sub>ij</sub>	T (C) <sub>ij</sub>
Δ-E	322,15	120699	466
Δ-Ts	12,272	6307	54,105
Δ-B	12,3	6296	56,03
Δ-fcs	11,955	6230,3	54,7
Ts-E	334,422	127006	520
B-E	334,45	126995	521,93
fcs-E	334,11	126929,4	520,35
B-Ts	0,0272	11,22	1,924
fcs-Ts	0,3168	76,52	0,465
B-fcs	0,344	65,3	1,459

Tablo 4.13 T(A)<sub>ij</sub>-rij, T(B)<sub>ij</sub>-rij, T(C)<sub>ij</sub>-rij bağıntıları ve korrelasyon katsayıları

Değişkenler	Bağıntı	Korrelasyon Katsayısı
T(A) <sub>ij</sub> -rij	$T(A)_{ij} = 0,7274 + 0,0012.r_{ij}$	0,394
T(B) <sub>ij</sub> -rij	$T(B)_{ij} = 0,7697 + 0,0000002.r_{ij}$	0,302
T(C) <sub>ij</sub> -rij	$T(C)_{ij} = 0,7697 + 0,0000000.r_{ij}$	0,302

Daha önce belirtilen kritik korrelasyon katsayıları hatırlanırsa, Tablo 4.13'te verilen bütün korrelasyon katsayıları % 95 güvenilirlik derecesinin bile çok altında kaldığı görülmektedir.

Acaba bileşim faktörlerinin değişimlerinden etkilenmelerindeki benzerlikler bir arada göz önüne alındığında durum nedir? Bunu anlamak için (rij)'ler T(A)<sub>ij</sub>, T(B)<sub>ij</sub> ve T(C)<sub>ij</sub>'lere katlı hesabıyla bağlanmıştır. Elde edilen bağıntı;

$$r_{ij} = -9E + 07 T(A)_{ij} + 2E + 08 T(B)_{ij} - 1E + 08 T(C)_{ij} + 3E + 07 \quad (4.5)$$

Korrelasyon katsayısı 0,377 bulunmuştur. Bu değerde her iki güvenilirlik derecesinden düşük bir değerdir.

Bu durumda özellikler arasındaki korelasyonların güçlü olmasında,çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkların birbirine yakın olmasının en önemli role sahip olduğu anlaşılmaktadır.



## 5.GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmanın sınırları içinde elde edilen başlıca sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Su/çimento oranının artmasıyla birim ağırlık,yarma ve basınç dayanımları,gevreklik indisi ve elastisite modülü azalmıştır.
- 2) Agreganın granülometrik bileşimi,birim ağırlığı ve gevreklik indisini pratik olarak etkilememiştir. Buna karşın yarma ve basınç dayanımları ile elastisite modülü granülometrinin B16-C16 arasında olması halinde,diğerlerinden bir miktar daha düşük değerler almaktadır. Bu durumu B16-C16 granülometrisi halinde hava boşluğunun biraz daha fazla olmasına bağlamak yerinde olacaktır.
- 3) Basınç dayanımı arttıkça gevreklik indisi ve basınç dayanımı/yarma dayanımı oranı yükselmiştir. Bu durum dayanım arttıkça betonun daha gevrek bir hale geldiğini göstermektedir.
- 4) Özellikler arasındaki korelasyonların güçlü olmasında,çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkların birbirine yakın olmasının en önemli husus olduğu anlaşılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] **Mary.S.J, Gani.,** 1997, Concrete, Chapman Ltd, London.
- [2] **Kocataşkın,F.,** 1982, Beton Teknolojisi, İTÜ Yayınları, İstanbul.
- [3] **Gökdemir,A.,** 1997, Yapı Malzemeleri ve Beton Teknolojisi, Ankara.
- [4] **Jennings,H.M.,** 1998, Toward high performance cement based materials,new horizon in construction materials, *Proceedings of Session/ASCE National Convention*, St.Louis.
- [5] **Diamond,S.ve Diğ.,** 1995, Microstructure of Cement Based Materials/Bonding and Interfaces in Cementitious Materials,*Materials Research Center Proceedings* Vol.370.
- [6] **Brandt,A.M.,** 1999, Cement and Other Binders,Cement Based Composites, Materials,Mechanical Properties and Performance, pp 47-52, London.
- [7] **Brandt,A.M.,** 1999, Structure of Cement,Cement Based Composites,Materials, Mechanical Properties and Performance, pp 109-125, London.
- [8] **Postacıoğlu,B.,** 1986, Beton Cilt 1, Bağlayıcı Maddeler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [9] **Popovics,S.,** 1992, Concrete Materials,Properties,Specification and Testing, Second Edition, Noyes Publication, USA.
- [10] **Popovics,S.,** 1998, Strength and Related Properties of Concrete-A Quantitative Approach, John Wiley and Sons Inc, USA.
- [11] **Zimbelmann,R.,**1989, A contribution to the problem of cement-aggregate bond *Cement and Concrete Research*, 15, 801-808.
- [12] **Zhang,M.H. ve Gjorv,O.E.,** 1990, Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol 20, pp 610-618.
- [13] **Barnes,A.,** 1995, Microstructure of Cement Based Systems/Bonding and Interfaces in Composite Materials, D.M.Roy, Vol 370, pp 309, London.
- [14] **Tasong,W.A ve Diğ.,** 1998, Aggregate-Cement Paste Intereface 2:Influence of aggregate physical properties, *Cement and Concrete Research* ,28, 1453-1465.
- [15] **Uğurlu,A.,** 1999, Agreg-açimento hamuru bağı üzerine, *Beton Prefabrikasyon* 5,9-17.

- [16] **Hansen,C.T.**, 1973, Physical Structure of Hardened Cement Paste:A classical approach, DK-2800, Lyngby, Denmark.
- [17] **Leo,F.M.**,1970, The Chemistry of Cement and Concrete, Third Edition, Edward Arnold Publishers Ltd, London.
- [18] **Hansen,C.T.,Radjy,F.and Sellevold,E.J.**, 1973, Cement paste and concrete, Annual Review of Materials, Vol.3, pp:233-268, Denmark.
- [19] **Sereda,P.J.,Feldman,R.F. and Romachandron,V.S.**,1980, Structure formation and development in hardened cement pastes *Proc.7th International Congress on the Chemistry of Cement*, Vol.1, Paris.
- [20] **Okpala,D.C.**, 1999, Pore Structure of Hardened Cement Paste and Mortar. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol.11, No.4, USA.
- [21] **Mehta,P.K. and Aitcin,P.C.**, 1990, Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete, *2nd International Symposium on High Strength Concrete* ,pp 265-285, Berkeley, California.
- [22] **Taşdemir,C.**, 1994, Agreg-açimento hamuru ara yüzeyi mikro yapısının yüksek mukavemetli betonların kırılma parametrelerine etkisi, *Doktora Tezi* ,İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Şengül,Ö.**, 2000, Agreg-a türünün normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Oktar,O.N.**, 1977, Bağlayıcı hamurunun yapısının betonun kısa süreli elastik davranışındaki işlevi, *Doktora Tezi* ,İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [25] **Odler,I. and Rössler,M.**, 1985, Investigations on the relationship between porosity structure and strength of hydrated portland cement pastes:Effect of Pore Structure and Degree of Hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.15 pp 401-410, USA.
- [26] **Odler,I. and Rössler,M.**, 1985, Investigations on the relationship between porosity structure and strength of hydrated portland cement pastes:Effect of Porosity, *Cement and Concrete Research*, Vol.15 pp 320-330, USA.
- [27] **Popovics,S.**, 1985, New formulas for the prediction of the effect of porosity on concrete strength, *ACI Journal*, USA.
- [28] **Mindess,S.**, 1988, Concrete, Water/cement Ratio, pp 243-257, New Jersey.
- [29] **Kaplan,M.F.**, 1958, The effect of the properties of coarse aggregates on the workability of concrete, *Magazine of Concrete Research*, August, 63-74.

- [30] **Mindess,S.**, 1983, *Strucutre and Performance of Cement*, pp 319, London.
- [31] **Oktar,O.N.,Moral,H.,Taşdemir,M.A.**,1984, Sensitivity of Concrete Properties to the Pore Structure of Hardened Cement Paste *Cement and Concrete Research* Vol.26, No.11, 1619-1627, İstanbul.
- [32] **Oktar,O.N.,Moral,H.,Taşdemir,M.A.**, 1984, Factors Determining the Correlations Between Concrete Properties, *Cement and Concrete Research* Vol.26, No.11, 1619-1627, İstanbul.
- [33] **Neville,A.M.**, 1997, Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete, *ACI Mateials Journal*, January-February, **94**, no.11, pp 71-74, USA.
- [34] **Yıldırım,H.**, 1995, Agregra konsantrasyonunun betonun mekanik özelliklerine etkisi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [35] **Kawamaki,H.**, 1992, Effect of aggregate type on the mechanical behavior of concrete, *Interfaces In Cementitous Composites*, pp 179-186, J.C Masa (Ed) Toulouse.





**EKLER**

Tablo A.1 A16-B16 granülometri eğrisi için beton bileşimleri

Beton Malzemeleri	A16-B16				
	A/B				
Çimento kg/m <sup>3</sup>	344	349,55	346,32	349	349,1
Kum kg/m <sup>3</sup>	365	351	342	333	323,4
Kırmataş 1 kg/m <sup>3</sup>	1338	1285	1251	1219	1184,3
Taş Tozu kg/m <sup>3</sup>	190	192.5	173	170	168
Su kg/m <sup>3</sup>	176	192.5	210	227.5	245
Su/çimento oranı	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Hava miktarı %	2.5 1.8	2.0 0.2	2.8 0.6	1.3 1.1	1.8 0.7
Çökme cm	0	0	1-1.5	2.0	2-2.5
Birim Ağırlık kg/cm <sup>3</sup>	2368 2383	2347.5 2387.5	2300 2351	2304 2310.5	2264 2387.5

TabloA.2 B16 granülometri eğrisi için beton bileşimleri

Beton Malzemeleri	B16				
	A/B				
Çimento kg/m <sup>3</sup>	348	347	344.5	348.15	347
Kum kg/m <sup>3</sup>	450	439	427	416	404.3
Kırmataş 1 kg/m <sup>3</sup>	1223.5	1193.4	1162	1131.5	1100
Taş Tozu kg/m <sup>3</sup>	190	182	177.4	173	168
Su kg/m <sup>3</sup>	175	192.5	210	227.5	245
Su/çimento oranı	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Hava miktarı %	1.3 2.2	1.85 3.0	1.96 4.1	1.88 1.6	1.0 2.4
Çökme cm	0	0	1-1.5	2.0	2.5
Birim Ağırlık kg/cm <sup>3</sup>	2391 2368.5	2347.5 2322	2315 2264.5	2286.5 2296	2280 2246

Tablo A.3 B16-C16 granülometri eğrileri için beton bileşimleri

Beton Malzemeleri	B16-C16				
	A/B				
Çimento kg/m <sup>3</sup>	340	341	344.5	348.1	349.3
Kum kg/m <sup>3</sup>	540	526.5	512.5	499	485
Kırmataş 1 kg/m <sup>3</sup>	1129	1102	1072	1044.5	1015
Taş Tozu kg/m <sup>3</sup>	187	182	177.4	173	168
Su kg/m <sup>3</sup>	175	192.5	210	227.5	245
Su/çimento oranı	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70
Hava miktarı %	4.3 4.4	3.5 4.7	2.7 3.2	3.5 2.2	1.3 1.5
Çökme cm	0	0	1-1.5	2.0	2-2.5
Birim Ağırlık kg/cm <sup>3</sup>	2314 2311	2304.5 2276.5	2292 2282.5	2247 2275	2261 2236.5

## ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğdum. İlk öğretimden sonra Özel Işık Lisesini kazandım. 1995 senesinde mezun olduktan sonra İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandım. 1999 yılında mezun olduktan sonra aynı sene İstanbul teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladım.



**T.C. MİLLÎ EĞİTİM BAKANLIĞI**  
**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**YAPILAR MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ**