İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KÖKENLİ AGREGALAR İÇEREN YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Aydın KARADAĞ

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI KÖKENLİ AGREGALAR İÇEREN YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Aydın KARADAĞ
(501061016)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Nisan 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Haziran 2008

Tez Danışmanı : Y.Doç.Dr. Hasan YILDIRIM
Diğer Jüri Üyeleri Y.Doç.Dr. Hakan Nuri ATAHAN (İ.T.Ü.)
Doç.Dr. Nabi YÜZER (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2008

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımlarıyla yanımda olan sayın hocam Y. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM'a,
Bu çalışmaya teknik yardım ve malzeme desteği sağlayan Nuh Beton A.Ş.'ye, bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, bu firmanın yetkililerinden Y. İnş. Müh. Mehmet MUTLU'ya ve İnş. Müh. Mehmet GENÇMEHMETOĞLU'na,
Deneysel çalışmalarımda verdikleri destek ve yardımları için sayın hocam Y. Doç. Dr. Hakan Nuri ATAHAN'a ve İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuarı çalışanlarına,
Gösterdikleri ilgi ve destekleri için aileme teşekkür ederim.

Haziran, 2008 Aydın KARADAĞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
ÖZET ix
SUMMARY xi

1.GİRİŞ 1
1.1. Beton 1
1.2. Betonu Oluşturan Malzemeler 2
1.2.1. Agrega 2
1.2.1.1. Agregaların Sınıflandırılması ve Tanımlar 2
1.2.1.2. Agrega Granülometrisi ve Elek Analizi 3
1.2.1.3. İncelik Modülü 5
1.2.1.4. İçerdiği Su Miktarına Göre Agregaların Nemlilik Durumları 5
1.2.1.5. Agregaların Su Emme Kapasitesinin ve Mevcut Nemlilik Durumunun Belirlenmesi 7
1.2.1.6. Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık ve Kompasite 8
1.2.1.7. Agregaların Mekanik Özellikleri 9
1.2.1.8. Agregaların İçinde Zararlı Madde Bulunması 10
1.2.1.9. Agrega Türünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri Üzerine Yapılan İncelemeler 11
1.2.2. Çimento 12
1.2.3. Puzolanlar 12
1.2.3.1. Silis Dumanı 13
1.2.3.2. Uçucu Kül 14
1.2.4. Karışım Suyu 16
1.2.5. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi 16
1.3. Betonların Sınıflandırılması 17
1.4. Yüksek Mukavemetli Betonlar 19
1.4.1. Yüksek Mukavemetli Beton Malzemeleri 20
1.4.1.1. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Agrega 21
1.4.1.2. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Çimento 22
1.4.1.3. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Silis Dumanı 23
1.4.1.4. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Uçucu Kül 23

1.4.1.5. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Hiper Akışkanlaştırıcı 23
1.5. Kendiliğinden Sıkışan Betonlar 24
1.5.1. Kendiliğinden Sıkışan Betonların Avantajları 26
1.5.2. Kendiliğinden Sıkışan Betonlar Üzerine Yapılan Araştırmalar 26
1.6. Yüksek Mukavemetli Betonlarda Gerilme-Birim Deformasyon İlişkileri 27
1.6.1. Yüksek Mukavemetli Betonun Dayanımına Yükleme Hızının Etkisi 30
1.7. Betonun Elastisite Modülü 30
1.7.1. Betonun Elastisite Modülü Değerini Etkileyen Faktörler 31
1.7.2. Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması 34
1.7.2.1. Başlangıç Teğeti Yöntemi 34
1.7.2.2. Sekant Yöntemi 35
1.7.2.3. Teğet Yöntemi 35
1.7.2.4. Kiriş Yöntemi 36
1.7.3. Betonun Basınç Dayanımı Değeri ile Elastisite Modülünün Hesaplanması 37

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 38
2.1. Üretilen Betonların Özellikleri 38
2.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri 39
2.2.1. Çimento 39
2.2.2. Uçucu Kül 41
2.2.3. Silis Dumanı 41
2.2.4. Agrega 42
2.2.4.1. Dolomit 42
2.2.4.2. Kalker 45
2.2.4.3. Bazalt 47
2.2.4.4. Kuvarsit 50
2.2.4.5. Doğal Kum 53
2.2.5. Kimyasal Katkı 54
2.3. Beton Üretimi 54
2.3.1. Beton Üretiminde İzlenen Yol 55
2.4. Taze Beton Deneyleri 57
2.4.1. Serbest Yayılma Deneyi 57
2.4.2. Birim Ağırlık Deneyi 58
2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri 58
2.5.1. Basınç Dayanımı Deneyi 58
2.5.2. Ultrases Hızı Deneyi 59
2.5.3. Elastisite Modülü Deneyi 59

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ **60**
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları 60
3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 62
3.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları 62
3.2.2. Ultrases Hızı Deneyi Sonuçları 65
3.2.3. Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları 66
3.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 67
3.3.1. Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki 67
3.3.2. Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki 68
3.3.3. Birim Ağırlık ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki 69
3.3.4. Basınç Dayanımı ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki 70
3.3.5. Elastisite Modülü ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki 71
3.3.6. Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki 72

4. GENEL SONUÇLAR **76**
4.1. Taze Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar 76
4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar 76

KAYNAKLAR **78**

ÖZGEÇMİŞ **86**

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 1.1	Normal ve Ağır Betonlar İçin Basınç Dayanımı Sınıfları……...	18
Tablo 1.2	Maksimum Tane Büyüklüğüne Göre Beton Sınıfları…….....	19
Tablo 1.3	Birim Hacim Kütlesine Göre Beton Sınıfları ……..……	19
Tablo 1.4	Taze Beton Yayılma Sınıfları……...	19
Tablo 2.1	Üretilen Betonların İsimlendirilmesi (Karışım Kodu) …….	39
Tablo 2.2	Çimentonun Fiziksel Özellikleri……...	40
Tablo 2.3	Çimentonun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri……...	40
Tablo 2.4	Uçucu Külün Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Analizleri…….	41
Tablo 2.5	Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri……...	42
Tablo 2.6	Dolomit Agregasının Mineral Bileşimi……	43
Tablo 2.7	Dolomit Agregalarının Özgül Ağırlıkları…….	43
Tablo 2.8	Dolomit Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri……..	44
Tablo 2.9	Kalker Agregasının Mineral Bileşimi……...	46
Tablo 2.10	Kalker Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri……..	46
Tablo 2.11	Kalker Agregalarının Özgül Ağırlıkları……..…….	47
Tablo 2.12	Bazalt Agregasının Mineral Bileşimi……...	48
Tablo 2.13	Bazalt Agregalarının Özgül Ağırlıkları……..……..	49
Tablo 2.14	Bazalt Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri……..	49
Tablo 2.15	Kuvarsit Agregasının Mineral Bileşimi……	51
Tablo 2.16	Kuvarsit Agregalarının Özgül Ağırlıkları……..…..	51
Tablo 2.17	Kuvarsit Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri……..	52
Tablo 2.18	Doğal Kumun Mineral Bileşimi……...	53
Tablo 2.19	Doğal Kumun Elek Analizi……..	54
Tablo 2.20	Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri……...	54
Tablo 2.21	Gerçek Beton Bileşimleri…….	56
Tablo 3.1	Taze Beton Deney Sonuçları……	60
Tablo 3.2	28 Günlük Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları…….....	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 : Agrega Tanelerindeki Su Durumları……. 6
Şekil 1.2 : Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri..... 27
Şekil 1.3 : Tek Eksenli Basınç Altında Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Gerilme-Şekil Değiştirme…….. 28
Şekil 1.4 : Bağıl Kırılma Enerjisi-Basınç Dayanımı İlişkisi……..... 30
Şekil 1.5 : Betonun ve Betonu Oluşturan Malzemelerin σ-ε Eğrileri……..... 32
Şekil 1.6 : Betonun Elastisite Modülünü Etkileyen Faktörlerin Sınıflandırılması..... 33
Şekil 1.7 : Başlangıç Teğeti Yöntemi..... 34
Şekil 1.8 : Sekant Yöntemi 35
Şekil 1.9 : Teğet Yöntemi 36
Şekil 1.10 : Bazı Deneylerde Elde Edilen Betonun σ-ε Eğrisi……. 37
Şekil 2.1 : Dolomit Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri……. 44
Şekil 2.2 : Kalker Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri……... 47
Şekil 2.3 : Bazalt Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri…… 50
Şekil 2.4 : Kuvarsit Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri……. 52
Şekil 2.5 : Serbest Yayılma Deneyi……..... 57
Şekil 2.6 : Aşındırma Yöntemi ile Numunelere Başlık Yapılması…… 58
Şekil 2.7 : Ultrases Hızı Belirleme Düzeneği…… 59
Şekil 3.1 : Serbest Yayılma Deneyi Sonuçları……... 61
Şekil 3.2 : Taze Betonların 50 cm Çapa Ulaşma Süreleri (T_{50})……. 61
Şekil 3.3 : 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımı Sonuçları……... 63
Şekil 3.4 : 0,26 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları ……..... 64
Şekil 3.5 : 0,30 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları……... 64
Şekil 3.6 : 0,34 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları……... 65
Şekil 3.7 : 28 Günlük Ultrases Hızları……... 66
Şekil 3.8 : Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları…… 67
Şekil 3.9 : Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki……..... 68
Şekil 3.10 : Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki……..... 69
Şekil 3.11 : Gerçek Birim Ağırlık ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki……... 69
Şekil 3.12 : Basınç Dayanımı ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki……... 71
Şekil 3.13 : Elastisite Modülü ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki..... 72
Şekil 3.14a : Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki..... 72

Şekil 3.14b : Basınç Dayanımının Karekökü ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki…… 73
Şekil 3.14c : Deneysel Elastisite Modüllerinin Literatürle Karşılaştırılması……...……. 74

FARKLI KÖKENLİ AGREGALAR İÇEREN YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONLARIN ELASTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yüksek mukavemetli betonlar, normal dayanımlı betonlara göre daha üstün içyapı ve mekanik özelliklere sahip yapı malzemeleridir. Mukavemet, betonun diğer bütün özelliklerini az çok belirleyen bir parametre olarak kullanılır. Bu nedenle betonlar standartlarda basınç mukavemetleri esas alınarak sınıflandırılırlar.

Kendiliğinden sıkışan beton karışımlarının, kendi ağırlığı altında yayılması, sık donatıların arasından geçmesi ve segregasyona karşı direnç göstermesi gibi özellikleri inşaat alanlarında önemli faydalar sağlamaktadır. Bu özellikleri sağlamak için kendiliğinden sıkışan beton karışımlarında, geleneksel betonlara göre daha fazla hamur hacmine ihtiyaç duyulur. Hamur içeriğindeki bu artış ise sertleşmiş beton özelliklerini etkileyebilen agrega miktarında bir azalma meydana getirmektedir.

Betonun elastisite modülünün tahmini yapısal tasarım açısından önemlidir. Literatür ve yapı standartlarında mevcut olan tahmin yöntemleri genellikle normal dayanımlı geleneksel beton karışımlarını kapsamaktadır. Bu tez çalışması, farklı kökenli agregalar içeren yüksek mukavemetli kendiliğinden sıkışan betonların taze beton, basınç dayanımı ve elastik özellikleri ile ilgili bilgi vermektedir.

Bu tez çalışmasında 12 farklı beton karışımı üretilmiştir. Yüksek mukavemetli beton karışımlarının tasarımında dolomit, kalker, bazalt ve kuvarsit agregalarının kırmataş ve kırma kumları kullanılmıştır. Buna ilave olarak, her beton tasarımı için aynı doğal kumdan yararlanılmıştır. Her bir agrega türü için 3 farklı eşdeğer su/bağlayıcı oranı kullanılmıştır. Aynı zamanda kimyasal katkıdan gelen su miktarı karışım suyundan düşülmüştür.

Karışımlarda tipik bir portland çimentosu (CEM I) kullanılmıştır. Aynı zamanda C tipi uçucu kül ve silis dumanı da tamamlayıcı malzemeler olarak kullanılmıştır. Buna ilave olarak, tüm agrega türlerinin beton karışımları için istenilen taze beton özelliklerini sağlamak amacıyla polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltan bir kimyasal katkıdan yararlanılmıştır. Tüm agrega türleri için her bir metreküp beton için kullanılan çimento, uçucu kül ve silis dumanı miktarları sabit tutulmuştur.

Serbest yayılma, taze betonun 500 mm'lik çapa yayılma süresi (T_{50}) ve birim ağırlık değerleri taze beton özellikleri olarak belirlenmiştir. Her bir beton karışımından 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde 4 silindir numune alınmıştır. Numuneler, dökümden sonraki 28. günde yapılan basınç dayanımı, ultrases hızı ve elastisite modülü test günlerine kadar 23±2 ^{o}C sabit sıcaklığındaki suda küre bırakılmışlardır.

Tüm agrega türleri için beton karışımlarının serbest yayılma değerlerinin 650-760 mm arasında değiştiği görülmüştür. Betonun 500 mm'lik çapa yayılma süresi

su/çimento oranının azalmasıyla artış göstermiştir. Taze beton karışımlarının birim ağırlıkları ise agrega türü ve kullanılan su/çimento oranına bağlı olarak 2356-2531 kg/m^3 aralığında değişim göstermiştir.

Dolomit ve bazalt içeren yüksek mukavemetli betonların kalker ve kuvarsit içeren betonlara göre daha yüksek ultrases hızına sahip olduğu görülmüştür. Tüm agrega türleri için 28 günlük basınç dayanımları su/çimento oranının artmasına bağlı olarak azalmıştır. Basınç dayanımı değerleri 84,47 MPa ile 112,97 MPa aralığında değişim göstermiştir. Aynı zamanda en düşük özgül ağırlığa sahip olan kuvarsit agregası içeren betonların da diğer agregalar gibi yüksek mukavemet değerlerine ulaşabileceği söylenebilir. Bununla beraber, bu çalışmada dolomit agregasıyla üretilen beton en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır.

Yüksek mukavemetli beton karışımlarının elastisite modülleri su/çimento oranının artmasıyla azalmıştır. Aynı su/çimento oranına sahip beton karışımları birlikte değerlendirildiğinde, kalker kırmataş ve kırma kum agregaları içeren beton karışımları diğerlerine nazaran biraz daha düşük elastisite modülü sonuçları vermiştir. Dört farklı tür agrega kullanılarak tasarlanan betonların elastisite modülleri su/çimento oranı ve agrega türüne bağlı olarak 38,98 GPa ile 48,85 GPa aralığında değişim göstermiştir.

TS 500'de önerilen tahmin yöntemi, yüksek mukavemetli beton karışımlarının elastisite modüllerini 85 MPa ile 95 MPa basınç dayanımı aralığında biraz daha yüksek tahmin etmiştir. Diğer taraftan, 95 MPa'ın üzerinde elastisite modülü değerlerini daha iyi bir yaklaşımla tahmin etmiştir. Yüksek mukavemetli betonlar için ACI 363-R'de önerilen yöntem ise, deneysel verilerin alt sınırına çok yakın bir yol izlemiştir. Bu nedenle, ACI 363-R bu çalışma için deneysel elastisite modülünün tahmininde uygulanabilir bir yöntem olarak düşünülebilir. Sonuç olarak, elde edilen sonuçların literatürde belirtilen değerlere uygun olduğu görülmüştür.

INVESTIGATION OF THE ELASTIC PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETES INCLUDING DIFFERENT TYPES OF AGGREGATES

SUMMARY

High strength concretes are the structural materials which have more excellent internal structure and mechanical properties than the normal strength concretes. Strength is used as a parameter to determine all the characteristics of the concrete more or less. Therefore, concretes are categorized to be predicated on their compressive strengths in the standards.

The ability of self compacting concrete mixtures to flow under its own mass, pass through congested reinforcement and resist against segregation can result in substantial benefits in the construction zones. To attain these characteristics, self compacting concrete mixtures need more paste volume than is needed for the conventional concrete mixtures. The increment in the paste content results in a reduction in aggregate volume which can affect the hardened concrete properties.

The prediction of modulus of elasticity of the concrete is important from the point of view of the structural design. The prediction methods available in the literature and structural standards usually cover the moderate strength conventional concrete mixtures. This thesis study provides information about the fresh concrete, compressive strength and elastic properties of high strength self compacting concretes including different types of aggregates.

In this thesis study, 12 different concrete mixtures have been produced. For the design of the high strength concrete mixtures, the crushed stones and crushed sands of dolomite, limestone, basalt and quarzite aggregates have been used. Furthermore, for each concrete design the same natural sand has been used. 3 different equivalent water/binder ratio have been used for each aggregate type. The amount of water comes from the chemical admixture also has been deducted from the mixing water.

An ordinary portland cement (CEM I) has been used in the mixtures. C type fly ash and silica fume also have been used as supplementary materials. To provide the desired fresh properties of concrete mixtures, a polycarboxylate-based high range water reducer chemical admixture has been used for all types of concretes as well. Cement, fly ash and silica fume amounts used in per cubic meter of concrete have been kept constant for all aggregate types.

The slump flow, the time for the concrete to spread to a diameter of 500 mm (T_{50}) and unit weight were determined as the fresh concrete characteristics. 4 samples of 150 mm diameter, 300 mm height cylinder have been taken as samples from each concrete mixtures. The samples have been cured in water with a constant temperature

of 23±2 ^{o}C until the compressive strength, ultrasonic pulse velocity and modulus of elasticity testing days which have been made on the 28th day after casting.

It has been seen that, for all aggregate types, the slump flow values of concrete mixtures have changed between 650-760 mm. The time for concrete to spread the diameter of 500 mm has increased with decreasing water/cement ratio. The unit weights of fresh concrete mixtures have varied between 2356-2531 kg/m^3 depending on the aggregate type and water/cement ratio used.

It has been observed that high strength concretes including dolomite and basalt had higher ultrasonic pulse velocity than the concretes including limestone and quarzite. For all aggregate types, 28 day compressive strengths were decreased with increasing water/cement ratio. Compressive strength values changed between 84,47 MPa and 112,97 MPa. Also, it shoud be said that, concretes including quarzite with the lowest specific gravity can reach the high compressive strength values like the other aggregates. Also, in this study the concrete which has made with dolomite aggregate have reached the highest compressive strength.

The modulus of elasticity of the high strength concrete mixtures have decreased with increasing water/cement ratio. When the concrete mixtures having the same water/cement ratio are evaluated, the concrete mixtures including limestone as crushed stone and crushed sand aggregates have given smaller modulus of elasticity results compared to the other mixtures. The modulus of elasticity of concretes designed using four different types of aggregates have varied between 38,98 GPa and 48,85 GPa depending on the water/cement ratio and aggregate type.

The prediction method proposed in TS 500 has slightly overestimated the modulus of elasticity of high strength concrete mixtures between the compressive strengths of 85 MPa and 95 MPa. On the other hand, it estimated the modulus of elasticity with a better approach over 95 MPa. For high strength concretes, the method proposed in ACI 363-R has followed a very close path to the lower bound of the experimental datas. For this reason, ACI 363-R can be considered as an applicable method for the prediction of the experimental modulus of elasticity for this study. Finally, it has been seen that the acquired results are appropriate to the literature.

1. GİRİŞ

1.1. Beton

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olan beton, çimento, su, iri ve ince agregadan oluşan, gerektiğinde kimyasal ve mineral katkı maddelerinin katıldığı kompozit bir malzemedir. Betonda çimento ve suyun oluşturduğu hamur fazı sürekli ortamı, agregalar ise dağınık fazı meydana getirirler. Agrega maliyetinin çimentoya göre çok daha düşük olması beton içinde agrega kullanımının tek sebebi değildir. Agrega betonun dayanımı ile birlikte davranışını da etkilemektedir. Agrega, betona daha iyi bir hacim sabitliği sağladığı gibi, aynı zamanda betonun çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Bunların yanı sıra, betonun işlenebilirliği, pompalanabilmesi ve beton içindeki hava miktarı da agrega tarafından belirlenir [1].

Beton üretiminde kullanılan mineral kökenli, kum, çakıl ve kırmataş gibi taneli yapı malzemelerine agrega adı verilmektedir. Agregalar betonun toplam hacminin yaklaşık %70'ini oluşturmaktadır. Bu nedenle agregaların kimyasal bileşimi, mineralojik ve petrografik yapısı ile fiziksel özelliklerinin iyi etüd edilmesi gerekmektedir. Bunların başlıca özellikleri granülometri, tane şekli ve boyutu, yüzey şekli, su emmesi, dayanımı, elastisite modülü, kimyasal ve mineral bileşimi, petrografik tanımlama ve özgül ağırlıktır. Bütün bu özellikler, betonun performansını ve durabilitesini etkilemektedir [2]. Kendiliğinden yerleşen betonlarda, bağlayıcı malzeme miktarının fazla olması ise sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini etkileyebilen agrega miktarında bir azalma meydana getirmektedir.

Betonlarda aranan en önemli özellik, yüksek bir mekanik mukavemet ve bunun yanında fiziksel ve kimyasal dış etkilere dayanıklılıktır. Mukavemet, betonun diğer bütün özelliklerini az çok belirleyen bir parametre olarak kullanılır. Bu nedenle betonlar standartlarda basınç mukavemetleri esas alınarak sınıflandırılırlar. Betonun mekanik mukavemet bakımından ilginç bir özelliği de, çekme mukavemetinin basınç mukavemetine göre çok küçük olmasıdır. Mühendislikte büyük önem taşıyan bu husus, betonarme demiri kullanılması ile giderilmeye çalışılır. Yol, köprü, baraj, vb.

birçok yapıda beton basınçtan başka çekme ve eğilme gerilmelerine de maruz kalmaktadır. Bu nedenle bu yapılarda kullanılan betonların çekme ve eğilme mukavemetlerin de mümkün olduğunca yüksek olması gerekir. Ayrıca bu tür kritik yapılarda betonların darbe ve aşınma etkilerine karşı da dayanıklı olması istenir. Yapılan araştırmalar, betonun basınç mukavemetinin yüksek olduğu oranda diğer (çekme, eğilme ve aşınma gibi) mekanik mukavemetlerinin de yüksek olduğunu göstermiştir. Bu durumda, basınç mukavemeti yüksek bir beton elde edildiğinde, bir ölçüde diğer mekanik mukavemetleri de yüksek olan beton elde edildiği kabul edilebilir. Pratikte basınç mukavemeti beton kalitesini belirleyen ölçü olarak kullanılır [3].

1.2. Betonu Oluşturan Malzemeler

Betonu oluşturan hammaddeler agrega, çimento, karışım suyu, kimyasal ve mineral katkılardır.

1.2.1. Agrega

Agrega, betonun %60-80'ini oluşturan mineral kökenli, kırılmış veya kırılmamış taneli malzemedir. Beton karışımında kullanılacak agregaların granülometri dağılımı, maksimum tane büyüklüğü, yüzey şekli ve biçimi, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, zararlı ve yabancı madde içeriği, aşınmaya ve donmaya karşı dayanıklılık gibi özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

1.2.1.1. Agregaların Sınıflandırılması ve Tanımlar

Agregalar, kaynaklarına göre, doğal ve yapay olmak üzere iki, özgül ağırlıklarına göre normal, hafif ve ağır agregalar olmak üzere üç, tane büyüklüklerine göre ise ince ve iri agrega olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

Doğal Agregalar: Nehir yatakları, eski buzul yatakları, deniz ve göl kenarları, taş ocakları gibi doğal kaynaklardan elde edilmiş fakat konkasörde kırma, eleklerden eleyerek değişik tane boyu sınıflarına ayırma ve yıkama işlemleri dışında, doğadaki yapılarında değişiklik yaratacak hiçbir işlem uygulanmamış olan agregalardır. Kum, çakıl ve kırmataş, en tipik ve en çok kullanılan doğal agregalardır.

Yapay Agregalar: Beton üretimi ile doğrudan ilgisi bulunmayan bir endüstri kolunda yan ürün veya atık malzeme olarak ortaya çıkan malzemelerden üretilen agregalar

veya bir malzemeye ısıl işlem uygulanarak beton yapımında kullanılmaya uygun hale getirilen agregalardır [4].

Normal Ağırlıklı Agrega, Hafif Agrega ve Ağır Agrega: Özgül ağırlığı 2,4-2,8 arasında olan agregalar normal ağırlıklı, 2,4'ten küçük olanlar hafif, 2,8'den büyük olan agregalar ise ağır agrega olarak isimlendirilirler. [1,5].

İnce ve İri Agrega: Beton agregaları için, en küçük boyut 60 μm ile 2 μm arasındaki taneli malzeme silt, 2 μm'den ince malzeme kil olarak tanımlanır. Beton literatüründe kabaca 4,75 mm'den küçük ince taneli malzemeye ince agrega veya sadece kum denilir. İri agrega ise 4,75 mm ile en büyük boyut ($D_{maks.}$ =40 mm) arasındaki taneli malzemeyi tanımlar. Çakıl ise kayaların parçalanmasından sonra akarsular tarafından taşınarak depo edilen iri taneli agregadır. Agregalar doğadan (akarsu yatakları, deniz kıyıları, çöl) doğrudan doğruya taneli olarak temin edilebildikleri gibi taşocağı işletmeciliği ile üretilen taş blokların kırılıp eleme işlemleri sonucunda da elde edilebilirler. Bu şekilde üretilen taneli malzemeye kırmataş denilir. Kırmataş tesislerinin artığı olan ince taneli malzemeye kırma kum (taşunu) denilmektedir. Bu tür malzemeler beton üretiminde ince agrega olarak kumla birlikte kullanılmaktadır [6].

1.2.1.2. Agrega Granülometrisi ve Elek Analizi

Elek açıklıkları apsis, buna karşı gelen yüzdeler ordinat alınarak ifade edilen eğriye granülometri eğrisi denilir. TS 706'daki kare açıklıkları en büyükten en küçüğe doğru 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm ve 0,25 mm'dir. Elek açıklıkları 0,25 mm'nin 2, 4, 8, …128 katı olup, logaritmik eşel yardımıyla elek açıklıklarını eşit olarak alınma kolaylığını temin eder.

Agrega karışımının boşluğunun en az, diğer anlatımla doluluk oranının en fazla olması istenir. Böylelikle betonda hem sağlam bir taşıyıcı iskelet oluşması hem de boşlukları dolduracak çimento hamurunun azalması gerçekleştirilebilir. Kuşkusuz bu husus beton karışımının tasarımının ekonomikliği ile yakından ilintilidir. Bu hususları yerine getiren granülometri eğrilerine referans eğrileri denir [6].

Beton karışımında kullanılacak agrega karışımının granülometri eğrisi temelde şu işlevleri görmektedir [7].

- Agrega karışımındaki boşluğu en aza indirmek, böylece en fazla doluluk oranını sağlayarak çimento hamurunu azaltmak.
- Taze betonun fazla olmayan bir ıslatma suyu miktarı ile kalıbına kolay yerleştirilebilir bir işlenebilirliğe sahip olması gerekmektedir. Tane boyutunun incelmesi tanenin özgül yüzey alanını arttırmakta, bu ise ıslatma suyu gereksiniminin artmasını sağlamaktadır. Kısaca, ince granülometrili bir agrega karışımının kullanımı, aynı çimento dozajında karışım suyu oranını arttırarak beton dayanımını düşürecektir.
- Taze betonun ayrışmasını önlemek için agrega karışımının içinde yeteri kadar ince ve orta büyüklükte tane bulunmalıdır. Eğer agrega karışımı içinde bulunan en küçük tane boyutu oldukça küçük olursa, bunun arasında oluşacak boşlukların boyutları da büyük olacaktır. Bu durumda betonun yerleştirilmesi sırasında çimento hamurunun bir kısmı kolayca bu boşluklardan geçip esas beton karışımından ayrılabilir. Ayrışma olayını önlemek için agrega karışımında yeterli miktarda ince boyutlu agrega taneleri bulunmalıdır. Ayrıca ince boyutlu agrega tanelerinin bulunması, taze beton karışımına bir kohezyon özelliği katar. Kohezyonlu beton karışımlarının ayrışması ise çok güçtür.
- Taze betonun kalıplara ve donatıların arasına girmesini temin etmek ise en büyük tane boyutu ile ilintilidir. Agreganın en büyük boyutu ise, beton karışımının kalıplara ve donatıların arasına girmesini zorlayacak kadar büyük olamaz. Bu değer betonarme standartlarında tanımlanmıştır.
- Taze betonda terleme fazla olmamalıdır. Kalıbına henüz yerleşmiş taze beton karışımındaki büyük boyutlu ve ağır katı taneli maddeler göreceli şekilde kalıbın içinde çökelir. Bu olayın sonucunda karışım suyunun ince bir film şeklinde kalıbın en üst kısmında gözükmesine terleme denilir. Kalıbın üst yüzeyindeki karışımın su/çimento oranı yüksektir. Eğer beton şu veya bu nedenle iyi kür edilmiyorsa bu katmandaki su, çok hızlı bir biçimde buharlaşır ve yapı içinde büzülme çatlaklarının oluşmasına yol açar. Terleme sonucunda karışımdan ayrılan su, özellikle iri agregaların ve donatı çubuklarının altında su filmcikleri oluşturur. Böyle oluşumlar ise agrega ile çimento hamuru arasındaki bağlantıyı zayıflatarak betonun mekanik dayanımının azalmasına neden olur [7].

Taze betonun işlenebilme özelliği, agrega granülometrisinden doğrudan etkilenen bir özelliktir. Agrega granülometrisi iyi olmadığı takdirde, istenilen işlenebilirliği elde edebilmek için betona daha çok su katmak gerekebilir. Bu durum beton dayanımını önemli ölçüde azaltabilmektedir. İstenilen sabit su/çimento oranı için çimento miktarı arttırılacak olursa sertleşmiş betonda daha çok büzülme olayı görülebilir ve ayrıca çimento maliyetinden ötürü ekonomik beton üretilememiş olur.

1.2.1.3. İncelik Modülü

Bir agregadaki tane dağılımı özelliği, en iyi şekilde, granülometri eğrisi ile belirlenmektedir. Agreganın granülometri özelliğini belirtebilmenin bir başka yolu, agrega tanelerinin ortalama büyüklüğünün veya başka değerlerinin tek bir sayı halinde ifade edilmesidir. Ancak, böyle bir sayı, agreganın inceliği veya kalınlığı hakkında genel bir bilgi vermekle beraber, agregadaki tane dağılımı oranını belirlemekten uzak kalmaktadır.

Karakteristik sayısal değer olarak kullanılan değişik değerler arasında en çok kullanılanı incelik modülüdür. İncelik modülü, agreganın granülometri özelliği hakkında bilgi sağlayan ampirik sayısal bir değerdir. Bu değer, elek analiziyle bulunan tane dağılımı oranlarını kullanarak hesap yoluyla elde edilebilmektedir.

İncelik modülü, elek analizinde, göz açıklığı en küçük olan standart elek en altta olmak üzere küçükten büyüğe doğru dizilmiş olan standart elekler üzerinde kalan agregaların yığışımlı yüzdelerinin toplamının 100'e bölünmesiyle elde edilen sayıdır.

İncelik modülü, agregadaki tanelerin, büyüklüğünün ortalama olarak ne mertebede olduğunu, yani, agreganın inceliğini ya da kalınlığını belirtmektedir. Agrega taneleri küçüldükçe incelik modülü azalır, taneler irileştikçe incelik modülü büyür. Aynı incelik modülüne sahip agregaların granülometri eğrileri farklı olabilir [4].

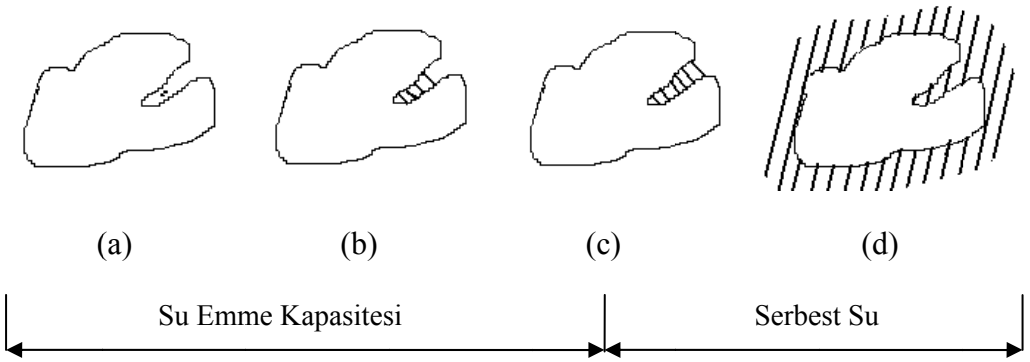
1.2.1.4. İçerdiği Su Miktarına Göre Agregaların Nemlilik Durumları

Agrega tanelerinde iki tip boşluk yer alabilmektedir. Bunlardan birincisi, tane yüzeyinde ince çatlaklar olarak oluşmuş olan veya tane içerisinde olup da yüzeydeki boşluklarla bağlantılı olan su geçirgen boşluklardır. Bu tür boşlukların içerisine su girip çıkabilmektedir. Diğeri ise agrega yapısından gelen, agrega tanelerinin içerisinde oluşmuş olan su geçirmez boşluklardır. Bu boşluklara su girememektedir.

Agrega tanelerinin karşı karşıya kaldıkları ıslanma veya kuruma durumuna göre, su geçirgen boşlukların içerisinde hiç su bulunamayacağı gibi, bu boşlukların içerisi kısmen veya tamamen su dolu olabilmektedir. Hatta, bazen, agrega tanelerinin içerisindeki boşluklar tamamen suyla dolu ve tanelerin yüzeyi de bir miktar su filmi ile kaplı durumda olabilmektedir.

İçerdiği su miktarına göre, agrega, Şekil 1.1'de gösterilen dört değişik durumdan birisine sahiptir [4].

a) Tamamen Kuru Durum: Agrega boşluklarında hiç su yoktur.
b) Hava Kurusu Durum: Agreganın su geçirgen boşluklarının içerisinde bir miktar su vardır. Ancak, boşluklar tamamen suyla dolu değildir ve tanelerin yüzeyinde su yoktur.
c) Doygun Yüzey Kuru Durum (DYK): Su geçirgen boşluklar tamamen suyla dolu, fakat tanelerin yüzeyinin kuru olduğu durumdur.
d) Islak Durum: Agreganın su geçirgen boşlukları tamamen suyla doludur, ayrıca tanelerin üzerinde bir miktar su filmi vardır.



Şekil 1.1: Agrega Tanelerindeki Su Durumları [4]

Beton yapımında kullanılacak agrega yığını, genellikle hava kurusu veya ıslak olmaktadır. Tamamen kuru veya doygun yüzey kuru durumuna nadiren rastlanabilmektedir.

Beton yapımında kullanılacak olan agreganın hangi nem durumuna ve ne kadar su emme kapasitesine sahip olduğunu saptayabilmek için, agrega yığınını temsil eden numune üzerinde şu işlemler yapılmaktadır. Önce, agrega numunesi tartılarak, mevcut ağırlığı (W_m) bulunmaktadır. Daha sonra, aynı agrega numunesi tamamen kuru duruma getirilerek o durumdaki ağırlığı (W_k) bulunmaktadır. Daha sonra da,

aynı agrega numunesi doygun, yüzey kuru duruma getirilerek o durumdaki ağırlığı (W_{dyk}) saptanmaktadır.

Bir agrega numunesinin tamamen kuru duruma getirilebilmesi için o numunenin etüvde 100-110 ^{o}C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar tutulması gerekmektedir. Numunenin fırında bir gece bırakılması bu durumu sağlayabilmektedir [4].

Doygun yüzey kuru durumuna getirilmek istenen numune, önce, su içerisinde 24 saat bekletilip doygun duruma getirilmektedir. Doygun duruma getirilmiş olan agregaların yüzey kuru durumuna getirilme işlemleri, iri ve ince agrega numuneleri için farklı yöntemlerle yapılmaktadır. Doygun sudan çıkartılan iri agrega taneleri, üzerlerinde gözle görülebilen su filmi kalmayıncaya kadar kurutulmalıdır. Gerekirse agrega taneleri, bir havlu ile teker teker kurutulmalıdır. Doygun olarak sudan çıkartılan ince agrega tanelerinin yüzeylerinin kuru olmasını sağlayabilmek için, numune bir tava içerisine yayılarak tablalı ısıtıcı üzerinde kurutulmalıdır.

1.2.1.5. Agregaların Su Emme Kapasitesinin ve Mevcut Nemlilik Durumunun Belirlenmesi

Su Emme Kapasitesi: Tamamen kuru durumdaki agreganın emebileceği maksimum su miktarı, su emme kapasitesi olarak tanımlanmakta ve yüzde olarak (1.1) bağıntısıyla ifade edilmektedir [4].

$$\text{Su Emme Kapasitesi, \%} = (W_{dyk} - W_k) / W_k \times 100 \quad \textbf{(1.1)}$$

Burada;
W_{dyk} = Agreganın doygun yüzey kuru durumundaki ağırlığı,
W_k = Agreganın tamamen kuru durumundaki ağırlığıdır.

Mevcut Nem Durumu: Betonda kullanılacak agregadan alınan numunenin önce mevcut halindeki (yani, numuneye hiçbir işlem uygulanmadan) ağırlığı bulunur ve daha sonra aynı numune tamamen kuru duruma getirilerek tartılırsa, agregadaki mevcut nem durumu (1.2) bağıntısındaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Agregadaki Mevcut Toplam Su, \%} = (W_m - W_k) / W_k \times 100 \quad \textbf{(1.2)}$$

W_m = Agrega yığınını temsil eden numunenin hiçbir işleme tabi tutulmamış ağırlığı,
W_k = Tamamen kuru duruma getirilmiş agrega numunesinin ağırlığıdır.

Agrega ıslak durumda ise betonun içerisine karışım hesaplarında elde edilen su miktarından daha çok su katılmış olur. Böyle bir durumda, su/çimento oranı hesaplanan miktardan daha yüksek olacağından, betondan istenilen dayanım elde edilememektedir. Öte yandan, agrega, tamamen kuru veya hava kurusu durumunda ise, beton karışımının içerisine katılan suyun bir miktarını emebilmektedir. Bu durumda da istenilen işlenebilmenin ve dayanımın elde edilebilmesi güçleşmektedir.

Agreganın su emme kapasitesi, malzemenin karışımı için yapılacak hesaplar açısından önemlidir. Ayrıca, agreganın su emme kapasitesi, betonun ve betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı için de büyük önem taşımaktadır. Su emme kapasitesi yüksek olan gözenekli agregaların içerisine su kolayca girebilmekte ve soğuk havalarda buz haline dönüşerek genleşmeye, çatlamaya yol açmaktadır [4].

1.2.1.6. Birim Ağırlık, Özgül Ağırlık ve Kompasite

Bir agrega yığınını boşluksuz olarak belirli bir hacme yerleştirmek mümkün değildir. Çünkü taneler arasında mutlaka boşluklar kalacaktır. Birim ağırlık, agregaların belirli bir hacimde bir araya gelerek ne ölçüde sıkı bir yapı meydana getirebileceklerini ifade etmektedir. Belirli V hacmindeki bir kaba serbest bir şekilde doldurulan agreganın ağırlığı P ise, P/V oranına agreganın birim hacim ağırlığı ya da kısaca birim ağırlığı denir ve Δ ile gösterilir. Bu değere yerleştirme şeklinin etkisi kadar, agreganın su içeriği de etki eder. Beton uygulaması yönünden birim ağırlık ve diğer bir yoğunluk şekli olan özgül ağırlık değerleri, agreganın yüzey kuru, suya doygun diye adlandırılan su içeriği konumunda tayin edilir. Birim ağırlık kavramında geçen V hacmi, taneler arası boşluk hacmini de içerir ve agrega yığının görünen hacmidir. Şantiyelerde ölçülebilen hacim işte bu görünen hacimdir.

Agrega yığını içindeki taneler arası boşluk (n) herhangi bir yöntemle ölçülürse, (örneğin kaba su konularak), V-n hacmi, agreganın mutlak hacmidir. Pratik olarak bu hacim Arşimed prensibine göre, agregaların taşırdığı su miktarı ile belirlenir. P/(V-n) değerine özgül ağırlık denir ve δ harfi ile gösterilir. Agreganın özgül ağırlık değeri, betonda yer alacak malzeme miktarının hesaplanmasında kullanılır. Betonda kullanılan çimento, su ve agregaların özgül ağırlıklarını bilmekle bu malzemelerin 1 m^3 beton içerisindeki hacimleri hesaplanabilir [8].

Özgül ağırlık değerlerinde agregaların jeolojik kökenleri etkilidir. Silisli agregaların, özellikle kuvartzların özgül ağırlıkları 2,65 kg/dm^3'tür. Kalkerli agregaların özgül

ağırlıkları ise 2,70 kg/dm^3'tür. Farklı kökenli kütlelerden oluşan agregalarda bu değer 2,55-2,80 kg/dm^3 arasında değişebilir. Çok farklı özgül ağırlıklı agregaların bir arada kullanılması halinde betonda homojenlik bozulabilir. Agreganın özgül ağırlığı düşük ise malzemenin düşük mukavemete sahip olduğu ve boşluklu olduğu yorumu yapılabilir.

Birim ağırlık değerine ise kökenden daha çok agreganın şekli etki eder. Yuvarlak nispeten küresel agregalarda yerleştirme daha iyi olduğundan birim ağırlık (1,6 – 1,8 kg/dm^3) daha yüksek olabilir. Kırmataş agregalarında ise bu değer 1,3-1,5 kg/dm^3 civarındadır. Birim ağırlık kumlarda daha düşük, çakıllarda daha yüksektir. Bu da taneler arası boşluğun bir sonucudur. Agregaların granülometrisine bağlı olarak boşluk miktarının azalması birim ağırlığı arttırır [8].

Herhangi bir agreganın birim ağırlığının (Δ) ve özgül ağırlığının (δ) bilinmesiyle, aynı zamanda bu agreganın kompasitesi, yani birim hacimdeki tanelerin işgal ettikleri gerçek hacim belirlenmiş olur. Çünkü agreganın kompasitesi $k=\Delta/\delta$ ifadesiyle hesaplanabilir. Birim ağırlık daima özgül ağırlıktan küçük olduğuna göre kompasite 1'den küçük bir değer alır. Bu durumda, yığın halindeki agreganın birim hacmindeki boşluk kompasiteyi 1'e tamamlayan değer olacaktır. Agregalarda kompasiteyi arttırmak için çeşitli çaplardaki taneleri beraber kullanmak gerekmektedir, öyle ki, en iri tanelerin arasındaki boşlukları ince taneler doldurabilsinler. Böylece iyi bir taneli malzemede, her çaptan tane bulunması gerektiği anlaşılır. Bu şekilde çimento miktarı, dolayısıyla beton maliyeti azaltılmış olur [9].

1.2.1.7. Agregaların Mekanik Özellikleri

Betonda kullanılan agreganın sağlam, sert, kolay kırılmayan ve çabuk aşınmayan özellikte olması gerekmektedir. Agreganın mekanik özelliklerinin belirlenmesi, her türdeki beton için gerekli olmamaktadır. Özel amaç için kullanılması gereken betonlarda ve betonun aşınmaya maruz kalacağı yerlerde kullanılacak agreganın mekanik özellikleri önem kazanmaktadır [10].

Tane Dayanımı: Yüksek dayanımlı beton elde etmek için mekanik dayanımı belirli değerlere ulaşan agregalara gereksinim vardır. Bu nedenle agregaların tane dayanımlarını da belirlemek gerekir. Nehir yataklarından elde edilmiş olan agregalar, genellikle, yüksek dayanımlı ve sert agregalardır.

Aşınma Dayanımı: Agregalar üzerinde aşınmaya dayanıklılık deneyleri uygulanarak çakılların sağlamlığı hakkında bilgi edinilebilir. Agregaların aşınma dayanımını elde etmek için en çok Los-Angeles deneyi uygulanır. Bu deneyde kullanılan cihaz iki tarafı kapalı, ekseni etrafında dönebilen, çelik silindirlerden oluşmaktadır. Silindir içinde belirli ağırlıkta ve sayıda çelik bilyeler mevcuttur. Tane büyüklüğü sınıfına göre miktarı ilgili tabloda gösterilen agrega silindir tambur içine koyularak, tambur döndürülmeye başlanır. Deney sırasında taneler, çelik bilyelerin çarpmasıyla parçalanır ve ufalanır. Alet, devir sonunda otomatik olarak duracak şekilde ayarlanır. Bu devirler sonunda silindirden çıkarılan numune kare gözlü elekten elenerek, alta geçen miktarının yüzdesi belirlenir. Bu değer deney sonrasındaki kayıp yüzdesini ifade eder. Genellikle yassı ve uzun taneli agregaların kayıp yüzdesi, yuvarlak taneli agreganınkinden daha büyük olur. Ayrıca, camsı agregalar, şistler, marnlı kireçtaşları, iri kristalli taşlar aşınmaya mukavemet gösteremezler. Özgül ağırlığı fazla ve sert olan taşların ise aşınmaya mukavemetleri yüksektir. Aşınmaya karşı mukavemetleri yüksek olan agregaların basınç mukavemetleri de yüksek olur.

Dona Dayanıklılık: Soğuk iklimlerde üretilen betonun donma etkisiyle yüzeyinin soyulmaması ve bir bütün olarak betonun parçalanmaması istenir. Betonun dona dayanıklılığında agrega önemli bir rol oynar. Bu nedenle donma etkisinde kalacak betonlarda kullanılacak agreganın da dona dayanıklı olması istenir. Agreganın dona dayanıklılığı esas olarak don deneyleriyle belirlenir. Ayrıca, agrega üzerine uygulanan don deneyiyle agreganın sağlamlığı hakkında da dolaylı olarak bilgi edinilir [10].

1.2.1.8. Agregaların İçinde Zararlı Madde Bulunması

Agregaların içinde bulunabilen bazı maddeler birçok zararlı etki gösterebilirler. Çimento hamuru ile agregalar arasında güçlü bir aderans oluşmasını engelleyerek betonun mukavemetini önemli ölçüde düşürebilirler. Ayrıca, agrega içinde mukavemeti çok düşük, yumuşak, kırılgan ve kusurlu taneler bulunabilir. Şeker vb. maddeler betonun prizini geciktirici etki yapar. Nitrat gibi tuzlar, donatının korozyonuna yol açan olumsuz etkiler meydana getirebilir. Bu sebeple betonda kullanılacak agregalarda zararlı madde bulunmaması veya betona zarar vermeyecek mertebede olması gerekmektedir [9].

1.2.1.9. Agrega Türünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri Üzerine Yapılan İncelemeler

Özturan ve Çeçen'in [11] bazalt, beyaz kalker ve çakıl kullanarak yaptıkları çalışmada, düşük beton sınıfında kalker içeren betonun, yüksek beton sınıfında ise bazalt içeren betonun en yüksek dayanıma sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Çakıl kullanılarak elde edilen betonlar ise, tüm sınıflarda en düşük dayanımı vermiştir. Beton karışım oranlarını değiştirmeden, sadece daha yüksek dayanımlı çimento kullanarak çakılla da yüksek dayanım elde etmeye çalışmışlar ancak bağlayıcı kalitesini arttırmanın basınç dayanımını pek etkilemediğini görmüşlerdir.

Alexander ve Milne [12] yaptıkları incelemelerde, dört çeşit çimento karışımı kullanarak agrega çeşitlerinin beton mukavemetini nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir. Dolomit ve andezit agregaları ile portland çimentosu kullanılarak elde edilen karışımların mukavemetlerinin yüksek çıktığını, kuvarsit ve granit agregalarında ise erken yaşlarda beton elastisite modülünün düşük çıktığı sonucuna varmışlardır. Değişen su/çimento oranının agrega kökenine bağlı olarak yaklaşık olarak 20 MPa fark gösterdiğini belirtmişlerdir. Agrega ile çimento hamuru geçiş bölgesinin, agreganın doğal yapısına göre değişik özellikler gösterdiğini belirtmişlerdir.

Murdock [13] kalsiyum karbonattan oluşan kireçtaşlarının, yoğun ve sert türlerinin beton için en uygun agrega olduklarını ifade etmiştir. Yüksek oranda magnezyum içeren dolomitik kireçtaşlarının beton agregası olarak uygun olduğunu belirtmiştir.

Yeğinobalı [14], yüzeyi pürüzlü, gözenekli ve köşeli agregaların, yuvarlak taneli agregalara göre çimento hamuru ile daha güçlü bir bağ oluşturduklarını belirtmiştir. Ayrıca, agreganın mineralojik yapısının da bu bağda etkili olduğunu ifade etmiştir.

Tasong ve diğ. [15] yapmış oldukları çalışmayla, agrega yüzeylerinde çatlak ya da kırılma olup olmadığına bağlı olarak, farklı mineral kökenli agregalar arasında farklılıklar olduğunu belirlemişlerdir. Agregaların kayaç yapısı ve kimyasal reaksiyonlarının beton basınç dayanımını etkilediğini açıklamışlardır.

Taşdemir ve diğ. [16] yaptıkları çalışmada, beyaz kalker kullanılarak üretilen betonların, gri kalker kullanılanlara göre daha yüksek mukavemet verdiğini göstermişlerdir. Beyaz kalkerin agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde düzenli gerilme dağılımları oluşturması buna sebep olarak gösterilmiştir.

1.2.2. Çimento

Betonun en önemli hammaddelerinden biri çimentodur. Çimento, hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren bir maddedir. Çimento denilince ilk akla gelen çimento türü portland çimentosudur [3].

Portland çimentosu, kalker ve kil karışımı hammaddelerin pişirilmeleriyle ortaya çıkan ve klinker olarak adlandırılan malzemenin çok az miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucunda elde edilen bir üründür; su ile birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanmaktadır.

Çimento ve suyun birleştirildiği andan itibaren bu iki malzeme arasında hidratasyon olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonlar başlamakta ve devam etmektedir. Önceleri, yumuşak durumda olan çimento hamuru, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma gelmekte ve katılaşıp, sertleşmektedir. Çimento hamurunun katılaşma göstererek şekil verilmez bir duruma gelmesine priz alma denilmektedir. Çimento, su ve agregaların birlikte karılmalarıyla elde edilen beton, ilk zamanlarda plastik bir yapıdadır ve birkaç saat içerisinde sertleşmektedir. Sertleşmeye başlayan beton zaman ilerledikçe daha büyük dayanım kazanmaktadır. Betonun bu özellikleri, hidratasyon nedeniyle çimento hamurunun yapısında meydana gelen değişikliklerden ileri gelmektedir. Ayrıca, sertleşmiş betonda zamana bağlı olarak yer alabilecek büzülme ve sünme deformasyonları, aslında çimento hamurunda yer alan hacim değişiklikleridir. Dolayısıyla çimento özellikleri ve beton içerisindeki miktarı taze beton özelliklerini ve sertleşmiş betonun dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir [4].

Bina, köprü, yol, prefabrike elemanlar vb. betonlar için CEM I portland çimentoları uygundur. Yüksek mukavemeti gerektiren betonarme yapılarda 42,5 MPa ve 52,5 MPa mukavemeti olanlar tercih edilir. Soğuk havalarda beton dökümü, erken kalıp alma ve onarım işleri gibi erken yüksek dayanımın gerekli olduğu hallerde R işaretli olanlar, normal betonlarda ise N işaretli olanlar kullanılmaktadır [3].

1.2.3. Puzolanlar

Puzolan maddeler, ince öğütülmüş silisli ve alüminli maddelerdir. Çimentonun üretilmesi fazla miktarda enerji gerektirir. Günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirilerek hem daha ekonomik hem de çevreye karşı daha duyarlı bir beton üretimi giderek artan bir ilgi görmektedir [17]. Tek başlarına

bağlayıcılık özellikleri olmamakla beraber normal şartlarda kireç veya çimento ile karşılaştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda, suda çözünmeyen, kararlı, bağlayıcı madde özelliği kazanırlar [18]. Portland çimentosuna puzolan ilave edildiğinde çimentonun hidratasyonu sonunda açığa çıkan ve betonun durabiletesinde önemli rol oynayan $Ca(OH)_2$ (serbest kireç), puzolan içindeki SiO_2 ve Al_2O_3 arasında oluşan reaksiyon sonucunda tespit edilir [19,20]. Çimentoya ikameli olarak katılan puzolan, betonun plastikliğini arttırır; terlemeyi, segregasyonu, hidratasyon ısısını ve betonun geçirimliliğini azaltır [21]. Puzolanlar oluşumuna göre doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. Doğal puzolan olarak bilinen maddeler volkanik küller, killi şist, diatome toprağı, ponza taşı vb.'dir [22]. Yapay puzolanlar, kalsinasyon işlemi ile elde edilirler. Silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar ise yapay puzolanlardır.

1.2.3.1. Silis Dumanı

Bu çalışmada silis dumanı olarak yoğunlaştırılmış silis dumanı (mikrosilika) kullanılmıştır. Mikrosilika, silikon (veya metal-silikon alaşımı) endüstrisinin yan ürünüdür. Yüksek sıcaklıkta ark fırınlarından çıkan silisyummonoksit gazının (duman) silisyumoksite (SiO_2) oksitlenmesi ve yoğunlaşması ile oluşur [23,24]. Yapısı camsı küresel parçacıklar şeklindedir. Silis parçacıklarının boyutunun mikrondan daha küçük olması sebebiyle mikrosilika olarak adlandırılırlar.

Silis dumanı, çok yüksek özgül yüzeyi, yüksek silika miktarı ve çok ince boyutlu partikülleri nedeniyle yüksek puzolanik aktiviteye sahip çok etkin bir malzemedir. Betonda çimentonun hidratasyonu sırasında ortaya çıkan serbest kireci bağlayarak kalsiyum silikat hidrateyi (CSH) oluşturur. Serbest kirecin bağlanması sonucu çimento hamuru daha yüksek kimyasal dayanıma, daha yüksek dayanıma ve daha yoğun mikro boşluk yapısına sahip geçirimsiz bir beton oluşturur. Son derece düşük klor geçirimliliğine ve çok yüksek elektriksel dirence sahip olan silis dumanı katkılı betonlar, betonarme yapılarda donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin önlenmesinde önemli rol oynar [25].

Silis dumanı, Tip-I portland çimentosundan 100 kat daha ince oluşu ve boyutları 0,1-0,2 μ olan küresel parçacıklar nedeniyle çimento tanecikleri arasındaki çok küçük boşlukları bile doldurarak ince boşluklardaki suyun serbest suya dönüşmesini sağlar, buna karşın absorbe olan su miktarını arttırır [26]. Normal çimento ile

karşılaştırıldığında çökmede yaklaşık %70'lik bir azalma söz konusudur [27]. Eşit işlenebilirlik için daha fazla su gereksiniminden ötürü, süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanarak karışım suyu miktarının azaltılması yoluna gidilmektedir [28]. Çok yüksek özgül yüzeyi sayesinde serbest suyun bir kısmını absorbe etmesi, terlemeyi azaltır. Özellikle süperakışkanlaştırıcı ile kullanılması, viskoziteyi ve kohezyonu artırarak segregasyonu (ayrışmayı) önler. Daha önce yapılmış olan araştırmalarda silis dumanının priz süresini geciktirdiği [26], %10'a kadar kullanılması durumunda hidratasyon ısısını arttırdığı görülmüştür [29].

Silis dumanı şu özellikleriyle betonun performansını ve kalitesini iyileştirir [23,30];

- Yüksek mukavemet
- Azalan permeabilite
- Artan durabilite
- Artan aşınma direnci
- Daha iyi yoğunluk
- Sülfata karşı direnci iyileştirme
- Alkali-agrega reaksiyonuna karşı direnci iyileştirme
- Zararlı kimyasallara karşı direnci iyileştirme
- Donma-çözünme çevrimine karşı direnci iyileştirme

1.2.3.2. Uçucu Kül

Betonda kullanılan en yaygın puzolan uçucu küldür. Bu malzeme, termik enerji santrallerinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir. Taneler genellikle küresel olup çapları 1 ile 150 μm arasında değişir [31]. Uçucu küllerin içerisinde bulunan karbon ve CaO miktarı kömür tipine ve yanma işlemine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. CaO miktarı %10'un altında olan uçucu küller düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak adlandırılırlar. Uçucu kül çimentoya üretim aşamasında katılabileceği gibi doğrudan betona da katılabilmektedir.

Uçucu küller ASTM C 618'e göre F ve C olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [32].

- F tipi uçucu küller bitümlü kömürden elde edilip,
  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq$ %70 şartını sağlayan uçucu küllerdir.
- C tipi uçucu küller ise genelde linyit ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip,
  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 \geq$ %50 şartını sağlayan uçucu küllerdir.

Siliko alüminalı uçucu küller (F tipi) genellikle taş kömürü uçucu külleridir; esas yapısı siliko alüminatlardan (SiO_2, Al_2O_3) meydana gelmektedir. Normal sıcaklıkta kireci bağlama özelliğine sahiptirler, kireçli ve sulu ortamda priz yaparlar. Bu tip uçucu küllerin fazla miktarda silis ve alümin içermelerinden dolayı hidrolik aktiviteleri yüksektir. Siliko kalsik uçucu küller ise genellikle linyit uçucu külleridir ve yapılarındaki ana oksitler SiO_2 ve CaO'dur. CaO miktarı oldukça yüksektir. Bazı durumlarda ilave kirece gerek kalmaksızın kendi nitelikleri itibariyle zayıf bağlayıcı özellikleri vardır. Bazıları F sınıfı, bazıları ise C sınıfı içinde yer alırlar [33].

Uçucu kül inceliği puzolanik aktiviteyi önemli ölçüde etkiler [17]. İnceliğini arttırmak için uçucu kül elenebilir, hava kullanılarak iri ve ince taneler ayrılabilir veya öğütme yapılabilir. Puzolanik reaksiyon uçucu kül tanesinin yüzeyinde başlar. İncelik arttırılırsa puzolanik aktivite de artar, ayrıca; betonda en zayıf halka olan agrega-çimento hamuru ara yüzeyinin özelliklerinin iyileştirilmesi için de uçucu kül inceliği önemlidir [34,35]. Ayrıca uçucu külün yavaş kimyasal reaksiyona girmesi hidratasyon ısısını düşürmekte, pik değerini zaman içinde ötelemekte ve kütle betonlarında sıcaklık artışının zararlı etkisini sınırlamaktadır. Erken yaş dayanımı sağlamak amacıyla ise uçucu kül oranı arttırılıp buna ilaveten silis dumanı kullanılabilir ve su/çimento oranı azaltılabilir.

Betonda kullanılan uçucu külün faydaları şöyle sıralanabilir [36,37];

- Taze betonda işlenebilmeyi artırmak
- Taze betonun terlemesini azaltmak
- Geçirimliliği azaltmak
- Hidratasyon ısısını azaltmak, iyileştirmek
- Hacim değişikliğini azaltmak
- Alkali-agrega reaksiyonuna dayanıklılığı iyileştirmek
- İleri yaş dayanımını artırmak

Kendiliğinden sıkışan betonlarda (KSB) öğütülmüş uçucu kül kullanarak optimum karışım parametrelerini bulmak amacıyla yapılan bir çalışmada uçucu külün taze betonun viskozitesini düzelttiğini ve kendiliğinden yerleşen betonun yüksek mekanik özellikler taşıdığı, mükemmel su geçirimsizliğine, donma direncine ve düşük kuru rötreye sahip olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül kullanımı reolojik özellikleri düzeltir ve çimentonun hidratasyon ısısından dolayı betonda oluşacak çatlamayı da azaltır [38]. Buna ilaveten önceki araştırmalar, KSB'de uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımının, sadece portland çimentosu kullanılarak üretilen beton ile karşılaştırıldığında, benzer akıcılığı elde etmek için ihtiyaç duyulan süper akışkanlaştırıcı dozajını azalttığını göstermektedir [39].

1.2.4. Karışım Suyu

Kuru haldeki çimento ve agregayı işlenebilir bir kitle haline getirmek ve çimento ile kimyasal reaksiyon yaparak karışımın sertleşmesini sağlamak üzere katılan sudur. Karışım suyu betona zarar verecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atık içermeyen her türlü sudan elde edilebilir. Betonun mukavemeti su/çimento oranına bağlı olduğundan, ihtiyaçtan fazla su kullanmak betona zararlıdır.

1.2.5. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesi

Beton üretiminde kullanılması gereken çimento miktarında bir azaltışa gidilmeden veya mukavemetten ödün verilmeden imal edilen betonun, akıcı ve kolay yerleşebilir olmasını sağlamak ve su/çimento oranını düşürerek yüksek dayanımlı beton elde etmek istendiğinde, işlenebilirliği sağlamak için, su/çimento oranı sabit kalma kaydıyla hem su hem de çimento miktarını azaltma yoluna giderek tasarruf yapılması durumunda işlenebilirliği ilk seviyesinde tutabilmek amacıyla kullanılır. Mukavemet, su/çimento oranının fonksiyonu olduğuna göre katkı kullanıldığında karışım suyunun azalması su/çimento oranını düşüreceğinden daha yüksek, erken ve nihai mukavemetler elde edilecek ve daha az boşluklu, daha iyi yüzey görünümlü ve daha az geçirimli beton elde edilir.

Çimento partikülleri birbiriyle birleşmek suretiyle küçük topaklar oluşturmaya meyillidirler. Akışkanlaştırıcılar su ile birleşerek beton içerisindeki suyun yüzey gerilimlerini ve çekim gücünü azaltırlar. Akışkanlaştırıcılar negatif elektriksel yüke sahip olup su yüzeyinde hareket etme eğilimindedirler. Bu etkileri dolayısı ile topaklaşmayı önlemeleri ve aynı zamanda tanelerin birbiri üzerinden kaymalarını

kolaylaştırmaları ve yağlayıcı etki göstermeleri betonun iç sürtünmesini azaltmakta ve işlenebilirliğini artırmaktadır [40]. Akışkanlaştırıcılar, genellikle taşıma betonlarında, kütle betonlarında, pompa betonlarında, hazır betonda, düzgün yüzey istenen her yerde, çelik donatının yoğun olduğu yerlerde, vb. kullanılır.

Yeni kuşak süperakışkanlaştırıcılarda dağıtma (dispersiyon) etkisinin yanında sterik etki de akışkanlığı arttırmaktadır. Uzun dallar içeren polimer zincirleri sayesinde çimento tanecikleri çevresinde birbirini iten bir fiziksel etki oluşur. Sterik etki adı verilen bu etki sayesinde çimento etkileri dağılarak kararlı hale gelmektedir. İşlenebilirliği düşürmeden su/çimento oranını ve aynı zamanda kullanılan çimento miktarını azaltan, ayrışma olmaksızın akıcılığı arttırarak ulaşılması en zor yerlere dahi beton dökümüne izin veren akışkanlaştırıcılar, son dönemde yeni kuşak süperakışkanlaştırıcıların da ortaya çıkması ile yüksek performanslı betonların üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu betonların akışkanlıkları kendiliğinden yerleşme sağlayacak derecede yüksek olabilmekte ve kendiliğinden yerleşen betonların gelişmesine olanak sağlamaktadır [41].

Bu çalışmada kullanılan katkı, modifiye edilmiş polikarboksilik eter esaslı, erken ve nihai yüksek mukavemet ve dayanıklılığa gereksinim duyulan, iyi yüzey görünümü elde etmek için, hazır beton ve prekast endüstrisi için geliştirilmiş, yüksek oranda su azaltan, yeni nesil süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddesidir. Son derece düşük su/çimento oranı ile çalışma yeteneği, erken yüksek (18-24 saat) ve nihai mukavemete sahip beton imalatına olanak verir, klor içermez. Geleneksel süper akışkanlık verici katkı maddelerine göre değişik bir kimyasal yapıya sahiptir. Uzun kenar zincirli karboksilik eter polimerinden oluşur. Karıştırma işleminin başlangıcında, geleneksel süperakışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, elektrostatik itme mekanizmasını harekete geçirir. Bu işlemle, su ihtiyacı büyük ölçüde azalan akışkan bir beton elde edilir. Ancak polimer omurgasına bağlı yan zincirler, çimento taneciklerinin dağılma ve yayılma yeteneğini büyük ölçüde stabilize ederek, strik bir engel oluşturur. Bu sayede daha az su ile yüksek akışkanlık sağlanır [42].

1.3. Betonların Sınıflandırılması

TS-EN 206-1 beton standardında betonun, basınç dayanımına göre sınıflandırılmasında, normal ve ağır betonlar için Tablo 1.1'de verilen sınıflar uygulanır. Sınıflandırmada, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir

şeklindeki numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı ($f_{ck,sil}$) veya kenar uzunluğu 150 mm olan küp şeklindeki numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı ($f_{ck,küp}$) kullanılabilir. Basınç dayanım sınıfı C50/60'dan daha yüksek olan normal veya ağır betonlar yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılırlar [43].

Tablo 1.1: Normal ve Ağır Betonlar İçin Basınç Dayanımı Sınıfları

Beton Basınç Sınıfı	28 Günlük Standart Basınç Dayanımı ($f_{ck,sil}$), N/mm^2	28 Günlük Standart Basınç Dayanımı ($f_{ck,küp}$), N/mm^2
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Betonda kullanılmış olan agrega maksimum tane büyüklüğü esas alınarak betonlar dört sınıfa ayrılmışlardır. Maksimum tane büyüklüğüne göre beton sınıfları Tablo 1.2'de belirtilmiştir [43].

Tablo 1.2: Maksimum Tane Büyüklüğüne Göre Beton Sınıfları

Beton Sınıfı	Beton Agregası	$D_{maks.}$
No 1	D 1	12 mm
No 2	D 2	22 mm
No 3	D 3	32 mm
No 4	D 4	64 mm

Betonlar birim hacim kütleleri (yoğunlukları) esas alınarak, hafif beton, normal ağırlıklı beton ve ağır beton olmak üzere Tablo 1.3'teki gibi üç sınıfa ayrılmışlardır.

Tablo 1.3: Birim Hacim Kütlesine Göre Beton Sınıfları

Beton Sınıfı	Birim Hacim Kütlesi, (kg/m^3)
Hafif Beton	Birim Hacim Kütlesi ≤ 2000
Normal Ağırlıklı Beton	2000 ≤ Birim Hacim Kütlesi ≤ 2600
Ağır Beton	2600 ≤ Birim Hacim Kütlesi

Taze betonun yayılma çapına göre olan sınıflandırma Tablo 1.4'te belirtilmiştir [43]. Yayılma çapının artması aynı zamanda işlenebilirliğin de artması olarak yorumlanabilir.

Tablo 1.4: Taze Beton Yayılma Sınıfları

Sınıf	Yayıma Çapı, mm
F1	≤ 340
F2	350 - 410
F3	420 - 480
F4	490 - 550
F5	560 - 620
F6	≥ 630

1.4. Yüksek Mukavemetli Betonlar

Yüksek mukavemetli betonlar, normal dayanımlı betonlara göre daha üstün içyapı ve mekanik özelliklere sahip, bazı farklı özellikte malzemelerin ve tekniklerin kullanıldığı yapı malzemeleridir. Günümüz şartlarında 70-120 MPa aralığında basınç dayanımına sahip betonlar yüksek mukavemetli olarak nitelendirilebilirler. Bunun

yanı sıra eğer bölgede kullanılan betonun basınç dayanımı 50 MPa ise bu durumda f_c' değeri 60 MPa olan bir beton o bölgede yüksek mukavemetli beton olarak kabul edilir. Kural olarak betonarme yönetmeliklerinde var olan en yüksek beton dayanım sınıfının üstünde olan betonlar bu sınıfa girerler. Yüksek mukavemetli beton kullanımındaki ana amaçlar, bina yüksekliğini mimari kısıtlama olmaksızın arttırabilmek, daha ekonomik binalar elde etmek, eleman boyutlarını azaltarak ek alan ve rahat hareket imkanı kazanmak ve daha estetik tasarımlı, güzel binalar üretebilmek olarak özetlenebilir [44]. Maliyeti daha fazla olan dayanım sınıfı yüksek olan betonlar tercih edildiğinde aslında ekonomik olan bir yol izlenmiş olur. Yüksek mukavemetli betonlar kullanıldığında, binada kullanılan beton miktarı ve yapı elemanlarının boyutları azalacağından, maliyet düşecektir.

Daha üstün performans elde etmek için yüksek mukavemetli beton dizaynında, yüksek nitelikli agrega, silis dumanı, uçucu kül, yüksek dayanımlı çimento ve yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri kullanılmaktadır [45]. Yüksek mukavemetli betonlarda, basınç dayanımı birçok faktörün etkisi altında olduğu için geniş bir aralıkta dağılım gösterebilir. Üretim yöntemlerinde, agrega ve çimento miktarlarında değişiklik yapılmamasına karşın basınç dayanımında büyük varyasyonlar görülebilir [46]. Bunun sebeplerinden en önemlileri, yüksek mukavemetli betonlarda kimyasal ve puzolanik katkı kullanılması, düşük su/bağlayıcı oranının seçilmesi ve yüksek oranda bağlayıcı bulunmasıdır.

1.4.1. Yüksek Mukavemetli Beton Malzemeleri

Yüksek mukavemetli betonların üretiminde şu üç yaklaşım vardır [47];

- Betonun tüm malzemelerini büyük titizlikle seçmek ve sıkı bir kalite kontrol programı uygulamak,
- Uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıları kullanarak işlenebilirliği arttırmak, boşluk sistemini iyileştirmek ve hidratasyon ısısını azaltmak,
- Karışım dizaynında su/çimento oranını pratikte olabilecek sıkılamayı zorlamayacak şekilde en düşük seviyeye indirmek ve bu amaç için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanmak.

1.4.1.1. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Agrega

Yüksek mukavemetli beton üretiminde iyi nitelikli, temiz, sert ve sağlam agregaların seçilmesi büyük önem taşır. Agrega kalitesi yüksek dayanımlı betonu etkileyebilmektedir. Yaklaşık olarak 40 MPa'lık bir basınç dayanımına kadar agreganın yüksek dayanımlı olması birinci derece öneme sahip değildir. Betonda kırılma esnasında çatlak oluşumu önce agrega-matris temas yüzeyinde başlar, sonra matris çatlar ve yayılma matriste oluşur. Yüksek mukavemetli betonda ise kırılma süreci çatlakların agrega içinden geçmesiyle olur. Yani normal betondaki gibi çatlak, agrega-matris temas yüzeyinde başlayıp agrega etrafında tur atarak yayılmaz, doğrudan agreganın içinden geçer [48].

Agregalar için genel olarak şu kuralların geçerliliği unutulmamalıdır;

- Yüksek mukavemetli beton için agrega kalitesi çimento kalitesi kadar önemlidir. Agregaların TS 706, ASTM-C33 gibi standartların koyduğu kriterlerden geçmesiyle yetinmek yüksek mukavemetli beton için yeterli olmayabilir.
- Silt ve kil ile kirlenmeye müsaade edilmemeli ve bunlar titizlikle kontrol edilmelidir. Çünkü bu kirlilik, çimento hamuru-agrega bağ mukavemetini düşürür ve karışım suyu ihtiyacını arttırır [47].
- Eğer akışkanlaştırıcı bir kimyasal katkı kullanılmayacak ise en büyük tane boyutu 16 mm hatta 10 mm tercih edilmelidir ki çimento hamuru-agrega bağ alanı artsın ve birim alana gelen gerilme azalsın [49]. Süperakışkanlaştıcı bir kimyasal katkı kullanıldığında bağ mekanizması çokça güçlendirildiğinden, küçük tane boyutlarına gereksinme azalır [50].
- Yine iyi bir bağ mukavemeti elde edebilmek için köşeli (kırma) agregalar kullanılmalıdır. Ancak aşırı köşelilik ve yassı veya uzun taneler karışım suyu gereksinimini arttıracağından bunlardan kaçınılmalı ve miktarları sınırlandırılmalıdır.
- Özellikle düşük su/çimento oranlı karışımlarda kaba agrega seçerken bir miktar su emmesi olan bir tür tercih edilirse, hidratasyon ürünlerinin agreganın hemen yakınında oluşabilmesi için gereken suyu agreganın kendisi depolamış olur ve özellikle ileriki zamanlarda hamur-agrega bağı güçlenerek mukavemet kazanılır.

- İnce agrega olarak düşük su/çimento oranları için kaba kum uygundur. Ancak yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı kullanılabilecekse, ince bir kum kullanımıyla karışım ayrışması önlenebilir [47].

1.4.1.2. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Çimento

Çimentoyu seçerken, tam bir kalite programı uygulayan bir üretici aranmalı, çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından geçmişinin düzgünlüğüne bakılmalı ve kullanım aşamasında da kontrolleri uygun biçimde yürütülmelidir. Eğer dizayn erken zamanlı yüksek dayanımları gerektirmiyorsa, ilk reaksiyonları düşük seviyede olan bir çimentoyu seçmek uygundur. Yüksek dayanım elde etme sürecinde, karışım suyu ihtiyacı ve işlenebilirlik açısından çimento tipi önemlidir. Karışım için öncelikle C_3A içeriği ve tane dağılımı başlıca kontrol etkenleridir. Mineral bileşimi, çimento inceliği ve azaltılmış hidratasyon ısısı erken ve nihai dayanımı etkileyen faktörlerdir. Portland çimentosunun hidratasyonu sırasında çok miktarda kalsiyum hidroksid oluşur. Bu kalsiyum hidroksidin betonun dayanım gelişimine hiç bir katkısı yoktur. Aksine, geniş kalsiyum hidroksid kristalleri, agrega çimento hamuru etkileşiminde ve çimento hamurunun kümeleşme evresinde zayıflıkların oluşmasına neden olur. Kalsiyum hidroksid, uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıların katılımıyla puzolonik reaksiyon sırasında dayanıma katkıda bulunan bir maddeye dönüşür ki buna kalsiyum silikat reaksiyonu denir [51,52].

Su/çimento oranını düşürmenin klasik yolu çimento dozajını arttırmak olarak bilinir. Öte yandan belirli bir agrega türü ve karışımı için işlenebilirlik için gereken su miktarı sabittir. Ancak, çimento miktarını 450 kg/m^3'ün üstüne çıkardığımızda mukavemet kazanma yeteneği azalır; hele 600 kg/m^3 seviyesine doğru çıkıyorsa artık sıfıra ulaşılmış olur. Buna sebep olarak fazla çimentodan dolayı artan kireç miktarının agrega-çimento hamuru arakesitinde oluşturduğu zayıf bölgenin büyümesi (kalınlaşması), yüksek hidratasyon ısısından kaynaklanan gerilmeler ve bir takım sebeplerden dolayı oluşan büzülmeler gösterilebilir [53]. Bundan dolayı su/çimento oranının azaltılması, kullanılan su miktarının azaltılmasıyla sağlanır. Ayrıca çimentonun bir kısmını mineral katkılarla ikame etme ve bunun yanında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı yoluyla su/çimento oranı düşürülebilir.

1.4.1.3. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Silis Dumanı

Silisyum metali ve ferrosilisyum alaşım endüstrisinin yan ürürünü olan silis dumanı (mikrosilis), ultra inceliğe sahip bir puzolonik beton katkısıdır. Silis dumanında, SiO_2 oranı çok yüksek değerlerde bulunabilir (%90'ın üzerine çıkabilir) ve inceliği çimento inceliğinin 50-60 katına ulaşabilir. Çok küçük taneli amorf silis tozları (silica fume) kullanarak beton uygulamalarında yüksek mukavemet değerlerine ulaşılabilmektedir. Silis dumanı, yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi artırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı arttırır, sonuçta da betonun dayanımı ve durabilitesi artar [54]. Betonun mikro yapısında yaptığı iyileştirmelerden dolayı yüksek dayanımlı betonların üretiminde kullanılması olağan hale gelmiştir.

Çok yüksek yüzey alanları nedeniyle bu malzemeleri kullanırken artan karışım suyunun kesilebilmesi için hiper akışkanlaştırıcı kullanmak gerekmektedir. Aksi halde malzemenin yüksek miktarda su içeriği su/çimento oranını yükselterek mukavemeti düşürür [55]. Puzolanik etkisi ile çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getiren silis dumanı, betonların en zayıf fazı olan çimento hamuru-agrega arasındaki boşlukları doldurmakta ve hamur ile agrega taneleri arasındaki aderansı sağlamaktadır [56]. Diğer taraftan, bu malzemeden elde edilecek mukavemet kazancının düşük maliyetli olabilmesi için karışımdaki çimento dozajı 350 kg/m^3'ten düşük olmamalıdır [50]. Çünkü silis dumanının betonda kullanılmasındaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür.

1.4.1.4. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Uçucu Kül

Yüksek mukavemetli betonların üretiminde, portland çimentosuna ikame olarak uçucu kül kullanılmaktadır. Çimentonun bir kısmı yerine uçucu kül kullanılması hidratasyon ısısı artışını kontrol eder ve özellikle büyük hacimli yapı kesimlerinde zararlı olabilecek bir iç sıcaklık düzeyine erişmeden, çimentoyla yer değiştirerek betona bol miktarda bağlayıcı ürün sağlar [17].

1.4.1.5. Yüksek Mukavemetli Beton İçin Hiper Akışkanlaştırıcı

Beton teknolojisinde meydana gelen en önemli gelişmelerden biri hiper akışkanlaştırıcıların kullanımı ve bunların getirdiği yüksek mukavemet olmuştur. Bu

katkıların beton basınç dayanımı üzerindeki birincil etkisi su/çimento oranını azaltmasıdır. Aynı çökme ve çimento dozajı için su miktarı azaltıldığında, su/çimento oranındaki bu azalmalar betonun her yaştaki dayanımını arttıracaktır. Bu artış, basınç dayanımının yanı sıra durabilite ve diğer beton özelliklerine de olumlu olarak yansıyacaktır [51]. Çimento ile uyum açısından uygun katkı maddesinin türünün seçimi kadar miktarının belirlenmesi de önemlidir [57].

1.5. Kendiliğinden Sıkışan Betonlar

Kimya ve polimer teknolojisindeki ilerlemeler, 80'li yılların ortalarından itibaren çok etkili akışkanlaştırıcıların keşfine sebep olmuştur. Yüksek oranda su emme özelliğine sahip bu akışkanlaştırıcılar, aynı zamanda taze betonun işlenebilirliğini de arttırmaktadır. Yeni nesil akışkanlaştırıcıların sağladığı bu etki bilim adamlarını taze betonun yerleştirilmesi sırasında sıkıştırma işlemini ortadan kaldırmak için araştırma yapmaya yöneltmiştir. Böylece kendiliğinden sıkışan (yerleşen) beton kavramı ortaya çıkmıştır [58].

Kendiliğinden yerleşen beton yerleştirme ve sıkıştırma gerektirmeyen yeni nesil betondur. Az miktarda vibrasyon gerektiren betonlar Avrupa'da 1970'lerin başında kullanılmaya başlandı. Deprem bölgelerindeki çok sık donatılı yapılar için kullanmak amacıyla 1980'li yılların sonunda Japonya'da [59] geliştirilen kendiliğinden sıkışan beton (KSB), mükemmel şekil değiştirebilen ve segregasyona karşı yüksek dirence sahip olan bir beton olarak tanımlanır [60]. Avrupa'da ise ilk olarak 1990'lı yıllarda İsveç'te ulaştırma bağlantılarında kullanılmıştır. KSB herhangi bir sıkıştırma işlemi olmaksızın sık donatılı alanlara da kolaylıkla yerleşebilir [61].

Kendiliğinden sıkışan taze beton; gereken homojenliğini korurken, sadece kendi ağırlığı vasıtasıyla kalıbı tamamen doldurmak ve donatı çubuklarını sarmak kabiliyetine sahip bir beton olarak da tanımlanır [62]. Bu özellik taze betona, uygun reolojik özelliklerin (yeterli plastik viskoziteyle birlikte düşük akma gerilmesi değeri) sağlanmasıyla başarılır. Süperakışkanlaştırıcı ve ince taneli dolgu malzemesi kullanımı ve böylece akma davranışının optimize edilmesi, KSB'nin karışım oranının ayarlanmasında esas teşkil etmektedir [63]. KSB'nin kullanımı, daha hızlı inşaat zamanı, yerinde beton yapımı maliyetlerinin düşürülmesi, işlenebilirliğin artırılması ve sık donatılı kesitlerde donatı çevresindeki akışın kolaylığı gibi avantajlar sağlar. KSB kullanıldığında zaman kazancının, geleneksel yerleştirme ve

sıkıştırma metotlarından %40 daha hızlı olacağı tahmin edilir [64]. Ayrıca, KSB karışımlarının bileşimi, yüksek oranlarda ince taneli inorganik malzemelerden oluşur; günümüzde bu tozlar, genellikle hiçbir pratik uygulamada talep görmeyen ve elden çıkarılmaları pahalı olan atık ürünlerdir [65]. Bu sebeple, betonda mineral katkıların (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) kullanımı, maliyeti arttırmadan beton akıcılığını arttırmak için faydalı olacaktır.

Günümüzde işlenebilirlik açısından birçok betonarme inşaatta sıradan betonlara göre daha akıcı betonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sıradan betonlarda, yerleştirme ve sıkıştırma için vibrasyona ihtiyaç vardır. Vibrasyon uygulaması nitelikli işçilik ve sıkı kalite kontrol denetimi gerektirmektedir. Öte yandan işçi ne kadar eğitilmiş olursa olsun, taze betonda homojen sıkıştırma enerjisi verilmesi, özellikle işlenebilirliğin düşük olması halinde pratikte mümkün değildir. Vibrasyon uygulaması gürültü kirliliğine sebep olurken, fazla vibrasyon ayrışmaya, terlemeye ve hava boşluklarına sebep olmaktadır.

Kendiliğinden sıkışan betonlar, vibrasyona gerek duymadan istenilen yere yerleşebilen, yüksek işlenebilirliğe sahip, terleme ve ayrışma probleminin yaşanmadığı, homojenliği yüksek betonlardır. Akıcı kıvamda olan, gürültü kirliliğini engelleyen, daha az işçilik gerektiren, ekonomik ve ayrışma olmaksızın sık donatılar arasından akabilen, her türlü kalıba yerleşebilen bu betonlar aynı zamanda kendi ağırlığının etkisi ile boşlukları minimuma indirerek yerleşme sağladığı için durabilitesi yüksek olan ve kararlı bir tekniğe sahip betonlardır. Kendiliğinden sıkışan betonların en önemli özelliği, betonda ayrışma ve terleme görülmeden betonun döküldüğü kalıbı boşluk bırakmadan kendi ağırlığı ile doldurabilmesidir [66,67].

Kendiliğinden sıkışan betonun bileşimi, etkin bir süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı, maksimum agrega tane boyutu, kum/toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betonlardan farklılık göstermektedir.

Karışım tasarımında hedeflenen asıl amaç ayrışma, terleme ve topaklanma gibi eğilimler oluşmadan mümkün olan en yüksek akıcılığa sahip betonu elde etmektir. Genel olarak su/bağlayıcı oranının kontrol edilmesi, akışkanlığı etkin bir şekilde

arttırma özelliğine sahip katkıların kullanılması ve kullanılan iri agreganın sınırlı tutulması ile ayrışma direnci ve akışkanlık gibi özellikler elde edilir [67].

1.5.1. Kendiliğinden Sıkışan Betonların Avantajları

Kendiliğinden sıkışan (yerleşen) betonların özellikleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir [68];

- Kalıba daha kolay ve daha kısa zamanda yerleşir.
- Özellikle, dönüşlere sahip kompleks yapıların kalıplarında çok düzgün, üniform beton yerleşimi sağlar.
- Dar kesitli, sık donatılı karmaşık yapılarda büyük kolaylıklar sağlar.
- Segregasyonu önler.
- Düzgün yüzeyli (homojen) beton elde edilir.
- Betonun durabilitesini artırır.
- Hava kabarcıksız beton elde edilir.
- Betona şantiyede su katılma riskini ortadan kaldırır.
- Zamandan ve paradan büyük tasarruf sağlar.
- Vibrasyon yapılmadığı için gürültüsüz çalışma ortamı sağlar.
- İşçilik ve ekipman avantajı sağlar.

1.5.2. Kendiliğinden Sıkışan Betonlar Üzerine Yapılan Araştırmalar

Şimşek, Bektaş ve Erdal'ın vibrasyon süresinin betonun basınç dayanımına ve birim ağırlığına etkisi üzerine yapmış oldukları çalışmalarında, hazırlamış oldukları küp numunelerine masa vibratörü kullanarak değişik sürelerde vibrasyon uygulamışlar, bu numunelerde tek eksenli basınç deneyi yapmışlar ve numunelerin basınç dayanım değerlerini ve birim ağırlıklarını belirlemişlerdir. Vibrasyonun betonarme için önemli olduğunu ortaya koymuşlardır. Kendiliğinden sıkışan betonda ise herhangi bir vibrasyona gerek olmadığı için hem zaman, hem gürültü hem de ekonomiklik açısından büyük avantaj sağlandığı söylenebilir [69].

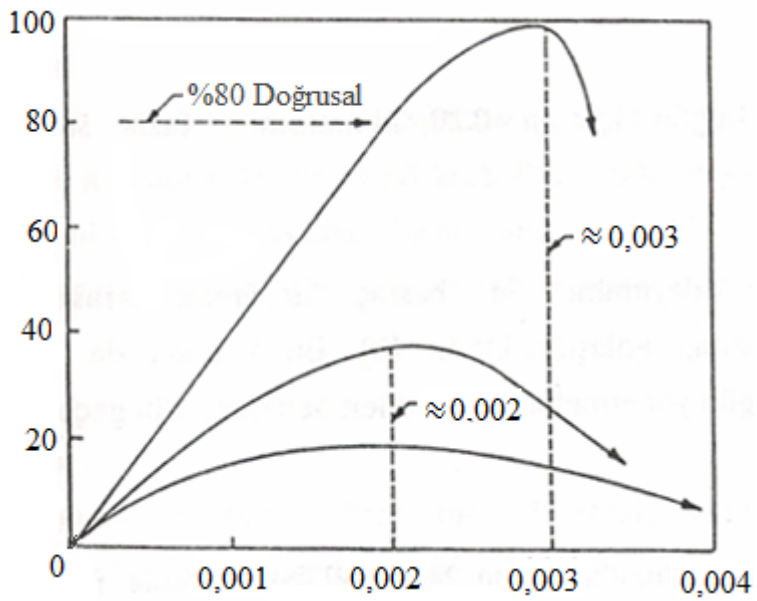
Sonebi Mohammed tarafından yapılan çalışmada, orta dayanımlı uçucu kül içeren KSB modellemesinde kullanılmak üzere deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yeni hazırlanmış taze kendiliğinden sıkışan betonun etrafında engeller bulunan bir ortamda kendi ağırlığı ile kalıpları tamamen doldurması ve akıcılığıyla yerleşmesi incelenmiş ve herhangi bir segregasyon ve blokajlaşma gözlenmemiştir. Daha kaliteli

beton ve çalışma durumlarını iyileştirme için sınıflandırmalar yapılmıştır. Kendiliğinden sıkışan beton karışımları genellikle daha yüksek içeriklerde ince dolgu malzemeleri ve çimento içeriği ile aşırı derecede sıkıştırılmış güçlü betonlardır. Bu özel betonun, uygulama alanlarında dar yerlerden geçebileceği sonucuna varmıştır [70].

Felekoğlu ve Baradan'nın kendiliğinden sıkışan betonların mekanik özellikleri ile ilgili araştırmalarında, sabit çimento dozajında akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttırılıp karışım suyu azaltıldıkça, yayılma değerleri belirli sınırlar içinde tutulurken viskozite hızla artmaktadır. Sabit bir çimento dozajı ve agrega gradasyonunda, su/toz oranının artışıyla aynı anda katkı dozajının azaltılması, taze betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini arttırmaktadır [58].

1.6. Yüksek Mukavemetli Betonlarda Gerilme-Birim Deformasyon İlişkileri

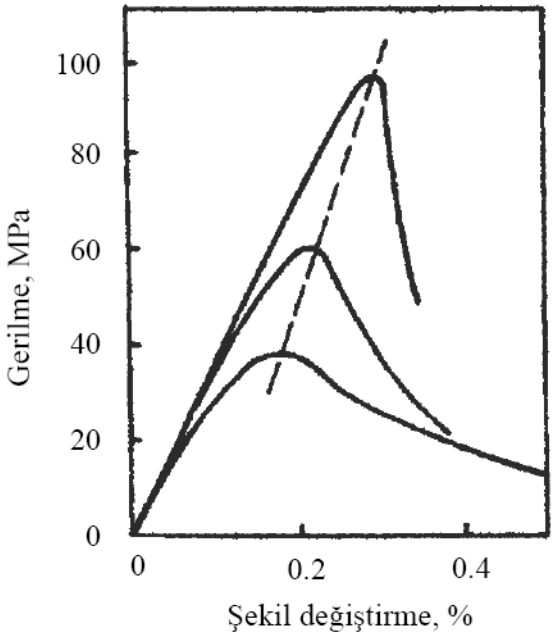
Yüksek mukavemetli beton ile ilgili çalışmalar, beton dayanımı yükseldikçe betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisini belirleyen σ-ε eğrisinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Normal dayanımlı beton ile yüksek dayanımlı betonun gerilme-birim deformasyon eğrileri arasındaki fark Şekil 1.2'den görülebilir.



Şekil 1.2: Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Gerilme-Birim Deformasyon Eğrileri [71]

Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, yüksek dayanımlı betonun normal dayanımlı betondan üç önemli farkı vardır.

- Normal dayanımlı betonda maksimum gerilmeye (dayanım) yaklaşık 0,002 gibi bir birim deformasyonda ulaşılırken, bu değer yüksek dayanımlı betonda 0,003'e yaklaşmaktadır.
- Yüksek dayanımlı betonda gerilme-birim deformasyon eğrisi yaklaşık olarak dayanımın %80'ine kadar doğrusal kalmaktadır. Aynı zamanda, bu noktaya kadar gözlenen davranış oldukça elastiktir. Yüksek dayanımlı betonun bu noktaya kadar doğrusal elastik kalmasının nedeni, mikroçatlamaların normal dayanımlı betona göre daha az olmasıdır.
- Yüksek dayanımlı betonda tepe noktasından sonra ulaşılan en büyük birim kısalma, normal dayanımlı betona oranla çok daha küçüktür [71].



Şekil 1.3: Tek Eksenli Basınç Altında Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Gerilme-Şekil Değiştirme [72]

Şekil 1.3'te görüldüğü gibi tepe noktasına kadar yüksek dayanıma sahip betonun eğriliği hemen hemen lineerdir. Yüksek dayanımlı betonlarda eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve kırılma daha gevrek olmaktadır. Şekil 1.3 elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için, en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji, daha düşük dayanımlı betonlarınkinden düşüktür [54]. Bu durum aşağıda açıklanmaktadır [73].

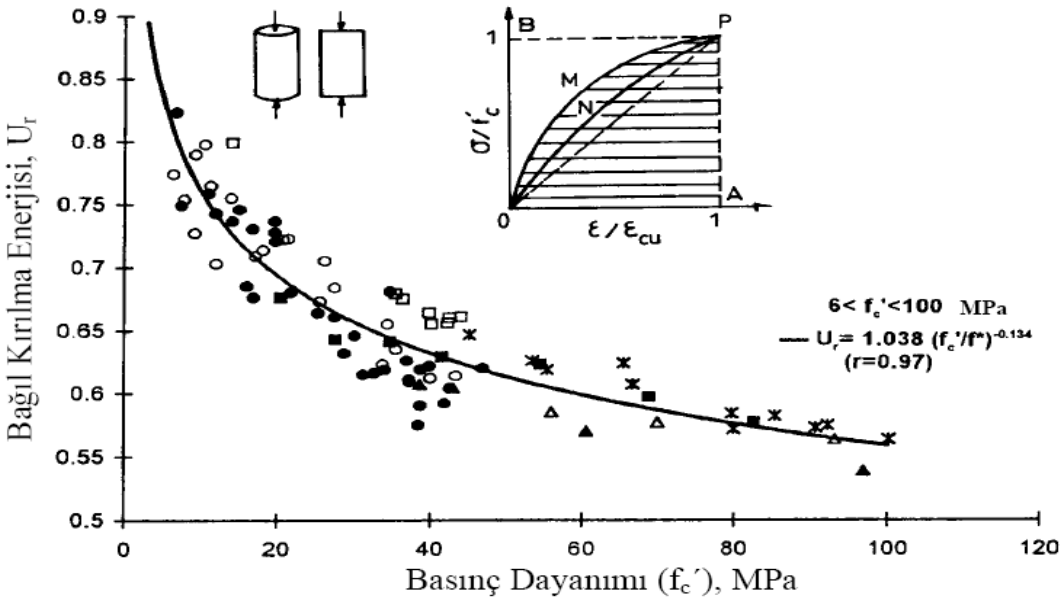
Basınç altında enerji yutma kapasitesi, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanın tepe noktasına kadar olan kısmının hesaplanmasıyla belirlenir. Bu eğrinin yükselen kısmında hem gerilme hem de şekil değiştirme normalize edilir. Bunun için Şekil 1.4'teki küçük şekilde görüldüğü gibi ordinattaki gerilme değerleri basınç dayanımı f_c' ile, apsisteki şekil değiştirme değerleri ise tepe noktasına karşılık gelen şekil değiştirme ε_u ile bölünür. Böylece normalize edilmiş eğriye dayanarak, yutulan bağıl enerji U_r, (1.3) bağıntısı ile hesaplanabilir;

$$U_r = \frac{\int_0^{\varepsilon_u} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{f_c' . \varepsilon_u} \qquad \textbf{(1.3)}$$

Bu şeklin incelenmesiyle görüldüğü gibi, OP doğrusu OAPB karesinin köşegenidir. Eğer eğri, OP'yi izlerse malzeme lineer elastik ve gevrek, OBP yolunu izlerse mükemmel plastik olacaktır. Böylece, yutulan bağıl enerji, U_r, 0,5 ve 1 arasında olur. Eğer eğri OMP yerine ONP'yi izlerse, bu betonun daha gevrek davranışa sahip olduğunu gösterir. Şekil 1.4'te, basınç dayanımı arttıkça tepe noktasına kadar yutulan bağıl enerji belirgin biçimde azalmaktadır. Böylece, tepe noktasına kadar yutulan bağıl enerji U_r, (1.4) denklemi ile ifade edilebilir:

$$U_r = 1{,}038.(f_c'/f_c^*)^{-0{,}134} \qquad \textbf{(1.4)}$$

Burada, f^*=1 MPa'dır. Denklem (1.4) ile gösterilen bağıntıda, korelasyon katsayısı çok yüksektir (0.97) ve denklem basınç dayanımlarının 6 MPa'dan 100 MPa'a kadar olan bir aralığı için geçerlidir. Yutulan bağıl enerjinin değerlendirilmesi için literatürden alınan ve tek eksenli basınç yüklemesi altındaki sonuçları içeren 85 farklı beton deney verisi kullanılmıştır. Bütün deney sonuçları silindirler veya prizmalar üzerinde kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney koşullarına dayanmaktadır [73].



Şekil 1.4: Bağıl Kırılma Enerjisi-Basınç Dayanımı İlişkisi [73]

1.6.1. Yüksek Mukavemetli Betonun Dayanımına Yükleme Hızının Etkisi

Şimdiye kadar yapılan araştırmalar normal dayanımlı betonun basınç dayanımının yükleme hızına bağlı olduğunu göstermiştir. Yüksek deformasyon hızlarında yüksek f_c' değerleri ölçülürken, düşük deformasyon hızları için bunun tersi geçerlidir. Yüksek dayanımlı betondaki yüksek deformasyon hızlarında ölçülen basınç dayanımı artışı normal dayanımlı betondakine oranla daha azdır. Yüksek dayanımlı beton değişik yükleme hızlarından, normal dayanımlı betona göre daha az etkilenmektedir [74] .

Basınç kırılma yükü, uzun süreli yüksek yoğunluklu yüklemede daha düşük olabilir. Basınç dayanımın %70 ile %75'i civarında olan uzun süreli yüklemeler, zamanla, normal dayanımlı betonun kırılmasına yol açar. Daha önce yapılan bir araştırma yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımının %95'ine kadar varan uzun süreli yüklemelerin kırılmaya sebep olmadığını göstermiştir [75]. Bu, yüksek dayanımlı beton elemanlarının uzun süreli ve aşırı yüklemeler altında kırılmaya karşı güvenlik sınırının normal dayanımlı betona oranla daha fazla olabileceğini gösterir.

1.7. Betonun Elastisite Modülü

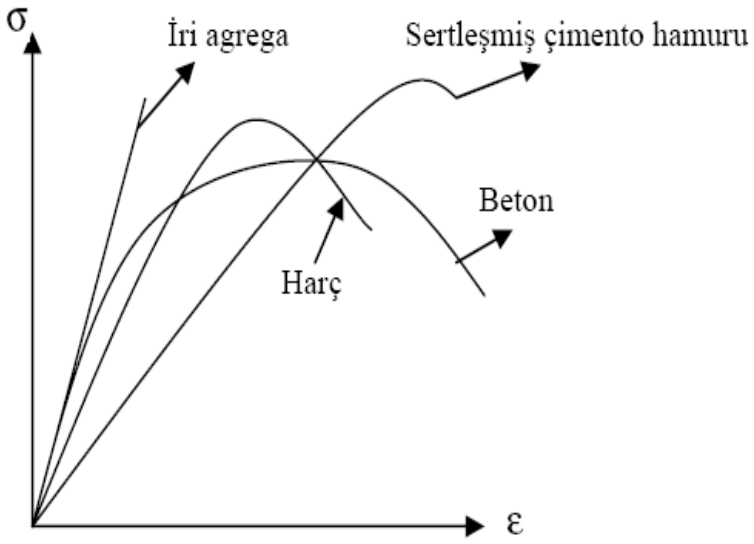
Üç fazlı anizotropik gevrek bir malzeme olarak tanımlanan beton, üzerine gelen değişik yükler nedeniyle farklı davranışlar gösterir. Elastik özellikteki malzemeden

elde edilmiş olan bir elemanın P yükü altında göstereceği toplam deformasyon miktarı, o elemana uygulanan yükün büyüklüğü ve elemanın boyu ile doğru orantılı, elemanın kesit alanı ile ters orantılıdır. Beton, gevrek ve farklı fazlardan oluşan bir kompozit olduğundan elastik bir malzeme değildir. Ancak küçük gerilmeler altında elastik özellik gösterebilir. Teorik olarak bu, basınç dayanımının %30 ile %40'ı arasındaki bir değere karşılık gelir [76]. Buna karşılık beton, mühendislik hesaplamalarında elastik bir malzeme olarak kabul edilir [4,77].

Betonda elastisite modülünün (E-modülü) bilinmesi beton, betonarme ve ön gerilmeli beton yapılarının deformasyonlarının hesaplanmasına yarar. Elastisite modülünün bilinmesiyle, deformasyonlar ölçülerek gerilmeler hesaplanabilir. Betonlarda elastisite modülü ve basınç mukavemeti arasında bazı ilişkiler vardır. Bu ilişkiler, betona zarar vermeden yaklaşık olarak mukavemetinin tayin edilmesini sağlar. Betonun bünyesinde çimento hamuru gibi viskoz bir karışımın bulunması bu malzemenin deformasyonunun asıl katı cisimlerin deformasyonlarından farklı olmasını sağlar [78]. Değişik yükler altında şekil değiştirebilen bir yapıya sahip bütün malzemeler gibi beton da üzerine gelen yükün tipinden, büyüklüğünden ve süresinden etkilenerek belirli ölçüde şekil değiştirme ya da başka bir deyişle deformasyon gösterir. Betonda E-modülü tayini betonun elastik davranabildiği sınırlar içerisindeki yükleme düzeylerinde standartlarda tanımlandığı üzere genellikle ϕ 150x300 mm boyutlarındaki silindir şekilli numuneler üzerinde yapılır.

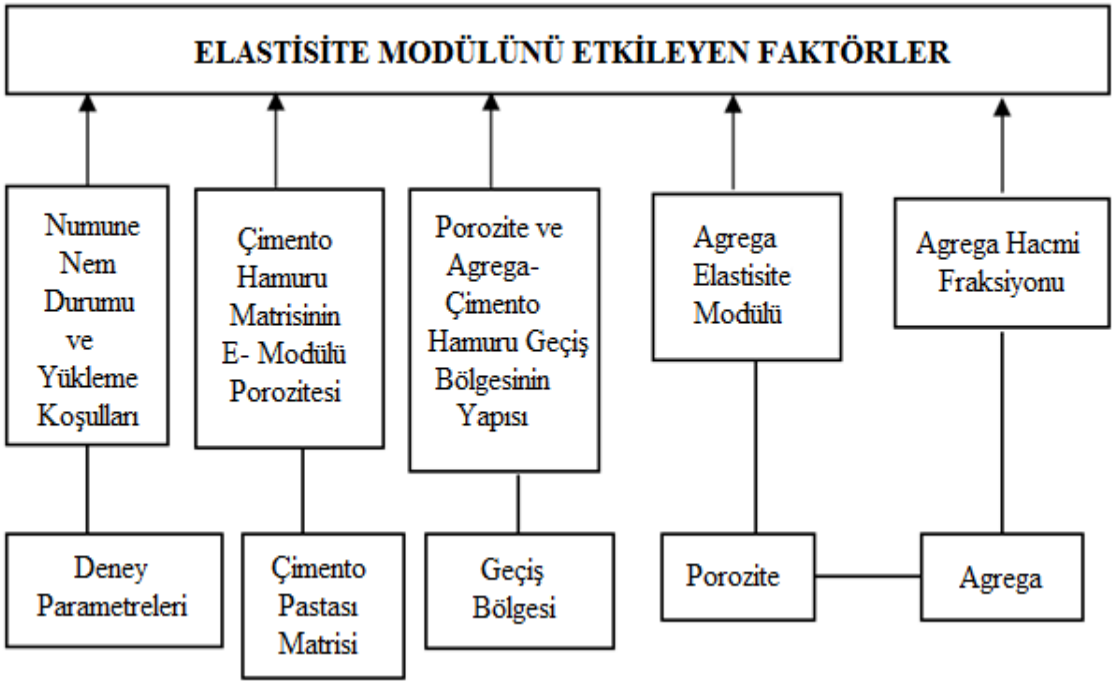
1.7.1. Betonun Elastisite Modülü Değerini Etkileyen Faktörler

Heterojen bir yapıya sahip olan beton içyapısı, yükleme sırasında agrega, çimento hamuru matrisi, değişik boşluk sistemleri, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi gibi sahip olduğu değişik fazlar nedeniyle farklı davranış gösterir [79]. Bu nedenle bunların birisinin nicelik veya niteliğindeki değişiklik beklenilen sonuçların farklı çıkmasına neden olabilir. Örneğin, aynı basınç dayanımına sahip fakat bileşim özellikleri ve bileşenleri farklı olan betonların elastisite değerleri farklı olabilir.



Şekil 1.5: Betonun ve Betonu Oluşturan Malzemelerin σ-ε Eğrileri [4]

Şekil 1.5'de görüldüğü gibi betonun ve betonu oluşturan bileşenlerin gerilme-deformasyon davranışları birbirinden oldukça farklıdır [4]. Beton içerisindeki fazlardan agreganın ve sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımı beton ve harcın dayanımına göre daha yüksektir. Buna karşılık beton kendi bileşenlerine göre daha sünek bir davranış göstermektedir. Yani betonun diğer fazlar ve bileşenlere göre inelastik davranışı daha yüksektir. Betonun gösterdiği deformasyon söz konusu faz ve bileşenlere göre eşdeğer bir basınç dayanımı için daha yüksektir. Bu olguların hepsi sonuçta malzemenin kırılma anındaki davranışını, rijitliğini, elastisite modülünü ve deformasyon kapasitesini belirler. Elastisite modülünü etkileyen faktörler ise Şekil 1.6'daki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 1.6: Betonun Elastisite Modülünü Etkileyen Faktörlerin Sınıflandırılması [80]

Şekil 1.6'da gösterilen agrega porozitesi ve agreganın elastisite modülü, çimento hamuru matrisinin özellikleri, çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi ve deney parametreleri gibi faktörler betonun elastisite modülünü etkilemektedir. Agreganın porozitesi ve elastisite modülü onun rijitliğini belirleyen bir öğedir. Bu nedenle yüksek yoğunluklu boşluksuz agregaların elastisite modülü yüksek olabilir. Çimento hamurunun elastisite modülü ve çimento hamurunun özellikleri ise büyük oranda su/çimento oranı tarafından belirlenir. Su/çimento oranının küçülmesi ile harç fazının elastisite modülü artar. Bu durum harç fazı/iri agrega elastisite modülü oranının artmasına neden olur. Bu değişim ise iri agrega çimento hamuru temas bölgesindeki gerilmelerin azalması yönünde etki yapar. Değişik nedenlerle ortaya çıkan çimento hamuru porozitesi betonun elastisite modülü üzerinde önemli bir rol oynar. Çimento hamuru-agrega geçiş bölgesi de beton elastisite modülü üzerine etki yapar. Betona yük uygulanması sırasında agrega taneleri ile çimento hamuru temas bölgesinde ortaya çıkan çekme, kayma gibi kuvvetler artar. Bu durum sonuçta büyük çatlaklara ve kırılmalara da yol açabilir [80].

Elastisite modülü, kullanılan agrega boyutu ve miktarına oldukça duyarlıdır. Örneğin, kırmataş kullanılarak üretilmiş bir betonun elastisite modülü düşük iken, aynı betonda yuvarlak çakıl kullanıldığında elastisite modülünün yüksek çıktığını

görmek mümkün olabilir [81]. Ayrıca agrega dane boyutunun belli oranda artırımı elastisite modülünü arttırabilir.

1.7.2. Gerilme-Deformasyon Eğrisi ile Elastisite Modülünün Hesaplanması

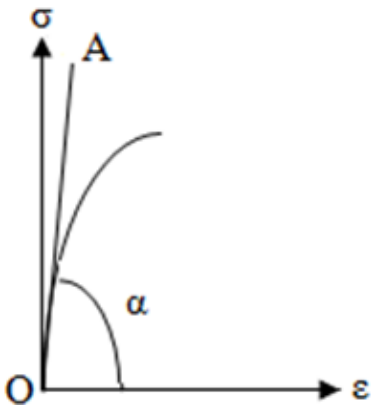
Elastisite modülünü hesaplarken, beton numunesine basınç uygulanarak ve betondaki deformasyonları gerilmelere göre kaydederek elde edilen gerilme-deformasyon eğrisini kullanmak en uygun yöntemdir [46]. Betonlarda, gerilme-deformasyon eğrisinden yararlanarak başlangıç teğeti, sekant, teğet ve kiriş yöntemleriyle elastisite modülü değerleri hesaplanabilir.

1.7.2.1. Başlangıç Teğeti Yöntemi

Başlangıç teğeti modülü (E_t), gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıçtaki teğetinin eğimidir. Bu karakteristik betonun maruz kaldığı gerilmeye bağlı değildir. Gerilmelerin (σ) küçük olması, özellikle betonun basınç mukavemetinin üçte birinden (R/3) küçük olması durumunda, başlangıçtaki teğetin gerilme-deformasyon eğrisi ile çakıştığı kabul edilir. Böylelikle σ, R/3'ten küçük olması şartı ile (1.5) formülü kullanılarak deformasyon hesaplanabilir [78].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_t} \qquad \textbf{(1.5)}$$

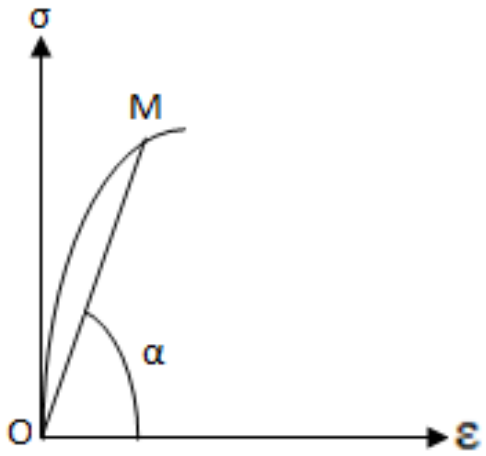
Dinamik elastisite modülü betonun gerilme-deformasyon eğrisinin başlangıçtaki teğetinin eğiminin alabileceği maksimum değerdir. Buna göre deney hızı belirli bir değerin üstünde artırılacak olursa elde edilecek gerilme-deformasyon eğrileri başlangıçta daima aynı bir OA doğrusuna teğet kalır. İşte bu OA doğrusunun eğimi (tgα) betonun dinamik elastisite modülünü verir [9]. Bu durum Şekil 1.7'de görülmektedir.



Şekil 1.7: Başlangıç Teğeti Yöntemi [9]

1.7.2.2. Sekant Yöntemi

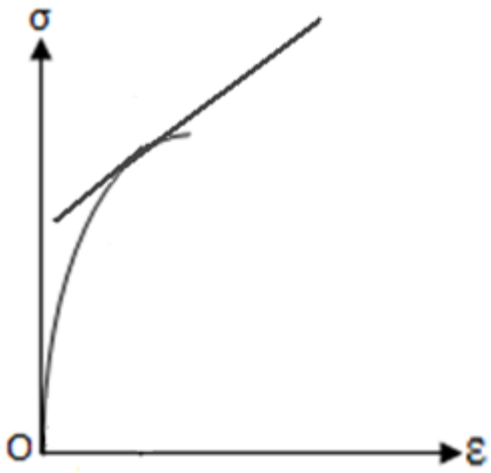
Sekant yöntemi olarak adlandırılan yöntemle elde edilen statik elastisite modülü (E_s) gerilme-deformasyon eğrisinin herhangi bir M noktasıyla koordinat merkezini birleştiren OM doğrusunun eğimidir. Şekil 1.8'de görüldüğü gibi $E_s = tg\alpha$'dır. Bu modülün bilinmesiyle deformasyondan derhal gerilmeyi hesaplamak mümkün olur. Yalnız E_s, gerilmenin değeriyle değişiklik göstermektedir [78]. Bu M noktasının seçiminde, genellikle, betonun maksimum gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri temel alınmaktadır [82].



Şekil 1.8: Sekant Yöntemi [78]

1.7.2.3. Teğet Yöntemi

Gerilme-birim deformasyon eğrisinin üzerinde herhangi bir nokta belirlenerek bu eğriye belirlenen noktadan geçecek şekilde teğet bir doğru çizilir. Pratikte, böyle bir nokta maksimum gerilmenin %40'ına karşılık gelen gerilme değeri temel alınarak belirlenir. Şekil 1.9'da görülen bu doğru, betonun σ-ε eğrisi olarak kabul edilir ve bu doğrunun eğimi hesaplanır [4] .

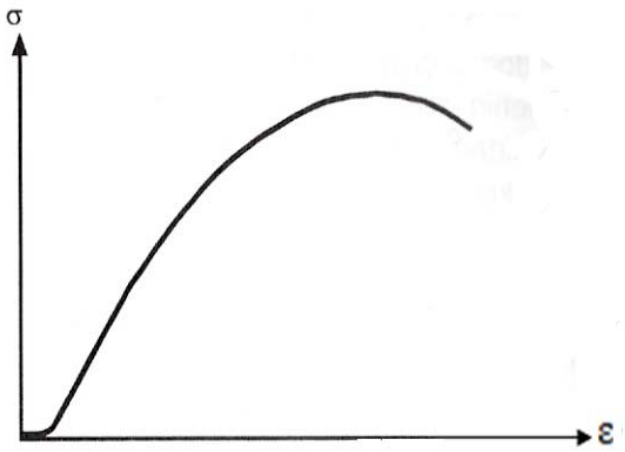


Şekil 1.9: Teğet Yöntemi

1.7.2.4. Kiriş Yöntemi

Betonun σ-ε eğrisi bazen Şekil 1.10'da görüldüğü gibi elde edilmektedir. Yani deney sırasında uygulanan gerilme değeri sıfır veya çok az iken gerilme-birim deformasyon eğrisinin başlangıç noktasında bir miktar deformasyon yer almakta, daha sonra, gerilme arttıkça deformasyon da normal olarak artmaktadır. Bu durum, yüklemeye başlamadan önce betonda bulunan bazı mikroçatlaklardan kaynaklanmaktadır. Yüklemeye başlandığında, betonda oturma olmakta ve fazla yük uygulanmadığı halde, böyle bir deformasyon ortaya çıkmaktadır. Aslında betondaki hakiki gerilme-birim deformasyon ilişkisi böyle bir deformasyondan sonra meydana gelen ilişkidir. O nedenle elastisite modülü hesaplanırken eğrinin başlangıç noktasındaki bu durum göz önüne alınmamalıdır.

Kiriş yöntemiyle elastisite modülünün tayininde sekant modülünde olduğu gibi gerilme-birim deformasyon eğrisi üzerinde bir nokta belirlenmektedir. Bu noktanın seçiminde, maksimum gerilme değerinin %40'ına karşılık gelen gerilme değerleri temel alınmaktadır [4]. Ancak, bu noktaya çizilecek kiriş, sekant modülünde olduğu gibi σ-ε eğrisinin başlangıç, sıfır olan noktasından başlatılmamakta, 0,00005 cm/cm birim deformasyon değerine karşılık gelen bir noktadan başlatılmaktadır [83].



Şekil 1.10: Bazı Deneylerde Elde Edilen Betonun σ-ε Eğrisi [4]

1.7.3. Betonun Basınç Dayanımı Değeri ile Elastisite Modülünün Hesaplanması

Betonun elastisite modülü genel olarak gerilme şekil değiştirme eğrisinden elde edilmektedir. Betonun basınç dayanımı kolaylıkla belirlenebilmesine rağmen gerilme şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesi zahmetli ve uzun süren deneysel çalışmalar gerektirmektedir. Bu nedenle daha kolay ve pratik bir yol olması açısından elastisite modülünün beton basınç dayanımından elde edildiği bağıntılar tercih edilmektedir [84]. Bazı standartlarda ve literatürde, elastisite modülü tahmini için, betonun basınç dayanımı f_c' (MPa), birim ağırlığı w_c (kg/m^3) ve elastisite modülü E_c (GPa) olmak üzere (1.6), (1.7), (1.8), (1.9) ve (1.10) bağıntıları önerilmiştir.

ACI 318 [85]	$E_c = 0{,}043 . w_c^{1,5} \sqrt{f_c'} . 10^{-3}$	**(1.6)**
TS 500 [86]	$E_c = (3250 . \sqrt{f_c'} + 14000) . 10^{-3}$	**(1.7)**
ACI 363-R [87]	$E_c = (3320 . \sqrt{f_c'} + 6900) . (w_c/2320)^{1,5} . 10^{-3}$	**(1.8)**
Ahmad&Shah [88]	$E_c = 3{,}385 . w_c^{2,5} . (f_c')^{0,325} . 10^{-8}$	**(1.9)**
Nassif ve diğ. [89]	$E_c = 0{,}036 . w_c^{1,5} \sqrt{f_c'} . 10^{-3}$	**(1.10)**

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Betonun elastisite modülünün tahmini yapısal tasarım açısından önemlidir. Literatür ve yapı standartlarında mevcut olan tahmin yöntemleri genellikle normal dayanımlı geleneksel beton karışımlarını kapsamaktadır. Bu tez çalışması, farklı tür agregalar içeren yüksek mukavemetli kendiliğinden sıkışan betonların taze beton, basınç dayanımı ve elastik özellikleri ile ilgili bilgi vermektedir.

2.1. Üretilen Betonların Özellikleri

Deneysel çalışmalarda dört farklı tür agreganın kırma kum ve kırmataşları kullanılarak üç farklı eşdeğer su/bağlayıcı (su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$) oranında, başka bir ifadeyle üç farklı su/çimento oranında on iki farklı beton karışımı üretilmiştir. Beton karışımlarının kodlanması, ilk üç harf kullanılan agreganın türünü, sonraki sayı değeri ise su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranını ifade edecek şekilde yapılmıştır. Örneğin, 0,26 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında dolomit kırma kum ve kırmataşı kullanılarak üretilen beton karışımı DOL 0,26 şeklinde kodlanmıştır. Deneylerde, karışım agregaları için incelik modülü hesabı yapılarak birbirine yakın granülometrilerde dolomit, kalker, bazalt ve kuvarsit agregaları ile 3 farklı su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında betonlar üretilmiş, kullanılan çimento, uçucu kül ve silis dumanı miktarları sabit tutulmuştur. Artan su/çimento oranlarına paralel olarak hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı yüzdeleri tüm agrega türleri için sabit değerler seçilerek azaltılmıştır. Üretilen beton karışımların kodlamaları ve teorik olarak karışımlara giren malzeme miktarları Tablo 2.1'de belirtilmiştir.

Tablo 2.1: Üretilen Betonların İsimlendirilmesi (Karışım Kodu)

Agrega Türü	Beton Kodu	Çimento (kg/m^3)	Uçucu Kül (Çim. Göre) (%)	Silis Dumanı (Çim. Göre) (%)	Kimyasal Katkı (Çim. Göre) (%)
Dolomit	DOL 0,26	450	15,6	9,0	3
	DOL 0,30	450	15,6	9,0	1,5
	DOL 0,34	450	15,6	9,0	1
Kalker	KAL 0,26	450	15,6	9,0	3
	KAL 0,30	450	15,6	9,0	1,5
	KAL 0,34	450	15,6	9,0	1
Bazalt	BAZ 0,26	450	15,6	9,0	3
	BAZ 0,30	450	15,6	9,0	1,5
	BAZ 0,34	450	15,6	9,0	1
Kuvarsit	KUV 0,26	450	15,6	9,0	3
	KUV 0,30	450	15,6	9,0	1,5
	KUV 0,34	450	15,6	9,0	1

2.2. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

2.2.1. Çimento

Bu deneysel çalışmada, beton karışımlarının tamamında teorik olarak 450 dozlu, CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de, kimyasal ve mineralojik özellikleri ise Tablo 2.3'te belirtilmiştir.

Tablo 2.2: Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellik	CEM I 42,5R	TS EN 197-1	Birim
Priz Başlangıcı	168	> 60	dakika
Priz Sonu	214	-	dakika
Özgül Ağırlık	3,17	-	gr/cm^3
Hacim Genleşmesi	1	< 10	mm
Özgül Yüzey	3114	-	cm^2/gr
2 Günlük Dayanım	25	> 20	N/mm^2
28 Günlük Dayanım	57	min./maks. 42,5/62,5	N/mm^2
32 μm Elek Kalıntısı	12,4	-	%

Tablo 2.3: Çimentonun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Kimyasal ve Mineralojik Özellik	CEM I 42,5R	TS EN 197-1	Birim
SO_3	2,61	< 4	%
MgO	1,11	-	%
Kızdırma Kaybı	1,50	< 5	%
Çözünmeyen Kalıntı	0,65	< 5	%
Klorür	0,0072	< 0,1	%
Toplam Alkali $Na_2O + 0,658\ K_2O$	0,54	-	%
Serbest Kireç	1,03	-	%
C_3S	61,00	-	%
C_2S	12,41	-	%
C_3A	5,34	-	%
C_4AF	11,08	-	%

2.2.2. Uçucu Kül

Beton üretiminde C tipi Çayırhan uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu küller ASTM C 618'e göre ikiye ayrılırlar. Bunlar, bitümlü kömürlerden elde edilen ve $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ toplamı %70'in üzerinde olan F tipi uçucu küller ve genellikle linyit veya bitümlü kömürlerden elde edilen ve $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ toplamı %50'nin üzerinde olan C tipi uçucu küllerdir [33]. Kullanılan uçucu külün fiziksel, kimyasal ve mekanik analizleri Tablo 2.4'te belirtilmiştir. Tüm beton karışımlarında teorik olarak çimento ağırlığının %15,6'sı kadar uçucu kül kullanılmıştır.

Tablo 2.4: Uçucu Külün Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Analizleri

Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Analiz	Çayırhan Uçucu Külü	C Tipi ASTM C 618 Sınırları	Birim
SiO_2	48,00	-	%
Al_2O_3	12,84	-	%
Fe_2O_3	7,09	-	%
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	67,93	> 50	%
CaO	20,78	-	%
MgO	3,02	< 5,0	%
SO_3	1,80	< 5,3	%
Klorür	0,07	-	%
Kızdırma Kaybı	0,96	< 6,0	%
Serbest CaO	0,56	-	%
İncelik (Blaine)	2,34	-	cm^2/gr
İncelik (µ45)	39,3	< 34	%
Özgül Ağırlık	2,43	-	gr/cm^3

2.2.3. Silis Dumanı

Deneylerde kullanılan yoğunlaştırılmış silis dumanına (mikrosilika) ait fiziksel ve kimyasal analiz ve ASTM C1240-3 sınır değerleri Tablo 2.5'de verilmiştir. Tüm beton karışımlarında teorik olarak çimento ağırlığının %9'u kadar silis dumanı kullanılmıştır.

Tablo 2.5: Silis Dumanının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Fiziksel ve Kimyasal Analiz	Silis Dumanı	ASTM C1240-3	Birim
SiO_2	94,75	> 85	%
SO_3	0,19	-	%
Cl^-	0,07	-	%
Alkali (% Na_2O)	0,44	-	%
Nem	0,15	< 3	%
Kızdırma Kaybı, LOI	1,82	< 6	%
pH	7,60	-	-
45 μ Elek Üstü	0,61	< 10	%
Özgül Yüzey (BET)	22,52	> 15	m^2/gr
Özgül Ağırlık	2,27	-	gr/cm^3
Hacimsel Yoğunluk	692,06	-	kg/m^3

2.2.4. Agrega

Deneysel çalışmalarda dolomit, kalker, bazalt ve kuvarsit olmak üzere dört farklı tür kırmataş ve kırma kum agregası kullanılmıştır. Kullanılan kırmataşların tümünde maksimum dane çapı ($D_{maks.}$) 16 mm'dir.

2.2.4.1. Dolomit

Beton karışımlarında kullanılan dolomit kırmataş kumu ve kırmataşları Ömerli'den temin edilmiştir. Bu agregaya ait mineralojik ve petrografik analizler aşağıda belirtilmiştir.

Makroskopik İnceleme:

Farklı özelliklerde kayaç parçalarından oluşur. Bunlar; sarı, gri, bordomsu kahve, bejimsi ve benekli renk ve özelliklerde parçalardır. Makro görünümlerden hareketle; sarı parçaların dolomitik kireçtaşı, bordomsu olanların kumlu kireçtaşı, bejimsi benekli olanların silisli kireçtaşı şeklinde tanımlanmaları mümkündür. Kayaç parçalarının sertliği yaklaşık 3,5 Mohs civarındadır. Asit (%10 HCl) ile muamelede belirsiz reaksiyon verir. Parçalarda bazı demir oksit sıvamalarının haricinde önemli bir alterasyon yoktur.

Mikroskopik İnceleme:

Petrografik-polarizan mikroskop altındaki inceleme sonucu numunenin özellikleri şu şekilde belirlenmiştir. Kayaç öz veya yarı öz şekilli tanelerden oluşur. Bunlar dolomit mineral taneleridir. Kalsit nadir oranda bazı merceklerdedir. Dolomitlerin boyutları genelde 0,05-0,1 mm aralığındadır. Taneler birbirleriyle iyi derecede kenetlenmiştir, boşluk bulunmaz.

Sonuç olarak malzeme dolomit olarak tanımlanır. Dolomit agregasının mineral bileşimi Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6: Dolomit Agregasının Mineral Bileşimi

MİNERAL BİLEŞİM	% MODAL ORAN
Dolomit	95-96
Kalsit (İkincil)	4-5
Dolomit	8-9
Opak Mineral	0,5

Dolomit agregası kullanılarak üretilen DOL 0,26, DOL 0,30 ve DOL 0,34 beton karışımlarında, %21 doğal kum, %22 kırmataş kumu, %57 kırmataş I kullanılmıştır. Dolomite ait, suya doygun yüzey kuru özgül ağırlıklar Tablo 2.7'de, kırma kum, kırmataş agregalarının ve karışımın elek analizleri ise Tablo 2.8'de verilmiştir.

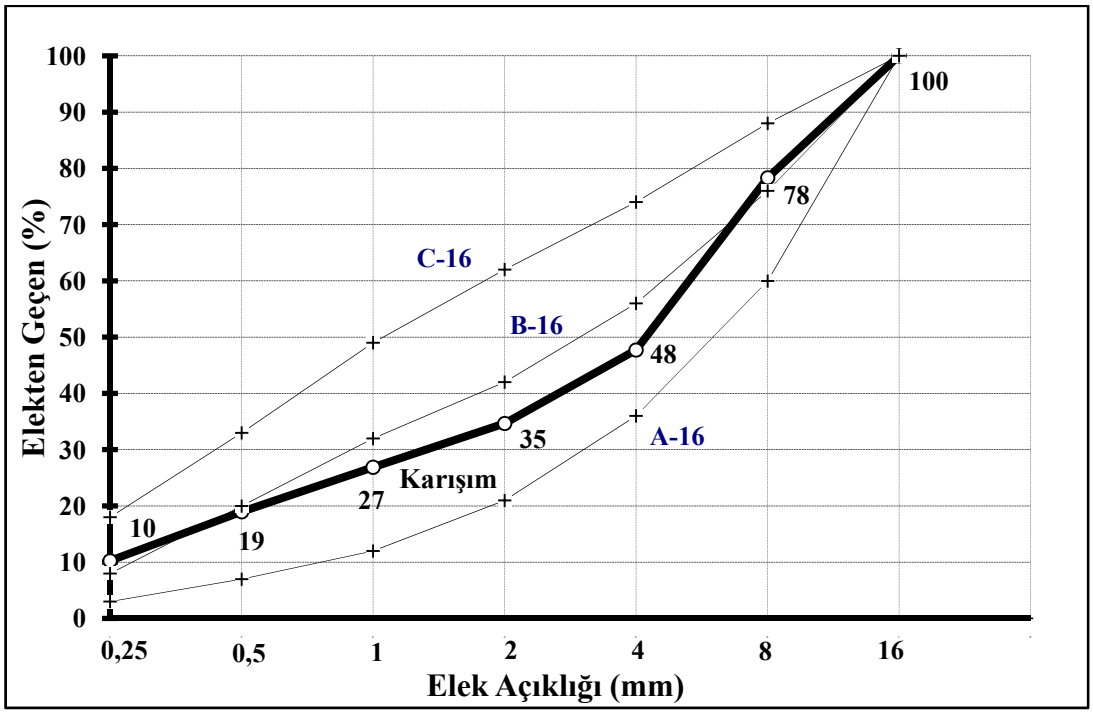
Tablo 2.7: Dolomit Agregalarının Özgül Ağırlıkları

AGREGA TÜRÜ	ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cm^3)
Dolomit Kırma Kum	2,69
Dolomit Kırmataş I	2,77

Tablo 2.8: Dolomit Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)						
	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş I	Karışım	C16	B16	A16
0,25	29,1	19,0	0	10,3	18	8	3
0,50	62	27	0	19	33	20	7
1	85	41	0	27	49	32	12
2	97	65	0	35	62	42	21
4	100	93	11	48	74	56	36
8	100	100	62	78	88	76	60
16	100	100	100	100	100	100	100

Dolomit agregası kullanılarak üretilen DOL 0,26, DOL 0,30 ve DOL 0,34 beton karışımlarına ait granülometri eğrisi ve TS 706 referans eğrileri Şekil 2.1'de verilmiştir. Karışımın incelik modülü, k= 3,83 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.1: Dolomit Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri

2.2.4.2. Kalker

Beton karışımlarında kullanılan kalker kırmataş kumu ve kırmataşı Cebeci'den temin edilmiştir. Bu agregaya ait mineralojik ve petrografik analizler aşağıda belirtilmiştir.

Makroskopik İnceleme:

Kırmataş malzemesi, grimsi tonlarda, az oranda beyaz bej renkli tanelerden oluşan renk tonuna sahiptir. Kayaç; ince taneli, sedimentler kayaç görünümünde, homojen sade dokulu, herhangi bir yönlenme (yapraklanma) gözlenmez. İnce taneli, ayrışma izlenmez. Kayaçta ayrıca ikincil beyaz kalsit damarlarına rastlanmıştır. %10'luk HCl (asit) ile reaksiyonda orta şiddette bir köpürme izlenmektedir. Kayaç-malzeme karbonat grubuna ait olup, kalsit vs. benzeri mineral içerir. Sertliği 3-3,5 Mohs'dur.

Mikroskopik İnceleme:

Yönlenmiş, yarı mikritik, bol opak mineral içerikli, yarı rekristalize doku içinde ikincil kalsit ve demiroksit (opak) mineral kılcal damar dolguları yer alırlar. Rekristalize kalsit ve dolomitler, farklı taneli, bazen çok iri taneli kristaller halinde, ikizlenme ve dilinim gösterirler. Kriptokristalli kaya renkli mikritik kalsitler bol oranda demiroksit mineralleri içerirler. Opak içerikli yassı nodüler dokuyu yansıtırlar.

Tane Boyutu:

Mikritik kalsit: 30-40 mikron

Rekristalize kalsit: 0,04-0,8 mm

Rekristalize dolomit: 0,12-0,7 mm

Sonuç olarak malzeme yönlenmiş bol opak içerikli oolitik, yarı mikritik, yarı rekristalize dolomitli kireçtaşıdır. Kalker agregasının mineral bileşimi Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9: Kalker Agregasının Mineral Bileşimi

MİNERAL BİLEŞİM	% MODAL ORAN
Kalsit (Mikritik)	40-45
Kalsit (Rekristalize)	13-25
Dolomit	25-27
Opak Mineral (İmpürte)	10-11

Kalker agregası kullanılarak üretilen KAL 0,26, KAL 0,30 ve KAL 0,34 beton karışımlarında, %22 doğal kum, %24 kırmataş kumu, %54 kırmataş I kullanılmıştır. Kalkere ait kırma kum ve kırmataş agregalarının ve karışımın elek analizleri Tablo 2.10'da, suya doygun yüzey kuru özgül ağırlıklar ise Tablo 2.11'de verilmiştir.

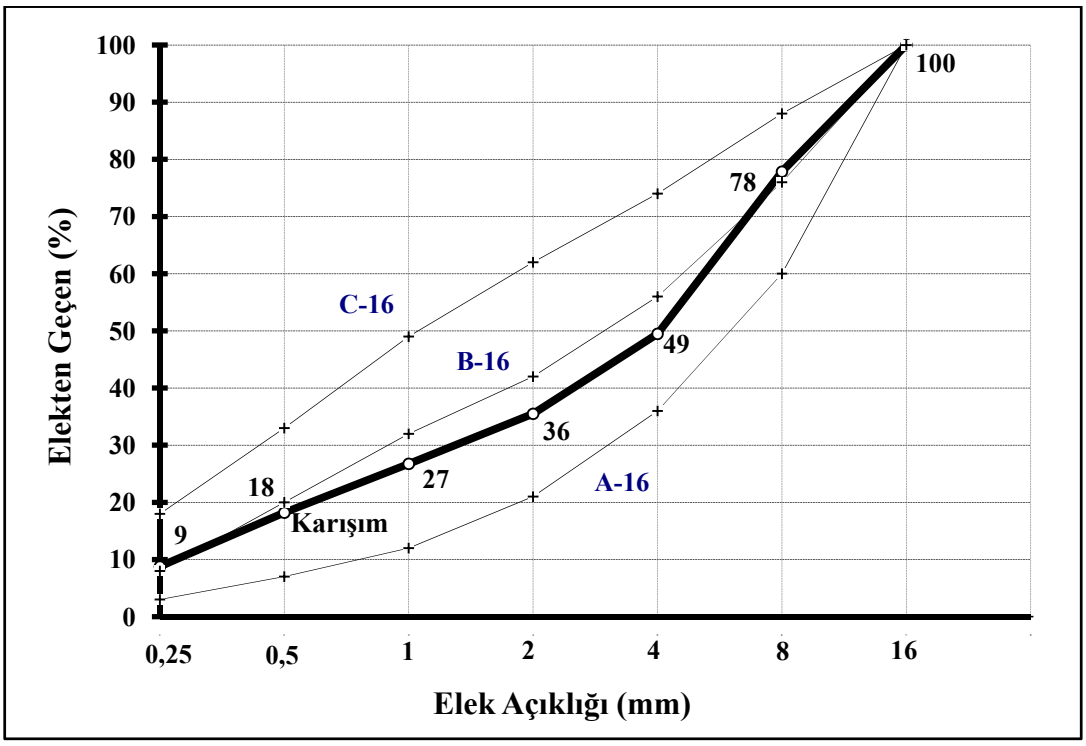
Tablo 2.10: Kalker Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)						
	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş I	Karışım	C16	B16	A16
0,25	29,1	10,2	0	8,8	18	8	3
0,50	62	19	0	18	33	20	7
1	85	29	2	27	49	32	12
2	97	50	4	36	62	42	21
4	100	83	14	49	74	56	36
8	100	100	59	78	88	76	60
16	100	100	100	100	100	100	100

Tablo 2.11: Kalker Agregalarının Özgül Ağırlıkları

AGREGA TÜRÜ	ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cm^3)
Kalker Kırma Kum	2,66
Kalker Kırmataş I	2,69

Kalker agregası kullanılarak üretilen KAL 0,26, KAL 0,30 ve KAL 0,34 beton karışımlarına ait granülometri eğrisi ve TS 706 referans eğrileri Şekil 2.2'de verilmiştir. Karışımın incelik modülü, k= 3,83 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.2: Kalker Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri

2.2.4.3. Bazalt

Beton karışımlarında kullanılan bazalt kırmataş kumu ve kırmataşı Çorlu, Karatepe'den temin edilmiştir. Bu agregaya ait mineralojik ve petrografik analizler aşağıda belirtilmiştir.

Makroskopik İnceleme:

Koyu giri-siyah tonlarında, yarı köşeli yarı yuvarlak, kristalliğin orta düzeyde olduğu kırmataş, yüzeyi çok pürüzlü, masif kompakt bir kayaçtır. Herhangi bir ayrışma ve yönlenme gözlenmeyen kayaç, makroskopik yönden ince taneli, afanitik (tane yapısı göstermeyen) görünümlü, sertliği 5-6 Mohs olup, %10 HCl ile reaksiyonda herhangi bir köpürme gözlenmez. Bu nedenle kayaç karbonat grubuna ait değildir.

Mikroskopik İnceleme:

Porfirik volkanik (bazaltik) diğer bir tanımla tipik girift ofitik doku altında, plajioklas kristalleri (idiyomorf), birbiriyle girift konumda, ara boşluklarda ince mikrolitik kristaller (plajioklas + olivin) ve olivin kristal taneleri yer alır.

Tane Boyutu:

Mikritik Kalsit: 0,6-0,3 mm

Olivinler: 0,5-0,4 mm

Sonuç olarak malzeme olivinli bazalttır. Bazalt agregasının mineral bileşimi Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.12: Bazalt Agregasının Mineral Bileşimi

MİNERAL BİLEŞİM	% MODAL ORAN
Plajioklas	25-30
Olivin	15-17
Matriks (Mikrolitik)	60-62

Bazalt agregası kullanılarak üretilen BAZ 0,26, BAZ 0,30 ve BAZ 0,34 beton karışımlarında, %21 doğal kum, %23 kırmataş kumu, %56 kırmataş I kullanılmıştır. Bazalta ait, suya doygun yüzey kuru özgül ağırlıklar Tablo 2.13'te, kırma kum ve kırmataş agregalarının ve karışımın elek analizleri ise Tablo 2.14'te verilmiştir.

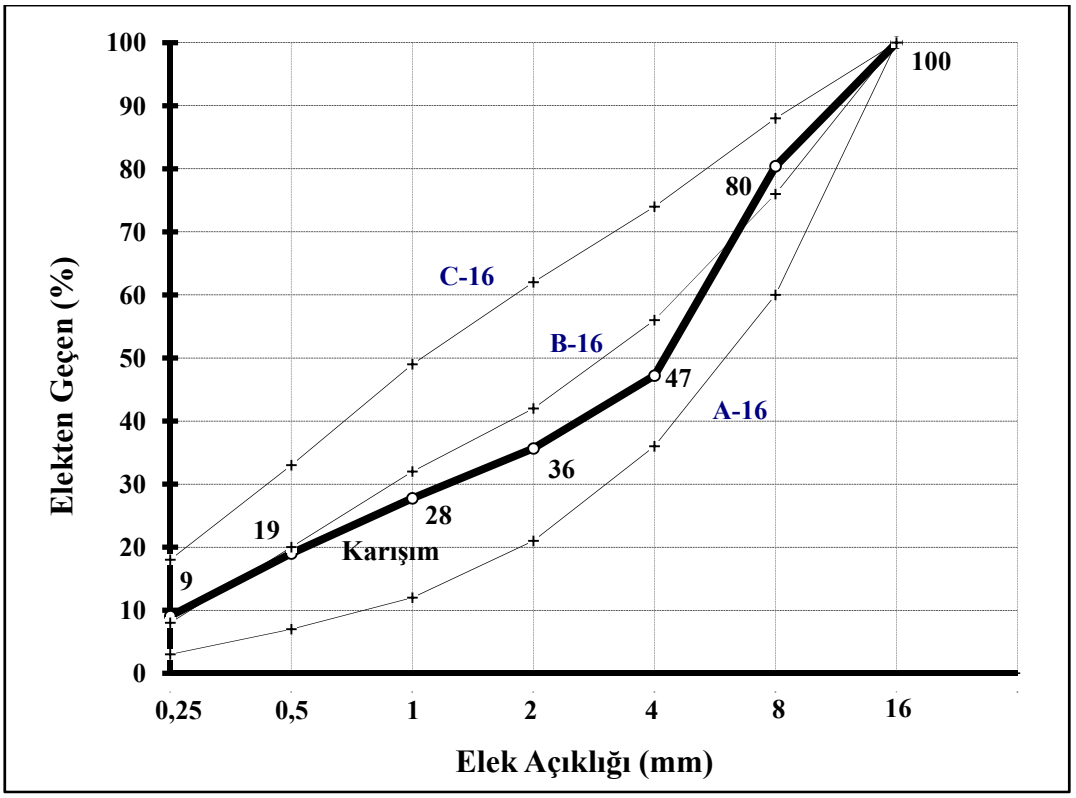
Tablo 2.13: Bazalt Agregalarının Özgül Ağırlıkları

AGREGA TÜRÜ	ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cm^3)
Bazalt Kırma Kum	2,82
Bazalt Kırmataş I	2,87

Tablo 2.14: Bazalt Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)						
	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş I	Karışım	C16	B16	A16
0,25	29,1	13,4	0	9,2	18	8	3
0,50	62	26	0	19	33	20	7
1	85	43	0	28	49	32	12
2	97	64	1	36	62	42	21
4	100	92	9	47	74	56	36
8	100	100	65	80	88	76	60
16	100	100	100	100	100	100	100

Bazalt agregası kullanılarak üretilen BAZ 0,26, BAZ 0,30 ve BAZ 0,34 beton karışımlarına ait granülometri eğrisi ve TS 706 referans eğrileri Şekil 2.3'te verilmiştir. Karışımın incelik modülü, k= 3,81 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.3: Bazalt Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri

2.2.4.4. Kuvarsit

Beton karışımlarında kullanılan kuvarsit kırmataş kumu ve kırmataşı Çatalca'dan temin edilmiştir. Bu agregaya ait mineralojik ve petrografik analizler aşağıda belirtilmiştir.

Makroskopik İnceleme:

Kırmataş (mıcır) şeklindeki doğal malzeme beyaz-bej fonlarında ince orta taneli, masif kompakt, herhangi bir yönlenme izlenmez. Orta köşeli malzemede, çatlaklarda ince kılcal demiroksit oluşumları dışında impürte ve ayrışmaya rastlanmaz. %10'luk HCl (asit) ile reaksiyonunda herhangi bir köpürme izlenmez. Kayaç karbonat grubuna ait olmayıp, karbonat mineralleri kalsit-dolomit içermez. Malzemenin sertliği 5,5-6,5 Mohs civarındadır.

Mikroskopik İnceleme:

Farklı taneli mozoyik doku altında, dalgalı yanıp sönmeli kuvars kristallerinden oluşmaktadır. Çok olan mineral kuvars olup, yanında az oranda mika (biotit), daha çok taneler arası kırıklı, eşikli zonlarda yer alırlar. Mikalar opaklaşmış, demirleşmiştir.

Tane Boyutu:

İnce: 0,025-0,030 mm

Orta: 0,030-0,04 mm

İri : 0,75-0,80 mm

Sonuç olarak malzeme biotitli kuvarsittir. Kuvarsit agregasının mineral bileşimi Tablo 2.15'te verilmiştir.

Tablo 2.15: Kuvarsit Agregasının Mineral Bileşimi

MİNERAL BİLEŞİM	MODAL ORAN %
Kuvars	94-95
Biotit (Mika)	4-5
Opak İmpürte	0,5-1

Kuvarsit agregası kullanılarak üretilen KUV 0,26, KUV 0,30 ve KUV 0,34 beton karışımlarında, %23 doğal kum, %20 kırmataş kumu, %57 kırmataş I kullanılmıştır. Kuvarsite ait, suya doygun yüzey kuru özgül ağırlıklar Tablo 2.16'da, kırma kum ve kırmataş agregalarının ve karışımın elek analizleri ise Tablo 2.17'de verilmiştir.

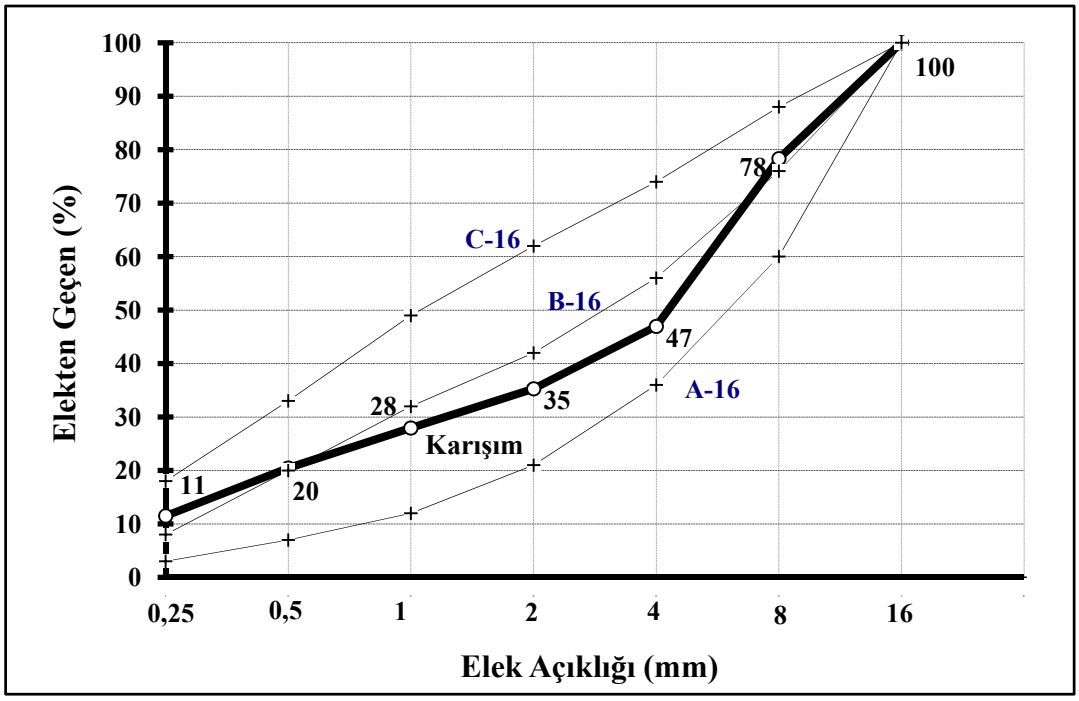
Tablo 2.16: Kuvarsit Agregalarının Özgül Ağırlıkları

AGREGA TÜRÜ	ÖZGÜL AĞIRLIK (gr/cm^3)
Kuvarsit Kırma Kum	2,61
Kuvarsit Kırmataş I	2,65

Tablo 2.17: Kuvarsit Agregası Kullanılan Beton Karışımlarının Elek Analizleri

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)						
	Doğal Kum	Kırma Kum	Kırma Taş I	Karışım	C16	B16	A16
0,25	29,1	23,8	0	11,4	18	8	3
0,50	62	31	0	20	33	20	7
1	85	42	0	28	49	32	12
2	97	62	1	35	62	42	21
4	100	97	8	47	74	56	36
8	100	100	62	78	88	76	60
16	100	100	100	100	100	100	100

Kuvarsit agregası kullanılarak üretilen KUV 0,26, KUV 0,30 ve KUV 0,34 beton karışımlarına ait granülometri eğrisi ve TS 706 referans eğrileri Şekil 2.4'te verilmiştir. Karışımın incelik modülü, k= 3,80 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.4: Kuvarsit Agregası Betonlarının Granülometri Eğrileri

2.2.4.5. Doğal Kum

Beton karışımlarında kullanılan doğal kum Kemerburgaz-Akpınar Köyü'nden temin edilmiştir. Bu doğal kuma ait mineralojik ve petrografik analizler aşağıda belirtilmiştir.

Makroskopik İnceleme:

Açık sarımsı bej görünümlü ince çakıllı kum boyutlu bir malzemedir. İnce kum boyutlu malzeme su ile muamelede çok açık az bej renkli bir kirlilik yapmaktadır. Buradan malzemede %0,8-1,2 oranında kil boyutlu malzeme bulunmaktadır. %10'luk seyreltik HCl ile muamelede herhangi bir köpürme izlenmemektedir. Buradan sonuçla malzeme içinde karbonat grubu mineral ve kayaç parçasına rastlanmamıştır.

Mikroskopik İnceleme:

Malzemenin kum boyutlu elemanları binoküler mikroskop altında modal mineralojik olarak incelenmiştir. Kuvars oranı %85 ve üzeri oranda tespit edilmiştir. Mika mineraline rastlanmamıştır. Bazı taneler üzerinde demiroksit ayrışımları tespit edilse de manyetit veya hematit bulunmamıştır.

Sonuç olarak malzeme kuvars kumudur. Doğal kumun mineral bileşimi Tablo 2.18'de verilmiştir.

Tablo 2.18: Doğal Kumun Mineral Bileşimi

MİNERAL BİLEŞİM	% MODAL ORAN
Kuvars	83-89
Feldspat	9-10
Göna	1-3
Piroksen+Amfibol	1-2
Turmalin	≤ 0,5

Suya doygun yüzey kuru özgül ağırlığı 2,59 gr/cm^3 olan doğal kuma ait elek analizi Tablo 2.19'da verilmiştir.

Tablo 2.19: Doğal Kumun Elek Analizi

ELEK AÇIKLIĞI (mm)	ELEKTEN GEÇEN (%)
8	100
4	100
2	97
1	85
0,5	62
0,25	29,1

2.2.5. Kimyasal Katkı

Bu çalışmada, polikarboksilik eter esaslı hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmış olup teknik özellikleri Tablo 2.20'de verilmiştir.

Tablo 2.20: Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkının Teknik Özellikleri

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Amber
Yoğunluk	1,07 kg/dm^3
Klor İçeriği % (EN 480-10)	< 0,1
Alkali İçeriği % (EN 480-12)	< 3

2.3. Beton Üretimi

Bu çalışmada dolomit, kalker, bazalt ve kuvarsit agregaları kullanılarak 0,26, 0,30 ve 0,34 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranlarında toplam on iki seri beton üretilmiştir. Aynı agrega kullanılarak üretilen beton karışımlarında agrega karışım gradasyonları sabit tutulmuştur. Farklı kökenli agrega karışımları için de karışım incelik modülü hesabı yapılarak gradasyonlarının birbirine yakın olması sağlanmıştır. Karışıma giren tüm agregalar kuru halde kullanılmıştır. Tüm beton karışımlarında teorik olarak 450 kg/m^3 çimento, 70 kg/m^3 uçucu kül ve 40,5 kg/m^3 silis dumanı kullanılmıştır. Üretilen beton karışımlarının yayılma değerlerinin 60-75 cm aralığında olması öngörülerek öncelikle farklı su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranları ve farklı kimyasal katkı yüzdelerinde deneme karışımları yapılmış, asıl beton karışımlarında ise 0,26 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı için çimento (Çim.) ağırlığının %3'ü, 0,30 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$

oranı için %1,5'i ve 0,34 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı için ise %1'i kadar kimyasal katkı kullanılmıştır. Tüm karışımlar için 30 litre beton üretilerek serbest yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Her bir üretimde 4 adet silindir numune alınmıştır. Su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranları hesaplanırken kimyasal katkının (K.K) içindeki su oranı %70, uçucu kül (U.K) etki katsayısı 0,4 ve silis dumanı (S.D) etki katsayısı ise 2 olarak alınmıştır.

Buna göre su/çimento ve su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranları;

$$\text{Su/çimento}=(\text{Su}+0{,}7\times\text{K.K})/(\text{Çim.}) \quad \textbf{(2.1)}$$

$$\text{Su/Bağlayıcı}_{(\text{Eşd.})}=(\text{Su}+0{,}7\times\text{K.K})/(\text{Çim.}+0{,}4\times\text{U.K}+2\times\text{S.D}) \quad \textbf{(2.2)}$$

bağıntıları ile hesaplanmıştır. Üretim yapıldıktan sonra taze betonun birim ağırlığından gerçek malzeme miktarları ve hava yüzdeleri hesaplanmıştır. Karışıma giren gerçek malzeme bileşimleri Tablo 2.21'de verilmiştir.

2.3.1. Beton Üretiminde İzlenen Yol

Beton karışımları 32 dm^3 kapasiteli, düşey eksenli cebri karıştırıcılı betonyerde üretilmiştir. Beton serilerinin üretim işlemi, karışımda homojenliği sağlamak amacıyla, öncelikle, kuru durumda olan doğal kum, kırma kum ve kırmataş karışımının doyurma suyu ile birlikte karıştırılması, daha sonra çimento, uçucu kül ve silis dumanı ilave edilerek karışım suyunun %60'ı ile birlikte 1 dakika karıştırılması ve geriye kalan suyla beraber hiper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmesi şeklinde betonyer yardımıyla toplam 5 dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işleminin ardından yeterli homojenlik sağlandıktan sonra serbest yayılma deneyi yapılmıştır. Bunun ardından taze beton birim ağırlık deneyine geçilmiş ve beton kürek yardımıyla herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan numune kalıplarına doldurulmuştur.

Tablo 2.21: Gerçek Beton Bileşimleri

Beton Kodu	Çimento (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Uçucu Kül (kg/m^3)	Silis Dumanı (kg/m^3)	Kimyasal Katkı (kg/m^3)	Doğal Kum (kg/m^3)	Kırma Kum (kg/m^3)	Kırma Taş I (kg/m^3)	Su/Çim.	Su/Bağ.$_{(Eşd.)}$*	Hava (%)	Gerçek Birim Ağırlık (kg/m^3)
DOL 0,26	455	137	70,7	40,9	13,644	351	380	1015	0,32	0,26	1,6	2463
DOL 0,30	457	165	71,1	41,1	6,854	340	370	987	0,37	0,30	1,2	2438
DOL 0,34	456	189	70,9	41,0	4,559	327	356	949	0,42	0,34	1,4	2394
KAL 0,26	456	138	71,0	41,0	13,685	368	413	938	0,32	0,26	1,2	2438
KAL 0,30	458	166	71,3	41,2	6,872	357	401	911	0,37	0,30	0,8	2413
KAL 0,34	457	190	71,1	41,1	4,569	344	386	877	0,42	0,34	1,0	2371
BAZ 0,26	457	138	71,0	41,1	13,700	352	419	1039	0,32	0,26	1,1	2531
BAZ 0,30	458	166	71,3	41,2	6,874	341	406	1009	0,37	0,30	0,8	2500
BAZ 0,34	457	190	71,1	41,2	4,574	328	391	971	0,42	0,34	1,0	2455
KUV 0,26	457	138	71,1	41,1	13,715	386	338	977	0,32	0,26	1,0	2423
KUV 0,30	459	166	71,4	41,3	6,884	374	328	950	0,37	0,30	0,6	2397
KUV 0,34	458	190	71,3	41,2	4,581	360	316	914	0,42	0,34	0,8	2356

***:** Su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranlarında katkı içindeki su oranı %70, silis dumanı ve uçucu kül etki katsayıları sırasıyla 2 ve 0,4 olarak alınmıştır.

2.4. Taze Beton Deneyleri

2.4.1. Serbest Yayılma Deneyi

Betonun kendi ağırlığı ile yayılma özelliğini yani, doldurma kabiliyetini ölçmek için Şekil 2.5'de görülen serbest yayılma deneyi metodu uygulanmıştır. Standart çökme (slump) hunisi (yükseklik: 30cm, alt silindir çapı: 20cm, üst silindir çapı: 10cm) yayılma tablasının üzerine konulmuştur. Yayılma tablası üzerine konulan slump hunisi içerisine, şişleme yapılmadan beton doldurulup üzeri mala yardımıyla düzeltildikten sonra, herhangi bir sarsma yapmadan slump hunisi yukarıya doğru çekilerek, betonun kendi ağırlığı ile yayılması beklenmiştir. Betonun tablaya önceden işaretlenen 50 cm'lik çapa ulaşma süresi (T_{50}) ve nihai yayılma çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülerek deney tamamlanmıştır.

Yayılma miktarının fazla olması betonun kendi ağırlığı altında hareket etme kabiliyetini gösterir. Bu nedenle yayılma miktarının fazla olması işlenebilme özelliğinin yüksek olmasının göstergesidir.

Yayılma miktarları, su/çimento oranları dışında başka faktörlerin de etkisindedir. İri agreganın köşeli tanelerden oluşması durumunda taze betonda meydana gelen kenetlenme betonun daha az yayılmasına sebep olur. Diğer taraftan, iri agrega taneleri daha yuvarlak yüzeyli taneler şeklinde ise bu kenetlenme daha az olur ve bu da yayılma değerlerini etkiler. Agrega karışım granülometrisi de yayılmaya etki eder.



Şekil 2.5: Serbest Yayılma Deneyi

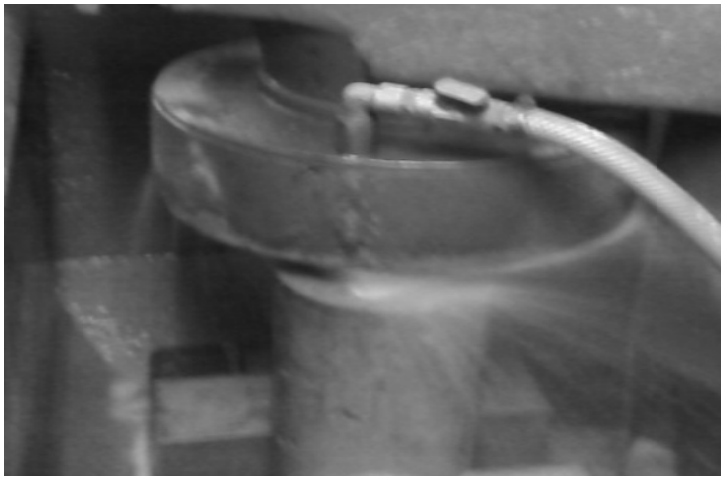
2.4.2. Birim Ağırlık Deneyi

Taze betonun gerçek bileşim miktarlarının belirlenebilmesi amacıyla 8 litre hacminde ve 4600 gr ağırlığında birim ağırlık kovası kullanılmıştır. Beton, birim ağırlık kovasına sıkıştırma işlemi uygulanmadan dökülmüş, daha sonra tartılmış, tartım sonucunda çıkan ağırlıktan kabın darası düşülerek, kabın hacmine bölmek suretiyle gerçek birim ağırlıklar elde edilmiştir.

2.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.5.1. Basınç Dayanımı Deneyi

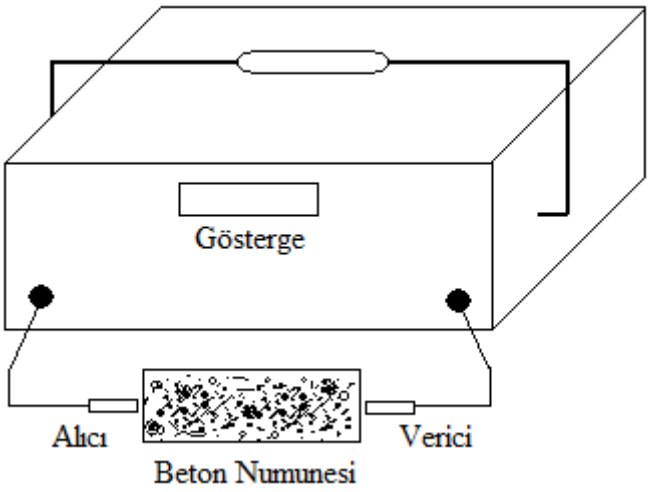
Numuneler kalıpta 24 saat bekletildikten sonra 26 gün süreyle 23±2 °C sıcaklığındaki suda küre maruz bırakıldılar. Sudan çıkarılan silindir numunelere Şekil 2.6'da görüldüğü gibi aşındırma yöntemiyle başlık yapılmıştır. Aşındırma yönteminin kullanılma sebebi silindir numunelerin basınç dayanımları arasındaki standart sapmanın aza indirilmesi ve genel itibariyle yüksek mukavemetli betonlar için daha sağlıklı bir yöntem olmasıdır. Kendi basınç dayanımı itibariyle yüksek dayanımlı bir betonun mukavemetinden daha düşük dayanıma sahip bir başlık malzemesi kullanılması betonun asıl dayanımını gösteremeyecektir. Bu açıdan aşındırma yöntemi herhangi bir sakınca teşkil etmemektedir. Aşındırılan numuneler daha sonra tekrar küre maruz bırakılarak, ultrases hızı deneyinden 8 saat öncesinde kür havuzundan çıkarılmıştır. 28. günde numunelerin tümü 500 ton kapasiteli aynı beton basınç dayanım presinde sabit yükleme hızında kırılmıştır. Kırılma yükleri ton cinsinden okunarak N/mm^2 (MPa) biriminde betonun basınç dayanımı değerine dönüştürülmüştür.



Şekil 2.6: Aşındırma Yöntemi ile Numunelere Başlık Yapılması

2.5.2. Ultrases Hızı Deneyi

Ultrases hızı deneyleri tüm numunelerde aynı ultrases aleti kullanılarak yapılmıştır. Ultrases aleti deneye başlanmadan önce aynı kalibrasyon çubuğu referans alınmak suretiyle, farklı kökenli agregalarla üretilen beton numuneleri arasındaki bağlantıyı sağlamak amacıyla kalibre edilmiştir. Beton numunelerinin boyları ölçülmüş, karşılıklı yüzeyleri üzerine gres yağı sürülerek Şekil 2.7'de görülen ultrases aletinin verici probundan alıcı probuna ulaşan sesin süresi mikro saniye cinsinden okunmuştur. Sesin boşlukta yayılamaması ilkesine dayanan bu yöntemle diğerlerine göre daha fazla boşluğa sahip numunelerde bu sürenin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Sesin numune içinden geçiş süresi, ölçülmüş olan numune boyuna bölünerek (km/sn) biriminde ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır.



Şekil 2.7: Ultrases Hızı Belirleme Düzeneği

2.5.3. Elastisite Modülü Deneyi

Elastisite modülü deneyleri silindir (ϕ 150x300mm) numunelerin üzerine komparatörlü çerçeve takılarak sabit yükleme hızında yapılmıştır. Her 5 tonluk yükleme değerine karşılık gelen düşey yer değiştirmeler komparatör yardımıyla belirlenmiştir. Gerilme deformasyon grafiği çizilerek, grafiğin lineer olduğu bölgesindeki eğimden yararlanılarak elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada yüksek mukavemetli betonların elastisite modülü hesaplanırken gerilme-deformasyon grafiğinde maksimum gerilmenin %40'ına kadar olan bölgedeki gerilme-deformasyon değerleri kullanılmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

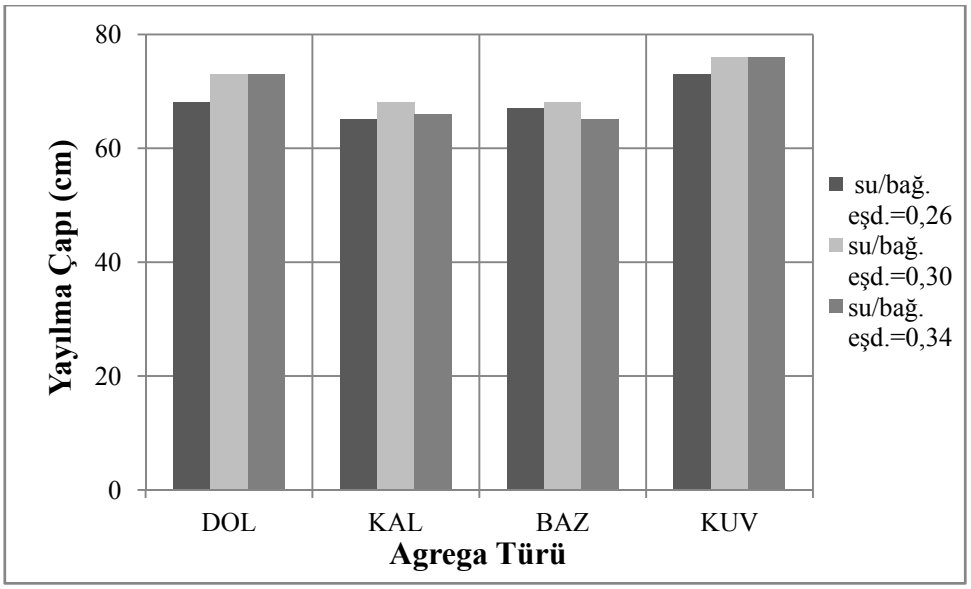
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton deneyleri sonucunda serbest yayılma ve gerçek birim ağırlık değerleri elde edilmiş, betonun içinde bulunan hava miktarları ise gerçek birim ağırlıklardan yararlanılarak hesaplanmıştır. Üretilen betonlara ait teorik ve gerçek birim ağırlık, serbest yayılma, T_{50} süresi ve hava yüzdesi değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Taze Beton Deney Sonuçları

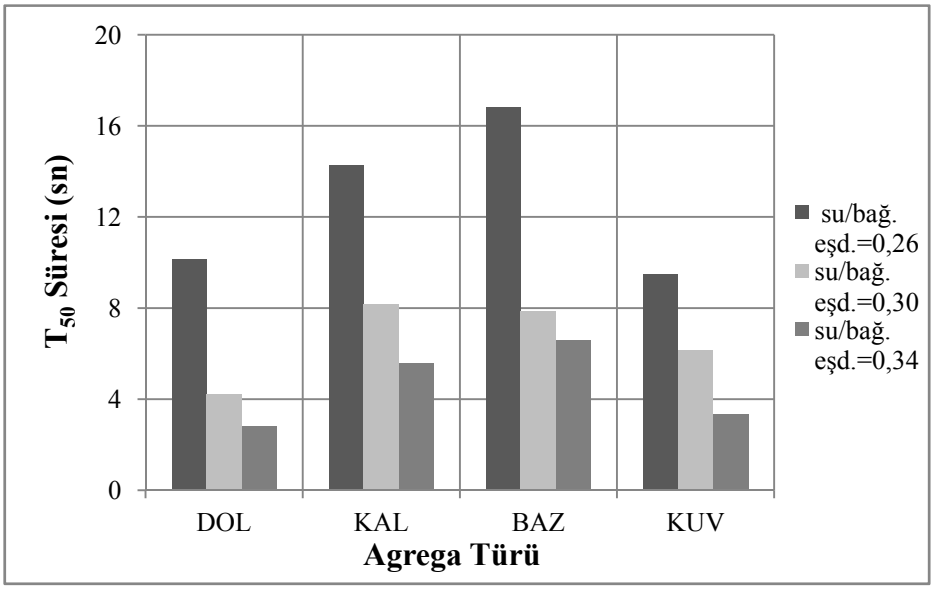
Beton Kodu	Teorik Birim Ağırlık (kg/m^3)	Gerçek Birim Ağırlık (kg/m^3)	Yayılma (cm)	T_{50} Süresi (sn)	Hava Miktarı (%)
DOL 0,26	2437	2463	68	10,16	1,6
DOL 0,30	2401	2438	73	4,20	1,2
DOL 0,34	2363	2394	73	2,82	1,4
KAL 0,26	2405	2438	65	14,28	1,2
KAL 0,30	2370	2413	68	8,16	0,8
KAL 0,34	2335	2371	66	5,58	1,0
BAZ 0,26	2494	2531	67	16,80	1,1
BAZ 0,30	2455	2500	68	7,84	0,8
BAZ 0,34	2415	2455	65	6,59	1,0
KUV0,26	2385	2423	73	9,50	1,0
KUV0,30	2350	2397	76	6,14	0,6
KUV0,34	2314	2356	76	3,34	0,8

Tablo 3.1'de verilen değerler göz önüne alındığında, beton içerisine giren agregaların özgül ağırlıklarının yüksek olması, bu agregalarla üretilen beton karışımlarının birim ağırlıklarının yüksek değerler almasını sağlamaktadır. Bazalt agregası ile üretilmiş betonların birim ağırlıklarının daha yüksek, kuvarsit agregası ile üretilmiş betonların ise birim ağırlıklarının daha düşük olması beklenen bir sonuçtur. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, yayılma değerleri 65-76 cm arasında değişirken su/çimento oranı, kimyasal katkı yüzdesi ve agrega türüne göre faklılık göstermiştir.



Şekil 3.1: Serbest Yayılma Deneyi Sonuçları

Şekil 3.2 incelendiğinde ise, yayılma sürelerinin, çimento dozajının %3'ü kadar kimyasal katkı kullanılan 0,26 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında üretilen beton karışımlarında en yüksek, %1'i kadar kimyasal katkı kullanılan, 0,34 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında üretilen beton karışımlarında ise en düşük değerleri aldığı görülmektedir. Yayılma miktarları tüm beton serileri için belirli aralıkta kalırken, artan su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı ve buna paralel olarak azaltılan kimyasal katkı yüzdeleri değişimleriyle viskozitenin azaldığı sonucu da T_{50} sürelerindeki azalmalar göz önüne alınarak söylenebilir.



Şekil 3.2: Taze Betonların 50 cm Çapa Ulaşma Süreleri (T_{50})

3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

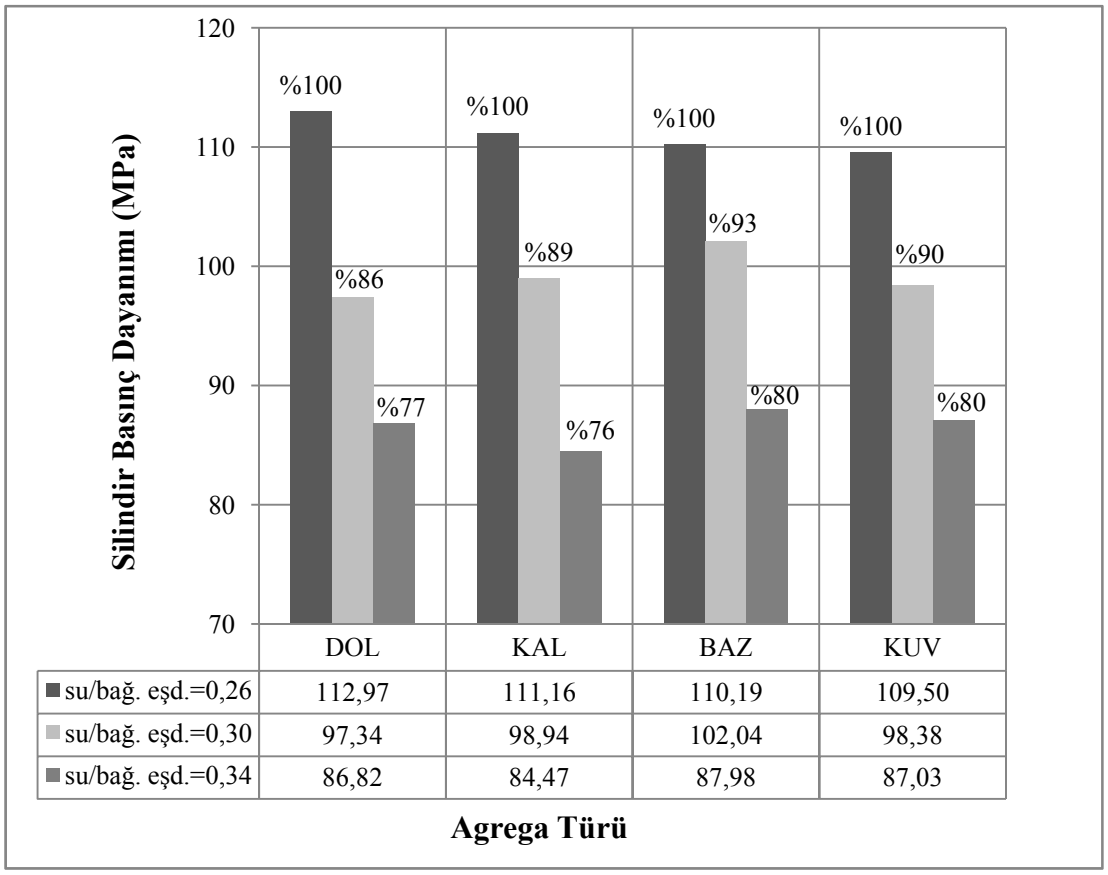
3.2.1. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Üretilen betonların 28 günlük silindir basınç dayanım deneyi sonuçları Tablo 3.2'de verilmiştir. Tablo 3.2 incelendiğinde en düşük 84,47 MPa, en yüksek 112,97 MPa basınç dayanımına sahip betonlar üretildiği görülmektedir.

Tablo 3.2: 28 Günlük Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Beton Kodu	Ort. 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
DOL 0,26	112,97
DOL 0,30	97,34
DOL 0,34	86,82
KAL 0,26	111,16
KAL 0,30	98,94
KAL 0,34	84,47
BAZ 0,26	110,19
BAZ 0,30	102,04
BAZ 0,34	87,98
KUV 0,26	109,50
KUV 0,30	98,38
KUV 0,34	87,03

Üretilen betonların 28. günde yapılan basınç dayanımı deneyi sonuçları, her bir agrega türü için üç farklı su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında, kendi agrega gruplarında incelenmiştir. Üretilen tüm betonların 28 günlük silindir basınç dayanımları ve bağıl basınç dayanım değerleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

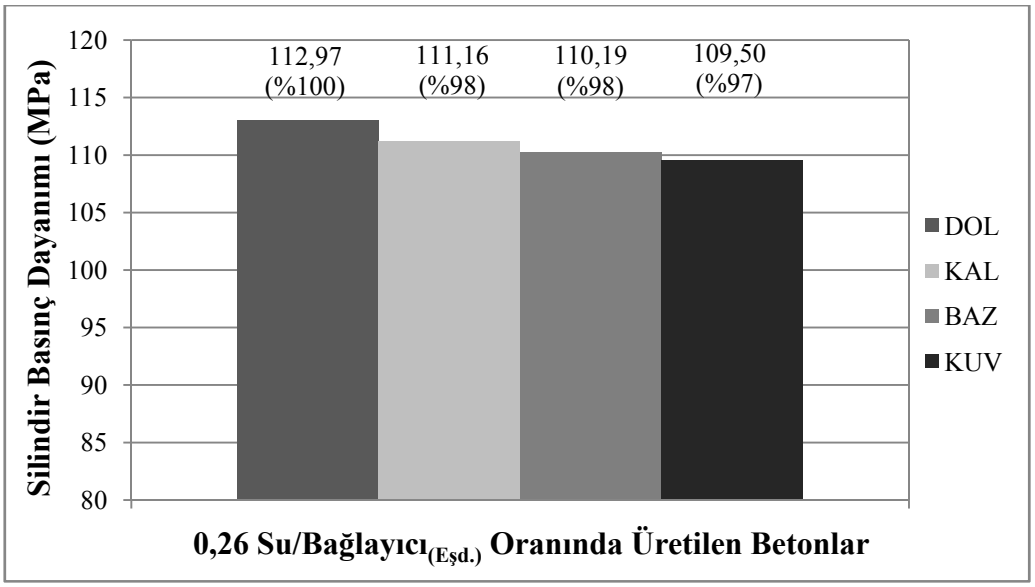


Şekil 3.3: 28 Günlük Silindir Basınç Dayanımı Sonuçları

Şekil 3.3 incelendiğinde;

- Dolomit (DOL) serisi betonlarında, su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı 0,26'dan 0,34'e yükseldiğinde basınç dayanımının %23,
- Kalker (KAL) serisi betonlarında, su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı 0,26'dan 0,34'e yükseldiğinde basınç dayanımının %24,
- Bazalt (BAZ) serisi betonlarında, su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı 0,26'dan 0,34'e yükseldiğinde basınç dayanımının %20,
- Kuvarsit (KUV) serisi betonlarında, su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı 0,26'dan 0,34'e yükseldiğinde basınç dayanımının %20 azaldığı görülmektedir.

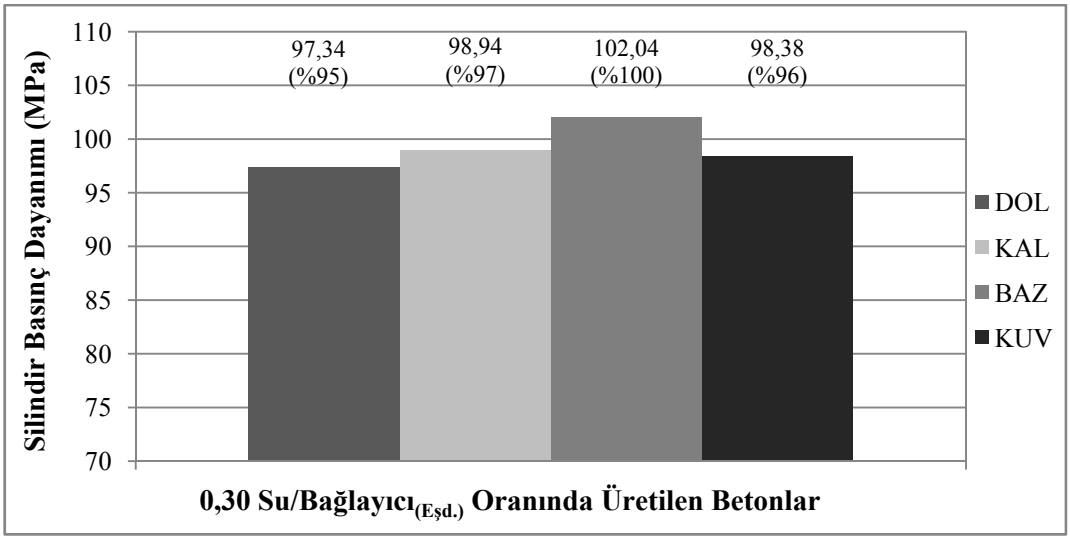
Ayrıca 28 günlük basınç deneyleri doğrultusunda dört farklı tür agreganın aynı su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı kullanılarak üretilen serilerinin basınç dayanımları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar ve bağıl basınç dayanımları Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.4: 0,26 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları

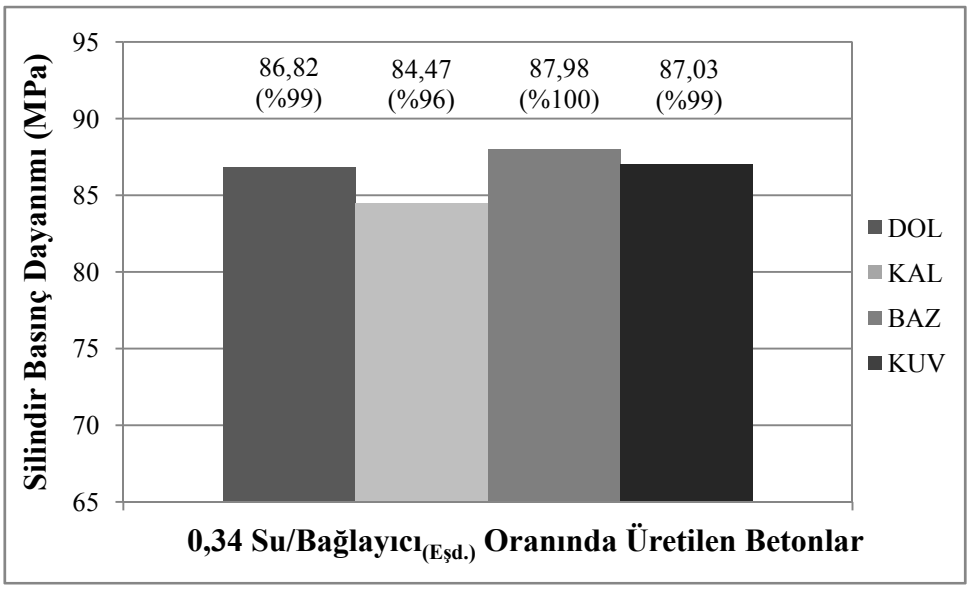
Şekil 3.4'te görüldüğü gibi 0,26 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında farklı kökenli agregalar kullanılarak üretilen beton serilerinde en yüksek basınç dayanımı dolomit agregasıyla elde edilmiştir. Dolomit agregasına göre kalker agregası %2, bazalt agregası %2, kuvarsit agregası ise % 3 daha düşük beton basınç dayanımı vermiştir. Ancak bu grupta incelenen tüm numuneler birlikte düşünüldüğünde, 28 günlük basınç dayanımlarının birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi 0,30 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında farklı kökenli agregalar kullanılarak üretilen beton serilerinde en yüksek basınç dayanımı bazalt agregasıyla elde edilmiştir. Bazalt agregasına göre kalker agregası %3, kuvarsit agregası %4, dolomit agregası ise %5 daha düşük beton basınç dayanımı vermiştir.



Şekil 3.5: 0,30 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, 0,34 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında farklı kökenli agregalar kullanılarak üretilen beton serilerinde en yüksek basınç dayanımı bazalt agregasıyla elde edilmiştir. Bazalt agregasına göre dolomit agregası %1, kuvarsit agregası %1, kalker agregası ise %4 daha düşük beton basınç dayanımı vermiştir.

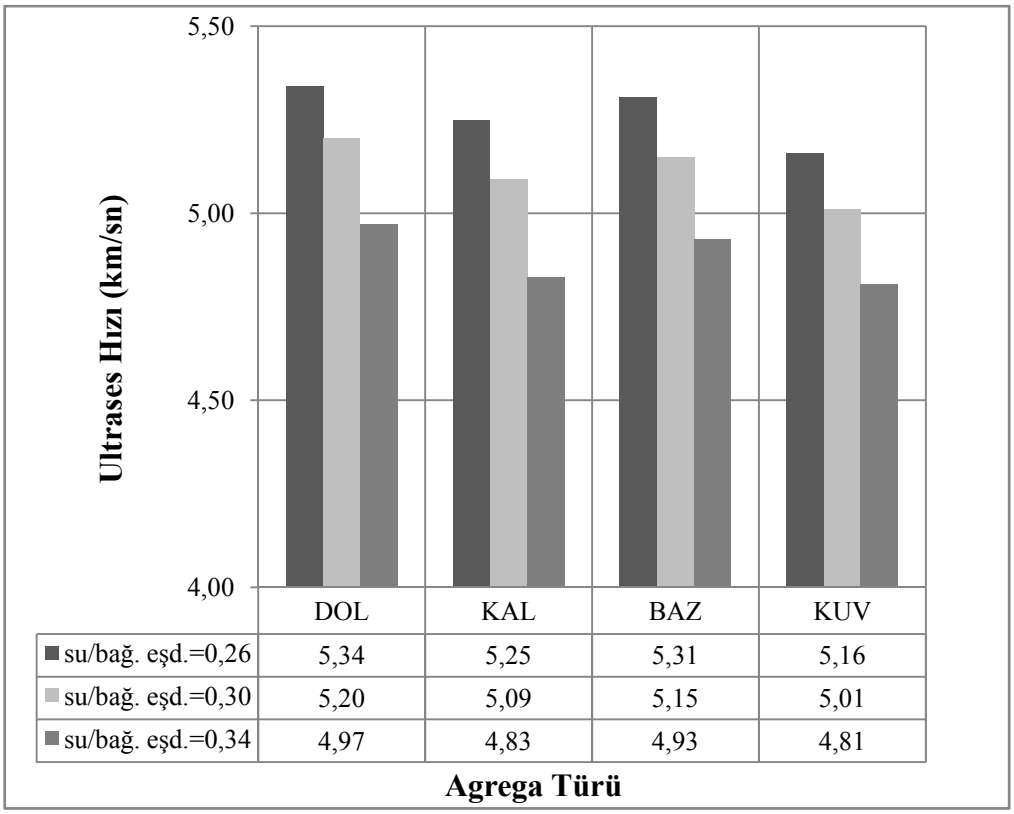


Şekil 3.6: 0,34 Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranında 28 Günlük Beton Basınç Dayanımları

3.2.2. Ultrases Hızı Deneyi Sonuçları

Üretilen betonlardan alınan silindir numuneler üzerinde 28. günde basınç dayanımı deneyi öncesinde ultrases hızı deneyi yapılmış ve sonuçları Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, tüm beton serileri için dolomit ve bazalt agregalarıyla üretilen beton karışımlarında ultrases hızları birbirlerine yakın yüksek değerler alırken, kalker ve kuvarsit agregalarıyla üretilen beton serileri ise dolomit ve bazalt agregalarıyla üretilenlere göre biraz daha düşük değerler vermiştir. Apaydın M.S. [90], bazalt, dolomit, kumtaşı, mavi ve beyaz kalker agregalarının kırma kum ve kırmataşlarını birlikte kullanarak ürettiği küp numuneler üzerinde yaptığı deneylerde yine benzer şekilde en yüksek ultrases hızını dolomit agregayla elde etmiştir. Ayrıca bu çalışmada tüm beton serileri arasında en yüksek basınç dayanımı en yüksek ultrases hızına sahip olan DOL 0,26, en düşük basınç dayanımı ise yine KUV 0,34 serisi ile birlikte en düşük iki ultrases hızından birine sahip olan KAL 0,34 beton serisiyle elde edilmiştir. Su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranının yükselmesi ve buna bağlı olarak beton içindeki boşlukların artması da ultrases hızını düşüren faktörlerdir.

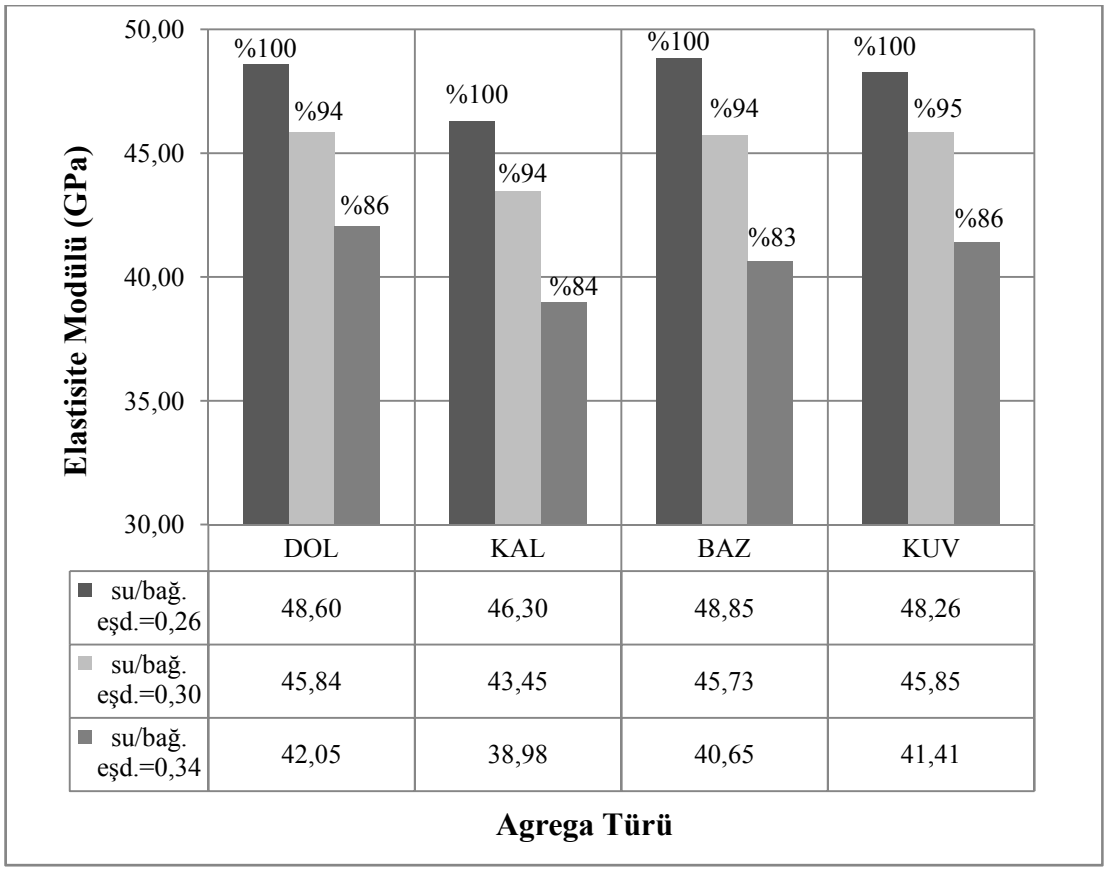


Şekil 3.7: 28 Günlük Ultrases Hızları

3.2.3. Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları

Üretilen numunelere uygulanan elastisite modülü deneyleri sonucunda elde edilen elastisite modülü ve bağıl elastisite modülü değerleri Şekil 3.8'de verilmiştir.

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, aynı su/çimento oranına sahip beton karışımları birlikte değerlendirildiğinde, kalker kırmataşı ve kırma kumu içeren beton karışımları diğerlerine nazaran biraz daha düşük elastisite modülü sonuçları vermiştir. Ayrıca beton sınıfları olarak, 0,26 ve 0,30 su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranında üretilen tüm beton serileri birlikte düşünüldüğünde 28 günlük elastisite modülü değerlerinin 43,45-48,85 GPa aralığında olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, Mutlu M. ve diğ. [91], kalker, kuvarsit, dolomit, bazalt ve diyorit kırma kum ve kırmataşlarını (kırmataş I) kullanarak C100/115 sınıfı beton tasarımı üzerine yapmış oldukları çalışmalarında 28 günlük elastisite modülü değerlerinin 42-50 GPa aralığında değiştiği sonucuna ulaşmışlardır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.3 birlikte incelendiğinde ise, elastisite modülündeki bağıl artışın, basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8: Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları

3.3. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

3.3.1. Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

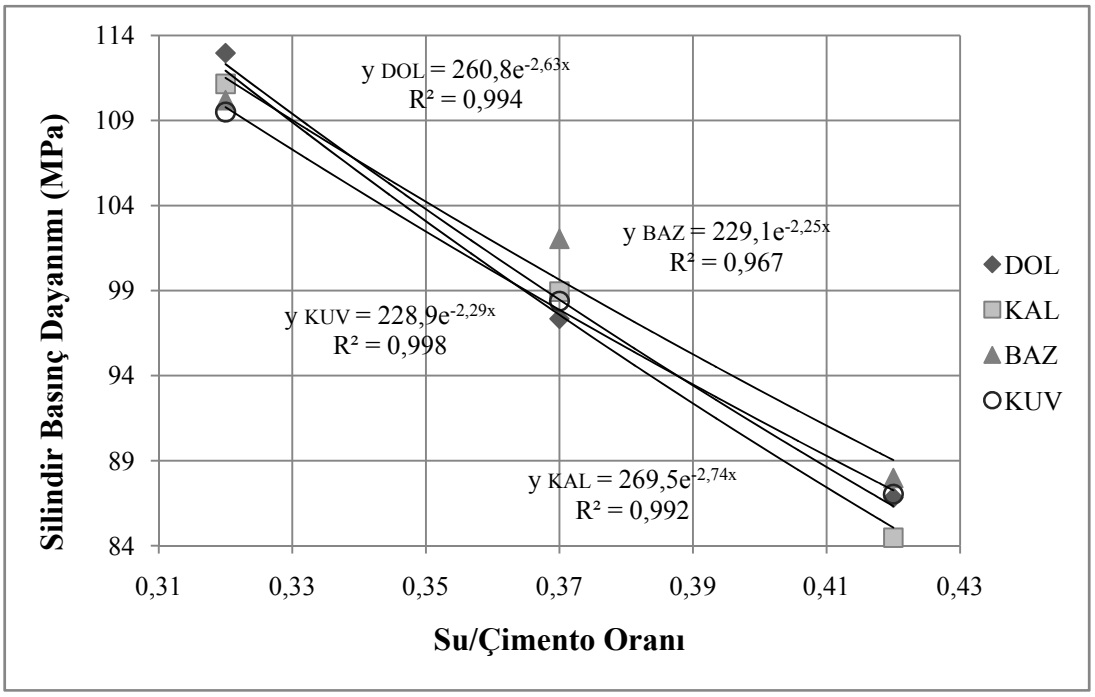
Su/çimento (w/c) oranı ile silindir basınç dayanımı arasındaki bağıntılar Şekil 3.9'dan elde edilmiştir. Şekil 3.9 incelendiğinde, basınç dayanımının su/çimento oranının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Silindir basınç dayanımıyla (f_c) su/çimento (w/c) oranı arasındaki bağıntılar yardımıyla bulunan korelasyon katsayıları, dolomit kullanılan beton serileri için R= 0,997, kalker kullanılan beton serileri için R= 0,996, bazalt kullanılan beton serileri için R= 0,983, kuvarsit kullanılan beton serileri için ise R= 0,999 şeklinde elde edilmiştir.

$$f_{cDOL} = 260{,}8.e^{-2{,}63(w/c)} \quad \textbf{(3.1)}$$

$$f_{cKAL} = 269{,}5.e^{-2{,}74(w/c)} \quad \textbf{(3.2)}$$

$$f_{cBAZ} = 229{,}1.e^{-2{,}25(w/c)} \quad \textbf{(3.3)}$$

$$f_{cKUV} = 228{,}9.e^{-2{,}29(w/c)} \quad \textbf{(3.4)}$$



Şekil 3.9: Su/Çimento Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

3.3.2. Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

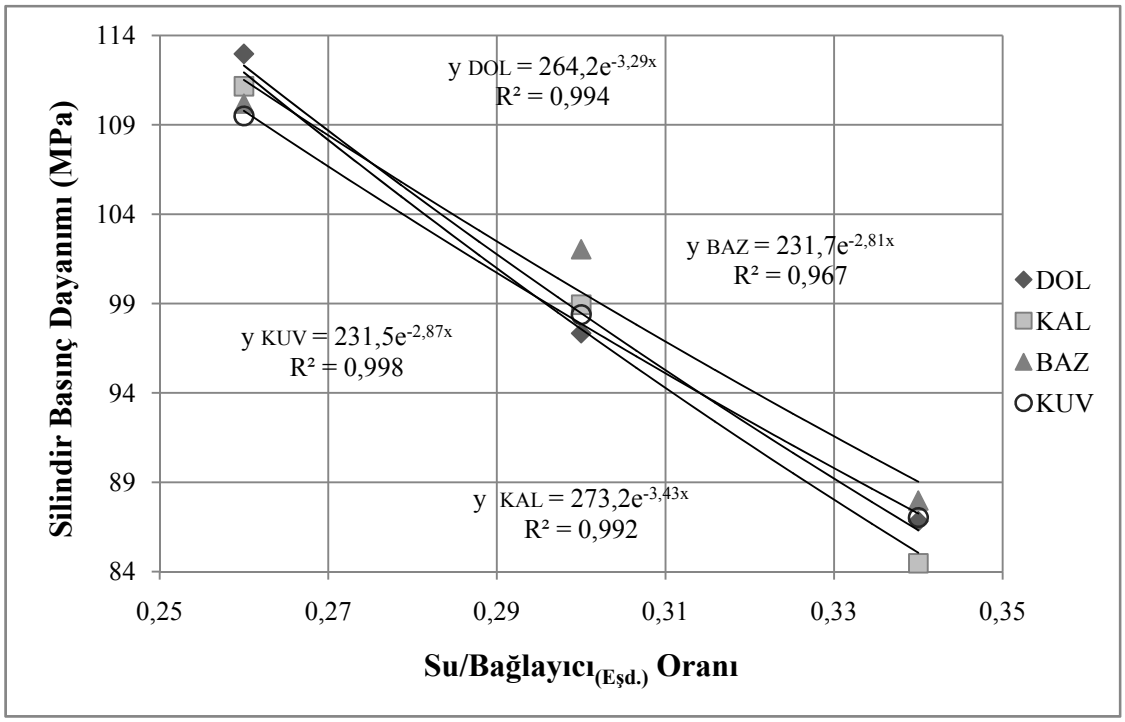
Su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ (w/b) oranıyla silindir basınç dayanımları arasındaki bağıntılar Şekil 3.10'dan elde edilmiştir. Basınç dayanımının, su/çimento oranıyla olan ilişkisine benzer şekilde, su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranının artmasıyla azaldığı Şekil 3.10'da görülmektedir. Silindir basınç dayanımıyla su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı arasındaki bağıntılar yardımıyla bulunan korelasyon katsayıları, dolomit kullanılan beton serileri için R= 0,997, kalker kullanılan beton serileri için R= 0,996, bazalt kullanılan beton serileri için R= 0,983, kuvarsit kullanılan beton serileri için ise R= 0,999 şeklinde elde edilmiştir.

$$f_{cDOL} = 264{,}2.e^{-3{,}29(w/b)} \quad \textbf{(3.5)}$$

$$f_{cKAL} = 273{,}2.e^{-3{,}43(w/b)} \quad \textbf{(3.6)}$$

$$f_{cBAZ} = 231{,}7.e^{-2{,}81(w/b)} \quad \textbf{(3.7)}$$

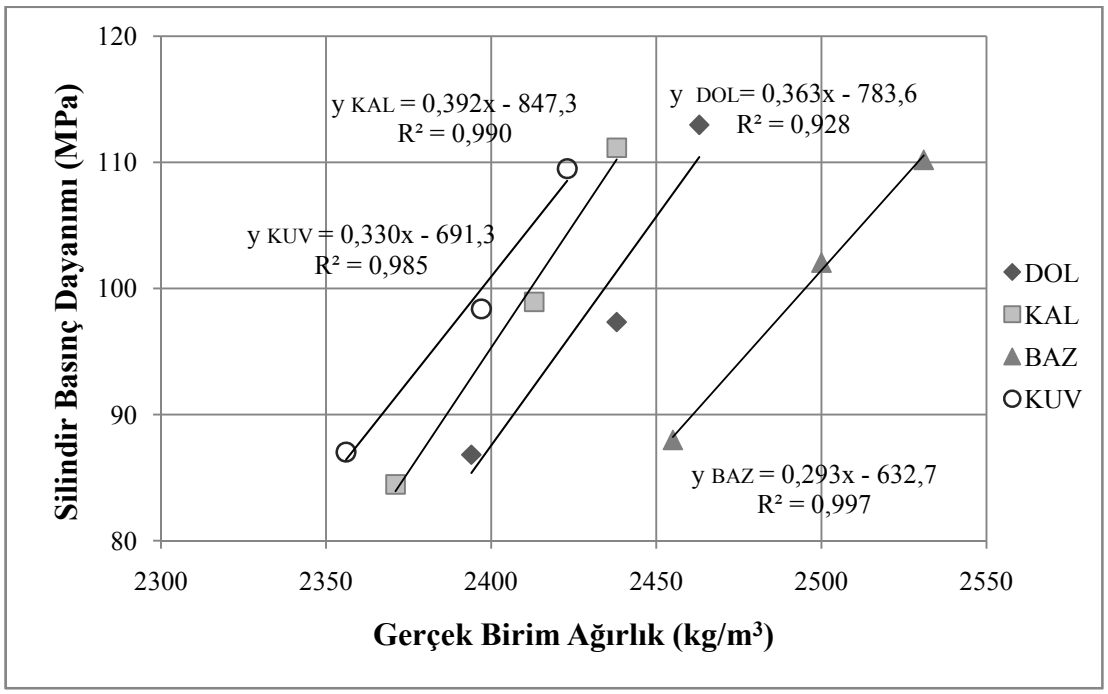
$$f_{cKUV} = 231{,}5.e^{-2{,}87(w/b)} \quad \textbf{(3.8)}$$



Şekil 3.10: Su/Bağlayıcı$_{(Eşd.)}$ Oranı ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

3.3.3. Birim Ağırlık ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Taze beton birim ağırlık deney sonuçları ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11: Gerçek Birim Ağırlık ile Silindir Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Şekil 3.11'de görüldüğü gibi birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı da artmaktadır. Birim ağırlığı diğer agregalara göre daha düşük olan kuvarsit agregası kullanılarak üretilen beton karışımlarıyla da yüksek basınç mukavemeti elde edilebileceği Şekil 3.11'den anlaşılmaktadır. Silindir basınç dayanımı ile gerçek birim ağırlık arasındaki bağıntılar yardımıyla bulunan korelasyon katsayıları, dolomit kullanılan beton serileri için R= 0,963, kalker kullanılan beton serileri için R= 0,995, bazalt kullanılan beton serileri için R= 0,998, kuvarsit kullanılan beton serileri için ise R= 0,992 şeklinde elde edilmiştir. Birim ağırlıkla basınç dayanımı arasındaki bağıntılar, f_c, N/mm^2 cinsinden silindir basınç dayanımını, α ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermek üzere aşağıda belirtilmiştir.

$$f_{cDOL} = 0{,}363\alpha - 783{,}6 \quad \textbf{(3.9)}$$

$$f_{cKAL} = 0{,}392\alpha - 847{,}3 \quad \textbf{(3.10)}$$

$$f_{cBAZ} = 0{,}293\alpha - 632{,}7 \quad \textbf{(3.11)}$$

$$f_{cKUV} = 0{,}330\alpha - 691{,}3 \quad \textbf{(3.12)}$$

3.3.4. Basınç Dayanımı ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki

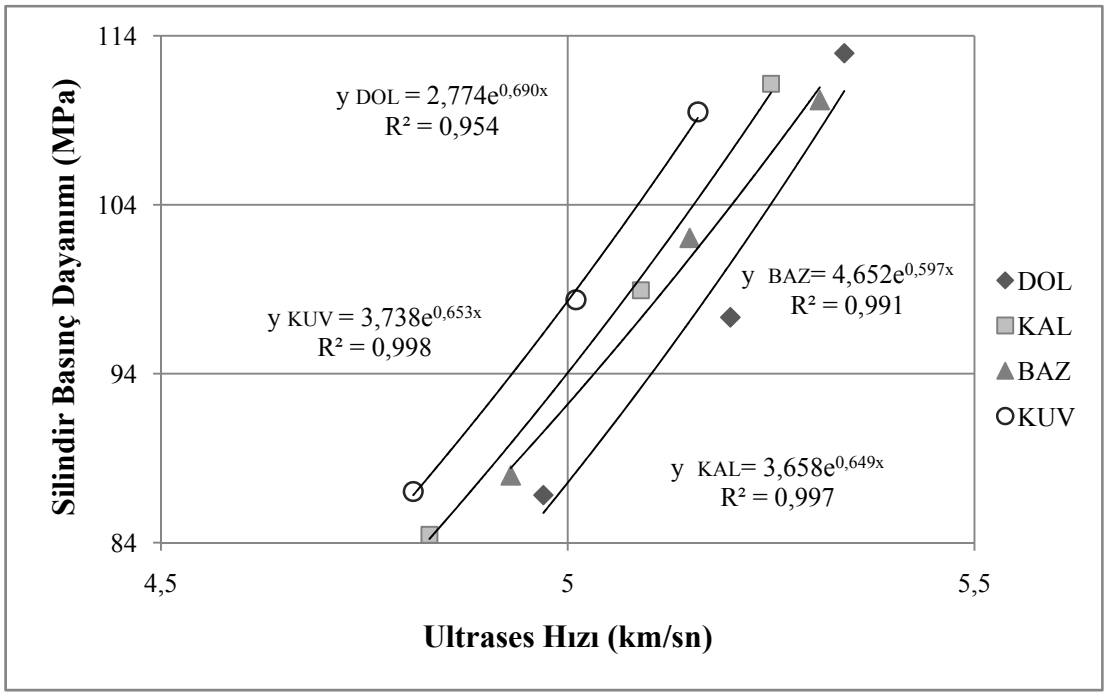
Basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki bağıntılar Şekil 3.12'den elde edilmiştir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi ultrases hızı basınç dayanımının artması ile artmaktadır. Farklı tür agregalar kullanılarak üretilen beton serileri için elde edilen basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki bağıntılar, f_c N/mm^2 cinsinden silindir basınç dayanımını, V ise km/sn cinsinden ultrases hızını göstermek üzere (3.13), (3.14), (3.15) ve (3.16) denklemleriyle belirtilmiştir. Silindir basınç dayanımı ile ultrases hızı arasındaki bağıntılar yardımıyla bulunan korelasyon katsayıları, dolomit kullanılan beton serileri için R= 0,977, kalker kullanılan beton serileri için R= 0,998, bazalt kullanılan beton serileri için R= 0,995, kuvarsit kullanılan beton serileri için ise R= 0,999 şeklinde elde edilmiştir.

$$f_{cDOL} = 2{,}774.e^{0{,}690V} \quad \textbf{(3.13)}$$

$$f_{cKAL} = 3{,}658.e^{0{,}649V} \quad \textbf{(3.14)}$$

$$f_{cBAZ} = 4{,}652.e^{0{,}597V} \quad \textbf{(3.15)}$$

$$f_{cKUV} = 3{,}738.e^{0{,}653V} \quad \textbf{(3.16)}$$



Şekil 3.12: Basınç Dayanımı ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki

3.3.5. Elastisite Modülü ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki

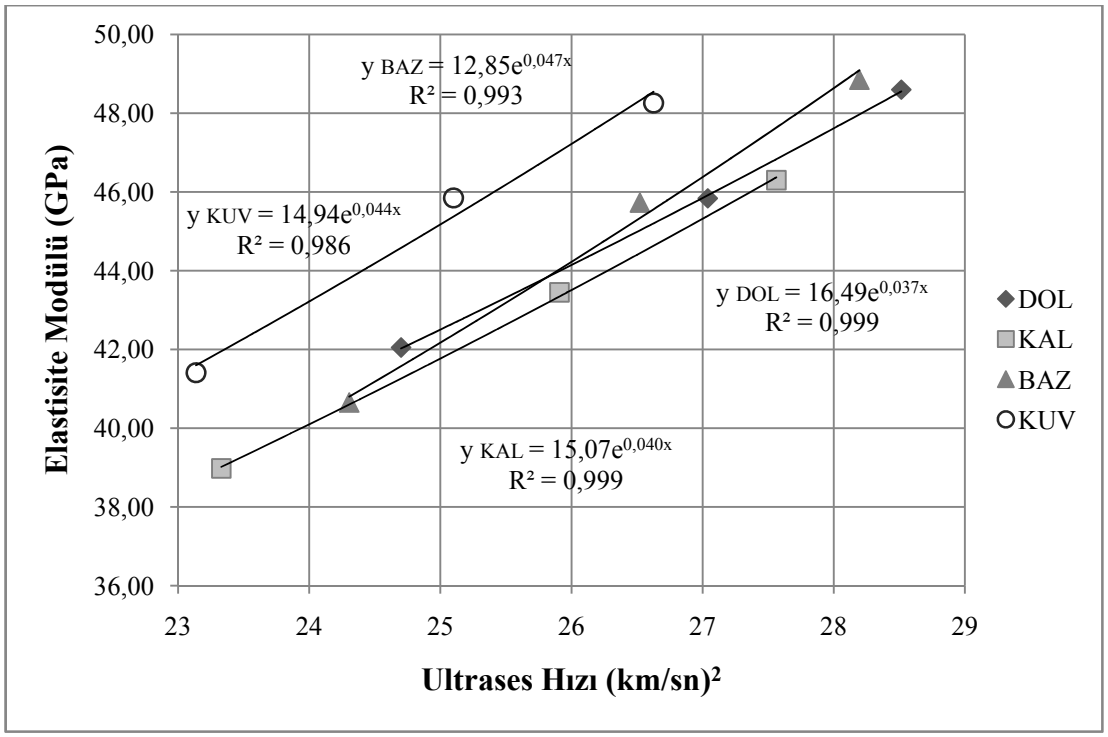
Ultrases hızı ile elastisite modülü arasındaki ilişki Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Şekil 3.13 incelendiğinde ultrases hızı arttıkça elastisite modülünün de arttığı görülmektedir. Burada ultrases hızının karesiyle elastisite modülü arasındaki ilişkiler kurulmuş, korelasyon katsayıları, dolomit kullanılan beton serileri için R= 0,999, kalker kullanılan beton serileri için R= 0,999, bazalt kullanılan beton serileri için R= 0,996, kuvarsit kullanılan beton serileri için ise R=0,993 olarak bulunmuştur. Farklı kökenli agregalar kullanılarak üretilen beton serileri için elde edilen elastisite modülü ile ultrases hızının karesi arasındaki ilişkiler, E, GPa cinsinden elastisite modülünü, V^2 ise $(km/sn)^2$ cinsinden ultrases hızını göstermek üzere (3.17), (3.18), (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla verilmiştir.

$$E_{DOL} = 16{,}49 . e^{0{,}037V^2} \quad \textbf{(3.17)}$$

$$E_{KAL} = 15{,}07 . e^{0{,}040V^2} \quad \textbf{(3.18)}$$

$$E_{BAZ} = 12{,}85 . e^{0{,}047V^2} \quad \textbf{(3.19)}$$

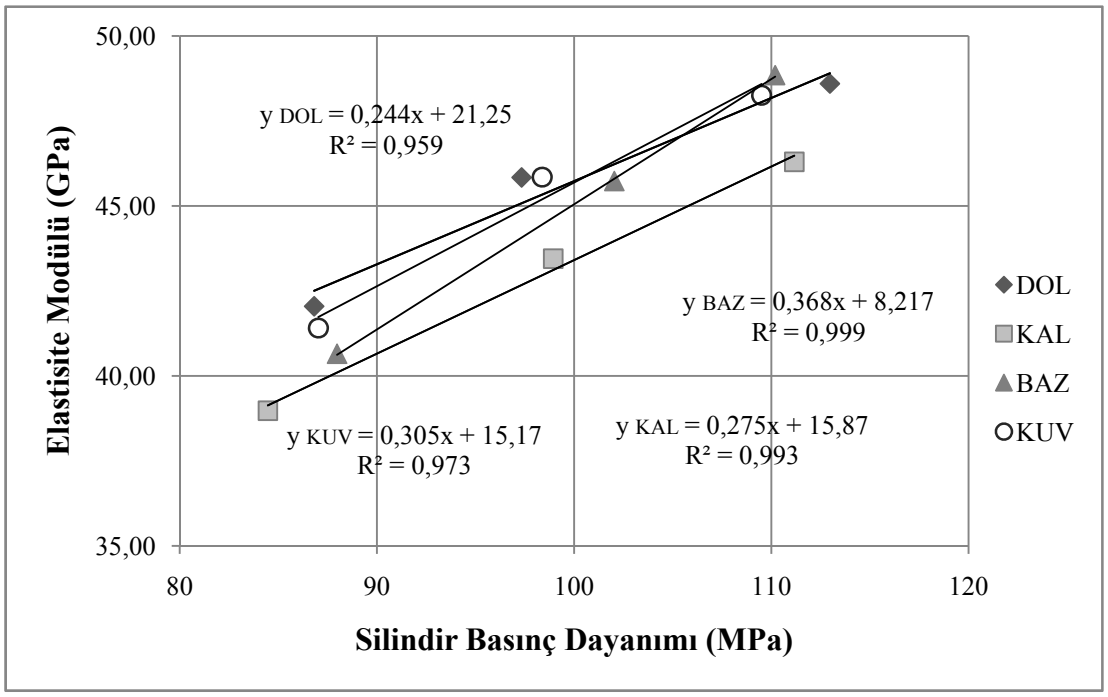
$$E_{KUV} = 14{,}94 . e^{0{,}044V^2} \quad \textbf{(3.20)}$$



Şekil 3.13: Elastisite Modülü ile Ultrases Hızı Arasındaki İlişki

3.3.6. Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

Basınç dayanımı ile elastisite modülü ve basınç dayanımının karekökü ile elastisite modülü arasındaki bağıntılar sırasıyla Şekil 3.14a ve Şekil 3.14b'de verilmiştir.



Şekil 3.14a: Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

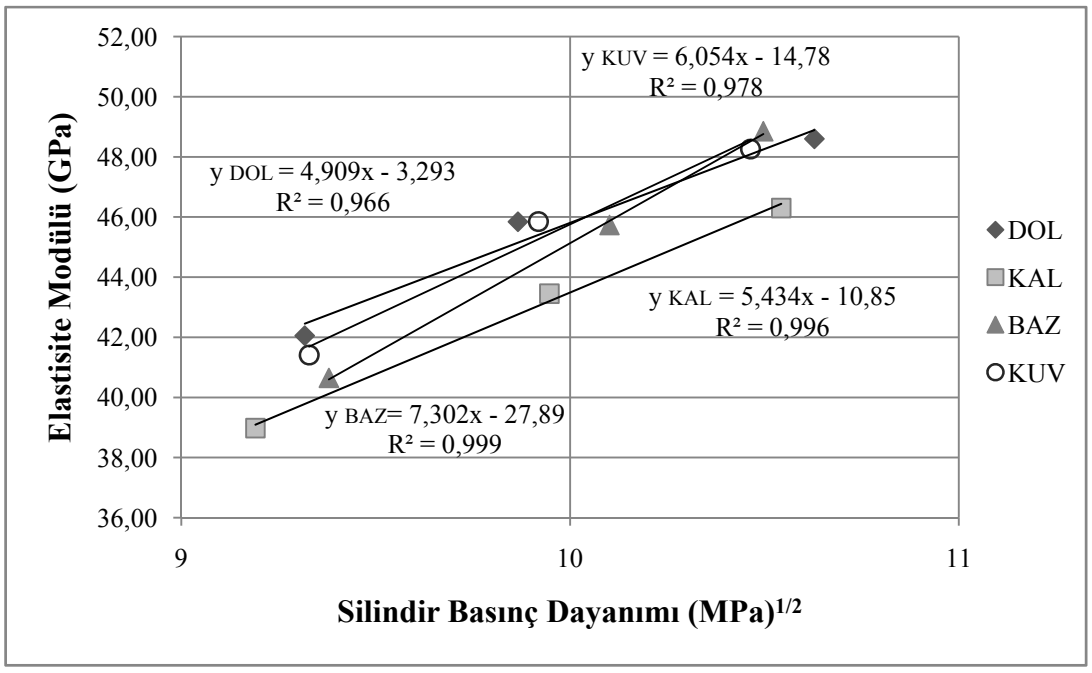
Şekil 3.14a'da görüldüğü gibi basınç dayanımının artmasıyla elastisite modülü yükselmektedir. Şekil 3.14a'dan elde edilen basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiler, E, GPa cinsinden elastisite modülünü, f_c, N/mm^2 cinsinden silindir basınç dayanımını göstermek üzere (3.21), (3.22), (3.23) ve (3.24) bağıntılarıyla verilmiştir.

$$E_{DOL} = 0{,}244\ f_{cDOL} + 21{,}25 \quad \textbf{(3.21)}$$

$$E_{KAL} = 0{,}275\ f_{cKAL} + 15{,}87 \quad \textbf{(3.22)}$$

$$E_{BAZ} = 0{,}368\ f_{cBAZ} + 8{,}217 \quad \textbf{(3.23)}$$

$$E_{KUV} = 0{,}305\ f_{cKUV} + 15{,}17 \quad \textbf{(3.24)}$$



Şekil 3.14b: Basınç Dayanımının Karekökü ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

Şekil 3.14b'den elde edilen basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiler ise (3.25), (3.26), (3.27) ve (3.28) bağıntılarıyla verilmiştir.

$$E_{DOL} = 4{,}909\ \sqrt{f'_{cDOL}} - 3{,}293 \quad \textbf{(3.25)}$$

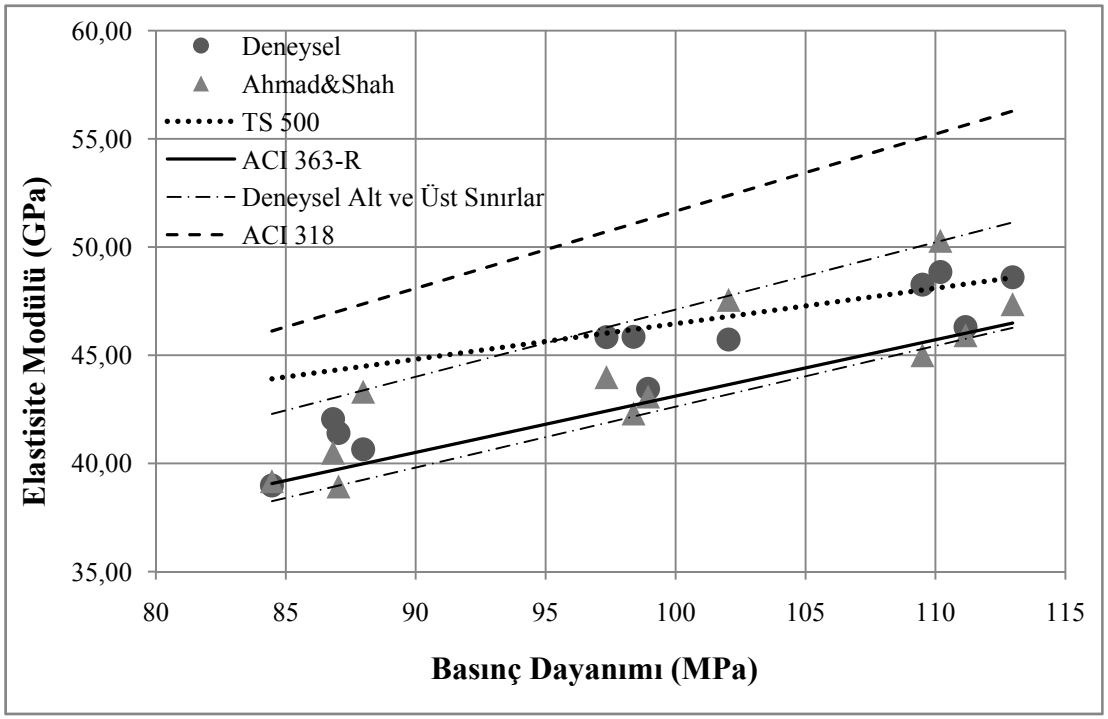
$$E_{KAL} = 5{,}434\ \sqrt{f'_{cKAL}} - 10{,}85 \quad \textbf{(3.26)}$$

$$E_{BAZ} = 7{,}302\ \sqrt{f'_{cBAZ}} - 27{,}89 \quad \textbf{(3.27)}$$

$$E_{KUV} = 6{,}054\ \sqrt{f'_{cKUV}} - 14{,}78 \quad \textbf{(3.28)}$$

Aynı zamanda, agregaların türleri arasında herhangi bir gruplandırma yapılmaksızın basınç dayanımı ile elastisite modülü arasındaki ilişkiler korelasyon katsayısı R^2=0,883 olmak üzere (3.29) bağıntısıyla ifade edilmiş, sonuçlar E_c, GPa cinsinden elastisite modülünü, f_c', MPa cinsinden silindir basınç dayanımını, w_c ise kg/m^3 cinsinden birim ağırlığı göstermek üzere sırasıyla (3.30), (3.31), (3.32) ve (3.33) bağıntıları ile verilen ACI 318, ACI 363-R, TS 500 ve Ahmad&Shah denklemleriyle karşılaştırılmıştır.

Deneysel	$E_c = 5{,}853\sqrt{f_c'} - 13{,}46$	**(3.29)**
ACI 318	$E_c = 0{,}043.w_c^{1,5}\sqrt{f_c'}.10^{-3}$	**(3.30)**
ACI 363-R	$E_c = (3320.\sqrt{f_c'} + 6900).(w_c/2320)^{1,5}.10^{-3}$	**(3.31)**
TS 500	$E_c = (3250.\sqrt{f_c'} + 14000).10^{-3}$	**(3.32)**
Ahmad&Shah	$E_c = 3{,}385.w_c^{2,5}.(f_c')^{0,325}.10^{-8}$	**(3.33)**



Şekil 3.14c: Deneysel Elastisite Modüllerinin Literatürle Karşılaştırılması

Şekil 3.14c'de görüldüğü gibi deney sonuçları ACI 318 ve ACI 363-R formülleri ile hesaplanan değerler arasında kalmaktadır. Basınç dayanımı değerleri 85 MPa'dan daha düşük olan betonlar için önerilen ACI 318 denklemi, deneysel yolla elde edilen yüksek mukavemetli betonların elastisite modüllerini daha yüksek tahmin etmiştir. Bu çalışma için, deneysel yolla elde edilen değerlerin alt sınırına çok yakın bir yol

izleyen ACI 363-R denklemi uygulanabilir bir yöntem olarak değerlendirilebilir. TS 500, 85-95 MPa aralığında elastisite modülü değerlerini biraz daha yüksek tahmin ederken, 95 MPa basınç dayanımının üzerinde daha yakın tahminde bulunmuştur. Ayrıca, Ahmad ve Shah tarafından önerilen tahmin modeliyle elde edilen değerler, deneysel verilerin alt ve üst sınırları arasında kalırken birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

4. GENEL SONUÇLAR

Yapılan deneysel çalışma sınırları içinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

4.1. Taze Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar

- Kullanılan agregaların kökenlerinden dolayı, özgül ağırlığı yüksek olan agregaların betonda kullanılmasıyla birim ağırlığı daha yüksek olan beton karışımları elde edilmiştir.
- Yayılma değerleri, tüm beton karışımları için belirli sınırlar içinde kalırken su/çimento oranı, kimyasal katkı yüzdesi ve kullanılan agreganın türüne göre faklılıklar göstermiştir.

4.2. Sertleşmiş Beton Özellikleri ile İlgili Sonuçlar

- Tüm agrega türleriyle üretilen beton karışımları kendi içinde değerlendirildiğinde, betonun birim ağırlığının artmasıyla basınç dayanımı, ultrases hızı ve elastisite modülü değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Özgül ağırlığı kullanılan diğer agregalara göre daha düşük olan kuvarsit agregasıyla da yüksek beton basınç dayanımlarına ulaşılabileceği görülmüştür.
- Betonda su/bağlayıcı$_{(eşd.)}$ oranı ve su/çimento oranı arttıkça basınç dayanımı, elastisite modülü ve ultrases hızı azalmaktadır.
- Basınç dayanımının artmasıyla elastisite modülünün de arttığı, ayrıca, elastisite modülündeki bağıl artışın, basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğu görülmüştür.
- Kalker kullanılarak üretilen tüm beton karışımları birlikte düşünüldüğünde, elastisite modüllerinin aynı su/çimento oranlarında dolomit, bazalt ve kuvarsit kullanılan betonlara göre biraz daha düşük değerler aldığı görülmüştür.

- TS 500, 85-95 MPa aralığında elastisite modülü değerlerini biraz daha yüksek tahmin ederken, 95 MPa basınç dayanımının üzerinde daha yakın tahminde bulunmuştur.
- Deneysel yolla bulunan elastisite modülü değerleri, basınç dayanımları 85 MPa'dan daha düşük olan betonlar için önerilen ACI 318 denklemi ile daha yüksek tahmin edilirken, deneysel verilerin alt sınırına çok yakın bir yol izleyen ACI 363-R denklemi bu çalışma için uygulanabilir bir yöntem olarak yüksek mukavemetli betonların elastisite modüllerini ACI 318'e göre daha yakın tahmin etmiştir.
- Ahmad ve Shah tarafından önerilen tahmin modeliyle elde edilen değerler, deneysel verilerin alt ve üst sınırları arasında kalırken birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Erdoğan, T.Y.,** 1995. Betonu Oluşturan Malzemeler Agregalar, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.

[2] **Taşdemir, C.,** 2001. Agrega Tür ve Boyutunun Beton Performansına Etkisi, *THBB Hazır Beton,* Mart-Nisan, İstanbul.

[3] **Yalçın, H., Gürü, M.,** 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, Ankara.

[4] **Erdoğan, T.Y.,** 2003. Beton, O.D.T.Ü. Geliştirme Vakfı Yayıncılık, Ankara.

[5] **Popovics, S.,** 1979. Concrete-Making Materials, Hemisphere Publishing Corporation, Washington.

[6] **Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Yılmaz, A.O.,** 2006. Beton Agregaları, Çözümlü Problemler ve Bilgi Föyleri, Evrim Yayınevi, İstanbul.

[7] **Oktar, O.N.,** 1984. Beton ve Harçların Basınç Altındaki Kısa Süreli Davranışında Çimento Hamuru Yapısı ve Agrega Granülometrisinin Etkileri, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

[8] **Akman, M.S.,** 1990. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

[9] **Postacıoğlu, B.,** 1987. Beton, Cilt II, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

[10] **Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M.,** 2004. Her Yönüyle Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.

[11] **Özturan, T., Çeçen, C.,** 1997. Effect of Aggregate Type on the Mechanical Properties of Concretes with Different Strengths, *Cement and Concrete Research,* **27,** No.2, pp.165-170.

[12] **Alexander, M.G., Milne, T.I.,** 1995. Influence of Cement Blend and Aggregate Type on Stress-Strain Behavior and Elastic Modulus of Concrete, *ACI Materials Journal,* **V.92,** May-June, pp.227-235.

[13] **Murdock, L.J., Brook, K.M., Dewar, J.D.,** 1991. Concrete Materials & Practice, Edward Arnold, A Division of Hodder & Stoughton, London.

[14] **Yeğinobalı, A.,** 1999. Betonun İç Yapısı, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Notları,* No.3, Ankara.

[15] **Tasong, W.A., Lynsdale, C.J., Crpp, C.,** 1998. Aggregate-Cement Paste Interface II: Influence of Aggregates Physical Properties, *Cement and Concrete Research,* **28,** pp.1453-1465.

[16] **Taşdemir, C. et al.,** 1998. The Influence of Aggregate Type on the Mechanical Properties of Concrete, *Proceeding of the 12th ERMCO Congress,* Lisbon, 23-26 June, pp.633-640.

[17] **Taşdemir, M.A., Şengül, Ö., Sönmez, R.,** 2003. Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimliliği, *5. Ulusal Beton Kongresi,* TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, 1-3 Ekim, s.75-85.

[18] **Yüzer, N.,** 1998. Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması, *Doktora Tezi,* Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Massazza, F.,** 1989. Puzolanlar*, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, 11-12 Mayıs, Ankara, 1-60.

[20] **Postacıoğlu, B.,** 1986. Beton, Cilt I, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

[21] **Kocataşkın, F.,** 1959. Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

[22] **Neville, A.M., Brooks, J.J,** 1987. Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, pp.275-282, New York.

[23] **Grace Construction Product,** FORCE-10.000, Microsilica, High Strength Concrete Admixture.

[24] **Tayrol, M.A., Tai, M.K., Ramey, M.R.,** 1975. Biaxial Compressive Behaviour of Fibre Reinforced Mortar, *ACI Journal,* **V.72,** issue 9, pp.496-501.

[25] **Wolsiefer, J., Sivasundaram, V., Malhotra, V.M., Carette, G.G.,** 1995. Performance of Concretes Incorporation Various Forms of Silica Fume, *5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete,* Milwaukee, June 4-9, pp.591-656.

[26] **Khayat, K.H., Aitcin, P.C.,** 1992. Silica Fume in Concrete - An Overview, *4th CANMET/ACI International Conference on the Use of Fly Ash, Silica*

Fume, *Slag and Natural Pozzolans in Concrete,* Istanbul, May 3-8, pp.835-872.

[27] **Swamy, R.N., Laiw, J.C.,** 1995. Effectiveness of Supplementary Cementing Materials in Controlling Chloride Penetration into Concrete, *5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, *Milwaukee,* June 4-9, pp.657-674.

[28] **Hope, B.B., Ip, A.K.C.,** 1988. Grout for Post-Tensioning Ducts, *American Concrete Institute Materials Journal,* July-August, **V.85,** issue 4, pp.234-240.

[29] **Gonçalves, A.,** 1992. Influence of Portuguese Silica Fume on the Behaviour of Concrete without Admixtures, *4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete,* Istanbul, May 3-8, pp.283-297.

[30] **Elkem Materials,** Elkem Mikrosilika Teknolojisi ile Yüksek Performanslı Beton.

[31] **Berry, E.E., Malhotra, V.M.,** 1986. Fly Ash in Concrete, CANMET, SP 85-3, 178 pp.

[32] **ASTM C 618-85:** 1985. Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland *Cement Concrete, ASTM*, Philadelphia.

[33] **Aitcin, P.C., Autefage, F., Carles-Gibergues, A.,** 1986. Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes, *2nd CANMET/ACI International Conference on Slica Fume, Fly Ash, Slag and Natural Pozzolans in Concrete,* Madrid, pp.91-114.

[34] **Monzo, J., Paya, J., Peris-Mora, E.,** 1994. A Preliminary Study of Fly Ash Granulometric Influence on Mortar Strength, *Cement and Concrete Research,* **V.24,** No.4, pp.791-796.

[35] **Demir, M., Erenoglu, T., Ekim, H., Tasdemir, M.A.,** 2002. Effects of Fineness and Amount of Fly Ash on Strength Development of Concrete*, 5th International Congress on Advances in Civil Engineering,* Istanbul, September 25-27, pp.1349-1358.

[36] **Erdoğan, T.Y., Parla, B.,** 1993. Yüksek Kireçli Uçucu Küllerin Beton Basınç Dayanımları, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu,* Ankara, s.79-87.

[37] **Kılıçaslan, Y.,** 1984. Çimento Cinsleri, Özellikleri ve Betona Etkisi, *Beton Semineri,* D.S.İ., Ankara, s.29.

[38] **Xie, Y., Liu, B., Yin, J., Zhou, S.,** 2002. Optimum Mix Parameters of High Strength Self-Compacting Concrete with Ultrapulverized Fly Ash, *Cement and Concrete Research,* **32,** pp.477-480.

[39] **Kurita, M., Nomura, T.,** 1998. Highly-Flowable Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing Fly Ash, In: V.M. Malhotra (Ed.), ACI, SP-178, June, pp.159-175.

[40] **Beton Üretiminde Kullanılan Katkılar,** www.teknolojikarastirmalar.com/e-egitim/yapi_malzemesi/beton/3.4.HTM, 09.10.2007.

[41] **Doğan, Ü.A.,** 2000. Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[42] **Glenium51,** www.basf-yks.com.tr/TR/urunler/KatkiSistemleri/betonkatkilari, 09.10.2007.

[43] **TS EN 206-1,** 2002. Beton–Bölüm 1:Özellik, Performans, İmalat, ve Uygunluk, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara, Nisan.

[44] **Gürlek, O., Özturan, T.,** 1991. Kolonlarda Yüksek Mukavemetli Beton Kullanımının Maliyet Mukayeseli İncelenmesi, *2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton,* İstanbul, 27-30 Mayıs.

[45] **Özyurt, N.,** 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[46] **Türkel, E.B.,** 2002. Betonda Basınç Dayanımı ile Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[47] **Balta, İ.,** 1991. Yüksek Mukavemetli Beton ve Bileşenleri, *2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton,* İstanbul, 27-30 Mayıs.

[48] **Struble, L., Skalny, J., Mindness, S.,** 1986. A Review of the Cement-Aggregate Bond, *Cement and Concrete Research,* **V.10,** pp.277-286.

[49] **Skalny, J., Roberts, L.R.,** 1987. High Strength Concrete, *Ann. Rev. Mater. Sci.,* **V.17,** pp.35-56.

[50] **F.I.P.,** 1988. Condensed Silica Fume in Concrete, *FIP State of Art Report,* Th. Telford, London.

[51] **Yılmaz, K., Sümer, M., Uysal, M.,** 2005. Farklı Tür Akışkanlaştırıcı Katkıların Yüksek Dayanımlı Betonlar Üzerine Etkisi, *6. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Performanslı Betonlar,* İstanbul, 16-18 Kasım.

[52] **Uyan, M., Karagüler, M., Yücesoy, S.,** 1996. Süperakışkanlaştırıcı katkıların Portland Çimento Harçlarının Rötresine Etkisi, *4. Ulusal Beton Kongresi,* İstanbul, 30 Ekim-1 Kasım.

[53] **Neville, A.M.,** 1981. Properties of Concrete, 3rd ed., Pitman, London.

[54] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M.,** 2004. Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, *Beton 2004 Kongresi,* İstanbul, 10-12 Haziran.

[55] **Roberts, L.R.,** 1989. Microsilica in Concrete I, in Materials Science of Concrete V.1, edited by J.P. Skalny, American Ceramic Society, Westerville.

[56] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F.,** 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, *itüdergisi/d,* Cilt 1, Sayı 2, Aralık, İstanbul.

[57] **Erdoğdu, Ş.,** 2000. Compatibility of Superplasticizers with Cements Different in Composition, *Cement and Concrete Research,* **V.30,** pp.767-773.

[58] **Felekoğlu, B., Baradan, B.,** 2004. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özellikleri, *Beton 2004 Kongresi,* İstanbul, 10-12 Haziran.

[59] **Ozawa, K., et al.,** 1989. Development of High Performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, *2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction,* Chiang Mai, Thailand, January 11-13, pp.445-450.

[60] **Türk, K., Karataş, M., Ulucan, Z.Ç.,** 2006. Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri, *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi,* **18-4,** s.513-520.

[61] **Shindoh, T., Yokota, K., Yokoi, K.,** 1996. Effect of Mix Constituents on Rheological Properties of Super Workable Concrete, *Proceedings of The International RILEM Conference Production Methods and Workability of Concrete,* Paisley, Scotland, June 3-5, pp.263–270.

[62] **Skarendahl, A.,** 2000. State of the Art Report of RILEM Technical Committee, 174-SCC, *RILEM Report,* **23,** RILEM, Cachan Cedex, 3-5.

[63] **Tangtermsirikul, S., Khayat, K.** 2000. Fresh Concrete Properties, In: A. Skarendahl, O. Petersson (Eds.), *Self-Compacting Concrete, State-Of-The-Art Report Of RILEM Technical Committee,* 174-SCC, RILEM Report 23, *RILEM*, Cachan Cedex, 17-22.

[64] **Nocher, M.,** 2001. Flowing Smoothly And Quietly, *Advanced Concrete and Masonry Centre, Concrete Quarterly,* Spring 2001, UK, issue 198.

[65] **Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, Y.,** 1999. Effect of Rheological Parameters on Self Compactibility of Concrete Containing Various Mineral Admixtures, *Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete,* Stockholm, September 13-15, pp.523-535.

[66] **Grünewald, S., Walraven, J.C.,** 2001. Parameter-Study on the Influence of Stell Fibres and Coarse Aggregate Content on the Fresh Properties of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research,* **31,** pp.1793-1798.

[67] **Işık, İ.E.,** 2005. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Düzenleyici Katkı Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, İstanbul.

[68] **KYSB**, www.cimsa.com.tr/urunler/pdf/aciklama_dost_beton.pdf, 03.09.2007.

[69] **Şimşek O., Bektaş S., Erdal M.,** 2002. Vibrasyon Süresinin Betonun Basınç Dayanımına ve Birim Ağırlığına Etkisi, *Politeknik Dergisi,* Cilt 5, Sayı 2, s.185-193, Ankara.

[70] **Sonebi M.,** 2004. Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans, *Cement and Concrete Research,* **V.34,** No.7, pp.1199-1208.

[71] **Ersoy, U., Tankurt, T.,** 1991. Yüksek Dayanımlı Betonların Yapısal Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme, *2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton,* İstanbul, 27-30 Mayıs.

[72] **Jansen, D.C., Shah, S.P., Rossow, E.,** 1995. Stress-Strain Results of Concrete from Circumferential Strain Feedback Control Testing, *ACI Materials Journal,* July, **V.92,** pp.419-428.

[73] **Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A. D., Lydon, F.D., Barr, B.I.G.,** 1998. Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach, *Cement and Concrete Research,* **V.20,** pp.301-318.

[74] **Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H.,** 1981. Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Terms Loads*, American Concrete Institute Journal,* May-June, **V.78,** pp.171-178.

[75] **Ngab, A.S., Nilson, A.H., Slate, F.O.,** 1981. Shrinkage and Creep of High Strength Concrete, *American Concrete Institute Journal,* July-August, pp.255-261.

[76] **Mehta, P.K,** 1986. Concrete- Structures Properties and Materials, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

[77] **Mindess, S., Young, J.F.,** 1981. Concrete, Prentice-Hall Inc., New Jersey.

[78] **Postacıoğlu, B.,** 1981. Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt I, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul.

[79] **Shah, S.P., Lange, A.D., Li, Z., Mitsui, K.,** 1994. Relationship Between Microstructure and Mechanical Properties of the Paste-Aggregate Interface, *ACI Journal,* January-February, **V.91,** No.1, pp.30-39.

[80] **Topçu, İ.B., Uğurlu, A.,** 2007. Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları İçin Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini, *İMO Teknik Dergi,* yazı 268, s.4055-4067.

[81] **Nesbit, J.K.,** 1966, Structural Lightweight Aggregate Concrete, Concrete Publications Limited, London.

[82] **Berry, H.C.,** 1910. Apparatus for Repeated Loads on Concrete Cylinders and a Typical Result, *ASTM Proceedings,* **V.10,** pp.581.

[83] **ASTM C 469,** 1994. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, *Annual Book of ASTM Standards*.

[84] **Demir, F., Tekeli, H., Korkmaz, A.,** 2007. The Effects of Elastic Modulus On The Relative Story Displacement Limitations*, Journal of Engineering and Natural Sciences,* **V.25,** issue 2, s.190-199.

[85] **ACI Committee 318,** 2005. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-05) and Commentary (318R-05), *ACI,* Farmington Hills, Mich., p.430.

[86**] TS 500,** 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

[87] **ACI Committee 363**, 1992. State of the Art Report on High-Strength Concrete (ACI363-R), *ACI,* Farmington Hills, Mich., p.55.

[88] **Ahmad, S.H., Shah, S.P.,** 1985. Structural Properties of High-Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete, *PCI Journal,* **V.30,** No.6, pp.92-119.

[89] **Nassif, H.H., Suksawang, N., Capers, H.,** 2005. The Development of High-Performance Concrete for Transportation Structure in New Jersey, *ACI Seventh International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete,* ACI, SP-228, Farmington Hills, M.I., **V.2,** pp.833-848.

[90] **Apaydın, M.S.,** 2007. Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[91] **Mutlu, M., Gençmehmetoğlu, M., Öztekin, E.,** 2007. Pompalanabilir C100/115 Sınıfı Beton Tasarımı, *7. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 28-30 Kasım.

ÖZGEÇMİŞ

Aydın KARADAĞ, 1983 yılında Karabük'te doğdu. İlkokulu Karabük Fevzi Çakmak İlkokulu'nda, ortaokulu Karabük Yenişehir Ortaokulu'nda, liseyi ise Karabük Demir-Çelik Lisesi'nde okuduktan sonra 2002 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve bu bölümden 2006 yılında mezun oldu. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.