



**PUZOLANİK KATKI MALZEMELERİYLE ÜRETİLEN HARÇLARDA
SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEYDANA GELEBİLECEK KAZA
ANINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İSTATİSTİKSEL OLARAK
KARŞILAŞTIRILMASI**

Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

**DOKTORA TEZİ
KAZALARIN ÇEVRESEL VE TEKNİK ARAŞTIRMASI ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2016

Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR tarafından hazırlanan "PUZOLANİK KATKI MALZEMELERİYLE ÜRETİLEN HARÇLARDA SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA MEYDANA GELEBİLECEK KAZA ANINDAKİ MEKANİK DAVRANIŞLARININ İSTATİSTİKSEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Öğr. Gör. Dr. Çağatay Mehmet BELGİN
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. Ahmet Celal APAY
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kürşat ÇUBUK
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKAŞ
Matematik Anabilim Dalı, Sakarya Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 27.06.2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

27/06/2016

**PUZOLANİK KATKI MALZEMELERİYLE ÜRETİLEN HARÇLARDA SICAKLIK
ETKİSİ ALTINDA MEYDANA GELEBİLECEK KAZA ANINDAKİ MEKANİK
DAVRANIŞLARININ İSTATİSTİKSEL OLARAK KARŞILAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)**

Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2016

ÖZET

Bu çalışmada, puzolanik katkı malzemeleri ile üretilen harçlarda yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelebilecek kaza anındaki mekanik davranışlar incelenmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmada örnekler 3 grup halinde üretilmiştir. 1. grup PÇ 42.5 çimentosu ile üretilen kontrol harcı, 2. grup örnekleri; çimentoya %5, 10, 15 ve 20 oranlarında sırasıyla tuğla tozu (TT), mermer tozu (MT), silis dumanı (SD) ve uçucu kül (UK) ayrı ayrı ikame edilerek; 3. grup örnekleri ise çimentoya %5, 10, 15 ve 20 oranlarında sırasıyla SD ve TT, SD ve MT birlikte ikame edilerek toplam 7 tip harç üretilmiştir. Deneysel çalışma; örnek üretimi, kürü, sıcaklık etkisi, soğutma süreci ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Harçlar laboratuvarda üretildikten sonra TS EN 196-1 standardına göre 40x40x160 mm boyutlarında prizma örnekleri elde edilmiş ve 20±2°C’ de %95 bağıl neme sahip laboratuvar ortamında 7, 28 ve 90 gün süreyle kür edilmiştir. Harç örnekleri 20, 150, 300, 700 ve 900 °C olmak üzere beş sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. 20 °C sıcaklıkta bekletilen harç örnekleri referans harç kabul edilmiştir. Harçların soğutma işlemi havada (laboratuvar ortamında kendiliğinden) ve suda olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Harç örnekleri oda sıcaklığına geldikten sonra eğilme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan harçların içyapısında meydana gelen değişimler makro düzeyde araştırılmıştır. Yüksek sıcaklığın, havada ve suda soğutma uygulamalarının harçlar üzerindeki etkisi belirlenerek deney sonuçları istatistiksel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre; bazı çimento tiplerinde 150 °C’ye kadar basınç dayanımının referans numunelerine göre artış gösterdiği ve bu sıcaklıktan sonra dayanımın sürekli düştüğü görülmüştür. Ayrıca farklı sıcaklık uygulaması yapılan harç numunelerinin hava ve su ile soğutulmasında istatistiki açıdan anlamlı farklar tespit edilmiştir. Sonuç olarak; üretilen harçlar arasında en yüksek dayanımları referans ve SD katkılı harçlarda görüldüğü, yüksek sıcaklığa maruz harçlarda havada soğutma işlemlerinin daha iyi sonuçlar verdiği ve üretilen bazı harçların belirli sıcaklık değerlerine kadar yangın olasılığı yüksek binalarda değerlendirilebileceği tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91127
Anahtar Kelimeler : Harç, Yüksek sıcaklık, Yangın, Dayanım, Dayanıklılık
Sayfa Adedi : 215
Danışman : Öğr. Gör. Dr. Çağatay Mehmet BELGİN

STATISTICALLY COMPARISONS OF MECHANICAL REACTIONS OF THE
MARBLES PRODUCED WITH POZZOLANIC ADDITIVES UNDER INFLUENCE OF
TEMPERATURE IN CASE OF A POSSIBLE ACCIDENT
(Ph. D. Thesis)

Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
June 2016

ABSTRACT

In this study, while mortars produced with pozzolanic additives are under pressure of high temperature, how reactions can emerge in case of an accident has been researched. For this purpose, test subjects in this experimental study were produced in 3 groups. First group test subject is control mortar produced with PC 42.5 cement; second group test subjects are the cements separately produced with 5% brick dust (BD), 10% marble powder (MP), 15% silica fume (SF), 20% fly ash (FA) and third group test subject is the mortar which is produced with cements added BD, SF, TT and MT together. In total, 7 types of mortars were produced. Experimental study was done in 5 steps: producing test subject, curing, temperature effect, process of cooling down and mechanical experiments. After mortars were produced in laboratory, test prisms in size of 40x40x160 mm were obtained conforming to standards of TS EN 196-1 and they were cured in laboratory environment which is at 20±2 °C room temperature and which has relative humidity at rate of 95% for 7, 28 and 90 days. Test mortars were exposed to 5 different temperature: 20 °C, 150 °C, 300 °C, 700 °C and 900 °C. Test mortars kept in 20 °C were accepted as reference mortars. Cooling down process of mortars was carried out in two different ways: in the air (by itself, in laboratory environment) and in water. After test mortars reached to room temperature, they were subjected to deflection and compression strength tests. Changes of internal structure of mortars exposed to high temperature were analysed at the macro level. Effects of high temperature and process of cooling down in the air and in water on mortars were detected and experiment results were statistically analysed. According to experiment results, for some types of cement, it has been found that compression strength until 150 °C shows increase compared to reference specimen and that strength is constantly decreasing. Besides, statistic important differences have been detected in cooling down process of mortars, which exposed to different temperature tests bath in the air and in water. As a consequence, it has been detected that among produced mortars, the highest compression strength is seen in the reference mortars and the mortars added SF and the process of cooling down in the air gives better results in mortars exposed to high temperature. Also some of the produced mortars can be used in high fire hazard buildings within certain temperature.

Science Code : 91127
Key Words : Mortar, high temperature, fire, strength, endurance
Page Number : 215
Supervisor : Lecturer Dr. Çağatay BELGİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile beni her zaman yönlendiren, her konuda yardımcı olarak beni destekleyen tez danışmanım değerli hocam Öğr. Gör. Dr. Çağatay BELGİN'e, tez çalışması boyunca tecrübelerinden yararlandığım ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım, Prof. Dr. Ahmet Celal APAY, Prof. Dr. Metin GÜRÜ, Yrd. Doç. Dr. Kürşat ÇUBUK, Yrd. Doç. Dr. Mehmet KARAKAŞ'a Abana Sabahat Mesut YILMAZ MYO Müdürü Doç. Dr. Erol TURAN'a, Tezimin her aşamasında beni bir an olsun bile yardımıyla desteğiyle yalnız bırakmayan mesai arkadaşım Öğr. Gör. Gülsüm SAĞLAM ÇİTOĞLU'na, arkadaşlarım Öğr. Gör. Hakan ÇAĞLAR, Ahmet BABAOĞLU'na, kısmi zamanlı çalışan öğrencim Kurtuluş KARAHAN'a maddi ve manevi destekleriyle çalışmalarım boyunca beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	11
2.1. Çimentolar.....	11
2.1.1. Çimento ile ilgili genel bilgi	11
2.1.2. Çimento ana hammaddeleri.....	13
2.1.3. Çimentonun üretimi	16
2.1.4. Çimentonun hidrasyonu	16
2.1.5. Çimento özelliklerini belirleyen kriterler	21
2.1.6. Çimento türleri	24
2.1.7. Çimento standartları	25
2.1.8. Portland çimentoları	27
2.2. Pozolanların Tanımı ve Sınıflandırılması	28
2.2.1. Doğal pozolanlar	29
2.2.2. Yapay pozolanlar	30
2.2.3. Pozolanik aktivitenin değerlendirilmesi.....	30
2.2.4. Pozolanik reaksiyon ve reaksiyon ürünleri	31
2.3. Silis Dumanı.....	33

	Sayfa
2.3.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri.....	36
2.3.2. Silis dumanın kimyasal özellikleri ve kompozisyonu.....	38
2.3.3. Silis dumanının beton özellikleri üzerine etkileri	39
2.3.4. Silis dumanının test edilmesi için standart metodlar	44
2.3.5. Silis dumanının uygunluğu için sınır değerler	44
2.4. Uçucu Küller.....	45
2.4.1. Uçucu küllerin özellikleri.....	46
2.4.2. Uçucu küllü betonlarda karışım oranlama yöntemleri	67
2.5. Mermer.....	70
2.5.1. Mermerlerin sınıflandırılması	73
2.5.2. Afyon bölgesi mermerlerinin özellikleri.....	75
2.5.3. Mermer ocaklarında ve mermer işleme tesislerinde oluşan atık.....	75
2.5.4. Mermer tozu	76
2.6. Tuğla ve Kiremit Endüstrisi.....	83
2.6.1. Tuğla ve kiremit hammaddelerinin bileşimi	84
2.6.2. Tuğla ve kiremit malzemelerinde istenilen özellikler	90
2.6.3. Kiremit üretim prosesi.....	92
2.6.4. Türkiye’de tuğla ve kiremit üretimi	95
2.7. Yüksek Sıcaklık	97
2.7.1. Yüksek sıcaklık kaynakları	97
2.4.2. Yüksek sıcaklık etkisi	98
3. MALZEME VE YÖNTEMLER	101
3.1. Malzemeler	101
3.1.1. Çimento	101
3.1.2. Silis dumanı.....	101
3.1.3. Uçucu kül	102

	Sayfa
3.1.4. Atık mermer tozu	102
3.1.5. Tuğla tozu.....	103
3.1.6. Standart CEN kumu	103
3.1.7. Karışım suyu	104
3.1.8. İstatistikî yöntemler.....	104
3.2. Metot.....	105
3.2.1. Harçların su ihtiyacı	105
3.2.2. Deneylerde kullanılan çimentoların üretilmesi ve örneklerin kodlanması.....	105
3.2.3. Deneylerde kullanılan çimentolara ait fiziksel deneyler.....	110
3.2.4. Yüksek sıcaklık uygulamaları.....	112
3.2.5. Soğutma uygulamaları	112
3.2.6. Harç deneyleri	112
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	115
4.1. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin Kimyasal Kompozisyonları	115
4.2. TT, MT, SD ve UK'nın Mineralojik Özellikleri.....	115
4.3. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri...	117
4.3.1. Çimentoların priz süresine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	118
4.3.2. Çimentoların inceliğine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	119
4.3.3. Çimentoların yoğunluğuna TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	120
4.3.4. Çimentoların özgül yüzeyine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	121
4.4. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT Katkılı Çimento Harçların Özellikleri.....	122
4.4.1. Harçların eğilme dayanımlarına TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	122

Sayfa

4.4.2. Harçların basınç dayanımlarına TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi.....	146
4.5. Harçların İstatistiksel Değerlendirmesi.....	172
4.5.1. Harçların eğilme dayanımları ile ilgili istatistiksel değerlendirme	172
4.5.2. Harçların basınç dayanımları ile ilgili istatistiksel değerlendirme.....	179
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	189
KAYNAKLAR	195
EKLER.....	214
ÖZGEÇMİŞ	214

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çimento içinde bulunabilecek bileşikle.....	12
Çizelge 2.2. Çimento bileşenlerinin kil içeriğine göre sınıflandırılmas	15
Çizelge 2.3. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları	29
Çizelge 2.4. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları	30
Çizelge 2.5. Silikon oranına göre SiO ₂ miktarları	34
Çizelge 2.6. Etibank elektrometalürji sanayi baca tozlarının özellikleri	35
Çizelge 2.7. Silis dumanının puzolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının uçucu kül ve doğal puzolan ile karşılaştırılması	37
Çizelge 2.8. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (% olarak)	38
Çizelge 2.9. Silis dumanının beton özellikleri üzerine etkileri	39
Çizelge 2.10. Kömürün yanması ile oluşan anorganik dönüşümler	45
Çizelge 2.11. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	50
Çizelge 2.12. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri	50
Çizelge 2.13. Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri	52
Çizelge 2.14. Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri.....	52
Çizelge 2.15. Uçucu küllerin çimento üretimi ile ilgili sınır değerler	53
Çizelge 2.16. Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri.....	74
Çizelge 2.17. Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırma.....	74
Çizelge 2.18. Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması	74
Çizelge 2.19. Mermer tozunun fiziksel özellikleri.....	78
Çizelge 2.20. Mermer tozunun kimyasal özellikleri.....	78
Çizelge 2.21. Tuğla ve kiremit çeşitlerinin TSE sınıflandırılması.....	88
Çizelge 3.1. CEM I 42,5 R çimentosunun özellikleri	101
Çizelge 3.2. SD’nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	102
Çizelge 3.3. UK’ nın kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	102

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.4. MT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	103
Çizelge 3.5. TT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri	103
Çizelge 3.6. Standart CEN kumu özellikleri.....	104
Çizelge 3.7. Ankara şehir içme suyunun kimyasal özellikleri.....	104
Çizelge 3.8. Üretilen çimento tiplerinin karışım oranları	107
Çizelge 3.9. Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan harç örnekleri	108
Çizelge 3.10. Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan harç örnekleri.....	108
Çizelge 4.1. PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimentoların fiziksel özellikleri	117
Çizelge 4.2. Çimento tiplerinin eğilme dayanımları	123
Çizelge 4.3. Çimento tiplerinin basınç dayanımları.....	147
Çizelge 4.4. Harç tiplerinin eğilme dayanımlarının gün ve sıcaklık bazında değerlendirilmesi	172
Çizelge 4.5. Harç tiplerinin 7.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	175
Çizelge 4.6. Harç tiplerinin 28.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	175
Çizelge 4.7. Harç tiplerinin 90.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi	176
Çizelge 4.8. 7.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	177
Çizelge 4.9. 28.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	178
Çizelge 4.10. 90.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	178
Çizelge 4.11. 1. Harç tiplerinin basınç dayanımlarının gün ve sıcaklık bazında değerlendirilmesi	180
Çizelge 4.12. 2. Harç tiplerinin 7. günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi.....	182
Çizelge 4.13. 3.Harç tiplerinin 28.günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi.....	184
Çizelge 4.14. 4. Harç tiplerinin 90.günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi.....	185
Çizelge 4.15. 7.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	186

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.16. 28.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	187
Çizelge 4.17. 90.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması	188



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Silis dumanının üretimi.....	35
Şekil 2.2. Çimentonun uçucu kül içeriğine bağlı olarak hidrasyon ısısındaki azalış.....	54
Şekil 4.1. TT'nin X-Işınları difraktogramı	115
Şekil 4.2. MT'nin X-ışınları kırınım eğrisi	116
Şekil 4.3. SD'nin X-ışınları kırınım eğrisi.....	116
Şekil 4.4. UK'nın X-ışınları kırınım eğrisi	117
Şekil 4.5. Çimento tipi ile priz değerleri ilişkisi	119
Şekil 4.6. Çimento tipi ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri ilişkisi.....	120
Şekil 4.7. Çimento tipi ile yoğunluk ilişkisi	121
Şekil 4.8. Çimento tipi ile özgül yüzey ilişkisi	122
Şekil 4.9. 7 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	124
Şekil 4.10. 7 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	125
Şekil 4.11. 7 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	126
Şekil 4.12. 7 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	127
Şekil 4.13. 28 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	131
Şekil 4.14. 28 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	132
Şekil 4.15. 28 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	133
Şekil 4.16. 28 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	134
Şekil 4.17. 90 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi	139

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. 90 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	140
Şekil 4.19. 90 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	141
Şekil 4.20. 90 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi.....	142
Şekil 4.21. 7 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	148
Şekil 4.22. 7 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	149
Şekil 4.23. 7 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	150
Şekil 4.24. 7 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	151
Şekil 4.25. 28 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	156
Şekil 4.26. 28 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	157
Şekil 4.27. 28 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	158
Şekil 4.28. 28 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	159
Şekil 4.29. 90 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	164
Şekil 4.30. 90 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	165
Şekil 4.31. 90 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	166
Şekil 4.32. 90 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi.....	167

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Alüminyum hidroksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
$\text{AlO}(\text{OH})$	Alüminyum hidroksit oksit
C_2S	Dikalsiyum silikat
C_3A	Trikalsiyum alüminat
C_3S	Trikalsiyum silikat
C_4AF	Tetrakalsiyum alümino ferrit
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum hidroksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Kalsiyum magnezyum karbonat
CaO	Kalsiyum noksit
CaO_2	Karbon dioksit
CaSO_4	Kalsiyum sülfat
Cr_2O_3	Kromyum (III) Oksit
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
Fe_2O_3	Demir oksit
H_2O	Su
HCl	Hidroklorik asit
K_2O	Potasyum oksit
KK	Kızdırma kaybı
MgCO_3	Magnezyum karbonat
MgO	Magnezyum oksit
MPa	Megapascal
MT 10	% 10 mermer tozu katkılı çimento
MT 15	% 15 mermer tozu katkılı çimento
MT 20	% 20 mermer tozu katkılı çimento

Simgeler	Açıklama
MT 5	% 5 mermer tozu katkılı çimento
Na₂O	Sodyum oksit
SD 10	% 10 silis dumanı katkılı çimento
SD 15	% 15 silis dumanı katkılı çimento
SD 20	% 20 silis dumanı katkılı çimento
SD 5	% 5 silis dumanı katkılı çimento
SDMT 10	% 5 silis dumanı ve % 5 mermer tozu katkılı çimento
SDMT 15	% 7.5 silis dumanı ve % 7.5 mermer tozu katkılı çimento
SDMT 20	% 10 silis dumanı ve % 10 mermer tozu katkılı çimento
SDMT 5	% 2.5 silis dumanı ve % 2.5 mermer tozu katkılı çimento
SDTT 10	% 5 silis dumanı ve % 5 tuğla tozu katkılı çimento
SDTT 15	% 7.5 silis dumanı ve % 7.5 tuğla tozu katkılı çimento
SDTT 20	% 10 silis dumanı ve % 10 tuğla tozu katkılı çimento
SDTT 5	% 2.5 silis dumanı ve % 2.5 tuğla tozu katkılı çimento
SiO₂	Silisyum oksit
SO₃	Kükürt trioksit
TiO₂	Titanyum dioksit
TT 10	% 10 tuğla tozu katkılı çimento
TT 15	% 15 tuğla tozu katkılı çimento
TT 20	% 20 tuğla tozu katkılı çimento
TT 5	% 5 tuğla tozu katkılı çimento
UK 10	% 10 uçucu kül katkılı çimento
UK 15	% 15 uçucu kül katkılı çimento
UK 20	% 20 uçucu kül katkılı çimento
UK 5	% 5 uçucu kül katkılı çimento

Kısaltmalar	Açıklama
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASKİ	Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BET	Özgül yüzey

Kısaltmalar	Açıklama
CEM I	Portland Çimentosu
CSA	Kanada Standartları
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
ISIC	Uluslararası Standart Sanayi Tasnifinde
MT	Mermer Tozu
MTA	Maden Tetkik Arama
PÇ	Portland Çimentosu
PÇ 42.5	Kontrol Çimentosu
REF	Referans
SD	Silis Dumanı
SDMT	Silis Dumanı ve Mermer Tozu
SDTT	Silis Dumanı ve Tuğla Tozu
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TT	Tuğla Tozu
UK	Uçucu Kül
XRD	X-Işınları Difraksiyonu
µm	Mikrometre

1. GİRİŞ

Hızla büyüyen teknoloji ile birlikte dünyadaki ekonomik gelişmeler inşaat sektörünün performansını da olumlu yönde etkilemektedir. 2015 yılında yayınlanan Türkiye Yapı Sektörü Raporuna göre; ülke ekonomisindeki büyümenin 2014 yılında devam ettiği ve buna paralel olarak da inşaat sektöründeki büyümenin de devam ettiği açıklanmıştır. Tüm bu gelişmelerle birlikte insanoğlu ilkel yapı elemanlarından başlayarak bu gelişime ayak uydurmuş ve bu gün teknolojiye uygun yapı elemanları üretmeyi hedeflemiştir. Bu yapı elemanlarından genel anlamda 5000 yıldan beri en çok ve en yaygın olarak beton kullanılmaktadır. Beton, fiyatının düşük, bileşimindeki malzemelerin kolay elde edilebilir ve kolay şekillendirilebilir olması nedeni ile yapı üretiminde diğer yapı malzemelerinden daha çok tercih edilmekte ve ekonomik önem taşımaktadır.

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı mineral ve kimyasal katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla elde edilen, başlangıçta akışkan olduğu için istenilen kalıbın şeklini kolayca alan, sertleştikten sonra ise yüksek bir dayanıklılık ile belirli bir taşıma gücü için gerekli dayanımı sağlayabilen yapay bir yapı malzemesidir (Erdoğan, 2003; Neville, 1978). Beton henüz yeni karıldığında taze beton adını alırken, katılaşıp dayanım kazanınca sertleşmiş beton adını alır. Taze betonda işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ise dayanım ve dayanıklılık özellikleri betonda aranan en önemli özelliklerdir. Ayrıca büyük miktarlarda kullanıldığı için betonun en ekonomik şekilde üretilmesi beton teknolojisi için çok önemlidir. Kaliteli bir beton kaliteli malzemeler ve deneyimli elemanlarla belirli kurallara ve standartlara uyularak yapılabilir (Topçu, 2006a).

Gelişen teknoloji ile birlikte sanayileşen dünyadaki değişimler beraberinde bazı sorunları da ortaya çıkarmaktadır. Bunların başında çevremizde bulunan doğal kaynakların sabit olması buna karşılık nüfus artışı ve sanayileşmeyle birlikte bu kaynakların bilinçsizce tüketilmesi gelmektedir. Diğer bir sorun ise sanayileşmenin hızla geliştiği son yıllarda ortaya çıkan endüstriyel atıklar ve bunların ne yapılacak olmasıdır. Günümüzde büyük bir çevre sorunu haline gelen atık maddelerden kurtulmak için birçok araştırmacı çeşitli çözüm yolları araştırmaktadır. Bu çözüm yollarından biriside atık maddelerin geri kazanılmış malzeme olarak yeniden değerlendirilmesidir. Bu amaçla beton teknolojisinde gerek bağlayıcı olarak gerekse agrega olarak kullanılan endüstriyel atıklar vardır (Topçu, 2006b).

Bunlar puzolanik özellik gösteren granüle yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı, atık mermer tozu ve atık tuğla tozu başlıcalarıdır.

Doğal puzolanlar, diatomit hariç olmak üzere volkanik kökenli malzemelerdir. Doğal puzolanlar, piroklastik kayalar (volkan tüfleri, tras, killi malzemeler ve zeolitli maddeler vb.), değişik orjinli maddeler (beyaz İtalyan toprakları) ve kırıntı taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip puzolanik maddeler, öğütülerek kullanıldığı gibi bazıları doğal olarak kullanılmaktadır (Ramachhandran ve Beaudoin, 2001).

Çimento, demir-çelik ve kireç fabrikaları gibi yüksek enerji tüketen işletmelerde atık işlemleri yeniden düzenlenmesi ile hem çevrede atık diye tabir edilen bu malzemelerin çevre kirliliğinin önlenmesi hem de atık malzemelerin çimentoda kullanılması ile betonda kullanılan en pahalı bileşenlerden biri olan çimentonun maliyetinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Çimentoların teknik özellikleri ve miktarı, betonun performansına (mukavemet, durabilite) ve ekonomisine önemli derecede etki etmektedir. Bu yüzden puzolanik malzemeler, betonun maliyetini azaltmak ve çeşitli özelliklerini iyileştirmek amacıyla doğrudan katkı olarak ya da çimentonun bir kısmını ikame etmek üzere betona katılmaktadır (Aruntaş, 1996).

Betonda dayanıklılık problemlerine neden olan başlıca fiziksel etkilerden biri yangın ve/veya yüksek sıcaklıktır. Yangın, katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması ile meydana gelen bir olaydır. İnsanlık tarihine bakıldığında, kontrol altında tutulamayan ateşin çoğu zaman önemli can ve mal kayıplarına yol açan bir felaket olduğu görülür. Yapılarda yangın sırasında oldukça yüksek sıcaklık derecelerine ulaşıldığı birçok yangın olayında saptanmıştır (Baradan ve diğerleri, 2002). Bu yüksek sıcaklık, otoyollarda ve tünellerde meydana gelebilecek otomobil kazaları sonucunda ortaya çıkan yangınlarda oluşan sıcaklık artışı şeklinde ya da özellikleri nedeniyle (örneğin kimyasal madde üretim tesisleri, şeker fabrikaları, cephanelikler, yakıt siloları, kâğıt ve kumaş fabrika ve depoları, benzin istasyonları, hastane ve okul gibi) binalarda yeterli güvenlik önlemlerinin olmayışı, dikkatsizlik sonucu çıkan yangınlarda oluşan yüksek sıcaklık şeklinde ortaya çıkmaktadır. Danimarka'da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara ve New York'taki Dünya Ticaret Merkezi Binalarının çökmesi ile çok sayıda can ve mal kaybına yol açmıştır

(Khoury, 2003; Schrefler ve diğeri, 2002; Baradan ve diğeri, 2002). Özellikle yangın gibi yüksek sıcaklığın oluşturduğu hasarlara ülkemizde de çok sık rastlanılmaktadır.

Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının; betona, betonarme yapılara ve harçlara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000).

Durmuş (2008) çalışmasında, Portland çimentosu ve Portland kompoze çimentosu ile üretilen harçların yüksek sıcaklıktaki mekanik dayanımlarını yapay sinir ağı ile tespit etmeye çalışmıştır. Yüksek sıcaklığın mekanik özelliklere etkilerini araştırmak için hazırladığı harç numunelerini 7, 28 ve 90. günlerde 20, 100, 300, 400, 500, 600, 700 ve 900 °C olmak üzere sekiz farklı sıcaklıkta yüksüz olarak ısıtmış ve harçların soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki grupta gerçekleştirilmiştir (Durmuş, 2008).

Durmuş ve Arslan (2010) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış çimento harçlarının farklı soğutma koşullarında eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve boşluk oranı değişimini incelemişlerdir. Çimento harç örneklerine 100, 300, 500, 700 ve 900 °C sıcaklıklar uygulanmışlar ve soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki şekilde gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, harç örneklerinin eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında 100 °C'de bir miktar artış olmasına rağmen bundan sonraki sıcaklıklarda sıcaklık ortalamasına bağlı olarak azalma eğilimi olduğu tespit edilmiştir (Durmuş ve Arslan, 2010).

Kızılkant ve Yüzer (2008) yaptıkları deneysel çalışmada, örnek üretimi, kürü, ısıtma-soğutma süreci, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere dört aşamada gerçekleştirmişlerdir. Örnek üretiminde silis ve kalker esaslı agregalar, CEM I 42.5 çimentosu, silis dumanı, uçucu kül, cüruf ve silis esaslı agregalar olarak Standart CEN kumu ve aynı granülometride kalker esaslı agregalar kullanmışlardır. Puzolan malzemeleri harca çimento ağırlığının %10'u oranında ikame olarak ilave etmişlerdir. Silis esaslı agreganın kullanıldığı örneklerin basınç dayanımında 600 °C'den sonra önemli ölçüde azalma görülmüştür. Kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise dayanımdaki bu belirgin azalma 900 °C'den sonra gözlemlendiği tespit edilmiştir. Silis dumanı ile kalker esaslı agregalar, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile silis esaslı agregalar kullanılarak üretilen harçlar, yüksek

sıcaklık etkisine maruz kaldıklarında basınç dayanımı açısından iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. (Kızılkıranat ve Yüzer, 2008).

Topçu ve Demir (2007) çalışmalarında farklı çimento tipleri kullanarak ürettikleri harç örneklerinde yüksek sıcaklık sonrası meydana gelen fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Harç üretiminde kullanılan agrega aynı olması nedeniyle ortaya çıkan farklılıklar farklı çimento hamurlarının yüksek sıcaklık sonrası değişimlerine bağlamıştır (Topçu ve Demir,2007).

Baradan ve Aydın (2003) yaptıkları bu çalışmalarında pomza kumu, tuğla kırıkları ve uçucu kül kullanarak yüksek sıcaklıklara dayanıklı, sıva gibi çeşitli yerlerde kullanılabilecek çok amaçlı bir harç geliştirmeye çalışmışlardır. Deneylerinde bu malzemeleri değişik oranlarda kullanarak çeşitli harç karışımları hazırlamışlardır. Agrega olarak pomza kumu ve tuğla kırıkları, bağlayıcı olarak çimento ve uçucu kül kullanılmıştır. Agrega\Bağlayıcı oranı 3 alınarak 4 ana karışım oluşturulmuştur. Yüksek sıcaklıktan en az oranda etkilenen karışım %100 pomza kumu agregası içeren uçucu kül çimento oranı 1 olan karışım olarak tespit etmiştir (Baradan ve Aydın, 2003).

Türker ve diğerleri (2001), kuvarsit, kalker ve pomza agregaları ile üretilmiş harç örneklerinin dayanımının yüksek sıcaklıklar ile değişimini incelemişlerdir. Hazırlanan harç karışımları 28 günün sonunda, ısıtma için harcanan süre de dâhil olmak üzere 4 saat süreyle 100, 250, 500, 700 ve 850 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Fırın içinde yavaş olarak soğutulan örnekler üzerinde basınç deneyi yapılarak arta kalan dayanımlar kıyaslanmıştır. Deneyler sonucunda kuvarsit ve kalker agregaları ile üretilen harçlar benzer davranış gösterirken, pomza agregası ile üretilen harçlar daha farklı bir davranış sergilemiştir. Dayanım kayıplarının tüm örneklerde 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda başladığını tespit etmişlerdir (Türker ve diğerleri, 2003).

Karaduman (2008) Bu çalışmasında, TS EN 197-1 standardına uygun olarak hazırladığı 7 farklı tip çimento ve alüminli çimentoyla dökülen harç örneklerinin değişen derecelerde yüksek sıcaklıklara maruz bırakılması sonucunda fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden önce iki değişik kür rejimi uygulanarak farklı tip çimentoların yüksek sıcaklıklara karşı direnci incelenmiştir. Bu çalışmada genel olarak bakıldığında tüm örneklerin basınç dayanımları, eğilme

dayanımları, elastisite modülleri ve ağırlıkları yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilendiği tespit edilmiştir (Karaduman, 2008).

Çil ve diğerleri (2007), yaptıkları çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun olarak 6 farklı tip çimentoyla hazırladıkları harç numunelerini değişen derecelerde yüksek sıcaklıklara maruz bırakarak, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Standart kür (28 gün-suda) işlemini takiben 28 gün de havada bekletilen numuneler, sırasıyla 20, 150, 300, 450, 600 ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Tüm harç numunelerinin basınç dayanımlarında sıcaklık artışıyla birlikte azalma görülmüştür. Sıcaklık 300 °C'ye çıkarıldığında CEM IV/A-W ve CEM IV/B-W çimentosuyla hazırlanan harç numunelerinin dayanımlarında az da olsa artış görülmüştür. 300 °C'den sonra bütün numunelerin dayanımları dikkate değer mertebede azalmıştır. 900 °C'ye maruz kalan tüm numunelerin basınç dayanımları yaklaşık %10'una düşmüştür. Özellikle 600 ve 900 °C'lerde katkılı çimentoların CEM I çimentosuna kıyasla yüksek sıcaklıklara daha dayanıklıdır. Tüm numunelerinin ağırlıkları sıcaklık artışıyla birlikte azalmıştır. Ağırlık kaybı, sıcaklık 900 °C'ye çıkartıldığında tüm numunelerde %10-12 civarındadır (Çil ve diğerleri, 2007).

Gökçer, Yıldız ve Keleştemur (2012) tarafından yapılan çalışmada, farklı miktarlarda cam lif ile takviye edilmiş harç numunelerine, filler malzeme ile ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında yer değiştirecek şekilde atık mermer tozu ilave edilerek, elde edilen numunelerin 400, 600 ve 800°C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan cam lif ve mermer tozu katkılı harç numunelerinin, porozite ve kılcal su emme değerlerinin arttığı, ultrases geçiş hızı, eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinin ise azaldığı; cam lif katkılı harç numunelerinde atık mermer tozu kullanımı neticesinde, yüksek sıcaklık sonrası harç numunelerinde daha az dayanım kaybı meydana geldiği elde edilen bulgular arasındadır (Gökçer ve diğerleri, 2012).

Betonun ısı kapasitesi yüksek ise yangın direnci daha kısa süreli olmaktadır. Betonun ısı kapasitesi esas olarak kendisini oluşturan malzemelerin toplam ısı kapasitesi tarafından kontrol edilebilmektedir (Gani, 1997).

Betonun yangın direnci termal iletkenliği, ısı kapasitesi ve beton bileşenlerine bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. Betonun termal iletkenliği düşük ise çatlama ve pullanma olan

beton hasarı minimize edilebilmektedir. Çünkü bu özellik hızlı sıcaklık artışını ve beton yüzey tabakalarında oluşacak hasarı sınırlayacaktır. Betonun ısı iletkenliği gözenekli hafif agregaya ya da hava sürükleyici kullanılarak azaltılabilmektedir (Gani, 1997).

Yangının betondaki etkileri iki gruba ayrılabilir. Birincisi, hidrate yapının bozulmasıyla oluşan dayanım kaybıdır. Bu durum genellikle 300 °C üzerinde başlar ama ana kayıplar 500 °C üzerinde görülür. İkinci etki ise beton kabuğundaki pullanma ve patlamadır. Bu etki pek çok betonda oluşabilir ama agregaya tipine, nem içeriğine, beton kalitesine, yüksek sıcaklık şiddetine ve uygulanan yük durumuna bağlı olarak kapsamı ve oranı değişebilmektedir (Newman ve Choo, 2003).

Yangın olayında yapının her tarafında farklı oranda oluşan ısı ve söndürme çalışmalarında kullanılan su ile hızlı soğumalar %40 oranında hacim artışı sağlamaktadır. Hacim artışı yapı yüzeylerine basınç oluşturduğundan betonda çatlamlar görülmektedir (Çelebi ve Akıncıtürk, 2003).

Yüksek sıcaklık beton yapısını önemli ölçüde değiştirir. Normal halde beton kapiler boşluklarında jel suyu, adsorbsiyon suyu ve serbest su halinde bulunan sular, sıcaklığın yükselmesi ile buharlaşarak uzaklaşır. Yangın etkisinde kalan betonlarda bozulma önce yüzeylerde başlar. İç kısımlarda bulunan suyun buharlaşarak yüzeye kadar taşınması zaman alır. Eğer sıcaklık hızlı bir şekilde yükselirse, iç kısımlarda bulunan sular da buharlaşır ve meydana gelen buhar betonu parçalayarak yüzeye çıkar. Kristal suyu olarak bağlı suların ayrışması için beton sıcaklığının en az 300 °C'ye kadar yükselmesi gerekir. 500 °C'de kalsiyum hidroksit, 900 °C'de kalsiyum silikatlar tam olarak ayrışır (Yalçın ve Gürü, 2006:10).

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan beton ve bileşenlerinin yapılarında değişimler meydana gelmektedir. Performans açısından yüksek sıcaklık sonrası betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler oldukça önem taşıdığı çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmektedir (Topçu ve Demir, 2007).

Bir başka çalışmada, sodyum karbonat, sodyum hidroksit ve sodyum silikat ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen harçlar 100, 400 ve 700 °C sıcaklıklara üç

saat boyunca maruz bırakılmıştır. Çalışmada, sıcaklık arttıkça serbest suyun buharlaşmasından dolayı basınç dayanımları 100 °C'ye kadar artmış, daha sonra yapılan araştırmalara benzer şekilde yüksek sıcaklığın etkisi ile bağ suyunun kaybedilmesinden ve hidratasyon ürünlerinin ayrışmasından dolayı basınç dayanımları düşmüştür (Topçu ve Canbaz, 2009).

Bunların dışında, yüksek sıcaklıktan doğabilecek zararı değerlendirmenin belli yöntemleri vardır. Bu yöntemlerden en kolayı gözlem yapmaktır. Betonda oluşan çatlaklar, dökülmeler ve renk değişiklikleri kolayca görülebilir (Durmuş ve Arslan, 2009). Yüksek sıcaklıkla oluşan değişiklikler özellikle silisli agregalar ile üretilen betonlarda belirgindir (Andrade, Alonso ve Khoury, 2003). Pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600 °C'ye, gri ise 600- 900 °C'ye, sarımtırak bej ise 900-1000 °C'ye yükseldiği ifade edilmektedir (Kızıllkanat ve Yüzer, 2008).

Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında beton dayanımının % 50'sini, 800 °C'ye ulaştığında ise yaklaşık % 80'ini kaybettiği göz önüne alınırsa, renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımında meydana gelen değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk de önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Kızıllkanat ve Yüzer, 2008).

50-120 °C sıcaklık aralığında dayanımdaki düşüş, hamurdaki su tabakalarının şişmesi nedeniyle bağların zayıflamasına bağlanmaktadır. Dayanımların bu sıcaklıktan sonra tekrar kazanılması termal kurumanın yararlı etkisinden kaynaklanmaktadır. Termal dehidratasyonun bu yararlı etkisi, mekanik özelliklerin bozulmasına neden olan jelin dehidratasyonu ve mikro çatlakların oluştuğu 300 °C'nin üzerinde sona erer. Bu sıcaklığın üzerinde mekanik özelliklerin bozulması üzerinde porozite artışının başlaması da etkin rol oynamaktadır. Sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında CSH ara yüzeylerindeki su, CSH ve sülföalüminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümünün kaybedilmesi mikro çatlaklara yol açmaktadır. Mikro çatlaklar önce (yaklaşık 300 °C'de) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin toplandığı bölgelerde ve daha sonra hidrate olmamış tanelerin bulunduğu bölgede (yaklaşık 400 °C'de) görülür. 400 ile 600 °C arasındaki yüksek sıcaklıklar sertleşmiş çimento hamurunda boşluk sisteminin tamamen kurumasına, hidratasyon ürünlerinin ayrışmasına ve CSH jellerinin parçalanmasına yol açar. 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda soğutulma

sonrası örneklerin parçalanması, o sıcaklıkta kalsiyum hidroksitin ayrışması ve bu sıcaklıktan soğuma sonunda tekrar hidrate olarak genleşmesi ile açıklanmaktadır. Yangın söndürme çalışmaları sırasında püskürtülen su CaO 'i tekrar Ca(OH)_2 'e dönüştürür ve hacimde genleşme görülür. Kısa sürede büzülen ve genleşen beton içinde oluşan parazit gerilmeler hasarın büyümesine neden olmaktadır (Baradan ve Aydın, 2013).

Yüksek sıcaklıklarda beton davranışının incelenebilmesi için beton bileşenlerinin yüksek sıcaklık altındaki davranışları araştırılmalıdır. Betonun dayanım ve dayanıklılığında önemli rolü olan çimento hamurunda sıcaklık artışıyla meydana gelen değişim şu şekilde özetlenebilir (Rashad, Bai, Basheer, Collier ve Milestone, 2012): Kapiler ve jel suyu yaklaşık 100-150 °C'de buharlaşır. 150-250 °C'de çekme mukavemetindeki azalma ile birlikte büzülme ve çatlaklar meydana gelmeye başlar. Yaklaşık olarak 250-300 °C'de alümin ve demir bileşenlerinden kimyasal bağlı su buharlaşır, basınç dayanımında azalmaya başlar. 400 °C'de kalsiyum hidroksit dehidrasyonu başlar. 400- 600 °C'de CSH arasında ayrışma olur ve dayanımda önemli bir azalma meydana gelir.

Sıcaklık arttıkça porozitenin arttığı bilinmektedir Bunun nedeni olarak bağlı suyun ayrılması ile çimento hamurunda oluşan bozulmalar görülmektedir. Gözenek şekli ve büyüklüğü önemli ölçüde sıcaklıktan etkilenmektedir. 130 °C'de gözenekler düşüktür ve 400 °C'den daha düzensizdir. 500 °C'ye kadar ana fiziko-kimyasal değişimler su kaybı ve kalsiyum hidroksitin ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Fares, Remond, Noumowe ve Cousture, 2010).

Üretilen betonun yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi için uygun bileşen seçimi çok önemlidir (Topçu ve Demir, 2006).

Yapılan çalışmalar sonucunda betonun birçok yapı malzemesine göre yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri için geçerlidir (Baradan ve diğerleri, 2002). Betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığını etkileyen faktörler, malzemeye ilgili faktörler ve çevresel faktörler olarak iki gruba ayrılır. Malzemeye ilgili faktörler agrega özellikleri, agrega çimento hamuru arasındaki bağ, bileşenlerin ısı uyumu ve çimento hamurunun özellikleri olarak sayılır. Çevresel faktörler; ısıtma derecesi, betonun en yüksek sıcaklıkta karşı karşıya kaldığı süre, soğuma derecesi, yükleme koşulları ve nem

durumudur. Betonun yüksek sıcaklıklarla karşı karşıya kaldığında ortaya koyduğu dayanım kaybı çevresel faktörlerle betonun malzeme özelliklerine bağlıdır. Beton yapıların yüksek sıcaklıklarla karşı karşıya kalma sürecinde ve bu sürecin ardından göstereceği tepkileri öngörebilmek için, betonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyice bilinmesi gerekir (Peng ve diğerleri, 2006a).

Bu deneysel çalışmada; harç üretiminde çimentoya ikame olarak silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), mermer tozu (MT) ve tuğla tozu (TT) ile üretilen harçların 150, 300, 700 ve 900 °C sıcaklık etkisi altında havada ve suda soğutma yöntemleri ile mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemektir. Bu amaç doğrultusunda farklı puzolanik özelliğe sahip malzemeler ile üretilen harçların (alev ve sıcaklığa) dayanıklılığın ön planda tutulduğu inşaatlarda olası kullanım alanlarının (örneğin kimyasal madde üretim tesisleri, şeker fabrikaları, cephanelikler, enerji santralleri, yakıt siloları, kâğıt ve kumaş fabrika ve depoları, benzin istasyonları, hastane, okul, konut vs.) artırılması da hedeflenmektedir.

Çalışmanın amacının ve kapsamının verildiği giriş bölümünden sonra ikinci bölümde, kaynak taramasından yararlanılarak harçlarda çimentoya alternatif ve ikame olarak kullanılan endüstriyel atıklar, çimentonun dayanıklılığına etki eden fiziksel ve kimyasal etkiler genel olarak ele alınmış; silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), mermer tozu (MT) ve tuğla tozunun (TT) çimentoda kullanımı ile çimento harçlarında farklı yüksek sıcaklık etkisi detaylıca ele alınarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışma; dördüncü bölümde deneylerden alınan sonuçlar, yüksek sıcaklık etkisinin harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine puzolanik malzemelerin oranına göre değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile değişkenler arasında; sonuçlar ile sıcaklık değişimi arasında ve üretilen harç özelliklerinin birbiri arasındaki ilişkiler istatistik ve tahmin yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Beşinci ve son bölümde çalışmadan alınan sonuçlar verilmiş ve ileriki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada çimento esaslı kompozit olarak “harç” seçilmiştir. Harçlar, maksimum tane boyutu daha küçük olan agrega içermesinin doğurduğu bazı farklılıklar (çimento miktarı, agrega-çimento hamuru ara yüzeyi gibi) göz önünde bulundurularak, beton teknolojisinde ayrı bir alt segmentte değerlendirilir. Ancak, her iki malzeme de “çimento esaslı taneli kompozit” olup ortak karakteristiklere sahiptir. Bu nedenle, çimento esaslı kompozitler üzerine yapılan araştırmalarda, birçok zaman, bu iki malzemeden biri üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların diğeri için de geçerli olduğu ifade edilir. beton ile ilişkili olarak verilen bilgiler harçlar için de geçerlidir. Yalnız harcı ya da yalnız betonu ilgilendiren hususlar metinde ayrıca belirtilmiştir (Oltulu, 2011).

Bu kısımda silis dumanı, mermer tozu, uçucu kül ve tuğla tozu katkılı çimentoların özelliklerine geçmeden önce; kullanılan malzemelerin puzolanik özelliklerinin araştırılması, çimento içerisinde nasıl bir tepkimeye neden olacağının yorumlanması, malzemelerin kimyasal-fiziksel özelliklerinin bilinmesinin ve ikame metodu ile karışım oranı belirlenen çimento harç tiplerinde yüksek sıcaklığın etkisiyle yapılarda oluşabilecek hasarları istatistiksel olarak belirlemek amacıyla faydalı olacağı düşünülmüştür.

2.1. Çimentolar

2.1.1. Çimento ile ilgili genel bilgi

“Çimento” kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince “caementum” kelimesinden türemiştir. Daha sonra bu kelime bağlayıcı anlamında kullanılmaya başlamıştır. İlk betonarme yapı 1852 yılında yapılmıştır, ancak bağlayıcı malzemelerin kullanımı çok eskilere dayanır (Gürü ve Yalçın, 2006).

Çimento esas olarak, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta pişirildikten sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bir bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. Diğer bağlayıcı maddeler gibi çimentolar da, CaO , MgO gibi alkalin öğeler ve SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi hidrolik bileşenlerden oluşur. Çimento bağlayıcılık görevini su ile tepkimeye girdikten sonra kazandığı için hidrolik bağlayıcı olarak adlandırılır. Alkalin ve hidrolik bileşenlerin oranları bağlayıcı maddenin niteliğini belirler. Çimento, su ile karıştırılıp

plastik hamur durumuna geldikten bir süre sonra havada ya da su içinde yavaş yavaş katılaşır. Bu katılaşma olayına priz adı verilir (Gürü ve Yalçın, 2006).

TS EN 197-1'e göre çimento, "su ile karıştırıldığında bir hamur oluşturabilen, su ile gerçekleşen tepkimeler ve süreçler kanalıyla gittikçe katılaşan ve sertleşen, ayrıca sertleştikten sonra su altında kalsa dahi belirli bir dayanıma ve ayrıca hacimsel olarak kalıcı bir dengeye ulaşan, genleşmeyen, çok ince öğütülmüş inorganik bir malzeme, sonuçta hidrolik bir bağlayıcıdır" (TS EN 197-1, 2002).

TS EN 197-1'e göre üretilen çimentolara CEM çimentosu adı verilmektedir. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler ve sınır değerleri Çizelge 2.1'de görülmektedir. Çimentolar; CEM I Portland Çimentosu, CEM II Portland Kompoze, CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu, CEM IV Pozolanlı Çimento ve CEM V Kompoze Çimento olarak ana sınıfa ayrılmıştır (TS EN 197-1, 2002).

CEM çimentosunda, reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve reaktif silisyum oksitin (SiO_2) oranlarının toplamı kütlece en az % 50 olmalıdır. Çimento içindeki magnezyum oksit (MgO) oranı % 0,1 ile % 4 arasında olması gerekir. Eğer magnezyum oksit (MgO) oranı % 5'ten fazla olursa taze veya nemli betonlarda aşırı genleşme meydana getirebilir. Betonun hacim genleşmesine etki eden diğer bir çimento bileşeni ise serbest kireçtir (CaO). Hacim genleşmesi, aylar bazen de birkaç yıl sürebilir (TS EN 197-1, 2002).

Çizelge 2.1. Çimento içinde bulunabilecek bileşikler (TS EN 197-1, 2002)

Malzeme	Kısaltma	Sınırlamalar	
PÇ klinkeri	K	$\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S} \geq \% 66,7$ $\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 2,0$ $\text{MgO} < \% 5$	
Granüle yüksek fırın cürufu	S	$\text{Camsı faz miktarı} \geq \% 66,7$ $\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{MgO} \geq \% 66,7$ $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 > \% 66,7$	
Doğal pozolan	P	Reaktif $\text{SiO}_2 \geq \% 25$	
Silisi uçucu kül	V	$\text{KK} \leq \% 5$ $\text{Reaktif CaO} \leq \% 5$ $\text{Reaktif SiO}_2 \geq \% 25$	
Kireçli uçucu kül	W	$\% 5 \leq \text{Reaktif CaO} \leq \% 15$ $\text{Reaktif SiO}_2 \geq \% 25$	$\text{KK} \leq \% 5$ $\text{Hacim genişlemesi} < 10\text{mm}$ $\text{Reaktif CaO} \leq \% 15$ $G \geq 10 \text{ N/mm}^2$

Çizelge 2.1. (devam). Çimento içinde bulunabilecek bileşikler (TS EN 197-1, 2002)

Malzeme	Kısaltma	Sınırlamalar
Piştirilmiş şeyl	T	$G_{28} \geq 25 \text{ N/mm}^2$ Hacim genişlemesi $< 10\text{mm}$
Kalker	L	$\text{CaCO}_3 \geq \% 75$ Kil miktarı $\leq 1,2 \text{ g/100 g}$ Organik madde miktarı $\leq 0,2$
Silis dumanı	D	$\% 5 \leq \text{Reaktif CaO} \leq \% 15$ Amorf $\text{SiO}_2 \geq \% 85$ $\text{KK} \leq \% 4$ Özgül yüzey (BET) $\geq 15 \text{ m}^2/\text{g}$

Çimento kimyasal analizlerinde kızdırma kaybı ve çözünmeyen kalıntı sıkça rastlanan bir ifadedir. Kızdırma kaybı; ağırlığı önceden bilinen ($1 \pm 0,05 \text{ g}$) çimento numunesinin yüksek sıcaklıkta ($\sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$) kızdırılması sonucunda meydana gelen ağırlıkça % olarak ifade edilen kayba denir. Çözünmeyen kalıntı ise, çimento veya agreganın standartlarda öngörülen hidroklorik asit konsantrasyonu etkisinde kaldığı halde çözünmeyen kısmın oranıdır (Şimşek, 2004).

Bu kayıp çimento içindeki üretim esnasında bünyesine aldığı nem ve öğütme sırasında havadan aldığı karbondioksittir. Kızdırma kaybı çimento cinsine bağlı olmak üzere en fazla % 4 olmalıdır.

Genellikle çimento çeşitlerine veya tiplerine bağlı olarak çimentonun içinde az da olsa potasyum, fosfor, sodyum ve manganez gibi maddeler bulunmaktadır. Çimento içinde bulunan sodyum oksit ve potasyum oksit miktarları beton için tehlikeli maddelerdir. Bu maddeler alkali-agrega reaksiyonu gibi beton için tehlikeli olan reaksiyonlar başlatan ana maddelerdir (TS EN 197-1, 2002).

2.1.2. Çimento ana hammaddeleri

Çimento üretiminde kullanılan ve jeolojide sedimanter kayalar olarak bilinen ana hammaddeler, kalker (kireçtaşı), kil ve/veya marndır. Klinker üretiminin ana bileşenleri olan CaO için kalker; SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 için de kil mineralleri temel kaynaklardır. Analizlerde Fe_2O_3 oranının düşük olduğu durumlarda uygun olan oranda demir cevheri de ilave edilmektedir. Ayrıca marn gibi bu dört oksidi bünyesinde bulunduran malzemeler de çimento hammaddesi olarak kullanılmaktadır (Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Raporu 2001, Koçak, 2008).

Bu bileşenler istenilen oranlarda tek bir hammaddede nadir olarak bulunmaktadır. Bu sebeple genellikle yüksek kireç içeren bir bileşen (kalker) ile düşük kireç, buna mukabil daha çok silis, alüminyum ve demir oksit içeren bir bileşenin (kil) uygun karışımının seçilmesi zorunludur. Bu iki ana bileşen genellikle kalker ve kil veya kalker ve marn olarak seçilmektedir (Atar, 2006).

Çimento üretiminde kullanılan temel hammaddelerin uygunluk dereceleri, onların kimyasal bileşimleri ile orantılıdır. Hammadde karışımında CaCO_3 içeriğinin genellikle %75-79 arasında kalmasına ve bunun mümkün olduğunca sabit tutulması önemlidir. Çünkü CaCO_3 içeriğindeki küçük bir değişiklik, klinkerdeki dikalsiyum silikat ile trikalsiyum silikat yüzdelерinin değişmesine ve çimento mukavemetinin önemli derecede değişmesine neden olmaktadır (Atar, 2006).

Kalker (Kireçtaşı): Klinker üretiminde oldukça geniş bir kullanım alanı bulunan kalker (kireçtaşı) sedimanter bir kayaç olup, çimento üretiminde çok büyük bir önem teşkil etmektedir. Kimyasal bileşiminde en az %90 CaCO_3 vardır. Kalkerin sertlik derecesi, Mohs sertlik skalasına göre 3, özgül ağırlığı ise 2,5-2,7 g/cm^3 'tür (Korçak, 2014).

Kireç, en az % 90 CaCO_3 içeren kireç taşının kireç fırınlarında 900-1000 °C'nin üzerinde kalsinasyonu sonucunda eşitlik 2.1'de kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir:



Kalsiyum oksit, su ile reaksiyonu girmesi sonucunda eşitlik 2.2'de ise sönmüş kireç meydana gelir.

Kalkerler doğada genellikle saf halde bulunmayıp, bileşimlerinde kalsiyum karbonatın yanı sıra, değişik oranlarda magnezyum karbonat, kil mineralleri, demir silikat-oksit ve silis gibi bileşikler içerirler. Çimento hammaddesi olarak kullanılan kalkerler içinde az miktarlarda bulunan bu safsızlıklar üretilen çimentonun kalitesi üzerine önemli derecede etki yapar. Kalker içinde bulunan en önemli safsızlık çakmak taşı (sileks), opal, kalsedon ve kuvars gibi silisyum dioksit bileşikleridir. Gerek öğütme ve gerekse pişirme sırasında sorun yarattığı için kalkerler içinde silisin bulunması istenmez (Korçak, 2014).

Marn: Kil ve kalker karışımı bir maddedir. Özgül ağırlığı 2,0-2,9 g/cm³'tür. Çimento sanayi için, kalker ve kilin beraber bulunduğu tek doğal hammaddedir. %50-70 kalker ve %30-50 kilden oluşmuş kayaca marn denir. Klinker, kil ve kalker içeren hammaddenin öğütüldükten sonra pişirilmesiyle elde edilir. Marn ise bu ikisini doğal olarak içerdiğinden ve kalkere kıyasla daha kolay öğütülmesinden dolayı, uygun bir hammaddedir (Korçak, 2014).

Kil: Killerin ana maddesi alüminyum silikat hidratlardır. Çimentodaki alkalilerin ana kaynağı da kil bileşenleridir. Kil minerallerinin temel özelliği kimyasal bileşiminde Al₂O₃ bulunması ve sulu alüminyum silikattan oluşmasıdır. Çimento üretiminde CaCO₃ ve kil miktarına göre kalkerden kile kadar olan karışım hammaddeleri Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi sınıflandırılmıştır (Korçak, 2014).

Çizelge 2.2. Çimento bileşenlerinin kil içeriğine göre sınıflandırılması (Gürü ve Yalçın, 2006)

Hammadde	CaCO ₃ (%)	Kil (%)
Kalker	96-100	0-4
Marnlı kalker	90-96	4-10
Kalkerli marn	75-90	10-25
Marn	40-75	25-60
Killi marn	10-40	60-90
Marnlı kil	4-10	90-96
Kil	0-4	90-100

Çimento hammaddesi olarak kullanılacak olan killerin yapısı hem kimyasal hem de mineralojik yapısı bakımından analiz edilmesi gerekir. Killerin kimyasal analizinde Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SO₃ ve kızdırma kaybı yüzdeleri belirlenir. Mineralojik analizlerde ise, kil minerallerinin dışında bulunan safsızlıkları oluşturan unsurlar ve bunların % miktarları saptanır. Çimento yapımında kullanılacak kilin kimyasal bileşiminde Al₂O₃/Fe₂O₃ oranı 21 civarında olmalıdır. Kuvars veya kalsedon halinde serbest silis bulunan killerde SiO₂ yüzdesi yüksektir. Bu killer üretim sırasında güçlükler çıkarır. Alkali meta oksitlerin miktarının kil içinde % 0,5'in altında olması istenir (Korçak, 2014).

Alçı Taşı: Alçı taşı, çorak ve kuru iklim şartları altında deniz suyunun buharlaşması sonucunda tortul kayaçlar olarak meydana gelmiş taşlar olarak ifade edilmektedir. Alçı taşı doğada, biri iki molekül kristal suyu içeren jips (CaSO₄.2H₂O), diğeri susuz kalsiyum

sülfat anhidrit minerali halinde olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Jips ve anhidrit doğada hiçbir zaman saf halde bulunmamakta, ayrıca bu iki mineral kararsız halde olup biri diğerine dönüşebilmektedir. Çimento üretiminde alçı taşı, harcın priz süresini geciktirmek için kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006; Koçak 2008).

2.1.3. Çimentonun üretimi

Çimento üretimi; jeoloji, maden, kimya, fizik, termodinamik gibi çok sayıda bilim dallarındaki bilgilerin birlikte kullanılmasını gerektirir. Üretim aşamaları ana hatları ile hammadde üretim ve hazırlama prosesi, pişirme prosesi ve çimento öğütme ile paketleme prosesi olarak incelenebilir (Canpolat, 2002).

Çimento, doğal kalker taşları ve kil karışımının yüksek sıcaklıkta ısıtıldıktan sonra öğütülmesi ile elde edilen hidrolik bağlayıcı bir malzemedir. Killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve yaklaşık 1400 – 1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi sonucu katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin, uygun oranda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Çimento yaygın olarak kullanılmadığı dönemlerde yaş olarak üretilmekteydi. Yaş sistemde hammadde karışımı fırına yaş olarak %35 oranında su bulunan cüruf halinde girmektedir. Islak sistemde çimentonun çamur halindeyken homojen bir hale getirilmesi daha rahat olurken ilerleyen teknoloji ile birlikte kuru sistemlerde de homojenlik sağlanmasıyla büyük miktarda enerji tasarrufu sağlanmıştır. 20. Yüzyılın ortalarından itibaren ıslak sistemler yerlerini kuru sistemlere bırakmışlardır. Kuru sistemde esas olarak üretim dört aşamada gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada ocaklardan çıkarılan kil ve kalker fabrikalara taşınır. İkincisinde hammaddeler kurutulur ve öğütülerek farin elde edilir. Bunu farinin pişirilerek klinkerin üretildiği aşama izler. Son adım olarakta klinker soğutulur ve öğütülerek çimentoya dönüştürülür (Gürü ve Yalçın, 2006).

2.1.4. Çimentonun hidratasyonu

Hidratasyon, bir maddenin su ile birleşmesi sonucu ortaya çıkan reaksiyon olarak tanımlanır (Moir, 2003, Ertün ve Türker, 2004). En genel manada ise hidratasyon; çimento ile su arasında meydana gelen kimyasal reaksiyondur. Erdoğan ve diğerleri (1998).

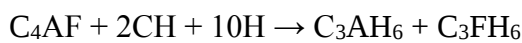
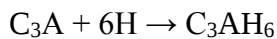
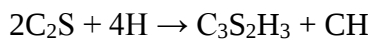
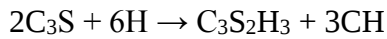
Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento su içinde yavaş yavaş çözünmekte ve hidrate hale gelerek tane yüzeyini jel halinde kaplamaktadır. Bu yüzden reaksiyona girmemiş klinker bileşiklerinin su ile etkileşimi önlenmiş olmakta, aynı zamanda da çözeltiye geçen klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmektedir. Doygun hale gelen klinker bileşikleri, çözünme hızını yavaşlatmakta ve hidrasyon hızının zamanla azalmasına neden olmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).

Çimento bileşiklerinin tam olarak hidrate olması için uzun bir süre gerekmektedir. Örnek olarak; 28 gün sonunda tanecik yüzeylerinden hidrasyon penetrasyon derinliği 4 µm, 1 yılsonunda ise 8 µm kadardır. 50 µm çapında bir klinkerin tam olarak hidrate olması için yaklaşık 5 yıla ihtiyaç duyulmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).

Hidrasyon sırasında önce plastik kıvamda çimento hamuru oluşmakta, daha sonra oluşan hamur priz başlangıcında plastikliğini kaybetmekte, priz sonu ile de sertleşmekte ve dayanım kazanmaya başlamaktadır (Koçak, 2008).

Çimentonun prizi ve sertleşmesi bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelir. Çimento ve suyun birleşmesiyle, ana bileşenlerin oluşturduğu kimyasal reaksiyonlar pratik olarak şu şekilde ifade edilebilir. Kalsiyum silikatlar ($C_3S - C_2S$) ve su (H) reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat ($C_3S_2H_3$, kısaca C-S-H) denilen bir ürün ile kalsiyum hidroksiti meydana getirir. Çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandıran da oluşan bu C-S-H jelidir. Meydana gelen C-S-H'nin parçacıkları arasındaki çekim kuvveti, bağlayıcılık özelliği yaratmaktadır. C-S-H'nin büyüklüğü moleküler mertebededir ve çimento tanesinin 1/1000'i büyüklüğündedir. (Erdoğan ve diğerleri, 1998).

Kalsiyum silikatların reaksiyon formülü şu şekildedir.



Hidratasyon sırasında önce plastik kıvamda çimento hamuru oluşmaktadır. Daha sonra oluşan hamur priz başlangıcında plastikliğini kaybetmekte, priz sonu ile de sertleşmekte ve dayanım kazanmaya başlamaktadır (Neville, 2006).

C₃A ana bileşeninin hidratasyonu

C₃A, su ile en hızlı reaksiyona giren çimento bileşenidir ve bu reaksiyon sonrasında çok yüksek ısı açığa çıkmaktadır. İlk olarak C₄AH₁₄ ve C₂AH₈ gibi ürünler ortaya çıkmaktadır. Ancak bu ürünler kararlı bir yapıda olmadığı için $C_3A + 6H \rightarrow C_3AH_6$ (hidrogarnet) denklemi elde edilmektedir. Bu esnada ani priz meydana gelmekte ve işlenebilme özelliğinin olmamasına yol açmaktadır. Katılaştan çimento hamurunda çatlaklar görülmekte ve fazla dayanım elde edilememektedir. Bu reaksiyonu yavaşlatmak amacıyla alçı taşı klinker ile birlikte öğütülmektedir (Yeğınobalı 1999, Aruntaş 1996).

Alçılı ortamda C₃A'nın hidratasyonu ile $C_3A + 3CSH + 26H \rightarrow C_6AS_3H_{32}$ (etrenjit) reaksiyonu gelişmektedir. Etrenjit kısa iğneler şeklinde kristalleşmekte ve hacim genişmesi meydana getirmektedir. İleri yaşlarda çimento içinde monosülfat haline dönüşmektedir. Etrenjit oluşumu sırasındaki hacim genişmesi çimento hamuru henüz plastikken meydana geldiği için bir sakınca oluşturmamakta, ancak betonun sertleşmesinden sonra sülfatlar ortama girerse monosülfat hidrat tekrar etrenjite dönüşmekte ve bu nedenle hacim genişmesi olmakta ve dolayısıyla betonda çatlamlara yol açmaktadır (Yeğınobalı, 1999).

C₄AF ana bileşeninin hidratasyonu

Gerçekte C₂A ve C₂F katı eriyiğinin ortalama bileşimi olan C₄AF'nin hidratasyonu, hidratasyon hızı daha az olmakla birlikte C₃A'nın hidratasyonuna benzemektedir. C₃A'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demir oksit almaktadır. Hidratasyon reaksiyonu sonunda alçı bulunmadığında ya da belli bir değerin altında olduğunda, hidrogarnet ($C_4AF + (6+n)H \rightarrow C_3AH_6 + CFH_2$) oluşmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006, Erdoğan 2010). Daha sonra alçılı ortamda sülfat yoğunluğuna bağlı olarak $C_4AF + 3CSH + 26H \rightarrow C_6A(F)S_3H_{32}$ ve $C_4AF + CSH + 26H \rightarrow C_4A(F)SH_{18}$ gibi, sırası ile etrenjit ve monosülfat hidrata benzeyen yapılarda bileşikler oluşmaktadır (Neville, 2006; Aruntaş, 1996).

Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı taktirde, C_4AF ana bileşenin göstereceği hidratasyon, C_3A ana bileşenin hidratasyonu kadar şiddetli olmasa bile oldukça hızlı olmakta ve açığa büyük miktarda ısı çıkarmaktadır. C_3A oranı düşük, C_4AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun sebebi tam olarak bilinmemekle birlikte, demir iyonu içeren kalsiyum-alümina-monosülfat ürünlerinin, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmediği düşünülmektedir (Erdoğan, 2010).

C_3S ve C_2S ana bileşenin hidratasyonu

Çimentonun yaklaşık %75'ini oluşturan kalsiyum silikatların hidratasyonları sonucu lifli düzensiz yapı ile örgü yapı arasında değişen bir dizi hidrat meydana gelmektedir. CaO/SiO_2 oranları ve kristal suyu miktarları değişmekle beraber fiziki yapıları boşluklu bir rijit jel olarak birbirine benzeyen bu hidratlar, C-S-H veya tobermorit jeli olarak adlandırılır (Yeğinobalı, 1999). C-S-H jelleri zayıf kristalli kolloidal parçacıklardan oluşmakta (C-S-H kristalleri tipik olarak $1 \times 0,1 \times 0,01 \mu m$ 'den daha küçüktür), ve lif şekilli bu kristallerin dağılımında bir düzen bulunmamaktadır. Elektron mikroskopla incelendiğinde C-S-H jelleri, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedirler. C-S-H jellerinin yapısının bir parçası olarak kolloidal tabakada adsorbe durumunda su yer almakta ve katı kolloidal tabakalarının arasında çok küçük boyutlu jel boşlukları bulunmaktadır (Erdoğan, 2010).

Özetle, C_3A ve C_4AF bileşenleri, uygun miktarda alçı ile kullanıldıklarında çimentonun bağlayıcılık özelliğini bir miktar etkilerler. Ancak, esas bağlayıcılık özelliği C_3S ve C_2S bileşenleri tarafından sağlanmaktadır (Erdoğan ve diğerleri, 1998).

Hidratasyon ısısı ve priz

Çimentoyu oluşturan minerallerin her birinin su ile verdiği kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan ısıların toplamına "hidratasyon ısısı" denilmektedir. Hidratasyon ısısı cal/g veya J/g birimiyle ifade edilmekte bir normal PÇ' nin toplam hidratasyon ısısı yaklaşık $120 cal/g$ ($500 J/g$) olarak belirtilmektedir (Erdoğan, 1995).

Çimento bileşenleri tam bir kimyasal dengeye ulaşmadan katılaştıklarından yüksek enerjiye sahip olup su ile reaksiyonları ekzotermiktir, yani hidratasyon ısısı açığa çıkmaktadır. Hidratasyon süresince çimentonun kimyasal bileşimine de bağlı olarak ısı yayılımı, priz süresi ile ilişkilendirilebilir. Çimento bileşenlerinin hidratasyonları birbirinden tamamen bağımsız olmamaktadır. Sülfat iyonları kalsiyum alüminatların hidratasyonunu geciktirirken, kalsiyum silikatların hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Diğer oksit ve gayri saflıklar da bu dört ana bileşenin hidratasyonunu etkilemektedir. Buna rağmen ilk birkaç günde hızlıdan yavaş doğru C_3A , C_3S , C_4AF ve C_2S olarak sıralanabilmektedir (Yeğınobalı, 1999).

Hidratasyon ısısı beton teknolojisinde hem yararlı hem de zararlı olabilmektedir. Soğuk havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz ve dayanım kazanmanın normal sürelerde yer almasına katkıda bulunmaktadır. Sıcak havalarda ise taze betonda kıvam kaybını hızlandırmaktadır. Kütle betonlarında havaya açık dış yüzeylere oranla iç bölgelerde ısıнын yükselmesi, sıcaklık farklarından dolayı ısı gerilme ve çatlamalara neden olabilmektedir. Çimentonun hidratasyonu ile ilgili aşamalar çimentonun bileşimine ve iç yapısına ilaveten başka faktörlerden de etkilenmektedir. Ortam sıcaklığındaki artış reaksiyonları hızlandırmaktadır. Çimento inceliği doğal olarak hidratasyona yardımcı olmaktadır. Bazı araştırmacılara göre 25 μm 'den iri taneler yıllar sonra bile tamamen hidrate olmamaktadır. Jel teşekkülü için gerekli miktarın üzerindeki yoğurma suyu katılma ve dayanım kazanma sürelerini uzatmaktadır. Bayat çimentolar da genellikle geç priz almaktadırlar (Yeğınobalı, 1999).

Çimento hamurunda priz başlangıcı ve sona erişı göreceli kavramlar olup deney metoduna göre değişebilmektedir. Ancak, hemen hemen bütün ülkelerde bu amaçla vicat metodu uygulandığından bir görüş birliğı oluşmuştur. Beton teknolojisinde priz süreleri önemlidir. Taze beton priz başlangıcından sonra işlenebilirliğini kaybetmektedir. Diğer taraftan prizin zamanında biterek betonun sertleşip dayanım kazanması beklenmektedir. Bu nedenlerle standartlarda genellikle prizin en erken 45-60 dakikadan sonra başlaması ve en geç 8-10 saat içinde sona ermesi öngörülmektedir. Dolayısı ile klinker bileşimine bağlı olarak katılacak alçı miktarına dikkat edilmesi gerekmektedir (Yeğınobalı, 1999).

Hava ve inşaat koşullarına, çimento türüne bağlı olarak priz sürelerini hızlandırmak veya yavaşlatmak için kimyasal katkıları kullanılabilmektedir. Priz sırasında yalancı priz ile

karşılaşılabilmektedir. Klinkerin yeterince soğumadan alçı taşı ile öğütülmesi sırasında, alçı taşı kısmen kristal suyunun bir bölümünü kaybederek normal alçıya dönüşebilir. Bilindiği gibi normal alçı 5-10 dakika içinde priz yapmakta ve katılaşmaktadır. Katılaşan çimento hamuru karıştırıldığında tekrar plastik kıvama dönüşüyorsa bunun gerçek priz değil, yalancı priz olduğu anlaşılmakta ve bir sakınca teşkil etmemektedir (Yeğınobalı, 1999).

2.1.5. Çimento özelliklerini belirleyen kriterler

Çimentoların kalite ve yeterliğini belirlemek amacıyla başlıca aşağıdaki özellikleri tayin edilir.

Standart basınç mukavemet

Çimentoların, standart kum ve belli karışım oranları ile, standart kalıplar ve kür koşullarında yapılan 28 günlük basınç mukavemetleri çimento kalitesini belirleyen en önemli kriteri oluşturur. Bu mukavemet değerleri çimento tipini belirleyen sembol olarak kullanılır. Avrupa normunda ve Türk standartlarında 28 günlük standart basınç mukavemeti için sınır değeri olarak 32,5 MPa, 42,5 MPa ve 52,5 MPa olmak üzere üç sınıf belirlenmiştir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Priz başlama süresi

Çimentoya su katılarak hamurun oluşturulduğu andan itibaren, hamurun akıcılığını ve plastikliğini kaybettiği ana kadar geçen süre priz başlama süresi olarak tanımlanır. Bu süre Vicat aleti ile yapılan özel bir deney ile belirlenir. Bu deneyde, çimento ile suyun karıştırılmış olduğu andan itibaren, Vicat iğnesinin cam levhaya 3-5 mm uzaklık kalıncaya kadar inmesi anına kadar geçen süre priz başlama süresi olarak belirlenir. Eski standartlarda priz bitiş süresi de deneysel olarak tayin edilirdi. Yeni standartlarda yalnız priz başlama süresi için sınır değeri verilmiştir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Hacim genleşmesi

Çimento bileşiminde fazla miktarda serbest kireç ve magnezyum oksit bulunması halinde hidrasyon sırasında istenilmeyen hacim genleşmesi meydana gelebilir. Çimentoların hacim genleşmesi Le Chatelier halkaları ile tayin edilir. 24 saat normal kürde, daha sonra 4 saat kaynamakta olan su içinde bekletilen çimento hamurunda meydana gelen genleşme

aletin çubukları arasından (mm) olarak ölçülür. Toplam genişlemenin çimentolarda 10 mm yi geçmemesi istenir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Birim hacim ağırlığı

Standartlarda kriter olarak verilmemekle beraber, çimento fabrikalarında klinker üretim kalitesini hızlı şekilde kontrol etmek üzere klinker birim hacim ağırlığı ölçülür. Bu amaçla belli elekler örneğin, 11,2 mm-5,6 mm arasında kalan granüle haldeki klinkerin 1 litre hacmindeki ağırlığı tartılarak sonuç g/L olarak belirlenir. Bu görünür yoğunluk değerinin belli bir değerden yüksek olması halinde klinkerin iyi pişirilmiş olduğuna karar verilir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Serbest kireç

Çimento içinde silikat ve alüminat halinde bağlanmamış olarak bulunan CaO, serbest kireç olarak tanımlanır. Betonda genişmelere neden olan serbest kirecin çimento içinde mümkün olduğunca az olması istenir. Klinkerin serbest kirecinin artmasının başlıca iki nedeni vardır. Bunlardan birincisi kireç doygunluk faktörünün gereğinden yüksek oluşudur. Normalde çimento hammadde karışımı içine teorik olarak gerekli olandan daha fazla CaO bulunması klinker oluşumunu kolaylaştırır. Ancak reaksiyonlarda kullanılmayan CaO klinker içinde kalır. Kireç doygunluk derecesi yüksek olması halinde yakıt sarfıyatı da artar. Düşük kireç doygunluk faktörü olan ham karışımlarda ise, pişme kolaydır, ancak C₃S fazının az, C₂S fazının çok fazla oluşmasından dolayı mukavemetler düşük olur (Gürü ve Yalçın, 2006).

Serbest kireç oluşumuna etki yapan ikinci olay, fırın içinde sinterleşme bölgesinden sonraki soğutma bölgesinde meydana gelir. Soğutma esnasında 1250 °C'un altındaki sıcaklıklarda C₃S tersinir bir reaksiyon göstererek C₂S ve CaO'ye ayrışır. Bu reaksiyon sonucu klinker bileşiminde serbest kireç olduğu gibi C₃S yüzdesi azalır. Bu durum çimento mukavemetini azaltıcı olarak etki yapar. Klinkerin soğutulması ne derece hızlı yapılırsa serbest kireç oluşması o derece önlenmiş olur (Gürü ve Yalçın, 2006).

Kızdırma kaybı

Çimento içinde organik bileşikler, karbon dioksit ve su gibi uçucu bileşiklerin belli bir değerden fazla bulunmaması istenir. Standartlarda bu değer < % 5,0 olarak verilmiştir.

Çimentolarda kızdırma kaybı tayini $975 \pm 25^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki bir fırında 15 dakika kızdırılarak yapılır (Gürü ve Yalçın, 2006).

Çözünmeyen kalıntı

Klinker bileşikleri alkali özellikte olup tamamı asitlerde çözünür. Ancak çimento içinde hammaddeden gelen başka inert bileşiklerde bulunabilir. Bunların belli bir değerden yüksek olması istenilmez. Standartlara çözünmeyen kalıntı yüzdesinin $<5,0\%$ olması sınırı konulmuştur (Gürü ve Yalçın, 2006).

Çimentoda çözünmeyen kalıntı deneyi ile asitlerde çözünmeyen maddelerin yüzdesi belirlenir. Bu amaçla çimento numunesi hidroklorik asitte çözülür. Çözünmeyen maddeler süzülerek ayrılır. Sıcaklığı $975 \pm 25^{\circ}\text{C}$ olan fırında kızdırılır. Elde edilen miktar çimentoda çözünmeyen kalıntı olarak verilir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Sülfat miktarı (% SO_3)

Çimento priz başlama süresini geciktirmek için çimento içine alçı taşı katılması gerekir. Aksi halde trikalsiyum alüminat çok hızlı çözünerek priz süresinin çok kısılmasına neden olur. Priz olayında kalsiyum sülfatın çözünme hızı büyük önem taşır. Bu nedenle iki mol kristal suyu olan alçı taşının kullanılması yoluna gidilir. Uygun miktarda alçı taşı klinker ile birlikte öğütülür. Çimento içine katılacak alçının gereğinden fazla olması sülfat korozyonuna neden olacağı için zararlıdır. Standartlarda alçı miktarının normal olarak $3,5 \text{ SO}_3$ 'ten daha fazla olması istenilmez (Gürü ve Yalçın, 2006).

Diğer bileşenler

Hammadde içinde genellikle çok az miktarda bulunan alkali metal oksitleri (K_2O ve Na_2O) normal halde, çimentonun esas elemanları olan kireç, alümin veya silisle birleşmeyip, klinker içinde oksit halinde kalırlar. Alkalilerin miktarının belirli bir sınırı aşması halinde bu bileşiklerin silikat ve alüminatların kristal yapılarında bazı değişiklikler meydana getirdiği ileri sürülmektedir. Ancak çimento içinde bulunan alkali oksitlerin büyük bir kısmının serbest halde olduğu ve çimento hidratasyonu sırasında su ile birleşerek hidroksit haline dönüştüğü kabul edilmektedir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Hammaddeler içinde bulunan MgO klinkerin pişirilmesi sırasında başka maddelerle birleşmez. Bu nedenle klinker mineralojik bileşimine girmez. Bu madde çimentoda genel olarak iki şekilde bulunur.

- Klinkerin çok yavaş bir şekilde soğutulması halinde MgO kristal haline geçer. Bu durumdaki magnezyum oksitin çimento içinde bulunması önemli hacim artışlarına yol açtığından beton yapıda genleşme meydana gelir.
- Eğer klinker çok hızlı soğutulacak olursa, bu durumda MgO amorf bir yapıya sahip olur. Amorf yapıdaki magnezyum oksitin çimento içinde bulunması sakıncalı değildir. Bu görüşe dayanılarak yeni çimento standartlarında MgO sınır değeri kaldırılmıştır (Gürü ve Yalçın, 2006).

2.1.6. Çimento türleri

Farklı kaynaklarda değişik sınıflandırmalar yapılarak adlandırılmış olan çimento türlerine rastlanılabilmektedir. Günümüz endüstrisinde kullanım alanına ve ihtiyaca göre değişik özelliklerde çimento üretilmektedir. Çimento türleri portland çimentosu, yüksek fırın cüruf çimentosu, traslı çimento, katkılı çimento ve diğer çimentolar olmak üzere beş farklı sınıfa ayrılmaktadır (Gürü ve Yalçın, 2006).

Portland çimentosu

Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın çimento türüdür. Portland çimentosu belirli oranda kalktaşı ve kilin karıştırılıp klinkerde pişirilmesinden sonra bilyeli değirmende öğütülmesiyle elde edilir (Gürü ve Yalçın, 2006).

Yüksek fırın cüruf çimentosu

Granüle yakın fırın cürufu ile Portland çimentosu klinkeri karışımının az miktarda alçıtaşı ile öğütülmesi ile elde edilir. Genelde, bu tür çimentolar deniz suyu ve diğer sülfatlı ortamlarda portland çimentosuna kıyasla daha yavaş gelişen ancak nihayetinde daha yüksek bir dayanıma sahip olurlar. Bununla birlikte geçirimsizlikleri daha düşüktür (Gürü ve Yalçın, 2006).

Traslı çimentolar

Silisli ve alüminli maddeler içeren volkanik tüflerdir. Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamasına rağmen, çimentodaki mevcut kireçle bu özelliği kazanırlar. Bu tür çimentolar imalat aşamasında portland çimentosu klinkerine aktif volkanik tüfler veya benzeri traslar katılarak, bunların öğütülmesiyle elde edilir. Karışımındaki tras oranı %20 -

%40 düzeyinde tutulur. Bu tür çimentoların geçirimsizliği az ve hidratasyon ısıları düşük olduğu için genellikle su yapılarında kullanılırlar (Gürü ve Yalçın, 2006).

Katkılı çimentolar

Portland çimentosu klinkerinin ağırlıkça en fazla %19'unun puzolanik malzeme ile değiştirilmesi ve alçıtaşı eklenmesiyle elde edilir. Katkılı çimento traslı çimento için belirtilen özelliklere sahiptir, fakat traslı çimentodan farkı puzolan oranının daha fazla olmasıdır (Gürü ve Yalçın, 2006).

Diğer çimento türleri de uçucu küllü çimento, süper sülfat çimentosu, sülfata dayanıklı çimento, erken dayanımı yüksek çimento gibi başlıklar altında sınıflandırılabilirler (Gürü ve Yalçın, 2006).

2.1.7. Çimento standartları

Çimento, uluslararası standart sanayi tasnifinde (ISIC), 369 ana grup ve 3692 kod numarası ile sanayide kullanılan esas kimyasal maddeler grubunda yer alır (ekutup.dpt.gov.tr).

Türkiye'de çimento üretimine ilişkin ilk geliştirilen standart 1959 yılının 6/640 numaralı standardıdır. Bu standartta değişik portland çimentosu, yüksek fırın cüruf çimentosu gibi çimento türlerine ilişkin üretim standartları belirlenmiştir. 1975 ve 1985 yılları arasında eski standartları iptal eden ve çimento çeşitlerini 6'dan 11'e çıkartarak 6 farklı standart geliştiren Türkiye, 2000 yılında Avrupa standartlarını norm haline getirmiş ve EN 197 standardını benimsemiştir.

Bu standart çerçevesinde CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV ve CEM V tipleri tanımlanmıştır. Ayrıca yeni katkı maddelerinin standartları ile yeni kimyasal, fiziksel, mekanik test metot ve uygulamaları da EN 197 kapsamındadır (www.tcma.org.tr).

Türk standartları kataloğuna göre çimento aşağıda belirtildiği gibi çeşitlendirilir: Portland çimentoları ve katkılı portland çimentosu (TS EN 197-1 CEM I): Portland çimentoları sondajlarda en çok kullanılan çimentolardır. İnilecek derinliğe ve kuyularda karşılaşılabilecek sorunlara göre değişik türleri vardır (TS EN 197-1, 2004).

Yüksek fırın cüruf çimentoları (TS EN 197-1 CEM II/BS – CEM III/A-B)

Ani soğutma ile granüle haline getirilmiş bazik yüksek fırın cürufuyla portland çimento klinkeri ve alçıtaşının belirli oranlarda karıştırılarak öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır (TS EN 197-1, 2004).

Traslı çimento (TS EN 197-1 CEM II/B-P)

Traslı Çimento, kütlece 20-40 kısım tras ile karşılıklı olarak 80-60 kısım portland çimentosu klinkerinin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır (TS EN 197-1, 2004).

Beyaz portland çimentosu (TS-21)

Beyaz Portland çimentosu ise, özel nitelikli kil ile kireçtaşının birlikte pişirilmesi sonucu elde edilen beyaza yakın renkli klinkerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilmektedir (TS 21, 1983).

Harç çimentosu (TS-22)

En az % 40 portland çimentosu klinkeri ile çözünmeyen kalıntı miktarı en çok % 50 olacak şekilde doğal puzzolanlar ve uçucu kül gibi çeşitli maddelerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır (TS 22, 1992).

Uçucu küllü çimento (TS EN 197-1 CEM II/A-V – B-V)

Uçucu küller silissi veya kalkersi yapıda olabilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu külün ise hidrolik özelliklerine ilaveten puzolanik özellikleri olabilir. Uçucu külün kızdırma kaybı, kütlece % 5,0'i geçmemelidir (TS EN 197-1, 2004).

Sülfatlı cüruf çimentosu (TS EN 197-1 CEM III/B-C)

Alüminyum içeriği fazla olan yüksek fırın cürufunu % 80, portland çimentosu klinkerini % 5 ve alçıtaşını da % 15 oranlarında içerir (TS EN 197-1, 2004).

Katkılı çimento (TS EN 197-1 CEM II/A-P)

Kütlege en çok 19 kısım puzolanik madde ile karşılıklı olarak en çok 81 kısım portland çimento klinkerinin, bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi ile ortaya çıkmaktadır. Puzolanik maddeler, kendi başlarına hidrolik bağlayıcı olmadıkları halde, ince olarak öğütüldüklerinde rutubetli ortamda ve normal sıcaklıkta kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek bağlayıcı özellikte bileşikler oluşturan maddelerdir (TS EN 197-1, 2004).

2.1.8. Portland çimentoları

Portland Çimentosu'nun (PÇ) ilkel maddeleri kireçtaşı (kalker) ve kildir. Üretiminde, öncelikle uygun miktarlarda kireç (CaO), silis (SiO_2), alümin (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3) içeren hammaddeler belirli oranlarda karıştırılır. Malzeme bu haliyle farin denilen $\sim 700^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip fırınlara iletilir. Kısmen kalsine olmuş malzeme döner fırınlarda $1450 - 1650^\circ\text{C}$ 'ye kadar pişirilir. Pişirme sırasında sıcaklık arttıkça kalsinasyon, sinterleşme ve füzyon reaksiyonları oluşur (Tokyay ve Dilek, 2003). Bu aşamalarda kalkerin ayrışması ile CaO , kilin ayrışması ile SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oluşur. Daha sonra bu maddeler sıcaklığın daha da artmasıyla tekrar birleşip silikatları ve alüminatları oluştururlar. Döner fırından çıkan gri renkte ve fındık büyüklüğündeki malzemeye "klinker" denir. Klinker soğutulduktan sonra çimentonun priz sürelerini ayarlamak için %3–5 oranında alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) eklenerek öğütülür. 90μ 'un altında öğütülen toz haldeki malzeme çimentodur ve bağlayıcı özellik kazanmıştır (Özkul ve diğerleri, 1999). Öğütülmüş malzemeye su ve kum katıldığında zamanla sertleşen malzemenin renk ve diğer özelliklerinin Leeds kentine yakın olan "Portland" isimli küçük bir adadaki taşlara benzediğini fark eden J. Aspdin, elde ettiği ürüne İngiltere'de "Portland Çimentosu" adıyla bir patent almış ve günümüze kadar bu isimle gelmiştir (Erdoğan, 2003).

Bir PÇ'nin $\sim 90\%$ 'i kimyasal içerik açısından ayrıştırılırsa; %60-65'i CaO , %20-25'i SiO_2 , %7-12'si $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oluşturur. Ancak bu oksitler PÇ'de kendi başlarına değil, döner fırındaki reaksiyonlar sonucunda, karmaşık bileşenler halindedirler.

PÇ'nin %90'ını oluşturan dört ana bileşen trikalsiyum silikat ($\text{Ca}_3\text{SiO}_5 = \text{C}_3\text{S}$), dikalsiyum silikat ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = \text{C}_2\text{S}$), trikalsiyum alüminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = \text{C}_3\text{A}$) ve tetrakalsiyum alüminaferrit ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10} = \text{C}_4\text{AF}$)'tir. Geriye kalan %10'luk kısım ise serbest CaO ,

serbest MgO, SO₃ ve alkali oksitlerle bazı minör oksitlerdir (Tokyay ve Dilek, 2003). Tipik bir PÇ klinkeri ağırlıkça %45–65 C₃S, %15–30 C₂S, %6–12 C₃A, ve %6–8 C₄AF karma oksitleri içerir. Kalsiyum silikatlar az miktarda safsızlıkları sebebiyle C₃S (alit) ve C₂S (belit) adını almıştır. (Baradan ve diğerleri 2002).

Gebhart, Kuzey Amerika'da pazarlanmakta olan portland çimentoları üzerinde 1994 yılında bir araştırma yürütmüştür. Başlıca amaç çimento karakteristikleri üzerinde güncel veriler toplamak ve standartların geliştirilmesine yönelik ihtiyaçları saptamak olmuştur. Sonuçlar özellikle PÇ Tip I ve Tip II'de sülfat miktarı, incelik ve dayanımların 50 yıl önce üretilen çimentodan fazla olduğunu göstermiştir. Ortalama olarak, 1950'lerin çimentosu ile kıyaslandığında günümüz çimentosunda kireç doygunluk faktörü ve C₃S miktarı daha fazladır. Bu bileşim daha düzgündür ancak alkali miktarında biraz fazladır. Benzer şekilde çimento özellikleri de değişmiştir. Bugünün çimentosu daha hızlı dayanım kazanmakta ve daha erken yüksek dayanıma ulaşmaktadır. Çimento özelliklerinde üretimden kaynaklanan değişkenlikler ise azalmıştır (Romain ve Sarkar, 2001).

2.2. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırılması

Gelişen beton teknolojisiyle puzolanlar, betonun bazı fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerine katkı sağlamak ve ekonomik yarar vermek amacıyla kullanılan mineral katkı maddesi olarak yerini almıştır. Puzolanik özelliklere sahip birçok yapay ve doğal malzeme geçmiş zamanlardan zamanımıza kadar beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Söz konusu mineral katkı maddeleri portland çimentosuna benzer özelliklerine rağmen yalnız başlarına bağlayıcılık özellikleri olmadığı için ikincil bağlayıcı maddeler olarak tanımlanmaktadır. Dolgu malzemesi özelliğinde olan bu maddeler, puzolanik aktiviteleriyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik gösterir ve bağlayıcı hamurun yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özelliklerinde iyileşme görülür. Puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri boşlukları azaltır ve daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını sağlar. Böylece agrega ile bağlayıcı hamur yüzeyi arasındaki aderans artar. Mineral katkı maddelerinin, betonda akışkanlaştırıcı katkı maddeleriyle birlikte kullanılması yüksek basınç dayanımlarına ulaşmayı kolaylaştırır (Anuk, 2004).

Puzolanlar doğal hallerinde bağlayıcılık özelliği bulunmayan ya da oldukça çok az olan, ancak öğütülerek ince taneli yapıya sahip olduklarında, normal sıcaklıkta ve sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan, silikalı veya alüminalı malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan 2010). Ancak bütün silisli ve alüminli malzemeler puzolan olarak kabul edilmemektedir. Örnek olarak kuvars (SiO_2), mullit ($\text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}$) ve sillimanit (SiAl_2O_5) puzolanik özelliğe sahip değildir (Aruntaş, 1996).

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir (Taşkın, 1999). Puzolan ismi birbirinden farklı volkanik kökenli ürünler için kullanılmaktadır. Puzolanlar esas olarak silika ve alümininden meydana gelirler ki, bu da onlara asit karakteri ile kireç ve alkalilerle kuvvetli bir birleşme eğilimi verir. Onlar aslında çok küçük boşluklardan meydana gelen camsı ürünlerdir ve bu nedenle büyük yüzey alanlarına sahiptirler. Kristal fazları sınırlıdır ve meydana geldikleri magmanın özelliklerini taşırlar (Cook, 1986).

Puzolan kullanımı, çimento ve beton endüstrisinde ekonomik, teknik ve çevreyle ilgili yararlar sağlamaktadır. Bu nedenle, puzolanların inşaat sektöründe kullanımı her geçen gün artmaktadır (Tokyay ve diğerleri, 2005). Puzolanlar kökenine göre yapay ve doğal olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Son yıllarda doğal ve yapay olarak birçok puzolanik madde çimentoya doğrudan katılarak ya da bir kısmını ikame etmek yolu ile kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü, 2006).

2.2.1. Doğal puzolanlar

Doğada bulunan volkanik tüfler, volkanik küller, volkanik camlar, ısıtılmış görmüş killer ve şeyller, diatomlu topraklar doğal puzolanlara örnek olarak verilebilir (Erdoğan, 2003). Bazı doğal puzolanların kimyasal bileşimi Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları (Erdoğan, 2003)

Doğal Puzolan	SiO_2 %	Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %	Alkali %
Volkanik cam	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	6.5
Volkanik tüf	52.1	18.3	5.8	4.9	1.2	6.6
Diatomlu toprak	86.0	2.3	1.8	-	0.6	0.4
Pişirilmiş kil	42.2	16.1	7.0	21.8	1.9	1.3

2.2.2. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu yapay puzolanlara örnek olarak verilebilir. Bazı yapay puzolanların kimyasal bileşimi Çizelge 2.4’de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin % miktarları (Erdoğan, 2003)

Doğal Puzolan	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Alkali %
Uçucu Kül	51.5	23.9	6.1	10.5	2.4	3.1
Yüksek Fırın Cürufu	40.2	11.0	0.8	34.5	9.4	3.6
Silis Dumanı	93.7	0.3	0.6	0.3	0.3	0.6

Massazza’nın sınıflandırmasına göre doğal puzolanlar, bu sınırlandırmaya göre 3 ana gruba ayrılmaktadır. İlk grup olan piroklastik, eriyik haldeki magmanın şiddetle dışarı atılması sonucunda biçimlenmekte ve sonra hızla soğuması ile içinde gaz kabarcıkları bulunan cam gibi bir malzeme meydana gelmektedir. Bundan dolayı, bu malzemelerin kimyasal kompozisyonu yeryüzüne çıkan magmanın kompozisyonuna bağlıdır. İkinci grubu, değişime uğramış yüksek silisli malzemelerden meydana gelmektedir. Bu puzolanlar, su içinde eriyen oksitlerin ayrılması ile kimyasal değişime uğrayan genellikle açık renkli kayaların, durgun sularda farklı orijinli malzemelerle birlikte çökmesiyle şekillenirler. Bu malzemeler, genellikle puzolanik özeliği azaltan kil ile karışık olarak bulunmaktadır. Doğal puzolanların son grubu ise, kil ve diatomit toprağını içine alan klastik orijinlidir. Kilin puzolanik davranışının eksik olması, PÇ ikame malzemesi olarak kullanılmasına olanak vermemekle birlikte uygun sıcaklıklarda yapılan kalsinasyon, kilin puzolanik özelliğini önemli miktarda yükseltmektedir (Aruntaş 1996, Koçak 2008).

2.2.3. Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi

Bir puzolanın kullanımını ve değerlendirmesini yapmak için, onun puzolanik aktivitesini belirlemek esastır. Söz konusu problem, önerilen birçok yöntemle karşı çözülmüş sayılmaz; çünkü bütün puzolan tiplerine uygulanabilir olmasının yanı sıra, maddenin kullanım karakteristikleriyle hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir olan bir test yöntemi yoktur (Massazza, 2000). Puzolanik aktivitenin belirlenmesi açısından kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerden yararlanılabilir (Özturan ve Gökçe, 1996).

Daha çok kullanılan kimyasal yöntemler, hidratlı kireç veya portland çimentosuyla karıştırılan puzolanın sabitleştirdiği kireç miktarını belirlemeye dayanır. Test sonuçları; maddenin yapı ve inceliğine, kireç/puzolan oranına ve sıcaklığa bağlıdır. Bir diğer yöntemde, puzolan-kalsiyum hidroksit süspansiyonu bir saat kaynatılarak ve bu işlem başında ve sonunda görülen serbest kireç miktarları karşılaştırılarak, maddenin puzolanik aktivitesi hızlı bir biçimde değerlendirilir.

Uçucu küllerin puzolanik kalitesi, puzolan-kalsiyum karbonat karışımından ve aynı karışımın 1000 °C’de bir saat kalsine edilmiş halinden arta kalan çözünmeyen HCl miktarlarını karşılaştırılarak değerlendirilebilir. Fiziksel yöntemlerde de puzolanların aktiviteleri, değerlendirilebilir. Bunlardan kalorimetrik ve kimyasal bir yöntem, puzolanların nitrik-hidroflorik asit karışımı içinde çözünmesi sırasında ve bir saatlik aşınma sonunda kalan çözünmeyen kalıntının çözünmesi ile açığa çıkan ısıyla puzolanı değerlendirir. Puzolan aktivitesini değerlendirme yöntemlerinin üçüncü grubu, puzolan-kireç ve puzolan-çimento harçlarının mekanik dayanımını ölçmeyle sağlanabilir. Kireç daha sabit bir karakteristiğe sahip olduğundan, puzolan-kireç harcı daha iyi değerlendirme ve testin standartlaşmasını sağlar. Öte yandan, puzolançimento harcı, klinker-puzolan bileşiminin doğrudan değerlendirilmesine neden olur (Özturan ve Gökçe, 1996).

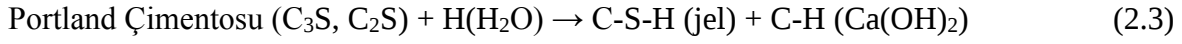
Doğal puzolanlar genellikle katkılı portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki türlü kullanılabilirler. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya yüksek fırın cürufu içeren katkılı portland çimentosu kullanımıyla betona katılır. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona karıştırma sırasında veya çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır (Özturan, 1991).

2.2.4. Puzolanik reaksiyon ve reaksiyon ürünleri

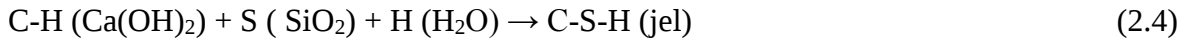
Çimento ve beton karışımı içerisinde çok ince taneli olarak yer alan puzolanlar bağlayıcılık özelliklerini çimentonun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girip yeni C-S-H jelleri oluşturarak kazanırlar. Puzolan içeren betonlarda puzolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile portland çimentosu (C_2S+C_3S) hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (C-H) arasında aşağıda (2.3) ve (2.4)’de gösterildiği gibi meydana gelmektedir.

(Çimento kimyasında $\text{CaO}=\text{C}$, $\text{SiO}_2=\text{S}$, $\text{Ca(OH)}_2=\text{CH}$, $\text{Al}_2\text{O}_3=\text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{F}$, $\text{H}_2\text{O}=\text{H}$ harfleri ile gösterilir.)

1) Portland çimentosu hidratasyonu



2) Puzolanik reaksiyon



(2.3) denkleminde sonra olan (2.4) denklemindeki puzolanik reaksiyon sonucu portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate ürünler açığa çıkmaktadır. Fakat bu reaksiyon hem serbest kireç oluşumuna ihtiyaç duyması hem de yavaş bir reaksiyon olması nedeniyle puzolanik etkiyle dayanıklılık kazanma da yavaş olmaktadır. Alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ve kür sıcaklığının artması, reaksiyonu hızlandırmaktadır. (2.4) denkleminde, serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitin reaksiyonları sonucunda hidratasyon ürünleride oluşmaktadır. Bununla birlikte portland çimentosu hidratasyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünler açısından hem de reaksiyonların hızları açısından farklılıklar ortaya çıkmaktadır (Özturan, 1991).

Portland çimentosu ve puzolan karışımı hidratasyona girince bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı da gittikçe azalmaktadır. Bağlayıcı ürünlerin bu reaksiyon sonucunda artması dayanım artışına neden olurken, karışımdaki serbest kirecin azalması ise dayanıklılığı iyileştirmektedir. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha sonra ve daha yavaş gelişmesi de puzolanlı betonların dayanımlarını daha geç yaşlarda kazanmalarına neden olmaktadır. Bu tür betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar genellikle daha düşük olmasına rağmen ileriki yaşlarda puzolanik aktiviteyle beraber sadece portland çimentoyla üretilmiş betonu yakalamakta veya geçmektedir (Özturan, 1991).

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalar, kimyasal özelliklerden çok çimento hamurunun boşluk boyutlarını da içeren puzolanik reaksiyonun fiziksel özelliklerinin, mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının artması için önemli olduğunu çalışmalarıyla göstermişlerdir (Özturan, 1991).

Portland çimentosu ve puzolan hidratasyona girince puzolanik reaksiyon sonucu bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır. Çünkü zamanla daha çok bağlayıcı ürün oluşmaktadır. Yeni ürünlerin oluşması da dayanım artışına neden olurken aynı zamanda serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi dayanımada önemli yararlar sağlamaktadır. Puzolanik reaksiyonun, portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi, puzolanlı betonların dayanım kazanma hızlarını da etkilemektedir. Bu tip betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar kontrol betonuna göre düşük olmakta fakat ileriki yaşlarda puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedirler (Özturan, 1991).

2.3. Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen, ana bileşeni 1 μm 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO_2) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür (Koca, 1996).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85 - %98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Bu malzeme, “mikrosilis”, veya “silis tozu”, veya “silika fume” gibi isimlerle de anılmaktadır. Silis dumanı, amorf yapıda ve çok ince taneli malzeme olmasından dolayı ve yüksek miktarda SiO_2 içermesi sebebiyle, mükemmel bir puzolanik malzemedir (Erdoğan, 2003).

Silis dumanı aşırı ince parçalara ve yüksek reaktiviteye sahip olduğu için, çok yüksek dayanıma sahip (≥ 100 MPa) ya da erken yaşta yüksek dayanıma sahip beton üretmek için süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır. Silis dumanı, elektrik ark ocaklarında silikon ve çeşitli silikon alaşımlarının üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ürün alaşımın tipi (şekli) ile suya daldırılmalı elektrik ark ocaklarında kullanılan iki temel bileşen olan kuvars ve kömürün kompozisyonu, silis dumanının kimyasal kompozisyonunu oldukça çok etkilemektedir (Malhotra, 1997).

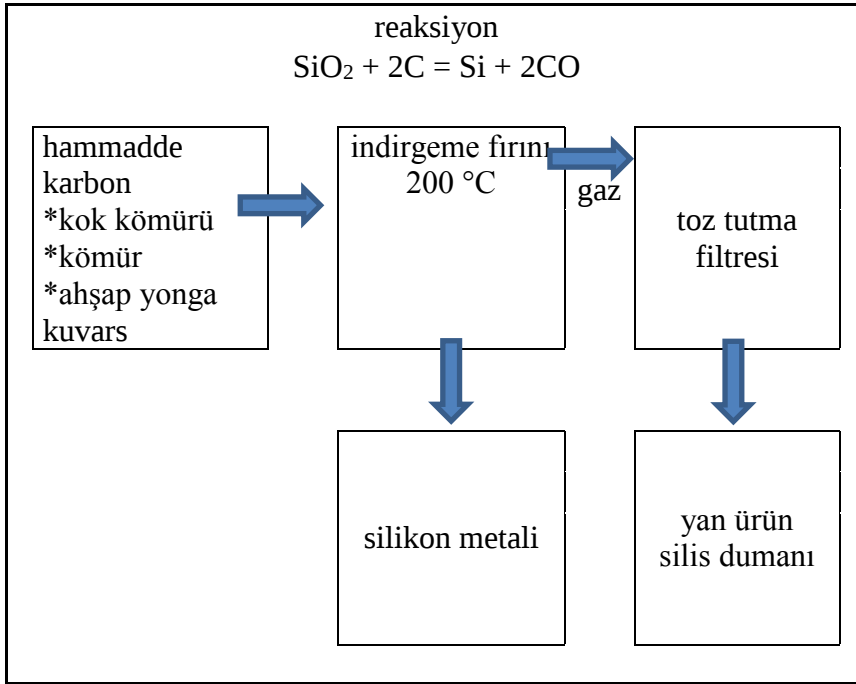
Silis dumanı silisyum ve ferrosilisyum üretiminde, elektrik ark fırınlarında yaklaşık 200 °C sıcaklıkta, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince

taneli puzolanik bir malzemedir (ACI Committe, 1987). Ortaya çıkan SiO gazı fırının üst bölümlerinde okside olup hızla soğuyarak amorf silis haline gelir ve silis dumanı bileşiminin büyük bölümünü oluşturur. Alaşımdaki silikon miktarı arttıkça, silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artmaktadır. Silikon oranı %98'e eriştiğinde ürün ferrosilikondan çok, silikon metali olarak isimlendirilmektedir (Özbek, 1998). Standartlarda, silis dumanında en az % 80 SiO₂ olması ve kızdırma kaybının en çok % 5 olması öngörülmektedir. Çizelge 2.5'de silis dumanının SiO₂ miktarı ile silikon alaşımlarının üretimiyle ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 2.5. Silikon oranına göre SiO₂ miktarları (Yazıcı, 1996)

Ferrosilikon alaşım/metal	SiO ₂ 'nin silis dumanı içindeki miktarı
%50 ferrosilikon	%72-77
%75 ferrosilikon	%84-88
Silikon (%90)	%93-98

Çizelgeden de görüleceği üzere, yüksek silis oranı, silis dumanını etkin bir puzolan haline getirmektedir. Puzolanik özellik bakımında %75 sınıfındaki silis dumanı ve daha yüksek oranlar betonda kullanım için satılmaktadır (Yazıcı, 1996; Yeğinobalı, 1993). Baca tozu olarak özel filtrelerde tutulup toplanan silis dumanının çoğunlukla küresel olan tanelerinin ortalama çapları 0,1 µm olarak belirlenmiştir. Bu, çimento inceliğinin 1/100'ü kadardır. Yüksek oranda amorf silis içermesi ve çimento ile uçucu küllerden çok daha ince olması sebebiyle silis dumanı çok aktif bir puzolanik maddedir (Ekinci ve Yeğinobalı, 1996). Şekil 2.1'de, silis dumanının üretimi şemalarla özetlenmiştir.



Şekil 2.1. Silis dumanının üretimi (SFA, 2006)

Ülkemizdeki silis dumanı, Etibank Elektrometalürji Sanayi İşletmesinin Antalya'daki tesislerinde elde edilmektedir. Fabrikanın ferrosilisyum (FeSi), silikoferrokrom (SiFeCr) ve kalsiyum kromit (CaCr) fırınlarından özel filtreli toz tutucularla elde edilen baca tozlarının özellikleri ve üretim miktarları Çizelge 2.6' da verilmiştir (Yeğınobalı ve Erdoğan, 1999).

Çizelge 2.6. Etibank elektrometalürji sanayi baca tozlarının özellikleri (Yeğınobalı ve Erdoğan, 1999).

Kimyasal Bileşimi %	Ferrosilisyum Fırını	Silikoferrokrom Fırını	Kalsiyum Kromit Fırını
SiO ₂	94.0-95.0	85.0-90.0	4.20-7.00
Al ₂ O ₃	0.40-1.35	0.80-3.00	10.00-11.00
Fe ₂ O ₃	0.40-1.00	0.50-1.40	10.00-11.00
CaO	0.60-1.00	0.90-1.80	26.00-28.00
MgO	1.00-1.50	3.00-3.65	13.00-14.00
Cr ₂ O ₃	-	0.50-1.75	30.00-32.00
S	0.15-0.30	0.40-1.00	0.40-0.80
C	0.80-1.00	1.00-1.50	0.30-0.50
Kızdırma Kaybı	0.50-1.00	1.30-2.50	0.80-1.00
Yığma Yoğunluk (t/m ³)	0.32-0.34	0.15-0.17	1.30-1.40
Baca Tozu Yıllık Üretim (t)	1800	1200	----

2.3.1. Silis dumanının fiziksel özellikleri

Renk

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişen renkte olabilir. Koyuluk, içeriğindeki karbonun artmasıyla artmaktadır (Malhotra, 1997). Silis dumanı su ile karıştırıldığında rengi koyulaşmakta hatta siyaha dönüşmektedir.

İncelik

Silis dumanı çok ince öğütülmüş parçalar içermektedir. Parçaların büyük çoğunluğunun boyu 0.1-0.2 μm arasındadır. Bu boyut, bir Portland çimentosunun taneciklerinin ortalama boyutundan 100 kez daha küçüktür. Genelde 45 μm eleğinin üzerinde kalan malzeme boyut üstü (kalın) olarak kabul edilmektedir (Erdoğan, 2003).

Kalın malzemenin silis dumanı içindeki yeri genellikle %6'nın altındadır. Silis dumanının özgül alanı Blaine aleti ile ölçülememektedir. Nitrojen emme yöntemi ile ölçülen özgül yüzeyi çoğunlukla 130.000-280.000 cm^2/gr arasında değişmektedir. Betonda kullanılan silis dumanı özgül yüzeyi 200.000 cm^2/gr civarındadır.

Silis dumanının inceliği diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi görülmektedir:

Silis : $\sim 200.000 \text{ cm}^2/\text{gr}$

Tütün Külü : $\sim 100.000 \text{ cm}^2/\text{gr}$

Uçucu Kül : 4.000~7.000 cm^2/gr

Normal Portland Çimentosu : 3.000 cm^2/gr

Özgül ağırlık

Beton için uygun olan silis dumanlarının özgül ağırlıkları 2.2-2.3 arasındadır. (Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3.1 civarındadır).

Gevşek halde birim ağırlık

Silis dumanının üretildiği gevşek haldeki birim ağırlığı genelde 200~300 kg/m³ arasındadır. Gevşek haldeki Portland çimentosunun birim ağırlığı ise 1500 kg/m³'tür.

Puzolanik aktiflik ve su ihtiyacı

Silis dumanı, çok ince olması ve yüksek silis içeriğinden dolayı genel olarak oldukça yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli görevi, C₂S ve C₃S hidratasyonları sonucu oluşan Ca(OH)₂'i bağlamak ve yeni bir CSH jeli meydana getirmektir. Bu jel çimento hamurunda normal olarak oluşan CSH jellerinden biraz farklıdır, yoğunluğu daha azdır ancak geçirimsizliği daha fazladır. Böylece silis dumanı taneleri, büyük kristaller yerine çok sayıda daha küçük ve daha sağlam Ca(OH)₂ kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaktadır. Küçük kürecikler halindeki silis dumanı tanecikleri, uygun oranda akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde, çimento taneleri arasındaki boşluklarda suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedirler (Yeğinoğlu, 1993).

Silis dumanının dayanım aktivite indisi ASTM C 311 (1994)'e göre belirlenmektedir. ASTM standartlarında, silis dumanının dayanım aktivite indisi için herhangi bir sınırlama getirilmemiş olmasına rağmen, bu dayanım indisi de uçucu kül ve doğal puzolanlar için getirilen minimum sınırı değerlerinin oldukça üzerindedir.

Aşırı ince olmasından dolayı, silis dumanının su ihtiyacı oldukça fazladır. Bu su ihtiyacı, uçucu kül ve doğal puzolanlar için verilen üst sınırların çok üzerindedir. Çizelge 2.7'de silis dumanının puzolanik aktivitesi ve su ihtiyacı için bulunan sonuçlar, uçucu kül ve doğal puzolanlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.7. Silis dumanının puzolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının uçucu kül ve doğal puzolan ile karşılaştırılması (Erdoğan, 2003)

	ASTM C618'in sınırları			Silis dumanı
	Doğal puzolan	F sınıfı uçucu kül	C sınıfı uçucu kül	
Dayanım aktivite indisi 28 günde kontrol numunesine oranla % min.	75	75	75	110
Su ihtiyacı kontrol numunesinin % max.	115	105	105	134

Silis dumanının beton ve harç için etkili bir puzolanik malzeme olduğu ve elde edilen betonların düz çimento hamuruna göre, daha süreksiz ve su geçirimsiz boşluk yapısına sahip olduğu belirtilmektedir (Bayasi ve Zhou, 1993).

2.3.2. Silis dumanının kimyasal özellikleri ve kompozisyonu

Silis dumanının esas bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir. Genelde, beton içinde katkı olarak kullanılan silis dumanının SiO_2 içeriği %85'in üzerindedir. İkinci esas bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. Fe_2O_3 içeriği ise %1 ile %2 civarındadır. Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O ve K_2O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur. Silis dumanının kimyasal özelliği, üretilen metalin ya da alaşımın tipine göre değişebilir. Demir silikon üretiminden elde edilen silis dumanının, demir ve magnezyum içeriği diğer silikon metal üretilen fırınlardan elde edilen silis dumanının demir ve magnezyum içeriğinden daha fazladır (Yazıcı, 1996). Çizelge 2.8'de bazı tipik silis dumanlarının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 2.8. Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (% olarak) (Yazıcı, 1996)

Bileşen	USA	Norveç	Kanada	Türkiye
SiO_2	90-93	90-96	89-95	93-95
C	1.3-2.6	0.5-1.4	2.1-4.2	0.8-1
Fe_2O_3	0.4-0.7	0.2-0.8	0.1-3.1	0.4-1
Al_2O_3	0.5-1.6	0.5-3	0.10.7	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	0.3-1.0	1-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.1-1.0	0.6-1
Na_2O_3	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.2	0.1-0.4
K_2O	1-1.2	0.4-1	0.5-1.4	0.5-1
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.2	0.1-0.3
Kızdırma kaybı	1.4-2.8	0.7-2.5	2.3-4.4	0.5-1

Silisyum, alüminyum ve demir oksit

Silis dumanının puzolanik reaksiyonuna katkıda bulunan en önemli bileşeni yüksek orandaki SiO_2 'dir. Kanada standartlarına göre silis dumanı en az %85 SiO_2 içermelidir. Fe_2O_3 ve Al_2O_3 silis dumanının aktivitesine katkıda bulunur fakat silis dumanı içindeki yüzdelерinin çok az olmasından dolayı bu katkı az olmaktadır (Özcan, 2005).

Magnezyum kükürt ve alkaliler

Yukarıda belirtildiği gibi, magnezyum, kükürt ve alkaliler silis dumanı içinde mevcuttur ve miktarı oldukça düşüktür. Genelde beton içinde bir problem oluşturmazlar. Bununla birlikte bu oksitlerin yüzdesi arttığında, bu maddeler katılaşmış beton içinde zararlı hacim genişlemelerine sebep olabilir (Özcan, 2005).

Karbon ve kızdırma kaybı

Çizelge 2.8'den anlaşılacağı gibi silis dumanının karbon içeriği ile kızdırma kaybının değeri birbirine çok yakındır. Kızdırma kaybının %85 ile %95'i genellikle silis dumanının içinde bulunan karbonun yanmasından dolayı oluşur. Karbon kimyasal reaksiyonlar açısından aktif değildir. Fakat varlığı hava katkı maddesinin dozajını etkileyebilir. Yüksek kızdırma kaybı olan silis dumanı yüksek dozajlı hava katkı maddesi ihtiyacı duyar. Kızdırma kaybının max. değeri Kanada standartlarına göre %6'dır (Özcan, 2005).

2.3.3. Silis dumanının beton özellikleri üzerine etkileri

Silis dumanının beton karışımında kullanılması taze ve katılaşmış betonun özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Bu etkiler Çizelge 2.9'da özetlenmiştir. Bu etkiler aşağıda açıklanmaktadır (Özcan, 2005).

Çizelge 2.9. Silis dumanının beton özellikleri üzerine etkileri

Olumlu Etkiler	İstenmeyen Potansiyel Etkiler
– Basınç mukavemetini artırır – Kanama ve ayrışmayı azaltır – Aşınma direncini artırır – Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini artırır – Alkali-agrega reaksiyonunu azaltır – Sülfatlara ve diğer kimyasallara karşı dayanıklılığı artırır – Hidratasyon ısısını azaltır.	– Su ihtiyacını artırarak su azaltıcı katkılara ihtiyaç duyulur – Terlemeyi azalttığından beton yüzeyinin perdahlanması zordur – Plastik rötre ve çatlaklarına karşı çok hassastır – Oldukça koyu renkli beton elde edilmesine neden olmaktadır.

Taze beton özellikleri üzerine etkisi

Su İhtiyacı

Silis dumanı yalnız başına beton karışımına ilave edildiğinde karışımın su ihtiyacını belli bir slump değerini elde etmek için artırır. Süper akışkanlaştırıcı kullanılmadığında, beton

karışımına ilave edilen her bir kg silis dumanı için 1 lt su ilavesi sabit akışkanlığı tutturabilmek için tavsiye edilmektedir. Genelde silis dumanı yüksek dozajlı normal tür su azaltıcı ile ya da süperakışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılır (Özcan, 2005).

İşlenebilirlik

Silis dumanı ile üretilen taze beton portland çimentosuna göre daha fazla yapışkanlık gösterir. Böylece portland çimentosu için elde edilen aynı işlenebilirliği elde edebilmek için silis dumanlı betonun slump'ı 3~5 cm daha fazla olmalıdır. Silis dumanının betona katılması ile karışım içersindeki toplam özgül yüzey miktarının artması nedeniyle katı maddeler arasında oluşan sürtünme artmakta bu ise karışımın segregasyona karşı direncini artırmaktadır. Silis dumanı ile elde edilen beton işlenebilirliğini portland çimentosuna göre daha çabuk kaybettiği için başlangıç slump'ı portland çimentosuna göre daha fazla olması istenmektedir. Silis dumanının miktarı arttıkça betonun aderansını da artırmaktadır. Silis dumanının beton içinde %5'ten fazla kullanılması durumunda beton daha yapışkan olmakta, yüzey düzeltmek için kullanılan ahşap aletlere yapışarak, yüzey perdahlama işlemini güçleştirmektedir. Yapışkanlığın artırması silis dumanını püskürtme betonu kullanımı için ideal bir malzeme yapmakta ve geri tepme ile yere düşmeyi azaltmaktadır (Özcan, 2005).

Priz zamanı

Silis dumanı küçük miktarlarda beton karışımında kullanıldığında priz zamanını fazla etkilemez. %10 kadar beton karışımına ilave edilen silis dumanı çimento miktarı 250~300 kg/m³ olan betonlarda priz zamanını fazla etkilememiştir. Silis dumanı genelde kimyasal katkıları ile birlikte kullanılır. Bu kimyasal katkıları ise portland çimentosu betonunun priz zamanını artırdıkları gibi silis dumanı katkılı betonların da priz zamanını etkilemektedir. Silis dumanı artırıldıkça priz zamanında da gecikmeler oluşmaktadır. Sıcaklığın silis dumanı katkılı betona etkisi diğer betonlar üzerinde olan etkisi gibidir (Özcan, 2005).

Hidratasyon ısısı

Çimentonun belirli bir miktarı yerine katılan puzolanlar açığa çıkan hidratasyon ısını azaltırlar. Silis dumanı kullanıldığında ise durum başlangıçta biraz farklı olabilmektedir. Çimento ağırlığının %10'u kadar silis dumanı kullanılarak yapılan betonların ilk 72 saat içersindeki hidratasyon ısısı, silis dumanı kullanılmayan betonlardan biraz daha fazla

olabilmektedir. Ancak ileri yaşlarda silis dumanlı betonlarda silis dumanı kullanılmayan betonlara göre yaklaşık %8~10 kadar daha az hidrasyon ısısı açığa çıkmaktadır. Başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidrasyonunu hızlandırması ile açıklanmaktadır (Özcan, 2005).

Hava sürüklenme

Silis dumanının beton karışımına ilavesi ile karışım için gerekli hava katkı maddesi ihtiyacı portland çimentosuna göre daha fazla artırmaktadır. Bunun sebebi ise yüksek özgül yüzey ile yanmamış karbonun silis dumanı içindeki mevcudiyeti olarak gösterilmektedir. Hava katkı maddesinin miktarı deney ile tespit edilmektedir. Silis dumanı katkılı betonunun yapışkanlılığı nedeniyle sürüklenmiş hava daha fazla stabil duruma gelmekte ve vibrasyon anında oluşan hava kayıpları ise azalmaktadır (Özcan, 2005).

Kanamakusma

Silis dumanı partikülleri aşırı derece ince olduğundan ve özgül yüzeyi artırdığından, taze beton içindeki bir kısım su bu partiküller tarafından tutulmaktadır. Böylece taze beton içerisinde yükselecek olan su azaldığından bu durum kanamayı da azaltmaktadır. Kanamanın azalmasıyla plastik rötre ve çatlaklarının oluşma tehlikesi baş göstermektedir. Yüksek sıcaklık durumlarında plastik rötre için önlem alınmalıdır. Düşük nem ve hızlı rüzgârlar beton yüzeyindeki suyu hızla buharlaştırıp plastik rötreye sebep olabilir (Özcan, 2005).

Katılaştırılmış beton özellikleri üzerine etkileri

Dayanım

Silis dumanının betona ilavesi basınç dayanımını oldukça artırmaktadır. Bu durum silis dumanı katkısının boşluk oranının azaltılmasına ve puzolanik aktivitesinin çok yüksek olmasına bağlanmaktadır. Bununla beraber silis dumanının herhangi bir akışkanlaştırıcı kullanılmadan beton karışımına ilavesi su ihtiyacını artırmakta böyle bir durumda suyun artması ise dayanımda azalmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle silis dumanı neredeyse her zaman süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılır. Böylece ‘su/(çimento+silis dumanı)’ oranı düşük tutulabilmektedir (Özcan, 2005).

Silis dumanı ilavesiyle beton mukavemetinin artmasının esas nedenleri kullanılan silis dumanının miktarına, su-bağlayıcı oranına, bağlayıcı malzeme miktarına, çimento tipine,

su azaltıcı katkının cinsine, kür durumuna ve zamana bağlanmaktadır. Silis dumanı kullanılarak elde edilen betonun basınç dayanımının optimum olmasını sağlayan esas neden ise silis dumanı miktarı ile kullanılan akışkanlaştırıcının dozajı sağlamaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanmadan üretilen silis dumanı betonunun su ihtiyacı sabit işlenebilirlik için direkt olarak silis dumanı miktarına bağlıdır. Genel yapılarda kullanmak için silis dumanının dozajı genelde %7 ile %10 arasında değişir (Özcan, 2005).

Silis dumanı katkılı betonların ilk günlerdeki dayanımı da oldukça yüksek olabilmektedir. Ancak bu durum yukarıdaki faktörlere, özellikle de 'su/(çimento+silis dumanı)' oranına bağlıdır. Malhotra ve diğerleri, (1993) tarafından yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %5-%15'i kadar silis dumanının kullanılmasıyla su/(çimento+silis dumanı) oranı 0.60 olan betonlarda ilk üç gün içerisinde belirgin bir dayanım artışı olmadığını, fakat bu oranın 0.40' a indirilmesiyle ilk günlerde de dayanım artışı elde edildiği görülmüştür. Bir başka araştırmada, 18 saatlik basınç dayanımı olarak 210-450 kgf/cm² gibi değerler elde edilmiştir (Erdoğan, 2003).

Silis dumanı betonunun basınç dayanımı üzerinde kür sıcaklığının çok önemli bir etkisi vardır. Silis dumanının pozolanik reaksiyonu kür sıcaklığına karşı portland çimentosundan daha fazla hassastır. Kür sıcaklığının artması silis dumanı betonunun dayanım kazanmasını hızlandırmaktadır. Silis dumanının basınç dayanım karakteristiği portland çimentosundan genel olarak farklıdır. Silis dumanının bu karakteristiği uçucu kül betonunun karakteristiğine benzemektedir. Ancak, silis dumanı betondaki pozolanik reaksiyonun daha erken yaşlarda oluştuğunun delilleri vardır. Bunun sebebi ise silis dumanının aşırı ince olması ve silis içeriğinin amorf formda olmasıdır. Normal sıcaklıklarda, silis dumanının beton dayanımına katkısı 3 gün ile 28 gün civarında yerini almaya başlar (Özcan, 2005).

Silis dumanı ile yapılan betonun eğilme çekme dayanımı portland çimentosu ile üretilen kontrol betonunun dayanımına eşittir ya da daha yüksektir. Silis dumanının çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki genelde normal portland çimentosu betonundaki ilişki ile benzerlik gösterir (Özcan, 2005).

Silis dumanlı betonlar daha az terleme gösterdiğinden ve buna bağlı olarak donatıların veya iri agrega tanelerinin altlarında daha az miktarda su cepleri oluşmuş olacağından, bu tür betonlardaki bağlayıcı hamur ile donatı arasındaki veya bağlayıcı hamur ile agrega taneleri arasındaki yapışma daha iyi olmaktadır (Özcan, 2005).

Permeabilite

Silis dumanı içeren betonların, portland çimentosuna göre daha az geçirimli olduğu bulunmuştur. Toplam porozitenin yaklaşık aynı kalmasına rağmen, çimento-silis dumanı hamuru içindeki iri boşlukların azalması nedeniyle bu geçirimliliğin azaldığı düşünülmektedir (Özcan, 2005).

Kuruma rötresi

Silis dumanı katılmış betonlarda rötre, katkı miktarı, su-bağlayıcı oranı ve ilk günlerdeki bakım koşullarından etkilenmekte, bu faktörlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar normal betonla elde edilenlerden farklı olabilmektedir. Katkı miktarı %10'dan az olduğunda rötre normal betonlardan farklı değildir. Daha yüksek silis dumanı miktarı, su-bağlayıcı oranının yüksek olması, yetersiz ıslak bakım ve ileri yaşlar kuruma rötresini göreceli olarak artırmaktadır. Su çimento oranından bağımsız olarak, 28 gün nemli ortamda kür edilen silis dumanı betonun rötresi portland çimentosu ile kıyaslanabilecek durumdadır (Özcan, 2005).

Aşınma direnci

Silis dumanının aşınma direncinin iyileştiği görülmekte, bu da yüksek dayanıma bağlanmaktadır. Silis dumanı betonu çelik paletli araçların kullanıldığı yollarda kaplama olarak başarı ile kullanılmıştır (Erdoğan, 1997).

Zararlı kimyasallara ve sülfata karşı direnci

Silis dumanlı betonların geçirgenliği daha az olduğundan zararlı birçok kimyasala karşı daha dayanıklı olabilmektedirler. Betonun geçirgenliği ve Ca(OH)_2 içeriği zararlı kimyasallara karşı göstereceği dirençte rol oynayan iki faktördür. Silis dumanı yüksek oranda kullanılarak (%12'den %20'ye kadar) betonun Ca(OH)_2 içeriği ve geçirgenliğinin azaltılması gözlemlenir. Norveç'te yapılan araştırmalarda, silis dumanı katkılı betonların sülfata karşı göstermiş olduğu direncin, Tip V-Sülfata Dayanıklı Portland Çimentosu ile yapılan betonlardaki kadar yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Özcan, 2005).

Alkali-silika reaksiyonu

Betonda zamanla genleşme ve çatlamalara yol açan alkali-agrega reaksiyonları genellikle alkali-karbonat ve alkali-silika reaksiyonları olarak iki ana grupta ele alınır. Silis dumanı katkısının alkali karbonat reaksiyonunun kontrol altına alınmasında fazla etkili olmadığı bildirilmektedir (Özcan, 2005).

Yüksek oranda alkali içeren çimento ve reaksiyona hazır agreganın mevcudiyetinde silis dumanı ilavesiyle üretilen (%5-%10) betonlarda alkali-silika reaksiyonunun zararlı etkisi önlenmiş ya da geciktirilmiştir (Özcan, 2005).

2.3.4. Silis dumanının test edilmesi için standart metodlar

Silis dumanının fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan genel testler incelik, dayanıklılık, özgül ağırlık ve dayanım aktivite indisi testleridir. SiO₂, SO₃ içeriği, kızdırma kaybının belirlenmesinde kullanılan deneyler silis dumanının kimyasal özelliklerini belirlemede kullanılan deneylerdir. Silis dumanı için özellikle belirtilen herhangi bir ASTM ya da TS yoktur. Bununla beraber ASTM C 311 ve TS 639'da uçucu kül için tanımlanan deneyler genellikle silis dumanını test etmede de kullanılır (Özcan, 2005).

2.3.5. Silis dumanının uygunluğu için sınır değerler

Silis dumanının fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirleyen herhangi bir ASTM ve TS yoktur. Ancak, Kanada standartları tarafından geliştirilen bir standart mevcuttur (CSA-A23.5.M.86).

Kanada standartlarına göre, betonda kullanılacak silis dumanı miktarı, yeterli dayanım, durabilite ve hacim stabilitesindeki değişim için bir kanıt gösterilmedikçe %10'u geçmeyecektir. Bu değerin %10 olarak seçilmesinin esas nedeni %10'dan fazla silis dumanı kullanılan birçok işte gözlemlenen plastik rötreği minimize etmek içindir. Bir başka sebep ise, yüksek oranda silis dumanı kullanıldığında ortaya çıkan donma-çözünmenin neden olduğu durabilite problemlerinden kaçınmaktır (Özcan, 2005).

2.4. Uçucu Külle

Kömürle çalışan termik santrallerden yan ürün olarak uçucu külle ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte günümüzde gerek miktarları gerekse kullanım olanakları bakımından önemli yer tutan atık ürünlerin başında gelmektedirler. Kömürün içinde bulunan bazı inorganik maddeler yanma sırasında oluşan yüksek sıcaklıklarla ayrışmakta ve bacadan atılırken soğuyarak küresel tanecikler oluşturmaktadır. Uçucu kül adı verilen bu tanecikler elektrofiltrelerle ve siklonlarla yakalanmaktadır. Bununla birlikte doğrudan atmosfere karışmaları engellenmektedir. Böylece çevre ve hava kirliliği de mümkün olduğunca önlenmiş olmaktadır (Baykal ve diğerleri, 1993).

Uçucu külle TS EN 450'ye göre, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip, önemli bir kısmı SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan, reaktif SiO_2 içeriği kütlece en az % 25 olan, küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Ayrıca TS EN 450'ye göre uçucu külle, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir (TS EN 450, 1998).

Yanma sırasında termik santrallerde yer alan kazanların alev sıcaklığı 1600 °C'yi aşabilmektedir. Söz konusu sıcaklık kömürün içinde bulunan pek çok anorganik bileşenin erimesi için yeterlidir. Kaynaklarda kömür içinde yaklaşık 50 mineralin olduğu belirtilmesine rağmen bunların birçoğu, uçucu külde az miktarda bulunurlar. Çizelge 2.10 Kömür içinde bulunan ana mineraller beş grupta toplanabilir. Bunlar; alüminyum silikatlar, karbonatlar, sülfidler, kloritler ve silika mineralleridir (Karayığit ve Onacak, 1999).

Çizelge 2.10. Kömürün yanması ile oluşan anorganik dönüşümler

Kömür içindeki mineraller	Uçucu küldeki dönüşüm ürünleri
Fillosilikatlar	Amorf madde, Mullit ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$), Kuvars
Kuvars	Amorf madde, Kuvars (SiO_2)
Pirit (FeS_2), Siderit (FeCO_3)	Hematit (Fe_2O_3), Manyetit (Fe_3O_4)
Demiroksitler	
Kalsit (CaCO_3)	Kireç (CaO)
Dolomit $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$	Kireç, Periklaz (MgO)
Jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	Anhidrit (CaSO_4)
Ankerit $\text{Ca} (\text{Mg Fe Mn}) (\text{CO}_3)_2$	Kalsiyum Ferrit (CaFe_2O_4), Periklaz

Kazan alevindeki yüksek sıcaklık koşulları altındaki tanecikler üzerinde bir dizi karmaşık fiziko kimyasal değişiklikler oluşur. Tanecikler yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisi ile çok çabuk olarak küresel formlara dönüşebilmektedir (erimede yüzey serbestleşme enerjisini mümkün olduğu kadar azaltmak için). Oldukça küçük tanecikler atık gazlar (CO_2 , CO , H_2O , SO_2) ile birlikte bacadan çıkış esnasında çok kısa sürede düşük sıcaklık rejiminin etkisi altına girerek amorf katı durumda soğurlar. Soğutma şiddeti büyük ölçüde tanecik boyutu ile ilgilidir. Büyük tanecikler yavaş soğuma sonucu kristaller oluştururken, küçük tanecikler ise hızlı soğuma sonucu camsı formda gelişirler (Karayığit ve Onacak, 1999).

Terim olarak uçucu kül 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi endüstrisinin gelişmesi ile yayılmaya başlamıştır. 1937 yılında R. E. Davis, Californiya Üniversitesi'nde uçucu külün betonda kullanımı ile ilgili yapılan ilk deneysel sonuçları elde etmiştir. Söz konusu çalışma ilk standartların, deney yöntemlerinin ve uçucu külün kullanımının temelini oluşturmuştur. İnşaat sektöründe uçucu küllerin ilk olarak kullanımı ise 1948 yılında Hungry Horse Barajının inşaatı ile başlamıştır (Berry ve Malhotra, 1986).

Ülkemizde ise bu çalışmaların başlangıcı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Çimento endüstrisinin uçucu küllerle tanışması ise 1970'lerde olmuştur. Bazı çimento fabrikalarında deneme amaçlı uçucu küllü beton üretimi yapılmıştır (Tokyay, 1993). Dünyada ortaya çıkan uçucu kül miktarı yıllık 600 milyon ton, Türkiye'de ise bu rakam yaklaşık olarak yılda ortalama 13 milyon tondur (Türker ve diğerleri, 2003).

Günümüzde uçucu küller beton sektörü başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe ise katkılı çimento ve beton üretiminde, portland çimentosu üretiminde hammadde olarak, beton ve asfalt yol yapımında, bazı geoteknik uygulamalarda, hafif agrega üretiminde, tuğla, kiremit ve seramik üretiminde, dolgu malzemesi olarak kullanımı örnekler olarak gösterilebilir (Massazza 1989, Erdoğan 1993).

2.4.1. Uçucu küllerin özellikleri

Kömürün özellikleri ve yakılma yöntemine göre uçucu küllerin özellikleri farklılıklar gösterebilir. Genellikle silisli ve alüminli bir bileşimleri olduğundan puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Tane biçimi olarak ince ve küresel taneleri nedeniyle betonda işlenebilmeyi artırır ayrıca hidratasyon ısını

düşürürler. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturarak çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betonun dayanıklılığını artırır. Linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilen uçucu külde ise kireç oranı genellikle yüksektir. Bu tür uçucu küllerin aynı zamanda bağlayıcılık özellikleri de vardır. Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan kömürden elde edilen uçucu küllerde ise karbon miktarı yüksek olur. Karbon miktarının yüksek olması da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır, puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Çoğunlukla çimentodan daha ince taneli oldukları için uçucu küller ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir (Türker ve diğerleri, 2003).

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olduğu ve çok ince taneli olarak elde edildiği için uçucu kül de aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi puzolanik özellik göstermektedir. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanımı mümkündür. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilir. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-% 50'si civarında değişebilmektedir. Bazı araştırmacılara göre önümüzdeki yıllarda çevreye bırakılan uçucu kül miktarının artması beklenmektedir olduğundan bu malzemelerin beton üretiminde değerlendirilmesi önem arz etmektedir (Wesche,1991).

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

Çimentodan daha koyu gri renkte olan uçucu kül, çok ufak taneli, el ile temas edildiğinde yumuşak bir malzemedir. Taramalı elektron mikroskopuyla incelendiğinde farklı şekil, büyüklük, incelik ve biçimlerde, genellikle küresel taneciklerden meydana gelen bir yapı gösterir (Atakay, 2006).

Tanecik şekli ve büyüklük dağılımı olarak uçucu küller, kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi proseslere bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu küllerin tanecik şekli ve büyüklük dağılımında uçucu küller etkileyen faktörle, kömürün orjini ve üniform olması, kömürün pulverizasyon durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi proseslere bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, farklı büyüklüklerde hem

camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün düşük veya yüksek kireçli olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen içi boşluksuz tam küresel tanecikler bulunmaktadır ve bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen ve mikro yapıya sahiptirler. Yüksek kireçli küllerde ise, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunmasıyla heterojen şekil dağılımı mevcuttur. Bunun yanında küresel taneciklerin yüzeyleri de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir (Türker ve diğerleri, 2003).

Uçucu küllerin inceliklerinin tayini yöntemleri konusunda araştırmacılar arasında anlaşmazlıklar mevcuttur. İnceliğin özgül yüzey cinsinden ölçülmesi portland çimentosu için anlamlı bir yöntem olmakla birlikte uçucu küller için aynı güvenilirlikte kullanılamayacağı iddia edilmektedir. Hava geçirgenlik testlerinde, uçucu küle ait küresel taneciklerin çimentonun düzensiz şekildeki taneciklerine göre daha iyi paketlenildiği ve bu nedenle uçucu külün hava akışına karşı olan direncinin daha yüksek olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, kül içerisindeki gözenekli karbon tanecikleri yanıtıcı yüksek hava akışı gösterecek şekilde havanın geçmesine izin verir. Bu nedenlerden dolayı uçucu külün özgül yüzey alanı kolaylıkla belirlenemez (Atakay, 2006).

Uçucu küllerin şekli, inceliği, boyut dağılımları, özgül ağırlığı ve bileşimi; beton karışım oranlarını, taze beton özelliklerini, sertleşmiş betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkilemektedir. Bu etki artan yüzey alanı ile küresel taneciklerin kayganlaştırıcı nitelik taşıması ve dolgu maddesi özelliklerine sahip olması, şekilsiz ve pürüzlü yüzeye sahip olanların ise su ihtiyacını arttırması şeklinde olmaktadır. Uçucu külün taneciklerinin çok ince olması ve genelde küresel olmaları puzolanik aktiviteye de olumlu yönde etki etmektedir. Özellikle pürüzsüz yüzeyli ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduklarından kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı faz rol oynamaktayken, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın çokluğu belirleyicidir (Türker ve diğerleri, 2003).

Öte yandan pratik oluşu nedeniyle sıkça kullanılan bir başka yöntem 45 µm eleğin üstünde kalan miktarın belirlenmesidir. Bunların dışında lazerli tane dağılım analizi, hidrometre

analizi, azot adsorpsiyonu, X-ışınları sedimantasyonu gibi yöntemler de uçucu küllerin inceliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır (Atakay, 2006, Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Tanımlayıcı olmamakla beraber uçucu küllerin rengi ise üretilmiş oldukları santraldeki kömür cinsinin değişimini, kızdırma kaybını ve yanma koşullarındaki değişikliği gözlememize yardımcı olarak, uçucu kül özelliğinde değişim olup olmadığını anlamamızı sağlar (Anuk, 2004).

Uçucu küllerin özgül ağırlığı 1.97 ile 3.02 arasında değişmektedir. Beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları ise 2.2 ile 2.8 arasındadır. Özgül ağırlığı etkileyen faktörler, uçucu küldeki demirli bileşen ve karbon miktarıdır. Demirli bileşen miktarı fazla olan uçucu küllerin özgül ağırlıkları daha yüksektir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerin ise özgül ağırlıkları daha düşüktür (Anuk, 2004; Tuygun, 2002).

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri

Kimyasal bileşim olarak uçucu küller, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve kömür hazırlama, yanma, toz kaplama ve desülfürizasyon gibi proses koşullarına bağlıdır. Ana elementler olarak uçucu küllerin kimyasal yapılarında Al, Si, Ca, Fe ve S bulunur. Uçucu küllerin kimyasal yapısında bulunan başlıca bileşenler Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO ve SO_3 olup MgO, Na_2O , K_2O , TiO_2 ve benzeri oksitler bulunabilir. Bunların miktarları uçucu külün silisli veya kireçli yapıda olmasına göre farklılıklar göstermektedir. Buna göre SiO_2 %25-60, Al_2O_3 % 10-30, Fe_2O_3 % 1-15 ve CaO % 1-40 oranlarında bulunmaktadır. Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5, alkali oksitler (Na_2O+K_2O) %5'in altında bulunmaktadır. SO_3 ise genellikle %2-2.5 arasında bir değerde bulunmakla birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre % 10'a kadar yükselebilmektedir. Ancak TS EN 450-2 standardı SO_3 değerini en fazla %3 olarak sınırlandırmaktadır. Kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozulması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO_2 kaybını da içine almaktadır. TS EN 450-2 standardında kızdırma kaybı % 5 olarak sınırlandırılmıştır. Uçucu küllerin tipik kimyasal kompozisyonları Çizelde 2.11'de verilmiştir (Türker ve diğerleri, 2003; Öner, 2005).

Çizelge 2.11. Uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları

Bileşen	F Sınıfı Kül (%) (CaO<%10)	C Sınıfı Kül (%) (CaO>%10)
SiO ₂	43.6-64.4	23.1-50.5
Al ₂ O ₃	19.6-30.1	13.3-21.3
Fe ₂ O ₃	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-20.29
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na ₂ O	0.2.8	0.4-1.9
KK	0.4-7.2	0.3-1.9

Uçucu küllerde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanımın gelişmesinde önemli rol oynayan C-S-H jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup pozolanik reaksiyonlara girmek üzere alkali ortamda çözülen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipinden bağımsız olarak en az % 25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise düşük kireçli küllerde % 10'un altında, yüksek kireçli küllerde ise % 10-15 arasında değişmektedir (Türker ve diğerleri, 2003).

Uçucu küllerin sınıflandırılmalarında, kimyasal bileşen yüzdesi dikkate alındığında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. Bu standartlardaki kimyasal sınırlar Çizelge 2.12'de verilmiştir (TSE EN 450, 1998).

Çizelge 2.12. Uçucu küllerin kimyasal bileşimleri standart değerleri

			ASTM C 618	
Bileşen (%)	TS EN 450	TS 639	F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃		> 70	> 70	> 50
SO ₃	< 3	< 5	< 5	< 5
Nemlilik		< 3	< 3	< 3
KK	< 5	< 6	< 6	< 6
MgO		< 5		
Alkaliler		< 1.5	< 1.5	< 1.5
Cl-	< 0.10			
Serbest CaO	< 1			
Reaktif SiO ₂	> 25			

ASTM C 618 standardına göre, uçucu küller C ve F sınıflarına ayrılırlar. F sınıfı uçucu küller, bitümlü kömürden üretilen ve toplam SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ yüzdesi % 70'den fazla olan uçucu küllerdir. CaO yüzdesi % 10'un altında olduğu için düşük kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özellikleri yoktur, pozolanik

özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 50'den fazla olan küllerdir. CaO yüzdesi % 10'dan büyük olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küllerin puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcılık özellikleri de söz konusu olmaktadır (ASTM C 618, 1978).

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada ise, uçucu küller silisli (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'ten fazla olması gerekmektedir. W sınıfı uçucu küller ise, hidrolik veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'ten oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde reaktif CaO oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'ten fazla olması gerekmektedir. Ayrıca her iki türde de kızdırma kaybının % 5'ten küçük olması gerekmektedir (TS EN 197-1, 2004).

Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) ve proses koşullarına bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımdadır. Camsı (kristalsız) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır. Mineralojik bileşim (cam fazın durumu, kristal yapıları) puzolanik özellikleri de etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumunun uçucu külün reaktivitesinde etkinliği büyüktür. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO_2 açısından zengin ve yüksek oranda polimerize silisli veya alüminyum da içeren alüminosilikat bileşimindedir. Silisli veya alüminosilikat camsı fazı, düşük kireçli reaktif bileşen olup su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girdiğinden küle puzolanik özellik kazandırmaktadır. Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize faz da vardır. Burada saf silika camı Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğinin yanında kısmen bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır (Türker ve diğerleri, 2003).

Çizelge 2.13’ de Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri ve ASTM C 618 standardıyla karşılaştırılmaları verilmiştir (Türker ve diğerleri, 2003). Çizelge 2.14’de uçucu küllerin mineralojik bileşimleri verilmiştir (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Çizelge 2.13. Türkiye’deki bazı uçucu küllerin kimyasal bileşimleri

Bileşim (%)	Orhaneli	Çatalağzı	Çayırhan	Yatağan	Tunçbilek	ASTM C 618	
						F	C
SiO ₂	48,53	58,75	50,98	51,50	57,43		
Al ₂ O ₃	24,61	25,24	13,11	23,08	16,07		
Fe ₂ O ₃	7,59	5,76	9,74	6,07	13,41		
S+A+F	80,73	89,75	73,83	80,65	86,92	> %70	> % 50
CaO	9,48	1,46	11,82	10,53	2,22		
MgO	2,28	2,22	3,91	2,42	5,62		
SO ₃	2,48	0,08	3,94	1,32	0,92	< %5	< %5
K ₂ O	2,51	4,05	1,91	2,54	1,58		
Na ₂ O	0,35	0,60	2,71	0,77	0,37		
KK	1,69	1,12	0,86	1,06	1,92	< %6	< %6
Cl ⁻	0,005	0,015	0,014	0,003	0,002		

Çizelge 2.14. Uçucu küllerin mineralojik bileşimleri

Mineral	Mineral Yüzdesi		
	Silikoaluminöz Küller	Sülfokalsik Küller	Silikokalsik Küller
Camsı ve Amorf Faz	60	35	50
Mullit	20	1	5
Hematit	7	4	3
Manyetit	6	1	1
Kuvars	5	5	5
Anhidrit	-	15	5
Serbest Kireç	-	20	10
Feldispat ve Gehlenit	-	≥ 20	≥ 15

Uçucu küllerin çimentoda kullanımı

Uçucu küller üzerinde yapılan araştırmalar ve bunların çeşitli alanlarda kullanımına yönelik çalışmalar yaklaşık 75 yıl öncesine dayanır. Ancak bunların çimento sanayinde kullanımı enerji maliyeti, çevresel koruma ve kalite optimizasyonu kriterlerinin öne çıktığı 70’li yıllardan sonra önem kazanmıştır. Uçucu küller çimentoya katılarak uçucu küllü çimento üretiminde kullanılabileceği gibi betona ince agrega olarak da katılabilir. Çimento üretiminde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için uçucu küllerin çok ince olması, Al₂O₃ ve SiO₂ açısından zengin olması, alkali içeriğinin düşük olması ve yanmamış karbon

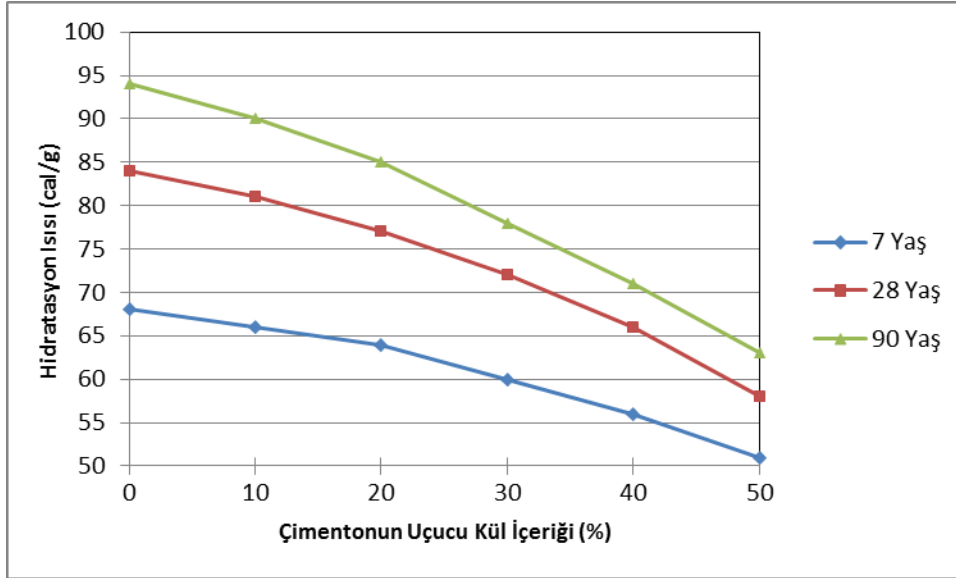
içeriğinin % 3'den az olması gerekir (Mishra ve diğerleri, 2003). Uçucu küllerin çimentoda kullanımına ilişkin değişik standartlar mevcuttur. Farklı standartlardaki sınırlamalar Çizelge 2.15'de verilmiştir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 2.15. Uçucu küllerin çimento üretimi ile ilgili sınır değerler

	TS 639	ASTM C 618	
		F Sınıfı	C Sınıfı
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	70	50
SO_3 , maks. %	5	5	5
Nemlilik, maks. %	3	3	3
KK, maks. %	10	6	6
MgO, maks. %	5	-	-
Alkaliler, maks. %	1,5	1,5	1,5

Uçucu külün çimentoda bir bileşen olarak kullanılması ekonomik ve çevresel kazanımlar yanında, uygulama yerine de bağlı olarak, çeşitli teknik özelliklerin iyileşmesinde yarar sağlar. Uçucu küllerin içerdiği küresel tanecikler yağlama etkisi yaptığından belirli bir işlenebilirlik değeri için su gereksinimi azalır. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, küledeki SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikleriyle ile pozolanik tepkimeye girerek fazladan (C-A-H ve C-S-H) oluşturur; alkali ve klor ortamlarına karşı dayanıklılığı artırır. Portland çimentosunun hidratasyonu esnasında ortaya çıkan ısı, beton sıcaklığının artmasına yol açar. Uçucu kül katılması hidratasyon ısını azaltmakta, bu sayede sıcaklık artışı düşmektedir. Uçucu küller büyük yapılarda termik çatlamaları azaltmaktadır. Özellikle baraj inşaatı gibi kütle beton kullanımı gerektiren durumlarda uçucu küllü çimentolar tercih edilmektedir. Çimentonun kül içeriği arttıkça hidratasyon ısısındaki azalışı gösteren örnek bir grafik Şekil 2.2'de verilmiştir (Atakay, 2006).

Uçucu kül kullanımında temel sıkıntı erken yaş basınç dayanımının düşüklüğü olup, erken yaş dayanımının önemli olduğu uygulamalarda kullanımından kaçınılmalıdır. Uçucu küller çoğu zaman termik santraldan elde edildiği şekli ile kullanıma hazır değildir. En azından bir boyut sınıflandırmasına tabi tutulur ve belli incelikteki kısım katkı olarak kullanılır. Belirli incelikteki küllerin yaklaşık % 30'a varan miktarlarda çimentoya katılması kabul edilebilir bir durumdur (Mccarthy ve Dhir, 2005). Katkı oranının artırılması ve uçucu küllü çimentoların teknik özelliklerinin daha da iyileştirilmesi konularında yapılmış çeşitli çalışmalar vardır.



Şekil 2.2. Çimentonun uçucu kül içeriğine bağlı olarak hidrasyon ısındaki azalış (Atakay, 2006)

Antiohos ve Tsımas, yaptıkları bir çalışmada sınıflandırılmış uçucu külün iri kısmında amorf silika ve alümina içeriğinin ince kısma oranla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Pozolanik tepkimelere giren ana bileşenlerin amorf silika ve alümina olduğundan hareketle bu iri fraksiyonu (+45 mikron) sınıflandırılmış ince kısım boyutuna öğütmüşler ve çimentoya katmışlardır. Bu yolla dayanım değerlerinin erken yaşlar da dahil olmak üzere iyileştiğini göstermişlerdir (Antiohos ve Tsımas, 2006). Bu sonuçlar Kiattikomol ve diğerleri,'nin bulguları ile örtüşmemektedir. Bu araştırmacılar 5 farklı kül üzerinde yaptıkları çalışmada sınıflandırılmış ince kısım ve aynı incelik değerlerine sonradan öğütülmüş iri kısmın dayanım değerleri arasında belirgin bir fark olmadığını saptamışlar ve bu nedenle uçucu küllü çimento harçlarının dayanımında etkili olan esas parametrenin kimyasal kompozisyon değil incelik olduğunu ileri sürmüşlerdir (Atakay, 2006).

Çimento sektöründeki teknolojik gelişmelerin hemen hemen tamamı enerjinin etkin kullanımına yönelik olmuştur. Ön ısıtıcı, ön kalsinasyonlu fırın sistemlerinin yanı sıra en önemli gelişmeler öğütme sistemlerinde olmuştur. Bilindiği gibi, çimento üretiminde kullanılan toplam elektrik enerjisinin % 40'ından fazlası öğütme işlemlerinde harcanmaktadır. Bu nedenle, yeni öğütücüler ve separatörler tasarlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Öte yandan tüm dünyada çimentoda daha fazla mineral katkı kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimentoda kullanılması,

- Klinkerizasyon enerjisinde tasarruf,
- Öğütme enerjisinde tasarruf,
- Kurutma enerjisinde tasarruf,
- Çevre dostu çabalarının ve faaliyetlerinin bir diğer göstergesi olması,
- Ürün çeşitliliği sağlaması,
- Elde edilecek malzemenin üstün özellikleri bakımından yararlı olacaktır (Atakay, 2006).

Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi

Uçucu küllerin taze betonun hidrasyon ısı ve sıcaklık yükselmesi üzerindeki etkisi

Priz alma ve sertleşme olayları sırasında bağlayıcı maddelerden ısı açığa çıkar. Açığa çıkan bu ısı hidrasyon ısıdır. Hidrasyon ısı, bu maddelerin su ile yapmış oldukları reaksiyon sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu ısı artışı özellikle kütle betonlarında ortaya çıkar. Hidrasyon ısısına karşı alınacak önlemler; uygun çimento seçimi, yavaş beton dökümü, çimento miktarını azaltma ile betondaki agrega ve suyu soğutma olarak sayılabilir. Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından hidrasyon ısında belirli bir azalma sağlanabilir.

Crow ve Dunstan yaptıkları çalışmada, düşük kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna göre daha az ısı çıkardığını ama yüksek kireçli uçucu kül içeren betonun kontrol betonuna yakın ısı meydana getirdiğini belirtmişlerdir (Akyüncü, 2012).

Compton ve McLannis, % 30 ikame oranında uçucu kül kullanılarak yaptıkları çalışmada, uçucu küllü betonlarda sıcaklığın kontrol betonuna göre daha düşük olduğunu göstermiştir (Akyüncü, 2012).

Barrow, Hadchiti ve Carrasquillo F ve C tipi uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarla yapılan deneylerde, F sınıfı uçucu küllerin hidrasyon ısını düşürdüğünü ve sıcaklık artışını yavaşlattığını saptamışlardır. C sınıfı uçucu küllerin ise sadece sıcaklık artışını yavaşlattığını gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Langley, Currence ve Malhotra, F sınıfı uçucu küller kullanarak yapmış oldukları deneylerde hidrasyon ısısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Hidrasyon ısısını düşürmek amacıyla yapılmış olan tüm bu çalışmalar; çimentonun azaltılarak puzolanların kısmi kullanımı büyük kütleli betonlarda hem ekonomik açıdan hem de işlev olarak büyük yararlar sağlayacağını göstermektedirler.

Uçucu küllerin taze betonda hava sürüklenmesi üzerindeki etkisi

Mineral katkı maddelerinin kullanımı, betonda hava sürüklenmesini zorlaştırmaktadır. Belirli bir hava miktarına ulaşmak için gereken katkı miktarı daha fazla olmaktadır. Mineral katkıların içerdikleri karbon miktarları ve yüksek özgül yüzeyleri bunda etkilidir (Anuk, 2004).

Haque, Day ve Langan, basit ikame yöntemiyle ürettikleri C sınıfı uçucu küllü betonlarda hava sürükleyici katkı kullanmışlar ve uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı ihtiyacını artırdığını gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Gebler ve Klieger, farklı C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame yöntemiyle ürettikleri betonlarda; genellikle C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere göre daha az hava sürükleyici etkiye sahip olduklarını ancak her iki uçucu külün de kontrol betonuna oranla hava sürükleyici ihtiyaçlarının arttığını gözlemlemişlerdir. Uçucu küldeki organik madde miktarı, karbon miktarı ve kızdırma kaybında bir artış olursa bunun hava sürükleyici katkı ihtiyacını da arttıracığını fakat uçucu küldeki toplam alkali miktarındaki artışın hava sürükleyici katkı ihtiyacını azaltacağını söylemişlerdir. Uçucu külün özgül ağırlığındaki artışın betondaki hava miktarını da artırdığı ayrıca yüksek oranda kireç içeren uçucu küllerin betonda daha az hava kaybına neden olduğu kanısına varmışlardır. Bunlara ilave olarak, uçucu külün kimyasal bileşimindeki SO_3 miktarındaki artışın betondaki hava miktarını da arttıracığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin işlenebilme, su ihtiyacı ve terleme üzerindeki etkisi

Betonları üretirken amaç kalıbına dökülmüş halde kompasitenin büyük bir değer alması ve dayanımın da yüksek olmasıdır. Taze betonun kalıbına yerleştirme sırasında kohezyonunu

ve homojenliğini kaybetmemesi, kalıplarda kolayca yayılıp mümkün olduğu kadar az boşluk bırakarak bunları doldurma özelliklerinin hepsine birden işlenebilme özelliği denilmektedir (Akyüncü, 2012). Tez çalışmasında yapılan üretimlerde işlenebilirlik sabit tutulmuş olup, karışım hesapları yapılmadan önce aynı işlenebilirliği sağlamak için çok sayıda deneme üretimi yapılmıştır. Bu yüzden beton içerisindeki suyun azaltılması ve bağlayıcı miktarının artması, işlenebilirliğin sabit tutulması açısından önemlidir. F ve C tipi uçucu küllerin de işlenebilirliğe katkısı bu açıdan olumlu yönde olmaktadır.

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küller basit ikame yöntemi ile yüksek dozajlı betonlarda kullanarak yaptıkları deneyler sonrasında ulaştıkları sonuçlarda, uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığı ve su ihtiyacını azalttığı kanısına varmışlardır (Akyüncü, 2012).

Olek ve Diamond, C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame yöntemiyle ürettikleri betonlarda her iki tip uçucu külün de işlenebilirliği arttırdığını gözlemlemişler, C tipi uçucu küllerin ise F tipi uçucu küllere göre işlenebilirliği daha fazla artırdığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Schiessl ve Hårdtl yapmış oldukları çalışmalarda, uçucu küllü betonlarda uçucu küllerin inceliğinin artması ile taze betonun işlenebilirliğinin de arttığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Welsh ve Burton bazı Avustralya küllerinin basit ikame yöntemi ile su miktarı sabit tutularak yapılan betonlarda kullanılması ile karışımında çökme kaybının gözlemlendiğini belirtmişlerdir (Akyüncü, 2012).

Terleme genellikle ayrışma sonucu oluşan, artması halinde erken rötreye neden olan bir olaydır. Ayrışma olayı, üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin ise inceliklerinin fazla oluşu nedeniyle, beton karışımının kohezyonunu artıracığı ve ayrışmayı azaltacağı, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği düşünülmektedir (Kocataşkın 1991).

Copeland, yaptığı çalışmalarda terlemeye eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir (Akyüncü, 2012).

Sivasundaram, Carette and Malhotra yaptıkları çalışmalarda, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettikleri betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını belirtmişlerdir (Akyüncü, 2012).

Reshi, bir kaç Hindistan uçucu külü ile yaptığı deneylerde incelenen tüm küllerin betonun su ihtiyacını arttırdığını gözlemlemiştir (Akyüncü, 2012).

Yukarıdaki çalışmalardan, uçucu küllerin betonda terlemeyi ve işlenebilirliği iyileştirdiği söylenebilir. Ancak bu konudaki en önemli etkenlerin uçucu küllerin fiziksel özellikleri, inceliği, kimyasal ve minerolojik bileşimi olduğu unutulmamalıdır.

Uçucu küllerin priz süresine etkisi

Priz süresinin kısılması ya da uzamasını etkileyen birçok faktör vardır. Betonda kullanılan çimentonun tipi, içeriği, inceliği, katkı kullanımının etkisi, uçucu külün miktarı, uçucu külün inceliği ve kimyasal bileşimi bu faktörlere örnek olarak gösterilebilir. Genellikle uçucu kül kullanılan betonlarda priz sürelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun esas nedeni, uçucu küllerin bağlayıcı özellik kazanabilmeleri ve kimyasal reaksiyona girebilmeleri için çimento prizi sonrasında ortaya çıkan serbest kireci kullanmalarıdır. Ayrıca serbest kireci kullanma sırasındaki reaksiyon hızının da yavaş olmasıdır.

Sivasundaram ve diğerleri, yüksek uçucu kül kullanımı ile priz süresinin arttığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Davis ve diğerleri, uçucu kül kullanımının tüm etkenler sabit olduğu zaman priz süresini arttırdığını söylemişlerdir (Baykal ve diğerleri 1993).

Lane ve Best, uçucu küllerin prizi geciktirdiğini söylemiş ve bunda uçucu kül karışım oranlarının, inceliğinin ve kimyasal bileşiminin etkili olduğunu belirtmişlerdir. Fakat kullanılan çimentonun inceliğinin, hamurun su miktarının ve ortam sıcaklığının etkilerinin daha fazla olduğunu söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Okada ve diğerleri, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanımıyla priz süresinin arttığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Yukarıda bahsedilen çalışmalardan, F ve C tipi uçucu kül katkılı betonların priz sürelerinin sadece portland çimento ile üretilen betonlara göre daha uzun olduğu görülmekte, bu etkinin genellikle priz süresini geciktirici nitelikte olduğu da söylenebilmektedir.

Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkileri

Uçucu küllerin dayanım kazanımı, basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkisi

F ve C tipi uçucu küllü betonlarda dayanım kazanımları, uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik şekli, uçucu kül reaktivitesi, sıcaklık ve diğer kür koşulları ve kullanım oranları gibi faktörlere bağlıdır (Anuk, 2004).

Yapılan çalışmalarda genel kanı, C sınıfı uçucu küllerin, F sınıfı uçucu küllere oranla erken yaşlardaki reaksiyon hızlarının daha yüksek olduğu yönündedir. Bunun nedeni olarak da C sınıfı uçucu küllerin daha yüksek miktarda CaO (kireç) içermeleri gösterilmiştir (Özturan, 1991).

Mehta ve Gjorv yaptıkları çalışmada, % 30 oranında F tipi uçucu kül içeren çimentolarla ürettiği betonlarda 7. ve 28. günlerdeki dayanımların düşük, 90. Gündeki dayanımların ise kontrol betonuna eriştiğini gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

F tipi uçucu küller ilk yaşlarda düşük mukavemetler verirken C tipi uçucu küllerde kireç oranı daha yüksek olduğu için; ilk yaşlarda mukavemet kazanma hızı daha fazladır. Hatta bazı çalışmalarda; C tipi uçucu küllü betonların, kontrol betonlarıyla hemen hemen aynı hızda mukavemet kazandıkları gözlenmiştir (Özturan ve Gökçe, 1996).

Yuan ve Cook, yapmış oldukları çalışmada; betonun dayanım kazanımını; yüksek kireçli uçucu küllü betonlar (CaO = % 30.3) ve hiç uçucu kül içermeyen betonlar üzerinde incelemişlerdir. Su/çimento oranını 0,45 olarak sabit tuttukları, %20, %30 ve %50 oranında uçucu külün çimento ile yer değiştirildiği bu çalışma sonucunda, uçucu küllü betonların 28 güne kadar kontrol betonuyla hemen hemen aynı dayanıma sahip oldukları, 28 günden sonra ise kontrol betonuna göre daha fazla dayanım kazandıklarını tespit etmişlerdir (Akyüncü, 2012).

Tuygun, kısmi ikame yöntemi ile yaptığı çalışmada % 10, % 30 ve % 50 oranlarında uçucu kül kullanarak betonlar üretmiş, uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının bütün yerleştirme yüzdelerinde düşük olduğunu gözlemlemiştir. 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımlarının ise % 10 uçucu kül içeren numunelerin kontrol betonuna yakın ve üzerinde değerler verdiğini söylemiştir. % 30 ve % 50 uçucu küllü numunelerin ise ileriki yaşlardaki dayanımlarının ise kontrol betonuna göre düşük olduğunu saptamıştır (Tuygun, 2002).

Şengül ve diğerleri yapmış oldukları çalışmada beton karışımındaki uçucu külleri kullanmadan önce öğütmüşlerdir. Uçucu kül tanelerinin inceliği ve yoğunluğu bir miktar değişmiştir. Yapılan basınç deneyler sonucunda öğütülmüş uçucu kül içeren betonların % 30 yer değiştirme yüzdesine kadar kontrol betonlarının basınç dayanımlarından daha yüksek basınç dayanımları sağladıkları görülmüştür (Şengül ve diğerleri, 2005).

Dayanım gelişimini uçucu külün tane boyutu açısından ele alırsak incelik ve bağlayıcılık aktivitesi olarak iki yönde etkilediğini görürüz. İncelik açısından, büyük taneler betonun su ihtiyacını artırdıklarından dayanım gelişimini de olumsuz yönde etkilerler. Bağlayıcılık aktivitesi hamurdaki katı fazın yüzeyinde meydana geldiğinden, dayanım gelişimini etkilemektedir. Bu nedenle yüzey alanı bağlayıcılık aktivitesinde önemli rol oynar (Anuk, 2004).

Crow ve Dunstan çok farklı özellikler içeren uçucu küllerin inceliğini araştırmışlar, inceliği fazla olan uçucu küllerin çimentoyla daha iyi reaksiyona girdiğini ve daha iyi dayanım kazandığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Dayanım gelişimini puzolanik aktivite açısından değerlendirdiğimizde, puzolanik reaksiyonun hem çimento hidrasyonu ile oluşan serbest kireç oluşumunu beklemesi hem de yavaş bir reaksiyon olması sebebiyle puzolanik etkiyle dayanım kazanma da yavaş olmaktadır. Genelde bu tür betonlarda erken yaşlardaki dayanımlar düşük, ancak puzolanik aktivitenin yüksekliğine göre ileriki yaşlardaki dayanımlar kontrol betonunu yakalamakta veya geçmektedir (Özturan 1991).

Sıcaklık ve kür koşulları da dayanımları etkilemektedir. Uçucu küllü betonların sıcaklık artışıyla birlikte dayanımlarının da arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca kür koşulları da dayanım artışında önemli bir etkiye sahiptir (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin elastisite modülü üzerindeki etkisi

Uçucu kül kullanılan betonlarda, elastisite modülünün basınç dayanımına benzer özellikler gösterdiği kabul edilmektedir. Yani uçucu küllü betonlarda elastisite modülü erken yaşlarda kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu söylenmektedir (Kocataşkın, 1991).

Berry e ve diğerleri, yapmış oldukları çalışmada, uçucu kül özelliklerinin az da olsa elastisite modülünü etkilediğini söylemişlerdir. Elastisite modülünün, kontrol betonuyla karşılaştırıldığında düşük dayanımlarda düşük, yüksek dayanımlarda ise yüksek değerlerde olduğunu saptamışlardır (Akyüncü, 2012).

Galoeta ve diğerleri, % 18 ve % 25 oranlarında F tipi uçucu kül içeren betonlarla yaptıkları çalışmalarda, elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Joaquin ve diğerleri, yüksek oranda F tipi uçucu kül kullandıkları betonlarda, elastisite modülünün erken yaşlarda düşük değerler verdiğini gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Yapılan çalışmalar sonucunda, uçucu külün elastisite modülü üzerindeki etkisi, basınç dayanımı üzerindeki etkisi kadar belirgin değildir. Elastisite modülünü, uçucu kül kullanmanın etkisinden çok, agrega ve çimento özelliğinin belirlediği bilinmektedir (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin sünme ve rötre üzerindeki etkisi

Uçucu küller, kullanıldıkları betonun dayanımına ve dayanım kazanma hızına etki ettiğinden dolayı, betonda sünme ve rötreye de etki etmektedir. Sünme ve rötre dayanımları ters orantılıdır. Yani dayanım azaldığında artar. Erken yaşlarda yüksek, ileriki yaşlarda ise düşüktür. Betondaki sünme ve rötreye etki eden faktörleri, ortamın sıcaklığını ve nem koşulları, betonun dayanımı, elastisite modülü, agrega miktarı, yükleme anındaki beton

yaşı ve yükleme anındaki sünme gerilmesinin dayanıma oranı olarak sayılabilir (Kocataşkın, 1991).

Atiş'in F tipi yüksek miktarda uçucu kül içeren betonlarda yaptığı çalışmalar, uçucu kül kullanımının rötreyi azalttığını göstermektedir (Akyüncü, 2012).

Brooks ve Farrugia, % 30 ve % 70 ikame oranlarında ürettikleri uçucu küllü betonda sünmenin, uçucu kül miktarının artışı ile arttığını belirtmişlerdir (Akyüncü, 2012).

Gifford ve Ward yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin sünmeyi azalttığını, bunun nedeninin ise uçucu küllerin elastisite modülünü artırması ve toplam agrega miktarını arttırırken sünme için uygun hamur hacmini azaltması olduğunu söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Sonuç olarak, uçucu küllü betonlarda rötre davranışıyla sünme davranışı birbirine benzemekte ve betona olumlu yönde katkı sağlamaktadır.

Uçucu küllerin dayanıklılık özelliklerine etkisi

Uçucu küllerin geçirimsizlik üzerindeki etkisi

Boşluk oranı düşük, dolu bir beton mekanik yönden avantajlı olmasının yanında aynı zamanda geçirimsizdir. Mineral katkı maddelerinin en önemli işlevleri betonda boşluk yapısını iyileştirmeleri ve geçirimsizliği azaltmalarıdır. Geçirimsizlik; çimento dozajı, su/çimento oranı, agrega granülometrisi, çimento cinsi ve uçucu kül kullanımından etkilenmektedir (Akyüncü, 2012).

Kanitakis düşük kireçli uçucu küllerle yaptığı çalışmada, erken yaşlarda uçucu küllü betonların düşük dozajlı betonlar gibi davrandığını ve bu yüzden geçirimsizliğin kaçınılmaz olduğunu söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Akman ve Erdiç, F tipi uçucu kül kullanarak yaptıkları çalışmada, yüksek oranda uçucu kül ilavesi ile klor geçirimsizliğinin büyük oranda azaldığını saptamışlardır. Uçucu külün klor geçirimsizliğini azaltan etkisinin ileriki yaşlarda daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Ayrıca uçucu kül miktarı düşük olan betonlarda ($< \% 20$) geçirimsizlikte beklenen yararın elde edilemediğini söylemişlerdir (Akman ve Erdinç, 1997).

Sonuç olarak, uçucu küller C-H ile birleşerek oluşturdukları C-S-H jelleriyle geçirimsizliği de azaltmış olurlar.

Uçucu küllerin zararlı kimyasallara dayanıklılık üzerindeki etkisi

Betondaki zararlı kimyasal etki ikiye ayrılır. Bunlar; betonun bulunduğu ortamın oluşturduğu zararlı etki ve beton içindeki bileşenlerin reaksiyonu sonucu ortaya çıkan zararlı etki olarak söylenebilir (Anuk, 2004).

Portland çimentosunun reaksiyon sonucu açığa çıkardığı Ca(OH)_2 bir bazdır ve asitlerden zarar görür. Asitler, serbest kireç ile reaksiyona girer ve suda çözünen tuzlar oluştururlar. Bu tuzların betondan yıkanmasıyla geçirimsizlik artmakta ve zararlı kimyasalların beton içerisine girişi hızlanmaktadır (Akyüncü, 2012).

Tikalsky ve Carrasquillo yaptıkları çalışmalarda, yirmi farklı uçucu külü basit ikame yöntemiyle beton içerisinde kullanmışlar ve yüksek kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı azalttığını gözlemlerken düşük kireçli uçucu külün sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Fidjestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemiştir (Akyüncü, 2012).

Uçucu küllerin alkali-agrega reaksiyonu üzerindeki etkisi

Çimento hammaddesinde bazı alkali oksitler bulunur. Bu alkali oksitler, agrega içinde aktif silis dumanı bulunması durumunda ise silikat jeline dönüşürler. Sodyum, potasyum ve kalsiyum silikası olan bu jel şişme ve genleşme yapar. Bu da betonun hacim sabitliğini bozar ve ağ şeklinde sık çatlaklar meydana getirerek alkali-agrega reaksiyonuna neden olur. Bu olayın gerçekleşmesi için, çimento alkali oksit içermeli ve agregalar içerisinde aktif silis bulunmalıdır (Akyüncü, 2012).

Kabayasaki ve diğerleri, F tipi uçucu külleri % 10, % 20 ve % 30 oranlarında kullanarak basit ikame yöntemiyle ürettikleri betonlarda, uçucu kül oranı arttıkça alkali-agrega reaksiyonunun kontrol altına alındığını söylemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Sonuç olarak; uçucu küller alkali-agrega reaksiyonunda dolayı betonda oluşan genleşme ve çatlamları azaltmaktadırlar. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu uçucu kül tarafından azaltılmakta ve böylece zararlı reaksiyon riski azaltılır (Anuk, 2004).

Uçucu küllerin donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkisi

Donma çözülme dayanıklılığı betondaki fiziksel etkenler arasında en önemli etkenlerdendir. Beton, içerisinde önemli miktarda boşluk içeren bir maddedir. Bu boşluklarda ise ya betonun üretilmesi sırasında kullanılan su ya da betonun geçirimsizliği nedeniyle içeriye sızan su bulunmaktadır. Beton içerisindeki suyun donması sonucu oluşan genleşme, betonda çekme gerilmeleri oluşturur. Bu gelişmeler sonucunda çatlaklar oluşur veya oluşmuş çatlaklar büyür. Bunu engellemenin en iyi yolu betondaki hava boşluğunun azaltılması ve kompasitesi yüksek dolu bir beton elde edilmesidir. Bunun dışında diğer etkenler olarak, agregaların sağlamlığı, hidratasyon derecesi, çimento hamuru dayanımı ve nem koşulları sayılabilir (Akyüncü, 2012).

Virtanen yaptığı çalışmalarda, uçucu külün yüksek oranda kullanımının donma çözülme direncini azalttığını gözlemlemiştir. Hava sürükleyici katkı kullanılarak yaptığı çalışmalarda ise hava miktarı sabit tutularak katkı miktarı arttırılırsa, uçucu küllerin olumsuz etkilerinin ortadan kalkacağını söylemiştir (Akyüncü, 2012).

Sonuç olarak, donma çözülme olayı fiziksel bir etkidir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma çözülme çevrimlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. F ve C tipi uçucu küllerin beton içerisindeki boşlukları daha iyi doldurarak donma çözülme dayanıklılığını artırdığı söylenebilir.

Uçucu küllerin deniz ortamına dayanıklılığının etkisi

Beton yapı temellerinin sahil alanlarda tuzlu yeraltı suyu seviyesinin altında yapılması, kılcal su emme ve buharlaşma nedeniyle toprak altındaki betonda kristalleşmeye neden olur. Böylece çimento hamurunda kimyasal hasar meydana gelir ve donatı korozyona

uğrayabilir. Geçirimsiz bir beton, bunların durdurulması veya zararsız bir düzeye indirilmesi için çok önemlidir. Bu açıdan geçirimsizlik deniz suyundaki betonun dayanıklılığını etkileyen en önemli faktördür (Anuk, 2004).

Onabolu, F sınıfı uçucu külleri % 30 oranında kullanarak basit ikame yöntemine göre ürettiği betonları deniz ortamında saklamış ve kontrol betonuna göre basınç dayanımlarının ve geçirimsizliğin arttığını gözlemlemiştir. Böylece yazar uçucu kül kullanımının deniz ortamına dayanıklılığı arttırdığını belirtmiştir (Akyüncü, 2012).

Sonuç olarak, deniz suyunun betona verdiği zarara karşı alınması gereken önlemlerin başında doğru çimento kullanımı gelir. F ve C tipi uçucu küller puzolanik özellikleri sayesinde, hidrasyon sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek boşluk yapısını azaltır ve dayanıklılığa önemli katkı sağlar.

Uçucu küllerin donatı korozyonuna etkisi

Korozyon bir malzemenin yüzeyinin dıştan kimyasal etkiler veya elektrokimyasal yolla değişime uğraması olayıdır. Çelik malzemesinde bu değişim sonucu oluşan ürüne pas denir. Günümüzde korozyon, yapı elemanlarının servis ömürlerini etkileyen en önemli etken olmaktadır. Korozyon, donatılarda ve betonda birbirini takip eden kimyasal reaksiyonlar olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarmede donatıyı paslanmaya karşı koruyan, betonun $\text{pH}=13$ civarında bulunan yüksek alkali düzeyidir. Bu yüksek alkali seviyesi düşmeye başladığı zaman beton artık içindeki donatıyı korozyona karşı koruyamaz hale gelir ve donatılar paslanmaya başlar. Paslanan donatının hacmi genişler ve betonarmede donatılara paralel çatlaklara sebep olur. Beton bir kere çatladıktan sonra, tamamen atmosferik etkilere maruz kalır ve yapı elemanı büyük bir hızla ömrünü doldurur (Çil, 2006).

Malhotra ve diğerleri, F sınıfı uçucu külleri kullanarak farklı su/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlarda yaptıkları çalışmalarda, 8 yıllık süreç içerisinde yalnızca su/çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyona rastlamışlardır. Klor geçirimsizliği ile ilgili olarak yapmış oldukları çalışmalarda ise uçucu kül kullanımının klor geçirimsizliğini azalttığını gözlemlemişlerdir (Akyüncü, 2012).

Sonuç olarak, yapılan çalışmalardan da görüldüğü gibi uçucu küllerin geçirimsizliği azalttığı, dolayısı ile donatı korozyonuna olumlu etki ettiği söylenebilir.

Uçucu küllerin karbonatlaşma üzerindeki etkisi

Sülfat, çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olan bir iyonudur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi, etrenjit ve alçı taşı oluşturmaları ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genleşme meydana getirerek çatlaklara ve dağılmalara yol açar, agrega-çimento aderansının etkilenmesiyle betonun dayanımı düşer. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütlede yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür (Baradan ve diğerleri, 2002).

Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Sülfat etkisine yol açan bir diğer kaynak çimentodur. Çimentonun C₃A bileşeninin ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçı taşı katılır.

Zamana bağlı genleşmenin ve beton dayanımının etkilenmesini önlemek için genelde katılan alçıtaşının oluşturacağı SO₃ miktarı çimento ağırlığının % 3'ü ile sınırlanmıştır.

Sülfat iyonları başta çimentonun ana bileşenlerinden olan C₃S ve C₂S'in hidrasyon ürünü olan ve çimentoya bazik özellik kazandıran Ca(OH)₂ ile birleşerek kalsiyum sülfatı (CaSO₄), C₃A ile birleştirilerek Candlot tuzunu (3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O) oluşturur (Aköz ve diğerleri, 1995). Candlot tuzunun 32 molekül su içermesi nedeniyle hacim artışı meydana getirmesi betonda çatlak oluşturur. Şiddetli bir sülfat hasarına uğramış betonun geçmiş yüksek oranda C₃A içeren portland çimentosu ve ortamdaki yoğun SO₃ ile ilişkilidir. Betonda sülfat oluşumunu azaltmak için C₃A bileşen oranı % 5'in altında olan sülfata dayanıklı çimentolar geliştirilmiştir (Neville, 2004). Sülfata dayanıklı çimentolar dışında puzolan katkılı çimentolar genellikle betonun sülfat etkisine karşı dayanıklılığını artırmaktadır. Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında katkılı çimento hamurunun kimyasal saldırılara karşı olan dayanıklılığı, düşük geçirimsizlik ve düşük klinker içeriği ve ileri yaşlarda gelişen puzolanik reaksiyonla ilişkilidir (Al-Amoudi, 2002).

2.4.2. Uçucu küllü betonlarda karışım oranlama yöntemleri

Uçucu külün betonda kullanımının farklı amaçları vardır. Bu amaçlar şöyle sıralanabilir:

1. Çimento miktarını azaltıp beton maliyetini düşürmek,
2. Hidratasyon ısını düşürmek,
3. İşlenebilirliği artırmak,
4. 90 gün ve sonrasında betonda istenilen dayanımı sağlamak,
5. Betonun dayanıklılığına katkı sağlamak,
6. Atık kullanıp çevreye katkı sağlamak (Akyüncü, 2012).

Beton içerisinde en iyi olan miktarda kullanıldıkları zaman uçucu küller beton özelliklerine olumlu olarak etki etmektedirler. Fakat bu olumlu etkinin sağlanması için uçucu küllerin karışım yüzdelerinin ve etkilerinin çok iyi hesaplanması gerekmektedir. Bununla birlikte uçucu küllerin sahip oldukları kimyasal ve mineralojik özelliklerin de iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla uçucu küllerin beton içindeki kullanımları bazı standartlarla sınırlandırılmaktadır. Uçucu küller, beton içerisinde başlıca iki şekilde kullanılmaktadırlar; (Akyüncü, 2012).

- Portland çimentosu yerine uçucu küllü çimento kullanımı
- Uçucu külün beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanımı

Uçucu külün çimento içerisinde kullanımı, diğer kullanıma göre daha kontrollüdür. Böylece uçucu kül ve çimento oranları önceden belirlenmekte ve karışım oranları sınırlandırılmaktadır. İlave olarak uçucu kül kullanılması ise daha geniş incelenmesi gereken bir olaydır. Uçucu kül özelliklerinin de bilinmesi ve sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir (Pekmezci, 2001).

Uçucu küllerin, beton içerisinde farklı görevleri vardır. Taze betonda su ihtiyacını azaltırken, sertleşmiş betonda puzolanik yapılarından dolayı bağlayıcı özellik gösterirler, dayanımı artırır ve dayanıklılığa önemli katkılar sağlarlar. Bu özelliklerine referans olarak yalnız portland çimentosuyla üretilmiş betonlar alınmaktadır. Buna göre iki kabul yapılmaktadır (Akyüncü, 2012);

- Uçucu küller beton dayanımını erken yaşlarda azaltırlar.
- Eşit işlenebilirliği sağlamak için, uçucu küllerle üretilen betonların su ihtiyacı, yalnız portland çimentosuyla üretilen betonlara göre daha azdır.

Uçucu küllerin beton içerisinde kullanılabilmeleri için farklı karışım yöntemleri mevcuttur. Bunlardan başlıca üç tanesi (Pekmezci, 2001);

- Basit ikame yöntemi (Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması)
- İlave yöntemi (Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması)
- Kısmi ikame yöntemi (Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması)

Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması (basit ikame yöntemi)

Basit ikame yönteminde, belli bir miktar çimento karışımından çıkarılmakta ve yerine aynı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Çıkarılan çimentonun yerine eklenen uçucu küller, başlangıçta az bağlayıcılık özelliği gösterir ve ince agrega gibi davranırlar. Bu nedenle karışımın işlenebilirliği artmaktadır. Bu yöntemle üretilen betonların erken yaşlardaki dayanımları düşüktür. Ancak ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları yüksektir. Hatta bazen yalnız portland çimentosuyla üretilmiş kontrol betonlarının dayanımlarından daha yüksek değerler bile alırlar (Akyüncü, 2012). Basit ikame yönteminin kullanılmasıdaki başlıca amaç, kütle beton üretiminde hidrasyon ısını düşürmek ve işlenebilirliği arttırmaktır. Ayrıca kullanılan uçucu külün yüksek veya düşük kireçli olması da kullanım sırasında farklılıklar gösterebilmektedir (Akyüncü, 2012).

Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması (İlave yöntemi)

İlave yönteminde, karışımındaki çimento miktarı değiştirilmeden karışıma uçucu kül eklenir. Uçucu külün eklenmesiyle karışımındaki bağlayıcı madde miktarı artar. Böylece betonun su ihtiyacı ve kohezyonu artar. Betonun kullanım amacına bağlı olarak karışımda diğer düzenlemeler yapılmalıdır. Bu yaklaşım, sülfata dayanıklılığı sağlamak için en az çimento faktörü ile ince agrega yerine puzolan kullanımını arttırmak amacıyla ilk kez Price tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde betonun ileriki yaşlardaki dayanımı artmaktadır (Akyüncü, 2012).

Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılması (Kısmi ikame yöntemi)

Kısmi ikame yönteminde, karışımdan çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül konulmaktadır. Bundan sonra ise ince agrega ve su miktarında değişiklik yapılarak ayarlanmaktadır. Bu çalışmadaki başlıca amaç uçucu kül kullanımı ile oluşan en önemli dezavantaj olan erken yaşlardaki dayanım kaybını en aza indirmektir. Ancak bu oranlama yapılırken, uçucu küllerin maliyeti azaltma ve işlenebilirliği artırma gibi avantajlarının da düşünülmesi gerekmektedir. Bütün etkenler göz önüne alınarak ve deneme karışımları yapılarak optimum performansa ait karışım oranları belirlenmektedir (Akyüncü, 2012).

Bu yöntem genel olarak modifiye edilmiş ikame yöntemi olarak bilinir. Ancak son yapılan çalışmalarla rasyonel oranlama yöntemi adıyla ikinci bir oranlama yöntemi söylenmektedir.

Modifiye edilmiş ikame yöntemi

Lovewell ve Washa bu yöntemi ilk kez 1958 yılında kullanmışlardır. Ayrıca uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonuyla karşılaştırılabileceğini söylemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, erken yaşlardaki (3. ve 28. günler arasında) basınç dayanımlarının uçucu küllü ve uçucu külsüz betonlarda eşit olması için, uçucu küllü betondaki toplam bağlayıcı maddenin kontrol betonundaki çimento miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir. Ancak 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar göstermektedir ki; uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik ve uçucu kül özellikleri de karışım oranlama yöntemine göre göz önüne alınması gereken faktörlerdir. Bunun ortaya çıkmasında Abrams'ın su/çimento ile dayanım arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılan karışım oranlama yöntemleri büyük rol oynamıştır (Akyüncü, 2012).

Rasyonel oranlama yöntemi

Rasyonel oranlama yöntemi ilk kez Smith tarafından kullanılmıştır. Modifiye ikame yönteminden farkı, uçucu kül için bir k faktörü tanımlanır ve kullanılır. Bu çalışma ile ilgili bazı bilgiler ve ulaşılan sonuçlar şöyle sıralanabilir (Akyüncü, 2012);

- Uçucu kül kullanılmayan betonlarda, dayanımı etkileyen iki ana faktör çimento tipi ve su/çimento oranıdır. Farklı sertleşme oranlarına sahip betonlarda su/çimento oranı ayarlanarak aynı basınç dayanımına ulaşmak mümkündür. Abrams'ın basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişkiyi inceleyen eğrisi yardımı ile farklı betonlarda aynı basınç dayanımını elde etmek için su/çimento oranları seçilebilmektedir.
- Abrams'ın basınç dayanımı su/çimento eğrisi yardımı ile uçucu küllü ve kontrol betonları arasında da ilişki kurularak aynı basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür.
- Uçucu kül kullanımında üç tane belirsizlik vardır. Esasen uçucu küllerin çimento içerisinde, katkı olarak ve ince agrega olarak kullanımındaki mantık aynıdır. Çimento içerisinde %25 oranında kül kullanmakla ($25/100=0.25$), katkı olarak %20 çimento yerine uçucu kül kullanmak ($20/80=0.25$) aynı oranlamayı göstermektedir. Uçucu külün kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı gözlenirse agrega/çimento oranının da azaldığı görülür. Bunun anlamı ise uçucu külün agrega miktarını azaltarak ince agrega yerine kullanılmasıdır. Görüldüğü gibi üç yaklaşımda da düşünce tarzı hatalıdır. Uçucu küllü betonlar yeni bir beton olarak ele alınmalı ve incelenmelidir.
- Rasyonel yöntem kullanılmadan önce uçucu küllerin basınç dayanımına etkisi incelenmelidir. Uçucu küllü ve kontrol betonlarının basınç dayanımı su/çimento oranı grafikleri incelenerek, uçucu küllü betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımını elde etmesi için gerekli su/çimento oranı bulunur.

2.5. Mermer

Ülkeler arasında ekonomik açıdan fark yaratan kaynaklardan birisi de madenî kaynaklardır. İnsanoğlu tarihin her döneminde sanat, ısınma, korunma, barınma gibi nedenlerle madenî kaynaklara ihtiyaç duymuştur. Ülkeler geliştikçe ve insan nüfusu arttıkça bu ihtiyaçlar artmış, maden rezervlerinin kullanımı yoğunlaşmıştır. Ülkelerin maden rezervleri açısından zengin olması günümüzün ekonomi piyasasında ön plana çıkabilmeleri ve rekabet edebilmeleri açısından bir avantaj oluşturmaktadır. Zengin maden yataklarına sahip olmak bir ülkenin kalkınması ve gelişmesi için önemli bir girdidir (DPT, 1996).

Yeraltı kaynaklarının kullanımı insanlık tarihi kadar eskidir. Yer altı kaynakları ve doğal taşlar, tarihin ilk zamanlarında insanların beslenme ve savunma amaçlı silah yapımında, daha sonra da konut olarak korunma ve barınma amaçlı olarak insanlığa hizmet etmiştir

(Kulaksız, 2005). Daha sonraki yıllarda, ülkelerin kalkınmalarında ve geleceklerini güven altına almalarında yer altı kaynaklarının öneminin büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Yer altı kaynaklarının öneminin anlaşılmasıyla birlikte, sanayileşen ülkeler maden üretebilecekleri bölgeleri paylaşmak amacıyla birbirleri ile savaşmışlar ve bu nedenle de iki dünya savaşı çıkmıştır (Sarıtış, 2006).

Türkiye maden rezervi açısından dünyanın en zengin ülkeleri arasında yer alırken, adeta büyük bir servetin üzerinde yaşıyoruz. MTA verilerinden derlenen bilgilere göre, Türkiye'nin karmaşık jeolojik yapısı çok çeşitli madenlerin ülkede bulunmasına olanak sağlıyor. Türkiye yeraltı kaynakları yönünden dünya madenciliğinde adı geçen 132 ülke arasında toplam üretim değeri itibarıyla 28'inci, maden çeşitliliği itibarıyla 10'uncu sırada yer alıyor. Başta endüstriyel ham maddeler olmak üzere, metalik madenler, enerji ham maddeleri ve jeotermal kaynaklar açısından zengin bir konumda bulunuyor. Günümüzde dünyada ticareti yapılan 90 çeşit madenden 77'sinin varlığı Türkiye'de saptanırken, halen 60 civarında farklı maden ve mineral üretimi yapılıyor. Dünya metal maden rezervlerinin %0.4'ü, endüstriyel hammadde rezervlerinin %2.5'i, kömür rezervlerinin %1'i ve jeotermal potansiyelinin % 0.8'i Türkiye'de bulunuyor (Sarıtış, 2006).

Ülkemiz yer altı kaynaklar bakımından önemli birçok madene ve önemli rezervlere sahip olmasına rağmen, ülkemiz için bu konuda yapılan en önemli eleştirilerden birisi, yer altı kaynaklarını etkin şekilde kullanamadığımız ve bunu ekonomik değere dönüştüremediğimizdir. Ülkemiz için önemli yer altı kaynaklarının önde gelenlerinden birisi mermerdir. Adını, günümüzden yaklaşık 2000 yıl önce antik mermer işletmeciliğinin başladığı yer olan Marmara Adası'ndan alan mermer, pek çok medeniyetin kurulmasında ve kültürlerin gelişmesinde önemli bir rol üstlenmiştir. Sanatkârların el emeği ve göz nuru ile işlenerek insan hayatına giren mermer, uygarlığın ilerlemesine paralel olarak, tapınak, amfi, arena, saray, hamam, köprü, sarnıç, cami, medrese, çeşme gibi işçiliklerde yapı taşı olmanın yanında abide ve heykelticilik gibi süsleme ve sanatsal tasarım amacıyla kullanılmıştır (Gürsoy, 2005).

Binlerce yıl önce insan hayatına giren mermer, önceleri sadece yapı taşı olarak kullanılırken, uygarlığın ilerlemesine paralel olarak süsleme ve sanatsal tasarım amacı ile de kullanılmış ve güncel yaşamdaki önemini günümüze kadar korumuştur (DPT, 1996). Tarihin her döneminde, değişik alanlarda rastladığımız, uygarlık seviyesine göre kullanım

alanları değişen ve her dönemde olduğu gibi günümüzde de önemini koruyan mermer; kalker ve dolomitik yapıdaki kayaçların ısı ve basınç altında değişime uğrayarak kristalleşmesi sonucu oluşan bir çeşit kaya olarak tanımlanmaktadır (Tosun, 2007).

Mermerin bilimsel ve ticari olmak üzere iki ayrı tanımı bulunmaktadır.

Bilimsel tanım: Başkalaşım (metamorfizma) süreci geçiren ve başkalaşımın izlerini taşıyan kalker dominit gibi karbonat bileşimli kayaçlara mermer adı verilir. Gerçek mermer olarak da adlandırılan bu kayaçlar, yüksek oranlarda kalsiyum karbonat, daha az oranlarda magnezyum karbonat ve değişik metal oksitler içerirler. Saf oldukları zaman yarı saydam ve beyaz renkli olan mermerler daha sonra uğradıkları biçim değişiklikleri ve kimyasal çözünme süreçleri ilginç renkli görünümler kazanır. Örneğin, sarı, pembe, kırmızı, mavimsi ve siyah renkli olabilmektedirler. Ayrıca yer hareketleri mermer kayacının kırılarak bu kısımların sonradan kalsitle dolması sonucunda damarların oluşmasına yol açabilir. Böylece ortaya çok hoş görünümlü, bresli ya da damarlı mermerler ortaya çıkar (Kişman ve Kan, 2011).

Ticari tanım: 3213 sayılı Maden Kanunu'na göre ticari standartlara uygun boyutlarda blok verebilen, kesilip parlatılan veya yüzeyi islenebilen ve tas özellikleri kaplama tası normlarına uygun olan her türden tas (tortul, magmatik ve metamorfik) ticari dilde mermer olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamanın içindeki hakiki mermerin yanında iyi parlatılabilen kalker, traverten, kumtaşı gibi tortul; gnays, kuvarsit gibi metamorfik; granit, siyenit, serpantin, andezit, bazalt gibi magmatik taslar da mermer olarak isimlendirilmektedir (DPT, 2001).

Mermer esas olan kireç taslarının çökelimi (sedimentasyonu) ve oluşumu prekambriyen de (700-800 milyon yıl) başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Mermerin milyonlarca yıl sürecek yolculuğunda çökelme ve tortullaşma ile beraber gmlme ve bunun sonucu oluşan basınç ve ısı faktörleri yavaş yavaş ortaya çıkmaya baslar. CaCO_3 'l malzeme basınç altında zamanla bünyesindeki suyu atarak taşlaşır (Erkek ve zdemir, 2011).

Kireçtaşından oluşan mermer hem kalsiyum karbonat, hem de magnezyum karbonat içerebilmektedir. Bunların içinde az miktarda kuvars, grafit, hematit, limonit, pirit, mika,

klorit gibi mineraller de bulunabilmektedir. Bu mineraller mermere değişik renkler ve damarlı bir görünüm kazandırmaktadırlar (Şen, 2006).

Herhangi bir mermer oluşumuna ocak işletmeciliği açısından bakıldığında; yeterli rezerve sahip olması, yani işletme için 30-50 yıllık üretimi karşılayacak rezervin bulunması, gruplanmış şekilde olsa da renk-desen homojenliğinin sağlanması ve mermer yatağında gelişmiş süreksizliklerin teorik olarak en az 4.5 m³ boyutlu, değerli mermerlerde ise 1.5m³ boyutunda blok üretimine uygun olması aranır (Tosun, 2007). Mermer olabilecek, yani mermer şeklinde kullanılabilecek bir tas kütlesinin sahada aranan en büyük özelliği blok verebilmesidir. Blok verebilen ve bloklar halinde üretilen taşlar geniş yüzeyli kesilebilmektedirler. Ne kadar yüksek vasıfta ve ne cinsten olursa olsun blok veremeyen taştan mermer olarak yararlanılamaz (Şen, 2006).

Mermerin kullanımı yönünden bakıldığında ise, levha üretiminde problem yaratabilecek sert veya zayıf zonlar içermemesi, kısa sürede ve tüm levha yüzeyinde eşit miktarda cila alması, fiziksel, jeomekanik ve kimyasal özelliklerinin ilgili standartların gerektirdiği şartların sağlaması, üretilen mermerlerin atmosferik ve kimyasal etkilere dayanıklı olması gibi özellikler taşınması beklenir (Tosun, 2007).

2.5.1. Mermerlerin sınıflandırılması

Mermerler, günümüze kadar birçok açıdan sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Burada sadece mineral tane boyutları ve mineral bileşim oranlarına göre yapılan mineralojik sınıflandırma ile türleri hakkında bilgi verilmiştir (Sağlam, 2012).

Mermerlerin mineral tane boyutuna göre sınıflandırılması

Mermerler mineral tane boyutuna göre aşağıda sınıflandırılmıştır:

İnce taneli mermerler	< 1 mm
Orta taneli mermerler	1 mm - 5 mm
İri taneli mermerler	> 5 mm - 1-2 cm

Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri

Mermerler mineral bileşim ve oranına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.16. Mineral bileşim ve oranına göre mineralojik sınıflandırma ve türleri (Sağlam, 2012).

Kayaç adı	İçerdiği diğer mineraller (kalsit hariç)	Kalsit	Yapı ve doku
Hakiki mermer	Mika, kuvarsit, opak mineraller (hematit, pirit) vb.	% 95	Masif, taneli
Kalşist	Klorit, epidot, mika, lepidolit	% 60-70	Şistli, yönlü
Sipolen	Flogoplt, tremotil, diopsi plajiyoklas, granat minerali	% 80	Şistli, yönlü
Magmatik kökenli mermer	Epidot, diopsit, granat minerali, olivin	% 80-90	Masif, taneli
Skam	Plajiyoklas + cevher minerali	-	-

Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırılması

Mermerler yapısına ve dokusuna göre Çizelge 2.17’de görüldüğü gibi sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.17. Mermerlerin yapı ve dokularına göre sınıflandırma (Sağlam, 2012).

Kayaç	Görünüm ve özellikleri
Masif	Kompakt, ince ve iri tanelidir
Laminai mermer	İri taneli, renkli şeritli görünümünde, şeritler farklı mineral veya elementler içerir
Şistli mermer	Yapraklı yapıda, önemli miktarda mika içerir
Breşik mermer	Kırıklanmış, tekrar ikincil minerallerle bağlanmış. Ara dolgular farklı renk ve mineral içerikli olabilir
İri taneli mermer	Tane boyutu 5 mm’den büyük tane türleridir

Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması

Mermerler jeolojik bakımdan Çizelge 2.18’de görüldüğü şekilde sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.18. Mermerlerin jeolojik açıdan sınıflandırılması (Sağlam, 2012).

I.Grup	Tam kristalleşmiş taşları içine alır. Renkleri genellikle beyaz ve açık gridir. Bileşimlerinde birçok yabancı madde bulunur
II.Grup	Omks ve travertenler içerir. Yapılarında yalnız CaCO_3 vardır. Soğuma boşluğu içerirler. Kolay işlenebilir ve iyi cila kabul ederler.
III.Grup	Magmatik kökenli mermerleri içerirler. Andezit, dasit, granit, bazalt, diabaz, gabro, serpantin vb.

2.5.2. Afyon bölgesi mermerlerinin özellikleri

Afyon mermerleri, mineralojik bileşimlerine göre değişik renk ve desen sergilemektedir (Karaman ve diğerleri, 2006).

Afyon yöresi mermerlerinin değişik türlerinden alınan örneklerden 20 adet ince kesit yapılmıştır. Bu ince kesitler polarizon mikroskopta detaylı bir şekilde incelenmiş ve mermerleri oluşturan mineraller arasında ilişkiler belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu, numunelerde hâkim olan kalsit minerallerine ilaveten bazı örneklerde klorit, serisit, kuvars ve demir (mağnetit, limonit) mineralleri saptanmıştır. Kalsit kristalleri 0,2 mm – 0,8 mm arasındaki boyutlardadır. Gronoblastik dokuya sahiptir. Yeşil şist fasiyesinde yer alan Afyon beyaz mermeri Pafileozoyik yaşı olup, metamorfizmaya uğramış klasik bir mermerdir. Bu mermerler, literatürde "Afyon metamorfiten" olarak isimlendirilen birim içerisinde mercek şeklindedir ve Neojen volkanitleri tarafından özetlenmektedir. Afyon kaplanpostu, yapı ve doku itibarıyla Afyon beyazından farklıdır ve gri renkli bir görünüme sahiptir. Değişik boyutta açık gri - koyu gri breşimsi karakter arz eden yamalar şeklindedir. Bu dokusuna izafeten, kaplanın derisine benzediği için "kaplan postu" ismi verilmiştir. Afyon yöresi mermerlerde blok ve plaka verme özelliği ile kenar - köşe kesilmesi, şekillendirilebilme, yeteneği ve kesilebilme hızları son derece iyidir. Bu durum, petrografi, mineralojik ve fiziksel özelliklerinden (mineral cinsi, tane boyutu, yapı ve doku gibi) kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu özelliklerinin yanında cila tutma özelliği de son derece iyidir (Kavas ve Kibici, 2001).

2.5.3. Mermer ocaklarında ve mermer işleme tesislerinde oluşan atık

MT, en küçük boyutlu mermer atıkları olup mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi esnasında açığa çıkan ve büyük çoğunluğu 1 mm'nin altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminin suyla yapılması nedeniyle bu atıklar direkt olarak suya karışır ve fosfojips halinde çöktürme havuzlarından veya kek olarak arıtma tesislerinde depolanır. Atıklar, değişik özelliklere sahip mermer tozlarından ve içine karışan yabancı maddelerden oluşmaktadır (Gürer ve Akbulut, 2005).

Mermer günümüzde kullanımı en çok tercih edilen bir inşaat hammaddesidir. Mermerin doğal bir malzeme oluşu çok kullanılma tercihinin en büyük nedenidir. 2002 yılında

Afyonkarahisar-İscehisar bölgesindeki 17 adet mermer ocağı işletmesinde yaklaşık 172 000 m³'lük blok mermer üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu üretim Türkiye blok mermer üretiminin % 12'sini karşılamaktadır (Çelik, 1996). Ocaklardaki blok mermer üretimi sırasında ortalama olarak üretimin % 40-60'ı atığa çıkmaktadır (Onargan ve Köse, 1997).

Ortalama atık miktarı % 50 olarak kabul edilirse; yıllık atık miktarı: 148000 m³/yıl x 0,5 = 74000 m³ / yıl olarak bulunabilir. Ayrıca, günümüzden hareketle bu güne kadar birikmiş ocak artıklarını hesap etmek istersek yaklaşık 1100000 m³ x 2,7 t/m³ = 2997000 t ocak atığından bahsetmek mümkün olacaktır (Gürer ve Akbulut, 2005).

Mermer ocaklarında blok alınmasını sınırlayan en önemli unsur mermer yatağındaki kırık ve çatlakların durumudur. Bu tür atıkların oluşmasına ocağın jeolojik yapısının yanı sıra yanlış üretim metotları da neden olabilmektedir (Gürer ve Akbulut, 2005).

Ocaklarda mermer atıklarının oluşmasına sebep olan bir diğer etken de sayalama işlemidir. Ocakların tektonik yapısına uygun olarak elde edilen çok büyük şekilsiz kütleler, çeşitli yöntemlerle istenilen ebatlarda alt, üst ve yanlarından kesilirler. Kesim sonucu ortaya çıkan bu atıklar ve blok elde edilmesi sonucu oluşan diğer tüm atıklar bir tarafta biriktirilir. Bu atıklar yükleyiciler vasıtasıyla kamyonlara yüklenecek pası döküm sahasına dökülmekte ve yığınlar oluşturularak çevrede istenmeyen görüntüler oluşmaktadır. Bu tip ocak işletmeleri, çevrenin özelliğine bağlı olarak etki yaratmaktadırlar. Eğer mermer vb. taş ocakları yerleşim merkezi ve yol kenarı gibi bölgelere uzak ise çevre tahribatı insanlar tarafından görülmediği için kamuoyu tepkisini çekmemektedir. Her işletme, yeryüzü topoğrafyasının bozulması vb. gibi bazı estetik kayıpların yanı sıra çevrenin kendine özgü niteliklerinin de yok olmasına neden olmaktadır (Gürer ve Akbulut, 2005).

2.5.4. Mermer tozu

Mermer tozu, en küçük boyutlu mermer atıklarıdır. Mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi sırasında oluşan, öğütme işlemine tabi tutulmadan koloidal yapıda bulunan ve büyük çoğunluğu da 250 µm'nin altında olan mermer tanecikleridir. Kesme işleminde su kullanılması nedeniyle suyla birlikte çökeltme havuzlarına taşınır. Mermer bloklarında kuru sistem kesim, aşırı toz ve kesici bıçağın aşırı ısınması nedeniyle yapılamamaktadır. Ortaya çıkan mermer çamuru çevreye yayılmakta, hatta bazen işletme

yakınındaki tarla veya nehirlerle akıtılmaktadır. Fakat genellikle işletmeler bu atığı bir havuzda toplamakta ve havuzdaki çamur kuruyunca, atığı kamyonlarla yerleşim yerlerinden uzak yerlere atmaktadırlar. Bu atık işletmeler içinde önemli bir sorun oluşturmaktadır (Gündeşli, 2008).

Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte, üstelik çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır. Mermer toz atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların çevre kirleticisi özelliğini de önemli ölçüde azaltacaktır (Çelik ve Tur, 2009). Konuyla ilgili olarak yapılmış olan bir çalışmada, mermer işletmeciliğinde elde edilen $1(m^3)$ bloğun işlenmesi sırasında makinelerin toz haline getirdiği miktar yaklaşık $0,481(m^3)$ olarak bildirilmiştir. Bu durumda ürün miktarının toplam % 48' i toz halinde üretim atığı olarak ortaya çıkmaktadır (Kavas ve Kibıç, 2001). 1989–1994 yılları arasında mermer üretiminde ortalama % 16 artış olmuştur. 2005 yılı Türkiye mermer üretimi yaklaşık 2 000 000 (m^3)'dür. Türk standartlarında belirtilen mermer birim hacim ağırlığı ortalama $2,7(t/m^3)$ olduğuna göre, Türkiye' de 2005 yılında üretilen mermer miktarı: $2\ 000\ 000(m^3/yıl) \times 2,7(t/m^3) = 5\ 400\ 000(t/yıl)$ dır. Türkiye genelinde 2005 yılında ortaya çıkan mermer atık miktarı: $5\ 400\ 000(t/yıl) \times 0,48 = 2\ 592\ 000(t/yıl)$ civarındadır (Gürer ve Akbulut, 2005).

Yıllık ortalama 2.500.000 ton mermer atığı oluşmaktadır. Bu atık nedeniyle İtalya gibi bazı ülkeler mermer üretimlerini sınırlamak zorunda kalmışlardır. Ülkemizde çevre kuruluşları ile mermer işletmecileri arasında bu konu ile ilgili problemler başlamıştır. Sürekli arttığı için depolanması işletmeler için mümkün olmayan bu atığın değerlendirilmesi; çevre sağlığı, çevre temizliği ve ekonomik açıdan büyük bir kazanç olacaktır (Ergi ve diğerleri, 2002).

Mermer tozunun fiziksel özellikleri

Mermer saf kalsiyum karbonat bileşiminde olduğu zaman beyaz ve yarı saydamdır. Renkleri genellikle beyaz ve grimsidir. Fakat yabancı maddeler nedeniyle sarı, pembe, kırmızı, mavimsi, esmerimsi ve siyah gibi renklerde de olabilirler (Şentürk ve diğerleri,

1996). Mermer tozunun fiziksel özellikleri Çizelge 2.19’da görüldüğü şekilde sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.19. Mermer tozunun fiziksel özellikleri (Vijayalaksmi vd., 2001)

Özellik	Sonuç
Hacim Yoğunluğu (g/cm ³)	1,3
Gerçek Yoğunluğu (g/cm ³)	3,6
Partikül Boyut Dağılımı (µm)	300-45
Yüzey Alanı (m ² /g)	6,37
Nemlilik (%)	8

Mermer tozunun kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşiminde büyük oranda kalsiyum karbonat, magnezyum karbonatın yanı sıra silisyum dioksit, değişik metal oksitleri ile silikat mineralleri bulunur. Bileşimlerinin %90-98’i CaCO₃’ten (Kalsiyum karbonat) oluşmaktadır. Düşük oranda MgCO₃ (Magnezyum karbonat) içermektedir. CaCO₃ kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral “Kalsit”tir. Aynı zamanda az miktarda silis, silika, feldspat, demiroksit, mika, florin ve organik maddeler bulunabilir (Tr.Wikipedia.Org). Mermer tozunun kimyasal özellikleri Çizelge 2.20’de görüldüğü şekilde sınıflandırılabilir:

Çizelge 2.20. Mermer tozunun kimyasal özellikleri (Ceylan, 2000)

Yapılan Test	Test Değeri (%)
Kızdırma kaybı	43,4
MgO	0,30
CaO	54,59
SiO ₂	8,5
Fe ₂ O ₃	0,40
Al ₂ O ₃	3,72
SO ₃	0,09
Cl-	0,03

Mermer tozunun kullanım alanları

Gelişen endüstri ve teknoloji ile mermer hemen hemen her yerde kullanılır hale gelmiş ve buna paralel olarak da mermer üretiminin arttığı bilinmektedir. Dünyadaki kaliteli ve en zengin mermer yataklarının büyük bölümü Akdeniz ülkelerinde yer almaktadır. Mermer ve diğer yapı taşları (granit, siyenit, andezit, bazalt, gabro, diyabaz, gnays, mika sist,

traverten, oniks mermer vb) ülkemizde her bölgede bulunan yer altı zenginliklerindendir (Yücetürk, 2010).

Ülkemizde Elazığ'dan Afyon'a, Adana'dan Çanakkale'ye 33 farklı ilde mermer yatakları ve mermer ocakları bulunmaktadır. Bu ocaklardan yaklaşık 50 farklı çeşit (Elazığ vişne, Hazar bej, Afyon beyaz vb.) mermer elde edilebilmektedir. Mermercilik sektöründe ocak işletmecisi ve mermer imalatçısı olan 200'ü aşkın firma bulunmaktadır ve bu sayı her geçen gün artmaktadır (Alyamaç ve İnce, 2007) . Mermer işleme tesislerinin yoğunlaştığı bölgelerdeki mermer atık sahaları da çevreye olumsuz etki yaptığı gibi imhası ekonomik kayıplara da neden olmaktadır (Filiz ve diğerleri, 2010).

Burada, önemle üzerinde durulması gereken husus, gerek mermerin ocakta üretiminde ve gerekse tesislerde islenmesi sürecindeki zorluklar ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksekliği dikkate alındığında, bu atık malzemelerin büyük bir milli kayıp olduğudur. Böyle bir potansiyeli sanayide değerlendirmek ulusal ekonomiye önemli kazanımlar sağlayacaktır (Köse ve Diker, 1999). Bu nedenle mermer işleme tesislerine ait bu atıkların belirli sektörlerde yeniden değerlendirilebilmesi için yapılacak çalışmalar ülkemiz mermerciliğine yararlı bir katkı sağlayacaktır. Mermer toz atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların çevreye verdikleri zararları da büyük ölçüde azaltacaktır (Şahin ve diğerleri, 2007).

Atık maddelerin geri dönüştürülmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Geri dönüştürme işlemleri ayrıca bir yatırım gerektirdiği gibi malzemelerin tamamı da geri dönüştürülememektedir. Bu malzemelerden en büyük faydayı sağlamak için çeşitli sektörlerde kullanılabilirliği son yıllarda üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan konulardandır. Literatür bilgilerinde ve dünyadaki bazı uygulamalarda gerek mermer tozlarının gerekse mermer toz atıklarının seramik, çimento, boya, cam, yapı malzemesi gibi birçok sektörde değerlendirilme çalışması olmakla birlikte, ülkemizde bu konuya yönelik yaygın uygulamalara rastlanmamaktadır (Bilgin, 2010). Mermer atıklarının kullanım alanları başlıklar halinde verilecek olursa (Bilgin, 2010);

- İnşaat Sektörü
- Seramik Sektörü

- Çimento İmalat Sanayi
- Plastik Sanayi
- Kâğıt sanayi
- Tarım ve Gübre Sanayi
- Yem Sanayi
- Boya Sanayi
- Yol Yapımında
- Demiryolu Zemin Malzemesi
- Cam Sanayi
- Kimya Sanayi
- Soda Üretimi
- Refrakter Malzeme Üretimi
- Oto Lastiği Üretimi
- Patlayıcı Malzeme Üretimi
- Temizlik Malzeme Üretimi
- Haşere Öldürücü İlaçlarda

ve daha bir çok alanda kullanılabilir. Ancak bu alanlarda, mermer tozu genellikle bazı fiziksel ve kimyasal işlemler uygulanarak kullanılabilir. Bu da üreticiye ekonomik bir yük getirmektedir. Ancak mermer tozu beton üretiminde kullanılmadan önce sadece kurutulacak ve az bir fiziksel kuvvetle toz haline getirilecektir. Bunda dolayı inşaat sektöründe kullanımı daha ekonomik olmakta ayrıca çevre kirliliğini de büyük ölçüde azaltmaktadır (Bilgin, 2010).

Mermer atıkları ekolojik dengeyi bozmayan, hava kirliliğine neden olmayan, iklim değişikliklerini etkilemeyen, su kirliliği oluşturmayan radyoaktif olmayan inşaat sektöründe değerlendirilebilen bir yan üründür (Ünal ve Kibici, 2001). Mermer atıklarının değerlendirilmesi halinde çevre kirliliğinde olumsuz etkinin azaltılabilmesi için havuz çökeltilerinin atık bir malzeme olarak kontrol altına alınması ve çimento sektöründe değerlendirilerek ekonomik yarar sağlaması amaçlanmıştır.

Mermer tozu atıklarının bazı kullanım alanları

İnşaat sanayinde kullanılması

İnşaat alanında mozaik, yapıtaşı, çimento, harç ve sıva olarak kullanıldığı gibi kireç elde edilen en önemli hammaddelerden birisidir. Suni Mermer olarak da bilinen yer karolarının imalatında ana hammadde olarak doğal mermerler kullanılmaktadır. Uygun boyutlardaki mermer parçalarının bağlayıcılar ile beraber mermer, agregalı karo üretiminin temelini oluşturmaktadır. Mermer parçalarının yanı sıra % 10 - 12 oranında, boyutu 0,5 mm altında olan mermer tozu da kullanılmaktadır (Aydın, 2013).

Seramik sektöründe kullanılması

Seramik üretiminde % 5-6 oranında mermer kullanılmaktadır. Seramik bünye ve sırlarında CaO olarak bünyeye alınan hammadde kaynakları genel olarak; kalsit, dolomit ve mermerdir. Karışık ve kalsitli akçini çamurlarının mineralojik bileşiminde % 5-20 arasında CaCO_3 kullanılır. Bu CaCO_3 çok ince öğütülmüş mermer halinde bileşime katılır. İri taneli ve iyi dağılmamış kalsit, çamur içinde hatalara yol açar. Özsüz seramik hammaddesi olan kalsit türleri, seramik çamurlarında artan sıcaklık ile birlikte gözenekliliği azaltır. CaO sırdaki SiO_2 ile reaksiyona girerek bir ara tabaka oluşturur. Bu ara tabaka seramik teknolojisinde çok önemlidir. CaO sır içindeki diğer oksitlerle birleşerek cam oluşumuna yardımcı olmaktadır (Aydın, 2013).

Çimento imalat sanayinde kullanılması

Çimento; CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve eser halde MgO ihtiva eder, esas itibariyle kalker ve kil karışımı olan, klinkerleşme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra, gerektiğinde alçı, vb. katkı maddeleri karıştırılıp öğütülerek toz halinde elde edilen bir malzemedir. En önemli özelliği %11-15 su ile karıştırıldığı zaman belli bir süre sonra sertleşerek karışımdaki diğer malzemelerin birbirine bağlanmasını sağlar. Çimento sanayinde her ne kadar çok miktarda CaCO_3 bileşimli hammaddeler kullanılırsa da, mermer sadece Beyaz Portland çimentosu yapımında kullanılmaktadır. Normal portland çimentosu bileşimindeki kalker yerine hammadde olarak mermer, kil yerine de kaolen kullanılmasıyla beyaz portland çimentosu elde edilmiş olur (Aydın, 2013).

Plastik sanayinde kullanılması

Plastik malzemelere, kalınlık ve tokluk vermesi amacıyla mermer tozu katılmaktadır (Aydın, 2013).

Kâğıt sanayinde kullanılması

CaCO_3 , özellikle sigara kâğıdı başta olma üzere gazete kâğıdı, kaliteli dergi kâğıtları üretiminde kullanılmaktadır. Yağ emme özelliğinden dolayı matbaa mürekkebinin hızlı kurumasını sağlamaktadır. Kâğıt sektöründe dolgu veya kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. CaCO_3 veya MgCO_3 , kullanılması kâğıdın daha düzenli yanmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte CaCO_3 ile yapılan kâğıtlar daha dayanıklı olmaktadır. Kâğıt imalatında selülozun pişirilmesi sırasında sıvının hazırlanmasında mermer kullanılmaktadır (Aydın, 2013).

Tarım ve gübre sanayinde kullanılması

Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, üzerinde yetişen ürünler açısından büyük önem taşır. Toprağın katı kısmı %1,5–5 oranında organik madde ve %95– 99 oranında mineral maddeleri ihtiva eder. Kalsiyum oranı toprağın yapısı bakımından etkili olduğu kadar, kimyasal nitelikleri üzerinde de etkili olduğundan toprağa yeterli bir kalsiyum düzeyi sağlaması gerekir. Doğal olarak sularla yıkanma yüzünden durmadan kireç kaybettiği için toprağa zaman zaman (3–6 yılda bir) kireçli madde vermek gerekir. Kireçle toprak ıslahı için, kalsiyumlu maddeler kullanılır. Bunlar; kalsiyum karbonat, kalsiyum oksit ve hidroksil veya dolomit gibi maddeler kullanılır (Aydın, 2013).

Yem sanayinde kullanılması

Özellikle yumurta yemlerinde CaO veya CaCO_3 olarak boyutu 2 mm altında olan toz katılmaktadır. Bu oran % 10–12 arasındadır. Düşük kalsiyum oranlı yemler tavuklarda yumurta verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Türk Standartları Enstitüsünün TS 60 standartlarına göre mermer tozu hayvan yemi olarak kabul edilmektedir. Buna göre bileşiminde en az % 92 CaCO_3 bulunan mermerler bu amaç için kullanılırlar (Aydın, 2013).

Boya sanayinde kullanılması

Boya imalatında katkı maddesi olarak kullanılan kalsit (CaCO_3), özellikle sulu boyalar için önemlidir. Bunun için 10 mikronun altında ve çok saf kalsit kullanılmaktadır. Kalsitin içindeki demir oksit oranı % 0,03'den az olması istenir (Aydın, 2013).

Yol yapımında kullanılması

Stabilizasyon malzemesi olarak yollarda kullanılır. Yol zeminindeki kil mineralleri ile birleşerek plastisite, genleşme ve kabarma katsayılarına etki eder. Ayrıca mıcır olarak da yol yapımında kullanılır (Aydın, 2013).

Demiryolu zemin malzemesinde kullanılması

Demiryoluna sağlam bir zemin oluşturmak için öncelikle zemine balast denilen yeterli sağlamlıkta ve boyutlandırılmış granül taş döşenir. Böylece demiryolu üzerindeki yükler rahat bir şekilde karşılanırken, demiryolları yapım malzemeleri olan travers ve raylar suyun etkisinden korunmuş olur (Aydın, 2013).

Diğer kullanım alanları

Bu alanlar dışında; soda imalinde, refrakter malzeme imalinde, oto lastiği imalinde, patlayıcı malzeme imalatında, temizlik malzemeleri, haşere öldürücü ilaçlarda kullanılır. Ayrıca madencilikte; Yeraltı işletmeleri, cüruf yapıcı, flotasyon, kalsine dolomit üretiminde kullanılır (Aydın, 2013).

2.6. Tuğla ve Kiremit Endüstrisi

Tuğla ve kiremit en eski yapı malzemeleri olmalarına rağmen, ana özelliklerinden hiç bir şey kaybetmeden günümüze kadar gelmişlerdir. Dünyanın neresinde hangi teknolojiye göre üretilirse üretilsin, sanayileşmenin bir neticesi olarak ortaya çıkan diğer yapı malzemeleriyle rekabet edecek potansiyel gücü her zaman tabiatında taşır. Mineralojik yapısındaki zenginlik, bünyesinin bileşimi, bir anlamda bize dünyamızın oluşumunu anımsatmaktadır. Bünye oluşurken yapı taşlarının geçirdiği evrelerle yeryüzünün jeolojik gelişimi arasındaki bağıllık, belki de bahsedilen bu potansiyel gücün kaynağıdır.

Yapısındaki mineral zenginliğin sağladığı esneklik sayesinde, bilim ve teknolojinin yeniliklerine uyum sağlayabilmekte, başka bir deyişle kendini çağın modernizasyonuna uyarlayabilmektedir (Özçay, 2010)

2.6.1. Tuğla ve kiremit hammaddelerinin bileşimi

Tuğla ve kiremit üretiminde kullanılan malzemeler genellikle saf değildir. Tek bir mineral yaygın olabilir ancak safsızlıklar özellikler üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Grimshaw (1971)'a göre killeri genellikle kil minerallerinden oluşur. Ancak önemli miktarlarda safsızlık da içerebilirler ve bu safsızlıklar malzeme özelliklerini etkiler. Kullanılan hammadde içindeki safsızlıklar etkilerini; kullanılan kilin kökenine, kil mineralleri ve kil dışı minerallerin oranına, tane boyuna ve morfolojisine, üretilen malzemenin imalat şartlarına (maksimum sıcaklık, ısıtma ve soğutma hızı, fırın atmosferi, mevcut olan diğer maddelerin etkileri) bağlı olarak gösterirler. Kil içindeki kimyasal bileşimler, silis, alümina, alkali ve toprak alkali içerikli mineraller, demir bileşikler, kalsiyum bileşikler, magnezyum bileşikler, titanyum bileşikler ve tuz kompleksleridir (Özçay, 2010).

Silis (SiO_2)

Kil içinde serbest silis (kuvars, hidrate ve kolloidal silis) ve diğer elementlerle birlikte iki şekilde (alüminyumla birlikte kil minerallerinin yapısında, alkali mineraller ve alümina ile feldispatların ve mikaların yapısında) bulunur. Hammadde içindeki serbest olarak bulunan silis miktarı, yapılacak olan tuğla ve kiremit çamurunun plastikliğinin düşmesine, kuruma ve pişme küçülmelerinin azalmasına, tane boyutu çok küçük olmadığında çekme ve kırma mukavemetinin azalmasına neden olur (Özçay, 2010).

Alümina (Al_2O_3)

Sadece kil mineralleri içinde bulunmaz; feldspat, mika ve andaluzit, silimanit, mullit gibi diğer alümina-silikatların kristal yapısında da yer alır. Halloysit, az miktarda gipsit ($Al(OH)_3$ veya $AlO(OH)$) formunda alümina-hidrat içerebilir. Halloysit ve ateş kili (fireclay) içeren killeri yüksek ergime sıcaklığı nedeniyle özellikle refrakter malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Kil minerali haricinde bulunan alüminyum bileşikler kaolende kilin plastikliğini azaltır (Özçay, 2010).

Temel alkali bileşikler

Silikatlar veya alümina-silikatlar: feldispat, mikalar ve sulu-mika örnek olarak gösterilebilir. Buradaki mika ve sulu-mineraller gerçekte kil mineralleridir. Alkali içerikli mineraller üretimde vitrifikasyon sıcaklığını düşürür. Kil minerali kristallerinin üzerine adsorplanan katyonlar: Montmorillonitler bu şekilde % 3'e kadar alkali miktarı içerebilirler. Ancak kaolinitlerde % 0.3'ü geçtikleri çok nadirdir. Çözünür tuzlar: Potasyum sülfat ve sodyum klorür ve bunların kompleksleri. Kil içindeki alkalilerin en önemli etkisi vitrifikasyon sıcaklığını düşürmesidir. Alümina ve silisle birleşerek düşük sıcaklıkta (700 °C) sıvı faz oluşur ve killerin pişirilmesi ile cam faz olarak kalır. Çözünür alkali tuzları killerin koloidal ve plastiklik özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Alkali içerikli minerallerin çoğu plastik olmadıkları için bünyenin kuru mukavemetini düşürür (Özçay, 2010).

Demir mineralleri

Manyetit (Fe_3O_4): Ham killerde nadiren bulunur ancak pişirme sırasında demir oksidin kısmen indirgenmesi ile oluşabilir (Özçay, 2010).

Hematit (Fe_2O_3): Ayrışmaya maruz kalmış killerde fazla bulunmaz. Çünkü hidrata forma dönüşür (limonit). Pişmiş killerdeki en önemli renklendiricidir. Hematit bazı killerde fazla miktarda bulunur ve bu killerin kırmızı, pembe olmasına neden olur (Özçay, 2010).

Limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 11/2\text{H}_2\text{O}$): Sarı veya kahverengimsi amorf tanelerden oluşan sulu demir oksittir. Killer genellikle belirli bir miktar limonit içerir. Ancak ayrışma sonucu oluşmuş killerde daha fazla bulunur. Isıtma ile limonit suyunu kaybeder ve demir okside dönüşür. Bu nedenle kırmızı rengin elde edilmesi için önemli bir kaynak oluşturur (Özçay, 2010).

Pirit (FeS_2): Sarı renkli, metal parlaklığında demir-sülfür'tür. Pirit kübik kristal yapıdadır.

Götit [$\text{FeO}(\text{OH})$] veya $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$: Kahve-siyah, sarımsı ve ya kırmızımsı renklerde oluşan sulu demir oksittir. Killerin çoğunda mevcuttur ve diğer minerallerin çevresinde koloidal formda bulunur. Killerde limonit denilen minerallerin çoğu ince boyutlu Götit'tir (Özçay, 2010).

Demir oksit (FeO): Ham killerde genellikle bulunmaz ancak özellikle indirgen atmosferde pişirme sırasında oluşur (Özçay, 2010).

Markasit (FeS₂): Pirit ile aynı kimyasal formüle sahiptir. Ancak iğnemsî şekilde oluşur (ortorombik). Markasit ayrışma ile kolayca Fe⁺²-sülfata okside olur ve kurutulmuş kilde beyazlıklar oluşturur. Pirit ise markasitin aksine kolaylıkla ayrışmaz veya okside olmaz (Özçay, 2010).

Kalsiyum mineralleri

Grimshaw (1971)'a göre kalsiyum bileşiklerinin kil üzerinde temel etkileri şunlardır:

CaO'in tuğlada 1050 °C'ye kadar ergitici özelliği yoktur. Ancak kil mineralleri ile düşük sıcaklıkta vollastonit (CaSiO₃) veya anortit (CaAl₂Si₂O₈) oluşturur (Özçay, 2010).

Hareketli, yüksek korozyon etkiye sahip akışkan sıvı oluşturur. Soğutulduğunda sıkı bağlanmaya ve asitlere dirençli cam oluşturur. Cam düşük sıcaklıklarda yumuşar ve bünyede deformasyona neden olur (Özçay, 2010).

Reaksiyon sıcaklığının altında kalsiyum bileşikleri pişme küçülmesini düşürür.

Kırmızı rengin olduğu sıcaklıkta kalsiyum bileşikleri demir minerali ile birleşerek rengin açılmasına neden olur. Renk daha fazla açılmak istendiğinde kalsiyum mineralleri çok ince taneli olarak yapı içine iyice dağıtılmalıdır (Özçay, 2010).

Kalsiyum karbonat (CaCO₃) yaklaşık 900°C'de dekompozisyona uğrayarak kirece dönüşür ve soğutma sırasında bu şekilde kalırsa havanın nemini ve CO₂'ini çekerek hacmini artırır ve bu nedenle seramik bünyelerde patlamalara neden olur (Özçay, 2010).

Yaklaşık 900°C'de CO₂ çıkışı nedeniyle seramik bünyelerin mukavemetini düşürür ve su emmeyi artırır.

Kalsiyum sülfat (CaSO₄) pişirme sırasında kararlıdır ve düşük sıcaklıkta pişirilen tuğlalarda bulunabilir. Yüzey tuğlalarında asıl çiçeklenmenin nedeni olarak magnezyum

sülfatın yanında yer alırlar. Doğal killerde genellikle bulunmamasına rağmen kalsiyum karbonat ve pirit içeren killerin pişirilmeleri sırasında da oluşabilirler (Özçay, 2010).

Magnezyum mineralleri

Kil içinde küçük oranlarda bulunur; manyezit ($MgCO_3$), dolomit [$CaMg(CO_3)_2$], klorit, spinel, magnezyum-silikatlar (enstatit, $MgSiO_3$) veya magnezyum-alümina silikatlar (kordiyerit, $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$) şeklinde bulunabilir. Magnezyum sülfat ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), tuğla killlerinde çok düşük miktarlarda bulunur. Ancak %0.05'lik miktar dahi çiçeklenmeye neden olur. Kalıplama öncesi çok ince taneli baryum karbonat ilavesi ile bu negatif etki önlenebilir. Bazen pişirme sırasında magnezyum tuzları ile sülfür gazının birleşmesi sonucu da suda çözünmeyen magnezyum sülfat oluşabilir. Bu durumda baryum ilavesi çiçeklenmeyi engellemez (Özçay, 2010).

Titanyum mineralleri

Ayrışmaya karşı dayanıklı olduğu için kil içerikli malzemelerde yaygın olarak bulunur. Bulunan ana mineraller; rutil, anataz ve brookit'tir. Killi malzemelerde titanyum miktarı genellikle % 3'ü geçmez (Yanık, 2005).

Tuğla ve kiremit çeşitleri

Yapı sanayinde kullanılan tuğla ve kiremitlerin sınıflandırılması Türk Standartlarına göre yapıldığında Çizelge 2.2'de verilmekte olan tuğla ve kiremit çeşitleri dikkat çekmektedir. Bununla beraber TSEK kapsamında asmolen döşeme giriş tuğlaları da yer almaktadır. TSE sınıflandırması dışında kalan baca, dekoratif, döşeme ve cephe kaplama tuğlaları da bu çeşitlilik arasında bulunmaktadır. (Aksin, 2007). Çizelge 2.21' de Tuğla ve kiremit çeşitlerinin TSE sınıflandırılması gösterilmiştir (Aksin, 2007).

Çizelge 2.21. Tuğla ve kiremit çeşitlerinin TSE sınıflandırılması (Aksin, 2007).

Standart No	Tuğla ve kiremit çeşitleri
TS 704	Harman tuğlası
TS 705	Fabrika tuğlaları-duvarlar için dolu ve düşey delikli
TS 1260	Taşıyıcı döşeme tuğlaları (statik çalışmaya katılan)
TS 1261	Taşıyıcı döşeme tuğlaları (statik çalışmaya katılmayan)
TS 4562	Fabrika tuğlaları-duvarlar için klinker tuğla
TS 4563	Fabrika tuğlaları-duvarlar için yatay tuğla
TS 4377	Fabrika tuğlaları-duvarlar için düşey delikli, hafif
TS 562	Oluklu kiremitler ve mahya kiremitleri-Akdeniz tipi, Marsilya tipi
TS 3457	Kiremit-pişmiş topraktan
TS EN 1304	Çatı kiremitleri ve bağlantıları parçaları-kilden iöal edilmiş-tarihler ve özellikler
TS EN 538	Çatı kiremitleri kilden yapılmış sürekli olmayan (bindirmeli) eğilme dayanımı deneyi

Normal tuğla (TS-704)

El ve makine ile imal edilen bu tuğlalar 19x9x5 cm ebadında olmalıdır. Su emme miktarı kuru tuğla ağırlığının %20'sinden fazla olmamalıdır. Çimento harcı ile birleştirilmiş iki yarı tuğladan meydana gelen on adet tecrübe küpünden yapılacak basınç deneyinin ortalaması 65kg/cm² olmalı ve her küpün basınç mukavemeti 50 kg/cm² den az olmamalıdır (Özçay, 2010).

Özel boyutta yassı tuğla

Normal tuğla gibi olup; kalınlıkları 3 cm'den 5cm'ye kadar muhtelif şekil ve ebatta yapılabilir (Özçay, 2010).

Delikli tuğla (TS- 705)

Makine ile kalıplanıp ve imal edilen bu tuğlalar, normal tuğla özelliğinde olmakla beraber, daha uzun süre ve daha iyi pişirilirler. Delikleri muntazam ve tamamen açık olmalıdır. Birçok şekil ve ebatta üretilebilirler. Delikli tuğlalar kuru tuğla ağırlığının % 15' inden fazla su emmemelidir. Normal olarak ebadı 19x9x5 cm'dir. Delikli tuğlalarda, deliklerin toplam alanı, delik açılan alanın yüzölçümünün en çok %75, en az %14' ü olmalıdır. Dış et kalınlığı 1.8 cm'den iç et kalınlığı da 0.8 cm'den az olmamalıdır. iyi pişmiş delikli tuğlanın her üç istikametteki basınç direnci 50 kg/m² den az olmamalıdır. Delikli tuğlanın taşıyıcı

olarak kullanılabilmesi için mukavemet hesapları, şartnamelerindeki gerilme ve inşaat şartlarına göre tahkik edilmelidir (Özçay, 2010).

Asmolen döşeme tuğla bloklar (TS- 407)

Özel kil karışımı makine ile öğütölüp, ezilerek, karıştırılması ve homojen bir hale getirilerek normal ölçülerine uygun bir şekilde kaplanarak pişirilmesi ile elde edilirler. Bir adedi en az 120 kg'lık münferit bir yükü taşımalıdır (Özçay, 2010).

Cephe tuğlası (fabrika yapısı duvar tuğlası) (TS-705)

Makine ile imal edilirler. Tamamıyla yoğun keşif, büyük bir basınç altında kaplanırlar. Çok iyi pişmiş ve yüzleri çok düzgün olmalıdır. Harca daha iyi bir şekilde yapışmaları için 19x9 yüzlerinin orta kısımları hafif bir şekilde çukur olacaktır. Basınç direnci 300 kg/cm²' den az olmayacak kuru olarak ağırlığının % 5' inden fazla su emmeyecektir. Yere 1.50 metre' den bırakıldığında kırılmayacak, üzerine vurulduğu zaman tanen bir ses verecektir (Özçay, 2010).

Ateş Tuğlası

Yüksek sıcaklığa dayanıklı olduklarından ocaklarda ve fırın iç çeperlerinde kullanılan ateş tuğlaları genellikle; alüminli ateş tuğlası, silika ateş tuğlası, izolasyon ateş tuğlası, asit ateş tuğlası, klinker ateş tuğlası, şamot ateş tuğlası, kizelgur ateş tuğlası, boru ateş tuğlası, kromit ateş tuğlası, sömi silika ateş tuğlası isimleri altında imâl edilip sınıflandırılmaktadır. İnşaatla kullanılan ebadı 19x9x5 cm'dir. Fabrika yapısı duvar tuğlası olup, makine presleri veya elde şekillendirilen özel şekilli tuğladır. Çeşitli ebat ve şekilde olanları vardır. Özgöl ağırlığı 1.7' den yüksek olmalıdır. 1000 °C ile normal ısı arasında yapılacak hâret sademe deneyine en az 15 defa dayanabilmelidir. Harcı özel olup fabrikası tarafından, (kaput bezinden ya da kâğıttan torbalar), ambalajlanır ve dağıtılır her bir torba 45-55 kg arasında değişir. Ateş tuğlası kuru ot ile muhafaza edilmiş ahşap kafes sandık halinde ambalajlanır (Özçay, 2010).

Kiremit

Yapıda kullanılacak kiremitler alaturka (TS-562) ve marsilya tipi olmak üzere iki cinstir. Alaturka kiremit yarım kesik koni seklinde 18x35 cm. boyutlarında olup marsilya tipi kiremidin kullanıldığı yerlerde de kullanılabilirler. Marsilya tipi kiremit ise 23x41 cm dir. Ortalama 2.7 kg ağırlığındadır. Kiremit iyi cins kil ve killi maddelerin homojen bir hale getirilip su ile yoğrulduktan sonra pres ile şekillendirilmesi ve kurutulup uygun bir sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilir. Yapıda kullanılacak kiremitler muntazam iyi kalıplanmış, iyi pişmiş rengi kırmızımtırak yüzeyi düzgün ve pürüzsüz her türlü çatlak, çapak ve delikten yoksun kesitli boşluksuz ve homojen olmalıdır. Kiremidin bir ucundan el ile tutulup diğer ucuna bir demir parçası ile hafifçe vurulduğunda bir ses verecektir. Kiremit; su emme değeri ağırlık olarak en çok % 13, su geçirme değeri en az 150 dakika, taşıyabildiği ağırlık en az 122 kg özelliklerinde olması istenmektedir (Aksin, 2007).

2.6.2. Tuğla ve kiremit malzemelerinde istenilen özellikler

Kimyasal bileşim

Kimyasal bileşimi oldukça önemlidir. Pişme ve pişirme özelliklerine etki eder. Safsızlıklardan dolayı killerin kimyasal bileşimi değişebilir. K_2O ve Na_2O ergitici olarak davranır ve pişirme sıcaklığını düşürür. Bu bazen istenir bazen de istenmez. SiO_2 ve Al_2O_3 ise malzemelerin mukavemetini arttırmanın yanında sinterleme sıcaklığını yükseltir ve malzemede daha fazla gözenek oluşmasına neden olur (Özçay, 2010).

Tane boyutu (inceliği)

Dünya genelindeki tuğla ve kiremit üretimi baz alındığında genel olarak kum fraksiyonunun $<3mm^0$, kalsit ve dolomitin $<0.75 mm^0$, feldispat ve pirit/markasitin $<0.1 mm^0$ olmasına dikkat edilmesi gereklidir. Farklı minerallerin tane boyutları yukarıda belirtilen sınırların dışına çıktığında plastik şekillendirmede (ekstrüzyonda) iri taneler orta bölümde sıralanarak malzeme içerisinde faz ayrımını oluştururlar. Bunun sonucu kuruma kesit alanında homojen olmaz, kuru çekme anizotropikleşir (Özçay, 2010).

Pişirme esnasında iri kum taneleri yani kuvars minerallerinin pişirim ve soğutma esnasında alfa/beta polimorfunda aşırı genleşme ve büzülme görülür, bu da çatlamalara yol açar.

Ayrıca iri kuvars, feldspat ve kalsit/dolomit tanelerinin kil mineralleriyle reaksiyona girme kabiliyetleri düşer. Bununla doğru orantılı olarak silikatlaşma özelliği azalır ve son üründe çatlamlar, kireç patlaması gibi hatalar görülür. Markasit ve piritin iri olmasının sonucunda bozunma reaksiyonu, yani SO_2/SO_3 gazının bünyeden çıkması zorlaşır, siyah lekelerin oluşması ihtimali artar ve ayrıca pişmiş ürünlerde pirit patlaması denilen optik hatalar oluşur (Özçay, 2010).

Plastisite

Üretim yöntemine bağlı olarak kullanılan malzeme belirli bir plastiklik özelliğine sahip olmalıdır. Farklı kil mineralleri, farklı plastiklik suyuna ihtiyaç duyar. Tuğla ve kiremit malzemelerinde farklı kil mineralleri bir arada bulunur. Bunların birbiriyle ve kil olmayan mineraller ile olan yüzey alanı ilişkileri sonucu malzeme çok farklı su isteyebilir. Fazla miktarda kil minerali ihtiva eden hammadde çok iyi şekillendirilebildiği halde kururken ve pişirilme esnasında çatlamalara sebep olur (Özçay, 2010).

Küçülme

Kuru küçülme tuğla üretiminde en fazla % 5, kiremit üretiminde ise %7 olmalıdır. Plastik killerin kuruma ve pişme küçülmeleri büyük olur. Plastik olmayan veya çok kumlu killerin ise küçülme değerleri düşük olur. Küçülme değerlerinin kontrolünde her iki tip kil karıştırılarak kullanılmalıdır (Özçay, 2010).

Pişme rengi

Tuğla ve kiremit sanayinde $900-1000^{\circ}C$ 'de pişen malzemelerin renginin kiremit kırmızı olması istenir. Pişme rengi mineral içeriğine ve tuz oranına bağlıdır. Fischer (1984)' e göre killeri pişirildiğinde genellikle kırmızı, kırmızımsı-kahverengi, sarımsı-kahverengi veya gri renk alır. Pişme rengi beyaz olan kil oldukça nadirdir. Pişme rengini etkileyen en önemli etkenlerden biri ürünün pişirilme sıcaklığıdır. Tuğla ve kiremit gibi yapı malzemelerinde rengi veren esas olarak demir elementidir. Ancak kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır. Demir oksidin bulunuş durumu üretilen malzemenin rengini etkileyen başka bir parametredir. Sistemde karbonat bulunduğunda renk daha düşük sıcaklıklarda elde edilir. Demir düşük oksijen içerdiğinde FeO 'in oranına

bağlı yeşil, mor veya siyah renk elde edilir. Ancak bu durum özellikle yapı malzemelerinde istenmeyen bir durumdur. Kil içinde bulunan organik malzemeler yakıldığında lokal olarak oluşan redüktif atmosfer Fe_2O_3 'ü indirgeyebilir. Bunun neticesinde renk değişir. Ancak oksijenin bol olduğu atmosferde oluşan FeO tekrar Fe_2O_3 'e dönüşür. Killerin indirgen atmosferde pişirilmelerinden sonra oksitleyici atmosferde tekrar pişirme ile rengin pembe olmasının nedeni indirgenme sırasında demir sülfat oluşması ve tekrar oksitlenme ile sistemdeki Fe_2O_3 miktarının artmasıdır. Kilde, TiO_2 ve Cr_2O_3 gibi oksitlerin varlığı tuğla ve kiremidin renginin sarı ve yeşilimsi olmasına, mangan bileşiklerinin ve organik atıkların olması kahverengi olmasına neden olur (Özçay, 2010).

2.6.3. Kiremit üretim prosesi

Kil ocağından kilin getirilmesi

Doğada genellikle sıkışmış halde rutubetli ve plastik bir kıvamda bulunur ve sökülerek kamyonlar vasıtasıyla fabrika hammadde stok sahalarına gönderilir. Tuğla ve kiremit üretiminde kullanılan killer, doğada genellikle rutubetli ve plastik bir kıvamda, bazen kuru ve toz haline getirilebilir bir şekilde, bazen de kaya menşeli olarak bulunur ve çıkarılır. Dolayısıyla doğadan elde edilen ve üretim tesislerine getirilen kil, gerek boyut olarak gerekse bileşim olarak uygun özelliklere sahip olması için bir dizi ön hazırlıktan geçmesi gerekmektedir (Özçay, 2010).

Hammaddenin işlenebilirlik özelliği kazanabilmesi için, önce öğütme işlemi yapılmaktadır.

Hammaddenin homojen bir malzeme olması, plastiklik ve kohezyon özelliklerinin gerçekleştirilmesi için iyice ufalanması ve ince partiküller halini alması gerekmektedir. Bu amaçla çeşitli makinelerle içindeki iri taşlar, çöpler ayıklanmakta (taş ayırıcı, vals, kollergang vb.) ve istenilen tane çapına kadar öğütülmektedir (Özçay, 2010).

Hammadde hazırlama

Toprak besleyiciler yardımı ile kolergan ezme ve hammaddeye su verme işlemi yapılır. Homojen bir kil hamuru elde etmek için, kilin yeterli miktarda su ile birlikte ezilmesi ve karıştırılması gerekmektedir. Kile azar azar su ilave edildiğinde plastikliği bir miktar artmaktadır (Özçay, 2010).

Su ilavesi öğütme öncesinde yapılabildiği gibi, öğütme sonrasında da yapılmaktadır. Dinlendirme, hammadde hazırlama aşamalarının en önemlisidir. Üretilen malzemenin kalitesini etkileyen çok önemli bir unsurdur. Killerin tiksotropik özellikleri dolayısıyla yoğurulmuş çamur dinlenme esnasında direnç kazanmaktadır. Dinlendirme işlemi öğütme işlemlerinden önce veya sonra yapılmaktadır. (Özçay, 2010).

Şekillendirme

Hammadde hazırlama aşaması sonunda Şekillendirilmeye uygun bir nitelik kazanan hamur, değişik yöntemler kullanılarak şekillendirilmekte ve değişik biçim ve boyutlarda yarı mamül tuğla-kiremit elde edilmektedir. Şekillendirmede genellikle kalıplama, presleme ve extrude yöntemleri kullanılmaktadır. Kalıplama, genellikle harman tuğlası üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Presleme, daha çok kiremit üretiminde kullanılır. Extruderden galeta olarak hazırlanan hammaddeler çeşitli tip ve büyüklükteki presler ile kiremit şeklini almaktadır. Extrude (vakumlama) yönteminde, hazırlanan kil sonsuz vida yardımı ve belli bir basınçla kalıptan çıkartılmaktadır. Bu yöntemde extruder (vakum pres) makinasına gönderilen hazırlanmış hammaddenin vakum yöntemi ile havası emilmekte ve plastik hale gelmektedir. Helezonlar vasıtası ile itilen hammadde vakum presin ağız kısmındaki ağızlık (filiyer) vasıtası ile iki boyutunun şeklini almakta ve sonsuz bant olarak vakum presi terk etmektedir. Sonra ince tellerle kesilen malzeme üçüncü boyutu da alarak kurumaya terkedilmektedir (Özçay, 2010).

Kurutma

Kurutma, kil içinde mevcut ve şekillendirmeye uygun bir kıvama getirmek için katılan suyun değişik yöntemlerle bünyeden çıkarılma işlemidir. Kurutma işleminde doğal kurutma ve suni kurutma olarak iki yöntem kullanılmaktadır. Doğal kurutma; ülkemizde çok yoğun olarak kullanılan ve atmosferdeki ısı enerjisinden faydalanma prensibine dayanan bir sistemdir. Extruder'den yaş olarak çıkan mamüller genellikle kurutma sehpalarna belli bir düzenle dizilmekte, bu sehpalara geniş kapalı alanlara (saya) ya da açık alanlara konarak kurumaya terkedilmektedirler. Bu kurutma yöntemi kurutma işleminde ek bir enerji gerektirmediği için ekonomik görünmektedir. Fakat kurutma işlemi için geniş alanlara ihtiyaç duyulması, kurutmanın çok ağır ve uzun sürede yapılabilmesi, kontrolün yeterli olamaması, kurutmanın hava şartlarına (ısı, rutubet, rüzgâr vs.) bağlı olması,

işçiliğin fazla oluşu sakıncalarını oluşturmaktadır. Suni kurutma; kurutmayı doğal koşullara bırakmadan ek bir enerji sağlanarak ısıнын ve hava hareketinin fazlaştırılmasıyla yapmaktır. Killi maddenin içindeki serbest suyun, önce yüksek buhar basıncı ve az sıcaklık, kurutmanın sonuna doğru alçak buhar basıncı ve yüksek sıcaklık sağlanarak dışarı atılması prensibine dayanır. Bu uygulama kurutma odaları veya tünel kurutma fırınları kullanılarak yapılmaktadır (Özçay, 2010).

Piştirme

Piştirme, tuğla ve kiremit üretimindeki en son aşamadır. Kilin kuruma aşamasında, serbest haldeki suyunu ve sonradan emdiği suyu kaybetmesinden dolayı boyutlarında küçülme olur. Piştirme sırasında kil kimyasal reaksiyonlara maruz kalır. 300 °C civarında organik maddeler tamamen yanar, 450-650°C arasında molekül suyunu kaybeder. 850-950°C arasında kil hamurunun pişmesiyle oluşan bu yeni malzeme artık sert, şeklini değiştirmeyen, belirli mukavemet ve renge sahip bir üründür (Özçay, 2010).

Türkiye’de en yoğun kullanılan fırın tipi hoffman fırın’lardır. Daha sonraki yoğunluğu tünel fırınlar oluşturmaktadır. 20 civarında da hoffman-tünel fırın karışımı olan kemer tünel fırın vardır. Hoffman fırınının, kesiti dairesel tonoz biçimindedir. Ateş hareketli, ürünler sabittir. Bu fırın yakıttan elde edilen ısıyı çok yüksek verimle kullanan ve üretim kapasitesi ve hızı yüksek olan bir fırındır. Yanmanın tam pişme durumundaki malzemenin üzerinde olması, fırın içinde hareket eden havanın bir yandan pişmiş malzeme ile temas ederek ısınması, ısınmış havadan çiğ malzemenin ısınması için yararlanılması bu fırının en önemli üstünlükleridir. Fırının üstündeki deliklerden yakıt püskürtülmekte, pişme safhası ilerledikçe püskürtme işlemi delikler boyunca ilerlemektedir. Yakıt olarak genelde kömür vb. katı yakıtlar, nadiren sıvı yakıtlar kullanılmaktadır. Hoffman fırınlarda, enerji kullanımı tünel fırınlara göre daha fazladır, emek-yoğun bir yapılanma gerektirdiği için maliyet yüksektir. Tünel fırında, ana prensip olarak ürünler hareketli iken ateş sabittir. Uzun bir tünel ve içinde hareketli fırın vagonları vardır. Yarı mamul ürünler fırın vagonlarına fırının dışında istif edilmekte ve birbiri ardına vagonlar belli bir hızda, fırının içinde hareket etmektedir. Fırın içinde hareket eden ürünler ısısı gitgide artan, rutubeti azalan bir hava ortamı ile karşılaşmaktadır. Bu bölge ısınma bölgesidir. Orta bölümde pişme bölgesi (cehennemlik) vardır. Burada pişen ürün ilerlemeye devam ederek daha önce pişmiş olan malzemenin üzerinden geçerek malzemeyi soğutmuş olan ve kendisi ısınan hava ile temas

ettikçe giderek soğumaya başlamaktadır. Daha sonra fırın dışına çıkan ürünler fırın vagonları üzerinden alınmaktadır (Özçay, 2010).

Pişirme bölgesinde genel olarak sıvı yakıt kullanılmakta, bazen katı yakıtlı sistemlerde yapılabilmektedir. Tünel fırınlar, ürün kalitesi yüksek, yakıt ve emek tasarrufu sağlayan, fabrikasyon süresi kısa sistemlerdir. Ancak, ilk yatırım ve bakım maliyetleri çok yüksektir. Fırın debisi çok sık değiştirilememektedir (Özçay, 2010).

Kalite kontrol, paketlenme ve depolama

Pişirme fırınlarından çıkan ürünler soğuma sonrası istenilen yere sevk edilmektedir. Sevk işleminde genel olarak kamyonlar kullanılmakta fırın veya fırın vagonu önüne yanaşan araca ürün direkt olarak yüklenmektedir. Bazı fabrikalarda ürünler palet üstüne ve sonrasında naylon ile ambalaj yapılarak veya mukavva kutulara konularak sevk edilmektedir (Özçay, 2010).

2.6.4. Türkiye’de tuğla ve kiremit üretimi

Ülkemizde tuğla-kiremit sektöründe son on yılı saymazsak teknolojik açıdan çok büyük bir atılım olmadığı görülmektedir. Özellikle 1986 yılından sonra konut sektöründeki kooperatifleşme ve kredilendirme süreci içinde fabrika sayısı artmış fakat sektöre yapılan yatırımlarda eski emek-yoğun teknolojiler kullanılmıştır. Bu istihdam açısından olumlu olmakla birlikte, kalite ne yazık ki fabrikaların projelendirme safhasında geri planda tutulmuştur. Kalitesiz üretimlerin yapılması bu dönemde sektörde yer edinmiş ve kaliteli standartlara uygun mal üreten fabrikaların rekabet şartlarını zorlamıştır. Bu oluşum günümüzde de devam etmektedir. 1997 yılından sonra inşaat sektöründe gitgide artan durgunluk öz sermayesi kısıtlı olan fabrikaların birer birer kapanmasına yol açmış atıl tesisler oluşmuş ve sektörel işsizlik gitgide artmıştır. Ülke çapında fabrika sayılarına bakarsak özellikle hammaddenin kaliteli olduğu bölgelerde yoğunlaşmış olduğunu görürüz. Tuğla kiremit sanayi, hammaddesi kil olan ve üretimlerinin tamamını inşaat sektörü için üreten bir oluşumdur. Türkiye’de kiremit sanayi üretim yapısı itibariyle ülkenin dört bir tarafına dağılmış, çok sayıda üreticisi olan bir konumdadır. Yaklaşık 520 fabrikanın bulunduğu ülkemizde otomatik ve tünel fırınlı fabrikalar ne yazık ki azınlıkta kalmaktadır. Teknolojik yenilemeye ve kalite artırımına yönelik yatırımlara acilen ihtiyacı

olan sektörün yerini alması direkt ve endirekt olarak ele alındığında karşımıza 1 milyon insan çıkmaktadır (Özçay, 2010).

Bu durum göz önünde bulundurulursa sektörün katma değer ve istihdam yaratmadaki gücü bir kez daha kanıtlanmış olur. Üretim, hammadde alanlarına da bağlı olarak belli bölgelerde yoğunlaşmış fabrikalarda yapılmaktadır. Bu fabrikaların tamamı ülke ihtiyacını karşılamakta olup sınırlı üretim ihraç edilebilmektedir. İç piyasada; ekonomik olması, yurdun her yerinde kolayca bulunabilmesi, yapım ekiplerinin malzemeyi tanımaları ve detaylarını bilmeleri, doğal olması, özellikle de dayanım süresinin diğer malzemelere göre uzun olması gibi nedenlerle tuğla- kiremit ürünleri yoğun talep görmektedir. Tuğla-kiremit ürünleri ülkemizde şu anda sınırlı miktarda ihraç imkânı bulmaktadır. Önümüzdeki dönemlerde teknolojik yatırımların artması, kalitenin yükselmesine neden olacaktır. Ayrıca Avrupa Norm'larının (EN) devreye girecek olmasını ürün kalitesinin daha da yükselmesini sağlayacaktır. Bu durum sektörün daha bilinçli, kaliteli çalışmasının ana şartıdır. Hammadde kalitesi açısından ülkemiz sonsuz imkânlarla sahip durumdadır. Gerekli şartların oluşturulması neticesinde Türkiye tuğla-kiremit sanayicileri Avrupa'nın her noktasına ürünlerini gönderebilecektir (Özçay, 2010).

Ülkemizdeki tuğla ve kiremit üreticileri Avrupa Birliği'ne girme sürecinde olduğumuz şu günlerde zaman geçirmeden hızlı bir şekilde modernizasyona giderek kendilerini ve teknolojilerini yenilemeleri zorunludur. Gayet bunu sağlayamazlarsa dünya piyasalarında ürün satma ve rekabet etme şansları olmayacaktır (Özçay, 2010).

Tuğla Tozu

Tuğla tozu, tuğla fabrikalarında pişmiş olan tuğlaların nakliye veya taşıma sırasında veya inşaatlarda kırılması sonucu kullanılamaz hale gelen atık tuğlaların öğütülmeleri ile elde edilen ve harç ve beton üretiminde kullanılan silis esaslı mineral bir katkıdır. Tuğla tozunun mikro yapısı incelendiğinde yüzeyinin kireçtaşı tozuna benzer şekilde köşeli ve pürüzlü bir yapıda olduğu görülür Bu da tuğla tozunun su gereksinimini artırır. Tuğla tozu ise yüksek silis içeriği sayesinde kalsiyum silika hidrat (C-S-H) oluşumunu sağlayarak hidrasyon reaksiyonunu hızlandırır. Erken dayanımın artmasına özellikle katkı sağlar. Bunların yanında tuğla tozu, pişmiş kil içeren bir malzemedir ve su emme değeri yüksektir (Özçay, 2010).

2.7. Yüksek Sıcaklık

Yapılarda dayanıklılık problemine yol açan başlıca fiziksel etkilere biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003). Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona betonarme yapılara ve harçlara etkisi 1922' den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000).

Ülkemizde yangın olayları sık yaşanmakta, yapılar ve yapı elemanları doğrudan olduğu gibi dolaylı olarak da yüksek sıcaklıktan etkilenmektedir. Literatürde yapı elemanlarını oluşturan beton, betonarme ve harçların yüksek sıcaklık etkisi karşısındaki dayanıklılıkları konusunda çalışmalar bulunmaktadır.

2.7.1. Yüksek sıcaklık kaynakları

Yapıya ve malzemeye zarar veren, hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları, yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünmenin neden olduğu ısınma ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir (Gölce, 2009). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

Yangın

Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Mahsanlar, 2006).

Yüksek sıcaklığa neden olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma

fazları tüm parlama öncesi, ısınma ve soğuma fazları ise tüm parlama sonrası fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer, 1994).

Endüstri fırın bacaları

Endüstri fırın bacalarında sıcaklığın 1250-1300 °C ye ulaştığı bilinmektedir. Günümüzde bacalardaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için ısı esanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak sıcaklık yaklaşık 200 °C' ye kadar düşürülebilmektedir (Avcı 1984).

Hava alanı pistleri

Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196 °C deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de hava alanının işlevleri kısıtlanır (Ramakrishnan, 1991).

Nükleer Reaktörler

Nükleer reaktörlerde, sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı ve nötron ve gama ışınlarının baskısı ile oluşan sıcaklık nedeniyle, reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez ancak beton sıcaklık nedeniyle daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisi azalır. Hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji, koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde salıverilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkiler. Sodyum yakma havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400 °C'de başlar ve yarım saat sonra sıcaklık 800 °C'den daha yüksek bir değere ulaşır (Sakr ve EL-Hakim, 2005).

2.4.2. Yüksek sıcaklık etkisi

Birçok yapı ve inşaatlarda potansiyel risklerden biri de yangın kalıntılarıdır. Yapılarda beton oldukça fazla kullanılan bir yapı malzemesi olduğu için, beraberinde betonda yangın

etkisini araştırma talebini de doğurmuştur. Ancak yapı elemanlarında yangın etkisini benzetmek oldukça zordur. Çünkü betonlar yangın sırasında karmaşık, yüksek, geçici sıcaklık etkisinde kaldıklarından dolayı gerçek yangınların şiddetinin ve davranışının tahmin edilmesi güçtür.

Yangın koşullarının belirtildiği değişik ülke standartları vardır. Bunlardan birisi betonda yangın etkisini araştıran çalışmalar için deney koşulları standardıdır. Yangın, betonda artan yüksek sıcaklık deneylerindeki belli bir noktaya kadar benzerlik göstermektedir.

Yapılan çalışmalar da, deneysel çalışmaların artan sıcaklık koşullarında yapıldığını göstermektedir. Her ne kadar bu koşullar standart yangın koşullarından farklıda olsa, bu araştırmalar betonda yangın etkisinin önemli bir kısmının anlaşılmasını sağlayabilmiştir. Bu nedenle, betonda yangın etkisinden daha çok yüksek sıcaklık etkisi çalışmaları yapılmış ve sonuçları yorumlanmıştır (Özbey, 2007).



3. MALZEME VE YÖNTEMLER

3.1. Malzemeler

Deneysel çalışmada; PÇ CEM I 42.5 R Portland çimentosu, tuğla tozu, atık mermer tozu, silis dumanı, uçucu kül ve CEN standart kumu kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmada harç karışımlarında PÇ CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. PÇ 42.5 kontrol çimentosunun TS EN 196-2 Çimento deney metotları-Bölüm 2: Çimentonun kimyasal analizi (TS EN 197-2, 2010), TS EN 196-3 Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini (TS EN 196-3, 2012), TS EN 196-6 Çimento deney metotları-Bölüm 6: İncelik Tayini (TS EN 196-6, 2010) ve TS EN 196-1 Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini (TS EN 196-1, 2009) standartlarına göre belirlenen fiziksel, kimyasal ve mekanik deney sonuçları fabrika raporlarından alınmış ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42,5 R çimentosunun özellikleri

Analiz	Oksit	Değer	Analiz	Deneyler	Değer
Kimyasal, %	SiO ₂	20,41	Fiziksel	Özgül yüzey, cm ² /g	3320
	Al ₂ O ₃	5,35		Hacim genleşme, mm	1,2
	Fe ₂ O ₃	3,3		Su ihtiyacı, gr	28,5
	CaO	63,5		Priz başlama süresi, dk	163
	MgO	1,65		Priz bitiş süresi, dk	240
	SO ₃	2,93		Yoğunluk, g/cm ³	3,16
	Na ₂ O ₃	0,15	Mekanik	Gün	MPa
	K ₂	0,71		3.gün	28,2
	Cl	0,011		7.gün	42,7
	HCl	0,28		28.gün	51,4

3.1.2. Silis dumanı

Deneysel çalışmalarda katkı malzemesi olarak SD kullanılmıştır. SD, Antalya’da üretim yapan Etibank Elektrometalurji Sanayi İşletmesi’nden temin edilmiştir. Deneylerde kullanılan SD üzerinde herhangi bir işlem yapılmamıştır. SD’nin özgül yüzeyi BET metodu ile belirlenmiştir. SD’ ye ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. SD'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Analiz	Oksit	SD	Fiziksel özellikler	
Kimyasal, %	SiO ₂	94,62	Özellik	SD
	Al ₂ O ₃	0,20	Özgül yüzey (cm ² /g)	20000
	Fe ₂ O ₃	0,20	Yoğunluk (g/cm ³)	2,36
	CaO	1,40	40 µm üstü kalan (%)	-
	MgO	-	90 µm üstü kalan (%)	-
	SO ₃	0,21		
	Na ₂ O	-		
	K ₂ O	-		
	K.K	-		

3.1.3. Uçucu kül

Deneysel çalışmada uçucu kül Seyit Ömer Termik Santrallerinden temin edilmiştir. Çizelge 3.3'de UK'nın kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.3. UK'nın kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Analiz	Oksit	UK	Fiziksel özellikler	
Kimyasal, %	SiO ₂	52,31	Özellik	UK
	Al ₂ O ₃	16,49	Özgül yüzey (cm ² /g)	4800
	Fe ₂ O ₃	12,38	Yoğunluk (g/cm ³)	2,05
	CaO	5,72	40 µm üstü kalan (%)	35
	MgO	5,01	90 µm üstü kalan (%)	7
	SO ₃	1,16		
	Na ₂ O	0,51		
	K ₂ O	2,27		
	K.K	1,13		

3.1.4. Atık mermer tozu

Deneysel çalışmada Afyon Çavdarlar Mermer Fabrikası'ndan temin edilen atık mermer tozu kullanılmıştır. Çizelge 3.4'de MT'nin kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4. MT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Analiz	Oksit	MT	Fiziksel özellikler	
Kimyasal, %	SiO ₂	1,92	Özellik	MT
	Al ₂ O ₃	0,38	Özgöl yüzey (cm ² /g)	-
	Fe ₂ O ₃	0,03	Yoğunluk (g/cm ³)	2,72
	CaO	54,34	40 µm üstü kalan (%)	51,23
	MgO	0,39	90 µm üstü kalan (%)	32,35
	SO ₃	0,08		
	Na ₂ O	0,18		
	K ₂ O	0,05		
	K.K	42,80		

3.1.5. Tuğla tozu

Deneysel çalışmada tuğla tozu Ankara Ahlatlıbel Öztuğsan Özgürler Toprak Sanayi A.Ş' den temin edilmiştir. Tuğla parçaları yaklaşık olarak çimento inceliğine gelene kadar öğütülmüştür. Çizelge 3.5'de TT' nin kimyasal kompozisyonu ve bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. TT'nin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Analiz	Oksit	TT	Fiziksel özellikler	
Kimyasal, %	SiO ₂	60,57	Özellik	TT
	Al ₂ O ₃	17,23	Özgöl yüzey (cm ² /g)	4724
	Fe ₂ O ₃	9,28	Yoğunluk (g/cm ³)	2,75
	CaO	3,76	40 µm üstü kalan (%)	52,22
	MgO	2,98	90 µm üstü kalan (%)	34,20
	SO ₃	0,09		
	Na ₂ O	1,47		
	K ₂ O	3,16		
	K.K	1,46		

3.1.6. Standart CEN kumu

Deneysel çalışmada harç örneklerinin hazırlanmasında; Limak Ankara Çimento Fabrikası üretimi olan TS EN 196-1 Rilem-Cembureau Pınarhisar standart kumu kullanılmıştır (TS EN 196-1, 2009). Bu kullanılan standart CEN kumunun özellikleri Çizelge 3.6'da görülmektedir.

Çizelge 3.6. Standart CEN kumu özellikleri

Analiz	Oksit	CEN kumu	Elek Göz Açıklığı (mm)	Kalan (mm)
Kimyasal, %	SiO ₂	93,05	2	-
	Al ₂ O ₃	3,11	1,6	5,23
	Fe ₂ O ₃	0,37	1	33,02
	CaO	0,17	0,5	65,74
	MgO	0,03	0,16	86,21
	SO ₃	0,07	0,08	99,12
	Na ₂ O	1,10	Nem	0,11
	K ₂ O	1,50		
	K.K	0,57		

3.1.7. Karışım suyu

Harç karışımlarında çimentoya zararlı olabilecek organik madde ve madensel tuzları ihtiva etmeyen Kastamonu şehir içme suyu kullanılmıştır. Karışım suyunun kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Kastamonu şehir içme suyunun kimyasal özellikleri

Parametre	Analiz Sonucu	TS266 göre izin verilebilir değer	Sağ. Bak. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Yönetmelik Değerleri
Bulanıklık (NTU birimi)	0,45	5	1,0
Koku	Yok	yok	yok
Bakiye Klor (mg/l)	0,7		uç noktada 0,5
İletkenlik γ =(25°C,mS/m)	28,8	250	250
Amonyum(mg/l)	< 0,08	0,5	0,5
Nitrit(mg/l)	< 0,005	0,5	0,1
Sülfat(mg/l)	43	250	250
Demir (µg/l)	32	200	200
Alüminyum (µg/l)	80	200	200
Bakteri sayısı	100 cc deki toplam koliform bakteri sayısı		100 cc deki toplam E-coli bakteri sayısı
	0,0		0,0

3.1.8. İstatistikî yöntemler

Bu deneysel çalışmada hipotez testlerinde en yaygın olarak kullanılan yöntem olan “t testi” kullanılmıştır. Test eğilme ve basınç dayanım değerleri ile harç örneklerine uygulanan beş farklı sıcaklık seviyesinde (20, 150, 300, 700, 900 °C), zaman faktörünün üç seviyesi (7, 28 ve 90 gün) ve havada soğutma faktörü ile 7 tip olarak hazırlanan harç örnekleri olarak ele alınarak değerlendirilmiştir. Zaman ve sıcaklık ortalamaları arasındaki farkın belirlenmesinde “t testi” ile birbirinden bağımsız iki grubun ortalamaları karşılaştırılarak,

aradaki farkın rastlantısal mı, yoksa istatistiksel olarak anlamlı mı olduğuna karar verilmiştir.

3.2. Metot

Numunelerin kimyasal analizi ve çimentolar ile ilgili deneyler Limak Ankara Çimento Fabrikası'nda, harç deneyleri DSİ 23. Bölge Müdürlüğü Kastamonu Laboratuvarı ve Kastamonu Tek Beton santralinde yapılmıştır.

3.2.1. Harçların su ihtiyacı

Bu deneysel çalışmada harç çubukların su ihtiyacı, su/bağlayıcı oranı 0,5 olarak alınarak ve agrega miktarı 1350 ± 5 g aralığında sabit tutulan prizmatik harç örnekleri üretilmiştir. Taze harç işlenebilirliği, TS EN 1015-3'e uygun olarak yayılma tablası ile tespit edilmiştir.

Bu deneysel çalışmadaki harç numuneleri üzerinde puzolanik aktivite deneyi TS 25'e göre, TS EN 197-1'de tanımlanan standart kum kullanılarak yapılmıştır. Standart kum ve su karıştırılarak elde edilen ve standarda uygun koşullarda saklanan 40x40x160 mm boyutundaki harç numunelerde 7. günde TS EN 196-1'e göre eğilme deneyi ve kırılan parçalarda basınç deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda Tablo 3' de görüldüğü gibi eğilme dayanımları 1N/mm²'den, basınç dayanımları 4N/mm²'den büyük çıkmıştır. Bu fark atık malzemelerin puzolanik özelliğe sahip olduğunu göstermiştir.

3.2.2. Deneylerde kullanılan çimentoların üretilmesi ve örneklerin kodlanması

Deneysel çalışmanın ilk bölümünü; PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimentoların üretiminde kullanılan PÇ 42.5, TT, MT, SD ve UK'nın kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özelliklerinin tespit edilmesi oluşturmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde harçların üretimi TS EN 196-1 "Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım" standardına uygun olarak 40x40x160 mm boyutlarında üçlü çelik harç kalıpları kullanılarak yapılmıştır. CEN standart kumu ile hazırlanan 7 tip (PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT) harç örnekleri dört farklı sıcaklık (150, 300, 700, 900 °C) seviyesine maruz bırakılmış olup, 20°C referans değerimiz olduğundan yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamıştır. Harç örnekleri toplamda 750 kalıp olarak 40x40x160 mm

boyutlarında harç prizması şeklinde üretilmiştir. Üretimden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan örnekler deneylerin yapılacağı 7, 28 ve 90. deney gününe kadar $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ' de %95 bağıl neme sahip laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Deneylerde kullanılacak karışım oranları harç çeşitlerine bağlı olarak, akma oranı değerleri de dikkate alınarak belirlenmiş ve karışım hesapları yapılmıştır.

Bağlayıcısı çimento olan harç örneği PÇ 42.5; bağlayıcısı çimento ve %5, 10, 15, 20 oranında tuğla tozu olan harç örnekleri TT5, TT10, TT15, TT20; bağlayıcısı çimento ve %5, 10, 15, 20 oranında mermer tozu olan harç örnekleri MT5, MT10, MT15, MT20; bağlayıcısı çimento ve %5, 10, 15, 20 oranında silis dumanı olan harç örnekleri SD5, SD10, SD15, SD20; bağlayıcısı çimento ve %5, 10, 15, 20 oranında uçucu kül olan harç örnekleri UK5, UK10, UK15, UK20; bağlayıcısı çimento ve % 2.5, 5, 7.5, 10 oranında silis dumanı ile tuğla tozu olan harç örnekleri SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20; bağlayıcısı çimento ve %2.5, 5, 7.5, 10 oranında silis dumanı ile mermer tozu olan harç örnekleri SDMT5, SDMT10, SDMT15, SDMT20 olarak adlandırılmıştır. Çizelge 3.8' de üretilen örneklerin kodlanması ve malzeme karışım oranları gösterilmiştir.

Harç örnekleri 150, 300, 700, 900 °C olmak üzere dört sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Harçların soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da her bir harç örneği için belirlenen deney çalışma planı açıklanmıştır.

Çizelge 3.8. Üretilen çimento tiplerinin karışım oranları

Çimento tipi	Çimento (%)	TT %	MT %	SD %	UK %	Toplam %
PÇ 42.5	100	-	-	-	-	100
TT5	95	5	-	-	-	100
TT10	90	10	-	-	-	100
TT15	85	15	-	-	-	100
TT20	80	20	-	-	-	100
MT5	95	-	5	-	-	100
MT10	90	-	10	-	-	100
MT15	85	-	15	-	-	100
MT20	80	-	20	-	-	100
SD5	95	-	-	5	-	100
SD10	90	-	-	10	-	100
SD15	85	-	-	15	-	100
SD20	80	-	-	20	-	100
UK5	95	-	-	-	5	100
UK10	90	-	-	-	10	100
UK15	85	-	-	-	15	100
UK20	80	-	-	-	20	100
SDTT5	95	2,5	-	2,5	-	100
SDTT10	90	5	-	5	-	100
SDTT15	85	7,5	-	7,5	-	100
SDTT20	80	10	-	10	-	100
SDMT5	90	-	2,5	2,5	-	100
SDMT10	90	-	5	5	-	100
SDMT15	85	-	7,5	7,5	-	100
SDMT20	80	-	10	10	-	100

Çizelge 3.9. Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan harç örnekleri

Eğilme dayanımı deneyine tabi tutulan örnek sayıları																												
Koşullar	Gün	7									28									90								
	Soğutma uyg.	20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda			
	Yüksek sic. uyg. °C		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900
Harç tipi	PÇ 42.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	TT5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	TT10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	TT15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	TT20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	MT5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	MT10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	MT15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	MT20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SD5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SD10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SD15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SD20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	UK5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	UK10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	UK15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	UK20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDTT5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDTT10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDTT15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDTT20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDMT5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDMT10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDMT15	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	SDMT20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	

Çizelge 3.10. Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan harç örnekleri

Basınç dayanımı deneyine tabi tutulan örnek sayıları																												
Koşullar	Gün	7									28									90								
	Soğutma uyg.	20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda			
	Yüksek sıc. uyg. °C		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900
Harç tipi	PÇ 42.5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	TT5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	TT10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	TT15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	TT20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	MT5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	MT10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	MT15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	MT20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SD5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SD10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SD15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SD20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	UK5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	UK10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	UK15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	UK20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDTT5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDTT10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDTT15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDTT20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDMT5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDMT10	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDMT15	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	SDMT20	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	

3.2.3. Deneylerde kullanılan çimentolara ait fiziksel deneyler

Priz süresi tayini deneyi

Priz başlangıcı ve sona erme süreleri, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini” standardına göre yapılmıştır. Vicat aleti üzerinde takılı olan özel kâğıda çimento hamurunun priz başlangıcı ve priz sonu kayıt edilmiştir. Standart kıvam tayininde kullanılan çimento hamurları, priz sürelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Vicat halkası, otomatik Vicat aletine konulmuş ve Vicat aletinin iğnesi temizlenerek her beş dakikada bir çimento hamuruna batacak şekilde ayarlanmıştır. Daha sonra deney sonucunun daha doğru olabilmesi için iğnenin her batışından sonra iğne bir bez yardımı ile temizlenmiştir. Burada çimento hamuruna batan iğnenin, cam levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı ana kadar geçen süre, priz başlangıcını vermektedir. Priz başlangıcından sonra her 5 dakikada iğnenin hamura batması devam etmiş ve iğnenin en çok çimento hamuruna 1 mm girdiği an, priz sona erme süresi olarak tespit edilmiştir. Otomatik Vicat aletinde iğnenin her batışı, halkanın değişik yerlerine olmuş ve dıştan içe doğru çapı küçülen spiral bir şekilde batma işlemi devam etmiştir. Deneyler sonunda tespit edilen priz başlangıç ve sona erme süreleri Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çimento incelik tayini deneyi

Çimento incelik tayini deneyi, TS EN 196-6 standardına göre yapılmıştır. Deneyde emiş kapasitesi 12500 Pa olan Alpine marka incelik ölçüm cihazı (hava basıncı ile otomatik emme sistemi) kullanılmıştır. 105 °C $\pm$ 2 °C’de kurutulmuş çimento numuneleri, 0,1 g duyarlılıkta Sartorius Basic marka elektronik terazide 20 g tartılarak alınmıştır. 20 g’lık numuneler, ayrı ayrı 40 μ m ve 90 μ m eleklerde 2500 Pa emiş gücü ile 3 dk emiş gücü uygulanmıştır. Eleme işlemi sonunda, elekler üzerinde kalan miktarlar her seferinde tartılarak kaydedilmiştir. Elek üzerinde kalanlar, bir sonraki elek üzerine aktararak işleme devam edilmiş ve numunelerin tane büyüklükleri tespit edilmiştir. Deney PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT çimento tipleri için ayrı ayrı, yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Yoğunluk

Çimentoların yoğunluk deneyleri, küçük bir metal tüp içerisine belli bir miktar numune konulmuş ve 0,1 g duyarlıkta elektronik terazide tartılmıştır. Tartılan bu ağırlık bir yere not edilmiştir. Daha sonra numunenin olduğu bu tüp yoğunluk cihazı içerisine konulmuş ve cihazın ağzı sıkıca kapatılmıştır. Deney süresi malzemenin inceliğine göre değişmekte olup yaklaşık 20-30 dk sürmüştür. Cihazdan analiz değeri okunmuş ve cihazdan numune dolu tüp çıkarılarak tekrar tartılmıştır. Gerekli işlemler yapıldıktan sonra numunenin yoğunluk değeri hesaplanmıştır. Yoğunluk tayini deneyi PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT çimento tipleri için ayrı ayrı, yapılmış ve deney sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Özgül yüzey (Blaine) deneyi

Özgül yüzey deneyi, TS EN 196-6 standardındaki tanım ve tariflere uygun olarak yapılmıştır. Blaine cihazı, hava geçirgenliği prensibine dayanarak çimentoların özgül yüzeyini tayin etmek için kullanılan bir cihazdır. Deney numunesi miktarı, TS EN 196-6’da belirtilen hesaplama yöntemi ile belirlenmiş ve etüv kuru çimentolar üzerinde deney gerçekleştirilmiştir.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \left(\frac{\sqrt{e3}}{\sqrt{1-e}} \right) \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1 \times \eta}}$$

Burada;

S = Özgül yüzey (cm²/g)

K= Cihaz sabiti,

e = Yatağın porozitesi,

t = Ölçülen zaman, (s)

p = Çimentonun yoğunluğu (g/cm³)

η = Çizelgeden alınan deney sıcaklığındaki havanın viskozitesi (Pa.s)'dir.

Özgül yüzey (Blaine) deneyi PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı tüm çimento tipleri için ayrı ayrı, yapılmış ve TS EN 196-6'da verilen formül ile hesaplanarak deney sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

3.2.4. Yüksek sıcaklık uygulamaları

Harç örnekleri 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce (24 saat) etüvde ($105\pm5^{\circ}\text{C}$) bekletilmiştir. Etüvde kuru duruma getirilen harç örnekleri yüksek sıcaklık etkisinin belirlenmesi amacıyla fırına yerleştirilmiştir. Isıl işlem safhasında TS EN 1363-1'e göre ısınma hızı $6^{\circ}\text{C}/\text{dak.}$ olan yüksek sıcaklık fırınında 150, 300, 700 ve 900°C sıcaklıklarında 2 saat süreyle yüksek sıcaklık etkisi altında bırakılmıştır. 20°C 'deki referans harç örnekleri yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamıştır.

3.2.5. Soğutma uygulamaları

Yüksek sıcaklık uygulamasında 2 saat süreyle 150, 300, 700 ve 900°C ' lerde bekletilen örneklerden yarısı havada (laboratuvar ortamında, $20^{\circ}\text{C} \pm 2$), diğer yarısı ise yağmurlama (su püskürtme) usulüne göre soğutulmuştur. Harç örneklerine soğuma işleminden sonra eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Havada soğumaya bırakılmış harç örneklerinin soğuma hızının sıcaklık derecesine bağlı olarak yaklaşık 30-180 dk arasında 20°C sıcaklığa gelinceye kadar laboratuvar ortamında bekletilerek ve yağmurlama yöntemi ile yapılan soğutma işleminde ise harç örnekleri sıcaklık derecesine bağlı olarak yaklaşık 20-80 dk arasında 20°C sıcaklığa gelinceye kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

3.2.6. Harç deneyleri

Eğilmede çekme dayanım deneyi

Örneklerin 7, 28 ve 90. günlerde eğilmede çekme dayanımını belirlemek üzere her harç tipi için 3 deney örneği kırılmıştır. Eğilmede çekme deneyinde $40\times 40\times 160$ mm boyutlu prizma biçimindeki örnekler, açıklığı 100 mm olan iki mesnet üzerine yan yüzlerden biri mesnetler üzerine oturacak şekilde yerleştirilmiş ve açıklığın tam ortasından numunenin bütün genişliği boyunca etkileyen, hızı 50 ± 10 N/s olacak şekilde uygulanarak P kırma yükü (MPa) belirlenmiştir. 7 tip (PÇ 42.5 ile TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT) katkılı

Çimento harıların 7, 28 ve 90. gün yaşlarındaki eğilme dayanımı deney sonuçları, 3 deney rneği elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları izelge 4.2’de verilmiştir.

Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi, 2400 ± 200 N/s yükleme hızı ile TS EN 196-1’de “imento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım” belirtilen esaslara göre gerçekleştirilmiştir. Deney, eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulanarak ortadan ikiye bölünen harç prizmaları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 7, 28 ve 90. günde kırıldıktan sonra 6 adet dayanım değerlerinin aritmetik ortalamaları alınmıştır. Deney sonuçları izelge 4.3’te verilmiştir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

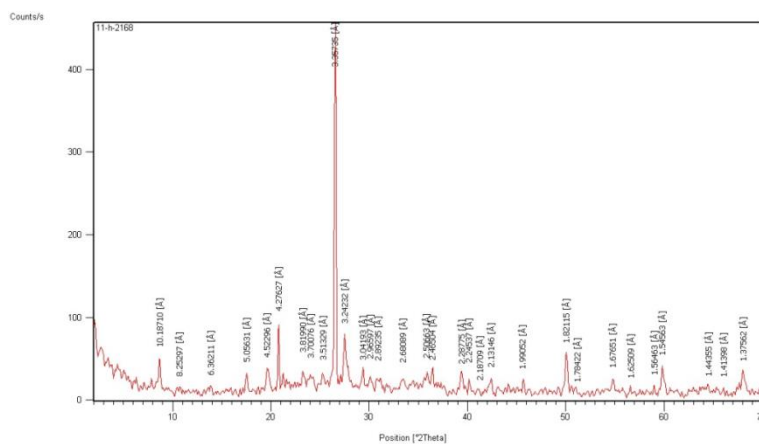
Farklı pozolanik katkı maddeleri ile üretilen harçlarda yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelebilecek kaza anındaki mekanik davranışlarının istatistiksel olarak karşılaştırılmasının araştırıldığı bu çalışmada, elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Deneylerden alınan veriler ile ilgili hesaplamalar yapılmış, bulunan değerler sıcaklık artışına bağlı olarak değerlendirilmiş ve istatistiksel olarak irdelenmiştir.

4.1. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin Kimyasal Kompozisyonları

ASTM C 618'e göre bir pozolanda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının ağırlıkça en az %70, kükürt trioksit (SO_3) değerinin en çok %5 olması öngörülmektedir. Çizelge 3.2'de SD'nin içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının %95.02 olup sınır değerinden çok yüksek olduğu; Çizelge 3.3'te UK'nın içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının %81.18 olup sınır değerinden çok yüksek olduğu; Çizelge 3.4'te MT'nin içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ toplamının % 56.67 olup C sınıfı pozolan bir malzemeye göre sınır değer üstünde olduğu; Çizelge 3.5'te TT'nin içindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının %87.08 olup sınır değerinden çok yüksek olduğu görülmektedir.

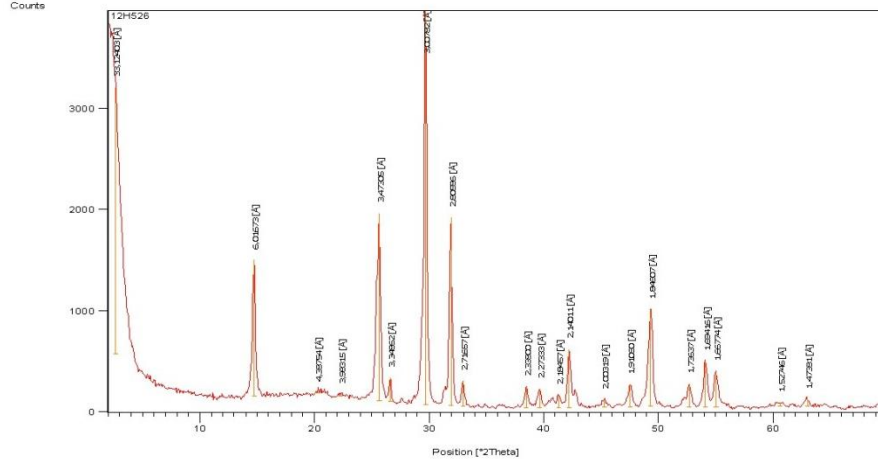
4.2. TT, MT, SD ve UK'nın Mineralojik Özellikleri

TT, MT, SD ve UK'nın X-ışını kırınım eğrileri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.1'de görülen TT'nin XRD kırınım eğrisi incelendiğinde; daha çok hematit, kuvars ve albit mineralleri saptanmıştır.



Şekil 4.1. TT'nin X-ışınları difraktogramı

olması için ince taneli olması, yeterli miktarda silis, alümin ve demir oksit içermesi ve amorf yapıya sahip olması gereklidir (Erdoğan, 2003).



Şekil 4.4. UK'nın X-ışınları kırınım eğrisi

4.3. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT Katkılı Çimentoların Fiziksel Özellikleri

Referans çimentosu PÇ 42.5 ve TT, MT, SD, UK, SDTT, SDMT katkıli çimentolarına ait fiziksel özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkıli çimentoların fiziksel özellikleri

Çimento tipi	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)	40 µm üstü kalan (%)	90 µm üstü kalan (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
PÇ 42.5	155	218	16.7	1.5	3.16	3080
TT5	202	314	10.4	2.3	3.15	2961
TT10	230	346	12.7	4.7	3.20	2845
TT15	260	380	15.1	7.2	3.26	2720
TT20	275	410	17.7	9.7	3.31	2607
MT5	333	420	40.5	18	3.14	2963
MT10	345	408	41.9	18.9	3.12	3120
MT15	320	370	43	19.8	3.11	3395
MT20	300	365	43.8	20.2	3.10	3690
SD5	270	340	7.6	0.3	3.13	3890
SD10	330	390	6.4	0.2	3.14	3900
SD15	380	450	5.2	0.1	3.15	4200
SD20	440	500	4.1	0.1	3.16	4500
UK5	175	190	10	1.5	2.95	3720
UK10	195	227	10.8	1.4	2.86	3800
UK15	215	290	11.2	1.3	2.79	3860
UK20	235	340	11.6	1.2	2.72	3920

Çizelge 4.1 (devam). PÇ 42.5, TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimentoların fiziksel özellikleri

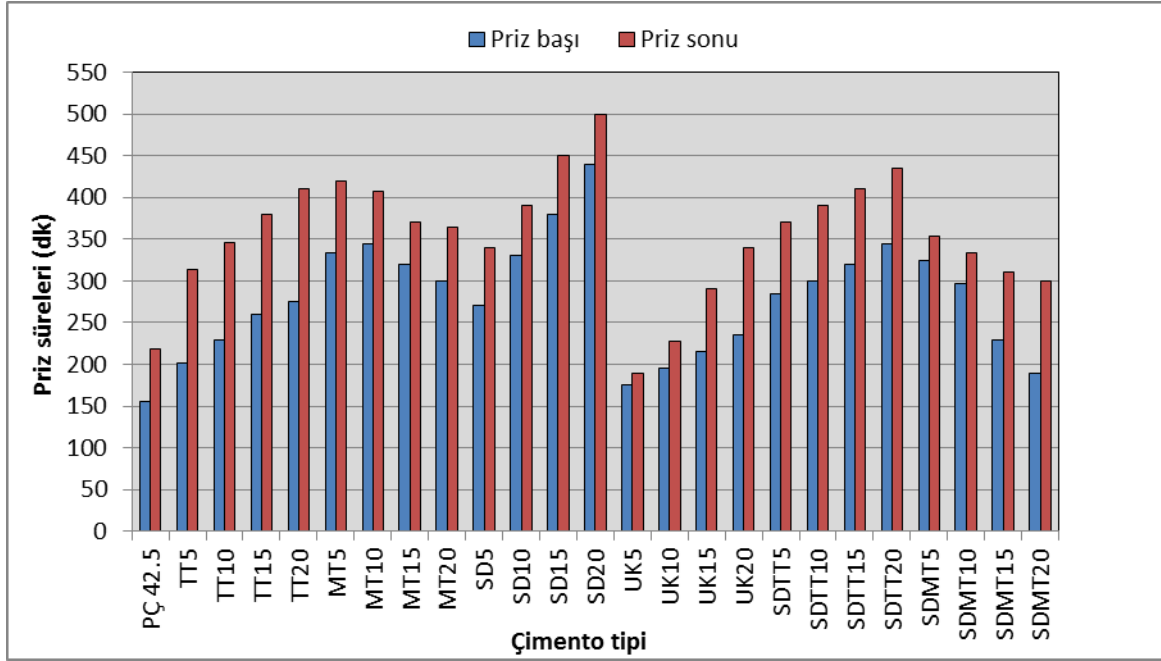
Çimento tipi	Priz başı (dk)	Priz sonu (dk)	40 µm üstü kalan (%)	90 µm üstü kalan (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
SDTT5	285	370	9.8	1.2	3.11	4155
SDTT10	300	390	8.6	0.7	3.06	4400
SDTT15	320	410	7.6	0.5	3.10	4670
SDTT20	345	435	6.5	0.3	3.12	4890
SDMT5	325	353	39.8	16.1	3.10	5440
SDMT10	297	333	41.2	17.9	3.04	8660
SDMT15	230	310	42.7	19.0	2.89	10700
SDMT20	190	300	43.1	20	2.85	10810

4.3.1. Çimentoların priz süresine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi

Çimentoların priz süresi deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile priz süreleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.5'te gösterilmiştir. TS EN 197-1'e göre çimentoların 1 saatten (60 dk) önce prize başlamaması gerekmektedir. Deneye tabi tutulan çimentolar arasında en düşük priz başı değeri referans çimentosu PÇ 42.5'ta, priz sonu değeri ise SD20 çimentosunda elde edilmiştir.

Genel olarak TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimentoların, katkı oranları arttıkça priz başlangıç süreleri referans çimento PÇ 42.5'e göre artmaktadır. Örneğin; PÇ 42.5 referans çimentosunun priz başı 155 dk, priz sonu 218 dk iken; SD5, SD10, SD15 ve SD20 priz başı ve priz sonu süreleri sırasıyla 270:340, 330:390, 380:450, 440:500 dk'dır.

TT, MT, SD, SDTT ve SDMT katkılı çimentoların, katkı oranları arttıkça priz sonu süreleri referans çimento PÇ 42.5'e göre arttığı; ancak UK5 katkılı çimento harcının priz sonu süresi referans çimento PÇ 42.5'e göre düşüktür. Genel olarak Şekil 4.5'te görüldüğü gibi çimento üretiminde kullanılan katkı maddeleri priz sürelerini arttırdığı söylenebilir.



Şekil 4.5. Çimento tipi ile priz değerleri ilişkisi

4.3.2. Çimentoların inceliğine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi

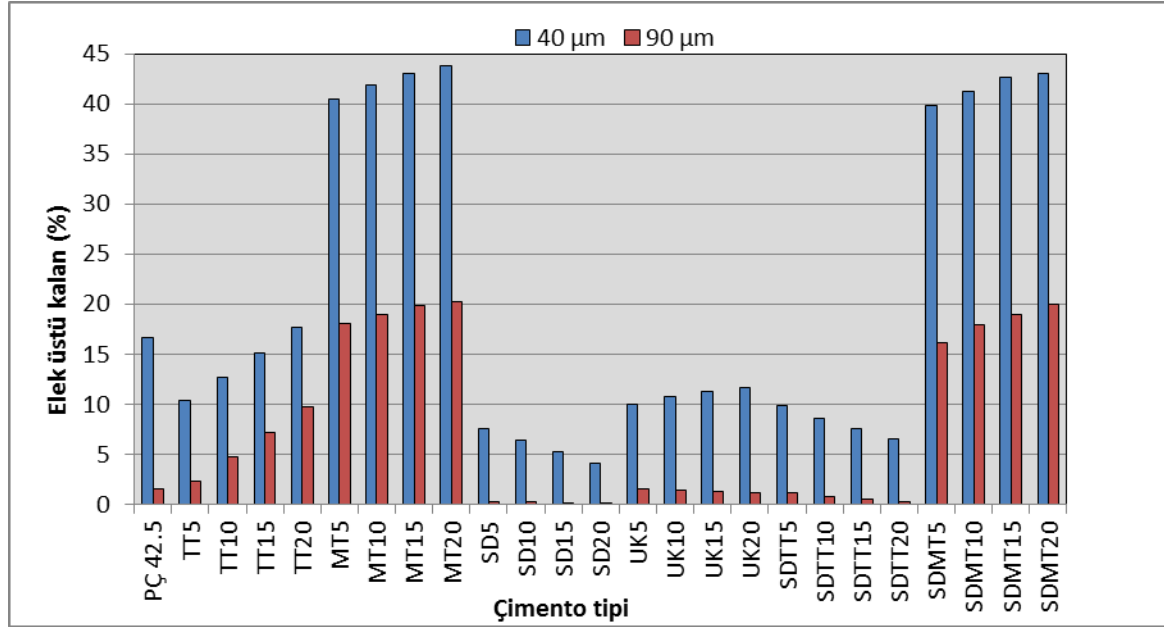
Çimentoların 40 µm ve 90 µm elek üstü kalan deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.6'da gösterilmiştir. TS EN 197-1'de çimentoların 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri ile ilgili olarak herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır.

SD, UK ve SDTT çimentolarının 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri referans çimentosu PÇ 42.5'tan düşük olduğu görülmektedir. Buna neden olarak SD ve UK taneciklerinin çok ince olması gösterilebilir.

MT ve SDMT katkılı çimentoların 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri referans çimentosu PÇ 42.5'tan oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle MT oranı ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri arasında doğru orantı vardır. Örneğin; SDMT5 çimentosunun 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri % 39.8-16.1 iken SDMT20 çimentosunun 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri % 43.1-20 olarak belirlenmiştir.

TT katkılı çimentolardan TT5, TT10 ve TT15'in 40 µm elek üstü değerleri referans çimentosu PÇ 42.5'dan düşük olduğu ancak TT20 çimentosunun ise referans

çimentosundan yüksek olduğu görülmektedir. TT katkılı çimentoların 90 µm elek üstü değerleri referans çimentosu PÇ 42.5'ten yüksek olduğu Çizelge 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.6. Çimento tipi ile 40 µm ve 90 µm elek üstü değerleri ilişkisi

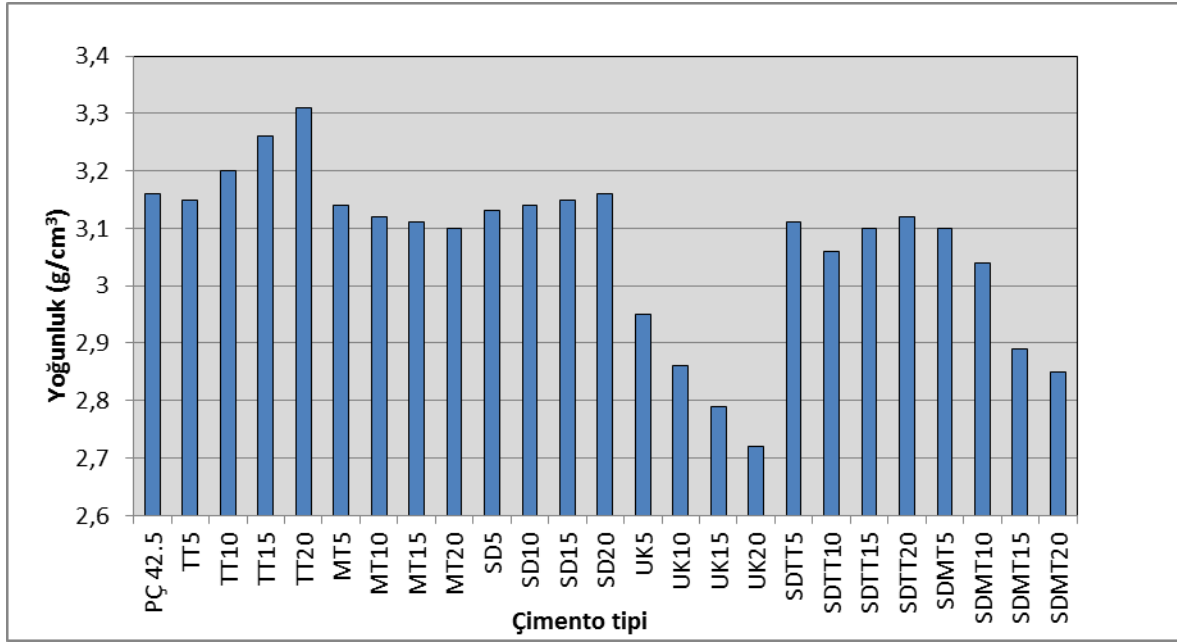
4.3.3. Çimentoların yoğunluğuna TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi

Çimentoların yoğunluk deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile yoğunluk arasındaki ilişki ise Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Çimentonun yoğunluğu ile ilgili TS EN 197-1'de herhangi bir sınırlama yoktur.

Referans çimentosu PÇ 42.5 ile TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT grubu çimentoları birbirleriyle karşılaştırıldığında, yoğunluğu en fazla olan çimento tipi TT katkılı çimento olduğu görülmektedir. TT ikame oranı arttıkça yoğunluk değerinin arttığı ve yoğunluğu en yüksek olan çimento tipinin de TT20 olduğu belirlenmiştir. SDTT ile SDMT grubu çimentolar birbirleri ile karşılaştırıldığında ise SDTT katkılı çimento grubunun yoğunluk değeri SDMT katkılı çimentolardan yüksek olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle katkılı çimentoların yoğunlukları TT miktarı ile orantılı olarak artmaktadır.

MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimento gruplarının yoğunluk değeri referans çimentosu PÇ 42.5 ile karşılaştırıldığında ise; genel olarak katkılı çimento gruplarının yoğunluğunun referans çimentosu PÇ 42.5'a göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Referans çimentosu PÇ 42.5'a göre yoğunluk değeri en düşük çimento grubu UK katkılı çimentoda görülmektedir. UK oranı ile yoğunluk değeri arasında ters bir orantı olup, UK5 katkılı çimentonun yoğunluğu UK20 katkılı çimentonun yoğunluğundan yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7. Çimento tipi ile yoğunluk ilişkisi

4.3.4. Çimentoların özgül yüzeyine TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi

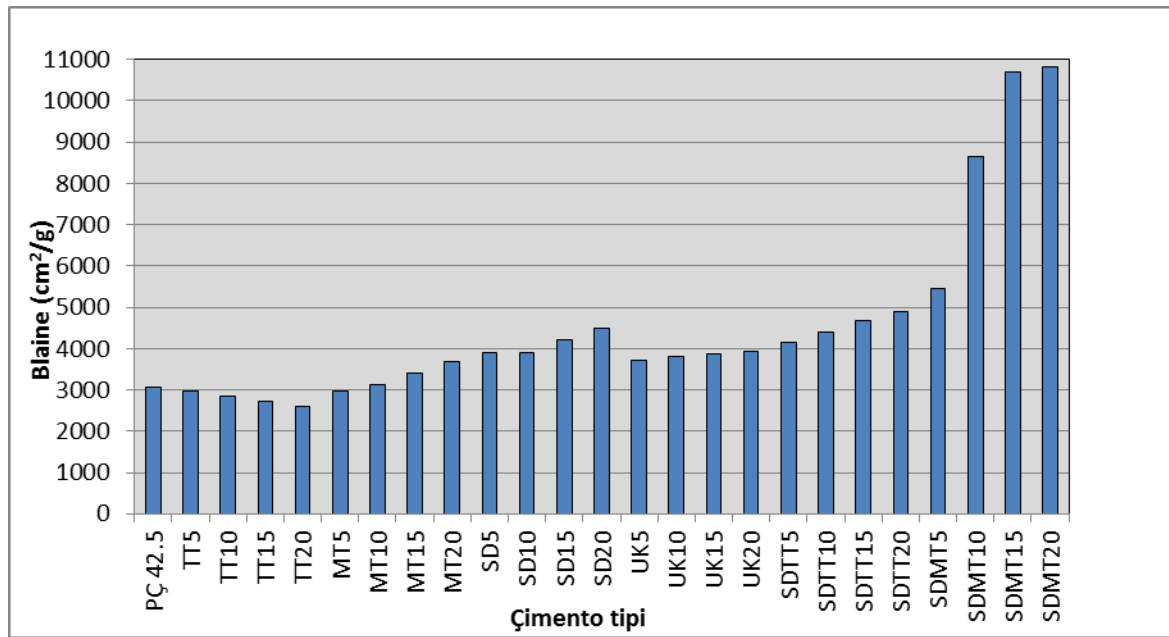
Çimentoların özgül yüzey deney sonuçları Çizelge 4.1'de, çimento tipi ile özgül yüzey arasındaki ilişki ise Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü tarafından 2002'de yürürlükten kaldırılan TS 10156 katkılı çimento standardına göre katkılı çimentoların özgül yüzeyinin en az 2800 cm²/g olması öngörülürken, yürürlükteki TS EN 197-1'de çimentoların özgül yüzeyi ile ilgili olarak herhangi bir sınırlama getirilmemiştir.

Referans çimentosu PÇ 42.5 ile TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT grubu çimentoları birbirleriyle karşılaştırıldığında, özgül yüzey değeri en düşük ve en yüksek olan çimentolar TT ve SDMT olarak belirlenmiştir.

MT, SD, UK, SDTT ve SDMT çimento tiplerinin kendi içerisindeki katkı oranları arttıkça özgül yüzey değerleri de artış göstermiştir. Örneğin; MT5 katkılı çimento tipinin özgül yüzey değeri MT20 katkılı çimento tipinden daha düşük olduğu ya da SDMT5 katkılı

çimento tipinin özgül yüzey değeri SDMT20 katkıli çimento tipinden daha düşük olması. Başka bir deyişle MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkıli çimento tiplerinin katkı oranları arttıkça özgül yüzey değeri de artış göstermektedir.

SDMT çimentolarının özgül yüzey değerleri referans ve diğer tüm çimento tipleri ile karşılaştırıldığında, 40 µm ve 90 µm elek üstü değerlerinde olduğu gibi karışımda kullanılan SD oranı arttıkça özgül yüzey değeri de artış göstermiştir.



Şekil 4.8. Çimento tipi ile özgül yüzey ilişkisi

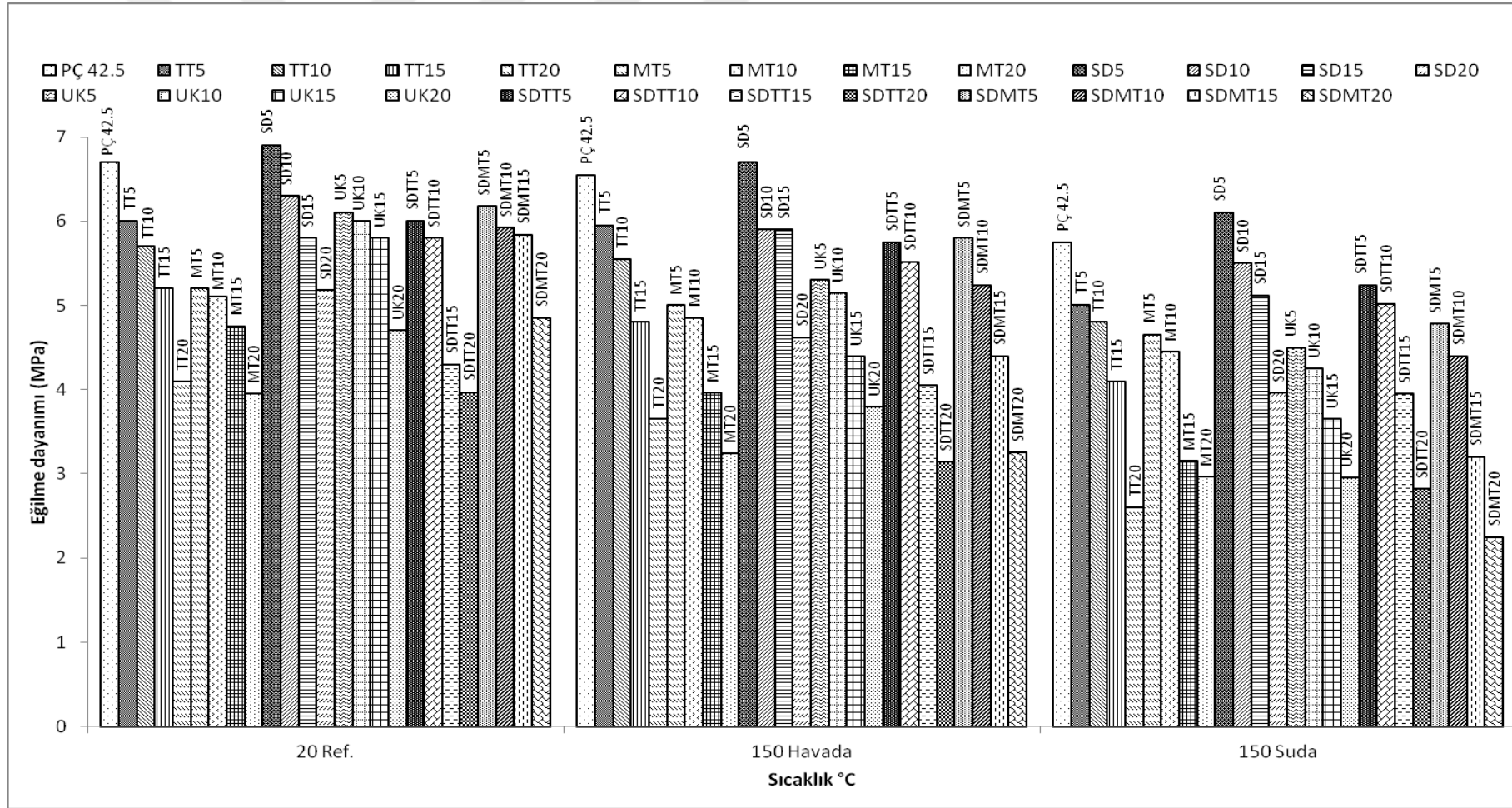
4.4. TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT Katkıli Çimento Harçların Özellikleri

4.4.1. Harçların eğilme dayanımlarına TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT'nin etkisi

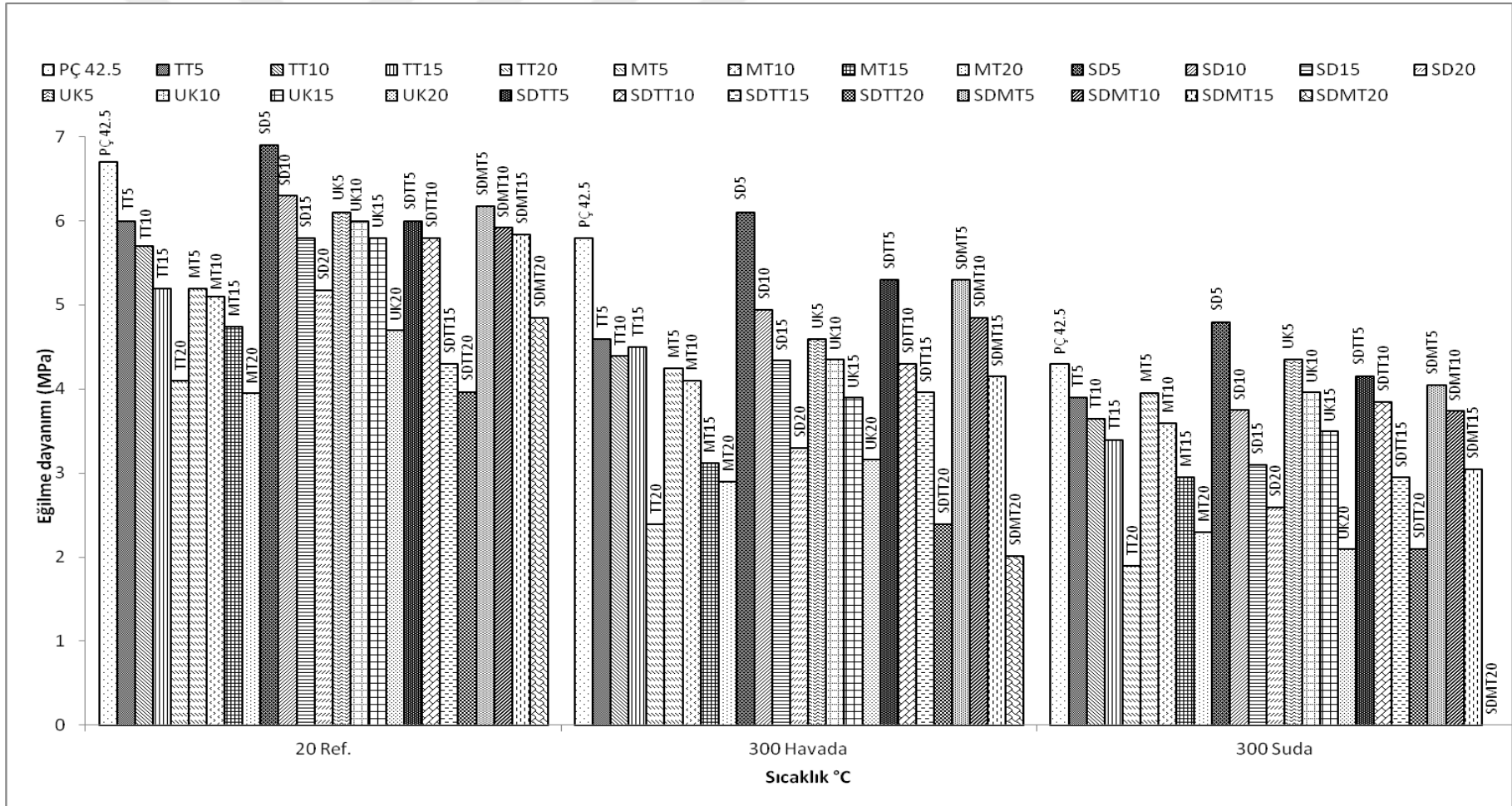
Laboratuvarda üretilen TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkıli çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.2'de, harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 4.9 ile Şekil 4.17 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Çimento tiplerinin eğilme dayanımları

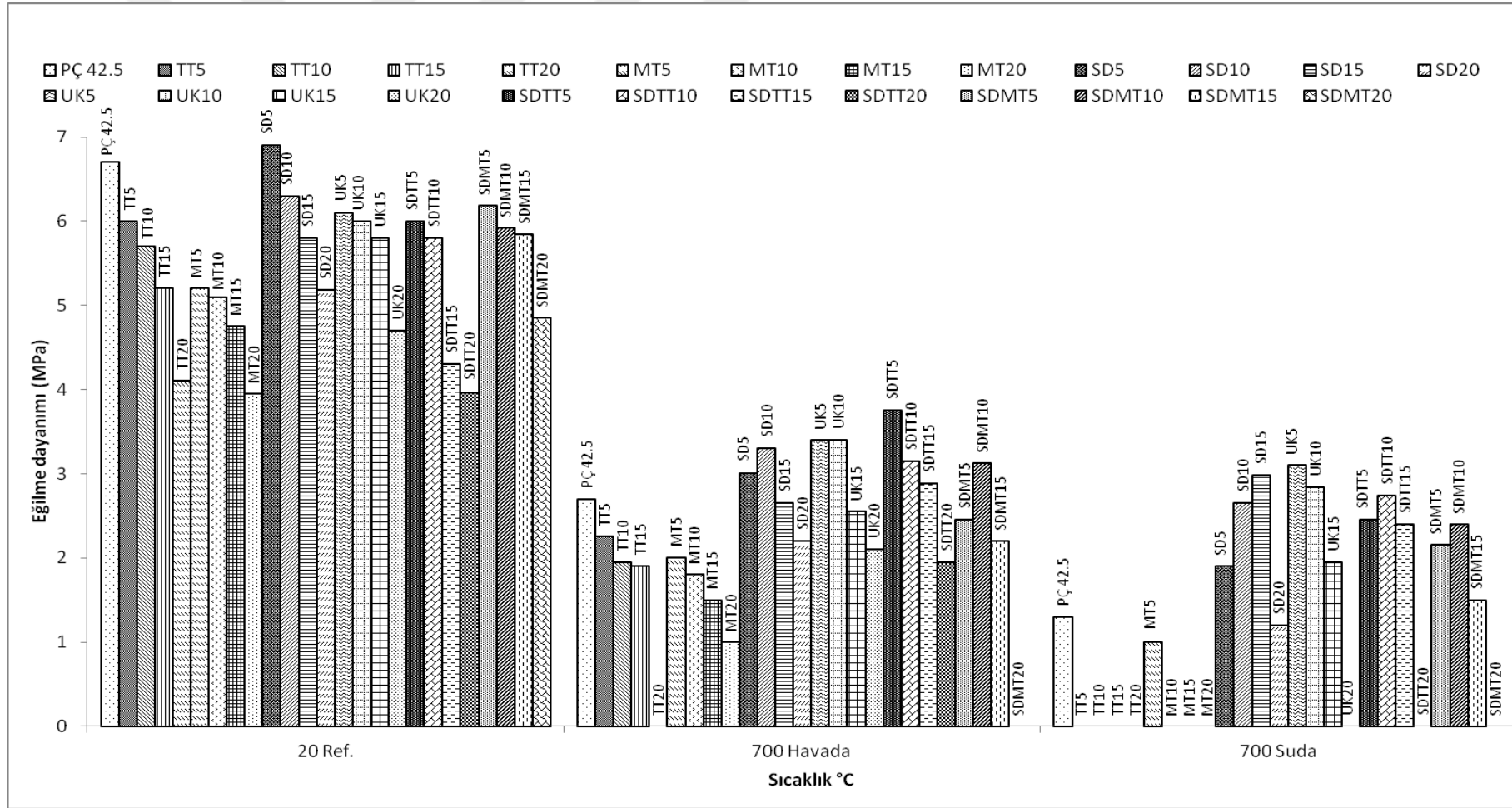
Eğilme Dayanımı (MPa)																												
Koşullar	Gün	7									28									90								
	Soğutma uyg.	20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda			
	Yüksek sıc. uyg. °C		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900
Harç tipi	PÇ 42.5	6,7	6,5	5,8	2,7	1,4	5,7	4,3	1,3	0,0	8,4	8,6	7,7	3,9	2,6	8,3	6,4	2,9	1,4	9,5	9,7	9,4	6,2	3,4	8,2	7,1	4,9	2,6
	TT5	6,0	5,9	4,8	2,4	1,2	5,2	4,1	1,1	0,0	8,3	8,4	7,1	3,5	2,2	7,8	5,9	2,1	2,1	9,6	9,8	8,4	5,9	2,5	8,0	5,8	3,4	1,7
	TT10	5,7	5,5	4,5	2,1	1,0	4,9	3,8	1,0	0,0	7,8	7,9	6,2	4,1	2,0	6,7	4,6	1,6	0,0	9,4	9,3	7,1	4,6	2,1	7,2	5,1	2,6	0,0
	TT15	5,2	4,8	4,5	1,9	0,0	4,1	3,4	0,0	0,0	7,4	7,2	6,1	3,4	1,9	6,1	4,2	1,2	0,0	8,4	7,9	5,4	2,5	1,2	5,3	4,2	0,0	0,0
	TT20	4,1	3,6	2,4	0,0	0,0	2,6	1,9	0,0	0,0	6,3	5,4	3,5	1,8	1,0	3,4	1,8	0,0	0,0	6,9	5,6	4,4	2,1	0,0	4,3	2,6	0,0	0,0
	MT5	5,2	5,0	4,2	2,0	1,2	4,6	3,9	1,0	0,0	6,4	6,4	5,6	3,3	1,7	5,9	4,4	2,2	1,5	7,6	7,7	6,8	5,6	2,2	6,1	4,8	2,7	1,2
	MT10	5,1	4,8	4,1	1,8	0,0	4,4	3,6	1,9	0,0	6,3	6,1	5,4	2,9	1,4	4,9	4,2	2,1	0,0	7,5	6,8	5,9	4,4	1,5	5,2	3,6	2,4	1,0
	MT15	4,5	3,9	3,1	1,5	0,0	3,1	2,9	0,0	0,0	5,4	5,1	4,5	3,5	1,3	4,3	3,0	1,9	0,0	6,9	6,3	5,2	3,9	0,0	5,1	3,2	2,3	0,0
	MT20	3,9	3,2	2,9	1,0	0,0	2,9	2,3	0,0	0,0	4,8	4,2	3,3	2,4	1,2	3,8	2,6	1,2	0,0	5,4	4,8	4,1	3,6	0,0	4,1	2,8	2,0	0,0
	SD5	6,9	6,7	5,4	2,3	1,5	5,4	4,1	1,2	0,0	8,7	9,0	6,4	3,8	1,6	8,2	5,2	3,1	2,2	10,1	10,4	9,6	6,1	3,8	8,4	6,8	4,3	2,5
	SD10	6,3	5,9	5,1	3,4	1,4	5,5	3,9	2,8	0,0	9,0	9,4	5,4	3,1	1,8	8,5	5,1	3,0	1,4	10,1	10,4	9,7	5,9	2,9	8,2	6,3	4,1	2,2
	SD15	5,8	5,9	4,3	2,6	0,0	5,1	3,1	2,9	0,0	8,1	8,6	5,2	2,9	1,4	6,8	4,2	2,4	1,2	9,4	9,8	7,7	5,4	2,2	7,6	4,2	3,1	1,8
	SD20	5,1	4,6	3,3	2,2	0,0	3,9	2,6	1,2	0,0	6,4	5,9	4,6	0,0	0,0	5,2	3,9	0,0	0,0	8,9	8,6	6,8	3,4	1,8	6,8	2,6	2,8	1,2
	UK5	6,1	5,3	4,6	3,2	2,2	4,4	4,2	2,9	0,0	8,6	8,8	6,5	4,1	2,5	7,5	4,4	3,7	1,4	10,0	10,2	9,7	6,3	3,2	8,5	6,6	3,9	1,8
	UK10	6,0	5,1	4,3	3,4	1,8	4,2	3,9	2,8	0,0	8,5	7,4	6,5	4,6	2,2	6,5	5,2	3,6	2,3	9,86	9,9	9,3	5,2	2,7	8,2	6,3	3,8	1,6
	UK15	5,8	4,4	3,9	2,5	1,2	3,6	3,5	1,9	0,0	7,8	6,9	6,5	4,3	2,1	5,4	4,5	3,2	2,0	9,2	9,2	8,4	4,4	2,4	7,6	4,6	3,4	1,4
	UK20	4,7	3,8	3,1	2,1	0,0	2,9	2,1	0,0	0,0	5,4	5,6	4,8	3,2	1,4	4,4	3,2	2,5	0,0	8,6	8,4	6,4	3,5	1,5	5,8	2,8	0,0	0,0
	SDTT5	6,0	5,7	5,3	3,7	2,2	5,2	4,1	2,4	0,0	8,2	8,5	7,4	3,6	2,2	7,4	5,6	3,6	1,5	10,1	10,3	9,2	6,4	3,4	8,1	6,1	3,5	1,4
	SDTT10	5,8	5,5	4,3	3,1	1,8	5,0	3,8	2,7	0,0	8,8	9,1	7,8	3,4	2,4	7,2	5,2	3,4	1,2	10,0	10,5	8,2	5,9	2,7	8,1	5,4	3,1	0,0
	SDTT15	4,3	4,0	3,9	2,8	1,3	3,9	2,9	2,4	0,0	8,1	7,9	5,9	3,3	2,0	6,5	4,8	3,2	1,6	8,9	9,4	7,2	5,0	2,2	6,8	5,0	2,9	0,0
	SDTT20	3,9	3,1	2,4	1,9	0,0	2,8	2,1	0,0	0,0	6,4	6,5	4,4	3,2	0,0	5,1	3,2	2,8	0,0	8,5	8,6	6,5	4,0	1,8	6,5	4,0	0,0	0,0
	SDMT5	6,1	5,8	5,3	2,4	1,5	4,7	4,0	2,1	0,0	7,2	7,8	6,5	3,6	2,1	6,3	4,2	2,9	1,2	9,1	9,6	8,4	4,8	3,0	7,8	6,2	3,6	2,2
	SDMT10	5,9	5,2	4,8	3,1	1,4	4,4	3,7	2,4	0,0	7,8	7,9	6,5	3,2	1,8	6,5	4,8	2,8	1,6	8,8	9,4	7,8	4,2	2,4	6,5	4,8	3,2	1,8
	SDMT15	5,8	4,4	4,1	2,2	0,0	3,2	3,0	1,5	0,0	6,8	6,4	5,6	3,6	1,4	4,1	3,6	0,0	0,0	7,2	8,9	6,4	3,8	1,4	4,5	2,5	2,5	0,0
	SDMT20	4,8	3,2	2,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	5,6	4,8	3,4	2,1	0,0	3,4	2,40	0,0	0,0	6,0	5,45	3,2	2,4	0,0	0,0	2,1	0,0	0,0



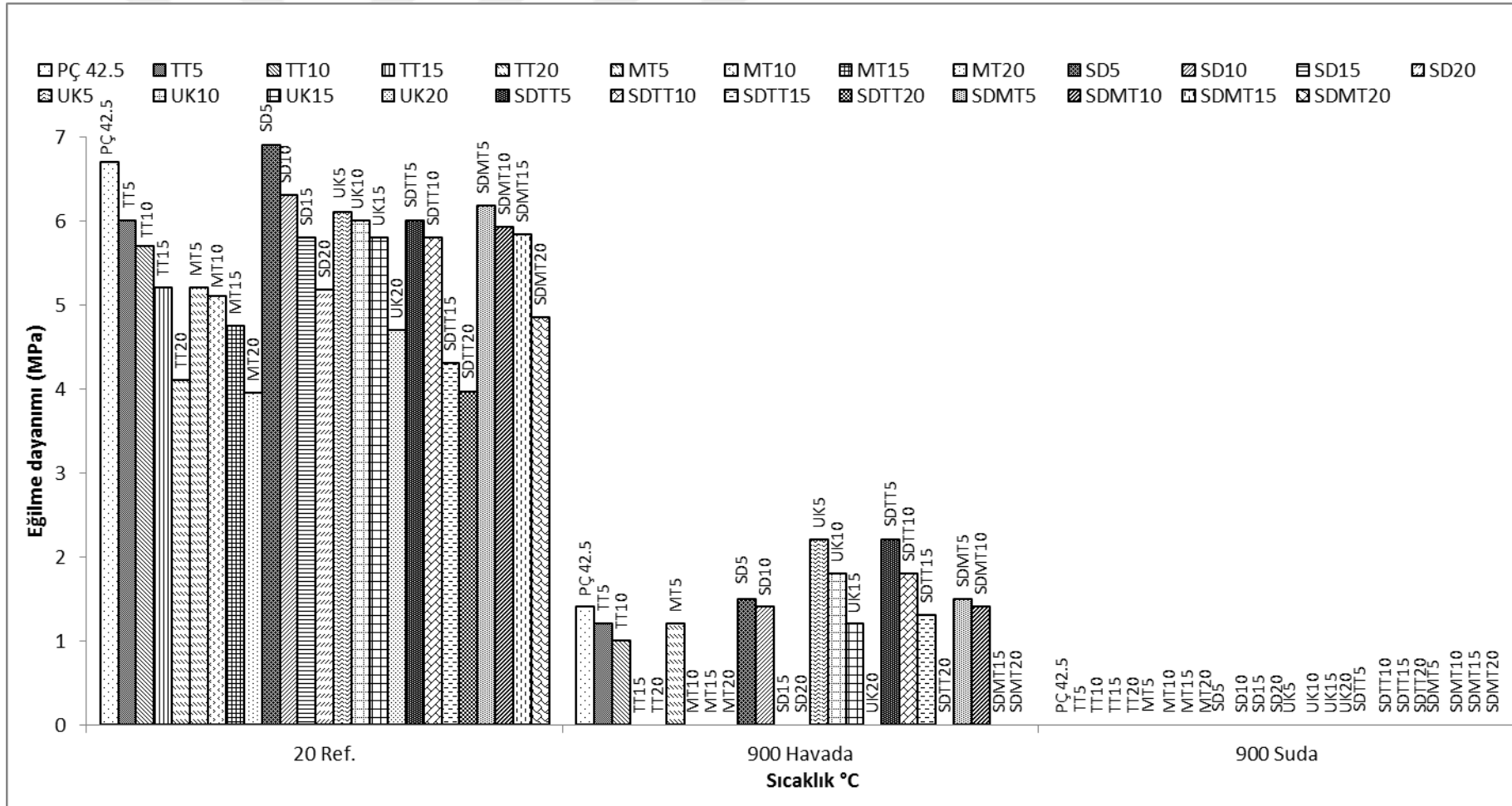
Şekil 4.9. 7 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.10. 7 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.11. 7 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.12. 7 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi

7. günde;

PC 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3 azaldığı, su ile soğutmada %14,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,4 azaldığı, su ile soğutmada %35,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %59,7 azaldığı, su ile soğutmada % 80,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %79,1 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,7 azaldığı, su ile soğutmada %13,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %20 azaldığı, su ile soğutmada %31,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %60 azaldığı, su ile soğutmada %81,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80 azaldığı; TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,5 azaldığı, su ile soğutmada %14 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada % 21,1 azaldığı, su ile soğutmada %33,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada % 63,2 azaldığı, su ile soğutmada %82,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %82,5 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %7,7 azaldığı, su ile soğutmada %21,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,5 azaldığı, su ile soğutmada %34,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %63,5 azaldığı; TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,2 azaldığı, su ile soğutmada %36,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,5 azaldığı, su ile soğutmada %53,7 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,8 azaldığı, su ile soğutmada %11,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %19,2 azaldığı, su ile soğutmada %25 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %61,5 azaldığı, su ile soğutmada %80,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %76,9 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,9 azaldığı, su ile soğutmada %13,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %19,6 azaldığı, su ile soğutmada %29,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %64,7 azaldığı, su ile soğutmada %62,7 azaldığı; MT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,3 azaldığı, su ile soğutmada %31,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %31,1 azaldığı, su ile soğutmada %35,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %66,7 azaldığı; MT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %17,9 azaldığı, su ile soğutmada %25,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa

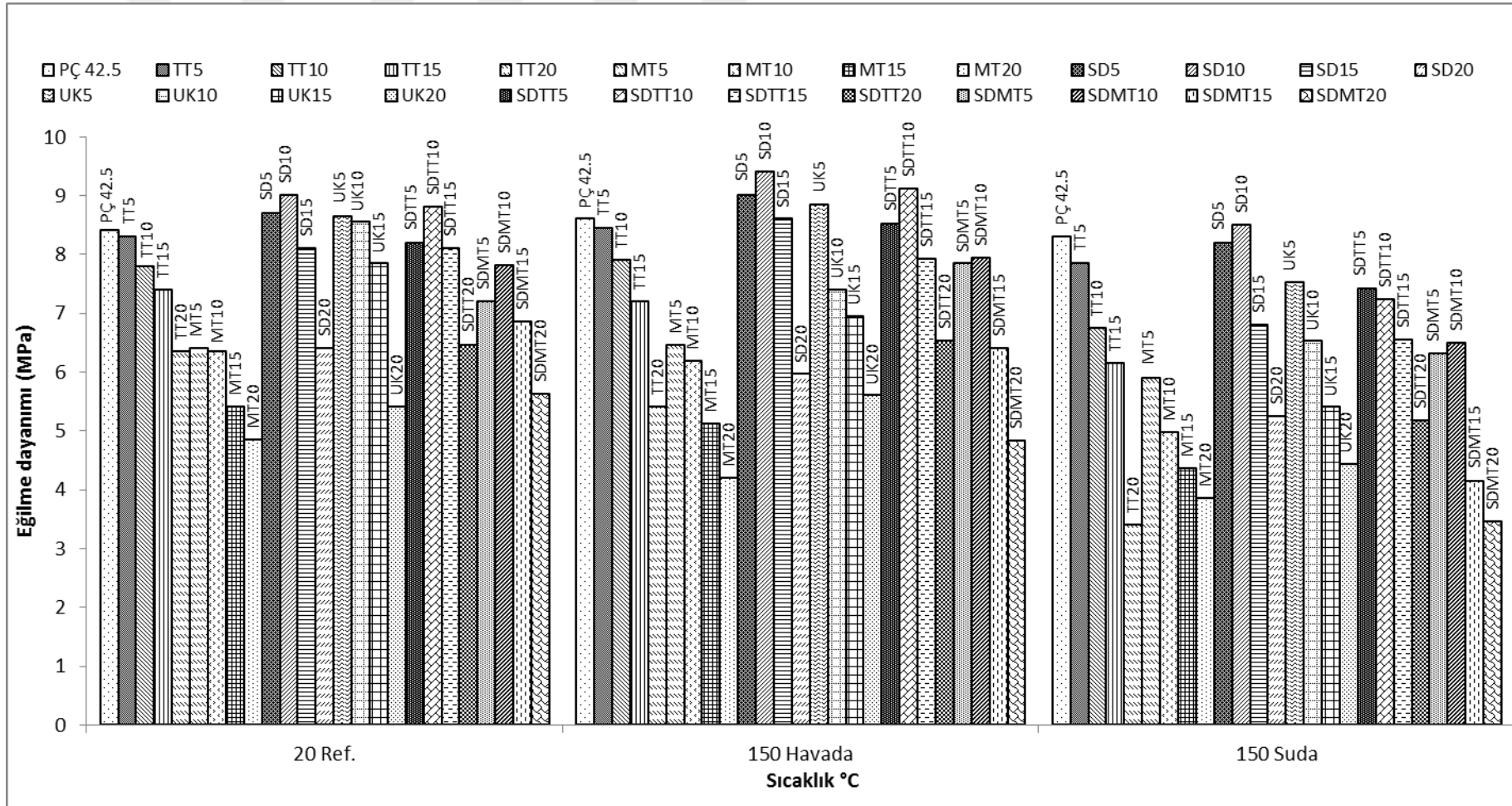
göre havada soğumada %25,6 azaldığı, su ile soğutmada %41 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,4 azaldığı;

SD5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,9 azaldığı, su ile soğutmada %21,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %21,7 azaldığı, su ile soğutmada %40,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %66,7 azaldığı, su ile soğutmada %82,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %78,3 azaldığı; SD10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %6,3 azaldığı, su ile soğutmada %12,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %19 azaldığı, su ile soğutmada %38,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %46 azaldığı, su ile soğutmada %55,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %77,8 azaldığı; SD15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,7 azaldığı, su ile soğutmada %12,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %25,9 azaldığı, su ile soğutmada %46,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %55,2 azaldığı, su ile soğutmada %50 azaldığı; SD20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,8 azaldığı, su ile soğutmada %23,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %35,3 azaldığı, su ile soğutmada %49 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,9 azaldığı, su ile soğutmada %76,5 azaldığı;

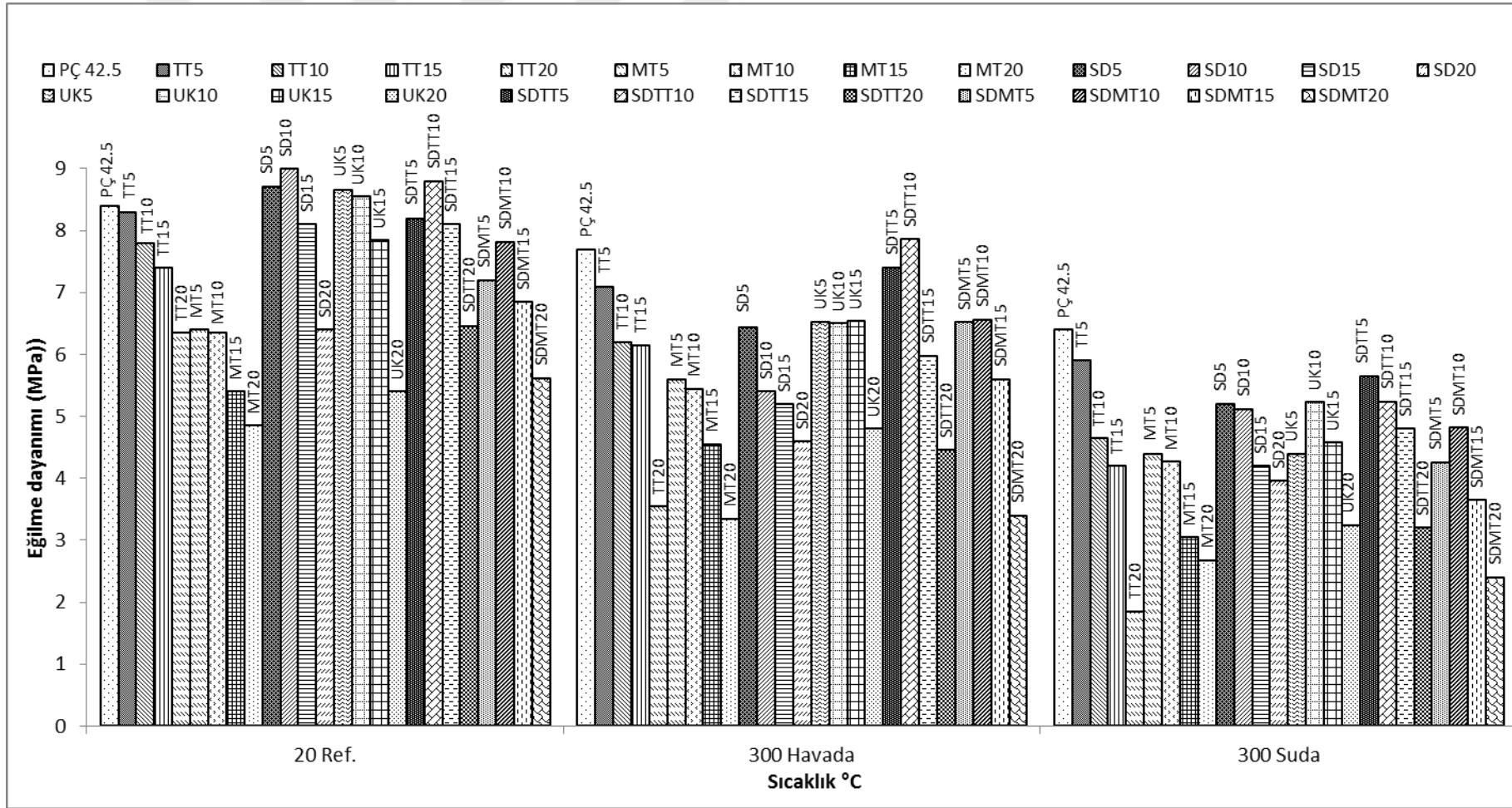
UK5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,1 azaldığı, su ile soğutmada %27,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,6 azaldığı, su ile soğutmada %31,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,5 azaldığı, su ile soğutmada %52,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %63,9 azaldığı; UK10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %15 azaldığı, su ile soğutmada %30 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %28,3 azaldığı, su ile soğutmada %35 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %43,3 azaldığı, su ile soğutmada %52,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %70 azaldığı; UK15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,1 azaldığı, su ile soğutmada %37,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,8 azaldığı, su ile soğutmada %39,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,9 azaldığı, su ile soğutmada %67,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %79,3 azaldığı; UK20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %19,1 azaldığı, su ile soğutmada %38,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %34 azaldığı, su ile soğutmada %55,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %55,3 azaldığı;

SDTT5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5 azaldığı, su ile soğutmada %13,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %11,7 azaldığı, su ile soğutmada %31,7 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %38,3 azaldığı, su ile soğutmada %60 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %63,3 azaldığı; SDTT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5,2 azaldığı, su ile soğutmada %13,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %25,9 azaldığı, su ile soğutmada %34,5 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %46,6 azaldığı, su ile soğutmada %53,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %69 azaldığı; SDTT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %7 azaldığı, su ile soğutmada %9,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %9,3 azaldığı, su ile soğutmada %32,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %34,9 azaldığı, su ile soğutmada %44,2 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %69,8 azaldığı; SDTT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %20,5 azaldığı, su ile soğutmada %28,2 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %38,5 azaldığı, su ile soğutmada %46,2 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %51,3 azaldığı;

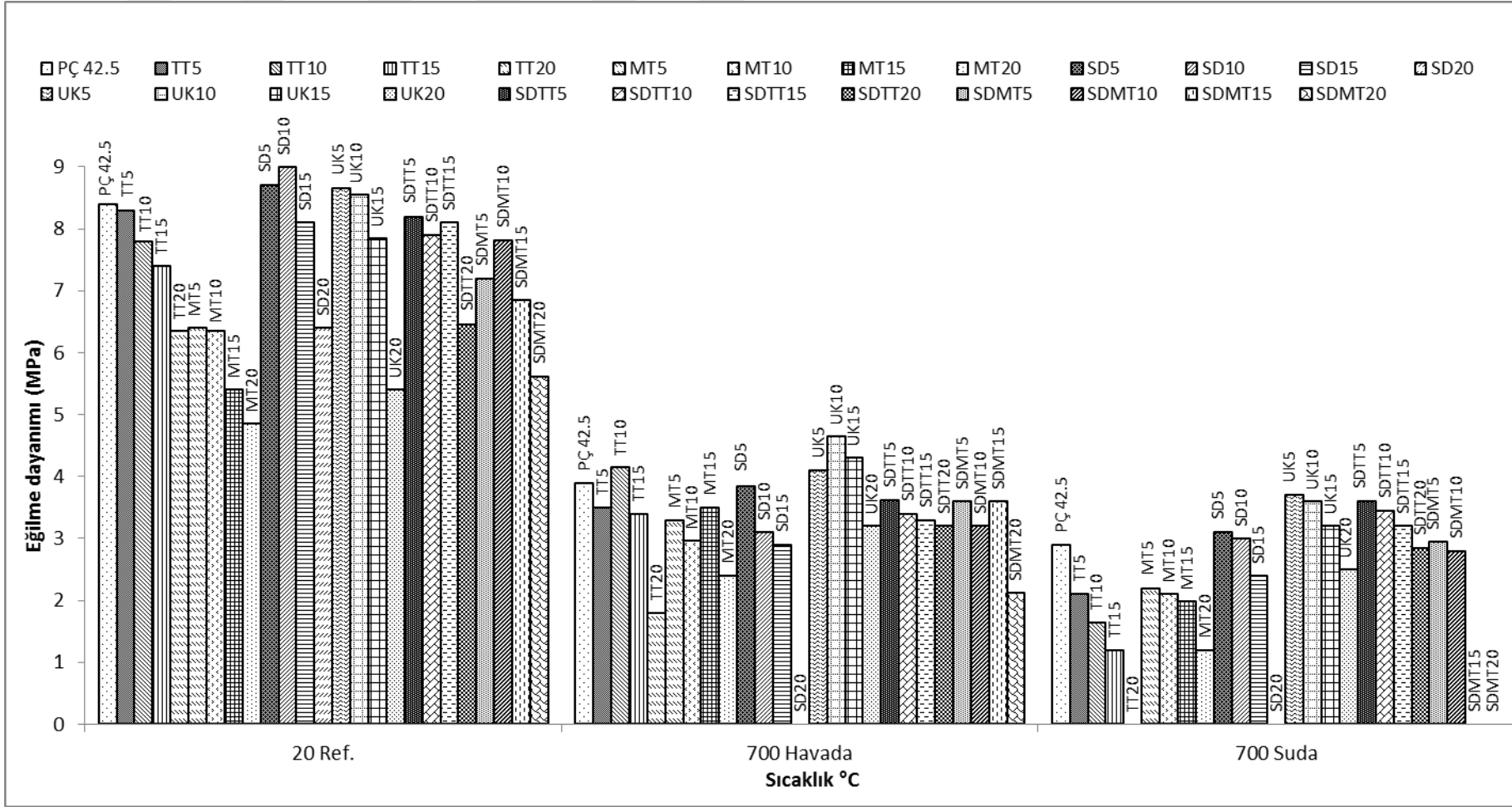
SDMT5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %4,9 azaldığı, su ile soğutmada %23 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %13,1 azaldığı, su ile soğutmada %34,4 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %60,7 azaldığı, su ile soğutmada %65,6 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %75,4 azaldığı; SDMT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %11,9 azaldığı, su ile soğutmada %25,4 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %18,6 azaldığı, su ile soğutmada %37,3 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %47,5 azaldığı, su ile soğutmada %59,3 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %76,3 azaldığı; SDMT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %24,1 azaldığı, su ile soğutmada %44,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %29,3 azaldığı, su ile soğutmada %48,3 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %62,1 azaldığı, su ile soğutmada %74,1 azaldığı; SDMT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %33,3 azaldığı, su ile soğutmada %54,2 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %58,3 azaldığı bulunmuştur.



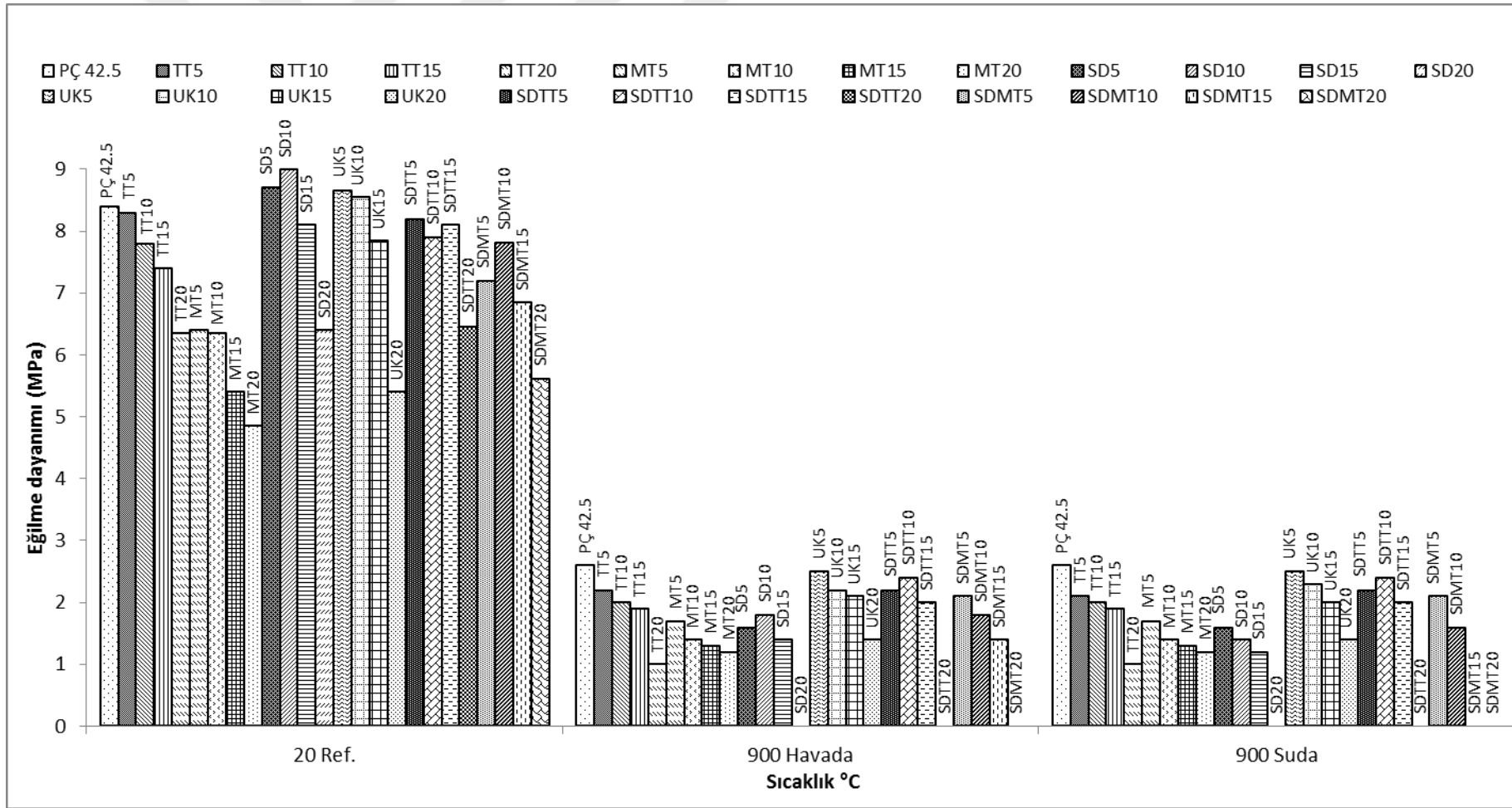
Şekil 4.13. 28 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.14. 28 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.15. 28 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.16. 28 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi

28. günde;

PÇ 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,4 arttığı, su ile soğutmada %1,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %8,3 azaldığı, su ile soğutmada %23,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %53,6 azaldığı, su ile soğutmada %65,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %69 azaldığı, su ile soğutmada %83,3 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,2 arttığı, su ile soğutmada %6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,5 azaldığı, su ile soğutmada %28,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %57,8 azaldığı, su ile soğutmada %74,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %73,5 azaldığı, su ile soğutmada %74,7 azaldığı;

TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,3 arttığı, su ile soğutmada %14,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %20,5 azaldığı, su ile soğutmada %41 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada % 47,4 azaldığı, su ile soğutmada %79,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,4 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,7 azaldığı, su ile soğutmada %17,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %17,6 azaldığı, su ile soğutmada %43,2 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %54,1 azaldığı su ile soğutmada %83,8 azaldığı; ; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,3 azaldığı; TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,3 azaldığı, su ile soğutmada %46 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %44,4 azaldığı, su ile soğutmada %71,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %71,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %84,1 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre su ile soğutmada %7,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,5 azaldığı, su ile soğutmada %31,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %48,4 azaldığı, su ile soğutmada %65,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %73,4 azaldığı, su ile soğutmada %76,6 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada % 3,2 azaldığı, su ile soğutmada %22,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,3 azaldığı, su ile soğutmada %33,3 azaldığı; 700 °C’de,

referansa göre havada soğumada %54 azaldığı, su ile soğutmada %66,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %77,8 azaldığı; MT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,6 azaldığı, su ile soğutmada %20,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %16,7 azaldığı, su ile soğutmada %44,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %35,2 azaldığı, su ile soğutmada %64,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %75,9 azaldığı; MT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,5 azaldığı, su ile soğutmada %20,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %31,3 azaldığı, su ile soğutmada %45,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %50, azaldığı, su ile soğutmada %75 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %75 azaldığı;

SD5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,4 arttığı, su ile soğutmada %5,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,4 azaldığı, su ile soğutmada %40,2 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,3 azaldığı, su ile soğutmada %64,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %81,6 azaldığı, su ile soğutmada %74,7 azaldığı; SD10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,4 arttığı, su ile soğutmada %5,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %40 azaldığı, su ile soğutmada %43,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %65,6 azaldığı, su ile soğutmada %66,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80 azaldığı, su ile soğutmada %84,4 azaldığı; SD15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %6,2 arttığı, su ile soğutmada %16 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %35,8 azaldığı, su ile soğutmada %48,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %64,2 azaldığı, su ile soğutmada %70,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %82,7 azaldığı, su ile soğutmada %85,2 azaldığı; SD20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %7,8 azaldığı, su ile soğutmada %18,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %28,1 azaldığı, su ile soğutmada %39,1 azaldığı;

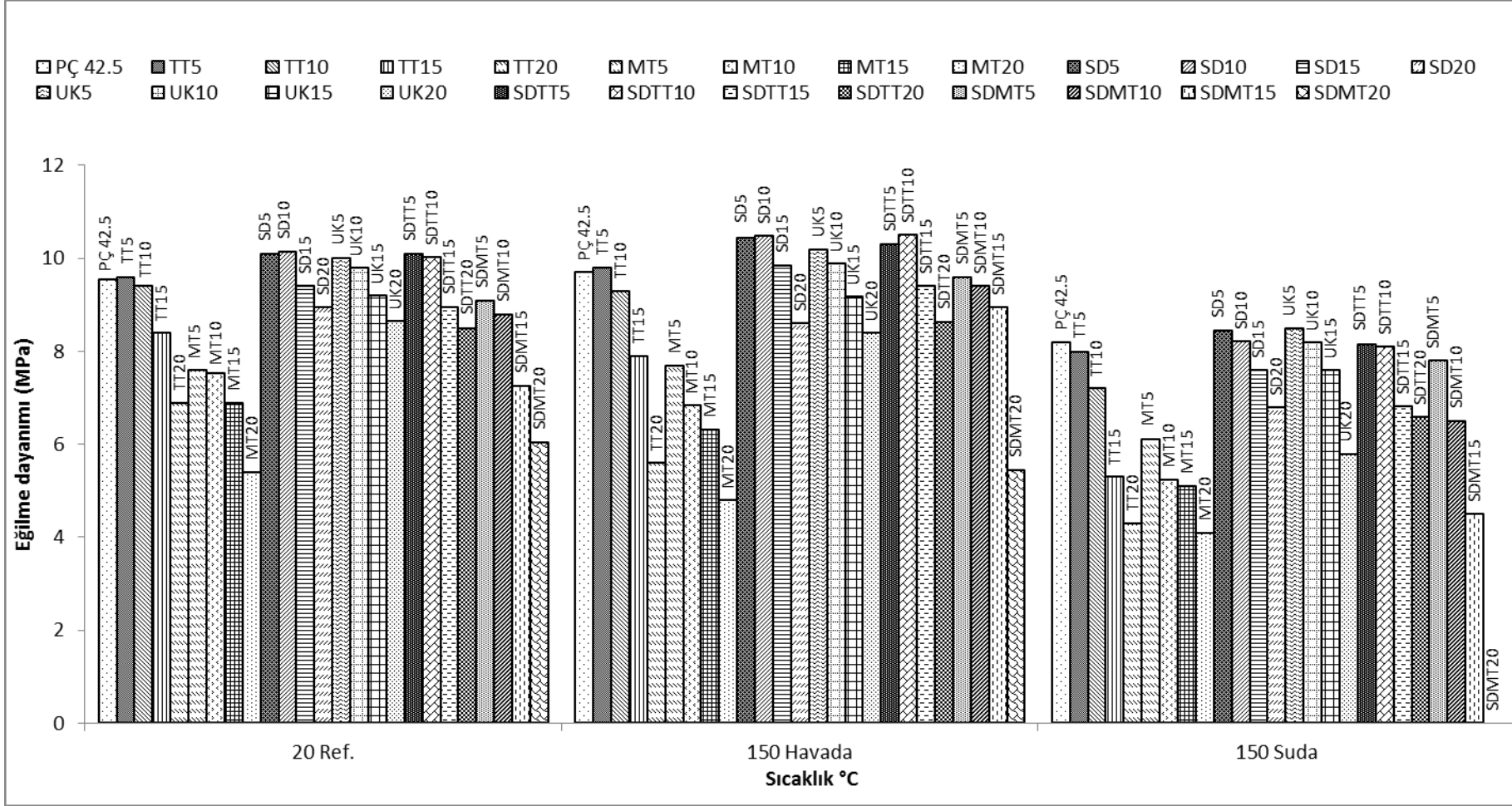
UK5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,3 arttığı, su ile soğutmada %12,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,4 azaldığı, su ile soğutmada %48,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,3 azaldığı, su ile soğutmada %57 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %70,9 azaldığı, su ile soğutmada %83,7 azaldığı; UK10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,9 azaldığı, su ile soğutmada %23,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %23,5 azaldığı, su ile

soğutmada %38,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %45,9 azaldığı, su ile soğutmada %57,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,1 azaldığı, su ile soğutmada %72,9 azaldığı; UK15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,5 azaldığı, su ile soğutmada %30,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %16,7 azaldığı, su ile soğutmada %42,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %44,9 azaldığı, su ile soğutmada %59 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %73,1 azaldığı, su ile soğutmada %74,4 azaldığı; UK20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,7 arttığı, su ile soğutmada %18,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,1 azaldığı, su ile soğutmada %40,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %40,7 azaldığı, su ile soğutmada %53,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74 azaldığı;

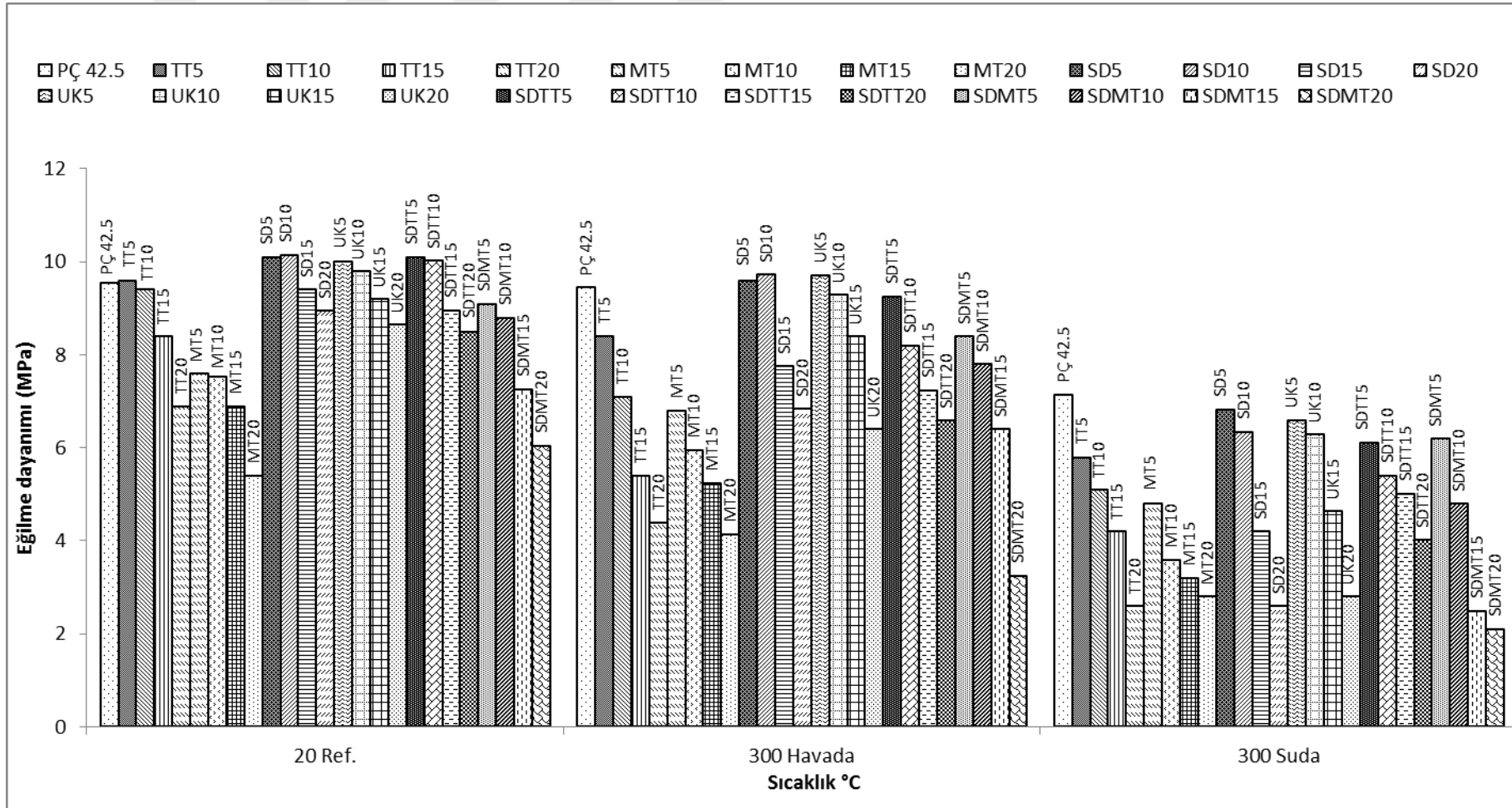
SDTT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,7 arttığı, su ile soğutmada %9,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,8 azaldığı, su ile soğutmada %31,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,1 azaldığı, su ile soğutmada %56,1 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %73,2 azaldığı, su ile soğutmada %81,7 azaldığı; SDTT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,4 arttığı, su ile soğutmada %18,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,4 azaldığı, su ile soğutmada %40,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %61,4 azaldığı, su ile soğutmada %61,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %72,7 azaldığı, su ile soğutmada %86,4 azaldığı; SDTT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,5 azaldığı, su ile soğutmada %19,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %27,2 azaldığı, su ile soğutmada %40,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %59,3 azaldığı, su ile soğutmada %60,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %75,3 azaldığı, su ile soğutmada %80,2 azaldığı; SDTT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,2 arttığı, su ile soğutmada %20,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %31,3 azaldığı, su ile soğutmada %50 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %50 azaldığı, su ile soğutmada %56,3 azaldığı;

SDMT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %8,3 arttığı, su ile soğutmada %12,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,7 azaldığı, su ile soğutmada %41,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %50 azaldığı, su ile soğutmada %59,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %70,8 azaldığı, su ile soğutmada %83,3

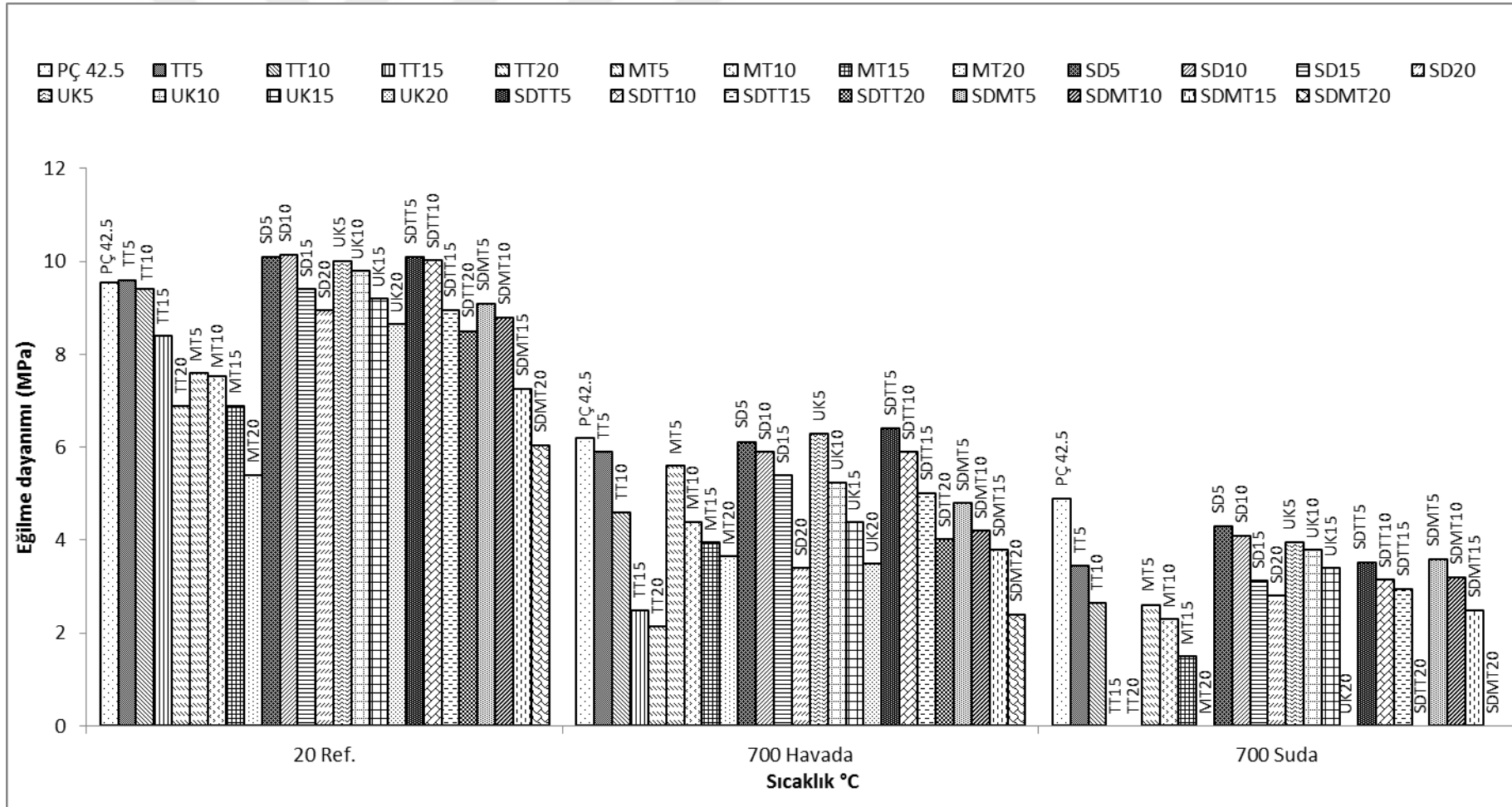
azaldığı; SDMT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %1,3 arttığı, su ile soğutmada %16,7 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %16,7 azaldığı, su ile soğutmada %38,5 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %59 azaldığı, su ile soğutmada %64,1 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %76,9 azaldığı, su ile soğutmada %79,5 azaldığı; SDMT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada % 5,9 azaldığı, su ile soğutmada %39,7 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %17,6 azaldığı, su ile soğutmada %47,1 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %47,1 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %79,4 azaldığı; SDMT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %14,3 azaldığı, su ile soğutmada %39,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %39,3 azaldığı, su ile soğutmada %57,1 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %62,5 azaldığı bulunmuştur.



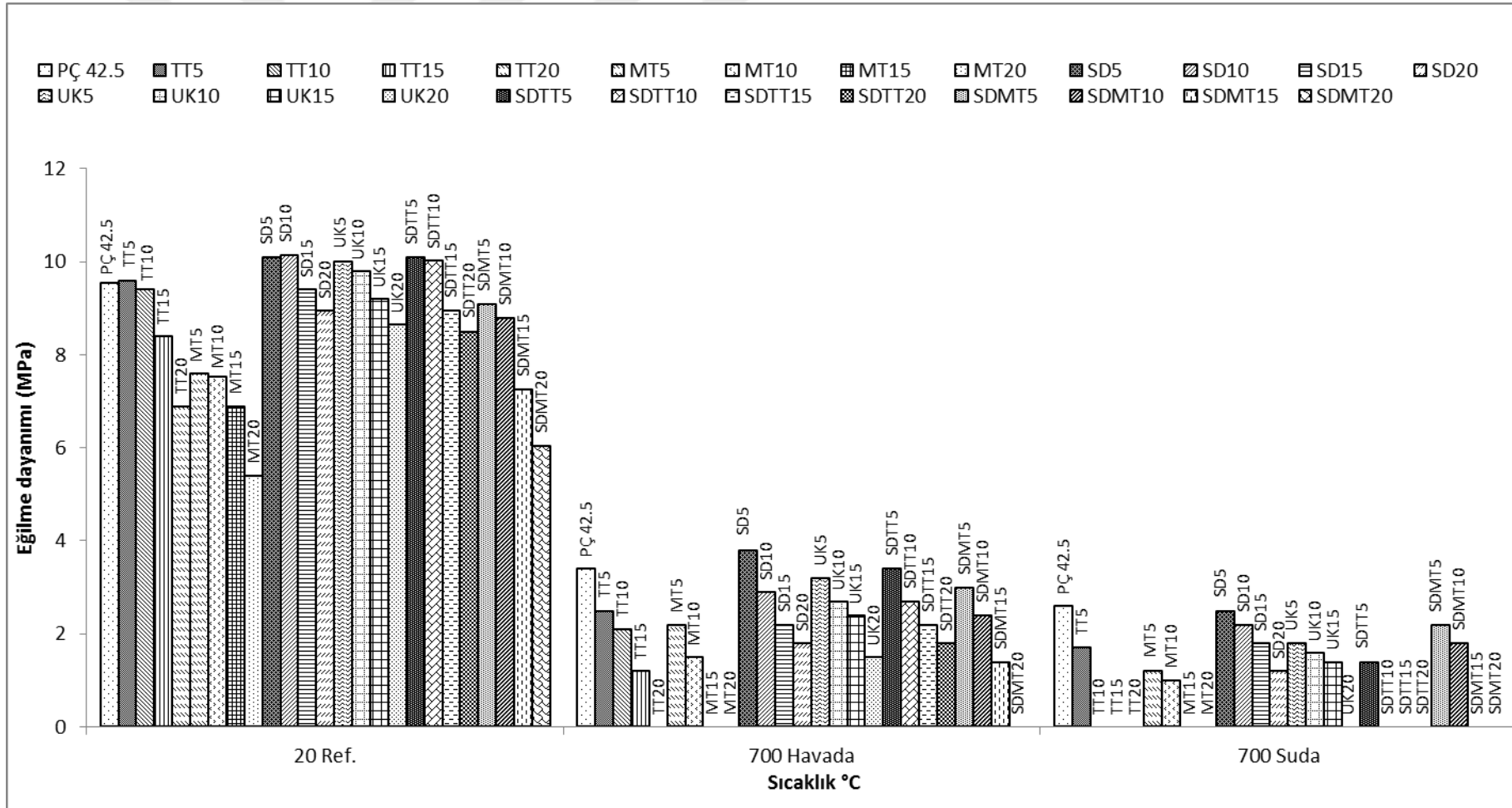
Şekil 4.17. 90 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.18. 90 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.19. 90 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi



Şekil 4.20. 90 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı ilişkisi

90. günde;

PÇ 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,1 arttığı, su ile soğutmada %13,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,1 azaldığı, su ile soğutmada %25,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %34,7 azaldığı, su ile soğutmada %48,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %64,2 azaldığı, su ile soğutmada %72,6 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,1 arttığı, su ile soğutmada %16,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,5 azaldığı, su ile soğutmada %39,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %38,5 azaldığı, su ile soğutmada %64,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74 azaldığı, su ile soğutmada %82,3 azaldığı; TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,1 azaldığı, su ile soğutmada %23,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,5 azaldığı, su ile soğutmada %45,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %51,1 azaldığı, su ile soğutmada %72,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %77,7 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %6,0 azaldığı, su ile soğutmada %36,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %35,7 azaldığı, su ile soğutmada %50 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %70,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %85,7 azaldığı; TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %18,8 azaldığı, su ile soğutmada %37,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %36,2 azaldığı, su ile soğutmada %62,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %69,6 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,3 azaldığı, su ile soğutmada %19,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %10,5 azaldığı, su ile soğutmada %36,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,3 azaldığı, su ile soğutmada % 64,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %71,1 azaldığı, su ile soğutmada %81,2 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,3 azaldığı, su ile soğutmada %30,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %21,3 azaldığı, su ile soğutmada %52 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,3 azaldığı, su ile soğutmada %68 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80 azaldığı, su ile soğutmada %86,7 azaldığı; MT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %8,7 azaldığı, su ile soğutmada %26,1

azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,6 azaldığı, su ile soğutmada %53,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %43,5 azaldığı, su ile soğutmada %66,7 azaldığı; MT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,1 azaldığı, su ile soğutmada %24,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,1 azaldığı, su ile soğutmada %48,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %33,3 azaldığı, su ile soğutmada %63 azaldığı;

SD5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3 arttığı, su ile soğutmada %16,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %5 azaldığı, su ile soğutmada %32,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %39,6 azaldığı, su ile soğutmada %57,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %62,4 azaldığı, su ile soğutmada %75,2 azaldığı; SD10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3 arttığı, su ile soğutmada %18,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %4 azaldığı, su ile soğutmada % 37,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,6 azaldığı, su ile soğutmada %59,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %71,3 azaldığı, su ile soğutmada %78,2 azaldığı; SD15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,3 arttığı, su ile soğutmada %19,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %18,1 azaldığı, su ile soğutmada %55,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %42,6 azaldığı, su ile soğutmada %67 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %76,6 azaldığı, su ile soğutmada %80,9 azaldığı; SD20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,4 azaldığı, su ile soğutmada %23,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %23,6 azaldığı, su ile soğutmada %70,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %61,8 azaldığı, su ile soğutmada %68,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %79,8 azaldığı, su ile soğutmada %86,5 azaldığı;

UK5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2 arttığı, su ile soğutmada %15 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %3 azaldığı, su ile soğutmada %34 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %37 azaldığı, su ile soğutmada %61 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %68 azaldığı, su ile soğutmada %82 azaldığı; UK10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,4 azaldığı, su ile soğutmada %16,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,7 azaldığı, su ile soğutmada %36,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,3 azaldığı, su ile soğutmada %61,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %72,6

azaldığı, su ile soğutmada %83,8 azaldığı; UK15'in 150 °C'de, referansa göre su ile soğutmada %17,4 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %8,7 azaldığı, su ile soğutmada %50 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %52,2 azaldığı, su ile soğutmada %3 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %73,9 azaldığı, su ile soğutmada %84,8 azaldığı; UK20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %2,3 azaldığı, su ile soğutmada %32,6 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %25,6 azaldığı, su ile soğutmada %67,4 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %59,3 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %82,6 azaldığı;

SDTT5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %2 arttığı, su ile soğutmada %19,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %8,9 azaldığı, su ile soğutmada %39,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %36,6 azaldığı, su ile soğutmada %65,3 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %66,3 azaldığı, su ile soğutmada %86,1 azaldığı; SDTT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5 arttığı, su ile soğutmada %19 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %18 azaldığı, su ile soğutmada %46 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %41 azaldığı, su ile soğutmada %69 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %73 azaldığı; SDTT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5,6 arttığı, su ile soğutmada %23,6 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %19,1 azaldığı, su ile soğutmada %43,8 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %43,8 azaldığı, su ile soğutmada %67,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %75,3 azaldığı; SDTT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %1,2 arttığı, su ile soğutmada %23,5 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %23,5 azaldığı, su ile soğutmada %52,9 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %52,9 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %78,8 azaldığı;

SDMT5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5,5 azaldığı, su ile soğutmada %14,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %7,7 azaldığı, su ile soğutmada %31,9 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %47,3 azaldığı, su ile soğutmada %60,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %67 azaldığı, su ile soğutmada %75,8 azaldığı; SDMT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %6,8 arttığı, su ile soğutmada %26,1 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %14,4 azaldığı, su ile soğutmada %45 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada

soğumada %52,3 azaldığı, su ile soğutmada %63,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %72,7 azaldığı, su ile soğutmada %79,5 azaldığı; SDMT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %23,6 arttığı, su ile soğutmada %37,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,1 azaldığı, su ile soğutmada %65,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,2 azaldığı, su ile soğutmada %65,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80,6 azaldığı; SDMT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %46,7 azaldığı, su ile soğutmada %65 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %60 azaldığı bulunmuştur.

Aruntaş, Tekin ve Birgül, yaptıkları çalışmada atık mermer tozunun 7,28 ve 90. yaşlardaki eğilme dayanımı değerlerinin referans çimento örneği CEM I’den daha düşük ve birbirlerine yakın değerler elde etmişlerdir. (Aruntaş ve diğerleri, 2010). Bu çalışma elde edilen sonuçlar neticesinde atık mermer tozunun farklı oranlarda çimentoda kullanılabilirliğini desteklemiştir.

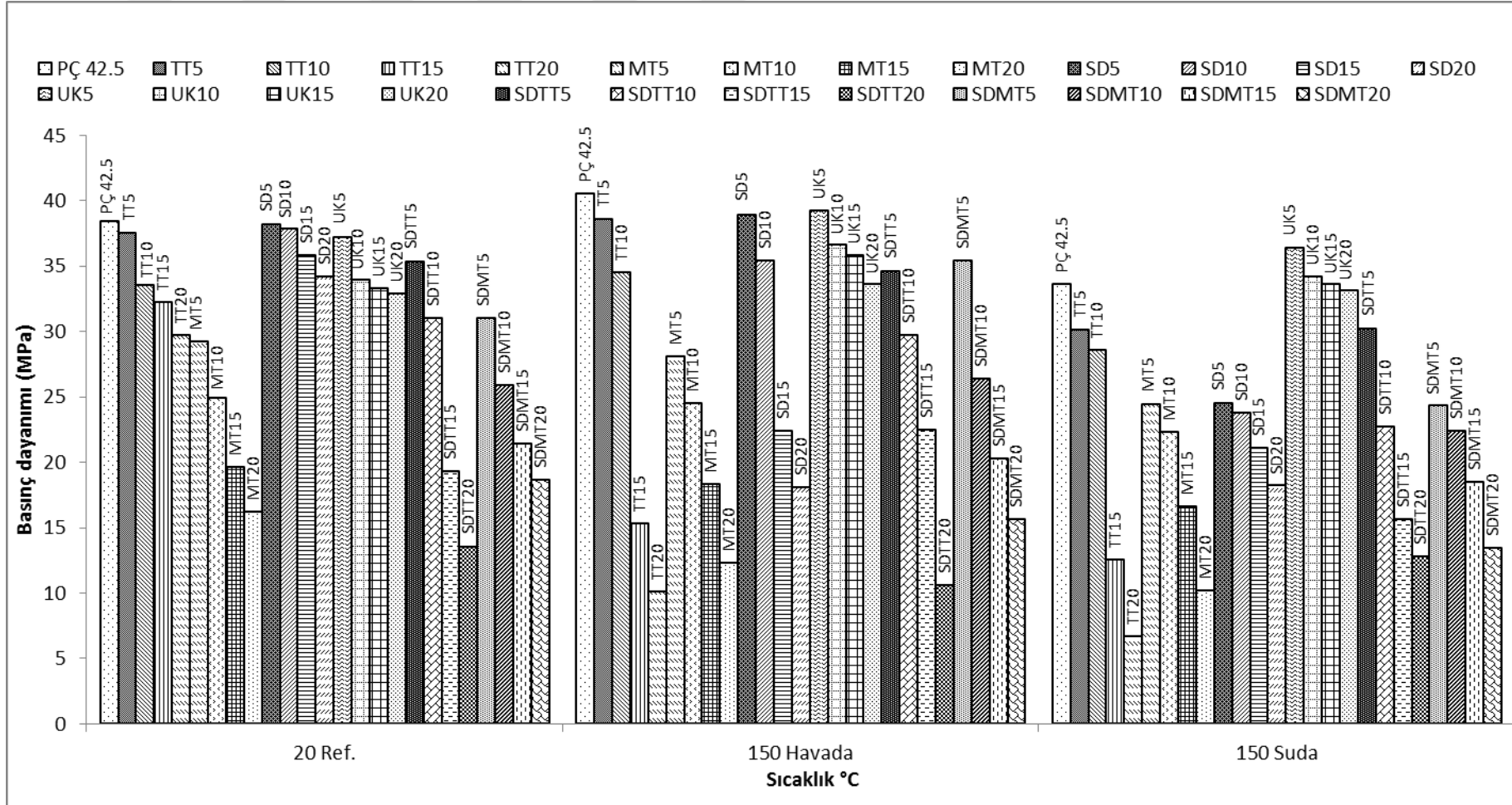
Yapılan araştırmalara göre çimentoda atık malzeme olarak daha çok uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Bu malzemeler hem erken yaşlarda hem de ileriki yaşlarda çimento harcının eğilme dayanımını arttırdığı gerçeği, yapılan bu deneysel çalışmada da desteklenmiştir.

4.4.2. Harçların basınç dayanımlarına TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT’nin etkisi

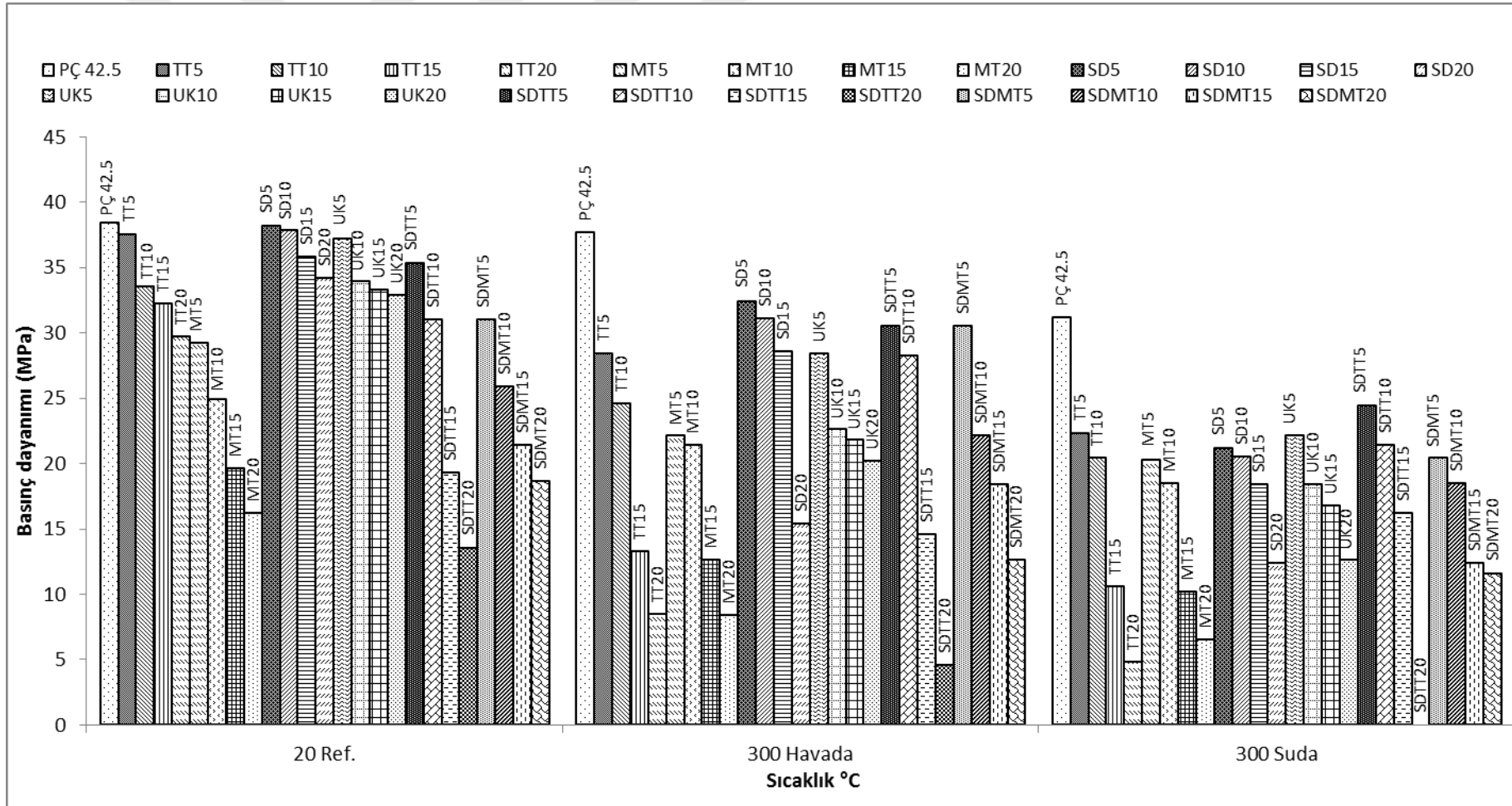
Laboratuvarda üretilen TT, MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimento harçlarının 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3’te, harçlarda çimento tipi ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 4.18 ile Şekil 4.26 arasında gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Çimento tiplerinin basınç dayanımları

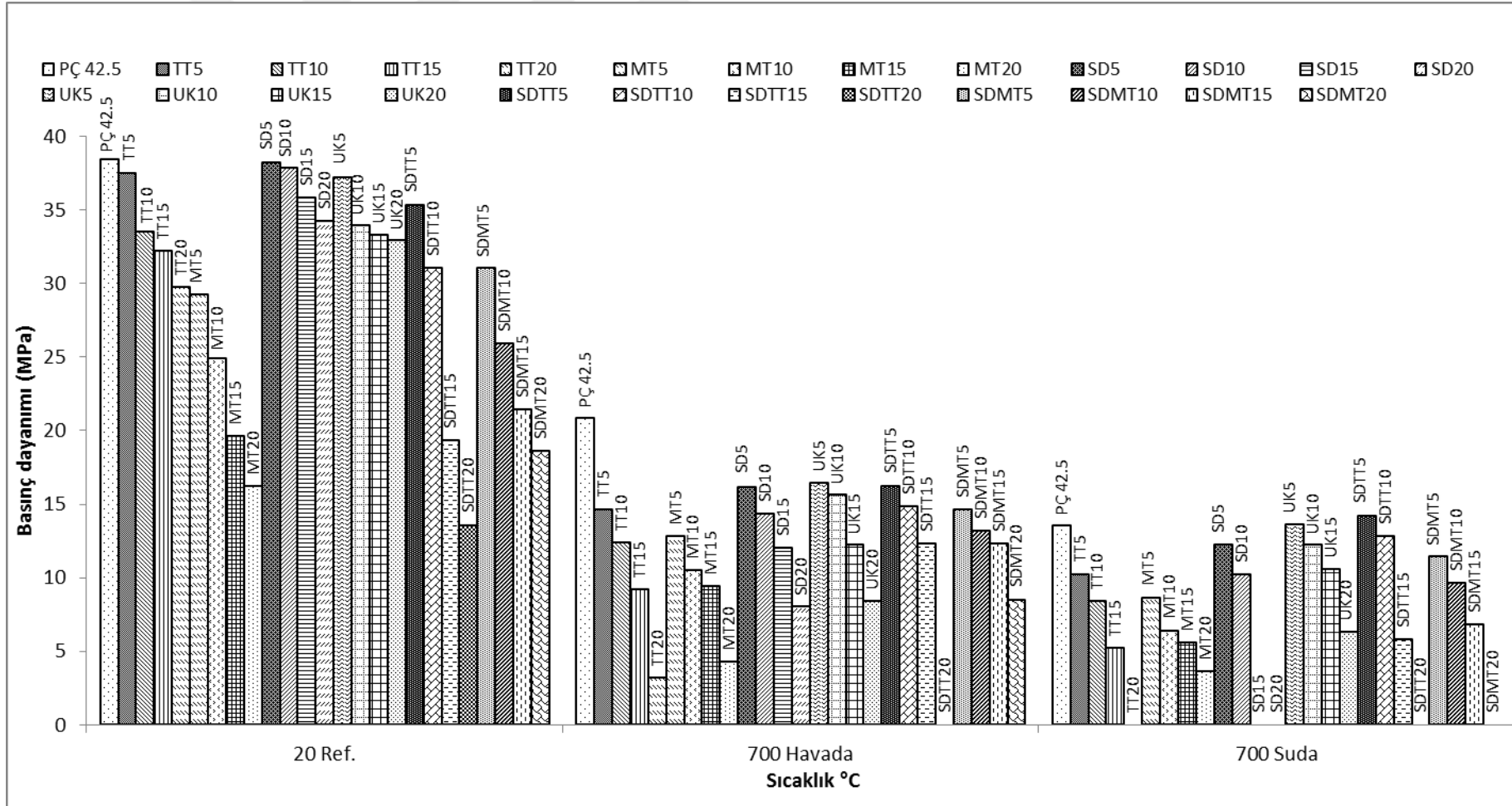
Basınç Dayanımı (MPa)																												
Koşullar	Gün	7									28									90								
	Soğutma uyg. Yüksek sıc. uyg. °C	20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda				20 (ref.)	Havada				Suda			
			150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900		150	300	700	900	150	300	700	900
Harç tipi	PÇ 42.5	38,4	40,5	37,7	20,8	18,4	33,6	31,2	13,5	10,5	41,2	43,2	39,6	31,4	28,6	36,6	34,3	16,7	14,8	51,5	54,3	52,3	38,2	32,2	52,2	44,6	34,0	29,6
	TT5	37,5	38,6	28,4	14,6	12,6	30,1	22,3	10,2	8,2	41,5	42,8	38,2	24,8	21,8	32,6	33,8	16,2	13,5	50,6	50,8	48,3	34,2	28,3	45,6	42,6	30,2	26,8
	TT10	33,5	34,5	24,6	12,4	10,8	28,6	20,4	8,4	6,5	40,2	42,3	34,5	22,6	20,6	28,2	26,8	14,3	12,6	49,5	48,2	38,5	30,2	26,5	38,3	34,6	24,6	22,5
	TT15	32,2	15,3	13,3	9,2	8,1	12,5	10,6	5,2	3,2	39,2	38,2	26,5	15,6	12,5	18,0	16,3	4,6	2,5	45,4	44,2	30,6	18,6	15,3	22,4	14,4	12,5	9,6
	TT20	29,7	10,1	8,5	3,2	2,2	6,7	4,8	0,0	0,0	36,2	26,5	20,4	0,0	0,0	16,5	12,3	0,0	0,0	39,2	39,3	24,3	9,5	7,6	10,8	0,0	0,0	0,0
	MT5	29,2	28,1	22,1	12,8	10,4	24,4	20,3	8,6	6,2	37,2	37,4	29,2	22,2	19,6	30,2	24,2	12,2	10,5	45,3	44,9	40,5	30,5	26,5	42,8	36,4	24,3	21,6
	MT10	24,9	24,5	21,4	10,5	8,6	22,3	18,5	6,4	4,4	33,6	33,8	24,6	18,4	16,2	26,5	20,3	10,8	8,5	43,2	42,2	38,6	26,8	22,5	34,6	32,2	18,5	15,6
	MT15	19,6	18,3	12,6	9,4	7,8	16,6	10,2	5,6	3,2	29,2	29,4	18,3	10,5	8,2	20,4	14,5	7,6	5,8	39,5	40,8	32,4	21,6	16,5	32,3	19,6	10,2	8,2
	MT20	16,2	12,3	8,4	4,3	2,6	10,2	6,5	3,6	0,0	24,2	24,6	16,5	8,5	6,2	15,8	7,6	6,4	4,2	35,4	28,5	18,5	9,6	8,2	18,6	12,6	8,4	5,8
	SD5	38,2	38,9	32,4	16,1	14,8	24,5	21,2	12,2	10,6	43,2	47,5	39,4	24,2	21,3	38,1	30,2	15,6	12,8	55,7	58,4	54,2	35,4	32,5	52,4	42,6	28,5	25,5
	SD10	37,8	35,4	31,1	14,3	12	23,8	20,5	10,2	7,4	42,6	48,2	40,5	22,1	18,5	40,4	29,6	14,8	11,5	54,1	57,3	51,4	36,3	33,5	49,5	38,4	30,2	27,8
	SD15	35,8	22,4	28,6	12,0	9,6	21,1	18,4	0,0	6,2	39,4	38,5	32,6	16,2	14,5	35,2	28,2	6,4	0,0	52,2	52,4	48,2	18,4	15,2	48,2	32,6	13,7	12,3
	SD20	34,2	18,1	15,4	8,0	7,8	18,2	12,4	0,0	0,0	37,2	30,0	31,3	0,0	0,0	34,5	25,4	0,0	0,0	50,1	49,3	39,5	2,8	0,0	35,4	22,1	4,6	0,0
	UK5	37,2	39,2	28,4	16,4	14,2	36,4	22,1	13,6	10,5	42,8	47,8	38,6	26,4	24,5	42,4	28,8	14,4	11,5	56,8	58,5	52,3	39,3	35,2	54,2	44,8	32,5	29,1
	UK10	33,9	36,6	22,6	15,6	13,2	34,2	18,4	12,2	9,8	41,4	46,2	36,2	24,3	22,1	42,2	26,4	12,2	10,2	55,4	56,0	48,5	36,2	32,3	50,3	40,5	29,6	25,0
	UK15	33,3	35,8	21,8	12,2	10,6	33,6	16,8	10,6	7,2	39,2	43,2	32,3	18,6	15,5	40,3	25,2	10,8	8,2	53,7	54,6	47,2	34,5	28,1	48,1	34,6	26,3	23,3
	UK20	32,9	33,6	20,2	8,4	6,5	33,1	12,6	6,3	5,1	33,9	40,1	29,5	14,6	12,6	34,2	18,3	7,5	5,2	53,3	53,3	39,2	22,1	16,3	42,2	24,6	10,7	7,6
	SDTT5	35,3	34,6	30,5	16,2	14,2	30,2	24,4	14,2	11,6	43,8	46,8	37,5	26,4	22,5	40,6	31,2	14,8	12,5	50,8	57,6	53,8	32,5	30,5	46,2	42,4	28,6	25,3
	SDTT10	31,0	29,7	28,2	14,8	12,6	22,7	21,4	12,8	10,2	42,2	45,6	36,5	24,3	19,6	36,4	24,6	12,5	10,6	52,2	42,6	48,6	24,5	21,3	38,8	36,8	21,5	18,2
	SDTT15	19,3	22,5	14,6	12,3	10,5	15,6	16,2	5,8	4,9	40,1	30,4	24,6	10,5	9,5	28,2	12,2	1,8	0,0	48,2	39,3	36,5	16,5	15,2	32,2	24,3	12,4	10,2
	SDTT20	13,5	10,6	4,6	0,0	0,0	12,8	0,0	0,0	0,0	35,5	22,1	10,8	0,0	0,0	18,4	0,0	0,0	0,0	39,9	13,4	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SDMT5	31,0	35,4	30,5	14,6	12,8	24,3	20,4	11,4	8,8	39,0	41,0	34,5	24,8	19,6	37,7	32,5	12,5	10,6	49,1	52,6	46,8	34,2	29,6	50,5	39,7	28,7	25,8
	SDMT10	25,9	26,4	22,1	13,2	10,2	22,4	18,5	9,6	7,2	35,9	34,5	32,3	21,8	16,5	32,3	28,5	10,6	8,5	46,2	47,0	40,5	33,6	25,3	42,6	36,2	24,5	23,2
	SDMT15	21,4	20,3	18,4	12,3	9,8	18,5	12,4	6,8	5,2	31,1	32,4	30,4	18,4	14,2	28,2	24,2	8,5	6,4	43,2	42,2	38,6	28,4	20,6	38,5	30,5	21,6	18,3
	SDMT20	18,6	15,6	12,6	8,5	0,0	13,4	11,6	0,0	0,0	27,1	25,6	18,5	8,4	6,8	16,8	16,8	4,2	2,2	39,7	35,6	28,2	12,3	9,6	26,6	18,5	12,0	9,2



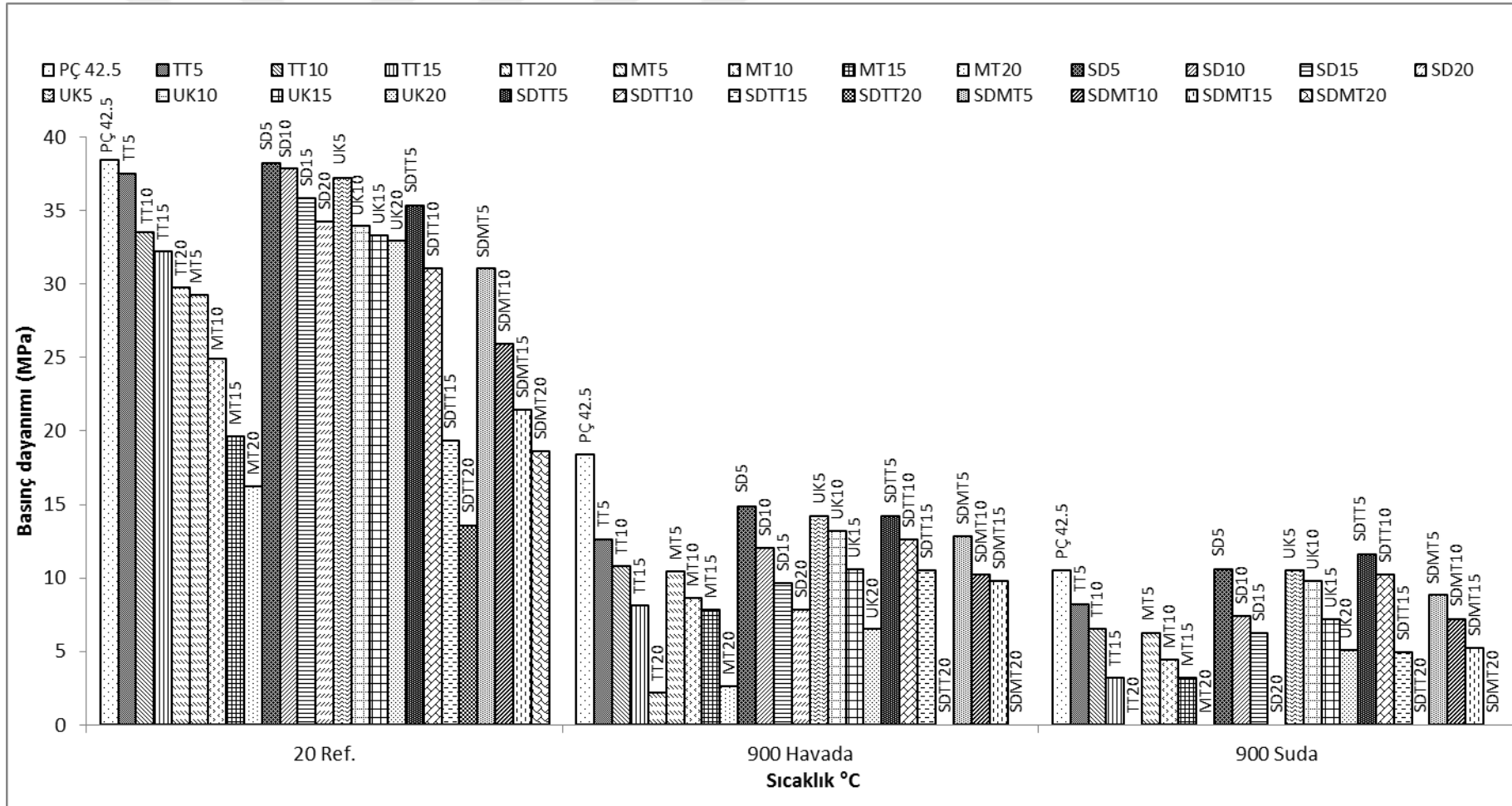
Şekil 4.21. 7 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.22. 7 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.23. 7 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.24. 7 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi

7. günde;

PÇ 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,5 arttığı, su ile soğutmada %12,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,8 azaldığı, su ile soğutmada %18,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %45,8 azaldığı, su ile soğutmada %64,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,1 azaldığı, su ile soğutmada %72,7 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,9 arttığı, su ile soğutmada %19,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,3 azaldığı, su ile soğutmada %40,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %61,1 azaldığı, su ile soğutmada %72,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %66,4 azaldığı, su ile soğutmada %78,1 azaldığı; TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,0 arttığı, su ile soğutmada %14,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,6 azaldığı, su ile soğutmada %39,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %63,0 azaldığı, su ile soğutmada %74,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %67,8 azaldığı, su ile soğutmada %80,6 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,5 azaldığı, su ile soğutmada %61,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %58,7 azaldığı, su ile soğutmada %67,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %71,4 azaldığı, su ile soğutmada %83,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,8 azaldığı, su ile soğutmada %90,1 azaldığı; TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %66 azaldığı, su ile soğutmada %77,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %71,4 azaldığı, su ile soğutmada %83,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %89,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %92,6 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,8 azaldığı, su ile soğutmada %16,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,3 azaldığı, su ile soğutmada %30,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,2 azaldığı, su ile soğutmada %70,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %64,4 azaldığı, su ile soğutmada %78,8 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,6 azaldığı, su ile soğutmada %10,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,1 azaldığı, su ile soğutmada %25,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %57,8 azaldığı, su ile soğutmada %74,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %65,5 azaldığı, su ile

soğutmada %82,3 azaldığı; MT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %6,6 azaldığı, su ile soğutmada %15,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %35,7 azaldığı, su ile soğutmada %48 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %52 azaldığı, su ile soğutmada %71,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %60,2 azaldığı, su ile soğutmada %83,7 azaldığı; MT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %24,1 azaldığı, su ile soğutmada %37 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %48,1 azaldığı, su ile soğutmada %59,9 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %73,5 azaldığı, su ile soğutmada %77,8 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %84 azaldığı;

SD5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %1,8 azaldığı, su ile soğutmada %35,9 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %15,2 azaldığı, su ile soğutmada %44,5 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %57,9 azaldığı, su ile soğutmada %68,1 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %61,3 azaldığı, su ile soğutmada %72,3 azaldığı; SD10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %6,3 azaldığı, su ile soğutmada %37 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %17,7 azaldığı, su ile soğutmada %45,8 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %62,2 azaldığı, su ile soğutmada %73 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %68,3 azaldığı, su ile soğutmada %80,4 azaldığı; SD15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %37,4 azaldığı, su ile soğutmada %41,1 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %20,1 azaldığı, su ile soğutmada %48,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %66,5 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %73,2 azaldığı, su ile soğutmada %82,7 azaldığı; SD20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %47,1 azaldığı, su ile soğutmada %46,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %55 azaldığı, su ile soğutmada %63,7 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %76,6 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %77,2 azaldığı;

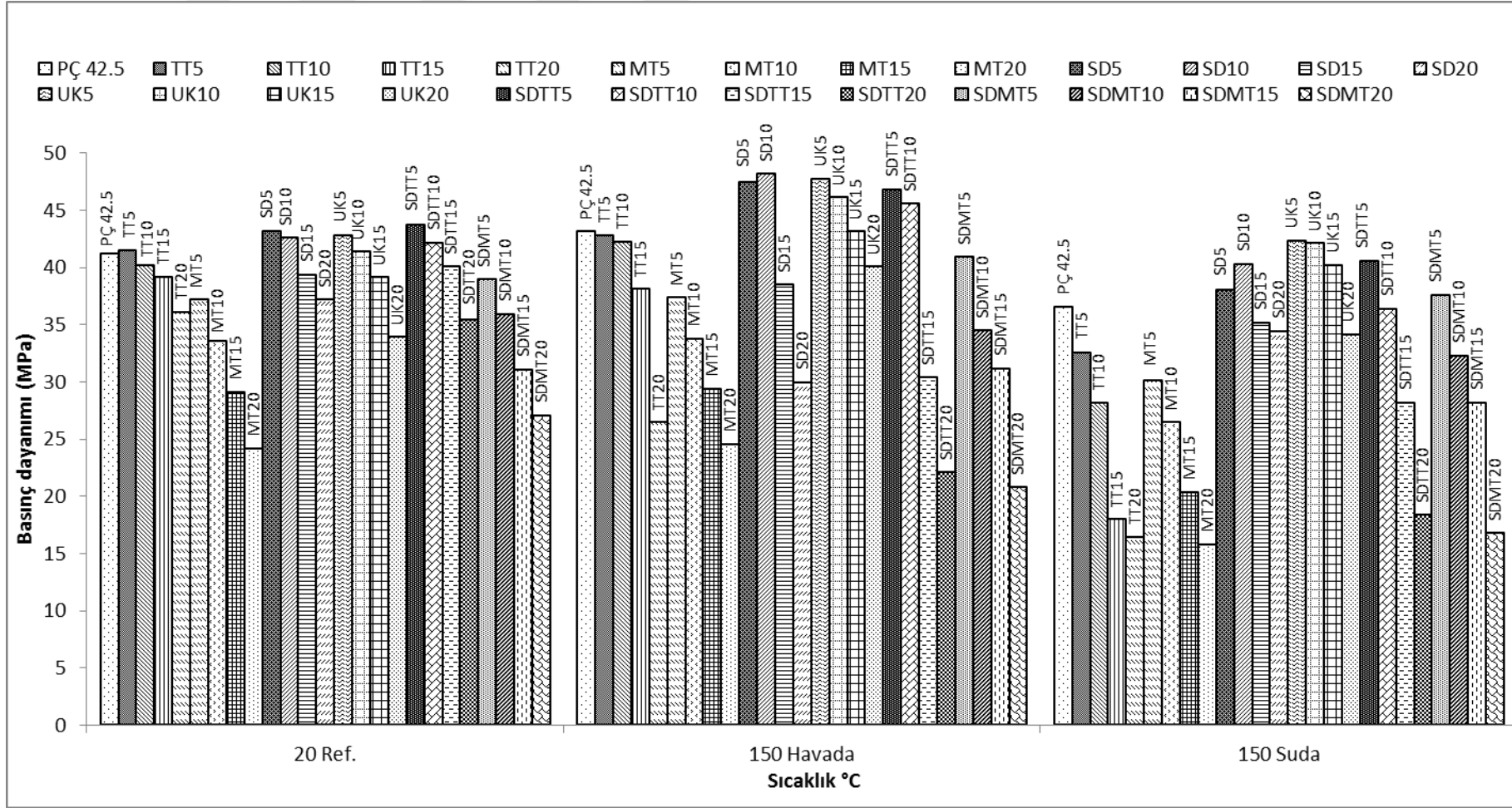
UK5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %5,4 arttığı, su ile soğutmada %2,2 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %23,7 azaldığı, su ile soğutmada %40,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %55,9 azaldığı, su ile soğutmada %63,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %61,8 azaldığı, su ile soğutmada %71,8 azaldığı; UK10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %8 arttığı, su ile soğutmada %0,9 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %33,3 azaldığı, su ile soğutmada

%45,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %54 azaldığı, su ile soğutmada %64 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %61,1 azaldığı, su ile soğutmada %71,1 azaldığı; UK15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %7,5 arttığı, su ile soğutmada %0,9 arttığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %34,5 azaldığı, su ile soğutmada %49,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %63,4 azaldığı, su ile soğutmada %68,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %68,2 azaldığı, su ile soğutmada %78,4 azaldığı; UK20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,1 arttığı, su ile soğutmada %0,6 arttığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %38,6 azaldığı, su ile soğutmada %61,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,5 azaldığı, su ile soğutmada %80,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80,2 azaldığı, su ile soğutmada %84,5 azaldığı;

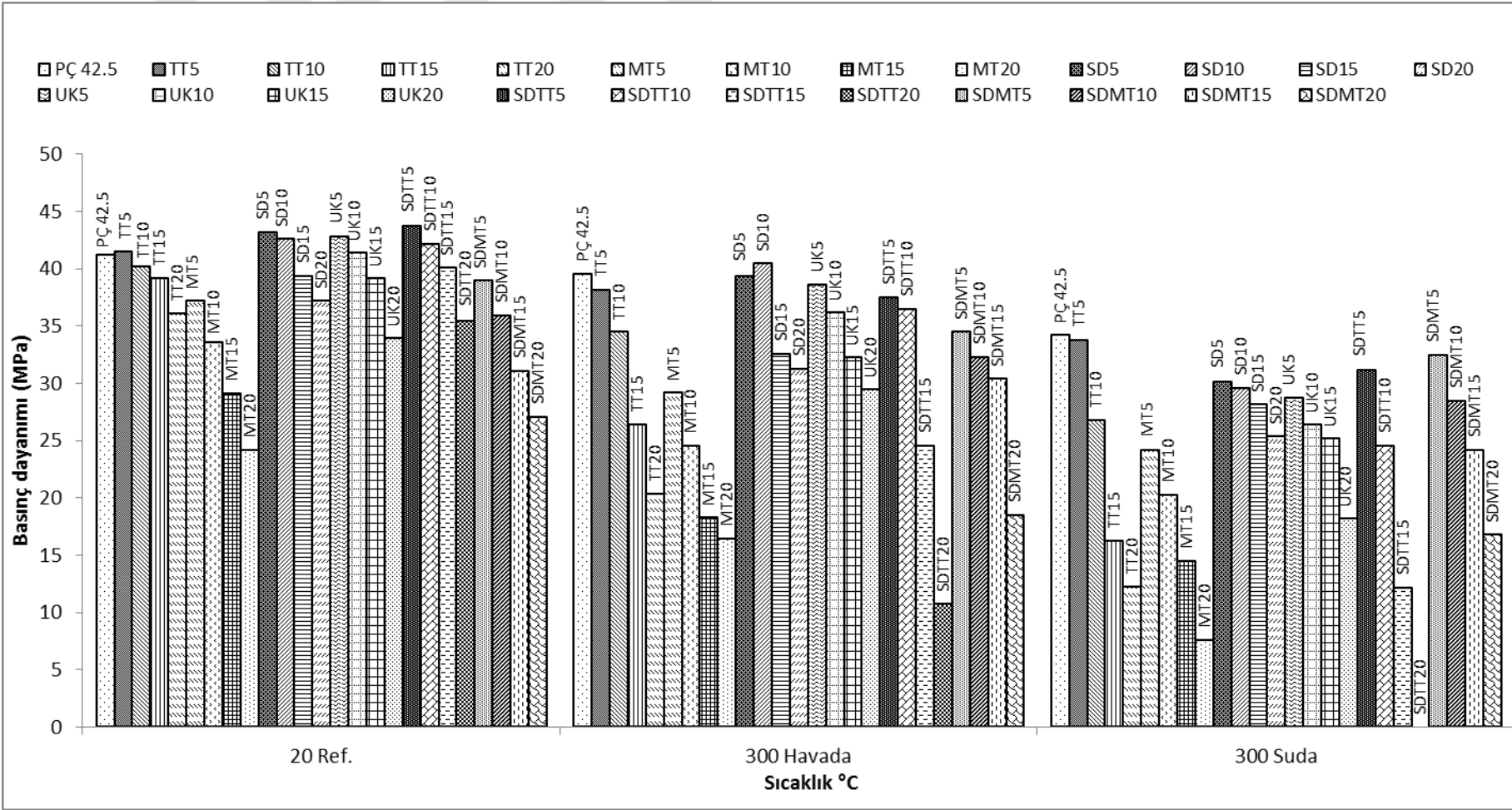
SDTT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,0 azaldığı, su ile soğutmada %14,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,6 azaldığı, su ile soğutmada %30,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %54,1 azaldığı, su ile soğutmada %59,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %59,8 azaldığı, su ile soğutmada %67,1 azaldığı; SDTT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,2 azaldığı, su ile soğutmada %26,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %9,0 azaldığı, su ile soğutmada %31,0 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,3 azaldığı, su ile soğutmada %58,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %59,4 azaldığı, su ile soğutmada %67,1 azaldığı; SDTT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %16,6 arttığı, su ile soğutmada %19,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,4 azaldığı, su ile soğutmada %16,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %36,3 azaldığı, su ile soğutmada %69,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %45,6 azaldığı, su ile soğutmada %74,6 azaldığı; SDTT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %21,5 azaldığı, su ile soğutmada %5,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %65,6 azaldığı;

SDMT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,2 arttığı, su ile soğutmada %21,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,6 azaldığı, su ile soğutmada %34,2 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,9 azaldığı, su ile soğutmada %63,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %58,7 azaldığı, su ile soğutmada %71,6 azaldığı; SDMT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,9 arttığı, su ile

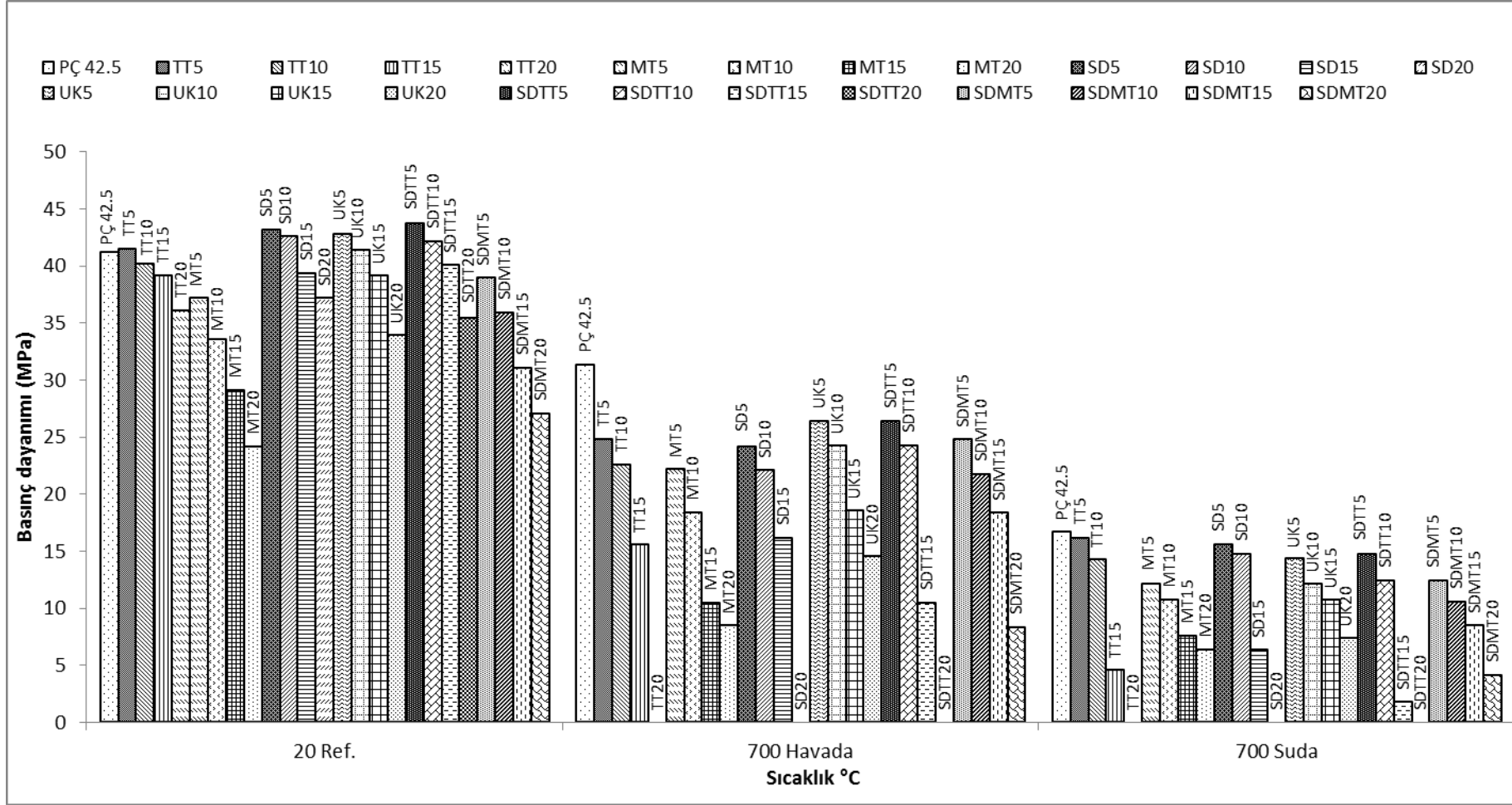
soğutmada %13,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,7 azaldığı, su ile soğutmada %28,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %49 azaldığı, su ile soğutmada %62,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %60,6 azaldığı, su ile soğutmada %72,2 azaldığı; SDMT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,1 azaldığı, su ile soğutmada %13,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14 azaldığı, su ile soğutmada %42,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %42,5 azaldığı, su ile soğutmada %68,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %54,2 azaldığı, su ile soğutmada %75,7 azaldığı; SDMT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %16,1 azaldığı, su ile soğutmada %28 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,3 azaldığı, su ile soğutmada %37,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %54,3 azaldığı bulunmuştur.



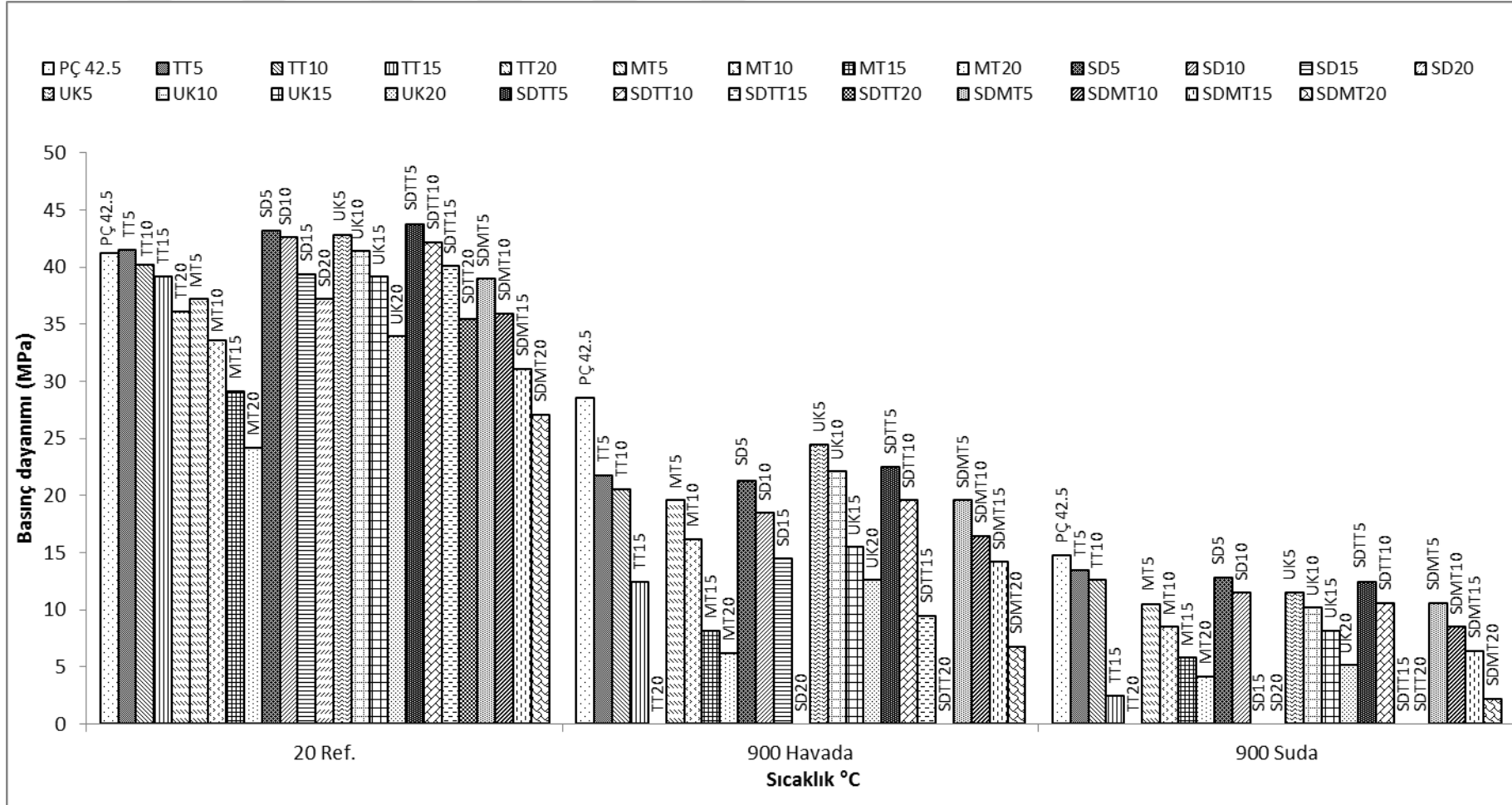
Şekil 4.25. 28 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.26. 28 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.27. 28 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.28. 28 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi

28. günde;

PÇ 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,9 arttığı, su ile soğutmada %11,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,9 azaldığı, su ile soğutmada %16,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %23,8 azaldığı, su ile soğutmada %59,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %30,6 azaldığı, su ile soğutmada %64,1 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,1 arttığı, su ile soğutmada %21,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %8 azaldığı, su ile soğutmada %18,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %42,2 azaldığı, su ile soğutmada %61 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,5 azaldığı, su ile soğutmada %67,5 azaldığı; TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,2 arttığı, su ile soğutmada %29,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,2 azaldığı, su ile soğutmada %33,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %43,8 azaldığı, su ile soğutmada %64,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %48,8 azaldığı, su ile soğutmada %68,7 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,6 azaldığı, su ile soğutmada %54,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,4 azaldığı, su ile soğutmada %58,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %60,2 azaldığı su ile soğutmada %88,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %68,1 azaldığı, su ile soğutmada %93,6 azaldığı; TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,8 azaldığı, su ile soğutmada %54,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %43,6 azaldığı, su ile soğutmada %66 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,5 arttığı, su ile soğutmada %18,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %21,5 azaldığı, su ile soğutmada %34,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %40,3 azaldığı, su ile soğutmada %67,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,3 azaldığı, su ile soğutmada %71,8 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,6 arttığı, su ile soğutmada %21,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,8 azaldığı, su ile soğutmada %39,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %45,2 azaldığı, su ile soğutmada %67,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %51,8 azaldığı, su ile

soğutmada %74,7 azaldığı; MT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %0,7 arttığı, su ile soğutmada %30,1 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %37,3 azaldığı, su ile soğutmada % 50,3 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %64 azaldığı, su ile soğutmada %74 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %71,9 azaldığı, su ile soğutmada %80,1 azaldığı; MT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %1,7 arttığı, su ile soğutmada %34,7 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %31,8 azaldığı, su ile soğutmada %68,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %64,9 azaldığı, su ile soğutmada %73,6 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %74,4 azaldığı, su ile soğutmada %82,6 azaldığı;

SD5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %10 arttığı, su ile soğutmada %11,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %8,8 azaldığı, su ile soğutmada %30,1 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %44 azaldığı, su ile soğutmada %63,9 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %50,7 azaldığı, su ile soğutmada %70,4 azaldığı; SD10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %13,1 arttığı, su ile soğutmada %5,2 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %4,9 azaldığı, su ile soğutmada %30,5 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %48,1 azaldığı, su ile soğutmada %65,3 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %56,6 azaldığı, su ile soğutmada %73 azaldığı; SD15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %2,3 azaldığı, su ile soğutmada %10,7 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %17,3 azaldığı, su ile soğutmada %28,4 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %58,9 azaldığı, su ile soğutmada %83,8 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %63,2 azaldığı; SD20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %19,4 azaldığı, su ile soğutmada %7,3 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %15,9 azaldığı, su ile soğutmada %31,7 azaldığı;

UK5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %11,7 arttığı, su ile soğutmada %0,9 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %9,8 azaldığı, su ile soğutmada %32,7 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %38,3 azaldığı, su ile soğutmada %66,4 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %42,8 azaldığı, su ile soğutmada %73,1 azaldığı; UK10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %11,6 arttığı, su ile soğutmada %1,9 arttığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %12,6 azaldığı, su ile soğutmada %36,2 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %41,3 azaldığı, su ile

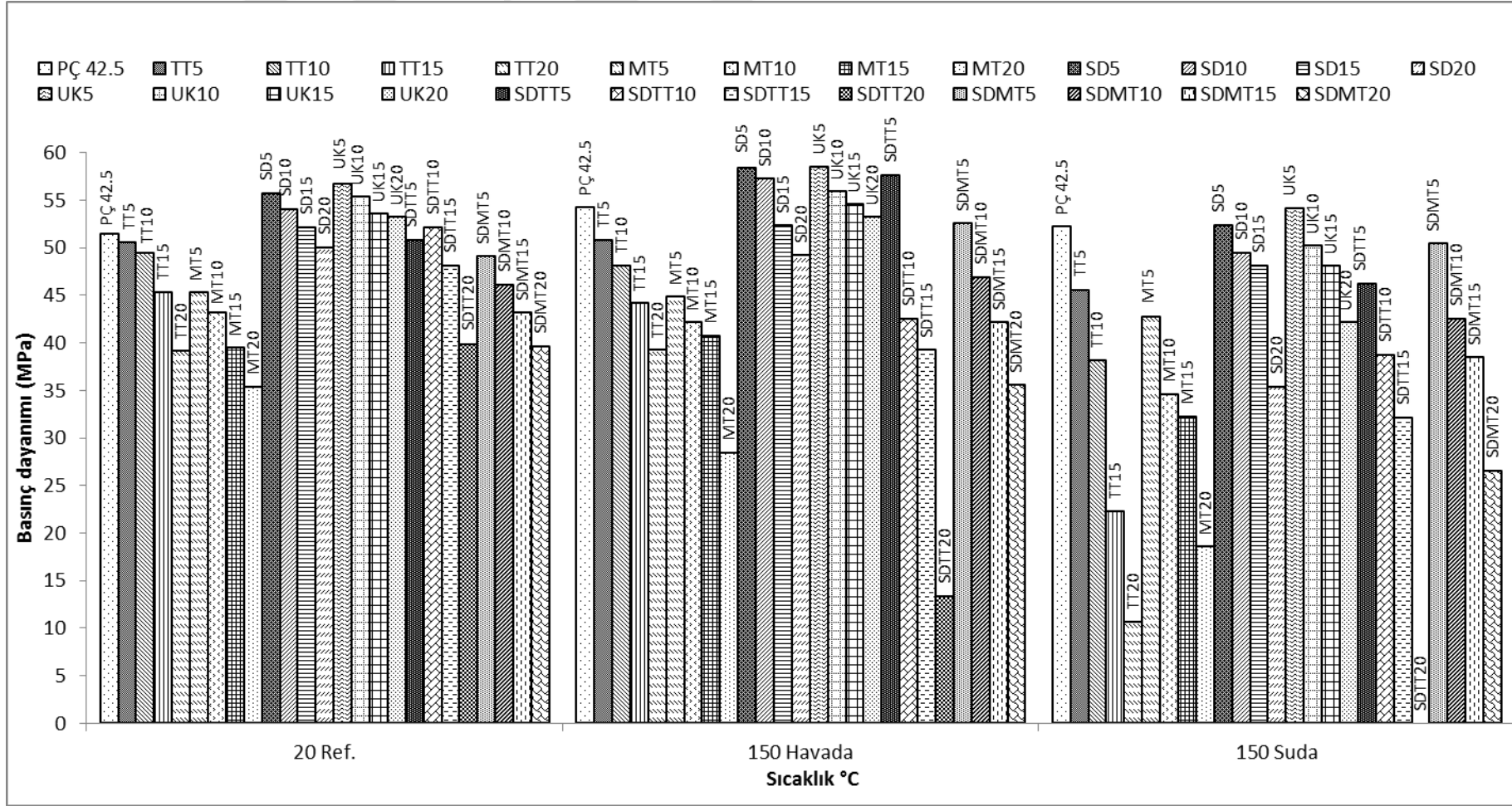
soğutmada %70,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %46,6 azaldığı, su ile soğutmada %75,4 azaldığı; UK15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %10,2 arttığı, su ile soğutmada %2,8 arttığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %17,6 azaldığı, su ile soğutmada %35,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %52,6 azaldığı, su ile soğutmada %72,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %60,5 azaldığı, su ile soğutmada %79,1 azaldığı; UK20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %18,3 arttığı, su ile soğutmada %0,9 arttığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %13 azaldığı, su ile soğutmada %46 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %56,9 azaldığı, su ile soğutmada %77,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %62,8 azaldığı, su ile soğutmada %84,7 azaldığı;

SDTT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %6,8 arttığı, su ile soğutmada %7,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %14,4 azaldığı, su ile soğutmada %28,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %39,7 azaldığı, su ile soğutmada %66,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %48,6 azaldığı, su ile soğutmada %71,5 azaldığı; SDTT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %8,1 arttığı, su ile soğutmada %13,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,5 azaldığı, su ile soğutmada %41,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %42,4 azaldığı, su ile soğutmada %70,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %53,6 azaldığı, su ile soğutmada %74,9 azaldığı; SDTT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,2 azaldığı, su ile soğutmada %29,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %38,7 azaldığı, su ile soğutmada %69,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %73,8 azaldığı, su ile soğutmada %95,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %76,3 azaldığı; SDTT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %37,7 azaldığı, su ile soğutmada %48,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %69,6 azaldığı;

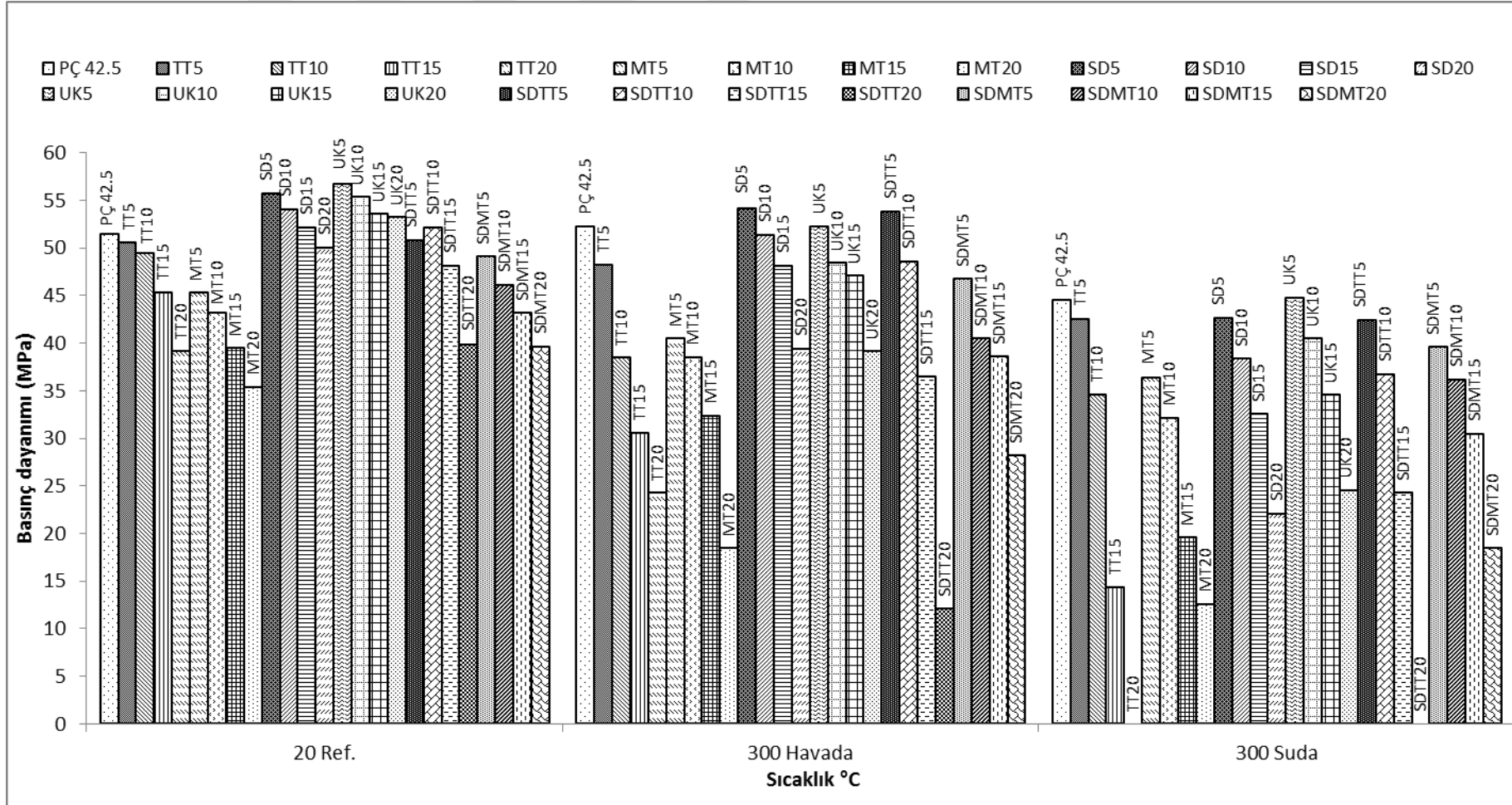
SDMT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,1 arttığı, su ile soğutmada %3,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %11,5 azaldığı, su ile soğutmada %16,7 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %36,4 azaldığı, su ile soğutmada %67,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %49,7 azaldığı, su ile soğutmada %72,8 azaldığı; SDMT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,9 azaldığı, su ile soğutmada %10 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %10 azaldığı, su ile soğutmada %20,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %39,3 azaldığı, su ile

soğutmada %70,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %54 azaldığı, su ile soğutmada %76,3 azaldığı; SDMT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,2 arttığı, su ile soğutmada %9,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,3 azaldığı, su ile soğutmada %22,2 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %40,8 azaldığı; su ile soğutmada %72,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %54,3 azaldığı, su ile soğutmada %79,4 azaldığı; SDMT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,5 azaldığı, su ile soğutmada %38 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %31,7 azaldığı, su ile soğutmada %38 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %69 azaldığı, su ile soğutmada %84,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %74,9 azaldığı, su ile soğutmada %91,9 azaldığı bulunmuştur.

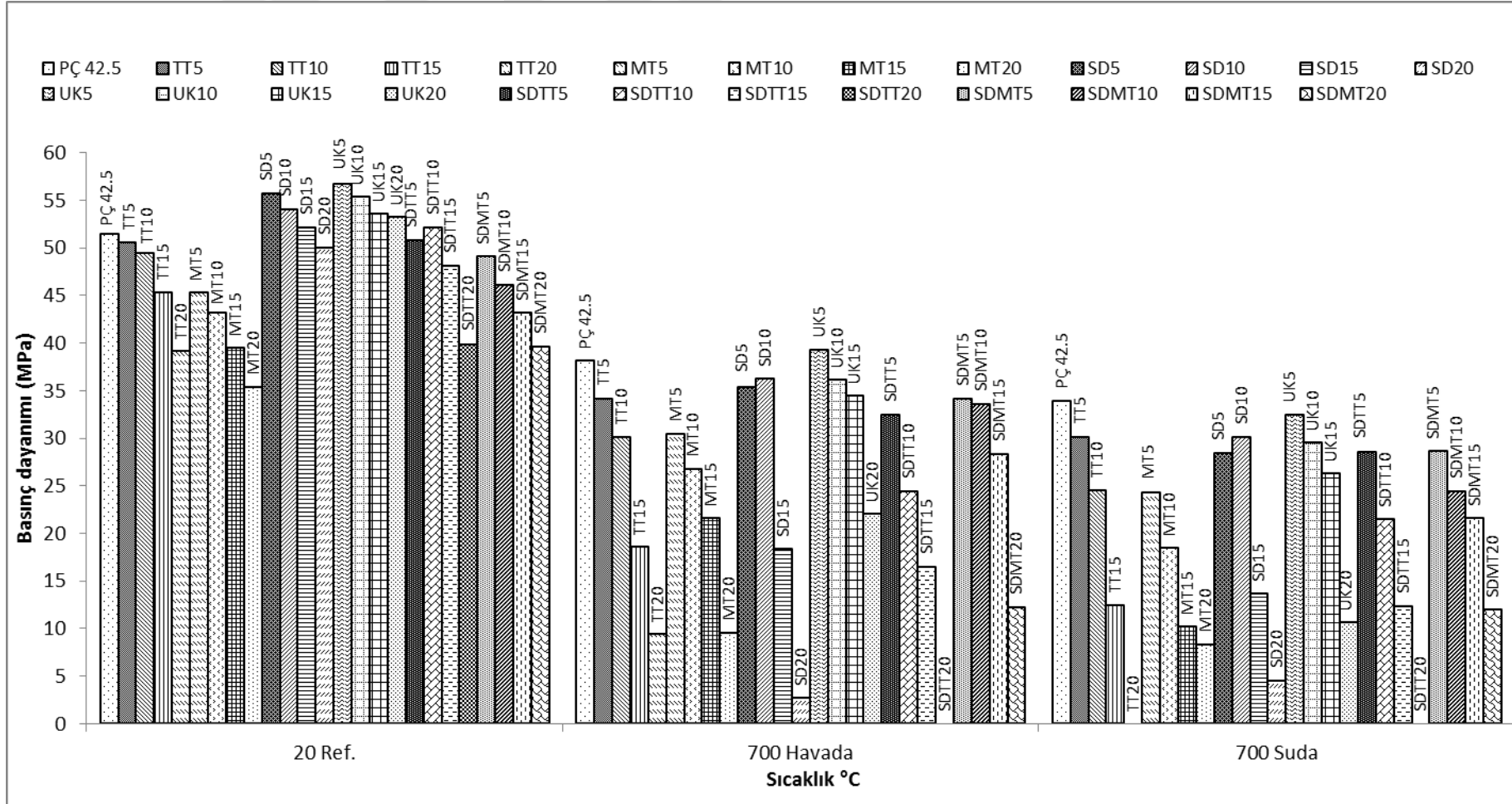




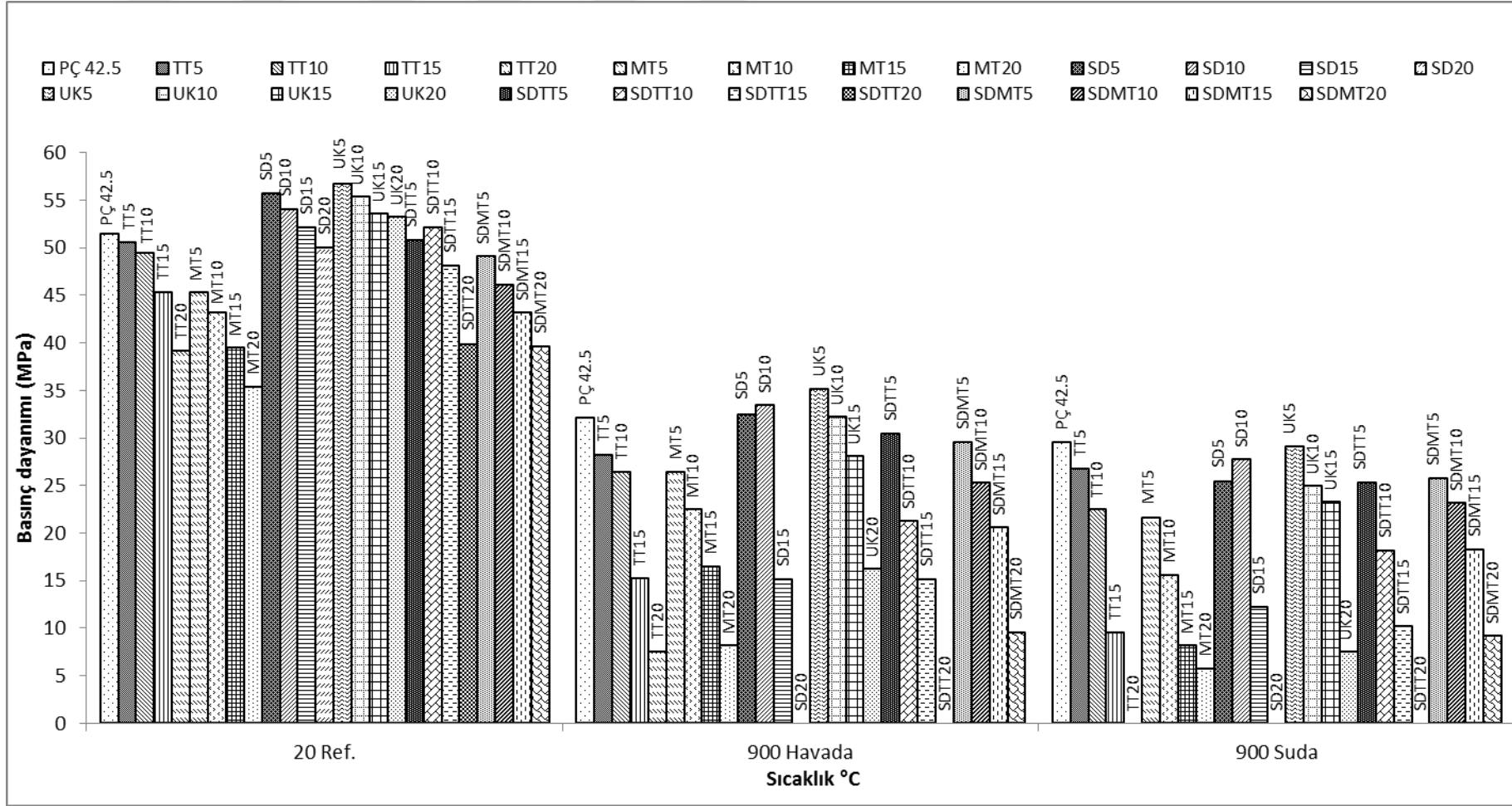
Şekil 4.29. 90 günlük 150 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.30. 90 günlük 300 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.31. 90 günlük 700 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.32. 90 günlük 900 °C sıcaklıkta harçlarda çimento tipi ile basınç dayanımı ilişkisi

90. günde;

PÇ 42.5 kontrol çimentosunun 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,4 arttığı, su ile soğutmada %1,4 arttığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,6 arttığı, su ile soğutmada %13,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %25,8 azaldığı, su ile soğutmada %34 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %37,5 azaldığı, su ile soğutmada %42,5 azaldığı;

TT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,4 arttığı, su ile soğutmada %9,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,5 azaldığı, su ile soğutmada %15,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,4 azaldığı, su ile soğutmada %40,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %44,1 azaldığı, su ile soğutmada %47 azaldığı; TT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,6 azaldığı, su ile soğutmada %22,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %22,2 azaldığı, su ile soğutmada %30,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %39 azaldığı, su ile soğutmada %50,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %46,5 azaldığı, su ile soğutmada %54,5 azaldığı; TT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,6 azaldığı, su ile soğutmada %50,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,6 azaldığı, su ile soğutmada %68,3 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %59 azaldığı, su ile soğutmada %72,5 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %66,3 azaldığı, su ile soğutmada %78,9 azaldığı;

TT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,3 arttığı, su ile soğutmada %72,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %38 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %75,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %80,6 azaldığı;

MT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,9 azaldığı, su ile soğutmada %5,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %10,6 azaldığı, su ile soğutmada %19,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,7 azaldığı, su ile soğutmada %46,4 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,5 azaldığı, su ile soğutmada %52,3 azaldığı; MT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada

%2,3 azaldığı, su ile soğutmada %19,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %10,6 azaldığı, su ile soğutmada %25,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %38 azaldığı, su ile soğutmada %57,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,9 azaldığı, su ile soğutmada %63,9 azaldığı; MT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3,3 arttığı, su ile soğutmada %18,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %18 azaldığı, su ile soğutmada %50,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %45,3 azaldığı, su ile soğutmada %74,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %58,2 azaldığı, su ile soğutmada %79,2 azaldığı; MT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %19,5 azaldığı, su ile soğutmada %47,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,7 azaldığı, su ile soğutmada %64,4 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %72,9 azaldığı, su ile soğutmada %76,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %76,8 azaldığı, su ile soğutmada %83,6 azaldığı;

SD5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %4,8 arttığı, su ile soğutmada %5,9 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %2,7 azaldığı, su ile soğutmada %23,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %36,4 azaldığı, su ile soğutmada %48,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,7 azaldığı, su ile soğutmada %54,2 azaldığı; SD10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,9 arttığı, su ile soğutmada %8,5 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,0 azaldığı, su ile soğutmada %29 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %32,9 azaldığı, su ile soğutmada %44,2 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %38,1 azaldığı, su ile soğutmada %48,6 azaldığı; SD15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %0,4 arttığı, su ile soğutmada %7,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %7,7 azaldığı, su ile soğutmada %37,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %64,8 azaldığı, su ile soğutmada %73,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %70,9 azaldığı, su ile soğutmada %76,4 azaldığı; SD20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,6 azaldığı, su ile soğutmada %29,3 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %21,2 azaldığı, su ile soğutmada %55,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %94,4 azaldığı, su ile soğutmada %90,8 azaldığı;

UK5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %3 arttığı, su ile soğutmada %4,6 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %7,9 azaldığı, su ile soğutmada

%21,1 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %30,8 azaldığı, su ile soğutmada %42,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %38 azaldığı, su ile soğutmada %48,8 azaldığı; UK10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,1 arttığı, su ile soğutmada % 9,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,5 azaldığı, su ile soğutmada %26,9 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %34,7 azaldığı, su ile soğutmada %46,6 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %41,7 azaldığı, su ile soğutmada %54,9 azaldığı; UK15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %1,7 arttığı, su ile soğutmada %10,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %12,1 azaldığı, su ile soğutmada %35,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %35,78 azaldığı, su ile soğutmada %51 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %47,7 azaldığı, su ile soğutmada %56,6 azaldığı; UK20’nin 150 °C’de, referansa göre su ile soğutmada %20,8 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %26,5 azaldığı su ile soğutmada %53,8 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %58,5 azaldığı su ile soğutmada %79,9 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %69,4 azaldığı, su ile soğutmada %85,7 azaldığı;

SDTT5’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %13,4 arttığı, su ile soğutmada %9,1 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %5,9 arttığı, su ile soğutmada %16,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %36 azaldığı, su ile soğutmada %43,7 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %40 azaldığı, su ile soğutmada %50,2 azaldığı; SDTT10’un 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %18,4 azaldığı, su ile soğutmada %25,7 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %6,9 azaldığı, su ile soğutmada %29,5 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %53,1 azaldığı, su ile soğutmada %58,8 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %59,2 azaldığı, su ile soğutmada %65 azaldığı; SDTT15’in 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %18,5 azaldığı, su ile soğutmada %33,2 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %24,3 azaldığı, su ile soğutmada %49,6 azaldığı; 700 °C’de, referansa göre havada soğumada %65,8 azaldığı, su ile soğutmada %74,3 azaldığı; 900 °C’de, referansa göre havada soğumada %68,5 azaldığı, su ile soğutmada %78,8 azaldığı; SDTT20’nin 150 °C’de, referansa göre havada soğumada %66,4 azaldığı; 300 °C’de, referansa göre havada soğumada %69,7 azaldığı;

SDMT5'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %7,1 arttığı, su ile soğutmada %2,9 arttığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %4,7 azaldığı, su ile soğutmada %19,1 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %30,3 azaldığı, su ile soğutmada %41,5 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %39,7 azaldığı, su ile soğutmada %47,5 azaldığı; SDMT10'un 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %1,7 arttığı, su ile soğutmada %7,8 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %12,3 azaldığı, su ile soğutmada %21,6 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %27,3 azaldığı, su ile soğutmada %47 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %45,2 azaldığı, su ile soğutmada %49,8 azaldığı; SDMT15'in 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %2,3 azaldığı, su ile soğutmada %10,9 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %10,6 azaldığı, su ile soğutmada %29,4 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %34,3 azaldığı, su ile soğutmada %50 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %52,3 azaldığı, su ile soğutmada %57,6 azaldığı; SDMT20'nin 150 °C'de, referansa göre havada soğumada %10,3 azaldığı, su ile soğutmada %33 azaldığı; 300 °C'de, referansa göre havada soğumada %29 azaldığı, su ile soğutmada %53,4 azaldığı; 700 °C'de, referansa göre havada soğumada %69 azaldığı, su ile soğutmada %69,8 azaldığı; 900 °C'de, referansa göre havada soğumada %75,8 azaldığı, su ile soğutmada %76,8 azaldığı; azaldığı bulunmuştur.

Yapılan deneysel çalışmada bazı sıcaklık değerlerinde referans örneğine göre basınç dayanımı daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Basınç dayanımları artış gösteren harç örneklerinin SD, MT, UK ve TT katkılı harç örneklerinin olması bu mineral katkılarının harç örneklerindeki boşluk miktarını azaltmasının yanında mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.

4.5. Harçların İstatistiksel Değerlendirmesi

4.5.1. Harçların eğilme dayanımları ile ilgili istatistiksel değerlendirme

Suda soğutma uygulaması

Tüm yaşlarda PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı göre 150, 300, 700 ve 900 °C sıcaklıklarda eğilme dayanımları azalmaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak eğilme dayanımları azaldığı için istatistiksel değerlendirme yapılmamıştır.

Havada soğutma uygulaması

Çizelge 4.4. Harç tiplerinin eğilme dayanımlarının gün ve sıcaklık bazında değerlendirilmesi

Gün	Eğilme Dayanımı	N	X±S.S (ortalama±standart sapma)	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
7	20°C (ref.)	25	5,4596±0,81481	-	-	-
	150°C	25	4,8848±1,00176	t=2,226	p=0,031	Anlamlı
	300°C	25	4,1140±1,00820	t=5,190	p=0,001	Anlamlı
	700°C	25	2,3060±0,93831	t=12,688	p<0.001	Anlamlı
	900°C	25	-	-	-	-
28	20°C (ref.)	25	7,2296±1,15226	-	-	-
	150°C	25	7,0528±1,37653	t=0,492	p=0,625	Anlamsız
	300°C	25	5,8552±1,33685	t=3,894	p<0,001	Anlamlı
	700°C	25	3,6452±1,28818	t=10,370	p<0.001	Anlamlı
	900°C	25	-	-	-	-
90	20°C (ref.)	25	8,7088±1,46464	-	-	-
	150°C	25	8,5028±1,72054	t=0,456	p=0,651	Anlamsız
	300°C	25	7,0284±1,82534	t=3,590	p=0,001	Anlamlı
	700°C	25	4,8040±1,33499	t=9,852	p<0.001	Anlamlı
	900°C	25	-	-	-	-

Çizelge 4.4. incelendiğinde;

7.günde harçların farklı sıcaklıklardaki eğilme dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleye ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik

ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanılğı payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 7.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 7.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

28.günde harçların farklı sıcaklıklardaki eğilme dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleyle ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanılğı payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 28. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 28. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

90.günde harçların farklı sıcaklıklardaki eğilme dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleye ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanılğı payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 90. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 90. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

Çizelge 4.5. ile 4.7. arası incelendiğinde;

7, 28 ve 90. günlerde harçların eğilme dayanımlarındaki değişim 150°C bir miktar artış göstermesine rağmen bu artışın istatistiksel açıdan önemsiz, diğer gün ve sıcaklıklarda ise istatistiksel açıdan önemli kabul edilebilir bir azalışın olduğu özellikle 900°C de elde edilen verilerin sayıca yeterli olmadığından ve çıkan sonuçların sıfıra yakın değerler olması neticesinde istatistiksel açıdan test edilemediği %95 güvenle söylenebilir.

Çizelge 4.5. Harç tiplerinin 7.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

7.gün Eğilme Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	5,437±1,86			
TT5	4	4,900±1,75	t=0,419	p=0,690	Anlamsız
TT10	4	4,550±1,73	t=0,697	p=0,512	Anlamsız
TT15	4	4,100±1,49	t=1,119	p=0,306	Anlamsız
TT20	4	2,537±1,83	t=2,214	p=0,069	Anlamsız
MT5	4	4,112±1,46	t=1,116	p=0,307	Anlamsız
MT10	4	4,162±1,12	t=1,170	p=0,286	Anlamsız
MT15	4	3,332±1,39	t=1,808	p=0,121	Anlamsız
MT20	4	2,772±1,26	t=2,366	p=0,056	Anlamsız
SD5	4	4,962±1,80	t=0,366	p=0,727	Anlamsız
SD10	4	5,262±1,33	t=0,153	p=0,884	Anlamsız
SD15	4	4,797±1,66	t=0,512	p=0,627	Anlamsız
SD20	4	3,825±1,33	t=1,403	p=0,210	Anlamsız
UK5	4	4,747±1,13	t=0,631	p=0,551	Anlamsız
UK10	4	4,730±1,11	t=0,650	p=0,540	Anlamsız
UK15	4	4,162±1,34	t=1,109	p=0,310	Anlamsız
UK20	4	3,440±1,09	t=1,846	p=0,114	Anlamsız
SDTT5	4	5,200±1,00	t=0,224	p=0,830	Anlamsız
SDTT10	4	4,692±1,21	t=0,669	p=0,529	Anlamsız
SDTT15	4	3,797±0,62	t=1,665	p=0,147	Anlamsız
SDTT20	4	2,862±0,88	t=2,495	p=0,047	Anlamlı
SDMT5	4	4,932±1,63	t=0,401	p=0,703	Anlamsız
SDMT10	4	4,782±1,19	t=0,591	p=0,576	Anlamsız
SDMT15	4	4,147±1,49	t=1,078	p=0,322	Anlamsız
SDMT20	4	2,530±2,04	t=2,099	p=0,081	Anlamsız

Çizelge 4.6. Harç tiplerinin 28.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

28. gün Eğilme Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	7,150±2,20			
TT5	4	6,837±2,30	t=0,196	p=0,851	Anlamsız
TT10	4	6,512±1,75	t=0,453	p=0,667	Anlamsız
TT15	4	6,037±1,84	t=0,775	p=0,468	Anlamsız
TT20	4	4,275±2,01	t=1,926	p=0,102	Anlamsız
MT5	4	5,437±1,47	t=1,292	p=0,244	Anlamsız
MT10	4	5,235±1,15	t=1,418	p=0,206	Anlamsız
MT15	4	4,642±0,83	t=2,129	p=0,077	Anlamsız
MT20	4	3,700±1,06	t=2,824	p=0,030	Anlamlı
SD5	4	6,297±1,71	t=0,612	p=0,563	Anlamsız
SD10	4	7,890±1,19	t=-0,590	p=0,576	Anlamsız
SD15	4	5,957±1,53	t=0,888	p=0,409	Anlamsız
SD20	4	4,240±2,92	t=1,589	p=0,163	Anlamsız
UK5	4	7,030±2,21	t=0,077	p=0,941	Anlamsız
UK10	4	6,775±1,64	t=0,273	p=0,794	Anlamsız
UK15	4	6,407±1,50	t=0,557	p=0,598	Anlamsız
UK20	4	4,752±1,08	t=1,953	p=0,099	Anlamsız
SDTT5	4	6,935±2,25	t=0,136	p=0,896	Anlamsız
SDTT10	4	7,907±1,47	t=-0,572	p=0,588	Anlamsız
SDTT15	4	5,562±1,81	t=0,412	p=0,695	Anlamsız
SDTT20	4	5,157±1,61	t=1,459	p=0,195	Anlamsız
SDMT5	4	6,290±1,87	t=0,595	p=0,573	Anlamsız
SDMT10	4	7,010±1,06	t=0,115	p=0,913	Anlamsız
SDMT15	4	5,612±1,43	t=1,170	p=0,286	Anlamsız
SDMT20	4	3,990±1,54	t=2,349	p=0,057	Anlamsız

Çizelge 4.7. Harç tiplerinin 90.günde eğilme dayanımlarının değerlendirilmesi

90. gün Eğilme Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	8,725±1,68			
TT5	4	8,200±1,58	t=0,454	p=0,666	Anlamsız
TT10	4	7,700±1,26	t=0,972	p=0,369	Anlamsız
TT15	4	6,050±2,70	t=1,678	p=0,144	Anlamsız
TT20	4	4,762±2,01	t=3,013	p=0,024	Anlamlı
MT5	4	6,850±0,90	t=1,962	p=0,097	Anlamsız
MT10	4	6,067±1,54	t=2,321	p=0,059	Anlamsız
MT15	4	5,602±1,29	t=2,934	p=0,026	Anlamlı
MT20	4	4,500±0,76	t=4,565	p=0,004	Anlamlı
SD5	4	9,062±2,00	t=-0,258	p=0,805	Anlamsız
SD10	4	9,062±2,13	t=-0,248	p=0,812	Anlamsız
SD15	4	8,100±2,01	t=0,476	p=0,651	Anlamsız
SD20	4	6,947±2,53	t=1,166	p=0,288	Anlamsız
UK5	4	7,225±2,26	t=1,063	p=0,329	Anlamsız
UK10	4	7,725±1,83	t=0,802	p=0,453	Anlamsız
UK15	4	8,325±1,25	t=0,380	p=0,717	Anlamsız
UK20	4	5,762±2,29	t=2,078	p=0,083	Anlamsız
SDTT5	4	8,387±2,33	t=0,231	p=0,825	Anlamsız
SDTT10	4	8,450±2,29	t=0,193	p=0,853	Anlamsız
SDTT15	4	7,652±1,99	t=0,822	p=0,443	Anlamsız
SDTT20	4	6,935±2,15	t=1,307	p=0,239	Anlamsız
SDMT5	4	9,375±2,56	t=-0,423	p=0,687	Anlamsız
SDMT10	4	8,807±1,68	t=-0,069	p=0,947	Anlamsız
SDMT15	4	6,965±1,55	t=1,533	p=0,176	Anlamsız
SDMT20	4	4,285±1,73	t=3,667	p=0,010	Anlamlı

Hipotezler;7, 28 ve 90. gün için

H₀: PÇ 42.5 harcının eğilme dayanımı ile %5'lik tuğla tozu (TT5)'in eğilme dayanımı arasında fark yoktur.

H₁: PÇ 42.5 harcının eğilme dayanımı ile %5'lik tuğla tozu (TT5)'in eğilme dayanımı arasında fark vardır.

H₀: PÇ 42.5 harcının eğilme dayanımı ile %10'luk tuğla tozu (TT10)'un eğilme dayanımı arasında fark yoktur.

H₁: PÇ42.5 harcının eğilme dayanımı ile %10'luk tuğla tozu (TT10)'un eğilme dayanımı arasında fark vardır.

H₀: PÇ42.5 harcının eğilme dayanımı ile %20'lik silis dumanı+mermer tozu (SDMT20)'nin eğilme dayanımı arasında fark yoktur.

H₁: PÇ42.5 harcının eğilme dayanımı ile %20'lik silis dumanı+mermer tozu (SDMT20)'nin eğilme dayanımı arasında fark vardır.

Çizelge 4.4. Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6 incelendiğinde harç tiplerinin PÇ42,5 harcına kıyasla eğilme dayanımlarında bir azalma olduğu ve bu azalmanın;

7. günde PÇ42,5 eğilme dayanımı ile SDTT20 eğilme dayanımı,

28. günde PÇ42,5 eğilme dayanımı ile MT20 eğilme dayanımı,

90. günde PÇ42,5 eğilme dayanımı ile TT20, MT15, MT20 ve SDMT20 eğilme dayanımı arasında istatistiksel olarak anlamlı olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.8. 7.günde TT-SDTT, SD-SDTT, MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

7. gün Eğilme Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=0,465	p=0,658	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,718	p=0,137	Anlamsız
MT-SDMT	t=-2,329	p=0,059	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,816	p=0,446	Anlamsız
150°C			
TT-SDTT	t=0,555	p=0,599	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,439	p=0,200	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,594	p=0,574	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,474	p=0,191	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=0,088	p=0,932	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,715	p=0,501	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,608	p=0,566	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,527	p=0,617	Anlamsız
700°C			
TT-SDTT	t=-1,985	p=0,094	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,601	p=0,570	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,221	p=0,832	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,965	p=0,372	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

Çizelge 4.9. 28.günde TT-SDTT, SD-SDTT, MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

28. gün Eğilme Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=-0,652	p=0,539	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,589	p=0,557	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,878	p=0,110	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,000	p=0,356	Anlamsız
150°C			
TT-SDTT	t=-0,903	p=0,401	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,933	p=0,387	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,408	p=0,209	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,501	p=0,634	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=-0,623	p=0,556	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,266	p=0,799	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,866	p=0,420	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,612	p=0,563	Anlamsız
700°C			
TT-SDTT	t=-1,328	p=0,233	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,515	p=0,625	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,925	p=0,391	Anlamsız
SD-SDMT	t=-0,173	p=0,869	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

Çizelge 4.10. 90.günde TT-SDTT, SD-SDTT, MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

90. gün Eğilme Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=-1,526	p=0,178	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,042	p=0,338	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,392	p=0,213	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,558	p=0,597	Anlamsız
150°C			
TT-SDTT	t=-1,900	p=0,106	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,397	p=0,705	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,872	p=0,110	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,856	p=0,425	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=-1,405	p=0,210	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,724	p=0,496	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,841	p=0,433	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,232	p=0,264	Anlamsız
700°C			
TT-SDTT	t=-0,545	p=0,605	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,599	p=0,571	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,774	p=0,468	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,100	p=0,923	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

Çizelge 4.8. Çizelge 4.9. ve Çizelge 4.10. incelendiğinde

Hipotezler;

7.günde;

H_0 : 20°C sıcaklıkta tuğla tozu (TT) ile silis dumanı+tuğla tozu (SDTT) nin eğilme dayanımları arasında fark yoktur.

H_1 : 20°C sıcaklıkta tuğla tozu(TT) ile silis dumanı+tuğla tozu(SDTT) nin eğilme dayanımları arasında fark vardır.

Diğer hipotezlerde bu şekilde kurulur ve hipotezler reddedilir. İlgili harçların eğilme dayanımları arasında anlamlı bir fark yoktur.

4.5.2. Harçların basınç dayanımları ile ilgili istatistiksel değerlendirme

Suda soğutma uygulaması

Tüm yaşlarda PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5,UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15,SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı göre 150, 300, 700, 900°C sıcaklıklarda basınç dayanımları azalmaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak basınç dayanımları azaldığı için istatistiksel değerlendirme yapılmamıştır.

Havada soğutma uygulaması

Çizelge 4.11. Harç tiplerinin basınç dayanımlarının gün ve sıcaklık bazında değerlendirilmesi

Gün	Basınç Dayanımı	N	X±S.S (ortalama±standart sapma)	Test istatistiği	P	Durum (α=0.05)
7	20°C (ref.)	25	29,526±7,449	-	-	-
	150°C	25	27,241±10,070	t=0,912	p=0,366	Anlamsız
	300°C	25	22,004±8,740	t=3,275	p=0,002	Anlamlı
	700°C	25	14,092±6,991	t=7,554	p<0.001	Anlamlı
	900°C	-	-	-	-	-
28	20°C (ref.)	25	37,960±5,209	-	-	-
	150°C	25	36,800±8,600	t=0,577	p=0,567	Anlamsız
	300°C	25	29,477±8,368	t=4,303	p<0,001	Anlamlı
	700°C	25	18,738±10,095	t=8,460	p<0.001	Anlamlı
	900°C	-	-	-	-	-
90	20°C (ref.)	25	47,998±6,008	-	-	-
	150°C	25	46,886±10,349	t=0,464	p=0,644	Anlamsız
	300°C	25	38,845±11,539	t=3,518	p=0,001	Anlamlı
	700°C	25	26,028±12,257	t=8,047	p<0.001	Anlamlı
	900°C	-	-	-	-	-

Çizelge 4.11 incelendiğinde

7.günde harçların farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleye ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanlış payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 7.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 7.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15,

MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

28.günde harçların farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleye ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanlış payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 28.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 28. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

90.günde harçların farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımları ile ilgili hipotezler

Sıfır Hipotezi (H_0): Örneklemden elde edilen ortalama ile anakütleye ait ortalamanın farkı "0" sayılabilir. Yani anakütle üzerinde yapılan deformasyonların anakütle aritmetik ortalamasını değiştirmeyeceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 yanlış payı göz önüne alınır. Zaten yapılan işlemlerden sonra farkın çok küçük de olsa sıfırdan farklı olduğu görülür. Bu hipotezimizde 90.günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olmadığını savunur.

Karşıt Hipotez (H_1): Yapılan deformasyonun anakütle aritmetik ortalamasını değiştireceği görüşünü savunur. Bu görüş savunulurken istatistiksel anlamlılık denilen %95 güven düzeyi göz önüne alınır. 90. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, TT15, TT20, MT5, MT10, MT15, MT20, SD5, SD10, SD15, SD20, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20, SDMT5, SDMT10, SDMT15 ve SDMT20 harçlarının 20°C referans sıcaklığı ile 150, 300, 700, 900°C sıcaklıktaki basınç dayanımları arasında fark olduğunu savunur.

Çizelge 4.12. ile 4.14. arası incelendiğinde

7, 28 ve 90. günlerde harçların basınç dayanımlarındaki değişim 150°C bir miktar artış göstermesine rağmen bu artışın istatistiksel açıdan önemsiz, diğer gün ve sıcaklıklarda ise istatistiksel açıdan önemli kabul edilebilir bir azalışın olduğu %95 güvenle söylenebilir.

Çizelge 4.12. Harç tiplerinin 7. günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

7.gün Basınç Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	36,715±4,50			
TT5	4	29,725±12,45	t=1,056	p=0,332	Anlamsız
TT10	4	25,750±11,15	t=1,822	p=0,118	Anlamsız
TT15	4	17,500±10,12	t=3,468	p=0,013	Anlamlı
TT20	4	12,885±11,60	t=3,828	p=0,009	Anlamlı
MT5	4	24,967±4,34	t=3,754	p=0,009	Anlamlı
MT10	4	22,360±2,96	t=5,325	p=0,002	Anlamlı
MT15	4	14,985±4,81	t=6,590	p=0,001	Anlamlı
MT20	4	10,305±5,12	t=7,744	p<0,001	Anlamlı
SD5	4	29,637±9,08	t=1,396	p=0,212	Anlamsız
SD10	4	29,260±10,22	t=1,334	p=0,230	Anlamsız
SD15	4	24,712±10,07	t=2,174	p=0,073	Anlamsız
SD20	4	18,937±11,06	t=2,976	p=0,025	Anlamlı
UK5	4	32,585±6,66	t=1,027	p=0,344	Anlamsız
UK10	4	28,265±8,21	t=1,804	p=0,121	Anlamsız
UK15	4	29,142±7,49	t=1,732	p=0,134	Anlamsız
UK20	4	30,850±7,22	t=1,378	p=0,217	Anlamsız
SDTT5	4	28,812±9,54	t=1,497	p=0,185	Anlamsız
SDTT10	4	26,287±6,82	t=2,551	p=0,043	Anlamlı
SDTT15	4	17,190±4,61	t=6,054	p=0,001	Anlamlı
SDTT20	4	7,187±6,04	t=7,833	p<0,001	Anlamlı
SDMT5	4	27,887±9,12	t=1,735	p=0,133	Anlamsız
SDMT10	4	22,510±5,05	t=4,197	p=0,006	Anlamlı
SDMT15	4	18,107±4,06	t=6,135	p=0,001	Anlamlı
SDMT20	4	13,825±4,32	t=7,324	p<0,001	Anlamlı

7.günde yorumlar

Tuğla tozundan %5 ve %10 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Mermer tozundan %5, %10, %15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir azalmaya yol açtığı söylenebilir.

Silis dumanından %5, %10 ve %15 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Uçucu külden %5, %10, %15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Silis dumanı+tuğla tozu harcından %5 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Silis dumanı+mermer tozu harcından %5 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Çizelge 4.13. Harç tiplerinin 28.günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

28. gün Basınç Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	39,105±4,69			
TT5	4	37,560±7,18	t=0,360	p=0,731	Anlamsız
TT10	4	35,875±8,34	t=0,675	p=0,525	Anlamsız
TT15	4	29,850±11,11	t=1,534	p=0,176	Anlamsız
TT20	4	18,775±15,33	t=2,535	p=0,044	Anlamlı
MT5	4	35,350±2,35	t=1,431	p=0,203	Anlamsız
MT10	4	28,535±6,01	t=2,770	p=0,032	Anlamlı
MT15	4	21,087±8,42	t=3,735	p=0,010	Anlamlı
MT20	4	18,860±8,08	t=4,333	p=0,005	Anlamlı
SD5	4	36,337±12,62	t=0,411	p=0,695	Anlamsız
SD10	4	38,900±11,77	t=0,032	p=0,975	Anlamsız
SD15	4	28,830±11,82	t=1,615	p=0,157	Anlamsız
SD20	4	26,133±18,00	t=1,394	p=0,213	Anlamsız
UK5	4	35,650±6,71	t=0,844	p=0,431	Anlamsız
UK10	4	35,862±8,20	t=0,686	p=0,518	Anlamsız
UK15	4	35,117±7,30	t=0,918	p=0,394	Anlamsız
UK20	4	31,682±7,13	t=1,739	p=0,133	Anlamsız
SDTT5	4	35,975±13,75	t=0,431	p=0,682	Anlamsız
SDTT10	4	37,825±13,39	t=0,180	p=0,863	Anlamsız
SDTT15	4	26,825±13,01	t=1,775	p=0,126	Anlamsız
SDTT20	4	16,387±15,32	t=2,834	p=0,030	Anlamlı
SDMT5	4	35,267±6,26	t=0,970	p=0,370	Anlamsız
SDMT10	4	32,807±3,23	t=2,209	p=0,069	Anlamsız
SDMT15	4	30,095±2,53	t=3,378	p=0,015	Anlamlı
SDMT20	4	19,905±8,54	t=3,940	p=0,008	Anlamlı

28.günde yorumlar Tuğla tozundan %5, %10 ve %15 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Mermer tozundan %5 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Silis dumanından %5,%10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Uçucu külden %5,%10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Silis dumanı+tuğla tozu harcından %5,%10 ve %15 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Silis dumanı+mermer tozu harcından %5 ve %10 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Çizelge 4.14. Harç tiplerinin 90.günde basınç dayanımlarının değerlendirilmesi

90. gün Basınç Dayanımı	N	Ortalama± S. Sapma	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
PÇ 42.5(ref.)	4	49,687±6,13			
TT5	4	44,950±7,09	t=1,010	p=0,351	Anlamsız
TT10	4	37,057±14,26	t=1,627	p=0,155	Anlamsız
TT15	4	33,512±13,89	t=2,130	p=0,077	Anlamsız
TT20	4	28,050±14,25	t=2,788	p=0,032	Anlamlı
MT5	4	41,800±4,14	t=2,129	p=0,077	Anlamsız
MT10	4	39,062±4,93	t=2,699	p=0,036	Anlamlı
MT15	4	35,305±5,85	t=3,391	p=0,015	Anlamlı
MT20	4	23,000±11,31	t=4,147	p=0,006	Anlamlı
SD5	4	50,930±10,49	t=-0,204	p=0,845	Anlamsız
SD10	4	49,772±9,32	t=-0,015	p=0,988	Anlamsız
SD15	4	42,600±16,77	t=0,793	p=0,458	Anlamsız
SD20	4	35,382±22,28	t=1,238	p=0,262	Anlamsız
UK5	4	51,987±8,18	t=-0,450	p=0,669	Anlamsız
UK10	4	50,350±6,75	t=-0,145	p=0,889	Anlamsız
UK15	4	48,650±7,11	t=0,221	p=0,833	Anlamsız
UK20	4	41,967±14,80	t=0,964	p=0,372	Anlamsız
SDTT5	4	49,775±11,99	t=-0,013	p=0,990	Anlamsız
SDTT10	4	39,425±11,50	t=1,574	p=0,167	Anlamsız
SDTT15	4	36,337±15,18	t=1,630	p=0,154	Anlamsız
SDTT20	4	16,350±16,81	t=3,724	p=0,010	Anlamlı
SDMT5	4	44,217±8,83	t=1,017	p=0,348	Anlamsız
SDMT10	4	39,462±8,24	t=1,990	p=0,094	Anlamsız
SDMT15	4	39,325±4,87	t=2,644	p=0,038	Anlamlı
SDMT20	4	29,537±10,42	t=3,330	p=0,016	Anlamlı

90. günde yorumlar Tuğla tozundan %5, %10 ve %15 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Mermer tozundan %5 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Silis dumanından %5,%10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Uçucu külden %5,%10,%15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Silis dumanı+tuğla tozu harcından %5,%10 ve %15 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Silis dumanı+mermer tozu harcından %5 ve %10 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı fakat %15 ve %20 oranında alınarak hazırlanan harcın basınç dayanımını önemli derecede azalttığı söylenebilir.

Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13 birlikte incelendiğinde TT20, MT10, MT15, MT20, SDTT20, SDMT15 VE SDMT20 katkılı çimento tiplerinde bu katkı harçlarının basınç dayanımını azaltıcı etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.15. 7. günde TT-SDTT, SD-SDTT, MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

7. gün Basınç Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=1,631	p=0,154	Anlamsız
SD-SDTT	t=2,099	p=0,081	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,448	p=0,670	Anlamsız
SD-SDMT	t=4,078	p=0,007	Anlamlı
150°C			
TT-SDTT	t=0,035	p=0,975	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,480	p=0,648	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,653	p=0,538	Anlamsız
SD-SDMT	t=0,527	p=0,617	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=-0,103	p=0,921	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,024	p=0,345	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,951	p=0,378	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,095	p=0,315	Anlamsız
700°C			
TT-SDTT	t=-0,472	p=0,654	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,433	p=0,680	Anlamsız
MT-SDMT	t=0,109	p=0,917	Anlamsız
SD-SDMT	t=-0,048	p=0,963	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

Çizelge 4.15. ile 4.17. arası incelendiğinde

7. günde yorumlar 20°C sıcaklıkta SD katkılı çimento tipinin SDMT katkılı çimento tipinden basınca dayanımının daha yüksek ve anlamlı olduğu, diğer tüm sıcaklıklarda TT ile SDTT arasında, SD ile SDTT arasında, MT ile SDMT ve SD ile SDMT katkılı çimento tipleri arasında anlamlı bir fark olmadığı söylenebilir.

Çizelge 4.16. 28.günde TT-SDTT, SD-SDTT, MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

28. gün Basınç Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=-1,002	p=0,355	Anlamsız
SD-SDTT	t=-0,631	p=0,551	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,334	p=0,750	Anlamsız
SD-SDMT	t=2,808	p=0,031	Anlamlı
150°C			
TT-SDTT	t=0,089	p=0,932	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,540	p=0,608	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,826	p=0,440	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,307	p=0,239	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=0,213	p=0,838	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,284	p=0,247	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,016	p=0,349	Anlamsız
SD-SDMT	t=1,471	p=0,192	Anlamsız
700°C			
TT-SDTT	t=0,694	p=0,514	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,228	p=0,827	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,549	p=0,603	Anlamsız
SD-SDMT	t=-1,395	p=0,212	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

28. günde yorumlar 20°C sıcaklıkta SD katkılı çimento tipinin SDMT katkılı çimento tipinden basınca dayanımının daha yüksek ve anlamlı olduğu, diğer tüm sıcaklıklarda TT ile SDTT arasında, SD ile SDTT arasında, MT ile SDMT ve SD ile SDMT katkılı çimento tipleri arasında anlamlı bir fark olmadığı söylenebilir.

Çizelge 4.17. 90.günde TT-SDTT,SD-SDTT,MT-SDMT ve SD-SDMT harçlarının karşılaştırılması

90.gün Basınç Dayanımı	Test istatistiği	P	Durum ($\alpha=0.05$)
20°C			
TT-SDTT	t=-0,425	p=0,686	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,750	p=0,131	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,245	p=0,260	Anlamsız
SD-SDMT	t=3,603	p=0,011	Anlamlı
150°C			
TT-SDTT	t=0,522	p=0,620	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,418	p=0,206	Anlamsız
MT-SDMT	t=-1,022	p=0,346	Anlamsız
SD-SDMT	t=2,385	p=0,054	Anlamsız
300°C			
TT-SDTT	t=-0,390	p=0,710	Anlamsız
SD-SDTT	t=1,302	p=0,241	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,506	p=0,631	Anlamsız
SD-SDMT	t=2,675	p=0,037	Anlamlı
700°C			
TT-SDTT	t=0,239	p=0,819	Anlamsız
SD-SDTT	t=0,437	p=0,678	Anlamsız
MT-SDMT	t=-0,191	p=0,855	Anlamsız
SD-SDMT	t=-0,569	p=0,590	Anlamsız
900°C			
TT-SDTT	-	-	-
SD-SDTT	-	-	-
MT-SDMT	-	-	-
SD-SDMT	-	-	-

90. günde yorumlar 20°C ve 300°C sıcaklıkta SD katkılı çimento tipinin SDMT katkılı çimento tipinden basınca dayanımının daha yüksek ve anlamlı olduğu, diğer tüm sıcaklıklarda TT ile SDTT arasında, SD ile SDTT arasında, MT ile SDMT ve SD ile SDMT katkılı çimento tipleri arasında anlamlı bir fark olmadığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışma yüksek sıcaklığa dayanıklı uygun çimento tipinin/tiplerinin tespit edilmesini kapsamaktadır. CEM I 42.5 R Portland çimentosu ve TT, MT, SD ve UK puzolanik katkı malzemeleri ile 7, 28 ve 90. günlerde harç numuneleri üretilip yüksek sıcaklık uygulamasına tabi tutulmuştur.

Yapılan araştırmalara göre; farklı yüksek sıcaklık uygulama sürelerinin, harcın mekanik ve fiziksel özelliklerinde bazı değişikliklere sebep olduğu görülmektedir. Örneklerin dayanımlarına 1-3 saat uygulanan yüksek sıcaklığın önemli etkisi olduğu, yüksek sıcaklık uygulama süresinin artması ile dayanımda meydana gelen azalmaların başlangıca göre azaldığı sonucu ve yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen büyük dayanım azalmalarının ilk iki saat içerisinde görüldüğü sonucu ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmalar neticesinde harç örnekleri üzerinde büyük dayanım kayıplarının ilk 2 saat boyunca gerçekleştiği sonucu doğrultusunda; harç örnekleri 2 saat boyunca 150, 300, 700 ve 900 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık fırınından çıkartılan harç örnekleri kendiliğinden (havada) ve yağmurlama (su püskürtme) olmak üzere iki farklı şekilde soğutulmuştur.

Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin büyük bir çoğunluğunun atık malzeme olmasından dolayı, bu malzemelerin yarattığı çevre kirliliğinin önüne geçilmesi ve üretilen elemanların maliyetlerinin düşük olması bakımından önemlidir. Daha sonra harçlarda yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelebilecek kaza anındaki mekanik davranışları incelenmek amacıyla üretilen harç örnekler üzerinde priz başı ve sonu, 40 ve 90 µm incelik, yoğunluk, özgül yüzey, eğilme ve basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca harçlar üzerinde yapılan mekanik deney sonuçları istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, harçlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- ✓ En düşük priz başı değeri PÇ 42.5'te, en düşük priz sonu değeri ise UK5 çimentosunda elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre; TT, MT, SD, UK, SDTT ve

SDMT katkılı çimentoların katkı oranları arttıkça priz başı ve priz sonu süreleri de artmaktadır.

- ✓ 40 µm ve 90 µm elek üstü deney sonucuna göre; MT ve SDMT katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD oranı arttıkça inceliği azalmaktadır. Başka bir deyişle MT çimentonun inceliğini azaltmaktadır.
- ✓ Çimentonun yoğunluğunu TT katkısının arttırdığı ve yoğunluğu en yüksek olan çimento tipinin TT20 olduğu belirlenmiştir. MT ve MTSD katkılı çimentolarda karışımdaki MT ve SD arttıkça yoğunluk değeri azaltmaktadır. UK katkılı çimentolarda karışımdaki UK arttıkça yoğunluk değeri azalmaktadır.
- ✓ TT katkı oranı arttıkça özgül yüzeyi değeri de azalmaktadır. Özgül yüzeyi en düşük çimento tipi TT20'dir. MT, SD, UK, SDTT ve SDMT katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça özgül yüzey de artmakta olup özgül yüzeyi en yüksek olan çimento tipi SDMT20'dir.
- ✓ Yüksek sıcaklık uygulanmış harç numunelerinden alınan kesitlerin mikroyapısında agrega dağılımı, çatlak gelişimi ve boşluk yapısı 300°C 'ye kadar iyi bir şekilde ayırt edilemediği, ama sonraki sıcaklıklarda ise bağlayıcı maddenin agrega taneleri arasındaki çatlakların giderek büyüdüğü görülmüştür.

Eğilme dayanımı;

- ✓ Katkılı harç örnekleri türüne göre 7, 28 ve 90. günlerde fark olduğu, sıcaklık değerlerindeki artış eğilme dayanım değeri ile ters yönde olduğu, kendiliğinden ve su ile soğutma arasında fark olduğu, 300-900 °C aralığında sıcaklık arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır.
- ✓ 7. günde havada soğutulan tüm örneklerde bütün sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Buna sebep olarak mineral katkıların erken yaşlardaki dayanımlara etkisinin olmadığı görülmüştür.
- ✓ 28. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, SD5, SD10, SD15, UK5, SDTT5, SDTT10, SDTT20, SDMT5 ve SDMT10 harçlarında havada soğutulan örneklerde 150 °C sıcaklığa kadar bir miktar artış olmasına rağmen sonraki bütün sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Buna sebep olarak mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ

hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.

- ✓ 90. günde PÇ 42.5, TT5, MT5, SD5, SD10, SD15, UK5, UK10, SDTT5, SDTT10, SDTT15, SDTT20 SDMT5, SDMT10 ve SDMT15 harçlarında havada soğutulan örneklerde 150 °C sıcaklığa kadar bir miktar artış olmasına rağmen sonraki bütün sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Artış gösteren harç örneklerinin SD, MT, UK ve TT katkılı harç örneklerinin olması bu mineral katkılarının harç örneklerindeki boşluk miktarını azaltmasının yanında mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.
- ✓ Her yaşta tüm çimento harçlarında suda soğutulan örneklerde azaldığı görülmüştür.
Basınç dayanımı;
- ✓ Basınç dayanım değerlerine bakıldığında, katkılı harçların 7. günden itibaren kontrol harcı dayanımına yakın değerler elde ettiği görülmüştür.
- ✓ 7. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, SD5, UK5, UK10, UK15, UK20, SDMT5 ve SDMT10 harçlarında havada soğutulan örneklerde 150 °C sıcaklığa kadar bir miktar artış olmasına rağmen sonraki bütün sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Artış gösteren harç örneklerinin UK katkılı harç örneklerinde yoğunlaşması uçucu kül ikamesine bağlı olarak bağlayıcı hamurda ortaya çıkan Ca(OH)_2 miktarlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi, uçucu kül ikamesi ile Ca(OH)_2 içeriği önemli oranda azalmaktadır. Çimento yerine %5, 10, 15 ve 20 oranlarında uçucu kül ikamesi, 7. günde ortamdaki Ca(OH)_2 içeriğinin azalmasını sağlamıştır. Artış gösteren tüm harç örneklerinde bunun yanı sıra mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.
- ✓ 28. günde PÇ 42.5, TT5, TT10, MT5, MT10, MT15, MT20 SD5, SD10, UK5, UK10, UK15, UK20, SDTT5, SDTT10, SDMT5 ve SDMT15 harçlarında havada soğutulan örneklerde 150 °C sıcaklığa kadar bir miktar artış olmasına rağmen sonraki bütün

sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Buna sebep olarak mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.

- ✓ 90. günde PÇ 42.5, TT5, MT15, SD5, SD10, SD15, UK5, UK10, UK15, SDTT5, SDMT5 ve SDMT10 harçlarında havada soğutulan örneklerde 150 °C sıcaklığa kadar bir miktar artış olmasına rağmen sonraki bütün sıcaklıklarda azaldığı tespit edilmiştir. Buna sebep olarak mineral katkıların belirli mertebelerde ikame edilerek kullanımının yüksek sıcaklıklara dayanıklılık açısından yarar sağladığı bilinmektedir ve çimento içerisine ikame edilen belirli oranlardaki mineral katkı içeren karışımların saf PÇ hamurlarına kıyasla daha az oranda kalsiyum hidroksit içermesi 150 °C sıcaklığına kadar bir artış göstermesine sebep gösterilebilir.
- ✓ Her yaşta tüm çimento harçlarında suda soğutulan örneklerde azaldığı görülmüştür.
- ✓ Harç numunelerinin 100-300 °C arasındaki eğilme ve basınç dayanımının artması yüksek sıcaklık esnasında oluşmuş su buharı, katkılı harç örnekleri içerisinde yüksek bir basınca neden olmuştur. Buda içsel dengenin oluşmasını sağlamaktadır. Özellikle 90 günlük numunelerde bu durum görülmektedir.
- ✓ Yüksek sıcaklıklarda (300°C civarı) Ca(OH)_2 kristalleri çevresinde oluşan çatlakların azalması, 400-600°C'de Ca(OH)_2 'in ayrışması ile açığa çıkan CaO 'in yeniden hidrate olması hacim artışına, bunun sonucunda da önemli çatlak oluşumlarına ve dayanım kayıplarına neden olur. Ca(OH)_2 'in azalması bu zararlı dönüşümün etkilerini ortadan kaldırır. Mineral katkıların yüksek sıcaklık dayanıklılığını arttırmasının diğer bir sebebi de mineral katkılı hamurların saf çimento hamurlarına kıyasla daha fazla kristal suyuna sahip olmalarıdır. Örneğin katkılı harç örnekleri normal PÇ hamurlarına kıyasla daha fazla kristal suyu içerdiğinden; serbest bırakılan bu su betonun yangın direncine katkıda bulunur.
- ✓ 7 günlük kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SDMT katkılı çimentoların basınç dayanımı MT katkılı çimento tiplerinden daha yüksek değerler, elde edilmiştir.
- ✓ 28 günlük kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SDMT katkılı çimentoların basınç dayanımı MT katkılı çimento tiplerinden daha yüksek değerler, elde edilmiştir.

- ✓ 90 günlük kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SDMT katkılı çimentoların basınç dayanımı MT katkılı çimento tiplerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ PÇ 42,5 ile SDMT5 katkılı çimentolarda tüm sıcaklık değerlerinde birbirlerine yakın dayanımlar elde edilmiş olup, yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek (yangın, patlama, alevlenme vb.) yapılarda SDMT katkılı çimentonun kullanılması ile de olası kazalar minimuma indirilerek, hem çevresel, ekonomi hem de insan hayatı açısından önemli faydalar sağlayacaktır.
- ✓ Ancak MT içerisinde yüksek oranda bulunan CaO su ile reaksiyona girdiğinden ısı açığa çıkartmaktadır. Bu kullanılacak olan SDMT katkılı çimentonun yangın sırasında ısılatılmadan tozlu söndürme sistemleri ile müdahale edilmelidir.
- ✓ SD çimentolu harçların 90. gün basınç dayanımlarının kontrol harcına oranla daha iyi olduğu saptanmıştır.
- ✓ Kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SD katkılı çimento tipinin basınç dayanımı her yaşta SDTT katkılı çimento tiplerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Harçların 90 günlük basınç dayanımları, SD ve TT'nin ikili kullanımlarında SDTT5'in PÇ 42,5 harcıyla yakın dayanımı verdiği görülmüştür. Tuğla tozu ile silis dumanının çimentoya ikame edilerek kullanılması ile yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek (yangın, patlama, alevlenme vb.) olan yapılarda kullanılması olası kazalar minimuma indirilecek, hem çevresel, ekonomi hem de insan hayatı açısından faydalar sağlayacaktır.
- ✓ Tuğla tozunun mikro yapısı incelendiğinde yüzeyinin kireçtaşı tozuna benzer şekilde köşeli ve pürüzlü bir yapıda olduğu görülür Bu da tuğla tozunun su gereksinimini artırır. Tuğla tozu yüksek silis içeriği sayesinde kalsiyum silika hidrat (C-S-H) oluşumunu sağlayarak hidrasyon reaksiyonunu hızlandırır. Erken dayanımın artmasına özellikle katkı sağlar.
- ✓ 7 ve 28 günlük kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SDTT ve TT katkılı çimentoların basınç dayanımlarında birbirlerine yakın değerler elde edilmiştir.
- ✓ SD katkılı çimentoların TT katkılı çimentoya göre 90. günde eğilme ve basınç dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

- ✓ Kendiliğinden soğuma (havada) tüm sıcaklıklarda SD katkılı çimento tipinin basınç dayanımı her yaşta SDTT katkılı çimento tiplerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Yapılan araştırmalara göre 500 °C'de kalsiyum hidroksit, 900 °C'de kalsiyum silikatların tam olarak ayrıştığı bilindiğinden, deneysel çalışmada 700 ve 900 °C sıcaklıklarda örneklerle ait bazı deneysel sonuçları çok düşük değerler elde edilmiş ya da hiçbir değer elde edilememiştir.
- ✓ Mermer tozu, tuğla tozu, silis dumanı, uçucu kül farklı oranlarda çimento üretiminde kullanılabilir.
- ✓ Mermer tozu ve tuğla tozu silis dumanı ile birlikte çimento üretiminde kullanılabilir.
- ✓ Yüksek sıcaklığa maruz kalabilecek (yangın, patlama, alevlenme vb.) olan yapılarda olası kazalar minimuma indirmek için kullanılması önerilen havada üretilen harç tipleri; 90.gün 150 °C'de SD5 ve UK5, 300 °C'de SD5 ve SDTT5, 700 °C'de UK5 ve 900 °C'de UK5 ve SD10 çimentoları olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N. (1995). Effects of sodium sulfate concentration on the sulfate resistance of mortars with and without silica fume. *Cement and concrete research*, 25(6), 1360-1368.
- Aksin, E. (2007). *Endüstriyel atıkların tuğla ve kiremit üretiminde değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Akyüncü, V. (2012). *F ve C tipi uçucu küllerin çimento ile ikame edilmesiyle üretilen betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin karşılaştırılarak incelenmesi*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Al-Amoudi, O. S. B. (2002). Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*, 24(3), 305-316.
- Alyamaç, K. E. ve İnce, R. (2007). *Atık mermer çamurunun kendiliğinden yerleşen betonda toz madde olarak kullanılabilirliğinin araştırılması*, TÇMB 3rd International Symposium, İstanbul, 821-832.
- Antiohos, S.K. and Tsimas, S. (2006). *A Novel way to upgrade the coarse part of a high calcium fly ash for reuse into cement systems*, Waste Management, Greece.
- Anuk, O. ve Cem, I. (2004). *42.5 çimentolu düşük dozajlı betonlarda F tipi uçucu külün etkinliği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aruntaş, H. Y. (1996). *Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aruntaş, H.Y., Tekin, İ. ve Birgül, R. (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design* 31, 4039–40.
- ASTM C 1437-01, (2002). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM, Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- ASTM C 230/C 230M-98, (2002). *Standard specification for use flow table for use in tests of hydraulic cement*. ASTM, Annual Book of ASTM Standards Vol.04.01, Cement, Lime, Gypsum.
- ASTM C 618, (1978). *Specification for fly ash & raw or calcined natural pozzolan for use a mineral admixture in portland cement concrete*.
- ASTM C131-96. (1996). *Standard test method for resistance to abrasion of small size coarse aggregate by use of the Los Angeles machine*, Annual Book of ASTM Standards.
- Atakay, O. (2006). *Uçucu küllerin katkılı çimento üretiminde kullanılması-tane inceliği ve katkı miktarının etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Atar, N. (2006). *Suda çözünen polimerlerin çimento ve beton özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Avcı, A. U. (1984). *Dökümde enerji tasarrufu*, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 178.
- Aydın, A. B. (2013). *İnce agregasında farklı oranlarda mermer tozu kullanılmış betonların dayanım ve dayanıklılık özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aydın, S. ve Baradan, B. (2003). *Yüksek sıcaklığa dayanıklı geliştirilmesi*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 451-460.
- Baradan, B. ve Aydın, S. (2013). Betonun Durabilitesi, *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi* 64-288.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). *Betonarme yapılarda kalıcılık*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Baykal, G., Özturan T., Savaş M. ve Ramadan K. (1993). *Uçucu külün inşaat mühendisliğinde bazı kullanım olanakları*, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, 89-99.
- Berry, E. E. and Malhotra, V. M. (1986). *Fly ash in concrete, energy, mines and resources* Canada: Canmet, Ottawa, 223-229.
- Bilgin, N. (2010). *Mermer tozu atıklarının yapı malzemesi üretiminde kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- CAN/CSA-A23.5-M86. (1986). *Supplementary Cementing Materials*, Canadian Standards Association, Canada: Ontario.
- Canpolat, F. (2002). *Çimento performansının geliştirilmesinde doğal zeolitin endüstriyel atıklarla birlikte çimento üretiminde kullanılması*, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Cook, D. J. (1986). *Naturel pozzolanas, calcined clay, shale and other soils, rice husk ash cement replacement materials*, Swamy, R. N. (Edit.) Surrey University Press, 1-70.
- Crow, R. D. and Dunstan, E. R. (1981). Properties of fly ash concrete. *Proceedings, Symposium on fly ash incorporation in hydrated cement Systems*; Editor, Sidney Diamond; Boston: Materials Research Society.
- Çelebi, R., Akıncıtürk, N. (2003). *Yangın Yapı Tasarım İlkeleri*, İstanbul: T.C. İstanbul Kültür Üniversitesi Yayınları, 136-140
- Çelik M. Y. ve Tur, S. (2009). Afyonkarahisar organize sanayi bölgesi mermer atıkları depolama sahasının özellikleri, *Afyon Karahisar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 41-49.

- Çelik, M. Y. (1996). *Mermer atıklarının (parça-tozların) değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Karahisar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Çil, İ. (2006). Betonarme donatısında elektriksel yöntemlerle korozyon Ölçümü, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 59-63.
- DPT (2001). *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*, Ankara.
- DPT. (1996). *Madencilik özel ihtisas komisyonu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu çimento hammaddeleri ve yapı malzemeleri çalışma grubu raporu*, Ankara.
- Durmuş, G. (2008). *Çimentolu harç özelliklerine yüksek sıcaklık etkisinin belirlenmesi ve yapay sinir ağı ile modellenmesi*, Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Durmuş, G. ve Arslan, M. (2010). Yüksek sıcaklık uygulanan çimento harçlarının farklı soğutma koşullarındaki bazı fiziksel özellikleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(3), 541-548.
- Erdoğan T. Y. (2010). *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*, Ankara: METU Press, 11-61.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını.
- Erdoğan, Y., Zeybek, M. S. ve Demirbaş, A. (1998). Cement mixes containing colemanite from concentrator wastes, *Cement and Concrete Research*, 28(4), 605-609.
- Erdoğan, K., Tokyay, M. ve Türker, P. (1999). *Traslar ve traslı çimentolar*, Ankara: TÇMB/AR-GE/Y99.2.
- Ergi, E., Bilgin, S., Asan, A. ve Zeybek, S. (2002). *Endüstriyel atık katkılı çimentoların beton dayanımı ve donatı korozyonuna etkileri*, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 1-20.
- Erkek D. ve Özdemir S. (2011). Mermer ve traverten sektörüne küresel ve bölgesel yaklaşım. *Marmara Coğrafya Dergisi* (33), 2147-7825.
- Ertün. T. ve Türker, P. (2004). *Çimento kimyası*, Ankara: TÇMB Yayını, 39-43.
- Fares, H., Remond, S., Noumowe, A. and Cousture, A. (2010). High Temperature Behaviour of Self-consolidating Concrete Microstructure and Physicochemical Properties, *Cement and Concrete Research*, 40, 488-496.
- Filiz, M., Özel, C., Soykan, O. ve Ekiz, Y. (2010). Atık mermer tozunun parke taşlarında kullanılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6, 57-72.
- Gani, M.S.J. (1997). *Cement and Concrete*, Chapman & Hall, London.
- Gökçer, B., Yıldız, S. ve Keleştemur, O. (2012). Atık Mermer Tozu ve Cam Lif Katkılı Harç Numunelerinin Yüksek Sıcaklık Altındaki Davranışları, *International Construction Congress*, Isparta.

- Gölce, C. (2009). *Farklı çimentolarla üretilen harçların yüksek sıcaklık ve değişik soğutma koşulları altındaki özellikleri*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Gündeşli, U. (2008). *Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Gürer, C. Ve Akbulut, H. (2005). *Ocak atığı mermerler için alternatif bir atık değerlendirme yöntemi*. 6.Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 1-10.
- Gürsoy, S. (2005). *Muğla ilinde mermercilik sektörünün gelişimi ve il ekonomisine katkıları*. Uzmanlık Tezi, İçişleri Bakanlığı, İl Planlama.
- Gürü, M. ve Yalçın, H. (2006). *Çimento ve beton*, Ankara: Palme Yayıncılık.
- Hewlett, P. C. (1998). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition, New York: John Wiley and Sons Inc, 982.
- İnternet: Çimentoların Yüksek Sıcaklıklara Direnci, *Proje No: MAG 106M158*, İzmir URL:
http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fuvt.ulakbim.gov.tr%2Fuvt%2Findex.php%3Fcid%3D9%26vtadi%3DTPRJ%252CTTAR%252CTTIP%252CTMUH%252CTSOS%26ano%3D91166_24500826837699fbf9982e56929adc0e&date=2016-06-05, Son Erişim Tarihi: 12.04.2016.
- İnternet: URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fekutup.dpt.gov.tr&date=2016-05-11>, Son Erişim Tarihi: 30.09.2015.
- İnternet: URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.tcma.org.tr+&date=2016-05-11>, Son Erişim Tarihi: 18.08.2015.
- İnternet: URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2FWiki%2FMermer&date=2016-05-11>, Son Erişim Tarihi: 20.02.2016.
- İnternet: URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2FWiki%2FMermer&date=2016-05-09>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2016.
- Karaduman, N. (2008). *Farklı tip çimentoların yüksek sıcaklıklara direnci*, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Karaman, S., Şahin, S., Örüng, İ. ve Pabuçcu, K. (2006). Ağaç yaprağı ve pomza katkılı alçı kompozitlerin tarımsal yapılarda kullanılabilme olanaklarının araştırılması, *Uludağ Üniversitesi, Mühendislik – Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1(1), 1 – 8.
- Karayığit, A. ve Onacak, T. (1999). *Çayırhan termik santrali uçucu küllerinden zeolit elde edilmesi*, *Türkiye bilimsel ve teknik araştırma kurumu*, YDAPÇAG-534 nolu proje, 188.

- Kavas, T. ve Kibıcı, Y. (2001). *Afyon bölgesi mermer atıklarının portland kompoze çimentosu üretiminde katkı maddesi olarak kullanım olanakları*, Türkiye III. Mermer Sempozyumu (MERSEM'2001) Bildiriler Kitabı, Afyon, 328-333.
- Khoury, G. A. (2000). *Effect of fire on concrete and concrete structures*, Prog. Struct. Engng Mater. Imperial College, London: UK.
- Khoury, G. A. (2003). *Fire and assessment*, International Centre for Mechanical Sciences. Course on effect of Heat on Concrete, Udine, Italy.
- Kızılkant, A. B. ve Yüzer, N. (2008). Yüksek sıcaklık etkisindeki harcın basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi, *Teknik Dergi*, 238, 4381-4392.
- Kişman, Z. A. ve Kan Ö. D. (2011). Elazığ Mermeri Sektörel Araştırması, Fırat Kalkınma Ajansı Raporu, Elazığ, Türkiye.
- Koca, C. (1996). *Yüksek performanslı beton üretiminde mikrosilis, curuf, klinker karışımı çimento kullanımı*. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, 381-394.
- Kocataşkın, F. (1991). *Betonun dünü, bugünü, yarını*, 2. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 23-25.
- Koçak Y. (2008). *Çimento-puzolan etkileşiminde moleküler ve elektrokinetik davranışların araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Korçak, Ö. (2014). *Kolemanit atıklarının çimento üretiminde kullanılması ve çimentonun performans özelliklerinin geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Köse, H. M. ve Diker, M. (1999). *Maden ve madencilğe dayalı sanayilerin türkiye ekonomisine katkısı*. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 1-5.
- Kulaksız, S. (2005). *Doğal taş maden işletmeciliği ve işleme teknolojileri*. Ankara: TMMOB Maden Mühendisleri Odası.
- Mahsanlar, N. (2006). *Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışı*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Malhotra, V. M. (1997). *Mineral admixtures. concrete construction engineering handbook*, Naway Edward G. New York: CRC Press.
- Massazza, F. (1989). *Puzolanlar, puzolanlı çimentolar ve kullanım alanları semineri*, (Çev: Atalay, B., Çolakoglu, H., Ertürk, F. ve Katnas, F.), Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Massazza, F. (2000, Eylül). *Evaluation of cements and cementitious systems: history and prospects, cement and concrete Technology in the 2000s*, Second International Symposium, 6-10, TCMA, İstanbul, 3-28.

- McCarthy, M. J. and Dhir, R. K. (2005). Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction. *Fuel*, 84 (11), 1423-1432.
- Mishra, S. R., Kumar, S., Park, A., Rho, J., Losby, J. and Hoffmeister, B.K. (2003). Ultrasonic characterization of the coring process of PCC fly ash-cement composites, *Journal Materials characterization*, 50, 317-323.
- Moir, G. (2003). *Cements, advanced concrete technology*, Constituent Materials, 1st ed. Ed. J. Newman, B. S. Choo, Oxford: Elsevier, 1-45.
- Neville, A. (2004). The confused world of sulfate attack on concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1275-1296.
- Neville, A. M. (1978). *Properties of concrete*, Pitman Publishing, London, Soft cover. Book Condition: Fine. SOFTBACK original printed covers.
- Neville, A. M. (2006). Properties of concrete. *Building and environment*, 4, 8-18, 78.
- Newman, J. and Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Tecnology*, Butterworth-Heinemann.
- Oltulu, M. (2011). *Mineral katkılı çimento harçlarının fiziko-mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerine Nano-SiO₂, Nano-Al₂O₃ ve Nano-Fe₂O₃ tozlarının tekli ve bileşik etkisi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Onargan, T. ve Köse H. (1997). *Mermer*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Öner, A. (2005). *Uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu içeren betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından optimum bileşiminin incelenmesi*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Örüng, S. (2007). Atık PVC Katkılı Hafif Betonların Özellikleri ve Tarımsal Yapılarda Kullanım Olanakları. *JOTAF/Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 4(2), 137-144.
- Özbey, S. (2007). *Yüksek sıcaklık etkisinde kalan mineral katkılı ve genleştirilmiş perlit agregalı harçların bazı özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M. ve Uyan, M. (1999). *Her yönüyle beton*, İstanbul: Türkiye Hazır Beton Birliği, 17-19.
- Özturan, T. (1991). *Yüksek mukavemetli beton üretiminde mineral katkı maddelerin etkinliği*, 2. Ulusal Beton Kongresi, Ankara, Türkiye, 280 – 291.
- Özturan, T. ve Gökçe, A. (1996). *Uçucu kül puzolanik aktivitesi ile ilgili bazı mevcut standartların değerlendirilmesi*, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul: Maya Basın Yayın.
- Pekmezci, B. Y. ve Uyan, M. (2001). Uçucu küllerde etkinlik faktörü kavramı. *Hazır Beton*, 65-68.

- Peng, G. F., Chan, S. Y. N., Song, Q. M. and Yi, Q. X. (2005, December). Effect of high temperature on concrete: a literature review. *In Key Engineering Materials*, 302, 138-149.
- Peng, G. F., Yang, W. W., Zhao, J., Liu, Y. F., Bian, S. H. and Zhao, L. H. (2006). Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 36(4), 723-727.
- Ramachandran, V. S. and Beaudoin, J. J. (2001). *Concrete admixtures handbook*, New Jersey: Noyes Publications, 42.
- Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. and Wu, G. (1991). *Cyclic heating and cooling effects on concrete durability*. Proceedings of the Second International Conference on Durability of Concrete (Ed. V.M. Malhotra), American Concrete Institute, Detroit.
- Rashad, A. M., Bai, Y., Basheer, P.A.M., Collier, N.C. and Milestone, N.B. (2012). Chemical And Mechanical Stability Of Sodium Sulfate Activated Slag After Exposure To Elevated Temperature, *Cement and Concrete Research*, 42 ,333–343.
- Romain, J.C. and Sarkar, S.L. (2001). 21. Yüzyılın çimentoları, *Çimento ve Beton Dünyası*, 5(30), 36-45.
- Sağlam, G. (2012). *Çimento üretiminde atık mermer tozu ve atık alçının kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Sakr, K. and El-Hakim, E. (2005). Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 590-596.
- Saritas, A. (2006). *Burdur ili mermer sektörünün kurumsal ve ekonomik yapısı*, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Antalya.
- Schrefler, B.A., Brunello, P., Gawin, D., Majorana, C.E. and Pesavento, F. (2002). Concrete at high temperature with application to tunnel fire, *Computational Mechanics*, 29, 43-51.
- Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. (2001). *Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu toprak sanayii hammaddeleri iv (çimento hammaddeleri) çalışma grubu raporu*, Ankara, 17.
- Şen, S. (2006). *Baltası-Palu (Elazığ) travertenlerinin tekno-mekanik özelliklerinin belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M. A. ve Sönmez, R. (2005). Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği, *İMO Bülten*, 77.
- Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y. İ. ve Sarıışık, A. (1996). Mermer teknolojisi. *Mermer Teknolojisi Dergisi*, 3, 15-18.
- Şimşek, O. (2004). *Beton ve beton teknolojisi*. Ankara: Seçkin Yayınevi, 75-119.

- Taşkın, C. (1999). *Türkiye çimento hammadde kaynakları*, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Toktay, M. (1993). *Betonda uçucu kül kullanımı, endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu*, Ankara.
- Toktay, M. ve Dilek, F. T. (2003). *Mineral katkı çimentolu sistemlerin sülfata dayanıklılığı*, Tübitak Araştırma Projesi Raporu, İntag-645.
- Toktay, M. ve Erdoğan, K. (1998). *Uçucu küllerin karakterizasyonu*, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 70.
- Toktay, M., Erdoğan, K. ve Türker, P. (2005). *Traslar ve traslı çimentolar*, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 63.
- Topçu, B. ve Demir A. (2007). *Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi*, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 455-463.
- Topçu, İ. B. (2006a). *Beton teknolojisi*, Konya: Uğur Ofset.
- Topçu, İ. B. (2006b). *Yapı Malzemeleri ve Beton Deneyleri El Kitabı*, Eskişehir:Nadir Kitap Yayınevi.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz,M. (2009). Alkalilerle Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Harçların Yüksek Sıcaklıklara Maruz Aldıktan Sonraki Mikroyapıları, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*,10(1), 319-326.
- Tosun, A. (2007). *Türkiye'nin mermer ihracatını artırma olanaklarının araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- TS EN 13914-1. (2007). *Dış ve iç sıvaların tasarımı, hazırlanması ve uygulanması – “dış sıva”*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-1. (2009). *Çimento deney metotları - bölüm 1: “dayanım tayini”*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-2. (2010). *Çimento deney metotları - bölüm 2: “çimentonun kimyasal analizi”*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-3. (2012). *Çimento deney metotları - bölüm 3: “priz süresi ve genleşme tayini”*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-6. (2010). *Çimento deney metotları - bölüm 6: “incelik tayini”*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 197-1. (2002). *Genel çimentolar – bölüm 1: genel çimentolar – bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 197-1. (2004). *Portland çimentosu*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS-21. (1983). *Beyaz portland çimento*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- TS-22. (1992). *Harç çimentosu*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.

- TSE EN 1097-2. (2000). *Beton agregalarında aşınmaya dayanıklılık (Aşınma oranı) deneyi*, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Tuygun, C. S. (2002). *Çayırhan uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi ve etkinlik faktörünün incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Türker, P., Erdoğan, B. ve Yeğinobalı, A. (2003). *Kalker katkılı portland çimentoların yangın direnci*, İMO, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, İstanbul, 441-447.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A. (2003). *Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği.
- Ünal, M. (1998). *Atık seramik karoların çimento üretiminde kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ünal, O. ve Kibici, A. (2001). *Mermer tozu atıklarının beton üretiminde kullanılmasının araştırılması*. Türkiye III. Mermer Sempozyumu (Mersem '2001) Bildiriler Kitabı, 317-325, Afyon.
- Wesche, K. (1991). *Fly ash in concrete properties and performance*. London: E and FN Spon.
- Yanık, G. (2005). *Turgutlu (Manisa) neojen oluşuklarının tuğla kiremit hammaddesi yönünden mineralojik petrografik ve jeokimyasal incelenmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yeğinobalı, A. (1999). *Portland çimentosu (Bazı temel bilgiler)*, Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü.
- Yücetürk, G. (2010). *Göller yöresindeki kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin yapay mermer kalitesine etkileri*. Doktora tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.





EKLER

Ek-1. Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.1. Tuğla tozunun öğütülmesinde kullanılan çene kırıcı ve örneklerin etüvde kurutulması



Resim 1.2. Bilyalı değirmen

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.3. Örnek çimento tiplerinin öğütüldükten sonra elenmesi



Resim 1.4. İncelik tayininde kullanılan Alpine incelik ölçüm cihazı ve Sartorius Basic elektronik terazi

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.5. İncelik deneyinin yapılışı ve Micromeritics AccuPyc yoğunluk cihazı



Resim 1.6. Tonindustrie-Seger marka blaine cihazı

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.7. Harçların su ihtiyacının tespit edilmesi



Resim 1.8. Harçların sarsma tablasındaki akma miktarının tespit edilmesi

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.9. Harç karışımlarının kalıplara yağlanarak konulması.



Resim 1.10. Harç karışımlarının kalıplara yerleştirilmesi.

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.11. Harç örnekleri



Resim 1.12. Yüksek sıcaklık öncesi örneklerin etüv fırınında kurutulması ve Yüksek sıcaklık fırınından bir görünüm.

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.13. Harç örneklerinin yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmesi ve harç örneklerinin soğutma süreci.



Resim 1.14. Harç örneklerinin eğilmede çekme deneyi

Ek-1. (devam). Çalışmada kullanılan alet ve cihazlar



Resim 1.15. Harç örneklerinin basınç deneyi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1987, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : +90 (530) 696 06 28
 e-mail : obayraktar@kastamonu.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/ Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü/İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/ Yapı Eğitimi Anabilim Dalı	2012
Lisans	Bozok Üniversitesi/İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Sakarya Üniversitesi/Yapı Öğretmenliği	2010
Lise	Keçiören Kanuni Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Kastamonu Üniversitesi Abana MYO	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, futbol, basketbol, sosyal projeler ve gönüllülük faaliyetleri, yapı tasarımı gezi inceleme aktivitelerine katılma.

Yayınlar

- Bayraktar, O.Y., Çitoğlu-Sağlam, G. ve Çağlar, H. (2016). I. Uluslararası Abana Sempozyumu, *Abana İlçesindeki Yığma Yapılarda Kullanılan Malzemelerin Tespiti ve Güçlendirme Önerileri*, Kastamonu Üniversitesi, Abana
- Çitoğlu Sağlam, G. ve Bayraktar, O.Y. (2016). I.Uluslararası Abana Sempozyumu, *Midye Kabuğunun Agregâ Olarak Betonda Kullanılabilirliği (Kastamonu/Abana ve Bartın/Amasra Örneklerinin Karşılaştırılması)*, Kastamonu Üniversitesi, Abana.
- Aydoğdu, A., Çitoğlu-Sağlam, G. ve Bayraktar, O.Y. (2016). I.Uluslararası Abana Sempozyumu, *“Abana Turizminin Sorunları ve Çözüm Önerileri Ortak Akıl Arama Toplantısının Ardından”*, Kastamonu Üniversitesi, Abana.





GAZİ GELECEKTİR..