

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAFİF AGREGALI BETONLARIN MEKANİK  
ÖZELİKLERİ VE ISI YALITIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnşaat Müh. Hakan KONUK**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2003**

**HAFİF AGREGALI BETONLARIN MEKANİK  
ÖZELİKLERİ VE ISI YALITIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnşaat Müh. Hakan KONUK  
501981062**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Aralık 2002  
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Ocak 2003**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Canan TAŞDEMİR  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Saim AKYÜZ (İTÜ)  
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)**

**OCAK 2003**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             |             |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖNSÖZ</b>                                                                | <b>ii</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                        | <b>v</b>    |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                        | <b>vi</b>   |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                       | <b>vii</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                                 | <b>viii</b> |
| <b>SUMMARY</b>                                                              | <b>x</b>    |
| <br>                                                                        |             |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                             | <b>1</b>    |
| 1.1. Genel Bilgiler                                                         | 1           |
| 1.2. Hafif Betonların Sınıflandırılması                                     | 3           |
| 1.3. Hafif Agregaların Sınıflandırılması                                    | 6           |
| 1.4. Ülkemizdeki Hafif Agregaların Durumu ve Ponza Taşı Hafif Agregası      | 7           |
| 1.5. Araştırmanın Konusu                                                    | 8           |
| 1.6. Çalışmanın Ana Hatları                                                 | 9           |
| <br>                                                                        |             |
| <b>2. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR ve ÇALIŞMALAR</b>                           | <b>10</b>   |
| 2.1. Betonun Mekanik Davranışı                                              | 10          |
| 2.2. Agreganın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ile İlgili Çalışmalar   | 12          |
| 2.3. Sürekli Fazın Etkisi                                                   | 15          |
| 2.4. Elastik Davranış                                                       | 19          |
| 2.5. Elastik Olmayan Davranış                                               | 20          |
| 2.6. Hafif Betonların $\sigma - \epsilon$ eğrileri                          | 22          |
| 2.7. Hafif Betonların Diğer Özellikleri ve Etkileyen Faktörler              | 24          |
| 2.7.1. Depreme Dayanıklılık                                                 | 24          |
| 2.7.2. Su Emme Miktarı                                                      | 25          |
| 2.7.3. Donmaya Dayanıklılık                                                 | 25          |
| 2.7.4. Isıl Genleşme                                                        | 25          |
| 2.7.5. Isı Yalıtımı                                                         | 25          |
| 2.7.6. Yangına Dayanıklılık                                                 | 27          |
| 2.7.7. Ses Emme                                                             | 28          |
| 2.8. Hafif Beton Basınç Mukavemetinin Tahmin Edilmesi ile İlgili Çalışmalar | 28          |
| 2.9. Hafif Betonlar Üzerinde Yapılmış Bazı Araştırmalar                     | 29          |
| <br>                                                                        |             |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                               | <b>33</b>   |
| 3.1. Kullanılan Malzemeler                                                  | 33          |
| 3.1.1. Agregalar                                                            | 33          |
| 3.1.1.1. Kum                                                                | 33          |
| 3.1.1.2. Kırmataş                                                           | 33          |
| 3.1.1.3. Ponza Taşı                                                         | 34          |
| 3.1.2. Çimento Özellikleri                                                  | 35          |

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2.1. Fiziksel Özellikler                                  | 35        |
| 3.1.2.2. Kimyasal Özellikler                                  | 36        |
| 3.1.3. Kimyasal Katkılar                                      | 36        |
| 3.1.3.1. Süperakışkanlaştırıcı Katkı                          | 36        |
| 3.1.3.2. Hava Sürükleyici Katkı                               | 36        |
| 3.2. Beton Karışımları                                        | 37        |
| 3.2.1. Kabul Edilen Esaslar                                   | 37        |
| 3.2.2. Bileşim Hesapları                                      | 38        |
| 3.2.3. Betonun Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklanması | 39        |
| 3.3. Betonlara Uygulanan Deneyler                             | 42        |
| 3.3.1. Taze Beton Deneyleri                                   | 42        |
| 3.3.2. Mekanik Deneyler                                       | 42        |
| 3.3.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi                               | 42        |
| 3.3.2.2. Yarma Dayanımı Deneyi                                | 43        |
| 3.3.3. Isıl İletkenlik Deneyi                                 | 44        |
| <b>4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>                | <b>46</b> |
| 4.1. Birim ağırlık ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki      | 46        |
| 4.2. Birim ağırlık ile Yarılma Dayanımı Arasındaki İlişki     | 47        |
| 4.3. Birim ağırlık ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki    | 48        |
| 4.4. Birim ağırlık ile Isı İletkenlik Arasındaki İlişki       | 49        |
| <b>5. GENEL SONUÇLAR</b>                                      | <b>52</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                              | <b>53</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                               | <b>58</b> |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                | <u>Sayfa No</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 1.1.</b> Hafif Beton Sınıfları .....                                                                                                  | 5               |
| <b>Tablo 1.2.</b> İşlevlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması.....                                                                     | 6               |
| <b>Tablo 1.3.</b> Karakteristik Dayanıma Göre Gazbetonların Sınıflandırılması.....                                                             | 6               |
| <b>Tablo 2.1.</b> Normal Betona ve Çeşitli Hafif Betonlara Ait Isı İletkenlik Katsayıları .....                                                | 26              |
| <b>Tablo 2.2.</b> Yangın Görmüş Donatılı Gazbeton Panel İçindeki Donatıların Mekanik Özellikleri ve Standard Değerlerle Karşılaştırılması..... | 28              |
| <b>Tablo 2.3.</b> Farklı Hafif Betonların Özellikleri.....                                                                                     | 32              |
| <b>Tablo 2.4.</b> Hafif Betonların Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması.....                                                               | 32              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Kumun Özellikleri .....                                                                                                      | 33              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Kırmataş 1'in Özellikleri .....                                                                                              | 34              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Ponza Taşı'nın Granülometrisi .....                                                                                          | 34              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Ponza Taşı Birim Ağırlıkları .....                                                                                           | 35              |
| <b>Tablo 3.5.</b> Ponza Taşı Hafif Agregalarının Su Emme Değerleri .....                                                                       | 35              |
| <b>Tablo 3.6.</b> Agregası Karışım Oranları .....                                                                                              | 38              |
| <b>Tablo 3.7.</b> Beton Karışımındaki Gerçek Malzeme Mikatarları ve Taze Beton Özellikleri .....                                               | 41              |
| <b>Tablo 3.8.</b> Sertleşmiş Beton Özellikleri.....                                                                                            | 43              |
| <b>Tablo 3.9.</b> Betonların Isı İletkenlik Değerleri.....                                                                                     | 45              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                             | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Şekil 1.1</b> : Hafif betonların sınıflandırılması.....                                                                                                  | 4                      |
| <b>Şekil 2.1</b> : Agreg, sertleşmiş çimento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....                                        | 11                     |
| <b>Şekil 2.2</b> : Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....                                                                              | 12                     |
| <b>Şekil 2.3</b> : Tek eksenli çekme ve basınç etkisinde betonda agreganın normal veya hafif olması durumuna göre oluşan kırılma çizgilerinin görünüşü..... | 16                     |
| <b>Şekil 2.4</b> : Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti.....                                                           | 17                     |
| <b>Şekil 2.5</b> : Hafif betonun kırılmasının modelle açıklanması.....                                                                                      | 18                     |
| <b>Şekil 2.6</b> : Hafif betonun kırılma durumlarının şematik gösterimi.....                                                                                | 19                     |
| <b>Şekil 3.1</b> : Beton agregasının granülometrik bileşimi .....                                                                                           | 40                     |
| <b>Şekil 3.2</b> : Silindir basınç dayanımı ve eksenel şekil değiştirme deneyi .....                                                                        | 42                     |
| <b>Şekil 3.3</b> : Silindir yarma dayanımı deneyi .....                                                                                                     | 43                     |
| <b>Şekil 3.4</b> : TS 388'e göre plaka metodu ile ısı iletkenliğinin tayini için deney düzeneği .....                                                       | 44                     |
| <b>Şekil 4.1</b> : Hafif betonların birim ağırlıkları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki.....                                                         | 46                     |
| <b>Şekil 4.2</b> : Hafif betonların birim ağırlıkları ile yarılmaya dayanımları arasındaki ilişki .....                                                     | 47                     |
| <b>Şekil 4.3</b> : Hafif betonların birim ağırlıkları ile elastisite modülleri arasındaki ilişki.....                                                       | 48                     |
| <b>Şekil 4.4</b> : Hafif betonların (Birim ağırlık) <sup>3/2</sup> x (Basınç dayanımı) <sup>1/2</sup> ile elastisite modülleri arasındaki ilişki.....       | 48                     |
| <b>Şekil 4.5</b> : Hafif betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları arasındaki ilişki .....                                                | 49                     |
| <b>Şekil 4.6</b> : Gazbetonun ısı iletkenlik katsayısının yoğunlukla değişimi.....                                                                          | 50                     |
| <b>Şekil 4.7</b> : Gazbetonun rutubet içeriği ile ısı iletkenlik katsayısı arasındaki bağıntı.....                                                          | 51                     |

## SEMBOL LİSTESİ

|                              |                                                                         |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b><math>\epsilon</math></b> | : Eksenel Şekil Değiştirme                                              |
| <b><math>C</math></b>        | : 1 m <sup>3</sup> yerleşmiş betondaki çimento hacmi (dm <sup>3</sup> ) |
| <b><math>f_c</math></b>      | : Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )                                  |
| <b><math>f_t</math></b>      | : Yarma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )                                   |
| <b><math>\sigma</math></b>   | : Normal Gerilme (N/mm <sup>2</sup> )                                   |
| <b><math>W</math></b>        | : 1 m <sup>3</sup> yerleşmiş betondaki suyun ağırlığı (kg)              |
| <b><math>V_a</math></b>      | : 1 m <sup>3</sup> yerleşmiş betondaki agrega hacmi (dm <sup>3</sup> )  |
| <b><math>\nu</math></b>      | : Poisson oranı                                                         |
| <b><math>\gamma</math></b>   | : Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )                                    |
| <b><math>\Delta</math></b>   | : Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )                                    |
| <b><math>d_{max}</math></b>  | : En büyük dane boyutu                                                  |
| <b><math>R</math></b>        | : Korelasyon Katsayısı                                                  |
| <b><math>\lambda</math></b>  | : Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)                                       |
| <b><math>Q</math></b>        | : Isıtıcı Plakaya Beslenen Elektrik Gücü (Watt)                         |
| <b><math>l</math></b>        | : Numune Kalınlığı (m)                                                  |
| <b><math>A</math></b>        | : Isıtıcı Plaka Alanı (m <sup>2</sup> )                                 |
| <b><math>\Delta T</math></b> | : Yüzeyler Arasındaki Sıcaklık Farkı (°C veya K)                        |

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmalarım esnasında bana emeği geçen bütün hocalarıma ve danışman hocam Doç. Dr. Canan TAŞDEMİR'e, araştırma görevlisi arkadaşlarım Nilüfer ÖZYURT ve Özkan ŞENGÜL'e, İTÜ Makine Fakültesi öğretim üyesi hocam Yrd. Doç. Dr. Erhan BÖKE'ye, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Labaratuvarı çalışanlarına ve tabii ki aileme teşekkürü borç bilirim.

Şubat, 2003

Hakan KONUK



## ÖZET

### HAFİF AGREGALI BETONLARIN MEKANİK ÖZELİKLERİ VE ISI YALITIMI

Hafif betonların konutlarda kullanımı özellikle yalıtım özellikleri nedeniyle çok önemlidir. Yapılarda kullanılan hafif agregalı betonlar, normal agregaya yerine hafif agregaya kullanılarak elde edilir. Türkiye’de doğal olarak en çok bulunan hafif agregalar ponza, volkanik tüf ve volkanik küldür. Sarıkamış, Ağrı, Van, Bitlis, Kayseri ve Nevşehir bölgelerinde bulunan ponza rezervinin yaklaşık 15 milyar m<sup>3</sup> olduğu tahmin edilmektedir. Ponza diğerlerine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Genelde, hafif betonları üretmek için yapay hafif agregalar kullanılır. Henüz Türkiye’de ve dünyanın diğer bölgelerinde yaygın olarak bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yapay hafif agregaya endüstrisi geliştirilmeden önce, bol bulunan doğal agregaya rezervlerinin kullanılması göz önünde bulundurulmalıdır. Doğal hafif agregalar, yapay olanlara göre daha düşük dayanıma sahiptirler. Buna rağmen, eğer nem etkisine karşı gerekli tedbirler alınırsa, çatı döşemeleri ve duvar panelleri gibi orta dayanıma ve düşük ısı iletkenliğe sahip betonarme yapısal elemanlar doğal hafif agregalar kullanılarak üretilebilir. Örneğin, Türkiye’nin deprem riski altındaki bölgelerinde hafif betonların kullanımı, depremin neden olduğu momentleri ve yatay yükleri azaltmada faydalı olabilir.

Hafif betonları üretmede yaygın olarak kullanılan 3 yöntem vardır. Birincisi, normal agregaya yerine özgül ağırlığı düşük, gözenekli hafif agregaların kullanılmasıdır. Sonuç olarak elde edilen beton da hafif agregalı beton olarak isimlendirilir. İkinci yöntemde, harç veya betonda büyük boşluklar oluşturulur. Bu tip betonlar havalı, hücreli, köpüklü veya gaz beton gibi değişik isimlerle bilinirler. Hafif betonları üretmede kullanılan üçüncü yöntemde ise karışımdaki ince agregaya çıkarılır ve sadece iri agregaya kullanılır. Bu tip betonlar da ince agregaya içermeyen betonlar olarak isimlendirilir.

Ponza açık renklidir ve bütün ponza türleri volkanik kökenlidir, özgül ağırlıkları da bölgesine göre 700 ile 900 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Bunlarla, birim ağırlığı 700 ile 1400 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen iyi yalıtım özelliklerine fakat yüksek su emme ve rötre özelliklerine sahip orta dayanımda betonlar üretmek mümkündür.

Bu çalışmada, 2-16 mm. boyutlarında ponza hafif agregası Nevşehir’den getirildi. Homojen hafif agregaya elde etmek için sadece suda yüzen taneler beton dökümünde kullanıldı. Ponza agreganın su emmesi, 30 dakikadan sonra kuru ağırlığının %15’iydi. Karışım oranlarının hesaplanmasında mutlak hacim yöntemi kullanıldı. Ponza agregalı betonların taze birim ağırlığı 700 ile 1900 kg/m<sup>3</sup> arasında 200 kg/m<sup>3</sup> adımlarla değişmekteydi. Böylece 7 beton karışımı hazırlandı. Karışımların hepsinde etkin su/çimento oranı 0.43’dü. Maksimum agregaya boyutu 16mm.’de sabit tutuldu. Agregaya karışımının granülometri eğrisi A16-B16 referans eğrilerinin arasındaydı.

Yaklaşık aynı işlenebilmeyi sağlamak için de süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Düşük birim ağırlığa sahip ( $700 \text{ kg/m}^3$ ,  $900 \text{ kg/m}^3$ ,  $1100 \text{ kg/m}^3$  ve  $1300 \text{ kg/m}^3$ ) betonlarda hava sürükleyici katkı kullanıldı.  $700 \text{ kg/m}^3$  birim ağırlığa sahip betonlarda, birim ağırlığı düşürmek için kum kullanılmadı.

Bu çalışmada üretilen ponza hafif agregalı betonlarda, betonların birim ağırlığı ile basınç dayanımları arasında iyi bir lineer ilişki bulunmaktadır. “Elastisite modülü” ile  $(\text{birim ağırlık})^{3/2} \times (\text{basınç dayanımı})^{1/2}$  arasında 0.99 korelasyon katsayısına sahip iyi bir ilişki elde edildi. Normal agregaya yerine ponza hafif agregası kullanılmasıyla basınç dayanımları  $1.4 - 18.7 \text{ MPa}$ . ve elastisite modülleri de  $1.6 - 19.5 \text{ GPa}$  arasında oldu.  $900 \text{ kg/m}^3$ ,  $1100 \text{ kg/m}^3$  ve  $1300 \text{ kg/m}^3$  birim ağırlığa sahip betonların ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ ), plaka metodu test tekniği ile belirlendi. Deney sonuçları ile gaz betonlar için geliştirilen  $\lambda = -0.011 + 0.00027 \times \Delta$ , ( $\Delta$ =birim ağırlık,  $\text{kg/m}^3$ ) bağıntısı kullanılarak hesaplanan sonuçlar arasında iyi bir lineer ilişki vardır.

## SUMMARY

### THERMAL INSULATION AND MECHANICAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETES

The use of lightweight concretes in residential structures is very important especially for their good insulating properties. The structural lightweight aggregate concretes are obtained by substituting the normal concrete aggregate with lightweight aggregate. Pumice, volcanic tuff and volcanic cinders are the most abundant natural lightweight aggregates in Turkey, where pumice reserves in the region of Sarıkamış, Ağrı, Van, Bitlis, Kayseri and Nevşehir are estimated to be 1,5 billion cubic meters. Pumice is more widely used than any of the others. Generally artificial lightweight aggregates are used for structural lightweight concrete, but artificial ones are not yet available in Turkey and other parts of the world. However, before an artificial lightweight aggregate industry is developed, in these areas, these abundant natural lightweight aggregate reserves should be considered for possible utilisation. Natural lightweight aggregates do have lower strengths and endurance compared with artificial ones. In spite of this fact if necessary precautions against moisture effects are taken, it is possible to produce reinforced concrete structural elements such as roof slabs and wall panels of moderate strength and of low thermal conductivity using natural aggregates. The use of lightweight reinforced concrete in the earthquake-prone areas of Turkey, for example, can also be beneficial in reducing the lateral forces and moments caused by earthquakes.

There are three widely used methods for producing lightweight concrete. In the first one, porous lightweight aggregate of low particle density is used instead of ordinary aggregate. The resultant concrete is generally known as the lightweight aggregate concretes. The second method of producing lightweight concrete relies on introducing large voids within the concrete or mortar mass. This type of concrete is variously known as aerated, cellular, and foamed or gas concrete. Third method of obtaining lightweight concrete is by eliminating the fine aggregate from the mixture, coarse aggregate is generally used. This concrete described as therm of no-fines concrete.

Pumice is light-coloured and all kinds of pumice lightweight aggregates are of volcanic origin with a particle density in region of 700 to 900 kg/m<sup>3</sup>. It is possible to make a moderate strength concrete with a density of 700 to 1400 kg/m<sup>3</sup>, and with good insulating characteristics, but having high absorption and shrinkage.

Pumice lightweight aggregate brought from Nevşehir and had a size range of 2 to 16 mm. In order to obtain a homogeneous lightweight aggregate, only particles that floated on water were used in the casting of the concrete. The water absorption of the Pumice aggregate after 30 minutes was 15 percent with respect to its dry weight. The absolute volumes was used in calculating the mix proportions. The fresh unit weights

of pumice aggregate concretes were changed from 700 to 1900 kg/m<sup>3</sup> in steps of 200 kg /m<sup>3</sup>. Thus seven concrete mixtures were obtained. All seven mixtures had an effective water-cement ratio of 0.43. The maximum particle size of aggregate was kept constant at 16 mm. The grading curve of combined aggregate was chosen between A16-B16. A superplasticiser was used to maintain approximately the same workability. An air-entraining agent was used in concretes with the unit weight (700,900,110,1300 kg/m<sup>3</sup>) in order to reduce the unit weight of the concrete. No sand was used in the concrete with a unit weight of 700 kg/m<sup>3</sup>.

For the pumice lightweight aggregate concretes produced in this investigation, there is a good linear relation between compressive strength and unit weight of concrete. Good correlation between the “modulus of elasticity” and “(unitweight)<sup>3/2</sup> x (compressive strength)<sup>1/2</sup>” is also obtained with a correlation coefficient of 0.99. The replacement of normal aggregate by the pumice lightweight aggregate results in compressive strengths ranging from 1.4 to 18.7 MPa and modulus of elasticity from 1.6 to 19.5 Gpa. The thermal conductivity coefficient of pumice concretes with the unit weights of 900,1100 and 1300 kg/m<sup>3</sup> were determined using a plate test technique. There is a good linear relation between the experimental values obtained and the calculated values using the relation of  $\lambda = 0,00027 \times \Delta - 0,011$  developed for autoclaved aerated concretes, where  $\Delta$  is the unit weight in kg/m<sup>3</sup>.

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Genel Bilgiler

Beton, günümüzde en yaygın kullanılan bir yapı malzemesidir. Joseph Aspdin'in 1824 yılında Portland çimentosunu bulmasıyla birlikte başlayan ve 1800'lü yılların sonlarına doğru betonarme, 1930'lu yıllarda da öngerilmeli beton yapı sistemlerinin geliştirilmesiyle hızlanan süreçte beton vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Beton özellikleri sürekli geliştirilmekte, kullanım alanları gittikçe artmakta ve yeni uygulama konuları gündeme gelmektedir.

Beton; çimento, agrega, su ve bazende katkı malzemelerinin biraraya getirilmesiyle oluşturulan kompozit bir malzemedir. Çimentonun su ile birleşmesi ile oluşan çimento hamuru agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak bağlayıcılık görevini yapar. Agrega ise betonun iskeletini oluşturan kum, çakıl, kırmataş gibi taneli mineral malzemedir.

Agreganın maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan betonda bir dolgu malzemesi olarak kabul edilebilir, ancak agrega kullanmanın tek sebebi beton üretiminde ekonomi sağlamak değildir. Agrega aynı zamanda betona önemli teknik avantajlar sağlar; beton, çimento hamuruna göre hacim sabitliğini daha iyi korur ve çevre etkilerine karşı daha dayanıklı olur. Ayrıca taze betonun işlenebilmesi, pompalanabilmesi, beton içerisindeki hava miktarı da agrega tarafından belirlenir [1].

Heterojen bir yapıya sahip olan betonun özellikleri kullanılan malzemelerle yakından ilgilidir. Beton hacmini yaklaşık %60-%85'ini oluşturan agreganın niteliği oldukça önemlidir. İyi beton elde edebilmek için uygun agrega kullanılması gerektiği bilinen bir gerçektir. Agreganın kimyasal ve mineralojik bileşimi, petrografik yapısı, özgül ağırlığı, dayanımı, fiziksel ve kimyasal kararlılığı, boşluk yapısı, rengi gibi özellikleri elde edildiği kayacın özelliklerine bağlıdır. Ancak genellikle agreganın tane şekli ve boyutları, yüzey yapısı ve su emmesi gibi özellikleri göz önüne alınır.

Beton iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük, dolayısıyla ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Normal betonun birim ağırlığının düşürülmesiyle betonarme elemanın öz ağırlıkları azaltılıp yapı hafifletilebilir. Böylece taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri küçültülerek ekonomi sağlanabilir. Diğer yandan yurdumuzun büyük çoğunluğunun 1. derece deprem riski taşıyan bölgelerde bulunması gözönüne alındığında, yapıların öz ağırlıklarının hafifletilebilmesi yapıya etkiyen deprem yükünü azaltacak ve dolayısı ile olası depremlerdeki yapı hasarları da azaltılmış olacaktır. Ayrıca betonda birim ağırlığın azaltılmasıyla ısı iletkenlik katsayısı küçülür ve betonun ses yutuculuğu artar.

Betonun birim ağırlığının azaltılması başlıca üç yolla yapılır [1, 2]:

- i. Normal agregaların yerine boşluklu olan doğal veya yapay hafif agregaların kullanılmasıyla üretilen hafif agregalı betonlar,
- ii. Beton içinde fiziksel veya kimyasal yolla büyük miktarda boşluk oluşturularak üretilen gaz ve köpük betonlar,
- iii. Betonun ince agregasını çıkarmak yoluyla üretilen kumsuz betonlar.

Görüldüğü gibi günümüzde çok kullanılmakta olan hafif betonları üretmek için beton içinde çeşitli yöntemlerle boşluk oluşturmak genel bir kuraldır. Ancak boşluk oluşturma ya harç içinde veya iri agrega daneleri arasında veya agreganın içinde yapılır.

Hafif betonların normal betonlara göre üstünlükleri şöyle özetlenebilir;

- Birim hacimdeki toplam malzeme ağırlığının azalması nedeniyle beton kalıbında daha düşük basınç oluşur, üretim ve yerleştirme kolaylaşır.
- Hafif betonla üretilen elemanların düşük birim ağırlıkları nedeniyle yatay ve düşey yapı yükleri azalır, bu azalma ile temeller ve diğer yapı elemanları daha küçük boyutlarda yapılarak ekonomi sağlanır.
- Isı iletkenlik katsayıları düşük, ısı ve ses yalıtımları yüksektir.
- Yangın bakımından normal betona göre daha elverişlidir.
- Yüksek çekme dayanımı / basınç dayanımı oranına sahip olması nedeniyle rötre süresince çatlama meydana gelme olasılığı düşüktür [3].

Hafif betonların normal betonlara göre sakıncaları ise şöyle özetlenebilir;

- Boşluklu olmaları nedeniyle mukavemetleri düşüktür. Bu nedenle yüksek mukavemetli beton uygulamalarında tercih edilen bir malzeme değildir.
- Aşınmaya karşı dayanıksızdırlar.
- Rutubete karşı yalıtım gereklidir.
- Elastiklik modülü düşük değerler alır.
- Sünme ve rötre normal betona göre daha yüksektir.

## 1.2. Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması, genellikle hem birim ağırlık hem de dayanıma göre yapılmaktadır. Yalıtım betonlarından taşıyıcı olanlara kadar bütün hafif betonların özellikle birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında değişik kabuller vardır.

Birim ağırlıkları  $1840 \text{ kg/m}^3$ 'ü geçmeyen ve 28 günlük silindir basınç dayanımı  $17 \text{ N/mm}^2$ 'yi aşan betonlar hafif beton sınıfına girerler [4]. Ancak ülkemizde ve diğer bazı ülkelerin standartlarında hafif beton birim ağırlığının  $1900 \text{ kg/m}^3$ 'e çıkmasına izin verilir [5, 6]. Genel olarak hafif betonların birim ağırlıklarının pratik değişim aralığı  $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ 'tür [1]. Taşıyıcı hafif betonların birim ağırlığı  $1450\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmekte, çoğunlukla birim ağırlık  $1600 - 1700 \text{ kg/m}^3$  arasında kalmaktadır. Dayanımları  $7 - 17 \text{ N/mm}^2$  arasında olan betonlar yalıtım betonu ile orta mukavemetli beton sınıfına girerler [1, 7].

Hafif betonları fonksiyonlarına göre üç ayrı gruba ayırmak mümkündür [1, 2, 8] :

- a. Yalıtım betonları
- b. Orta mukavemetli betonlar
- c. Taşıyıcı betonlar

DIN 1045 [10]'e göre betonlar birim ağırlıklarına göre şöyle sınıflandırılırlar:

Hafif betonlar : Birim ağırlık  $< 2000 \text{ kg/m}^3$

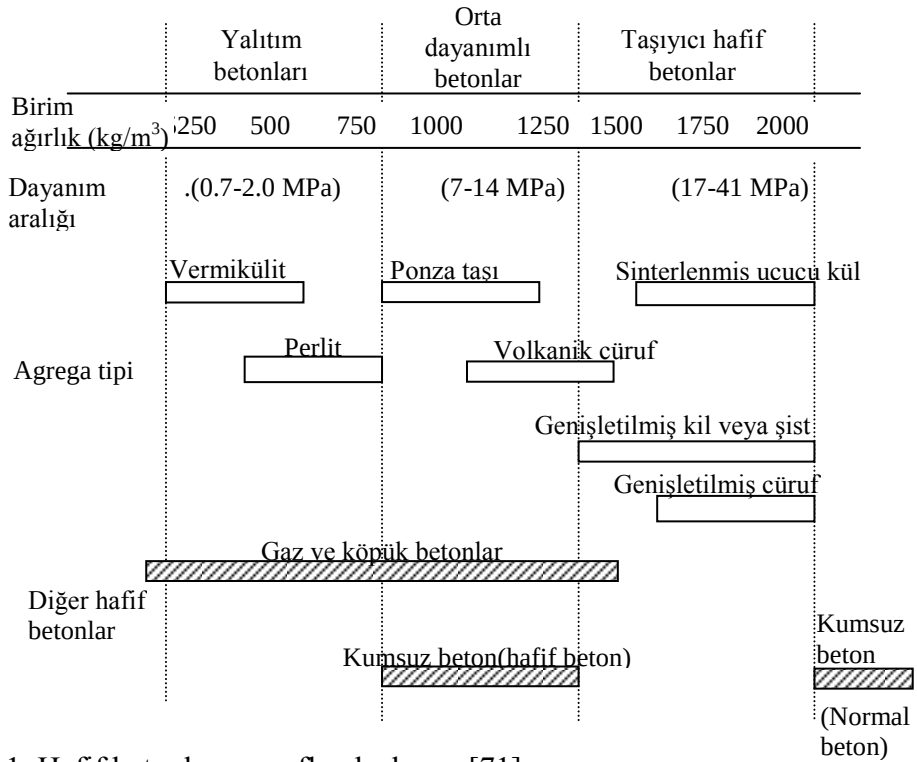
Normal Betonlar :  $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{birim ağırlık} < 2800 \text{ kg/m}^3$

Ağır betonlar : Birim ağırlık  $> 2800 \text{ kg/m}^3$

Diğer taraftan yine birim ağırlıklarına göre bütün betonların sınıflandırılması şu şekilde yapılır:

- 1) Birim ağırlığı  $400-1800 \text{ kg/m}^3$  arasında olan betonlar hafif betondur. (TS 2823 [9]'de alt sınır  $1000 \text{ kg/m}^3$  ve üst sınır  $1300 \text{ kg/m}^3$ , :DIN 1045 [10] 'de ise hafif betonların birim ağırlığı  $300-2000 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir.)
- 2) Birim ağırlığı  $1800-2000 \text{ kg/m}^3$  arasında olanlar ne hafif ne de normal betonlardır. Bazı yayınlarda olduğu gibi bu aralıktaki betonlara yarı hafif beton adı verilebilir [11, 12, 13]. Alman literatüründe [12, 13] çoğunlukla hafif normal beton diye geçen taşıyıcı yarı hafif betonların birim ağırlığı  $2000-2100 \text{ kg / m}^3$  arasındadır. Bu değerler yukarıda görüldüğü gibi DIN 1045 [10] 'deki normal betonun alt sınırıdır.
- 3) Birim ağırlığı  $2200-2500 \text{ kg/m}^3$  arasında olan betonlarda normal beton sınıfına girerler.

Şekil 1.1'de ponza taşı hafif betonunun orta dayanımlı bir beton olduğu, yalıtım betonlarının ise perlit ve vermikülit hafif agregasıyla üretilen betonlar olduğu gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Hafif betonların sınıflandırılması [71]

Şekil 1.1'de görüldüğü gibi gaz ve köpük betonları hem yalıtım hem de orta dayanımlı beton olarak adlandırılır.



Birim ağırlığı geniş bir aralıkta değişen hafif betonları sahip oldukları basınç dayanımlarını da göz önüne alarak Tablo 1.1'deki gibi sınıflandırmak da olasıdır. Bu betonların S1 sınıfındakilerden esas olarak ısı yalıtımının sağlanmasında, kısmen de taşıyıcı olarak yararlanılır. S2 ve S3 betonları orta dayanımlı betonlardır, yalıtım özellikleri de vardır. S4, S5 ve S6 betonları ise taşıyıcı hafif betonlardır. Bunlar birçok ülkede taşıyıcı beton olarak kabul edilirler. Örnek olarak, ASTM C330 standardında 28 günlük silindir basınç dayanımının 17 MPa'dan küçük olmaması, birim ağırlığının ise  $1840\text{kg/m}^3$  değerini aşmaması öngörülür. Avrupa standartlarında da benzer tanımlar vardır.

Tablo 1.1. Hafif beton sınıfları

| Hafif Beton Sınıfı | Birim Ağırlık<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Basınç Dayanım Aralığı<br>(MPa) |
|--------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| S1                 | $\leq 800$                           | 1-7                             |
| S2                 | 800-1200                             | 7-10                            |
| S3                 | 1000-1400                            | 10-14                           |
| S4                 | 1300-1800                            | 14-25                           |
| S5                 | 1500-1800                            | 25-40                           |
| S6                 | 1800-2000                            | 40-70                           |

Taşıyıcı hafif beton olarak tasarlanmayan S1 ve S2 sınıflarına ait olanlar duvar işlerinde kullanılır. Böylece yapının toplam ağırlığında önemli bir azalmanın olmasıyla depreme karşı dayanıklılıkta da belirgin katkı sağlanır. Sınıf 4 ve üstü için endüstriyel yolla üretilen yapay hafif agregaların kullanılması gerekir [72].

RILEM'in önerilerine göre [73] hafif betonlar Tablo 1.2'deki gibi sınıflandırılabilir.

Bazı ülkelerde Sınıf I betonunda en düşük basınç dayanımının 17 MPa'nın üstünde olması öngörülmekle birlikte diğer bazı ülkelerde ulusal standartlar sadece 15 MPa'nın üstünü zorunlu kılar. Bu son değer çok sayıdaki ülke için yaygındır.

Tablo 1.2. İşlevlerine göre hafif betonların sınıflandırılması [73]

| Sınıf                                        | I        | II                  | III            |
|----------------------------------------------|----------|---------------------|----------------|
| Hafif betonun türü                           | Taşıyıcı | Taşıyıcı ve yalıtım | Yalıtım        |
| Fırın kuru birim ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ) | < 2000   | Koşul konmamış      | Koşul konmamış |
| Basınç dayanımı (MPa)                        | > 15,0   | > 3,5               | > 0,5          |
| Isı iletim Katsayısı (W/mK)                  | -        | < 0,75              | < 0,30         |

Birçok ülke standardında I ve II sınıflarına yönelik en büyük birim ağırlık için genel bir sınırlama getirilmemiştir. Tasarım ve sınıflandırma için koşul konmuş olan değerler basınç dayanımı ve ısı iletim katsayısıdır.

Gazbetonların karakteristik dayanıma göre sınıflandırılması Tablo 1.3’de yapılmaktadır. Tablo 1.3’de görüldüğü üzere gazbetonlar mukavemet bakımından üç gruba ayrılmış olup fırın kuru birim ağırlığın üst sınır değeri  $1000 \text{ kg/m}^3$ ’tür. Birim ağırlığı  $1000 \text{ kg/m}^3$  -  $2400 \text{ kg/m}^3$  aralığındaki hafif ve normal betonlarda ısı iletim katsayısı 0.2-1.4 W/mK arasında değişmektedir [69].

Tablo 1.3. Karakteristik dayanıma göre gazbetonların sınıflandırılması [75]

| Özelik                                 | Düşük   | Orta      | Yüksek   |
|----------------------------------------|---------|-----------|----------|
| Basınç dayanımı (MPa)                  | < 1,8   | 1,8-4,0   | > 4      |
| Elastisite Modülü (MPa)                | < 900   | 900-2500  | > 2500   |
| Kuru birim ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ) | 200-400 | 300-600   | 500-1000 |
| Isıl iletkenlik (kuru) (W/mK)          | < 0,10  | 0,06-0,14 | > 0,12   |

### 1.3. Hafif Agregaların Sınıflandırılması

Hafif beton üretiminde en çok başvurulan yöntem, hafif agregalar ile birim ağırlığı istenen düzeyde tutmaktır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar üretildikleri malzemenin kaynağına ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılırlar. Elde ediliş biçimlerine göre hafif agregalar dört ana grupta sıralanabilir:

- (a) Doğal hafif agregalar: Ponza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemeler.

- (b) Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist, genleştirilmiş arduvaz, perlit, vurmikulit, ve styropor gibi polimer bazlı malzemeler.
- (c) Endüstriyel atıklardan üretilen hafif agregalar: Yüksek fırın cürufu, uçucu kül.
- (d) Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar: Genleştirilmiş Yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

Hafif agregalar birim ağırlıklarına göre sınıflandırıldıklarında üretiminde kullanılacakları hafif betonun fonksiyonuna göre gruplanır. Bu gruplandırma şöyledir:

- ♦ Birim ağırlığı  $400 \text{ kg/m}^3$ 'ten küçük olan hafif agregalar: Yalıtım betonlarının üretiminde kullanılırlar.
- ♦ Birim ağırlığı  $400\text{-}650 \text{ kg/m}^3$  arasında olan hafif agregalar: Yalıtım ve orta mukavemetli betonlarının üretiminde kullanılırlar.
- ♦ Birim ağırlığı  $650 \text{ kg/m}^3$ 'ten büyük olan hafif agregalar: Taşıyıcı hafif betonlarının üretiminde kullanılırlar.

#### **1.4. Ülkemizdeki Hafif Agregaların Durumu ve Ponza Taşı Hafif Agregası**

1981 yılında MTA tarafından yayınlanan rapora göre ülkemiz doğal hafif agregası açısından zengindir. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Ana Bilim Dalı ve Bayındırlık Bakanlığı'nın birlikte yaptıkları çalışmalara göre ülkemizdeki doğal hafif agregaların %57'sinin basınç dayanımların  $10 \text{ N/mm}^2$ 'nin üzerindedir. Bu kalitedeki doğal hafif agregalar, orta mukavemetli ve taşıyıcı hafif beton üretimine uygundur. Ülkemizde yapay hafif agregası sanayisi kurulmasına geçilmeden önce büyük miktarda rezervi bulunan doğal hafif agregaların değerlendirilmesi sözkonusuydu. Doğal hafif agregalar ülkemizde granül halinde bulunduklarından üretimleri için bir sorun yoktur; ancak özellikleri çok değişkendir, yöresine bağlı olarak büyük farklılıklar sergilerler.

Styropor (EPS) gibi polimer kökenli yapay hafif agregalar, üretimleri için yüksek yatırım maliyeti gerektirirler de sağladıkları yararlar ve çoğunun özellikle ambalaj malzemesi olarak kullanılıp tekrar değerlendirilmesi ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Doğal hafif agregaların , taşıyıcı amaçlı yapay hafif agregalara göre daha

dayanaksız oldukları gerçeği ve teknolojinin gelişmesi ile yapay hafif agrega sanayisi de endüstrideki yerini almaya başlamıştır. [14]

Ülkemizde en yaygın bulunan doğal hafif agrega ponza taşıdır. Kullanımı çok eskilere dayanan ponza taşının Romalılar zamanından beri kullanıldığı bilinmektedir [15]. Ergimiş lavın volkandan fışkırması sırasında açığa çıkan erimiş gazların hapsolmesiyle amorf yapılı ponza taşı parçacıkları oluşur. Bu nedenle agrega boşluklu ve dolayısıyla hafif olur. Ponza taşının boşluk miktarı %70 kadardır.

Konutlarda hafif ve yarı hafif beton kullanmakla enerji yönünden de kazanç sağlanır. Konutlarda kullanılacak hafif agregalı taşıyıcı betonlar ses yutuculuğu bakımından da iyi çözümdür. Doğal hafif agregaların iklimi soğuk yöreler olan Orta ve Doğu Anadolu'da çok miktarda bulunması da iyi bir rastlantıdır. Böylece hafif agregalı beton için gerekli olan agreganın üretiminde ayrıca bir enerjiye de gerek yoktur. Söz konusu yörelerde konut yapımı için kurulabilecek prefabrike elemanların üretimiyle ısı tasarrufu yönünden büyük yararlar sağlanabilir. Hafif beton yapı elemanlarının sağlayacağı ekonomi yanında kendi ağırlığının da azalması nedeniyle deprem kuşağında olan ülkemizde daha hafif ve güvenli yapılar üretilebilir. [16]

### **1.5. Araştırmanın Konusu**

Hem doğada bulunan hem de yapay olarak üretilen hafif agregalar her dane bölümünü içerir. Üretilmesi düşünülen hafif agregalı beton ya kesikli ya da sürekli granülometrilidir olur. Uygulamada daha az ayrışma gösteren sürekli granülometrilidir hafif betonlar tercih edilir. Sürekli granülometriye sahip normal betonun ince, orta ve iri agregalarının her bir bölümü tek tek veya oran aynı kalmak üzere bütün bölümlerinde hafif agrega ile değiştirme yapılabilir. Böylece her agrega bölümü kullanılmış olur. Bu sonuncu durumda her boyuttaki hafif agrega değerlendirilmiş olacağından ekonomi sağlanır.

Bu çalışmada, kırmataş agregası ile aynı granülometriye sahip ponza taşının, toplam agrega hacmi aynı kalmak koşuluyla, karışım oranları ayarlanarak hafif ve yarı hafif betonlar üretilmiştir. Granülometride maksimum tane boyutu ve toplam agrega hacmi aynı tutulmuştur.

Bu çalışmanın amacı kısaca şöyle özetlenebilir:

- ♦ Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların birim ağırlıkları ile basınç dayanımları, yarıma dayanımları ve elastisite modülleri arasındaki ilişkiyi belirlemek.
- ♦ Çeşitli birim ağırlıklarda üretilen hafif agregalı betonların birim ağırlıkları ile ısı iletkenlikleri arasındaki ilişkiyi saptamaktır.

### 1.6. Çalışmanın Ana Hatları

Yapılan deneysel çalışmalarda nominal taze beton birim ağırlıkları 700-1900 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen toplam 7 seri hafif ve yarı hafif beton üretildi.

Etkin su / çimento oranı 0,43 olan bu karışımların hepsinde maksimum dane boyutu da sabit olup 16 mm.'dir. Birim ağırlıkları 1900 kg/m<sup>3</sup>, 1700 kg/m<sup>3</sup>, 1500 kg/m<sup>3</sup>, 1300 kg/m<sup>3</sup> ve 1100 kg/m<sup>3</sup> olan karışımlarda toplam agrega hacminin %30'u, birim ağırlığı 900 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda toplam agrega hacminin %15'i kum olarak kullanıldı, birim ağırlığı 700 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda ise hiç kum kullanılmadı. Bütün bu karışımlardaki toplam agrega hacmi de sabit tutuldu.

Ayrıca bütün karışımlarda işlenebilirliği arttırmak ve ayrışmayı engellemek için çimento ağırlığının %1,5'i oranında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanıldı. Birim ağırlığı 1300 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda çimento ağırlığının %0,5'i oranında ve birim ağırlığı 1100 kg/m<sup>3</sup>, 900 kg/m<sup>3</sup> ve 700 kg/m<sup>3</sup> karışımlarda ise çimento ağırlığının %1'i oranında hava sürükleyici katkı kullanıldı.

Bu karışımlarla her seride 15x30 cm. boyutlarında 6'şar adet silindir numune üretildi. Bu numunelerin 4'er tanesi basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin bulunması için kullanıldı, 2'şer tanesinden kesilerek elde edilen 15x10 cm. boyutlarında 6'şar adet disk numune de yarma dayanımlarının bulunmasında kullanıldı.

Ayrıca birim ağırlıkları 1300 kg/m<sup>3</sup>, 1100 kg/m<sup>3</sup> ve 900 kg/m<sup>3</sup> olan karışımlarla 3'er adet 80x80 cm. boyutlarında ve 3 cm. kalınlığında numuneler üretildi ve bu numuneler üzerinde ısı yalıtım değerleri saptandı.

## 2. KONU İLE İLGİLİ LİTERATÜR VE ÇALIŞMALAR

### 2.1. Betonun Mekanik Davranışı

Beton; agrega, çimento ve agrega ile çimento hamuru arayüzeyinden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olarak gözönüne alındığında malzeme özellikleri sadece bileşenlerin özelliklerine bağlı değildir.

Heterojen bir malzeme olan betonun dayanımı 3 faktörden etkilenir [35]. Bunlar :

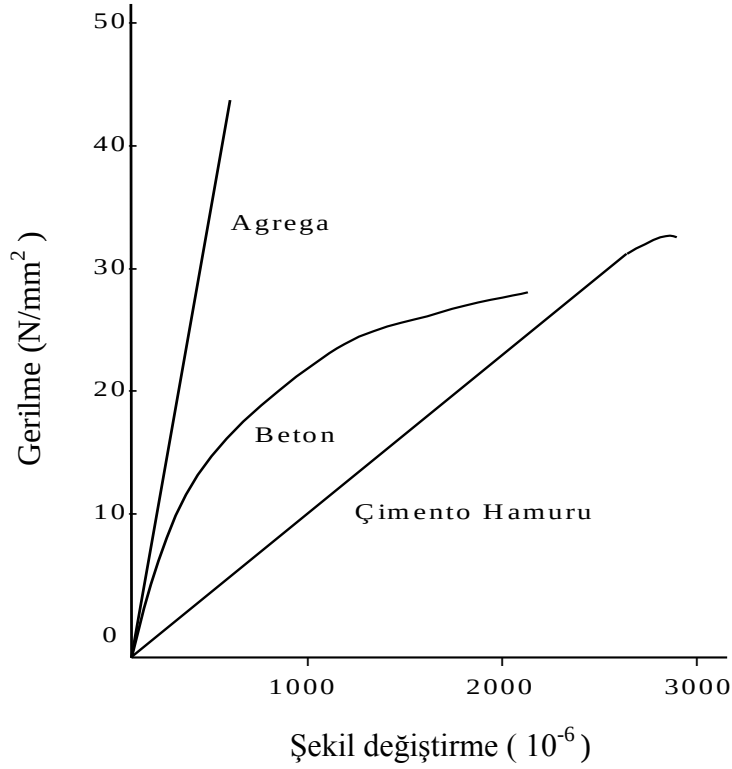
- i) Matrisin dayanımı (çimento hamurunun dayanımı),
- ii) Agreganın dayanımı,
- iii) Arayüzeyin dayanımı.

Bu faktörlerden herbirinin çeşitli sınıflardaki betonların dayanımlarında etkileri farklıdır. Ancak agrega-çimento arayüzeyi betondaki en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki temas yüzeyi, çimento hamurundan farklılıklar gösterir. Bu arayüzeyler betonun mekanik davranışında oldukça etkilidir [36].

Betonun dayanımını yitirmesi mikroçatlakların ortaya çıkmasıyla başlar. Agreg-a-çimento hamuru arayüzeyi betonun basınç altında kısa süreli davranışlarını önemli ölçüde etkiler. Agreg-a ve hidrate olmuş çimento hamuruna ayrı ayrı yük uygulandığında gerilme-şekil değiştirme eğrileri hemen hemen lineer elastik bir cismin davranışına benzer. Ancak Şekil 2.1’de görüldüğü gibi betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi lineer değildir [37].

Betonun lineer olmayan davranışı agrega-çimento hamuru arayüzeyinin varlığını ortaya koyar ve en küçük yükte bile bu temas yüzeyindeki mikroçatlamayı gösterir. Agreg-a-çimento hamuru arayüzeyindeki bu mikroçatlaklar betondaki bir kusur olarak düşünülebilir.

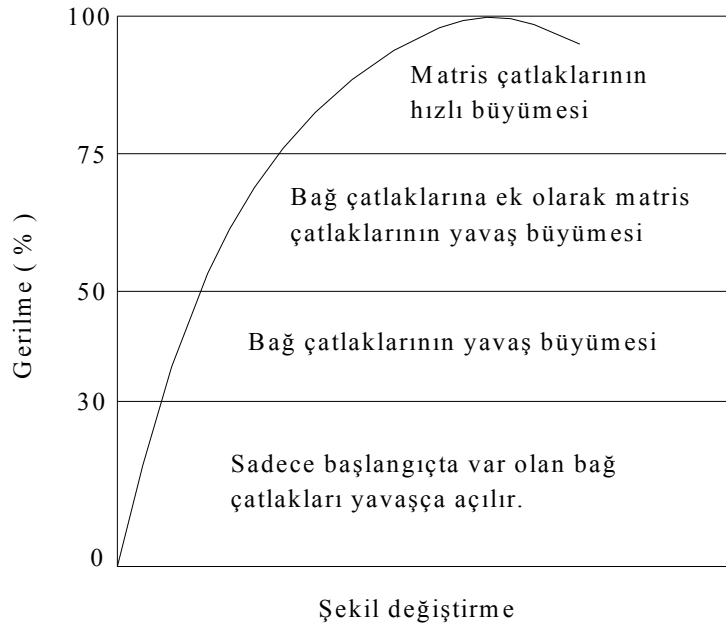
Araştırmalar, agrega ile imento hamuru arasındaki temas yüzeyinde çok küçük mikroçatlakların varlığını, bunların yk uygulanmadan önce bile bulunduğunu ortaya çıkarmıştır [27]. Betonun genel bir özelliği olan bu mikroçatlaklar iri agrega ile hidrate olmuş imento hamurunun özeliklerinin farklı olmasından, kuruma rtresi sebebiyle oluşabilir. Yükleme ncesi mikroçatlaklar betonun düşük çekme mukavemetinden önemli derecede sorumludur [38].



Şekil 2.1. Agrega, sertleşmiş imento hamuru ve betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Betona yük uygulandığında basınç dayanımının %30'una kadar mikroçatlaklar yavaşça açılırlar. %30'un üzerinde bu bağ çatlaklarının uzunlukları, genişlikleri ve sayıları artmaya başlar. Bu aşamada çatlakların ilerlemesi yavaştır. Uygulanan gerilme düzeyi basınç dayanımının %50'sine kadar malzemede lineer elastik davranış görülebilir, yani yk kaldırıldığı zaman deformasyon tersinirdir. Gerilmenin basınç dayanımına oranı %70-%90 olduğu zaman çatlaklar imento hamuru ile ince agregadan oluşan harç fazı içinde açılmaya başlar ve sayıları önemli ölçüde artar. Bu çatlaklar birleşerek sürekli çatlaklar oluştururlar ve bir çatlak ağı ortaya çıkar. Bu aşamada hızlı çatlak yayılması görülür [38]. Basınç dayanımının %90'ına ulaşıldıktan sonra ise bu bileşik çatlaklarda kararsız yayılış olur.

Bir çatlak ağı büyük ölçüde oluştuktan sonra betonun yük taşıma kapasitesi azalır. Şekil 2.2’de mikroçatlamanın şematik olarak açıklaması verilmektedir.



Şekil 2.2. Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme eğrisi

## 2.2. Agreganın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi İle İlgili Çalışmalar

ACI komitesinin hafif betonlarla ilgili raporuna göre [39]; ince ve kaba agregaların dağılımlarının ve oranlarının beton üzerinde önemli etkileri vardır. İyi derecelenmiş agrega en az seviyede boşluk oluşturacak ve bu boşlukları doldurmak için en az düzeyde çimentoya ihtiyaç duyulacaktır. Bu durum ekonomik olabilecek ve mukavemetin artmasına, rötrenin azalmasına sebep olacaktır [40].

Genelde, betonda en fazla agrega hacmini elde etmek için,

- agreganın uygun granulometriye sahip olması,
- agregaların şeklinin kübik veya yuvarlak olmaları,
- agrega yüzeyinin en az düzeyde boşluklu olması gerekir.

Bazı hallerde en büyük agrega boyutunun küçülmesi, çimento dozajında bir değişiklik yapmadan, beton mukavemetini arttıracaktır.



Taşdemir [16], normal betona ait sürekli bir geometrinin çeşitli bölümlerini ponza taşı ile değiştirerek yarı hafif ve hafif betonlar üzerinde çalışmış ve şu sonuçlara varmıştır:

- Birim hacim içinde hacmi aynı kalmak koşulu ile betonun agreg granülometrisinin hangi bölümü hafif agreg ile değiştirilirse değiştirilsin elastisite modülü değişmez.
- Hafif agreg kullanılarak normal betonun hafifletilmesi ile en az Poisson oranı, en çok elastiklik modülü azalır.
- Hafif agregalı betonlarda ortalama hafif agreg boyutu arttıkça, basınç mukavemetindeki birim kısaltmalar azalır.
- Hafif agreg miktarı arttıkça betonun basınç mukavemeti düşer.
- Hafif betonlarda en büyük agreg boyutunun küçülmesi ilk 14 günde rötreyi arttırmakta, daha sonra rötrede bir değişiklik olmamaktadır.

Zhang ve Gjorv[41]'a göre, yüksek mukavemetli hafif beton üretiminde mukavemete etki eden en önemli özellik hafif agreganın mukavemetidir.

Şehitoğlu [42] yaptığı çalışmada normal ve hafif betonlarda agreg konsantrasyonunu değiştirmiş ve normal betonlarda agreg konsantrasyonunun artmasıyla basınç mukavemetinin arttığını, hafif betonlarda ise azaldığını belirtmiştir.

Arda [43] yaptığı çalışmada yüksek mukavemetli betonlarda agreg konsantrasyonunun artmasıyla betonun basınç mukavemetinin ve elastisite modülünün arttığını göstermiştir.

Belirli bir su/çimento oranında karışımdaki agreganın yüzdesi arttıkça, betonun dayanımı da artmaktadır. Deneyler agreganın hacimce oranı beton hacminin %80'ine kadar çıktıkça beton dayanımında arttığını göstermiştir [1].

Lydon ve Baledran [44], normal ve hafif agregalı betonlarda betonun elastik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarda agreg cinsini, agreg konsantrasyonunu ve harç fazını yani çimento/kum oranını değiştirmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda agreg cinsinin elastik özelliklere etki eden en önemli faktör olduğu görülmüştür. Hafif agregalı betonlarda agreg konsantrasyonunun artmasıyla elastisite modülü düşer. Normal agregalı betonlarda agreg konsantrasyonunun artmasıyla elastisite modülü artar. Aynı agreg hacmindeki karışımlarda harç fazının değişimi elastisite

modülünü deęiřtirmemektedir. Normal ve hafif agrega konsantrasyonunun artmasıyla Poisson oranında dūřme gözlenmektedir.

Argunhan [45], yaptıęı çalıřmada řunları saptamıřtır: eęer agreganın birim aęırlıęı dane çapı ile deęiřmiyorsa, DIN 1045'deki A-B sūrekli granūloметрleri veya U-C sūreksiz granūloметрleri arasındaki bōlge en yūksek beton mukavemetlerini vermektedir [10]. Genellikle dane birim aęırlıęı, maksimum dane çapı arttıķa azalmaktadır ve bu nedenle yukarda belirtilen granūloметрler aynı zamanda en dūřuk birim aęırlıęı verirler, fakat en iyi mukavemetleri vermezler. Agreganın kaba kısmının bir kısmı yerine ince kısım ikame edilecek olursa hem mukavemette hem de birim aęırlıkta artıř elde edilir. Agreganın kaba kısmının bir bōlūmū yerine tabii kum ikame edilecek olursa sōzū geçen artıřlar daha būyūk olur ve aynı zamanda malzeme masrafı azalmıř olur. Ancak ikame edilecek bu kum miktarının bir ūst sınırı vardır. Bunun daha ūzerine çıkılması birim aęırlıęın çok fazla artmasına neden olur. Bu ūst sınır her bir agrega tūrū için deney ile bulunmalıdır.

En būyūk agrega boyutunun beton mukavemeti etkisi ūzerine Neville [1]; normal betonda en būyūk agrega boyutunun 38.1 mm.'ye kadar olan deęerlerinde, yūksek dozajlı betonlar için, mukavemette artmanın olduęunu; bu enbūyūk boyuttan sonra boyuttaki artıřla mukavemetin azaldıęını; buna karřılık normal dozajlı betonlarda ise en būyūk boyutun artması ile mukavemetin arttıęını belirtmektedir. 25mm. veya 40 mm.'nin ūstūnde en būyūk boyuta sahip agrega kullanmanın ūzellikle ayrıřmaya neden olması bakımından elveriřli olmadıęı aynı yazar tarafından savunulmaktadır.

Dięer yandan agrega mukevemetinin bilinmesinin beton mukavemetinin saptanmasında ūnemi vardır. Normal betonda basınç mukavemetinin genellikle kaba agreganın mukavemetinden daha dūřuk olması nedeniyle nihai mukavemet harç mukavemetine baęlıdır. Hafif betonda ise agrega mukavemeti ya harç mukavemetine eřit ya da daha altında olması nedeniyle beton mukavemeti agrega mukavemeti tarafından tayin edilir. Bu yūzden hafif betonda her bir agrega tūrū için belirli bir mukavemet sınırı sōzkonusu olur.

Sell [46], beton mukavemetini hafif agrega mukavemetiyle tahmine çalışmış ve silikon kauçuk devamlı fazı içinde agrega danelerine tek eksenli, iki eksenli ve ū eksenli basınç deneyi uygulayarak agregaların bağıl mukavemetlerini belirlemiştir.

Tepfers ve arkadaşları [47]da benzer bir yöntemle içinde yağ bulunan bir kaba hafif agregaları terleştirek basınç uygulamışlar, böylece değişik agregaların mukavemetleri arasında karşılaştırma olanağı sağlamışlardır. Gröbl [48, 49] hafif agreganın çekme mukavemetinin artmasıyla hafif beton mukavemetinin artacağını göstermiştir. Gröbl, sözkonusu araştırmalarında agreganın çekme mukavemetinin belirlenmesinde kullandığı deney tekniğini vermiş ve başka araştırmacıların bu doğrultudaki çalışmalarını özetlemiştir.

ACI 213 [8]'de ise hafif agreganın danelerinin mukavemetinin, bunların kökenlerine ve tiplerine göre değişiklik gösterdiği, agreganın mukavemetinin belirlenmesi için niteliksel bir ölçünün olmadığı, betonun mukavemeti ile dane mukavemeti arasında net bir korelasyon bulunmadığı belirtilmiştir. Ayrıca en büyük agreganın boyutunun betonun işlenebilirliğini, iri agreganın/kum oranını, çimento dozajını, basınç mukavemetini, ve rötresini etkileyebileceği kaydedilmiştir.

Yine bir araştırma sonucunda, düzgün yüzeyli agregaların köşeli ve pürüzlü yüzeye sahip olanlardan daha dayanıklı oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmada en uygun biçimli danelerin küp veya küreye yaklaşanlar olduğu ortaya çıkmıştır [10].

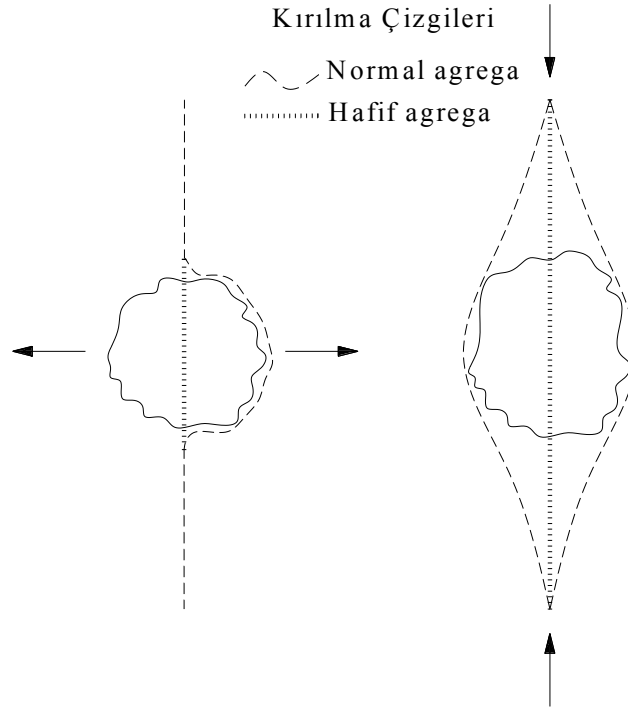
ACI 211'de, hafif agregaya beton üretiminden önce bir ön emdirme uygulamakla taşıma sırasında ufalanmanın azalacağı, agregadaki ayrışmanın önleneyeceği ve beton kıvamının değişmeden kontrol edilebileceği belirtilmiştir.

Betonda kullanılan hafif agregalarla ilgili olarak bazı standartlarda suda çözünen sülfat içeriği sınırlandırılmıştır. BS 3797 [50]'de  $SO_3$ 'ün %1'i, TS 1114 [51]'de ise %1.5'i aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Hafif agregada yanıcı madde miktarı için BS 3797 [50]'de %4'ü, TS 1114 [51]'de ise %5'i aşmaması istenmektedir.

### **2.3. Sürekli Fazın (matrisin) Etkisi**

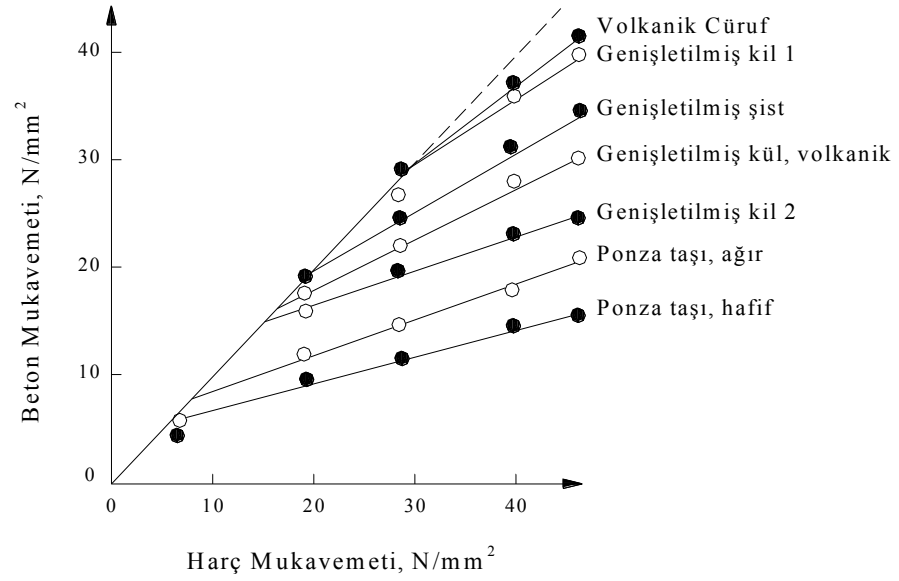
Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere agreganın, harç ve arayüzeyden oluşan beton basitleştirilmiş biçimde üç fazlı kompozit bir malzeme varsayılır. Normal betonda agreganın mukavemeti ve elastiklik modülü değerleri harcınkilerden daha büyüktür. Bu nedenle kırılma zayıf olan faz yüzünden oluşur. Hafif betonda ise tersi bir durum vardır, yani matrisin mukavemeti ve elastiklik modülü agreganınkilerden

daha büyüktür. Bundan dolayı hafif betonun kırılması da daha zayıf olan agregaların göçmesiyle oluşur. Normal betona karşın hafif betonda ek parametreler olarak agreganın hacim konsantrasyonu ile danelerin gözönüne alınması gerektiğini Schulz [52] belirtmiştir. K. Newman ve J.B. Newman [53]’a göre tek eksenli basınç ve çekme durumlarında , beton içindeki normal ve hafif agregalarda oluşan kırılma çizgileri Şekil 2.3.’de görülmektedir. Basınç durumu için benzer bir değerlendirme Schulz [54] tarafından yapılmıştır.



Şekil 2.3. Tek eksenli çekme ve basınca maruz betonda agreganın normal veya hafif olması durumuna göre oluşan kırılma çizgilerinin görünüşü

Grübl [55] ve Wesche [21], Schulz’un deney sonuçlarını değerlendirmişler ve bu araştırmacının çok sayıda hafif agreganın kullanılarak bu tür betonun kritik mukavemetini saptadığına değinmişlerdir. Şekil 2.4.’de kritik mukavemetlerin üstünde hafif agregalı betonun mukavemeti için regresyon doğruları görülmektedir. Sınır mukavemetler  $30 \text{ N/mm}^2$ ’nin altındadır ve bu sürekli faz mukavemetine eşit beton mukavemetini göstermektedir. Bu şeklin incelenmesinden görüldüğü üzere, hafif beton mukavemetinin daima harç mukavemetinden düşük bulunacağı, harç mukavemetini daha da arttırmanın bir yararı olmayacağı, harç mukavemetini arttırmanın dayanıklı agregalarda faydalı olacağı açıktır.



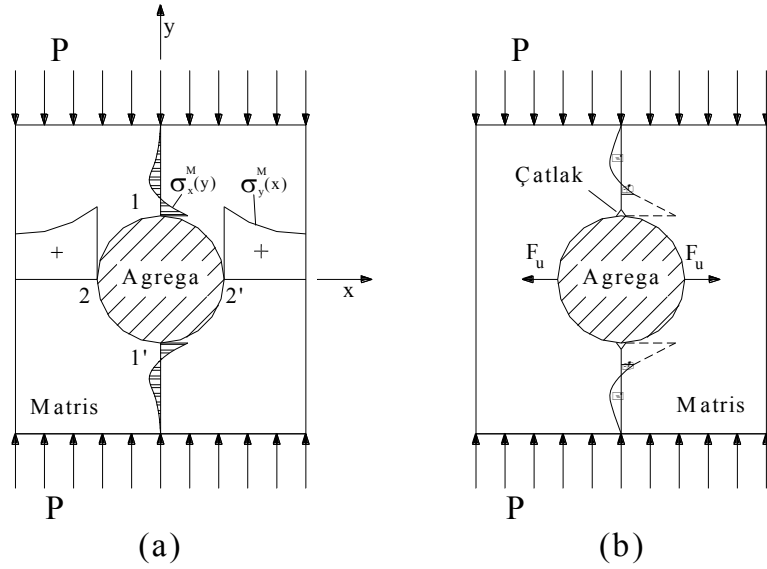
Şekil 2.4. Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti

Grübl [48, 49, 55], yaptığı çalışmalarda, hafif betonun basınç mukavemetini harç mukavemetinin arttırdığını fakat bu artışın az olduğunu belirtmiştir. Grübl'ün açıklamaları şöyledir:

Hafif betona dış basınç yükü uygulandığı zaman hafif agrega sınırında (yüke dik doğrultuda) çekme gerilmeleri oluşur. Şekil 2.5.a.'daki  $\sigma_x^m(y)$ , x doğrultusunda ve y ekseninde sürekli fazda oluşan gerilmeyi,  $\sigma_y^m(x)$ , y doğrultusunda ve x ekseninde yine sürekli fazda oluşan gerilmeyi göstermektedir.

Çekme kuvveti aşılnca bu gerilmeler harçta da çekmeye neden olur. Buna ek olarak agrega  $F_u$  çekme kuvvetine maruz kalır (Şekil 2.5.b.). Çekme gerilmesi agreganın çekme mukavemetine erişince hafif agrega danesi çatlar. Çatlak boyundaki ani artma ile beton göçer. Bu durumda hafif betonun basınç mukavemeti, agreganın çekme mukavemetine bağlı olur.

Grübl'ün hafif betonun kırılma davranışını açıklamak için ileri sürdüğü bu model başka araştırmacılar tarafından da birçok kez kullanılmıştır. Örneğin Zaitsev ve Witmann [56] da normal betondaki delik ve kusurları incelemek için böyle bir modelden yararlanmıştır. Bilindiği gibi bu model homojen ve sonsuz levhadaki delik problemidir.

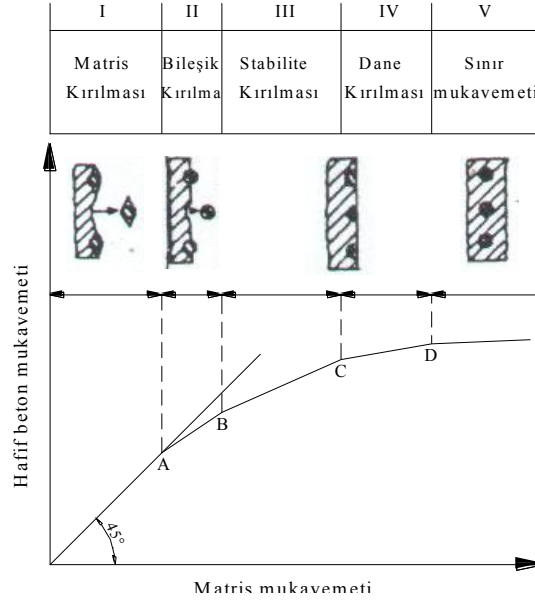


Şekil 2.5. Hafif betonun kırılmasının modelle açıklanması

Grübl yaptığı başka bir çalışmada [55] şu görüşlere yer vermiştir (Şekil 2.6.):

Eğer matris ile hafif agrega arasında bağ mukavemeti yüksek ise yük daneye aktarılır. Bağ mukavemeti aşıldıktan sonra çatlak dane etrafında danenin sınırı boyunca dolanır. Grübl, buna birleşik kırılma (kırılma durumu II) adını vermiştir. Eğer agrega, matris içindeki ilk çatlak oluşuncaya kadar çatlamadan kalırsa II, III ve IV kırılma durumları ortaya çıkar. Matrisin yüksek mukavemetli olması durumunda agreganın çekme mukavemeti öyle bir değer almalıdır ki dane matrisin çatlağı ortaya çıkmadan çatlasın. Bu durumda maksimum basınç kuvvetine erişilir (durum V). V. kırılma durumunun ortaya çıkması yüksek çekme mukavemetine sahip harcın seçilmesiyle olanaklıdır.

Grübl, diğer bir çalışmasında [49] şunları eklemiştir; Sınır mukavemet (Şekil 2.6.‘da A noktası) olarak belirli bir mukavemet değerinin üstünde, hafif agregalı betonun basınç mukavemeti harç mukavemetinden az etkilenir. Sınır mukavemetinin altında ise her ikisinin (hafif beton ve harç) mukavemeti birbirine eşittir. Sınır mukavemet değeri ve sınır mukavemet değerinin üstündeki mukavemet artışı kullanılan agregaya bağlıdır. Hafif agregalı betonun ulaşabileceği en yüksek basınç mukavemeti (Şekil 2.6. ‘da D noktası) sınır basınç mukavemetidir.



Şekil 2.6. Hafif betonun kırılma durumlarının şematik gösterimi

## 2.4. Elastik Davranış

Bazı araştırmacılara göre betonda matris fazı bir sıvı karakterine sahiptir. Bu görüş tamamen doğru olmasa dahi sertleşmiş çimento hamuru kuvvet altında doğal taş gibi, tamamen katı cisimlerden farklı bir şekilde deformasyon yapmaktadır. Bu durum sertleşmiş çimento hamurunun vizkos bir bünyeye sahip olduğunu göstermektedir. Çimentonun su ile yaptığı kimyasal reaksiyonun zamanla devam etmesinin bir sonucu olarak, bağlayıcı madde fazı sürekli bir gelişme halindedir [57].

Kökeni tamamen doğal olan kum, çakıl veya kırmataş taneleri ise kuvvet altında daha çok elastik deformasyon yaparlar. Böylelikle kuvvet altında reaksiyonları tamamen farklı olan iki fazın birleşmesinden meydana gelen betonun deformasyonu son derece karmaşık bir durum göstermektedir [57].

Lydon ve Baledran [44], betonun elastik davranışı üzerinde çalışmalar yapmışlar ve betonun elastik davranışını etkileyen en önemli faktörlerin; agreganın cinsi, betonun basınç mukavemeti, birim ağırlığı, yaşı ve numunenin saklama koşulları olduğunu belirtmişlerdir.

Neville [1], hafif betonların Poisson oranlarının normal betonun Poisson oranına yakın olduğunu fakat aynı mukavemetteki normal betonlara oranla hafif betonların elastisite modülünün 1/2 ila 3/4 oranında daha az olduğunu belirtmiştir.

Aynı şekilde Taşdemir [16], hafif agregalar kullanılarak normal betonun hafifletilmesiyle en az Poisson oranının, en çok elastisite modülünün azaldığını göstermiştir.

Gjorv ve Zhang [41], elastisite modülüne etkileyen en önemli faktörün agreganın rijitliği ve agregalar miktarı olduğunu belirtmekte ve ayrıca agregalar-çimento arası bağın önemini vurgulamaktadır.

Moral [58] tarafından yapılan çalışmalarda elastisite modülü çimento hamurunun yapısından duyarsız çıkmıştır.

## **2.5. Elastik Olmayan Davranış**

Tek eksenli basınç altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi başlangıçta lineer bir kısım ile bunu izleyen ve lineer olmayan ikinci kısımdan oluşmaktadır. Lineer kısım küçük olup kırılma yükünün yaklaşık %30'una kadardır. Betonun lineer olmayan şekil değiştirmeleri ise daha fazladır ve bu kısım projelendirme bakımından önemlidir.

Yük uygulanmamış betonda iri agregalar ile harç fazları arasında, çimento hamurunun yapmış olduğu rötre dolayısıyla oluşan mikroçatlaklar vardır [59]. Betona yük uygulaması sürdürülürse belirli bir gerilme değerine varıldığında bu mikroçatlaklar uzamaya başlar. Bu gerilme düzeyine kadar yaklaşık sabit kalan veya azalan Poisson oranı, bundan sonra belirgin bir artma gösterir. Bu gerilme değerine süreksizlik sınırı adı verilir.

Gerilme uygulamasına devam edilirse mikroçatlaklar artmaya başlar, beton içinde sürekli mikroçatlak ağı oluşur. Gerilmenin belirli bir değerine kadar küçülen numune hacminin, bundan sonra artma yönünde değiştiği görülür. Gerilmenin bu değerine de çözülme sınırı denilmektedir. Bu gerilme değerinin altındaki bir düzeye kadar yük uygulanır ve bu yük sabit tutulursa meydana gelmiş çatlaklarda ilerleme olmaz. Buna karşılık çözülme sınırına varmış bir betonun üstündeki yük tutulmaya devam edilirse,



çatlaklar zamanla kendiliğinden ilerler ve sonunda beton mukavemetini tamamen yitirir. Bu bakımdan çözülme sınırına gerçek basınç mukavemeti de denilir. Çözülme sınırının belirginliği, sertleşmiş çimento hamurunda veya agregada görülmez. Bu tipik davranış betonun kompozit niteliğine bağlıdır.

Normal betonlarda genellikle agrega matrisden daha dayanıklıdır. Betona çekme gerilmesi uygulandığında çatlaklar ya matris içinden ya da matris-agrega arayüzeyinden yayılacaklardır. Çatlaklar ilerlerken agregada tarafından tutulabilir. Ayrıca çatlakların agregada etrafından dolaşması ve çatallaşması bir miktar enerjinin sönümlenmesine yol açacaktır. Hafif betonlarda ise çatlak yayılması agregada içinden başlayacak ve bu olay ani göçmeye sebep olacaktır. Bu yüzden hafif betonlar, normal betonlara göre biraz daha gevrek kırılırlar [41].

Oktar [60], çimento hamurunun hamurunun daha az boşluklu bir yapıya sahip olmasıyla beton ve harçlarda ani kırılma eğiliminin ortaya çıkabileceğini saptamıştır. Süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç mukavemeti üzerinde en önemli işleve bağlayıcı hamurun yapısının sahip olduğu, granülometrinin etkisinin bunun yanında küçük kaldığını belirlemiştir. Basınç mukavemetindeki boyuna kısalma üzerinde ise agregada granülometrisinin hamur yapısından daha önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuştur. Agregada granülometrisinin incelidikçe, inelastik bölgede meydana gelen şekil değiştirmelerin arttığını saptamıştır. Bağlayıcı hamurun kompasitesinin artmasının, süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç mukavemetindeki boyuna kısalmayı arttırdığı belirlenmiştir.

Şehitoğlu [42], yaptığı çalışmada normal betonların tümünde, agregada konsantrasyonu arttıkça süreksizlik sınırı, çözülme sınırı, basınç mukavemetinin arttığını, hafif betonlarda ise azaldığını saptamıştır.

Arda [43], yüksek mukavemetli betonlarda agregada konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımının arttığını ve yüksek dayanımlı betonlarda normal dayanımlı betonlara oranla kırılmaların gevrekleşmekte olduğunu göstermiştir.

Moral [58], süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve basınç mukavemeti uygun granülometri bölgesinde bağlayıcı hamur yapısına duyarlı, buna karşılık daha ince granülometrilere her üç elastik olmayan özeliğinde hamur yapısından duyarsız olduğunu ortaya koymuştur.

## 2.6. Hafif Betonların $\sigma$ - $\epsilon$ eğrileri

Hafif betonların gerilme-şekil değiştirme eğrileri normal betonlarınkine benzerlik göstermesine karşın, başlangıçta yatay eksene doğru olan eğrilme daha azdır. Deneyler, hafif agregalı normal betonda gerilme-şekil değiştirme eğrisinin inen kısmının daha hızlı ve ani iniş ortaya koyduğunu göstermiştir. Yine, hafif betonların gerilme – şekil değiştirme eğrileri fazla eğrilik yapmamakta; göçme de eğim yapmaksızın oluşmaktadır. Burada göçme, matrisin göçmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Hafif betonların gerilme – şekil değiştirme eğrisi sertleşmiş çimento hamurununkine benzerlik göstermektedir ve çok sayıdaki mikro çatlaklar eğimi azaltmaktadır [25]. Mikro çatlama mekanizmasında beton, agregası ve harçtan ibaret iki fazlı bir malzeme olarak düşünülür. Betonda artan yük durumunda çatlama genellikle harç ve agregası arasındaki ara kesitlerde ilk olarak yer alır. Bunlar basit bağ çatlaklarıdır. Bağ çatlakları arasında harç çatlaklarına doğru ilerleme olur. Ve son olarak kompleks birleşik çatlakların oluşumu göçmeye öncülük eder. Bağ çatlakları bileşik çatlakların içinde gelişmezler ve yük artmadıkça kırılmaya öncülük etmezler. Birleşik çatlaklar veya en azından onların bazı tipleri sabit kalmayıp artarlar ve sabit yük altında göçmeye öncülük ederler. Betonda mikro çatlama ile ilgili çatlaklar üç tipte gruplandırılabilir [26] :

- a) Bağ çatlakları
- b) Harç çatlakları
- c) Agregası içi çatlakları

Basit bir çatlak, herhangi bir diğer çatlakla bağlanmamış herhangi bir tipte tek bir çatlaktır. Birleşik bir çatlak ise, birbirine bağlı (örneğin birleşik bağ ve harç çatlakları) iki veya daha fazla çatlakla ifade eder. Basit ve birleşik çatlaklar içerisinde mikro çatlakların ayrılması, mikro çatlamanın iki farklı fazı arasında bir ayırım oluşturur. Bu durum aynı zamanda betonun kırılmasına öncülük eden birleşik çatlakların gelişmesidir. Bu çatlaklar yüksek gerilme ve şekil değiştirme seviyesinde oluşur. Ayrıca, çatlak gelişmesinin stabilitesi ve büyüklüğünü ifade etmek amacıyla birleşik çatlaklar kendi aralarında tiplere ayrılmışlardır. Örneğin “Tip 1” birleşik çatlak; bir bağ çatlak veya bir harç çatlaklarının kombinasyonundan yada bir harç çatlak tarafından iki bağ çatlaklarının bağlanmasından ibarettir. “Tip 2” birleşik çatlak

ise en az iki bağ çatlağı ve iki harç çatlağının birleşmesinden ibarettir. Bağ çatlakları yine enaz bir harç çatlağı tarafından bağlanmışlardır.

Göçme mekanizmasını birleşik çatlakların oluşturmalarına karşın; düşük mukavemetli betonlarda basit çatlaklar, mikroçatlamanın aşamalarını belirtmektedir. Yüksek mukavemetli betonlarda, yani birleşik çatlakların hakim olduğu davranışta durum böyle değildir. Bunun nedeni, düşük mukavemetli betonlarda en dayanıksız bağın hemen hemen yalnız agrega – harç yüzeyi üzerine yer alması ve ilerleyen çatlama mekanizmasının bağ çatlakları arasında köprü kuran harç çatlaklarından meydana gelmesidir.

Betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi, aynı su/çimento oranındaki harç veya çimento hamuruna göre daha fazla bir eğriliğe sahiptir. Gerilme – şekil değiştirme eğrisindeki bu eğrilik agrega ile harç (veya çimento hamuru) temas yüzeyinde oluşan ve mekanizması yukarıda açıklanan mikroçatlamalardan kaynaklanır. Gerilme – şekil değiştirme eğrisinin biçimine; agrega içeriği yükleme hızı ve mikroçatlama süreci gibi faktörler önemli derecede etki ederler. Bir araştırmada; agrega ile harç temas yüzeyinde oluşan mikroçatlakların betonun iç yapısında yük uygulanmadan önce var olması ve çok düşük gerilmelerden itibaren sayıca artmaya ve ilerlemeye başlaması, betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisini ve kırılma davranışını önemli derecede etkileyeceği belirtilmiştir [27].

Hafif betonların gerilme – şekil değiştirme eğrilerini inceleyen bir başka araştırmada şu sonuçlar çıkmıştır [28].

Agrega ve matrisin rijitlikleri nedeni ile bu iki bileşende farklı gerilme yayılışları oluşur. İç çatlakların gelişme hızı ise agrega ile matrisin rijitlikleri arasındaki farkla ilgilidir. Agreganın rijitliği matrisin rijitliğine yaklaştıkça gerilme – şekil değiştirme eğrisinin rijitliği azalır. Yüksek mukavemetli normal betonlarla, hafif betonların gerilme – şekil değiştirme eğrileri düz bir doğruya daha yakındır. Deney sonuçlarından, hafif betonun tek eksenli basınç altında en yüksek gerilme noktasından sonra ani bir inişle çok gevrek biçimde kırıldığı görülmektedir. Bu bir bakıma yükün çok hızlı boşaldığını ifade etmektedir.

Sonuç olarak; birçok araştırmacının belirttiği gibi, hafif betonda gerilme – şekil değiştirme eğrisi çok kavisli bir eğri değildir. Böylece, en hafif betondan normal

betona doğru yaklaşıldıkça gerilme – şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alanın (Bağıl tokluk) artması doğal kabul edilir. Özellikle efektif su/çimento oranı 0,40 değerinden küçük olan taşıyıcı hafif betonlarda gerilme – şekil değiştirme eğrisinin bir ikinci derece parabolü gibi varsayılacağı belirgin olarak gösterilmiştir.

## **2.7. Hafif Betonların Diğer Özellikleri ve Etkileyen Faktörler**

### **2.7.1. Depreme Dayanıklılık**

Taşdemir [61], hafif betonun bir türü olan gazbetonlar üzerine yaptığı bir çalışmada gazbetonun depreme dayanıklı yapı üretiminde uzun yıllardır deprem etkisindeki yörelerde kullanılmakta olduğunu belirtmiştir. Hafif betonun bir türü olan gazbeton betonarme yapıda blok halinde ara bölme duvarları olarak kullanıldığı gibi donatılı döşeme ve çatı plakları ve donatılı düşey paneller halinde de kullanılır. Genel olarak bölme duvarları gazbeton ile yapılmış yapıların depreme karşı iyi direnç gösterdiği bilinmektedir. Bu malzeme ile yapılan bölme duvarı ne yatay ne de düşey yük taşıyıcı eleman olarak tasarlanır. Ancak, yapının taşıyıcı sisteminin deprem davranışına katkısı vardır. Deprem hareketinin başlangıç aşamasında gazbeton duvar elemanları yatay yüklerin alınmasına oluşturdukları yapısal rijitlikle katkı sağlar ve geçici bir süre için deprem sırasında düşey yükleri de taşıyabilir. Bu hafif betonun kullanıldığı yapılarda daha üniform gerilme yayılışları elde edilir ve daha iyi bir deformasyon uyumu sağlanır.

Aynı amaç için kullanılan birçok malzemeye göre gazbetonun düşük birim ağırlığa sahip olması yapının toplam ağırlığının azalmasına katkı sağlar ve böylece yapının toplam kütesini düşürerek deprem sırasında oluşan eylemsizlik kuvvetlerini azaltır. Tuğla duvarlarla yapılan yapılarda eşdeğer bir yalıtım sağlamak için sandöviç elemanlar kullanılır, ancak orta şiddette ve üstündeki depremler sırasında bu dış duvarlar yıkılabilir; bu da hasarı artırır. Bölme duvardaki devrilmeyi önlemek için hatıllar kullanılabilir, böyle bir önlem ise ısı köprülerinin oluşmasına neden olur. Gazbeton blokların arayüzeylerinde kullanılan yapıştırıcı harcın iyi bir dayanım sağlaması nedeniyle üniform yük dağılımları elde edilir. Bu durumda gazbeton kayma rijitliğini diğer malzemelerle yapılan duvarlara göre daha uzun süre koruyarak depremin şiddetli yer hareketi fazına girmesinde yapıya ek dayanım sağlama olasılığı

vardır. Deprem tasarım kuvvetinin global olarak azalması donatıda da azalmayı sağlar, böylece gazbetonla daha ekonomik çözüm elde edilir. Endüstriyel yapılarda gazbeton panellerin kullanılmasıyla sismik yükler altında yapının düğüm noktaları daha az zorlanır ve depreme karşı uygun çözüm sağlanır .

### **2.7.2. Su Emme Miktarı**

Hafif betonun, normal betona göre %12 - %22 oranında daha fazla su emdiği görülmüştür.

### **2.7.3. Donmaya Dayanıklılık**

Hafif agregada içindeki boşluklar su ile dolu olmamak koşuluyla, yani betonun tam kuru olması halinde donmaya dayanıklılık bakımından, hava sürüklenmiş bir betondaki gibi faydalı olduğu hava katkılı hafif betonların donmaya karşı normal betonlara göre daha fazla veya eşit dayanma gösterdiği, genel olarak çimento oranının artması ve toplam su oranının azalmasının betonun bu özeliğini iyileştirdiği belirtilmektedir [18].

### **2.7.4. Isıl Genleşme**

Hafif agregaların ısı genleşme katsayısı daha düşük olduğu için hafif betonda ısı genleşme katsayısı agregada çeşidine ve katılan doğal kum miktarına bağlı olarak normal betonun yaklaşık 80%'i kadar olup  $\alpha_t = 8 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$  (m/m °C) arasında değiştiği kaydedilmektedir [8].

### **2.7.5. Isı Yalıtımı**

Hafif betonun ısı yalıtımının normal betona kıyasla, hafif beton birim ağırlıklarına ve hafif beton yapımında kullanılan hafif agregada cinslerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Şekil 2.1'de TS 825 [18]'de verilen normal ve hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.1. Normal betona ve çeşitli hafif betonlara ait ısı iletkenlik katsayıları

| Malzemenin veya bileşenin çeşidi                                                                                                     | Birim Ağırlık kg/m <sup>3</sup> | Isı İletkenlik Katsayısı W/mK |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| Normal beton, (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (Donatılı)                                    | 2400                            | 2.10                          |
| Normal beton, (TS 500'e uygun), doğal agrega veya mıcır kullanılarak yapılmış betonlar (Donatısız)                                   | 2200                            | 1.74                          |
| Gözenekli hafif agregalar kullanılarak ve kuvars kumu katılmaksızın yapılmış betonlar (TS 1114'e uygun agregalarla )                 | 800                             | 0.39                          |
| "                                                                                                                                    | 900                             | 0.44                          |
| "                                                                                                                                    | 1000                            | 0.49                          |
| "                                                                                                                                    | 1100                            | 0.55                          |
| "                                                                                                                                    | 1200                            | 0.62                          |
| "                                                                                                                                    | 1300                            | 0.70                          |
| "                                                                                                                                    | 1400                            | 0.79                          |
| "                                                                                                                                    | 1500                            | 0.89                          |
| "                                                                                                                                    | 1600                            | 1.00                          |
| "                                                                                                                                    | 1800                            | 1.30                          |
| "                                                                                                                                    | 2000                            | 1.60                          |
| Yalnız genleştirilmiş perlit kullanılarak ve kuvars kumu katılmaksızın yapılmış betonlar (TS 3649'a uygun )                          | 300                             | 0.10                          |
| "                                                                                                                                    | 400                             | 0.13                          |
| "                                                                                                                                    | 500                             | 0.15                          |
| "                                                                                                                                    | 600                             | 0.19                          |
| "                                                                                                                                    | 700                             | 0.21                          |
| "                                                                                                                                    | 800                             | 0.24                          |
| "                                                                                                                                    | 900                             | 0.27                          |
| "                                                                                                                                    | 1000                            | 0.30                          |
| "                                                                                                                                    | 1200                            | 0.35                          |
| "                                                                                                                                    | 1400                            | 0.42                          |
| "                                                                                                                                    | 1600                            | 0.49                          |
| Gözeneksiz agregalar kullanılarak yapılmış betonlar                                                                                  | 1600                            | 0.81                          |
| "                                                                                                                                    | 1800                            | 1.10                          |
| "                                                                                                                                    | 2000                            | 1.40                          |
| Gözenekli hafif agregalar kullanılarak kuvarz kumu katılmadan yapılmış betonlar                                                      | 600                             | 0.22                          |
| "                                                                                                                                    | 700                             | 0.26                          |
| "                                                                                                                                    | 800                             | 0.28                          |
| "                                                                                                                                    | 1000                            | 0.36                          |
| "                                                                                                                                    | 1200                            | 0.46                          |
| "                                                                                                                                    | 1400                            | 0.57                          |
| "                                                                                                                                    | 1600                            | 0.75                          |
| "                                                                                                                                    | 1800                            | 0.92                          |
| "                                                                                                                                    | 2000                            | 1.20                          |
| Yalnız doğal bims kullanılarak ve kuvars kumu katılmadan yapılmış betonlar (TS 3234'e uygun) (TS 2823'e uygun yapı elemanları dahil) | 500                             | 0.15                          |
| "                                                                                                                                    | 600                             | 0.18                          |
| "                                                                                                                                    | 700                             | 0.20                          |
| "                                                                                                                                    | 800                             | 0.24                          |
| "                                                                                                                                    | 900                             | 0.27                          |
| "                                                                                                                                    | 1000                            | 0.32                          |
| "                                                                                                                                    | 1200                            | 0.44                          |
| Ahşap testere veya plânya talaşı betonu                                                                                              | 400                             | 0.14                          |
| "                                                                                                                                    | 600                             | 0.19                          |
| "                                                                                                                                    | 800                             | 0.25                          |
| "                                                                                                                                    | 1000                            | 0.35                          |
| "                                                                                                                                    | 1200                            | 0.44                          |
| Çeltik kapçığı betonu                                                                                                                | 600                             | 0.14                          |
| "                                                                                                                                    | 700                             | 0.17                          |
| Buharla sertleştirilmiş gaz betonlar (TS 453'e uygun yapı elemanları dahil)                                                          | 400                             | 0.14                          |
| "                                                                                                                                    | 500                             | 0.16                          |
| "                                                                                                                                    | 600                             | 0.19                          |
| "                                                                                                                                    | 700                             | 0.21                          |
| "                                                                                                                                    | 800                             | 0.23                          |

### 2.7.6. Yangına Dayanıklılık

Hafif beton yapılarının yangına dayanıklılığı, ısı yalıtımının daha fazla ve ısı genleşmelerin daha az olması nedeniyle normal betonunkinden daha iyidir. Belirli bir yangın yüküne dayanma süresi normal betonunkine göre %20 ~ %30 daha uzun olmaktadır [19].

Taşdemir [61], hafif betonun bir türü olan gazbetonlar üzerine yaptığı bir çalışmada gazbetonun yanmayan bir yapı malzemesi olup yangına karşı üstün bir performansa sahip olduğunu belirtmiştir. Düşük ısı iletkenliği nedeniyle malzeme içindeki ısı geçişi düşük hızda oluşur ve bu da gazbetonun yangın etkisine dayanıklı olmasını sağlar. Sadece yangının etkili olduğu gazbeton yüzeyi değil, diğer yüzeyinde de sıcaklık normal betona göre daha düşüktür. Bundan dolayı, gazbetonun yapılarda diğer malzemeleri koruma işlevi de vardır. Ayrıca bu hafif beton deprem sırasında oluşması muhtemel yangınlara karşı da yarar sağlar.

Yangın sırasında gazbeton içinde mevcut kristal suyu sıcaklık düşürücü rol oynar. Gazbetonun boşluklu yapısı nedeniyle yangın sonucu parça kopmaksızın ve dağılma olmaksızın buharın kaçıışı sağlanır. Yangında gazbetonda sıcaklık normal betonunkinden çok daha düşüktür. Sıcaklık, sadece yangın etkisindeki bir yüzde ve yaklaşık olarak ancak 5mm lik bir derinlikte etkili olabilmekte, gazbetonu diğer yüzeyinde ise sıcaklık etkili olamamaktadır. Dolayısıyla gazbeton, içindeki donatıyı iyi bir biçimde korumaktadır.

Tablo 2.2’de görüldüğü gibi söz konusu yangın etkisindeki bir donatılı gazbeton panelin içindeki donatı çeliğinin özelliklerinde de bir değişiklik olmamış ve gazbeton donatısını korumuştur.

Öte yandan gazbeton çelik yapıları da koruyucu bir malzeme olarak kullanılmaktadır. 1970 yılında Atatürk Kültür Merkezi yangınında birçok metali eriten yangının alevleri gazbetonla yapılan “yangın kalkan duvarını” aşamadı. Sonuçta, çok değerli aletler ve enstrümanlar gazbeton sayesinde korunmuş oldu.

Tablo 2.2. Yangın görmüş donatılı gazbeton panel içindeki donatıların mekanik özellikleri ve standard değerlerle karşılaştırılması

| Donatının mekanik özellikleri | Donatının çapı, mm |     | TS 708 standardının öngördüğü değerler |
|-------------------------------|--------------------|-----|----------------------------------------|
|                               | 4,2                | 3,8 |                                        |
| Akma sınırı, MPa              | 670                | 598 | 500                                    |
| Çekme dayanımı, MPa           | 743                | 708 | 550                                    |
| Kopma uzama oranı, %          | 9,8                | 10  | 8,0                                    |

Yüksek dayanımlı betonların üç önemli sakıncası vardır;

- i) erken yaşta oluşan otojen rötre,
- ii) kırılmaları sırasında gevrek davranış sergilemeleri,
- iii) yangına karşı normal betona kıyasla daha dayanıksız olmaları.

Bu sonuncusu yüksek dayanımlı betonların en önemli sakıncalarından biridir. Bu sakıncayı gidermek için yüksek dayanımlı betonlara polipropilen lifler katılmaktadır. Bu lifler yaklaşık 180°C’ de erimekte ve böylece yangın sırasında beton içinde su buharının tahliye olabileceği kanallar yaratılmaktadır. Bu da gazbetonun yangına karşı önemini belirgin biçimde ortaya koymaktadır.

#### 2.7.7. Ses Emme

Hafif betonun ses emme özeliği havadaki ses enerjisinin betonun çok küçük kanallarında ısıya dönüştürülmesi nedeniyle iyi olduğu belirlenmiş, dolayısıyla ses emme katsayısının normal betona oranla yaklaşık iki kat fazla olduğu belirtilmiştir. Betonun birim ağırlığı azaldıkça ses yutuculuğu iyileşmektedir [1].

#### 2.8. Hafif Beton Basınç Mukavemetinin Tahmin Edilmesi ile İlgili Çalışmalar

Hafif agregalı betonda, ilk çatlak agreganın tepesinde başlar ve sonra radyal olarak agreganın içinden geçer. Agreganın düşük çekme mukavemetine sahip olması, dane çatlaklarının erken oluşmasına neden olur, ayrıca çatlakların başlamasında bağ çatlakları da etken olur. Bu düşünceye dayanarak Sasse [20] hafif betonlar ile normal



betonların basınç mukavemetinin tahmin edilebileceğini belirtmiş ve bir formül teklif etmiştir.

Basınç mukavemetini tahmin etmek amacıyla başka bir bağıntı da Schütz tarafından kurulmuştur. Bu bağıntı harç agregası sınır mukavemetinin üstündeki mukavemetleri belirten deney sonuçlarına dayanmaktadır [21].

Hafif agregalı taşıyıcı betonların mukavemetlerini tahmin etmek amacıyla Bache [22, 23] da bir bağıntı ileri sürmüştür. Bache'ın verdiği denklemde hafif beton basınç mukavemeti, hafif agregası hacmine, agregası mukavemetine ve harç mukavemetine bağlıdır.

Schmidt-Hurtienne [24], bileşenlerin özelliklerinden hafif betonların basınç mukavemetlerini hesaplamak için iki fazlı bir modelden yararlanmıştır. Araştırmacı betonun çok sayıda iki fazlı sistemlerin bir kombinasyonu olduğu varsayımını kullanmıştır. Çimento hamuruna en ince agregası grubunun ilavesiyle bir iki fazlı sistem oluşmakta, bu sürekli faz olarak alınıp, biraz daha iri agregası bölümünün eklenmesiyle yeni bir iki fazlı sistem elde edilmektedir.

## **2.9. Hafif Betonlar Üzerinde Yapılmış Bazı Araştırmalar**

K.D. Schmidt, Hurtienne [24], fazların özellikleri bilinirken hafif betonların basınç mukavemetlerinin elde edilebilmesine çalışmışlar, iki fazlı model üzerinde teorik olarak buldukları sonuçları deneysel yolla gerçekleştirmişlerdir.

Czuryszhievicz [62], hafif agregası dane biçiminin hafif beton basınç mukavemetinde etkili olduğunu, yassı ve uzun agregaların basınç mukavemetinin düşmesine sebep olduğunu gözlemiştir.

Shütz [63], farklı hafif agregalar üzerinde hafif betonun nihai dayanımı üzerine yaptığı çalışmalarda, matris mukavemetinin artmasının hafif betonun nihai dayanımına etkisinin az olduğunu, hafif agregası çekme mukavemetinin artmasının ise hafif beton mukavemetini arttıracak sonucuna varmıştır.

Weshe [21], hafif agregalı betonların elastiklik modüllerinin normal betonunkilere nazaran çok düşük olduğunu, hafif agreganın tipi, betonun birim ağırlığı ve basınç

mukavemetine göre hafif betonların elastiklik modüllerinin  $8000-24000 \text{ N/mm}^2$  gibi geniş bir aralıkta değiştiğini belirtmiştir.

Pauw [64], hafif betonlarda elastiklik modülünün hesabında betonun birim ağırlığı ve basınç mukavemetinin ikisinin birden etkisini içeren bir bağıntı vermiştir.

Atan [65], betonu iki fazlı malzeme olarak değerlendirerek, hafif betonların tek eksenli yükleme halindeki davranışlarına agrega ve harç fazının etkilerini araştırmıştır. Atan [66] bir diğer çalışmada iki fazlı kompozit modellerle ilgili olarak tuğla kırığı hafif agregası ile elde ettiği betonlara kompozit modellerini uygulamıştır.

Taşdemir [16], normal betonun agrega granülometrisinin çeşitli bölümlerini hafif agregalarla değiştirerek karışımların elastisite modüllerinin modeller yardımı ile hesaplanabileceğini, aynı birim ağırlık için ortalama hafif agrega boyutu arttıkça, basınç mukavemetinin azaldığını göstermiştir. Aynı şekilde normal agrega ile değiştirilen hafif agreganın boyutu arttıkça hafif beton gevrek kırılmakta, tokluğu azalmakta, nihai basınç birim kısalması yine azalma göstermektedir. Böylece aynı bir sürekli granülometriye ve birim ağırlığa sahip betonlar içinde ince bölümü hafif agrega olan betonlar mekanik özellikler bakımından daha iyi sonuç vermektedir.

İhtiyaroğlu [67], ponza taşı, tuf ve volkanik cüruf agregaları ile üretilen hafif beton blokların duvar elemanı olarak özelliklerinin saptanması üzerinde yaptığı çalışmalarda malzeme olarak Kayseri-Develi bölgesi ponza taşlarını, Kayseri Himmetdede andezit tüflerini ve Manisa Salihli bazalt cüruflarını kullanmış, sonuçta, genel olarak hafif agregalı betonlarda istenilen işlenebilme özeliğinin elde edilebilmesi için normal betona göre daha fazla ince malzeme konması gerektiğini, hafif agregalı betonlar ile bunlarla üretilen blokların normal betona göre daha fazla ısı direnci, ses izolasyonu, yangına karşı daha iyi bir dayanım ve düşük özağırlık özelliklerine sahip olduğunu, hafif agregalı beton blokların daha fazla rötre yapmalarına karşılık düşük elastisite modüllerinin uzama miktarını düşürmesiyle rötre fazlalığının telafi edildiğini ve rötre çatlaklarının böylece önleneceğini göstermiştir. İhtiyaroğlu'nun kullandığı hafif betonların birim ağırlıkları  $900-1800 \text{ kg/m}^3$ , basınç mukavemetleri ise  $2.0-12.0 \text{ N/mm}^2$  arasında değişmiştir.

Turgutalp [68], Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasıyla (ponza taşı) üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerinde çalışmıştır. Üretilen hafif betonların tarımsal yapılarda kullanılan taş, kerpiç, tuğla ve briket gibi malzemelere oranla daha hafif olduğunu, basınç dayanımlarının bazılarının basınç dayanımlarından daha yüksek olduğunu, ısı iletkenliklerinin ise daha düşük olması nedeniyle iyi bir ısı yalıtımı sağlanabileceğini, hafif beton kullanımının yapım kolaylığı sağlayabileceğini ve yapı maliyetinin düşebileceğini belirtmiştir. Turgutalp'ın ürettiği betonların birim ağırlıkları  $1190-1520 \text{ kg/m}^3$ , basınç mukavemetleri ise  $2.5-16.0 \text{ N/mm}^2$  arasında değişmiştir.

Erciyes [69], ponza taşı ve ponza taşından yapılmış hafif beton üzerinde yaptığı araştırmada ponzanın don tesirlerine karşı mukavemetinin düşük olduğunu, ponzanın içinde eser miktarda  $\text{SO}_2$  ile %4.99 oranında yanabilen maddenin bulunduğunu belirtmiştir. Bu betonların ölü ağırlığın azaltılması istendiği yerlerde dolgu betonu olarak, ısı yalıtımının önemli olduğu teras, çatı, sanayi tesisleri, fabrikalar ve soğuk hava depolarında kullanılabileceğini belirterek birim ağırlıkları  $900-1340 \text{ kg/m}^3$ , basınç mukavemetleri ise  $0.7-9.0 \text{ N/mm}^2$  arasında değişen hafif betonlar üretmiştir.

Sükan ve Ermutlu [70], Türkiye'nin değişik yerlerinden doğal hafif agregalar alarak bunlarla hafif betonlar üretmişlerdir. Bu doğal hafif agregaların jeolojik etüdlerini yapmışlar, ürettikleri hafif betonlara ait mekanik özellikler ile bazı beton karakteristiklerini saptamışlardır.

Çeşitli hafif agregalarla yapılmış betonların basınç dayanımları ve birim ağırlıkları Tablo 2.3'de verilmektedir. Bu tablodan da görüldüğü gibi ponza taşı betonunun birim ağırlığını  $700$  veya  $800 \text{ kg/m}^3$ 'ün altına düşürmek oldukça güçtür. Çünkü kuru iken su üzerinde yüzebilen ponza taşı hafif agregalarının kuru birim hacim ağırlıkları  $700-800 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir. Böylece ponza taşı betonunun birim ağırlığını  $800 \text{ kg/m}^3$ 'ün altına düşürmek için yaklaşık %17 oranında hava sürüklemek gerekmektedir. Bu da maliyeti büyük ölçüde arttıracaktır. Böyle bir uygulama da şu anda yapılmamaktadır. Yukarıda verilen şekillerin ve tabloların incelenmesinden görüldüğü üzere ponza taşı betonu orta dayanımlı beton sınıfındadır. Bu betonların ısı iletkenlik katsayıları ise birim ağırlıklarına bağlı olarak  $0.26-0.60 \text{ W/mK}$  aralığında değişmektedir [69].

Tablo 2.3. Farklı hafif betonların özellikleri

| Hafif Betonun Türü            | Agreganın türü                     | Agreganın birim hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> ) | 28.günde beton basınç dayanımı (MPa) | Betonun birim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| Gaz ve köpük beton            | ---                                | ---                                                 | 1,4-4,8                              | 400-600                                     |
| Kısmen Sıkıştırılmış          | Genişletilmiş vermikülit ve perlit | 64-240                                              | 0,5-3,4                              | 400-1120                                    |
|                               | Ponza taşı                         | 480-880                                             | 1,4-3,8                              | 720-1120                                    |
|                               | Genişletilmiş cüruf                | 480-960                                             | 1,4-5,5                              | 960-1520                                    |
|                               | Sinterlenmiş uçucu kül             | 640-960                                             | 2,8-6,9                              | 1120-1280                                   |
|                               | Genişletilmiş kil veya şist        | 560-1040                                            | 5,5-8,3                              | 960-1200                                    |
|                               | Klinker                            | 720-1040                                            | 2,1-6,9                              | 720-1520                                    |
| Kumsuz beton                  | Doğal agrega                       | 1360-1600                                           | 4,1-13,8                             | 1600-1920                                   |
|                               | Hafif agrega                       | 480-1040                                            | 2,6-6,9                              | 880-1200                                    |
| Taşıyıcı hafif Agregalı beton | Genişletilmiş cüruf                | 480-960                                             | 10,3-41,4                            | 1680-2080                                   |
|                               | Sinterlenmiş uçucu kül             | 640-960                                             | 13,8-41,4                            | 1360-1740                                   |
|                               | Genişletilmişkil ve şist           | 560-1040                                            | 13,8-41,4                            | 1360-1840                                   |

Tablo 2.4’de perlit, stropor ve ponza taşı betonlarıyla gaz betonun mekanik özellikleri karşılaştırılmaktadır. Gaz beton dışındakilerin söz konusu tablodaki mekanik özellikler üretimi izleyen 56. günde belirlendi.

Tablo 2.4. Hafif betonların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [74]

| Hafif Beton türü | Elastisite Modülü MPa | Basınç Dayanımı MPa | Hava Kuru Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | Fırın kuru Birim ağırlık (kg/cm <sup>3</sup> ) | Ortalama Rutubet İçeriği (%) |
|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|
| Perlit           | 2180                  | 2,45                | 780                                          | 660                                            | 18,2                         |
| Stropor          | 2060                  | 2,25                | 850                                          | 810                                            | 4,9                          |
| Ponza taşı       | 3530                  | 4,60                | 820                                          | 755                                            | 8,6                          |
| Gazbeton         | 2400                  | 4,00                | 740                                          | 705                                            | 4,0                          |

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1. Agregalar

###### 3.1.1.1. Kum

Beton üretiminde en büyük tane boyutu 2 mm. olan Podima kumu kullanıldı. Bu kum üzerinde yapılan granülometri , özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık, deney sonuçları Tablo 3.1’de verilmektedir. Granülometrik bileşim TS 706 [29]’daki elek takımına göre belirlenmektedir.

Tablo 3.1. Kumun Özellikleri

| Kumun Kökeni | Elekten Geçen % |     |     |     |     |     |      | Özgül Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | Gevşek Birim.Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------------------------------------|-------------------------------------------|
|              | 16.0            | 8.0 | 4.0 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.25 |                                    |                                           |
| Podima Kumu  | 100             | 100 | 100 | 100 | 70  | 30  | 10   | 2620                               | 1400                                      |

Kum üzerinde TS 3673’ [30]e uygun olarak yapılan deney sonucunda kumda organik madde bulunmadığı, TS 3527 [31]’ e uygun olarak yapılan deney sonucunda ise ağırlıkça %0.5 oranında çamurlu madde bulunduğu saptandı.

###### 3.1.1.2. Kırmataş

İstanbul Cebeci yöresinden sağlanan kalker esaslı Kırmataş I kullanıldı. Bu agreganın en büyük tane boyutu 16 mm.dir. Kırmataş I’in grnülometri bileşimi, özgül ağırlık ve birim ağırlığı Tablo 3.2.’de verilmektedir.

Tablo 3.2. Kırmataş I'in Özellikleri

| Elek Göz Boyutu (mm) | Elekten Geçen % |     |     |     |     |     |      | Özgöl Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------------------------------------|-------------------------------------------|
|                      | 16.0            | 8.0 | 4.0 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.25 |                                    |                                           |
| Kırmataş I           | 100             | 70  | 20  | 0   | 0   | 0   | 0    | 2700                               | 1450                                      |

### 3.1.1.3. Ponza Taşı

Nevşehir yöresinden temin edilen ponza taşı hafif agregaları elenerek 2-16 mm.'lik aralığa getirildi. Bunlar suda yüzdürülerek batan daneler ayıklandı, yüzenler ise oda sıcaklığında kurutularak beton üretiminde kullanıldı. Tablo 3.3'de verilen deney sonuçları su üstünde yüzen hafif agregalara ilişkin değerlerdir.

Tablo 3.3. Ponza Taşı'nın Granülometrisi

| Ponza Taşı'nın Kökeni | Elekten Geçen % |     |     |     |     |     |      |
|-----------------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Elek Boyutu (mm)      | 16.0            | 8.0 | 4.0 | 2.0 | 1.0 | 0.5 | 0.25 |
| Nevşehir              | 100             | 70  | 20  | 0   | 0   | 0   | 0    |

### Özgöl Ağırlık

Ponza taşı öğütölüp toz haline getirilerek 90 µ'luk elekten elendi ve 105°C'de sabit ağırlığa kadar kurutuldu. Sıvısı benzin olan piknometre ile yapılan üç ölçümün sonucu olarak özgül ağırlık 2400 kg/m<sup>3</sup> olarak bulundu.

### Birim Hacim Ağırlık

2-16 mm. arası ponza agregasının birim ağırlık ve gevşek birim ağırlık değerleri Tablo 3.4'de verilmektedir.

Tablo 3.4 Ponza Taşı Birim Ağırlıkları

| Hafif Agregatane Boyutu (mm) | Tane Birim Hacim Ağırlığı Hava Kurusuna Göre (kg/m <sup>3</sup> ) | Gevşek Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 2-16                         | 800                                                               | 406                                       |

### Su Emme

Ponza taşı hafif agregalarının 30 dakika süresindeki su emme yüzdeleri hava kurusu durumdaki ağırlıklarına göre hesaplanarak Tablo 3.5’de verilmektedir.

Tablo 3.5 Ponza Taşı Hafif Agregalarının Su Emme Değerleri

| Hafif Agregat Bölümü (mm) | Su Emme (%) 30 Dakika |
|---------------------------|-----------------------|
| 2-16                      | 15                    |

### 3.1.2. Çimento Özellikleri

Tüm deneylerde PÇ 42.5 cinsi Portland çimentosu kullanıldı. Sıvısı benzin olan piknometre ile yapılan üç ölçümün sonucu özgül ağırlık 3125 kg/m<sup>3</sup> olarak bulundu.

#### 3.1.2.1. Fiziksel Özellikler

|                                          |                    |
|------------------------------------------|--------------------|
| Blaine özgül yüzeyi (cm <sup>2</sup> /g) | : 3270             |
| 90 µ’luk elekte kalan %                  | : 6.3              |
| 200 µ’luk elekte kalan %                 | : 0.21             |
| Özgül ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )       | : 3125             |
| Priz başlangıcı                          | : 1 saat 45 dakika |
| Priz sonu                                | : 3 saat 45 dakika |

### 3.1.2.2. Kimyasal Özellikler

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub> (çözünen)                      | : % 20.37 |
| SiO <sub>2</sub> (çözünmeyen)                   | : % 0.31  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | : % 5.94  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | : % 3.49  |
| CaO                                             | : % 63.92 |
| MgO                                             | : % 1.29  |
| SO <sub>3</sub>                                 | : % 2.48  |
| Kızdırma kaybı                                  | : % 1.39  |
| Ölçülemeyen                                     | : %0.81   |
| Karmaşık Bileşikler:                            |           |
| C <sub>3</sub> S (trikalsiyum silikat)          | : % 47.33 |
| C <sub>2</sub> S (dikalsiyum silikat)           | : % 22.81 |
| C <sub>3</sub> A (trikalsiyum alüminat)         | : % 9.94  |
| C <sub>4</sub> AF (tetrakalsiyum alüminoferrit) | : % 10.72 |

### 3.1.3. Kimyasal Katkılar

#### 3.1.3.1 Süperakışkanlaştırıcı Katkı

Bu çalışmada su/çimento oranı düşük olduğundan işlenebilirliği sağlamak ve aynı zamanda ayrışmayı engellemek amacıyla beton karışımlarına çimento ağırlığının %1,5'i kadar süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi eklendi. Katkının yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup>'dür.

#### 3.1.3.2 Hava Sürükleyici Katkı

Birim ağırlığı düşürebilmek için bir seride çimento ağırlığının % 0,5'i kadar, üç seride ise çimento ağırlığının % 1,0'i oranında hava sürükleyici katkı maddesi kullanıldı. Katkının yoğunluğu 1000 kg/m<sup>3</sup>'dür.



## 3.2. Beton Karışımları

### 3.2.1. Kabul Edilen Esaslar

Yapılan deneysel çalışmalarda nominal birim ağırlıkları 700-1900 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen toplam 7 seri hafif ve yarı hafif beton üretildi.

Etkin su / çimento oranı 0,43 olan bu karışımların hepsinde maksimum agrega tane boyutu sabit olup 16 mm.'dir. Birim ağırlıkları 1900 kg/m<sup>3</sup>, 1700 kg/m<sup>3</sup>, 1500 kg/m<sup>3</sup>, 1300 kg/m<sup>3</sup> ve 1100 kg/m<sup>3</sup> olan karışımlarda toplam agrega hacminin %30'u, birim ağırlığı 900 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda toplam agrega hacminin %15'i oranında kum kullanıldı, birim ağırlığı 700 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda ise hiç kum kullanılmadı. Bütün karışımlarda toplam agrega hacmi sabit tutuldu.

Ayrıca bütün karışımlarda işlenebilirliği arttırmak ve ayrışmayı önlemek için çimento ağırlığının %1,5'i oranında süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanıldı. Birim ağırlığı 1300 kg/m<sup>3</sup> olan karışımda çimento ağırlığının %0,5'i oranında ve birim ağırlığı 1100 kg/m<sup>3</sup>, 900 kg/m<sup>3</sup> ve 700 kg/m<sup>3</sup> karışımlarda ise çimento ağırlığının %1'i oranında hava sürükleyici katkı kullanıldı.

Üretilen betonlar; YHB yarı hafif betonu, HB hafif betonu izleyen sayı ise t/m<sup>3</sup> cinsinden betonun birim ağırlığını gösterecek şekilde kodlandı.

- YHB1.9 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %35 ponza taşı, %30 kum ve %35 kırmataş içeren yarı hafif beton
- HB1.7 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %52.5 ponza taşı, %30 kum ve %17.5 kırmataş içeren hafif beton
- HB1.5 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %70 ponza taşı, %30 kum içeren hafif beton
- HB1.3 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %70 ponza taşı, %30 kum içeren hafif beton
- HB1.1 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %70 ponza taşı, %30 kum içeren hafif beton
- HB0.9 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %85 ponza taşı, %15 kum içeren hafif beton

HB0.7 : Etkin su/çimento oranı 0,43 olan, %100 ponza taşı içeren kumsuz hafif beton

Bu karışımlarla her seride 15x30 cm. boyutlarında 6'şar adet silindir numune üretildi. Bu numunelerin 4'er tanesi basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin bulunması için kullanıldı, 2'şer tanesinden kesilerek elde edilen 15x10 cm. boyutlarında 6'şar adet disk numune de yarma dayanımlarının bulunmasında kullanıldı.

Ayrıca birim ağırlıkları  $1300 \text{ kg/m}^3$ ,  $1100 \text{ kg/m}^3$  ve  $900 \text{ kg/m}^3$  olan karışımlarla 3'er adet 80x80 cm. boyutlarında ve 3 cm. kalınlığında numuneler üretildi ve bu numuneler üzerinde ısı yalıtım değerleri saptandı.

### 3.2.2. Bileşim Hesapları

Beton bileşim hesapları mutlak hacim yöntemine göre yapıldı. Bütün bileşimlerde toplam agrega hacmi sabit olup  $0,720 \text{ m}^3$ 'dür. YHB1.9, HB1.7, HB1.5, HB1.3, HB1.1 serilerinde toplam agrega hacminin %30'u, HB0.9 serisinde ise toplam agrega hacminin %15'i oranında kum kullanıldı. Agrega karışım oranları Tablo 3.6'da, karışımın granülometri eğrisi Şekil 3.1'de verilmektedir

Tablo 3.6 Agrega Karışım Oranları

| Agrega Tipi ve Özelliği | Karışımdaki Hacim Oranı % |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | YHB1.9                    | HB1.7 | HB1.5 | HB1.3 | HB1.1 | HB0.9 | HB0.7 |
| Kum ( 0-2 mm. )         | 30                        | 30    | 30    | 30    | 30    | 15    | -     |
| Ponza ( 2-16 mm. )      | 35                        | 52,5  | 70    | 70    | 70    | 85    | 100   |
| Kırmataş 1 ( 2-16 mm. ) | 35                        | 17,5  | -     | -     | -     | -     | -     |
| Toplam                  | 100                       | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |

Karışım da kullanılacak ponza taşlarının ağırlığının hesaplanmasında hava kurusu durumdaki tane birim hacim ağırlığı kullanıldı

Beton bileşim hesaplarında izlenen yol şöyle özetlenebilir;

C : 1m<sup>3</sup> yerleşmiş betondaki çimentonun ağırlığı, kg

W : 1m<sup>3</sup> yerleşmiş betondaki suyun hacmi, dm<sup>3</sup>

δ<sub>c</sub> : Çimentonun özgül ağırlığı, kg/dm<sup>3</sup>

δ<sub>ai</sub> : (i) agregasının birim hacim ağırlığı, kg/dm<sup>3</sup>

P<sub>i</sub> : (i) agregasının karışım yüzdesi

V<sub>a</sub> : Toplam agrega hacmi, dm<sup>3</sup>

E / C : Etkin su/çimento oranı, (0,43)

h : 1m<sup>3</sup> yerleşmiş betondaki hava hacmi, dm<sup>3</sup>

G<sub>i</sub> : (i) agregasının ağırlığı, kg

olduğuna göre

$$V_a = 1000 - \left( \frac{C}{\delta_c} + W + h \right) \quad [3.1]$$

$$W = 0,43 \times C \quad [3.2]$$

$$G_i = V_a \times P_i \times \delta_{ai} \quad [3.3]$$

formüllerinden beton bileşimleri hesaplandı.

### 3.2.3. Betonun Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme ve Saklanması

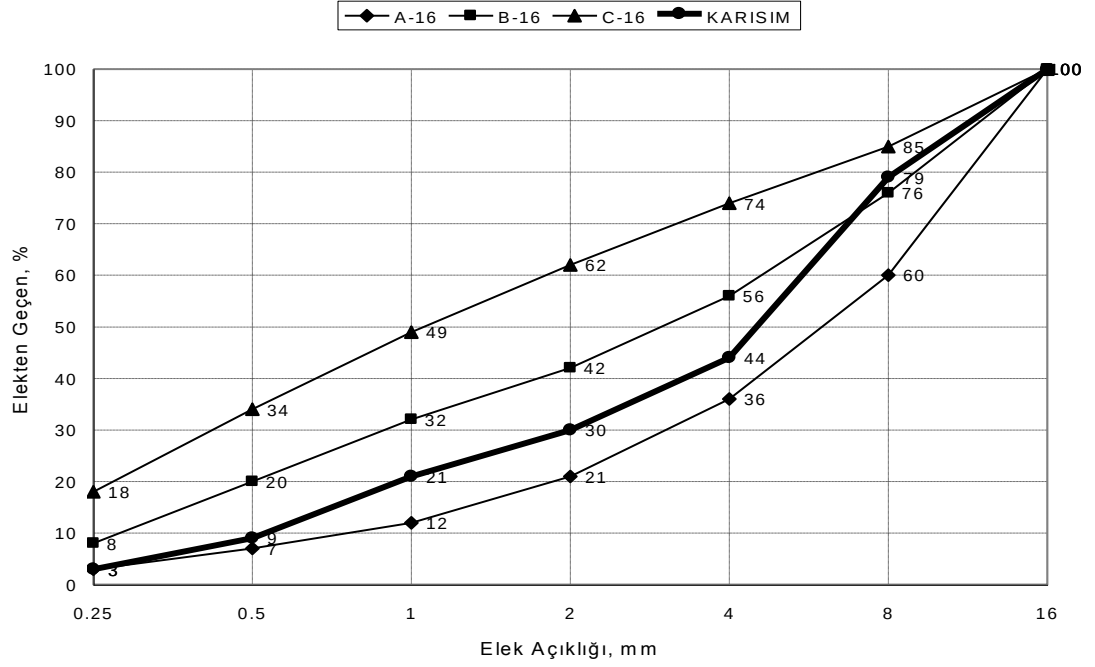
Betonlar düşey eksenli zorlamalı karıştırmalı 50 lt. kapasiteli küçük bir betonyer ile üretildi. Hafif agregalara üretiminden önce yarım saatlik bir ön su emdirme uygulandı. Böylelikle etkin su/çimento oranının istenilen değeri alması sağlandı.

Her bir karışımdan 6'şar adet 15x30 cm'lik silindir numuneler üretildi. Karışımlar ikişer tabaka halinde dökülüp 25'er kez şişlendi.

Isı yalıtım deneyleri için HB0.9, HB1.1, HB1.3 serilerinden 3'er adet 80x80 cm. boyutunda ve 3 cm. kalınlığında numuneler üretildi. Karışımlar tek tabaka halinde dökülüp alüminyum master ile yüzeyleri düzgünleştirildi.

Üretilen silindir şeklindeki numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak deney gününe kadar 22±3°C'deki kirece doymuş su içinde saklandı.

80x80x3 cm. boyutundaki numuneler üretiminden sonra üzerleri nemli bezle örtüldü. 48 saat sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 28. güne kadar  $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 'deki odada üzerleri nemli bezle örtülü halde saklandı.



Şekil 3.1 Beton Agregasının Granülometrik Bileşimi

Üretilen betonların gerçek bileşimleri ve taze beton özellikleri Tablo3.7’de verilmektedir.

Tablo 3.7 Beton Karışımlarındaki Gerçek Malzeme Miktarları ve Taze Beton Özellikleri

| Beton Kodu | 1m <sup>3</sup> betondaki gerçek malzeme miktarları ve taze beton özellikleri |         |               |                  |                            |                      |                    |                                   |                             |        |                                      |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------|------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------------------|
|            | Çimento (kg)                                                                  | Su (kg) | Su/Çim. oranı | Kum 0-2 mm. (kg) | Hafif Agrega 2-16 mm. (kg) | Ön Emdirme Suyu (kg) | Kırmataş I No (kg) | Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (kg) | Hava Sürükleyici Katkı (kg) | Hava % | Taze Birim Ağırlık kg/m <sup>3</sup> |
| YHB1.9     | 348                                                                           | 150     | 0,43          | 563              | 201                        | 30                   | 677                | 5,2                               | -                           | 1,8    | 1973                                 |
| HB1.7      | 342                                                                           | 147     | 0,43          | 553              | 296                        | 44                   | 333                | 5,1                               | -                           | 3,4    | 1720                                 |
| HB1.5      | 342                                                                           | 147     | 0,43          | 553              | 394                        | 59                   | -                  | 5,1                               | -                           | 3,5    | 1500                                 |
| HB1.3      | 291                                                                           | 125     | 0,43          | 469              | 334                        | 50                   | -                  | 4,4                               | 1,5                         | 17,9   | 1275                                 |
| HB1.1      | 258                                                                           | 111     | 0,43          | 417              | 297                        | 45                   | -                  | 3,9                               | 2,6                         | 27,0   | 1133                                 |
| HB0.9      | 236                                                                           | 101     | 0,43          | 191              | 330                        | 49                   | -                  | 3,5                               | 2,4                         | 33,3   | 913                                  |
| HB0.7      | 209                                                                           | 90      | 0,43          | -                | 344                        | 52                   | -                  | 3,1                               | 2,1                         | 40,8   | 700                                  |

### 3.3. Betonlara Uygulanan Deneyler

#### 3.3.1 Taze Beton Deneyleri

Taze betonlar üzerinde yaş birim ağırlık deneyi yapıldı. Yaş birim ağırlığın bulunmasında darası 5.5 kg. olan 8 litre hacime sahip silindirik şekilli standart ölçü kabı kullanıldı. Taze beton ölçü kabına kıvama göre ya üç defada şişleme, ya da sarsma tablasında vibrasyona tabi tutularak dolduruldu. Sonra üst yüzü çelik masterla düzeltildi. Kabın etrafı silindikten ve yapışan harç parçaları temizlendikten sonra terazide tartıldı.

#### 3.3.2 Mekanik Deneyler

##### 3.3.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Bu çalışmada her seriye ait 4 adet silindir numuneye sabit hızlı kısa süreli tek eksenli basınç yükleri uygulandı. Basınç deney düzeneği Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 Silindir Basınç Dayanımı ve Eksenel Şekil Değiştirme Deneyi

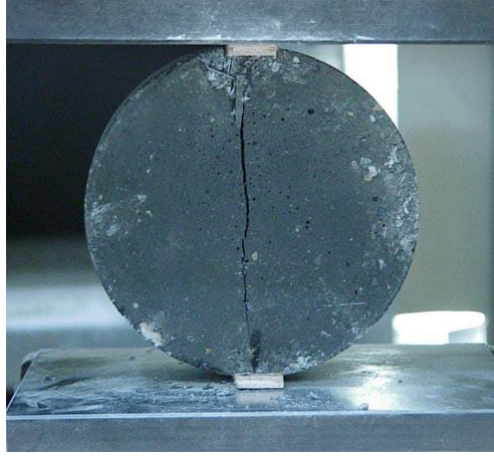
Basınç deneyi için 500 ton kapasiteli Amsler marka pres kullanıldı. Eksenel şekil değiştirmeler 2,5 mm. kapasiteli transduser yardımıyla okundu. Boyuna doğrultudaki şekil değiştirmeler ile yükün okunması aynı anda yapıldı. Basınç deneyi

sonuçlarından basınç dayanımları elde edildi. Elastisite modülleri  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisinin 1/3'lük bölümünde lineer korelasyon yapılarak hesaplandı.

Elde edilen 28 günlük basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri Tablo :3.8'de görülmektedir.

### 3.3.2.2. Yarma Dayanımı Deneyi

Silindir numunelerden ikisi kesilerek üç eşit parçaya bölündü ve her seriye ait 6'şar adet  $\Phi 15 \times 10$  cm. boyutlarında disk numuneler elde edildi ve bu numuneler üzerinde kısa süreli yarma-çekme deneyleri yapıldı. Deney düzeneği Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3 Silindir Yarma Dayanımı Deneyi

Elde edilen 28 günlük yarma dayanımı değerleri Tablo 3.8'de görülmektedir.

Tablo 3.8 Sertleşmiş Beton Özellikleri

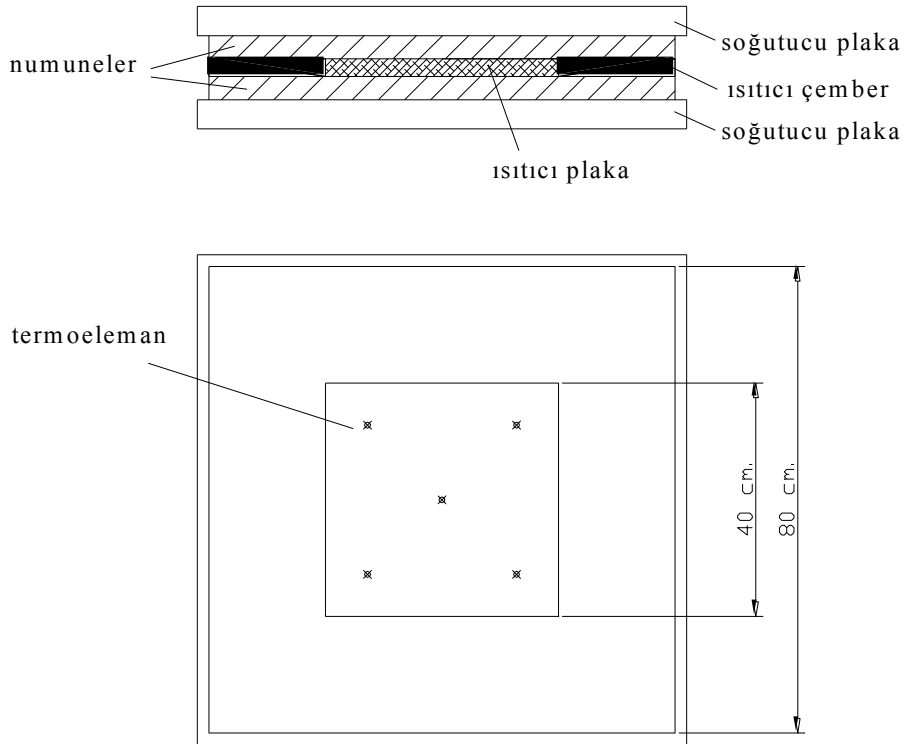
| Beton Kodları                                  | YHB<br>1.9 | HB<br>1.7 | HB<br>1.5 | HB<br>1.3 | HB<br>1.1 | HB<br>0.9 | HB<br>0.7 |
|------------------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 28 Günlük Silindir<br>Basınç Dayanımı<br>(MPa) | 18,7       | 14,1      | 11,4      | 11,1      | 5,2       | 2,4       | 1,4       |
| 28 Günlük Silindir<br>Yarma Dayanımı<br>(MPa)  | 2,77       | 2,62      | 2,43      | 1,67      | 0,96      | 0,59      | 0,41      |
| Elastisite Modülü<br>(GPa)                     | 19,5       | 13,9      | 11,6      | 7,1       | 5,8       | 3,1       | 1,6       |

### 3.3.3 Isıl İletkenlik Deneyi

Isı iletkenliği, homojen bir malzemenin kararlı durum koşulları altında, iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı 1°C olduğu birim zamanda (1 saat), birim alandan (1 m<sup>2</sup>), bu alana dik yönde birim kalınlıktan (1 m.) geçen ısı miktarıdır. Birimi W/m°C ‘dir [32].

Isı iletkenlik deneyi TS 388 [32]’e göre yapıldı. Isı iletkenlik katsayısı ise TS 415 [33]’e göre hesaplandı.

Plaka metodu ile ısı iletkenliğinin tayin edilmesini sağlayan bu düzenek iki adet 80x80 cm. numune ile çalışmaktadır. Numunelerin yüzeyleri birbirine paralel ve pürüzsüz olmalıdır. Numuneler deneylerden önce 6 hafta yaklaşık 20°C sıcaklıkta tutularak nem miktarlarında kararlılık sağlanmıştır. TS 388’e göre hazırlanan deney düzeneği şekil 3.4’de görülmektedir.



şekil 3.4 TS 388’e Göre Plaka Metodu ile Isı İletkenliğinin Tayini İçin Deney Düzeneği

Numuneler şekil 3.4’de de görüldüğü gibi, elektrikle ısıtılan ısıtıcı çember ve plaka ile, su ile soğutulan soğutucu plakalardan oluşan deney tesisatında test edilir. Her iki numunenin de alt ve st yüzeylerine 5’er adet diferansiyel termoeleman uçları tespit edildikten sonra numuneler ısıtıcı çember ve plaka ile soğutucu plakaların arasına



yerleştirilir ve düzenek dışarıdan da sarılmak suretiyle izole edilir. Daha sonra ısıtıcılar elektrik gücü ile beslenir. Soğutucu plakalardan da soğuk dolaştırarak, numunelerin alt ve üst yüzeyleri arasında sıcaklık farkı oluşturulur ve numune üzerinden iletimle ısı geçişi sağlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, numunelerin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının ortalama 10°C olacak kadar ısıtılmalarıdır. Isıtıcı çembere beslenen elektrik yükü ayarlanarak, ısıtıcı plakadan çevreye olan ısı kayıpları sıfırlanır ve sürekli rejim halinde, ısıtıcı plakaya beslenen elektrik gücü (Q, Watt) ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ( $\Delta T$ , °C veya K) ölçülür. l (m) numune kalınlığı, A (m<sup>2</sup>) ısıtıcı plaka alanı, olmak üzere aşağıdaki bağıntı [3.4] kullanılarak ısı iletim katsayısı ( $\lambda$ , W/mK) hesaplanır.

$$\lambda = \frac{Q \times l}{2 \times A \times \Delta T} \quad [3.4]$$

İ.T.Ü. Makine Fakültesi, Isı Ölçmeleri Labaratuvarında yapılan plaka metodu ile ısı iletkenliğinin tayini deneyi, bir numune için yaklaşık 7-11 gün sürmüştür. Deneyin bitiş koşulu ısıtıcı plaka ile ısıtıcı çember arasındaki sıcaklık farkının sıfır olmasıdır. Bu da bir ucu ısıtıcı çemberde diğer ucuda ısıtıcı plakada bulunan termoeleman sayesinde anlaşılır. Böylelikle yatay ısı geçişi engellenmiş olup, sadece sıcak plakadan soğuk plakalara doğru düşey ısı geçişi sağlanır.

Betonların ısı iletkenlik deney sonuçları Tablo 3.9’da görülmektedir.

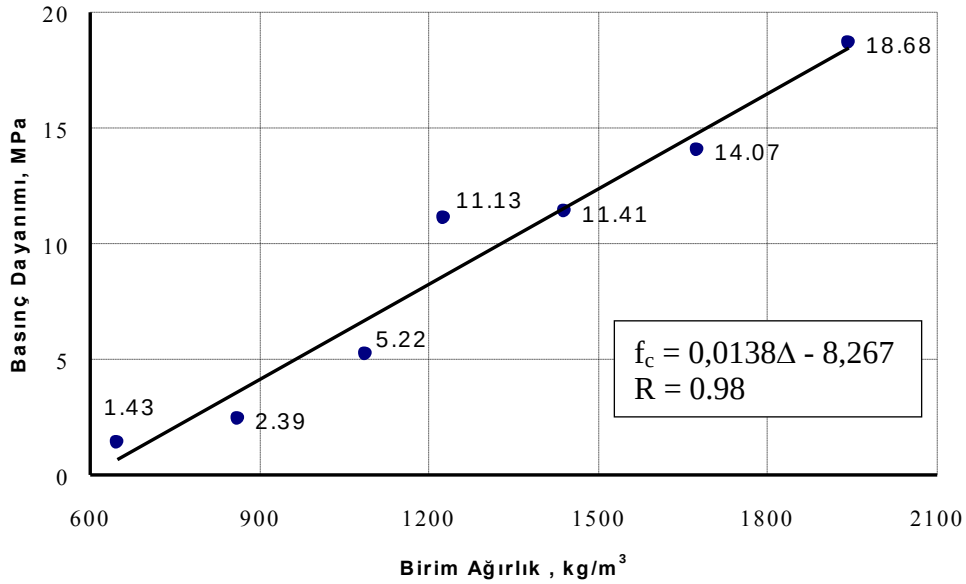
Tablo 3.9 Betonların Isı İletkenlik Değerleri

| Beton Kodları<br>Özellikler                                                 | HB 1.3 | HB 1.1 | HB 0.9 |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| Isı Geçiş Alanı<br>(A), m <sup>2</sup>                                      | 0.16   | 0.16   | 0.16   |
| Malzeme ortalama kalınlığı<br>(l), m                                        | 0.0325 | 0.0326 | 0.0326 |
| Isıtıcı plakaya verilen elektrik<br>gücü (Q), W                             | 28.82  | 32.66  | 29.04  |
| Numunelerin iki yüzü arasındaki<br>sıcaklık farkı ( $\Delta T$ ), °C veya K | 8.18   | 11.86  | 12.83  |
| Isı İletkenlik Katsayısı<br>( $\lambda$ ), W/mK                             | 0,36   | 0,28   | 0,23   |

#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

##### 4.1. Birim ağırlık ile Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

7 farklı birim ağırlıkta üretilen hafif ve yarı hafif betonların 28 günlük basınç dayanım değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 Hafif ve Yarı Hafif Betonların Birim Ağırlıkları ile Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil 4.1’in incelenmesinden de görüldüğü gibi ponza taşı ile üretilen hafif ve yarı hafif betonların basınç dayanımları ile birim ağırlıkları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Betonların birim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları da artmaktadır.

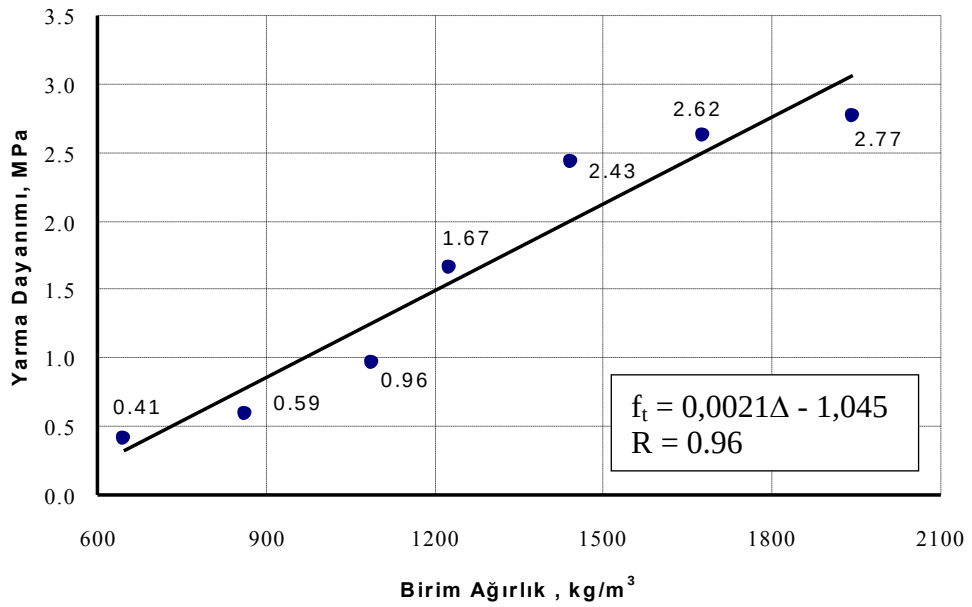
Ponza taşı agregasıyla üretilen betonlar basınç dayanımlarından da görüldüğü gibi orta dayanımlı betonlardır. Daha yüksek dayanımlı hafif betonlar elde edebilmek için endüstriyel yolla üretilen yapay hafif agregaların kullanılması gerekmektedir [34].

Güvenli taşıyıcı betonarme elemanlar üretebilmek için birim ağırlığın yükseltilerek yarı hafif betonlara erişmek gerekmektedir.

Soğuk iklimlerde ve deprem kuşağında olan bölgelerde konutlar üretiminde hafif ve yarı hafif betonlar kullanılırsa hem ısı yalıtım bakımından önlem alınmış olur, hem de toplam yapı ağırlığının azaltılması nedeniyle deprem yükleri etkisine yapının düğüm noktaları daha az zorlanır.

#### 4.2. Birim ağırlık ile Yarma Dayanımı Arasındaki İlişki

7 farklı birim ağırlıkta üretilen hafif ve yarı hafif betonların 28 günlük yarma dayanım değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

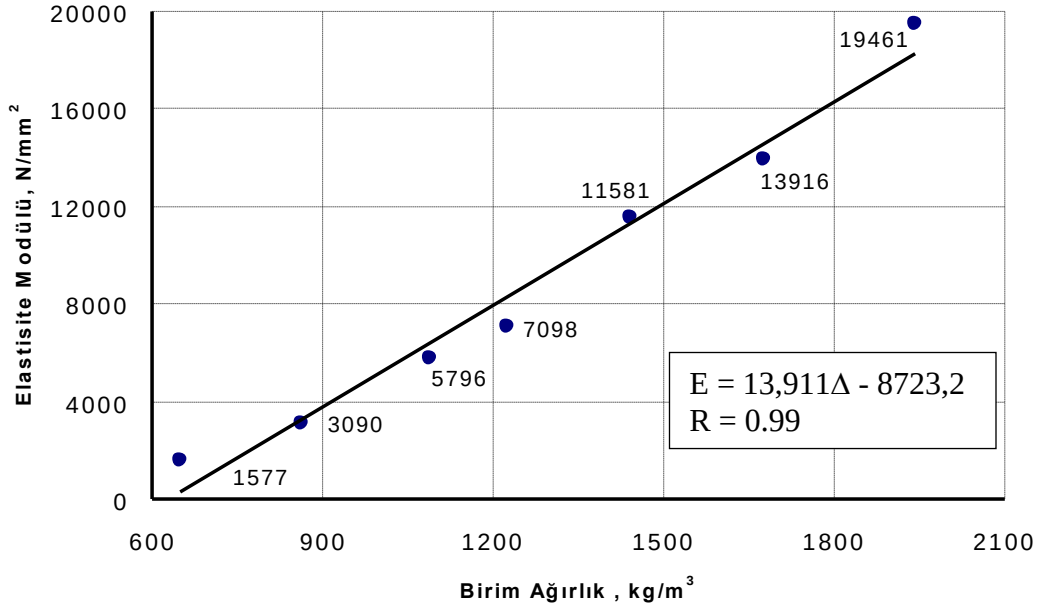


Şekil 4.2 Hafif ve Yarı Hafif Betonların Birim Ağırlıkları ile Yarma Dayanımları Arasındaki İlişki

Şekil 4.2’in incelenmesinden de görüldüğü gibi ponza taşı ile üretilen hafif ve yarı hafif betonların yarma dayanımları ile birim ağırlıkları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Hafif betonların birim ağırlıkları arttıkça yarma dayanımları da artmaktadır.

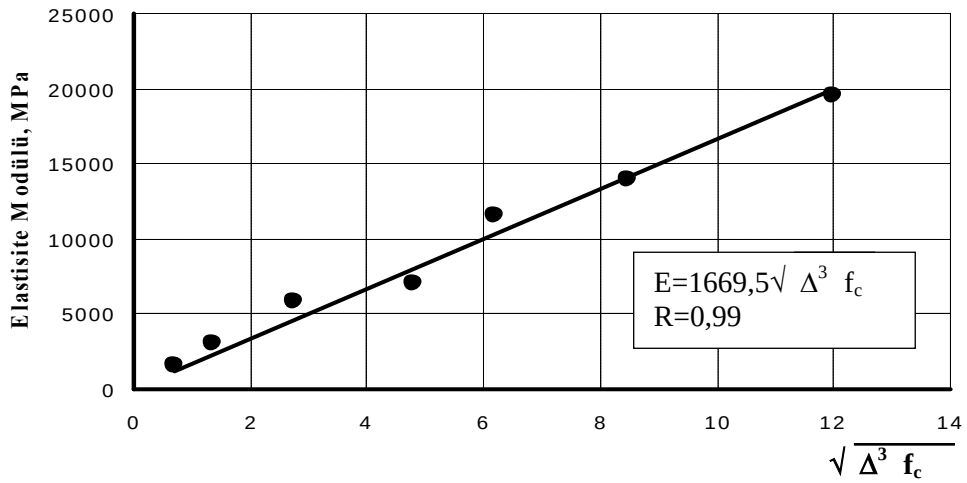
#### 4.3. Birim ağırlık ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

7 farklı birim ağırlıkta üretilen hafif ve yarı hafif betonların 28 günlük Elastisite Modülü değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.3’de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Hafif ve Yarı Hafif Betonların Birim Ağırlıkları ile Elastisite Modülleri arasındaki İlişki

Şekil 4.3’ün incelenmesinden de görüldüğü gibi hafif ve yarı hafif betonların birim ağırlıkları arttıkça elastisite modülleri de artmaktadır. Ancak yapılan deneyler göstermiştir ki, ponza taşı ile üretilen hafif betonlarda birim ağırlığın düşürülmesi elastisite modülünü basınç dayanımından daha fazla etkilemektedir.

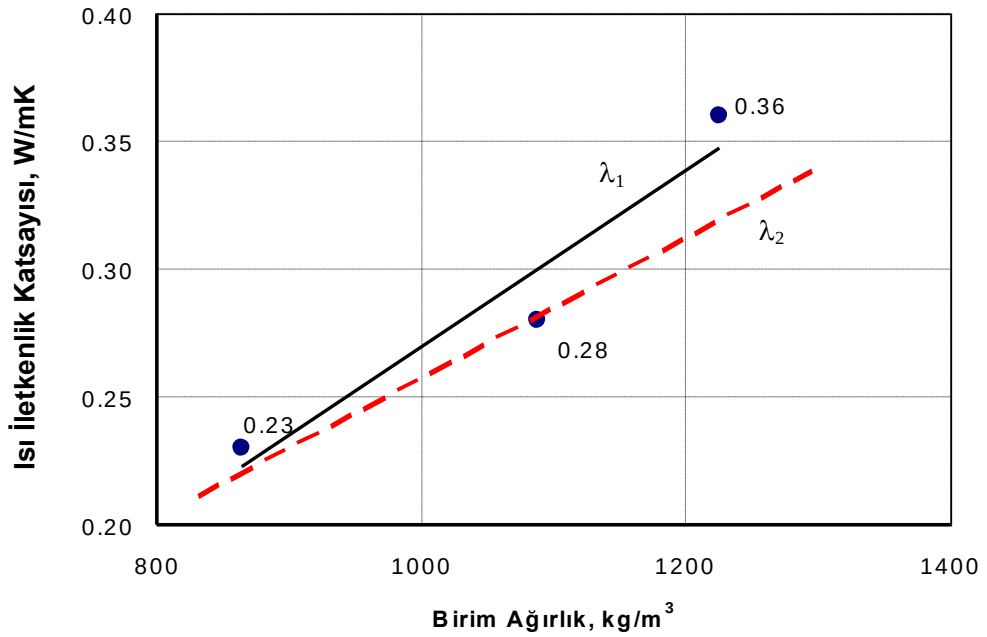


Şekil 4.4 Hafif Betonların Elastisite Modülü –  $(\text{birim ağırlık})^{3/2} \times (\text{basınç dayanımı})^{1/2}$  İlişkisi

Literatürde verilen Elastisite modülü = (birim ağırlık)<sup>3/2</sup> x (basınç dayanımı)<sup>1/2</sup> bağıntısı bu çalışma kapsamındaki ponza taşı agregasıyla üretilen hafif ve yarı hafif betonların elastisite modüllerini bir korelasyonla ifade edebilmektedir. Şekil 4.4’de görüldüğü gibi yapılan regregasyonda korelasyon katsayısı 0,99 bulunmuştur.

#### 4.4. Birim ağırlık ile Isı İletkenlik Arasındaki İlişki

3 farklı birim ağırlıkta üretilen hafif betonların ısı iletkenlik değerleri ile birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 4.5’de gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Hafif Betonların Birim Ağırlıkları ile Isı İletkenlik Katsayıları Arasındaki İlişki

Şekil 4.5’in incelenmesinden de görüldüğü gibi ponza taşı ile üretilen hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları ile birim ağırlıkları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Hafif betonların birim ağırlıkları arttıkça ısı iletkenlik katsayıları da artmaktadır.

Şekil 4.5’deki siyah sürekli çizgi plaka metodu ile hesaplanan ısı iletkenlik değerlerinin birim ağırlık ile değişimini  $R=0.96$  korelasyon katsayısı ile veren denklemin eğrisidir ( $\lambda_1 = 0.0003\Delta - 0.0772$ ,  $\Delta$ =birim ağırlık,  $\text{kg/m}^3$ ).

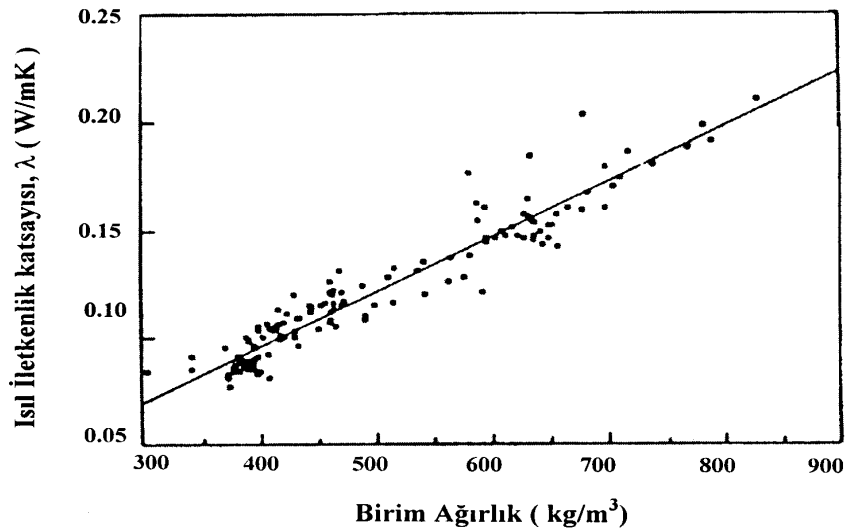
Şekil 4.5'deki kırmızı kesikli çizgi gazbetonlar için geliştirilen;  $\lambda_2 = 00027 \cdot \Delta - 0,011$  ( $\Delta$ =birim ağırlık,  $\text{kg/m}^3$ ) bağıntısı kullanılarak hesaplanan ısı iletkenlik değerlerinin birim ağırlık ile değişimini veren denklemin eğrisidir.

Şekil 4.5'in incelenmesinden de görüldüğü gibi, ponza taşı hafif agregasıyla üretilen hafif betonların plaka metodu ile hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları ile, gazbetonlar için geliştirilen;  $\lambda_2 = 00027 \cdot \Delta - 0,011$  ( $\Delta$ =birim ağırlık,  $\text{kg/m}^3$ ) bağıntısı kullanılarak hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları arasında iyi bir lineer korelasyon vardır.

Taşıyıcı hafif beton olarak tasarlanmayan düşük birim ağırlıktaki hafif betonlar duvar malzemesi olarak kullanılabilir. Böylece yapının toplam ağırlığında önemli bir azalmanın olmasıyla depreme karşı dayanıklılıkta da belirgin katkı sağlanır.

Taşdemir [61], yaptığı bir çalışmada hafif betonun bir türü olan gazbetonların ısı iletkenliklerinin yoğunlukla değişimini incelemiştir. Gazbetonun ısı iletkenliği yoğunluk ve rutubet içeriği ile artar. Isı iletkenlik katsayısı fırın kurusu durumda yapılır. Rutubet için düzeltme yapılmalıdır. Gazbetonun ısı iletkenlik katsayısını saptamak için çeşitli yöntemler vardır.

Kuru durum,  $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$  de havalandırma sistemi içeren bir dolabda değişmez ağırlık adı verilen denge halindeki duruma karşı gelir. Şekil 4.6'da farklı sınıflardaki gazbetonlar için kuru durumdaki ısı iletkenlik katsayısının birim ağırlığın fonksiyonu olarak değişimi görülmektedir



Şekil 4.6. Gazbetonun ısı iletkenlik katsayısının yoğunlukla değişimi

Ölçülen değerlerden elde edilen sonuçlara göre ısı iletkenlik katsayısı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir:

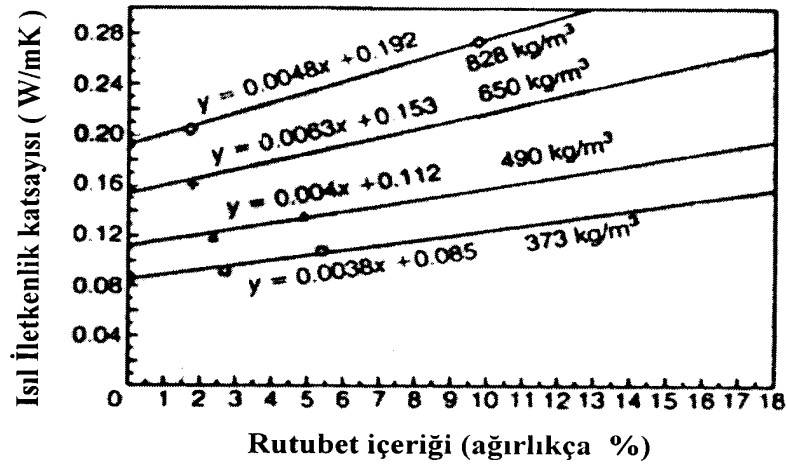
$$\lambda_{kuru} = A + B\rho \quad [4.1]$$

burada;  $A = -0,011 \text{ W/mK}$ ,  $B = 0,00027 \text{ Wm}^2/\text{kgK}$ ,  $\rho$  ise  $\text{kg/m}^3$  olarak birim ağırlığı göstermektedir.  $\lambda$  katsayısının boyutu ise  $\text{W/mK}$  dir.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ısı iletkenlik rutubet içeriğindeki artma ile artar. Deney sonuçlarına dayanarak elde edilen bu bağıntılara göre rutubet içeriğinde her %1 artış ısı iletkenlikte %42 artışa neden olmaktadır. Eğer ölçülmüş değerler mevcut değilse rutubetli halde ısı iletkenlik katsayısı aşağıdaki denklemle elde edilebilir:

$$\lambda_{rut} = \lambda_{kuru} (1 + C_w) \quad [4.2]$$

burada  $C = 0,04$  ve  $w$  ağırlık yüzdesi olarak rutubet içeriğini gösterir.



Şekil 4.7. Gazbetonun rutubet içeriği ile ısı iletkenlik katsayısı arasındaki bağıntı

## 5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada incelenen hafif betonların birim ağırlıklarının, betonların ısı iletkenlik ve taşıyıcılık özelliklerine etkileri şunlardır:

1. Ponza taşı hafif agregasıyla üretilen hafif betonların birim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları, yarma dayanımları, elastisite modülleri, ısı iletkenlik katsayıları artmaktadır.
2. Ponza taşı hafif agregasıyla üretilen hafif betonların birim ağırlıklarını 700 kg/m<sup>3</sup>'den 1900 kg/m<sup>3</sup>'e kadar değiştirmek mümkündür. Böylece bu hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini genişçe bir aralıkta değerlendirebilmek söz konusudur.
3. Ponza taşı gibi doğal agregalarla üretilen hafif betonlarda birim ağırlığın düşürülmesi elastisite modülünü basınç dayanımından daha fazla etkilemektedir.
4. Üretilen tüm hafif betonlar için “elastisite modülü” ile  $(\text{birim ağırlık})^{3/2} \times (\text{basınç dayanımı})^{1/2}$  arasında çok kuvvetli lineer bir korelasyon vardır.
5. Ponza taşı hafif agregasıyla üretilen hafif betonların plaka metodu ile hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları ile, gazbetonlar için geliştirilen;  $\lambda = 00027 \cdot \Delta - 0,011$  ( $\Delta$ =birim ağırlık, kg/m<sup>3</sup>) bağıntısı kullanılarak hesaplanan ısı iletkenlik katsayıları arasında iyi bir lineer korelasyon vardır

Bu sonuçların, yalnızca bu araştırmada incelenen sınırlar arasında geçerlidir. Beton bileşim parametrelerinin bu sınırlar dışındaki değerleri alması durumunda betonun ne şekilde davranacağı, yapılacak yeni çalışmalarla incelenebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Neville, A.M.**, 1975. *Properties of Concrete*, Pitmann Publishing, London.
- [2] **Akman, M.S. ve Taşdemir, M.A.**, 1977. Taşıyıcı Malzeme Olarak Perlit Betonu, *I. Ulusal Perlit Kongresi*, Ankara, 20-22 Aralık, s.40-48.
- [3] **Price, W.H. and Cordan, W.A.**, 1949. Test of Lightweight-Aggregate Concrete, *ACI Journal, Proceedings*, **Vol.45, No.8**, April, pp.581-600.
- [4] **ASTM C330-69**, “Standart Specification for lightweight aggregates for structures concrete”.
- [5] **TS 2511**, 1977. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, *T.S.E*, Ankara.
- [6] **Manuel CEB-FIB.**, 1980. Beton de Grenulats Legers, *Annales de l’ITBTP beton* no: 195, Mai
- [7] **Cormon, P.**, 1973. Betons Legers D’Aujourd’hui, Editions Eyrolles,.
- [8] **ACI Committee 213**, 1970. *Guide for structural lightweight aggregate concrete*, Paris
- [9] **TS 2823**, 1977. Bims Betondan Mamül Yapı Elemanları, *T.S.E*, Ankara.
- [10] **Çetmeli, E.**, 1974. Yeni Alman Betonarme Şartnamesi (DIN 1045, 1972) Betonarme hesap esasları, kesitlerin boyutlandırılması ve donatının yerleştirilmesi, Uluğ Kitabevi, İstanbul.
- [11] **Malhotra, V.M.**, 1976. No-Fines Concrete-Its properties and applications, *ACI Journal*, November, pp.628-644.
- [12] **Heufers, H.**, 1976. Leichter Normalbeton, (lightweight normal concrete), *Betonwerk+Fertigteil+Technik*, **11**, pp. 525-528.
- [13] **Wierig, H. –J. und Ruppert, H.**, 1976. Über das Verformungsverhalten von leichten normal betonen, unter kurzzeitig einwirkenden lasten, teil 1 (The deformation behaviour of lightweight normal concrete under short-period loads), *Betonwerk+Fertigteil+Technik*, **11**, pp. 629-533.
- [14] **Ateş, Erdem.**, 2001. Styropor hafif betonun ve betonarme çatı plak elemanları üzerine araştırma, *Bitirme Çalışması*, İTÜ İnşaat Fak, İstanbul.
- [15] **Yıldırım, M.Ali.**, 1994. Hafif ve yarı hafif betonlarda çelik lif kullanımının etkisi, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul

- [16] **Taşdemir, M.A.**, 1982. Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
- [17] **Budkinov, P.P., Elinzon, M.P. Yakbu, I.A.**, 1968. The Structure, Composition and some properties of Lightweight Aggregates Used for Concrete in the USSR, *Proceedings of the first international congress on Lightweight Concrete*, Vol 1, Papers: 3-16,
- [18] **TS 825**, 1999. Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, *T.S.E*, Ankara.
- [19] **Russel, P.**, 1976. Effect of Aggregates on the durability of Concrete, *Cement and Concrete Association*, Advisory Note, Wexham Springs,
- [20] **Sasse, H.R.**, 1974. A Structural interpretation of the cracking behaviour of Concrete, *Ibac Mitteilungen*, pp. 100-11.
- [21] **Weshe, K.**, 1973. Strength and Deformation behaviour of structural lightweight concrete, *National Seminar on "Materials science and Technology*, Madras(India), febr.
- [22] **Bache, H.H.**, 1967. Strength of structural lightweight aggregate concrete, *Rilem Symposium on "Testing and Design Methods of Lightweight Aggregate Concrete"*, Budapest, march.
- [23] **Bache, H.H. and Christensen, P.N.**, 1965. Observation on strength and fracture in lightweight and ordinary concrete, *Proceedings of and Inter. Conf. On the Structure of Concrete and its Behaviour under Load*, London, , pp.93-108.
- [24] **Schmidt-Hurtienne Klaus-Dieter.**, 1972. Druckfestigkeit von Leichtbeton, *Schriftenreihe der institute für Konstruktiven Ingenierbau der Tu Braunschweig*, 4.
- [25] **Sturman, G.M., Shah,S.P., Winter, G.**, 1964. Microcracking and inelastic behavior of concrete, *Proceedings of the international Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, ASCE-ACI, Miami, Florida, Nov., pp. 473-499.
- [26] **ACI Journal**, 1981. Microvaracking and Time-Dependent Strains in Concrete, written by *Ngab,A.S., Slate, F.O. and Nilson, A.H.*, pp. 262-268.
- [27] **Hsu, T.C., Slate, F.O., Struman, G.M., Winter, G.**, 1963. Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve, *ACI Journal*, pp. 209-224.
- [28] **Grimer, F.J., Hewitt, R.E.**, 1969. The Form of the Stress-Strain Curve of Concrete interpreted with a diphas concept of material behaviour, *Civil Engineering Materials Conference*, Southampton, Part 1, No. 57, pp. 681-691.
- [29] **TS 706**, 1980. Beton Agregaları, *T.S.E*, Ankara.

- [30] **TS 3673**, 1981. Beton Agregalarında Organik Kökenli Madde Tayini, *T.S.E*, Ankara.
- [31] **TS 3527**, 1980. Beton Agregalarında İnce Madde Oranı Tayini, *T.S.E*, Ankara.
- [32] **TS 388**, 1977. Plaka Metodu İle Isı İletkenliğinin Tayini, *T.S.E*, Ankara.
- [33] **TS 415**, 1977. Isı İletkenliği ve Isı Geçirgenlik Direncinin Yapıda Kullanılması İçin Hesap Değerlerinin Bulunması, *T.S.E*, Ankara.
- [34] **Postacıoğlu, B., Taşdemir, M.A.**, 1986. Depreme Dayanıklı Yapılarda Doğal Hafif Agregalı Yapılardan Yararlanılması, *Yapı Endüstri Merkezi "Deprem" Semineri Bildiriler Kitabı*.
- [35] **Popovics, S.**, 1998. Strength and Related Properties of Concrete, *A Quantitative Approach*, John Wilwy & Sons Inc.
- [36] **Şengül, Özkan.**, 2000. Agregat Türünün Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışına Etkisi, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [37] **Neville, A.M.**, 1986. Properties of Concrete, *An Overview*, *Concrete International*, pp.60-63.
- [38] **Neville, A.M.**, 1997. *Properties of Concrete*, John Wilwy & Sons Inc.
- [39] **ACI Journal**, 1990. Standart Practice for Selecting Proportions For Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2), *ACI Materials Journal*, November-December.
- [40] **Arda, Aydın.**, 1994. Hafif Betonlarda Agregat Konsantrasyonunun Mekanik Özelliklere Etkisi, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [41] **Min-Hong Zhang and Odd. E. Gjorv.**, 1991. Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete, *ACI Materials Journal*, May-June.
- [42] **Şehitoğlu, Bedia.**, 1987. Normal ve Hafif Betonların Elastik Olmayan Davranışı, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] **Arda, Aydın.**, 1992. Yüksek Dayanımlı Betonların Tek Eksenli Kısa Süreli Basınç Yükleme Altında Mekanik Davranışında Agregat Konsantrasyonunun Etkisi, *Bitirme Ödevi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [44] **F.D.Lydon, R.V.Baledron.**, 1986. Some Observations of Elastic Properties Of Plain Concrete, *Cement and Concrete Research*, Yol 16, pp. 34-324.
- [45] **Argunhan, Ercan.**, 1984. Ponza Taşı İle Üretilen Taşıyıcı Hafif Betonarme Elemanların Özelliklerine Süperakışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Etkisinin Araştırılması, *Y. Lisans Tezi*, İTÜ FenBilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [46] **Sell, R.**, Die Kornfestigkeit künstlicher Zuschlagstoffe und ihr Einfluss auf die betonfestigkeit, *Deutscher Ausschuss für stahlbeton*, Heft 197.
- [47] **Tepfers, R., Purins, E. and Hermann, Y.**, 1979. Mix design of Lightweight Aggregate Concrete for structural Purposes, *The International Journal of Lightweight Concrete*, Vol.1, no.2.
- [48] **Grübl, P.**, 1979. Die Zugfestigkeit von Leichtzuschlag, *Betonwerk + Fertigteil + Technik*, Heft 10, pp. 579-587.
- [49] **Grübl, P.**, 1972. *Method for Determination of the Compressive Strength by Hydraulic Pressure of Lightweight Aggregates Granules*, Göthenburg, September
- [50] **BS 3797**, 1964. British standart specification for lightweight aggregates for concrete, *British Standart*, London.
- [51] **TS 1114**, 1972. Hafif Agregalar, *T.S.E*, Ankara.
- [52] **Schulz, B.**, 1978. Entwurf mittel-und hochfester Leichtbeton Mischungen, *beton*, 3.
- [53] **Newman, K. and Newman, J.B.**, 1969. Failure Theories and Design Criteria for Plain Concrete, *The proceedings of the southampton Civil Engineering Materials Conference*, Part 2, pp.963-995.
- [54] **Schulz, B.**, 1977. Zum Entwurf von Leichtbeton bestimmter Festigkeit, *beton*, 2, s.61-65.
- [55] **Grübl, P.**, 1979. Druckfestigkeit von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge, *beton*, 3, s.91-95.
- [56] **Zaitsev, J.W., and Witmann, F.H.**, 1973. Fracture of porous viscoelastic materials under multiaxial state of stress, *Cement and Concrete Research*, Vol.3, pp.389-395.
- [57] **Postacıoğlu, B.**, 1981. *Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri*, İTÜ matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.
- [58] **Moral, H.**, 1979. Bağlayıcı Hamurun yapısının Beton ve Harçların Kısa Süreli İn elastik Davranışına Etkileri, *MMLS Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul
- [59] **Hsu, T.C.**, 1963. Mathematical analysis of shrinkage stresses in a model of hardened concrete, *ACI Journal Proceedings*, Vol.60, No.2, pp.371-390.
- [60] **Oktar, Osman N.**, 1982. Çimento hamurunun yapısının ve agrega granülometrisinin beton ve harçların basınç altındaki davranışına etkileri, *İTÜ Yapı Malzemeleri Seminerleri*, İTÜ, İstanbul.

- [61] **Taşdemir, C., Ertokat, N.,** 2002. Gazbetonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri üzerine bir değerlendirme, *TMMOB Mimarlar Odası 1. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, İstanbul, Cilt 2, pp.425-437.
- [62] **Czuryszkiewicz, A.,** 1973. The effect of aggregate shape upon the strength of structural lightweight aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.25, No.83, , pp. 81-86.
- [63] **Schütz, F.R.,** 1970. Der Einfluss der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit, *Dissertation Th Aachen*,
- [64] **Pauw, A.,** 1960. Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density, *ACI Journal Proceedings*, Vol.57, pp. 679-687.
- [65] **Atan, Y.,** 1972. Hafif betonların tek eksenli yükleme halindeki davranışlarına agrega-harç fazlarının etkisi, *Teknik Rapor No.12*, İTÜ İnşaat fak., İstanbul.
- [66] **Atan, Y.,** 1967. Taşıyıcı hafif beton olarak tuğla kırığı betonu üzerinde araştırmalar, *Doçentlik tezi*, İTÜ İnşaat fak., İstanbul.
- [67] **İhtiyaroğlu, E.,** 1976. Tabii hafif agregalar ile imal edilen Hafif beton blokların duvar elemanı olarak özelliklerinin tayini üzerine Araştırmalar, *İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları*, No. 5.
- [68] **Turgutalp, İ.,** 1978.. *Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasıyla üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerine bir araştırma*, Erzurum,
- [69] **Erciyes, Y.,** 1963. Bims ve bims betonu üzerine araştırmalar, *İmar ve İskan Bakanlığı Yayınları*, No. 5-17.
- [70] **Sükan, T., Ermutlu, E.,** 1966. Doğal hafif agregalarla hafif beton araştırması, *Tübitak proje no. ,MAG31*, Ankara.
- [71] **Mindess, S., Young, J.F.,** 1981. *Concrete*, Prentice - Hall ., Inc., New Jersey,
- [72] **Postacıoğlu, B., Taşdemir, M.A.,** 1986. *Depreme Dayanıklı Yapılarda Doğal Hafif Agregalı Betonlardan Yararlanılması*, Yapı Endüstri Merkezi “Deprem” Semineri Bildiriler Kitabı,
- [73] **RILEM Recommendation,** 1975. *Functional Classification of Lightweight Concrete*, LC2,
- [74] **Gürol, M., Taşdemir, M.A.,and Kocataskın, F.,** 1988. A Comparative Experimental Study of Reinforced Lightweight Concrete Roof Slabs, *Civil Engineering Practice*, Vol.3, No.2, pp.59-66.
- [75] **RILEM Technical Committees,** 1993. *Autoclaved Aerated Concrete: Properties, Testing and Design*, E and FN Spon, London, 78-MCA and 51-ALC,

## **ÖZGEÇMİŞ**

Hakan Konuk 1975 yılında İstanbulda doğdu. 1993 yılında Üsküdar Anadolu Lisesinden mezun oldu. 1998 yılında Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Lisans programını bitirdi. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi.