

Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Havaalanı Kaplamaları İçin Uygun Beton Özellikleri

Serkan Sarıbek

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2012

Suitable Concrete Properties for Airfield Pavements Which Subject to High
Temperature

Serkan Saribek

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

August 2012

Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Havaalanı Kaplamaları İçin Uygun Beton Özellikleri

Serkan Sarıbek

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ö. Fatih Eser

Ağustos 2012

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Serkan SARİBEK'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Havaalanı Kaplamaları İçin Uygun Beton Özellikleri" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç.Dr. Ömer Fatih ESER

İkinci Danışman : ---

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer Fatih ESER

Üye : Prof. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

Üye : Doç. Dr. Nevzat KIRAÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet CANBAZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Musa ŞÖLENER

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Jet uçaklarının hizmete sokulması beton uçak pistlerinin ve park sahalarının ciddi oranda bozulmasına neden 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 ve hasarlı alanların belli sürelerle değiştirilmesi gerekir.

Basınç dayanımının artması ile ısısız gerilme sorunu çözülmez, yarmada çekme dayanımı artmış olmasına rağmen, termal gerilmeler eşit miktarda artmıştır. Bunun nedeni basınç dayanımının karekökü ile orantılı olarak hem elastisite modülünün hem de yarmada çekme dayanımının artmasıdır. Özgül ısının azaltılması faydalıdır. Termal gerilmelerdeki değişimler termal genişleme katsayısındaki değişimlere eşittir. Termal gerilmeler doğrudan elastisite modülü ile ilgilidir ve elastisite modülünde direk birim ağırlıkla ilgili olduğundan, birim ağırlık birinci etkendir ve termal genişleme katsayısından (α) daha önemlidir.

Bu çalışmada hava alanı beton kaplamaları için uygun beton özellikleri tanımlanmış, deneysel çalışmada hafif beton olarak perlit katkılı betonun fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada perlitli betonun tek başına yeterli olmadığı farklı katkılarla, geliştirilmiş kil, uçucu kül vb. ile desteklenmesi gerektiği tespit edilmiştir. Hava alanları için uygun beton dizaynı başka bir araştırma konusudur.

Anahtar Kelimeler: Pist, yüksek sıcaklık, uçak, beton, perlit

SUMMARY

The introduction of jet aircraft into service has created serious deterioration of the concrete runways and parking aprons. At landing and take-offing with repeated heating and cooling effect appears dusting and erosion on runways. In this case the runways even as they maintain their capacity to load in this case the functions are restricted and damaged areas must be replaced in certain periods.

Increasing compressive strength therefore does not solve the thermal stress problem, although splitting tensile strength increased, the thermal stresses increased by an equivalent amount. This is due to the fact that both modulus of elasticity and splitting tensile strength increase proportionally to the square root of compressive strength. Specific heat reduction is beneficial. Changes in thermal expansion coefficient is equal to changes on thermal stresses. Thermal stresses are directly related to the modulus of elasticity and because of modulus of elasticity is directly related to unit weight, the unit weight is first factor and is more important than thermal expansion coefficient.

In this study, suitable concrete properties are defined for runway concrete pavements. Experimental study of physical and mechanical properties of lightweight concrete were investigated as a perlite added concrete. In the experimental study perlite added concrete alone is not enough, different additives, expanded shale, fly ash, and so on. was determined to be supported by. Appropriate concrete design for airfield is another topic of research.

Keywords: Runway, high temperature, aircraft, concrete, perlite.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bana yol gösteren ve yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç Dr. Ömer Fatih ESER' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda verdiği yakın destek için, ESOGÜ Kimya Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Musa ŞÖLENER'e teşekkürü borç bilirim.

Tez süresince her türlü yardımı benden esirgemeyen Sayın Sevgin YILMAZ'a minnettarım.

Son olarak beni bugünlere getiren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, bana hayata bakış açısıyla yol gösteren anneme teşekkür ederim.

Serkan SARIBEK

Ağustos 2012

İÇİNDEKİLER**Sayfa**

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİ.....	3
2.1 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri.....	3
2.1.1 Çimento hamuru	4
2.1.2 Agregası.....	8
2.1.3 Mineral katkı malzemeleri	11
2.1.4 Liflerin etkisi.....	12
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri	14
2.2.1 Isı yayılım katsayısı	16
2.2.2 Isı iletim katsayısı	17
2.2.3 Genleşme katsayısı	17
2.2.4 Özgül ısı	17
2.2.5 Isı şoku parametresi	18
2.2.6 Birim hacim ağırlığı.....	18
2.2.7 Renk	20
3. JET UÇAKLARININ EGZOZ GAZINA MARUZ KALAN BETON KAPLAMALARIN NUMERİK İNCELENMESİ.....	23

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1 Sorunun Tanımlanması	24
3.2 Hedefler	25
3.3 Sonlu Eleman Modeli	25
3.4 Malzeme Isıl Özellikleri ve Isı Akış Modeli	27
3.5 Beton Dayanımı	28
3.5.1 Normal ağırlıklı betonda ısıl gerilmeler	30
3.6 Parametre Çalışması	33
3.6.1 Beton dayanımı	33
3.6.2 İletkenlik	34
3.6.3 Isı kapasitesi.....	35
3.6.4 Termal genişleme katsayısı.....	35
3.6.5 Hafif beton	35
3.6.5.1 Deneyim.....	36
3.6.5.2 Sonlu eleman analizi.....	38
3.6.5.3 Sıcaklık dönüşümü.....	39
3.7 Buhar Basıncı.....	40
3.8 En Uygun Hafif Beton Özellikleri	40
4.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	42
4.1.1 Agregalar	43
4.1.2 Çimento.....	45
4.1.3 Perlit.....	46
4.1.4 Karma suyu	47
4.2 Beton Karışım Oranları.....	47
4.3 Üretilen Numune Tipleri ve Kür Süresi.....	48

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.4 Betonlara Uygulanan Deneyleer.....	49
4.4.1 Taze beton deneyleri.....	49
4.4.1.1 Çökme deneyi	49
4.4.1.2 Birim ağırlığı belirleme deneyi.....	50
4.4.2 Sertleşmiş beton deneyleri	51
4.4.2.1 Tek eksenli basınç dayanım deneyi	51
4.4.2.2 Ultrases deneyi.....	51
4.4.2.3 Su emme deneyi.....	53
4.4.2.4 Kılcallık deneyi.....	53
4.4.2.5 Isı iletkenlik katsayısı	54
4.4.2.6 Yüksek sıcaklık deneyleri.....	56
5.1 Taze Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	58
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	58
5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	59
5.2.1 Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi.....	59
5.2.2 Ultrases deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	62
5.2.3 Su emme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	66
5.2.4 Kılcallık deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	67
5.2.5 Isı iletkenlik deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi.....	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
7. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	71

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Boşluk suyu transferi	4
2.2 Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki	6
2.3 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun termogravimetrik ergileri.....	7
2.4 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derece ve oranı	8
2.5 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi	10
2.6 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi	13
2.7 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri.....	14
2.8 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi	15
2.9 Çeşitli betonlar için a ısısı yayılım katsayısı	16
2.10 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi.....	19
2.11 Silis esaslı agrega ile üretilen betonda basınç dayanımı renk ilişkisi	21
2.12 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi	22
3.1 F/A-18 uçakları park sahasındaki tipik bir hasarlı alan.	24
3.2 Kaplama ağı diskretizasyonu	26
3.3 Merkezdeki sıcaklık dağılımı.....	27
3.4 Yatay basınç gerilmeleri, termoelastik model	31
3.5 Düşey çekme gerilmeleri, termoelastik model	31
3.6 Düşey çekme gerilmeleri, beton model	32
3.7 Yüksek dayanımlı NW beton için çekme gerilmeleri.....	34
3.8 Harrier uçağı resmi.	37
3.9 a) F7 Cutlass, b) F8U Crusader Navy.....	37
3.10 Genleştirilmiş killi beton için çekme gerilmeleri.	38
3.11 Gerekli çekme dayanımına karşı uygunluk	41
4.1 Karışımın granülometri eğrisi.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2 Standart kür koşullarında bekletilen numuneler.	49
4.3 Çökme deneyi yapılış aşamaları.	50
4.5 Basınç testi uygulanmakta olan bir küp numune.	51
4.6 Ultrases deneyi uygulanmakta olan bir küp numune.	52
4.7 Kılcallık katsayısı belirleme deney düzeneği.	54
4.8 25 mm çapında, 64 mm uzunluğunda beton numuneler.	55
4.9 Isı iletkenlik katsayısı belirleme cihazı.	55
4.10 Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan beton numuneler.	57
5.1 Taze beton birim ağırlıkları, kg/m ³	58
5.2 Tek eksenli basınç dayanım değerleri, MPa.	61
5.3 Ultrases geçiş hızları, km/s.	64
5.4 Dinamik elastisite modül değerleri, GPa.	66
5.5 Birim ağırlık ile su emme oranı arasındaki ilişki.	67
5.6 Birim ağırlık ile kılcallık katsayısı arasındaki ilişki.	68
5.7 Kılcallık katsayısı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.	68
5.8 Birim ağırlık ile ısı iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki.	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Bazı minerallerin yüksek sıcaklıkta renk değişimleri.....	20
3.1 Kaplama yüzeyi üzerinde radyal sıcaklık dağılımı.....	25
3.2 Eğilme ve çekme altında beton dayanımı.....	29
4.1 Agregaların granülometrisi.....	44
4.2 Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	46
4.3 Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi.....	47
4.4 Beton karışım oranları	48
4.5 Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi ilişkisi.....	53
5.1 Taze beton birim ağırlıkları ve çökme miktarları.....	58
5.2 Tek eksenli basınç dayanım değerleri.....	60
5.3 Ultrases geçiş hızları.....	63
5.4 Dinamik elastisite modül değerleri.....	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
°C	Celsius, Santigrat derece.
Cl	Klor.
cm	Santimetre.
dm	Desimetre.
°F	Fahrenayt derece.
hr	Hour, Saat.
in.	Inch, 2,54 cm.
K	Kelvin.
kg	Kilogram.
Kj	Kilojoule.
km	Kilometre.
m	Metre.
mm	Milimetre.
P	Isı şoku parametresi.
sa	Saat.
W	Watt.
α	Alfa, Isıl genleşme katsayısı.
β	Beta.
λ	Lamda, Isı iletim katsayısı.
σ	Sigma, Gerilme

Kısaltmalar **Açıklama**

ACI American Concrete Institute.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar Açıklama

ADINA	A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis.
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit.
BTU	British thermal unit.
CaO	Kalsiyum oksit.
Ca(OH) ₂	Kalsiyum hidroksit.
CO ₂	Karbondioksit
ESOGÜ	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
et al	Ve diğerleri.
Fe ₂ O ₃	Demir oksit.
GPa	Gigapascal, 10 ³ Mpa.
H ₂ O	Hidrojen oksit.
K ₂ O	Potasyum oksit.
Ksi	Kilopound per square inch, yaklaşık 6,89 Mpa.
MgO	Magnezyum oksit.
MPa	Megapascal.
Mph	Miles per hour, yaklaşık 1,609 km/sa.
Na ₂ O	Sodyum oksit.
NB	Normal beton.
PB	Perlitli beton.
Pcf	Pound per cubic foot, yaklaşık 16,02 kg/m ³ .
ppm	Parts per million, Milyonda bir birime verilen isimdir.
psi	Pounds per square inch, yaklaşık 0,0069 Mpa.
SiO ₂	Silisyum oksit.
SO	Kükürt oksit.
Take-off	Uçakların havalanmadan önce son kontrollerinin yapıldığı yer.

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar Açıklama**

vb.	Ve benzerleri.
vd.	Ve diğerleri.
VTOL	Vertical take-off and landing.
YAMAHA	Yabancı madde hasarı, Uçak motorlarına, çok yüksek hava emişinden kaynaklanan her türlü serbest malzemenin verebileceği hasardır.

BÖLÜM-1

GİRİŞ

Jet uçaklarının hizmete sokulması beton uçak pistinin ve park sahalarının ciddi oranda bozulmasına neden olur. Uçakların destek kuvvet ünitesinin egzoz gazı üst beton tabakasının kırılmasına ve parçalanmasına neden olur, hasarlı alanların belli sürelerle değiştirilmesi gerekir. Benzer bir sorun jet motor test hücrelerindeki kaplamalarda da görülür (L. J. Malvar ve M. C. Hironaka, 1991).

Yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır (Khoury, 2000). 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde odaklanılmıştı (Khoury, 2003 b). Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmelidir. Çünkü bu betonların boşluk oranı düşük, yapısı daha yoğun olduğu için yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşüktür (Schrefler vd., 2003).

Egzoz gazları beton kaplama yüzeyine yüksek sıcaklıklardan daha hızlı erişir. Ortam sıcaklığı da önemli bir parametredir (L. J. Malvar ve M. C. Hironaka, 1991). Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196 °C'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına neden olmaktadır, iniş 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 (Ramakrishman vd., 1991).

Bu çalışmada jet uçaklarının egzoz sıcaklığın betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine yapılan nümerik çalışmalar incelenecek ve yüksek sıcaklık etkisi altında farklı betonlar ve sıcaklıklar için deneysel araştırmalar yapılmış daha sonra deneysel sonuçlar irdelenmiş ve hava alanı beton kaplamaları için uygun beton özellikleri verilmiştir.

BÖLÜM-2

GENEL BİLGİ

2.1 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir (Erdogan, 2003: Mahsanlar'dan (2006)). Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000: Mahsanlar'dan (2006)). Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002: Mahsanlar'dan (2006)).

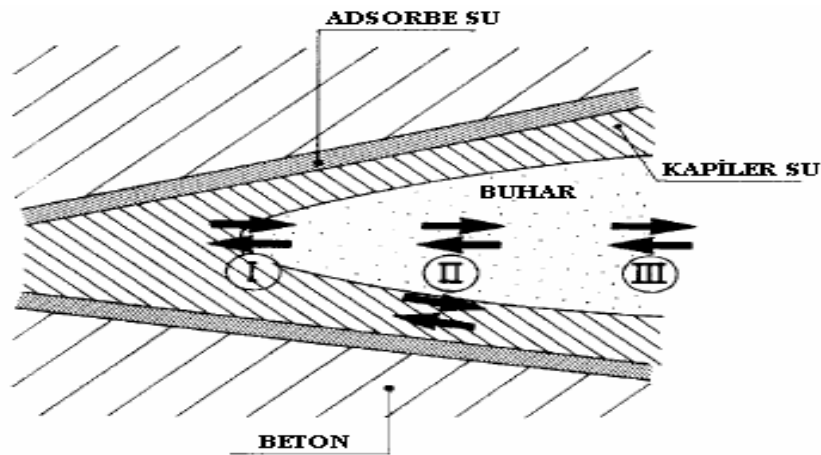
Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Polipropilen lif ve hava sürükleyici kullanılması parça atma riskini azaltır. Hava sürükleyiciler nem içeriğini ve boşlukların miktarını artırarak boşluk basıncını düşürür. Parça atmaları azaltmak için termal bariyerler, polipropilen lifler, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük termal genleşmeye sahip agregalar kullanmak gerekir (Khoury, 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Riley, 1991; Akman, 2000: Mahsanlar'dan (2006)).

Beton, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004: Mahsanlar'dan (2006)). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerini ve özelliklerinin değişimi için aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.1.1 Çimento hamuru

Çimento hamuru ilk ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100 °C ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100 °C'den sonra kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı önemli bir rol oynamaktadır (Khoury, 1992: Mahsanlar'dan (2006)). Şekil 2.1'de basitleştirilmiş boşluk suyu transferi görülmektedir. "I" suyun buharlaşması veya yoğunlaşması, "II" betonun içine suyun transferi, "III" ise suyun dış çevreye transferini temsil etmektedir (Andrade vd., 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).



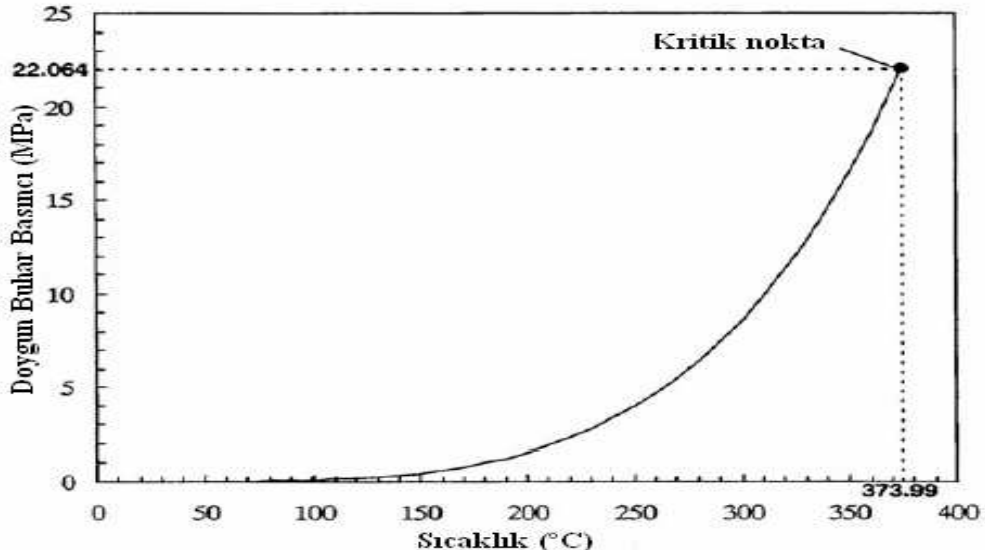
Şekil 2.1 Boşluk suyu transferi (Andrade vd., 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır (Vodak vd., 2004: Mahsanlar'dan (2006)). Beton bünyesinde boşluklar, kalsiyum silikat hidrate (CSH) jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur. Genellikle, sertleşmiş çimento hamuru 20-200 °C civarında genişir. 200 °C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genişir. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003a: Mahsanlar'dan (2006)). 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad ve Shannis, 2004: Mahsanlar'dan (2006)). 600 °C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni büzülen ara bölme duvarlar ve oluşan mikro çatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003a: Mahsanlar'dan (2006)).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikro çatlakların mevcudiyeti, sertleşirken oluşan rötrenin sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerin etrafındaki mikro çatlaklarda bu sıcaklıkta gelişir. 300 °C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500 °C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0,01mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0,05 mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Alonso vd., 2003a: Mahsanlar'dan (2006)).

Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı ögelerini birbirine bağlayan

adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin %4'ü kadar bulunabilen serbest su 100 °C'de, kimyasal bağı su ise 300 °C 'de buharlaşmaktadır. Şekil 2.2'de boşluk suyu basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki görülmektedir. 374 °C'de 22,06 MPa kritik su basıncı oluşmaktadır. Kritik noktanın üstünde su buhar halinde, altında ise sıvı halinde kabul edilir (Khoury, 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

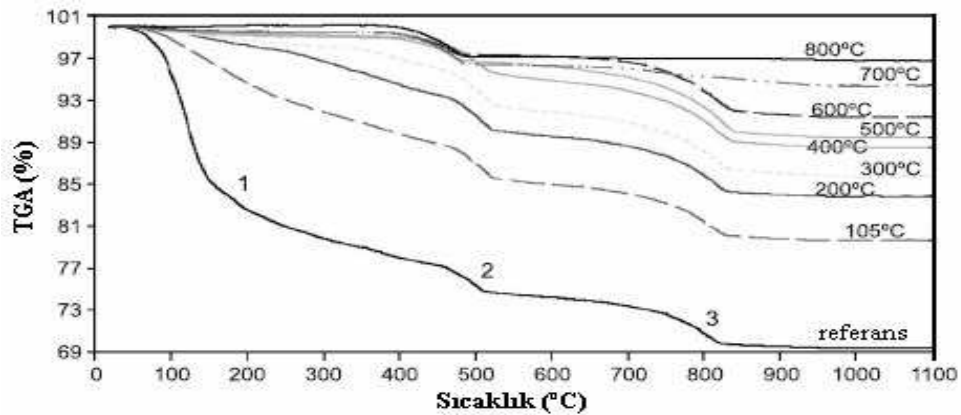


Şekil 2.2 Doymuş buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki (Khoury , 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

Bazı araştırmacılar 100 °C civarında permeabilitede azalma bulmuşlardır. Bu diğer araştırmalarda aynı bölgede düşük basınç dayanımı bulunmasıyla çelişir. Olası tek açıklama artan basınçtan dolayı suyun yoğuşmasıdır çünkü nemli betonun düşük dayanım gösterdiği bilinir. Benzer sıcaklık aralıklarında etrenjitin yok olmasıyla da ilişkili olabilir. Bu olay çok miktarda suyun serbest kalmasını sağlar ve taşıyıcı fazların azaldığı farz edilir (Andrade vd.,2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

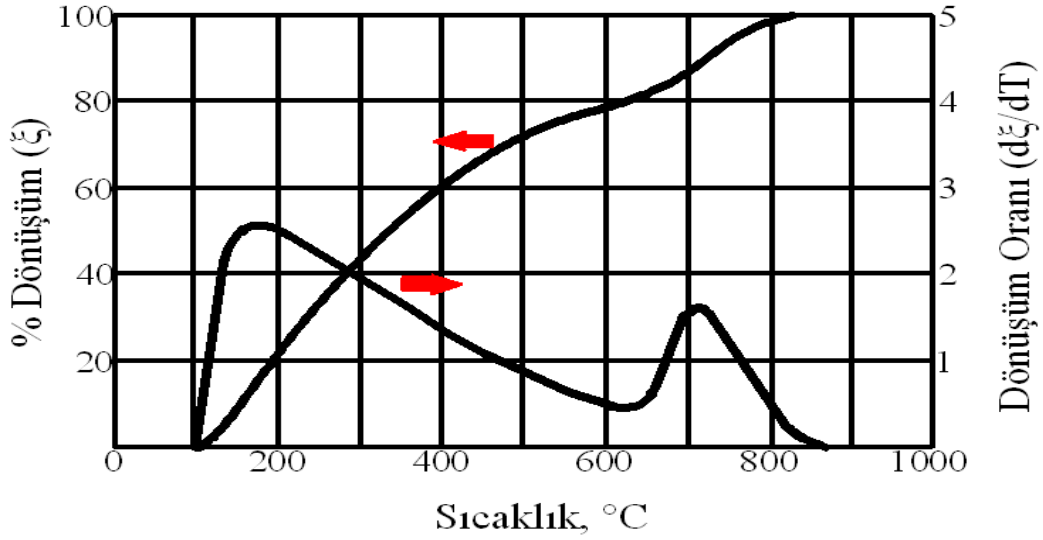
Çimento hamuru %70-80 tabakalı CSH jeli, %20 Ca(OH)_2 ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur (Zhang vd., 2002; Mahsanlar'dan (2006)). Ca(OH)_2 , 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde %33'e varan bir büzülme oluşur. Yangın sırasında sıkılan su ile CaO tekrar Ca(OH)_2 'ye dönüşür, bu olay %44 mertebesinde bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 'nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530 °C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır. Yüksek fırın curufllu ve alüminli çimentolarla üretilen betonlarda Ca(OH)_2 'nin az olması nedeni ile bu lekeler daha az olabilir (Akman, 2000; Mahsanlar'dan (2006)).

Şekil 2.3'te görülen Alarcon-Ruiz vd. (2005) tarafından yapılan termogravimetrik analizde üç önemli ağırlık kaybı görülmektedir. İlk ağırlık kaybı 100-200 °C arasında CSH, karboalüminatlar ve etrenjit gibi birçok hidratın dehidrasyonu, ikinci ağırlık kaybı 450-550 °C arasında portlanditin dehidroksilasyonu ve üçüncü ağırlık kaybı ise 750-850 °C arasında klinker ve filler malzemedeki kalsiyum karbonatın dekarbonasyonu ile oluşur. Dehidroksilasyon ve dekarbonasyon reaksiyonları birbirleriyle ilişkilidir. 700-800 °C'nin üstünde portlandit artarken dekarbonasyon reaksiyonları azalır. Bunun ana nedeni portlanditin fırın içinde soğurken yeniden kristalleşmesidir.



Şekil 2.3 Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamurunun termogravimetrik erişleri (Alarcon- Ruiz vd., 2005; Mahsanlar'dan (2006)).

Ca(OH)_2 'nin CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500°C civarında olurken, Şekil 2.4'de görüldüğü gibi CSH'in dehidratasyonu 110°C 'den itibaren başlamaktadır (Scherefler vd., 2003; Mahsanlar'dan (2006)). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına neden olur.



Şekil 2.4 Çimento pastasındaki tobermoritin (CSH) sıcaklığa bağlı olarak dönüşüm (dehidratasyon) derecesi ve oranı (Scherefler vd., 2003)

2.1.2 Agregalar

Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler (Alonso vd., 2003 a; Mahsanlar'dan (2006)). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250 °C ile 575 °C'ler arasındır (Perkins, 1986: Mahsanlar'dan (2006)). Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200 °C'de erir (Haddad ve Shannis, 2004: Mahsanlar'dan (2006)). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575 °C'de yaklaşık %5,7'lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α -kuvarzdan β - kuvarza dönüşür (Alonso vd., 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

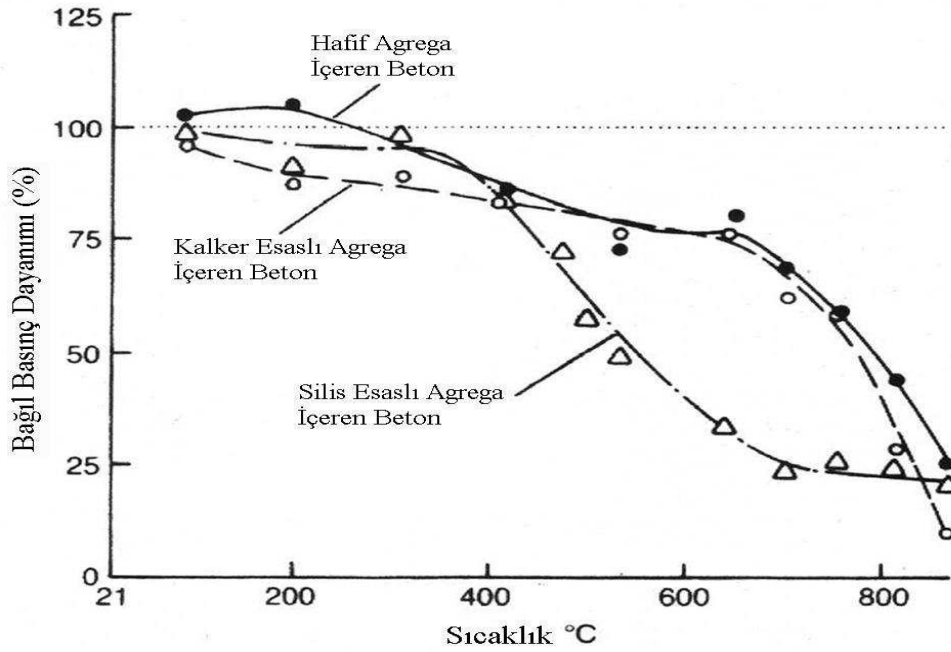
Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C'ye kadar kararlıdır (Alonso vd., 2003b: Mahsanlar'dan (2006)). 800-900 °C'lerde CaO ve MgO'ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO₂'nin ayrışması, MgO ve CaO'nun oluşması büzölmeye neden olur (Khoury, 1992: Mahsanlar'dan (2006)). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)₂ tekrar oluşur. Bu büzölme ve genişmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986: Mahsanlar'dan (2006)).

Nükleer reaktörlerde kullanılan ağır betonlar 400-800 °C arasında sıcaklığa maruz kalırlar. Sakr ve El-Hakim (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada çakıl (kum), barit ve ilmenite agregaları kullanılarak üretilen betonlar 250, 500, 750 ve 950 °C'ye maruz bırakılmıştır. Kontrol deneyleri sonunda ilmenite kullanılarak üretilen ağır betonlar fiziksel ve mekanik açıdan en yüksek performansı göstermiştir.

Khoury'nin (1992) yapmış olduğu bir derlemede üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600 °C'ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç dayanımlarının silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlemlendiği belirtilmiştir (Şekil 2.5).

Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000 °C'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir (Perkins, 1986: Mahsanlar'dan (2006)).

Pomza, köpük, cüruf ve genişletilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür (Shoaib vd., 2001: Mahsanlar'dan (2006)).



Şekil 2.5 Betonun bağıl basınç dayanımının kullanılan agrega türüne göre sıcaklıkla değişimi (Khoury, 1992: Mahsanlar'dan (2006)).

Allen ve Desai (1967) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada farklı tip agregaların kullanıldığı betonlar 300 °C sıcaklığa maruz bırakılmış, agrega olarak killi ateş tuğlasının kullanıldığı betonlar, en iyi mekanik özelliği göstermiştir. Genellikle silis içermeyen agregalar, örneğin kalker ve volkanik kökenli agregalar ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıklıdır (Postacıoğlu, 1987: Mahsanlar'dan (2006)).

2.1.3 Mineral katkı malzemeleri

Beton, uygulama alanlarında daha iyi performans göstermesi için son yirmi yılda geliştirilmiş ve gerek kimyasal gerekse mineral katkı malzemelerinin kullanımı ile basınç dayanımları 80 MPa ve üzeri olan betonlar üretilmiştir (Kalifa vd., 2000: Mahsanlar'dan (2006)).

Yüksek dayanımlı ve dayanıklı beton bir çok açıdan üzerinde çalışılan bir konudur. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında yüksek performanslı betonda, normal betona göre özelliğini kaybedip parçalanma, dağılma gibi daha ciddi hasarlar oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıkta dağılmaya ve parça atmaya neden yüksek performanslı betonun yoğunluğudur. İç yapıdaki sıkılık yangın direncini azaltır ve yüksek dayanımlı betonu normal betona göre yüksek sıcaklık etkisinde daha riskli duruma getirir (Kalifa vd., 2000: Mahsanlar'dan (2006)). Yüksek sıcaklık etkisinde puzolanlardan beklenen fayda, kalsiyum hidroksitleri tüketerek CSH oluşumuna katkıda bulunmalarıdır (Haddad ve Shannis, 2004: Mahsanlar'dan (2006)).

Silis dumanı, uçucu kül ve curuf gibi mineral katkı malzemelerinin kullanımı yüksek performanslı beton hazırlamada en etkin yoldur (Poon vd., 2004: Mahsanlar'dan (2006)). Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık 300 °C'yi aştığında jel adsorbe suyu serbest hale geçmekte, yüksek performanslı betonlarda kılcal boşlukların boyutu küçük olduğundan bu boşluklarda buhar basıncı artmakta, betonda büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan basınç etkisi, betonda patlamalara ve dağılmalara neden olmaktadır (Yeginobalı, 2002: Mahsanlar'dan (2006)). Poon vd. (2001) tarafından, yüksek sıcaklığın yüksek dayanımlı betona etkilerinin araştırıldığı çalışmada, silis dumanı katkılı beton numunelerde yapılan deneysel çalışmalardan örnekler verilmiş, bu örneklerden birinde %14-20 silis dumanı katkılı, basınç dayanımı 170 MPa olan beton numunelerde, 350 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda basınç dayanımının arttığı, yüksek sıcaklıklarda ise dayanımında ani bir

düşüşün olduğu, 650 °C’de çatlama, parça atma ve patlama şeklinde hasarlar görüldüğü belirtilmiştir. Aynı çalışmada verilen diğer bir örnekte ise %10 silis dumanı katkılı numunelerde, silis dumanının yüksek sıcaklık etkisinde betona herhangi bir yararının olmadığı ifade edilmiştir.

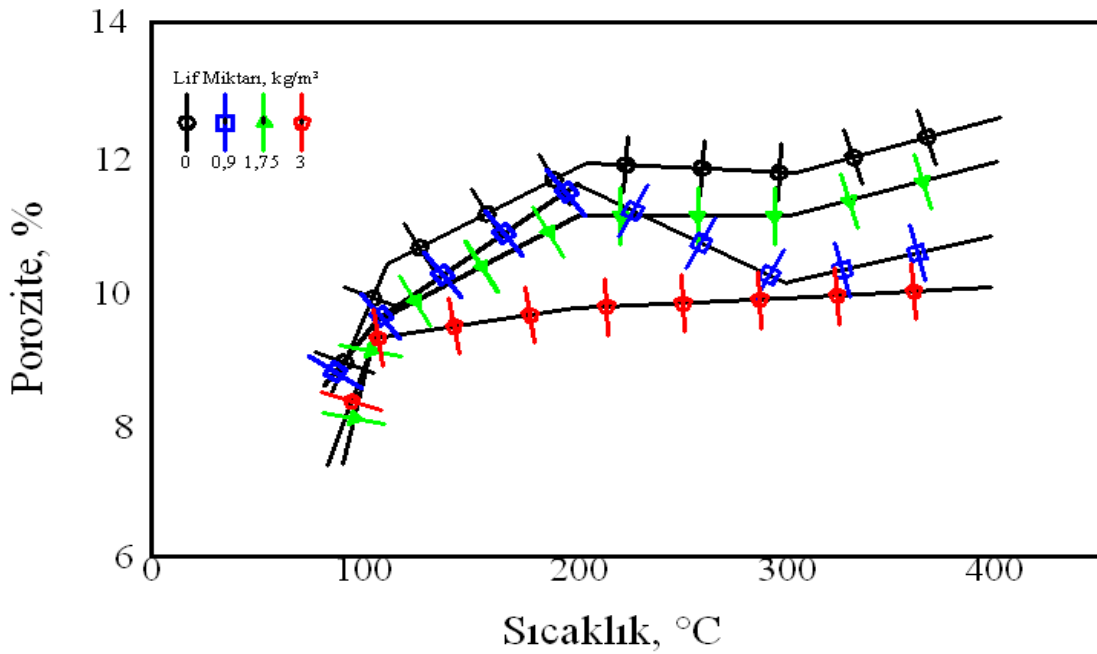
Uçucu kül, 121-149 °C’ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle CSH jelinden iki üç kat daha güçlü tobermorit jeli oluşturarak betonun basınç dayanımını % 152 oranında arttırmaktadır. Yüksek fırın cürufu ise yüksek sıcaklıkta diğer puzolanlara göre en iyi performansı göstermektedir. Silis dumanı katkılı betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişmekle birlikte, %10’un üzerinde silis dumanı katkılı betonlar hariç tüm puzolan katkılılar, katkısız betonlara oranla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir (Poon vd., 2001; Yeginobalı, 2002).

2.1.4 Liflerin etkisi

Malzemeler, özellikle çekme, eğilme ve çarpma dayanımları gibi mekanik dayanımlarının iyileştirilmesi, gevrek kırılma özelliğinin kısmen giderilebilmesi amacıyla liflerle donatılmaktadır. Çimento harçları ve betonların donatılmasında, asbest lifi, özel cam lifleri, çelik teller, polipropilen gibi polimer yapıları lifler, karbon lifleri ve selüloz, sisal, hindistancevizi lifleri gibi değişik bitkisel lifler kullanılmaktadır (Ersoy, 2001; Mahsanlar’dan (2006)). Bunlardan en sık kullanılan polipropilen lifler ve çelik tellerin yüksek sıcaklık etkisinde davranışı aşağıda incelenmiştir.

Polipropilen lifler, düşük ergime noktalarından dolayı iki şekilde etkilerler. Sıvılaştıran lif yakınındaki boşlukları doldurur fakat daha sonra organik bileşenlerinin bir kısmının buharlaşması sonucu poroziteyi artırır. Porozitedeki artış kullanılan lif içeriğiyle orantılıdır. Polipropilen lifler, yüksek performanslı betonlara ağırlıkça %0,05-0,1 oranında katıldıklarında parça atmaları engeller, çünkü 160 °C civarında eriyerek porozitenin gelişmesini kolaylaştırır ve açık boşluklar oluşturarak buhar

basıncını azaltırlar. Şekil 2.6'da porozitedeki artış polipropilen lif içeriğine bağlı olarak verilmiştir (Alonso vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)). Yangın sırasında yüksek sıcaklık etkisinde bu liflerin eriyerek su buharının sınır bölgelerden çıkabileceği, böylece yüzeylerdeki dökülmelerin engellenebileceği belirtilmektedir (Taşdemir vd., 2005: Mahsanlar'dan (2006)).

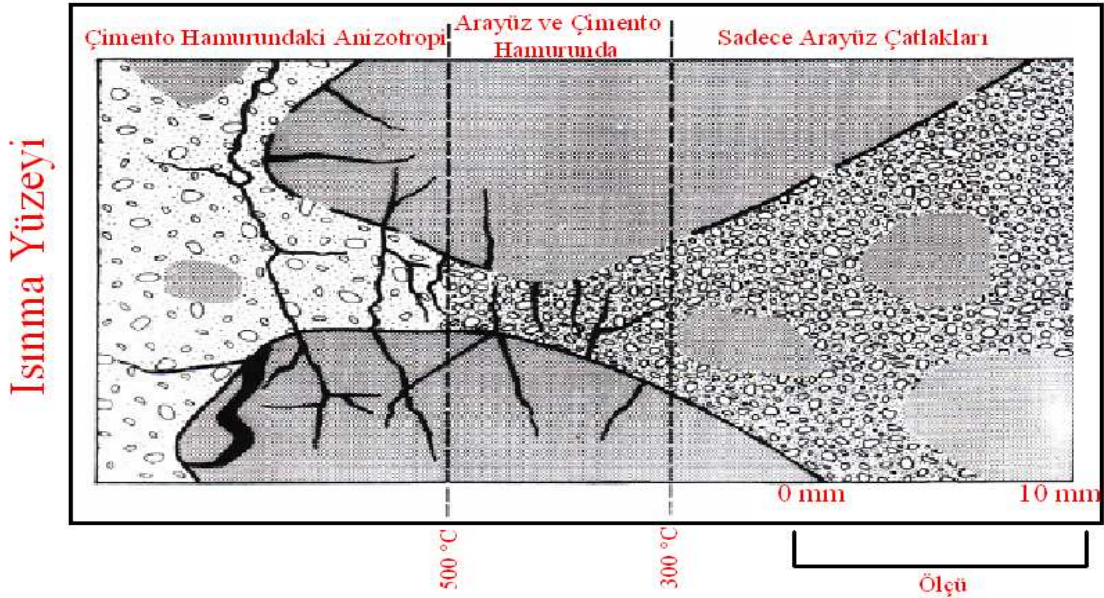


Şekil 2.6 Polipropilen lif içeriğine bağlı porozite değişimi (Alonso vd., 2003 b)

Çelik lifler yüksek sıcaklıklarda betonda çatlak oluşmasına katkıda bulunurlar. 500 °C'nin üstünde okside olurlar. Okside olan çelik liflerin hacmi, çevresindeki dehidrat çimento hamuruna basınç uygular ve çatlakların ilerlemesini kolaylaştırır (Alonso vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)). Ultra yüksek dayanımlı betonlarda yüksek sıcaklıklarda patlamaların azalmasını sağlarlar (Alonso vd., 2003 a: Mahsanlar'dan (2006)).

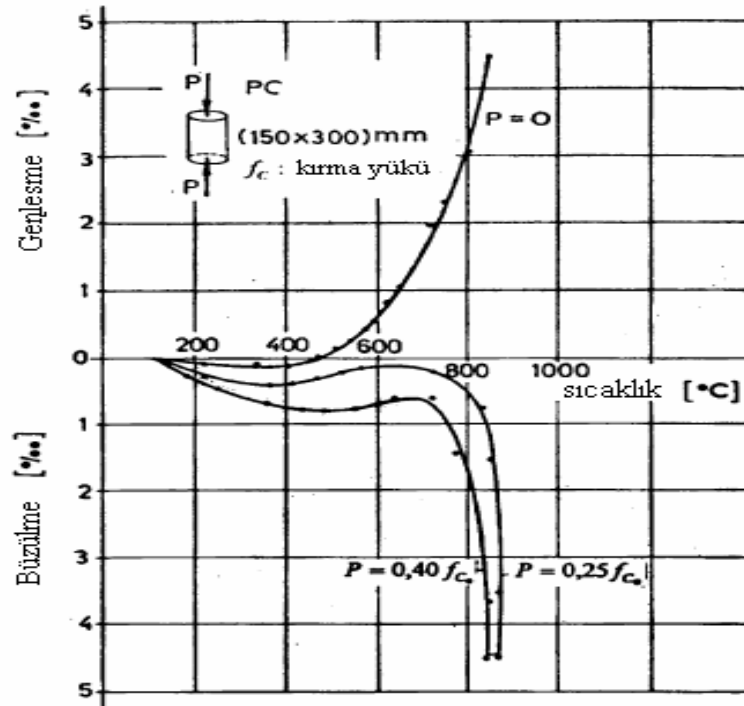
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayınımına, ısı iletkenliğine, ısıl genişmesine, özgül ısısına, birim ağırlığına ve rengine etki eder. Bu fiziksel değişimler sırasında betonun mekanik özelliklerinde de değişiklikler meydana gelir. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayınımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur. Riley (1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermeleri çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermelere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyinden itibaren 25-30 mm içeriye girmiştir.



Şekil 2.7 Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)

300 °C'den daha düşük sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel ara yüz çatlakları, 300-500 °C arasında ara yüz ve çimento pastasında, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agrega tanelerinde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu da betonun anizotropik özelliğinin başlangıcıdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda anizotropik özellikler gözleniyorsa, sıcaklık 500 °C'yi aşmış demektir (Riley, 1991: Mahsanlar'dan (2006)).



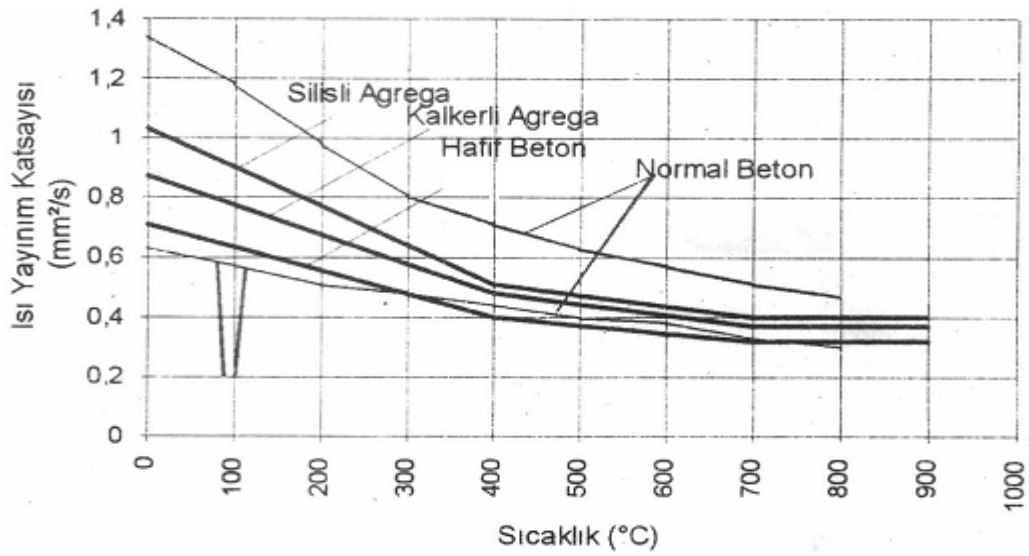
Şekil 2.8 Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (Papayianni ve Valliasis, 2005)

Papayianni ve Valliasis (2005) tarafından Şekil 2.8'de görüldüğü üzere 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindirik beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde yüksüz durumda 400 °C'ye kadar büzülme daha sonra genişleme gözlenmiştir.

2.2.1 Isı yayılım katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayılım katsayısı (a , mm^2/s) etkili olur. Isı yayılım katsayısı, malzemenin ısı iletim katsayısına (λ , $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), özgül ısısına (c , $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$) ve birim ağırlığına (β , kg/m^3) bağlı olarak (2.1) bağıntısı ile hesaplanır (CEB, 1991: Mahsanlar'dan (2006)).

$$a = \lambda / c \cdot \beta \quad (2.1)$$



Şekil 2.9 Çeşitli betonlar için a ısı yayılım katsayısı (CEB, 1991: Mahsanlar'dan (2006)).

Isı yayılım katsayısı, Şekil 2.9'dan da görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100 °C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.

2.2.2 Isı iletim katsayısı

Yapılan araştırmalar, betonun ısı iletimine etki eden temel unsurun agrega türü olduğunu göstermektedir. Betonun kalker ve dolomit esaslı agregalarla üretilmesi durumunda λ büyük değerler almaz. Buna karşın silis esaslı agreganın kullanıldığı betonda λ 'nın %15-20 daha büyük olduğu kabul edilir. Isı iletim katsayısına etki eden diğer iki önemli unsur, boşluk oranı ve boşluk yapısı ile su içeriğidir. Suyun ısıyı havaya göre daha fazla iletmesinden dolayı kuru haldeki bir cisimde gözeneklerin fazla olması λ 'nın düşmesine yol açar. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun, gözeneklerinden su kaybettiği, çimentonun dehidratasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüştüğu ve ısı iletim katsayısının azaldığı bilinir (Aköz veYüzer, 1994: Mahsanlar'dan (2006)).

2.2.3 Genleşme katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısı genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α , $1/^\circ\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı (11.10^{-6} - 20.10^{-6} $1/^\circ\text{C}$) ile agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıka α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega ara yüzünde çatlamalara neden olur (CEB, 1991: Mahsanlar'dan (2006)).

2.2.4 Özgöl ısı

Betonun özgül ısısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli etkisi yoktur (Aköz vd., 1995: Mahsanlar'dan (2006)).

2.2.5 Isı şoku parametresi

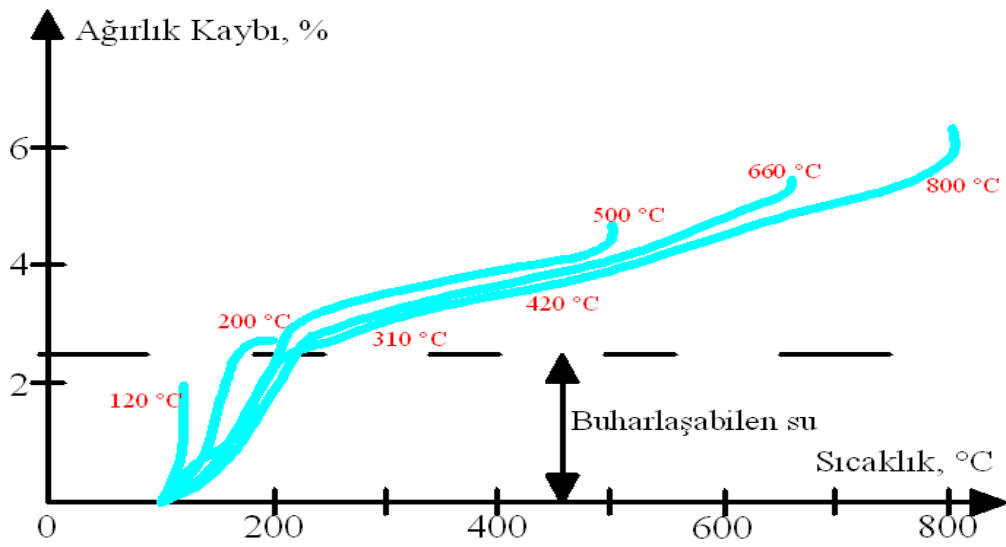
Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isıl şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısıl genişlemeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısıl genişmesi küçük malzemelerde ısıl enerji hızla çevreye yayılır bu nedenle sıcaklık gradyanı düşük, boyut değişimleri az, dolayısıyla gerilmeler küçük olur. Malzemelerin ısı şokuna dayanıklılığını belirtmek için ısı şoku parametresi kullanılır. Isıl şoka dayanıklılık yüksek ısı iletimli ve yüksek çekme mukavemetlilerde büyük, ısı genişmesi ve elastisitesi büyük olanlarda ise küçük olur. Bu etkenlere bağlı olarak ısı şoku parametresi λ ısı iletim katsayısına, α ısıl genişme katsayısına, σ_c malzemenin çekme mukavemetine ve E elastisite modülüne bağlı olarak (2.2) bağıntısı ile hesaplanır (Onaran, 2000: Mahsanlar'dan (2006)).

$$P=\lambda\sigma_c/E\alpha \quad (2.2)$$

2.2.6 Birim hacim ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genişme nedeniyle hacim artar (Aköz vd., 1995: Mahsanlar'dan (2006)). Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar (Alonso vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)). Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995: Mahsanlar'dan (2006)).

Anderberg-Thelanderson sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına neden olan ağırlık kaybını silis esaslı agrega ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.10'da verilmiştir. 1000 °C'ye kadar yoğunluğun %11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003: Mahsanlar'dan (2006)).



Şekil 2.10 Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan başka bir çalışmada suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, mikroyapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar (Alonso vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)).

2.2.7 Renk

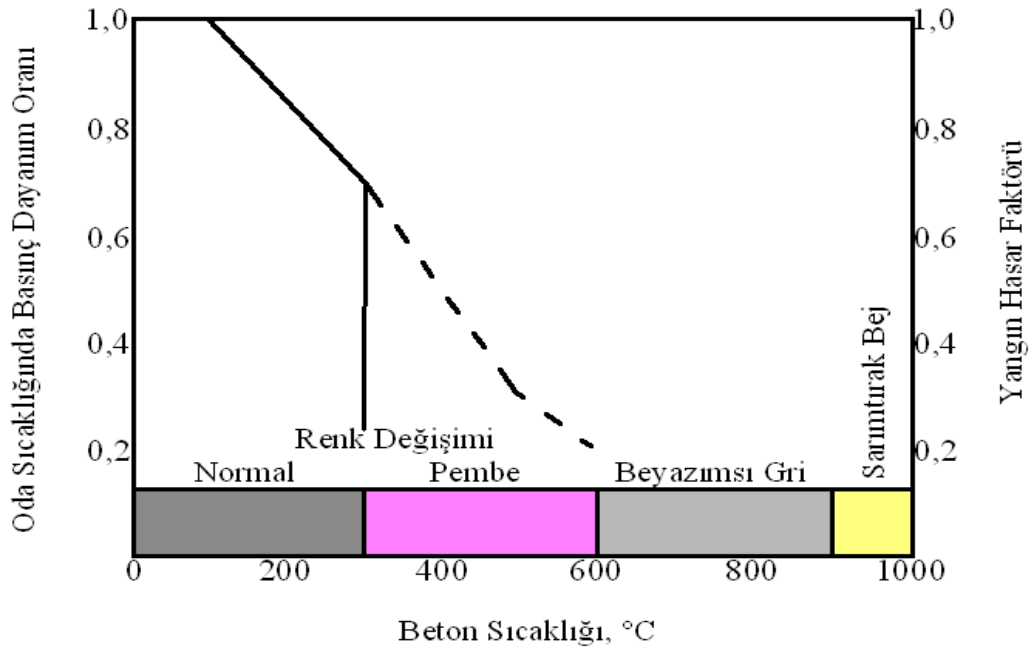
Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı agregalı betonun maruz kaldığı maksimum sıcaklığın tahmin edilebildiği, özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda renk değişiminin belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600 °C'ye, gri ise 600-900 °C'ye yükseldiği önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Neville, 2000: Mahsanlar'dan (2006)).

Bazı minerallerin renklerinde Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi yüksek sıcaklık etkisiyle değişiklikler meydana gelir. Örneğin Kuvartz'ın (SiO_2) bir türü olan Ametist'in 300 °C'de renginin değiştiği, koyu renkli çeşitlerinin ısıtılınca sarı renge dönüştüğü belirtilmiştir (Uz, 1994: Mahsanlar'dan (2006)).

Çizelge 2.1 Bazı minerallerin yüksek sıcaklıkta renk değişimleri (Uz, 1994)

Mineral	Renk	
	Soğuk Halde Gözlenen	Sıcak Halde Gözlenen
Demir	Sarımtırak	Kırmızımsı kahve
Bakır	Mavi	Kirli yeşil
Manganez	Grimsi kirli yeşil	Grimsi kahve (koyu)
Krom	Sarımsı yeşil	Koyu pembe-kırmızı

Silis esaslı agrega ile üretilen betonlarda Şekil 2.11'de görüldüğü gibi 300 °C civarında oluşan pembe renk betonun dayanımının ve elastisite modülünün önemli şekilde azaldığını gösterir. Beyazımsı gri veya sarımtırak bej renkli beton zayıf ve gevreklerdir. Renkteki değişimin nedeni metal içeren bileşenlerdir ve betonun ulaştığı maksimum sıcaklığın ve denk yangın ömrünün belirlenmesinde kullanılabilir (Andrade vd., 2003 b: Mahsanlar'dan (2006)).

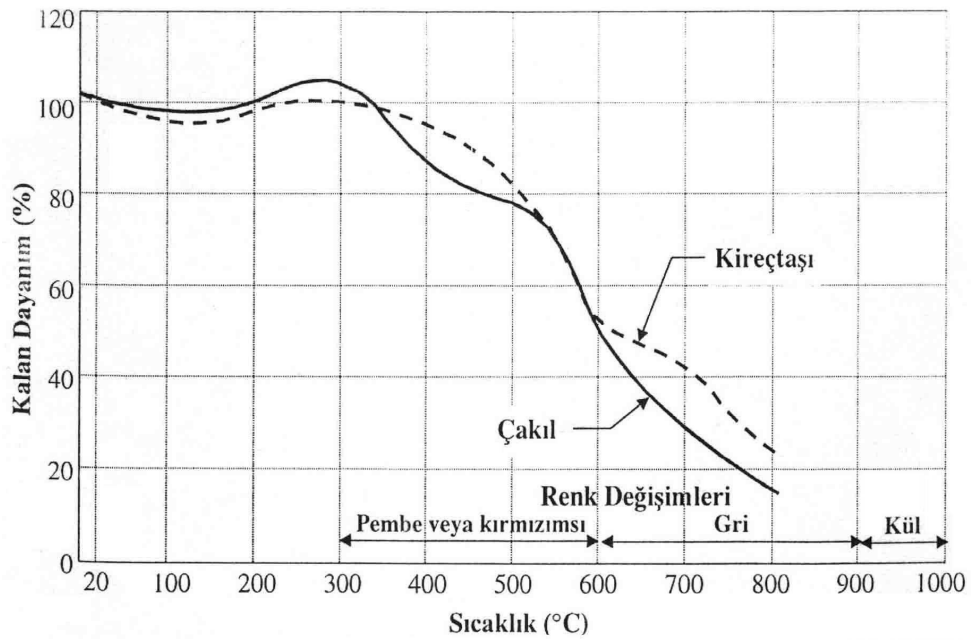


Şekil 2.11 Silis esaslı agrega ile üretilen betonda basınç dayanımı renk ilişkisi
(Andrade vd., 2003 b)

Agrega olarak nehir kumu ve bazalt kullanılarak üretilmiş yüksek dayanımlı betonlar üzerinde yapılan diğer bir çalışmada 200 °C'de renkte bir değişim olmazken, 400 °C, 800 °C ve 1000°C'de sırasıyla, açık sarı, kirli beyaz ve kırmızı renkleri gözlenmiştir. Renkteki değişimin betonun yapısında ve bileşimindeki değişikliklerin bir sonucu olduğu ve basınç dayanımındaki azalmaya bir referans olabileceği söylenmiştir (Li vd., 2004: Mahsanlar'dan (2006)).

Chang vd. (1993) tarafından yapılan bir çalışmada normal dayanımlı beton kullanılan bir binadan örnekler alınmış, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300 ve 1400 °C'ye on dakika ve bir saat maruz bırakılmıştır. Betonların rengi 800 °C ve 900 °C de soluk kırmızı, 1000 °C'de parlak kırmızı, 1100 °C'de gri, 1200 °C'de on dakikada grimsi sarı, bir saatte kısmen grimsi sarı kısmen kahverengi, 1300 °C de kahverengi ve 1400 °C'de koyu kahverengi olarak gözlenmiştir.

Şekil 2.12’de de görüldüğü üzere, sıcaklık 600 °C’ye ulaştığında beton, dayanımının %50’sini, 800 °C’ye ulaştığında ise yaklaşık %80 ’ini kaybettiği göz önüne alınırsa (Baradan vd., 2002; Mahsanlar’dan (2006)), renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003, Yüzer vd. 2004; Mahsanlar’dan (2006)).



Şekil 2.12 Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd., 2002)

BÖLÜM 3

JET UÇAKLARININ EGZOZ GAZINA MARUZ KALAN BETON KAPLAMALARIN NUMERİK İNCELENMESİ

Jet uçaklarının hizmete sokulması beton uçak pistinin ve park sahalarının ciddi oranda bozulmasına neden olur. Özellikle F/A-18 uçağının destek kuvvet ünitesinin egzoz gazı üst beton tabakasının kırılmasına ve parçalanmasına neden olur, hasarlı alanların belli sürelerle değiştirilmesi gerekir. Benzer bir sorun jet motor test hücrelerindeki kaplamalarda görülür. Bu sorun Bishop (1953) tarafından incelenmiş ancak tatmin edici bir çözüm geliştirilememiştir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991)

Bir sonlu eleman analizi ilk olarak çatlamanın normal ağırlıklı betonda oluşacağını göstermek için yapılır. Bir parametre çalışması parçalanmaya karşı direnç üzerine, her bir beton varlığın etkisini belirtmek için gerçekleştirilir. Hafif ağırlıklı betonun sıcaklık ve buhar basıncına karşı gösterdiği direnci geliştirmek için incelenir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Deneysel kaplama yüzey sıcaklıklarının bulunamaması durumunda, egzoz gazının sıcaklığı kullanılır. Egzoz gazları beton kaplama yüzeyine yüksek sıcaklıklardan daha hızlı erişir. Bu ilk çalışmaların çok fazla konservatif olmasının beklenilmesine rağmen, ısı direnci için belirli malzeme özelliklerinin değerlendirilmesini sağlar (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

3.1 Sorunun Tanımlanması

Şekil 3.1, F/A-18 uçak apronundaki (park sahası) tipik bir hasarlı alanı göstermektedir. Bu alan birkaç metre çapında ve 1,9 cm'den fazla derinliktedir. Bu sorunun kökeni kaplamanın üzerinde yaklaşık 1,2 m'de, kuyruk kısmına yakın uçak gövdesinin dip kısmında yer alan destek kuvvet unitesidir. Egzoz gazları kaplamanın üzerinde yaklaşık olarak en fazla 196 °C sıcaklığa, 30° etki açısına, dikey ve en fazla 228,5 km/sa'lik hıza sahiptir. Egzoz gaz sıcaklığı eşsıcaklık eğrileri kaplama üzerinde hemen hemen daireseldir ve 76 cm mesafede merkezde yaklaşık 196 °C'den, 93 °C'ye bir azalmayı gösterir. Sonlu eleman programında kullanılan radyal sıcaklık dağılımı Çizelge 3.1'de detaylandırılmıştır. Referans sıcaklığı daha düşük olduğu için, kaplama içerisinde daha yüksek sıcaklık dereceleri olacaktır. Referans sıcaklığı 0 °C'den daha düşük bir değerde ayarlanmıştır. Sıcaklık etkilerine ek olarak, jet yakıtı, betonun içinde yer alan sudan dolayı oluşan buhar basıncı da bu bozulmayı artırır (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).



Şekil 3.1 F/A-18 uçakları park sahasındaki tipik bir hasarlı alan

(L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Çizelge 3.1 Kaplama yüzeyi üzerinde radyal sıcaklık dağılımı (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Merkezden Uzaklık, cm	Giriş Sıcaklığı, °C	Merkezden Uzaklık, cm	Giriş Sıcaklığı, °C	Merkezden Uzaklık, cm	Giriş Sıcaklığı, °C	Merkezden Uzaklık, cm	Giriş Sıcaklığı, °C
0,00	195,56	33,02	157,22	66,04	110,00	99,06	53,89
2,54	192,78	35,56	153,89	68,58	106,11	101,60	48,89
5,08	190,00	38,10	150,56	71,12	102,22	104,14	43,89
7,62	187,22	40,64	147,22	73,66	98,33	106,68	38,89
10,16	184,44	43,18	143,89	76,20	93,89	109,22	33,89
12,70	181,67	45,72	140,56	78,74	89,44	111,76	28,89
15,24	178,89	48,26	137,22	81,28	85,00	114,30	23,89
17,78	176,11	50,80	133,33	83,82	80,56	116,84	18,89
20,32	173,33	53,34	129,44	86,36	76,11	119,38	13,89
22,86	170,56	55,88	125,56	88,90	71,67	121,92	8,89
25,40	167,22	58,42	121,67	91,44	67,22	124,46	3,89
27,94	163,89	60,96	117,78	93,98	62,78	127,00	0,00
30,48	160,56	63,50	113,89	96,52	58,33		

3.2 Hedefler

Hedefler üç kısımdır; ilki ısısal zorlanmalardan dolayı oluşan gerilmeler normal ağırlıklı (NW) beton için belirlenecektir. Bu termal gerilmeler betondaki ezilme ve parçalanmalar için yeterli neden olabilir. İkincisi, bir parametre çalışması, beton dayanımının etkilerini, iletkenliğini, ısı kapasitesini, birim ağırlık ve termal genleşme katsayısını, en uygun beton tasarımı değerlendirecektir. Üçüncüsü, eğer en uygun beton hem termal genleşme hem de buhar basıncı nedeniyle gerilmelere dayanabilirse buhar basıncı elde edilecek ve belirlenecektir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

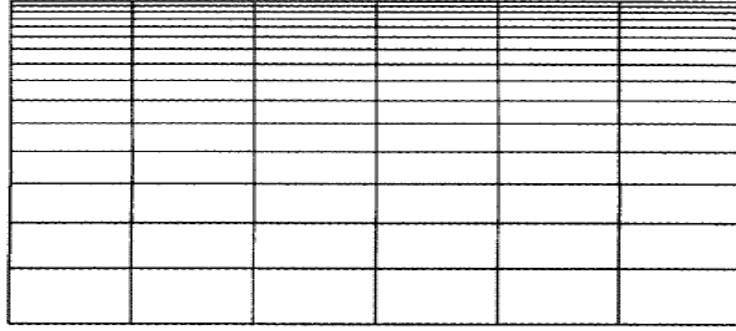
3.3 Sonlu Eleman Modeli

Kaplama üstündeki eşsıcaklık eğrilerinin dairesel şekli nedeniyle, asimetric model benimsenir. 10 cm yeterli derinlik olarak tanımlanır çünkü daha derin tabakalar, sıcaklık artışından önemli düzeyde etkilenmeyecektir. Sıcaklığın merkezden 127 cm

uzaklıktaki çevre içinde bozulmalara neden olduğu varsayılacaktır. Bu, sayısal modelde yarıçap olarak alınır (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Şekil 3.2 modelin ilk 15 cm radyalini (merkezden) gösterir. İki boyutlu elemanlar her düğüm serbestliğinin 2 derecesi ve dört düğümü ile kullanılmıştır. Bu asimetric eksen düşey yer değiştirmeye izin verir, dipteki sabitlenmiş, kenarlar kaplamadaki derzlerde sıcaklık yakınlığı nedeniyle serbesttir (Şekil 3.1). 1/4, 1/8 ve 1/16 oranları sonuçlardaki ihmal edilebilir değişimleri gösteren en üstteki elemanlar için başarıyla kullanılmıştır (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Kaplama Ağı

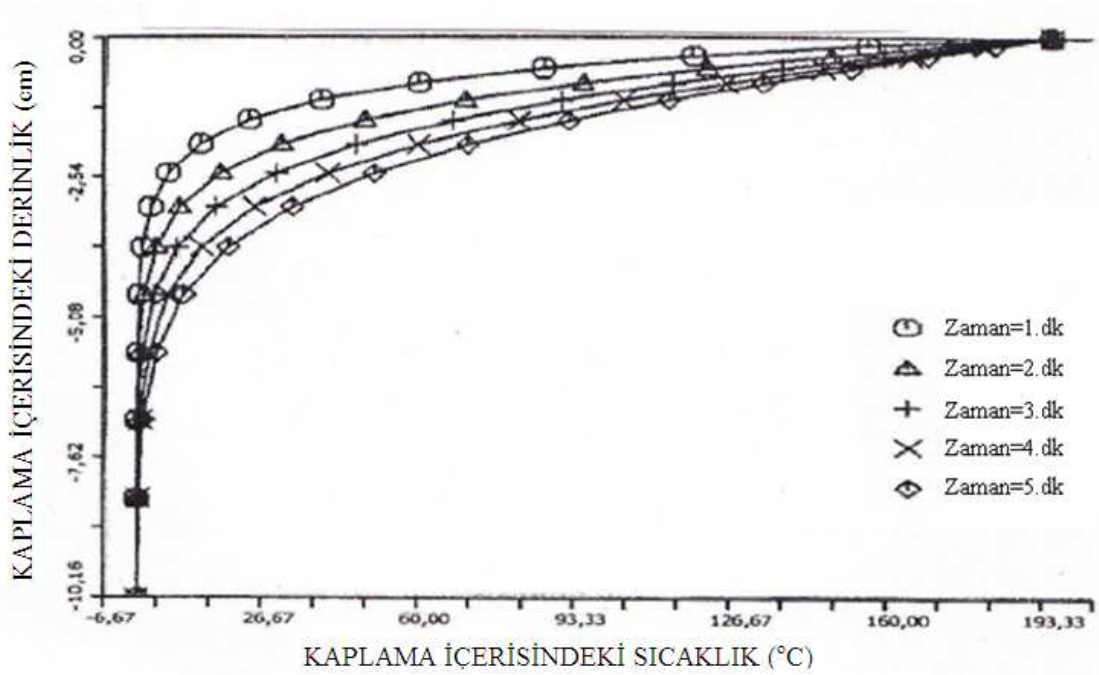


Şekil 3.2 Kaplama ağı diskretizasyonu
(L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Isı girdisinin yaklaşık bir gösteriminde, en üstteki beton tabakası Çizelge 3.1’de belirtilen egzoz gaz sıcaklıklarına 1 dakikada eriştiği varsayılır. İlk gözlemler göstermiştir ki bu gösterim çok anlık olarak en yüksek değerlerine ulaşmayan kaplama üstündeki gaz sıcaklıkları ve beton yüzey sıcaklıkları her zaman, daha düşük olacak ve derece derece artacağı için çok konservatiftir. Daha fazla deneysel analiz ile beton yüzey sıcaklıklarının ve zamanla değişimlerinin sağlanması beklenir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

3.4 Malzeme Isıl Özellikleri ve Isı Akış Modeli

Kaplama içerisindeki ısı akışı farklı zamanlarda ADINA-T programı kullanarak elde edilmiştir. Şekil 3.3, bir NW betonu için 1-5 dakikalardaki derinliğe göre sıcaklık dağılımının bir örneğini göstermektedir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).



Şekil 3.3 Merkezdeki sıcaklık dağılımı.

Bu sıcaklık dağılımlarının elde edilmesinde, aşağıdaki malzeme özellikleri kullanılmıştır.

NW (Normal ağırlıklı) beton için:

Isıl iletkenlik (varsayılan sabit)= $39 \cdot 10^{-4}$ Watt/(m. $^{\circ}$ K) (0,0875 BTU.in./(hr.in 2 . $^{\circ}$ F)),
Doğrusal değişebilen özgül ısı -17,78 $^{\circ}$ C'de 0,0145 BTU/(in 3 . $^{\circ}$ F)'den, 204,44 $^{\circ}$ C'de 0,0244BTU/(in 3 . $^{\circ}$ F)'ye.

LW (Hafif) beton için:

Isısal iletkenlik (varsayılan sabit)= 11.10^{-4} Watt/(m.^oK) (0.025 BTU in./(hr.in².^oF)),
Doğrusal değişebilen özgül ısı -17,78 ^oC'de 0.00868 BTU/(in³.^oF)'den, 204,44 ^oC'de
0.01331 BTU/(ln³.^oF) ye.

Analiz edilmiş tüm zaman adımları için sıcaklık dağılımları, gerilim modellerinde daha sonra kullanmak için bir dosya içerisinde kaydedilmiştir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

3.5 Beton Dayanımı

Termal değişimlerden kaynaklanan gerilme seviyelerini değerlendirmek için başlangıçta basınç dayanımları için çekme dayanım değerlerini tanımlamak gerekir. Çizelge 3.2 ACI'da belirtilen farklı beton dayanımları için kopma modülü ve yarmada çekme dayanım değerlerini içerir. Bütün hafif betonlar için bu değerler 0,75 ile çarpılabilir. ACI'da belirtilen değerler aşırı güvenlidir, test verileri olmaması durumunda kullanılabilir (ACI 9.5.2.3 ve 11.2.1.1). Bortolotti'nin (1990) yaptığı çalışma ortalama değerlerin bir örneğini içerir ayrıca ACI, Committee 213 (1987), yüksek ortalama değerleri gösterir (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Çizelge 3.2 Eğilme ve çekme altında beton dayanımı.

Normal Ağırlıklı Beton				
F_c	F_{ct}	F_r	F_{ct}^a	F_r^a
27.58	2.92	3.27	3.06	4.11
34.47	3.27	3.65	3.45	4.74
41.37	3.58	4.01	3.76	5.28
48.26	3.87	4.32	4.02	5.76
55.16	4.13	4.63	4.24	6.20
68.95	4.62	5.17	4.60	6.95
82.74	5.06	5.67	4.87	7.60
96.53	5.48	6.12	5.08	8.17
110.32	5.84	6.54	5.25	8.69

Hafif Beton				
F_c	F_{ct}	F_r	F_{ct}^a	F_r^a
27.58	2.19	2.45	2.30	3.08
34.47	2.45	2.74	2.59	3.55
41.37	2.68	3.01	2.82	3.96
48.26	2.90	3.25	3.01	4.32
55.16	3.10	3.47	3.18	4.65
68.95	3.46	3.87	3.45	5.21
82.74	3.80	4.25	3.65	5.70

F_c: Beton basınç dayanımı, MPa

F_{ct}: Yarmada çekme dayanımı, MPa

F_r: Kopma modülü, MPa

a: Referans ortalama değer, (Bortolotti, 1990).

F_{ct}^a: Yarmada çekme dayanımı ortalama değeri, MPa

F_r^a: Kopma modülü ortalama değeri, MPa

NW: Normal ağırlıklı beton.

LW: Hafif beton.

F_{ct} (NW): $6,7 * \sqrt{F_c} * 0,083$, (ACI 318-89, 11.2.1.1).

F_r (NW): $7,5 * \sqrt{F_c} * 0,083$, (ACI 318-89, 9.5.2.3).

F_{ct}^a (NW): $(5+0,001 * F_c) * F_c$, (Bortolotti, 1990)

F_{dt}^a (NW): $F_c / (5,12 + 0,000844 * F_c)$, (Bu formülde F_c ve F_{dt}^a için psi birimi alındı ($1 \text{ psi} = 0,006894 \text{ MPa}$)), (Bortolotti, 1990).

F_r^a (NW): $(1,2 + 0,0000167) * F_{dt}^a$, (Bu formülde F_{dt}^a ve F_r^a için psi birimi alındı ($1 \text{ psi} = 0,006894 \text{ MPa}$)), (Bortolotti, 1990).

F_{ct} (LW): $0,75 * F_{ct}$ (NW), (ACI 318-89, R11.2.1.1).

F_r (LW): $0,75 * F_r$, (ACI 318-89, 9.5.2.3).

F_{ct}^a (LW): $0,75 * (5 + 0,001 * F_c) * F_c$, (Bortolotti, 1990).

F_{dt}^a (LW): $0,75 * F_c / (5,12 + 0,000844 * F_c)$, (Bortolotti, 1990).

F_r^a (LW): $0,75 * (1,2 + 0,0000167) * F_{dt}^a$, (Bortolotti, 1990).

3.5.1 Normal ağırlıklı betonda ısıl gerilmeler

Hem NW hem de LW beton için elastisite modülü (E_c) Ramakrishnan vd. (1988) tarafından aşağıda tanımlanmıştır.

$$E_c = 0,043 * w^{1,5} * \sqrt{F_c} \quad 1442 \text{ kg/m}^3 < w < 2483 \text{ kg/m}^3 \text{ için} \quad (3.1)$$

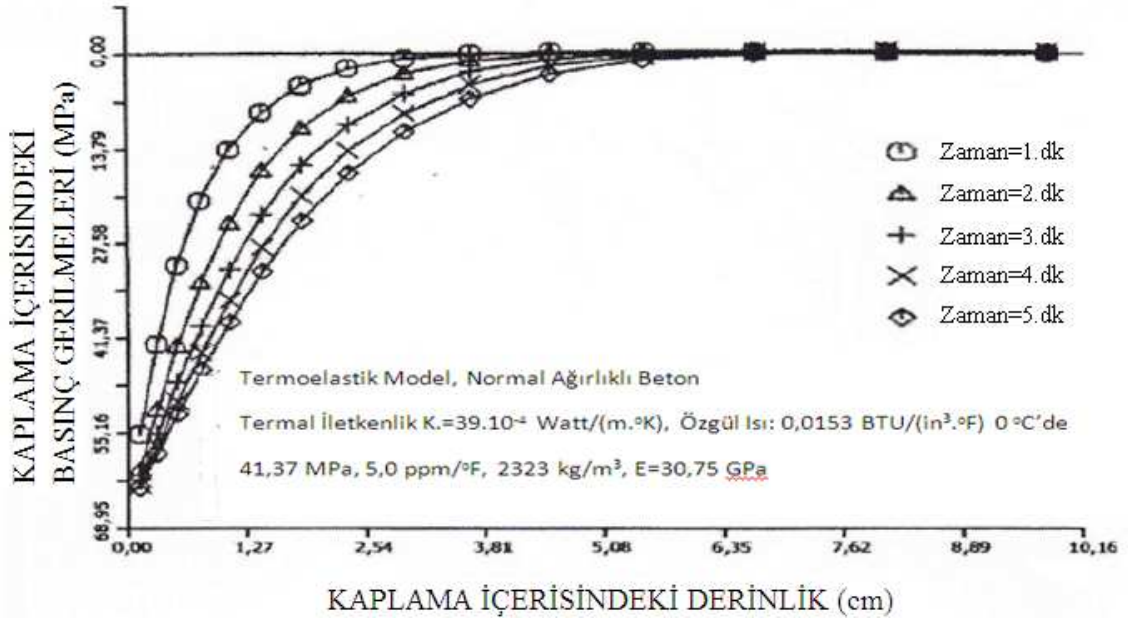
w: Birim ağırlık, kg/m^3

E_c : Elastisite modülü, MPa

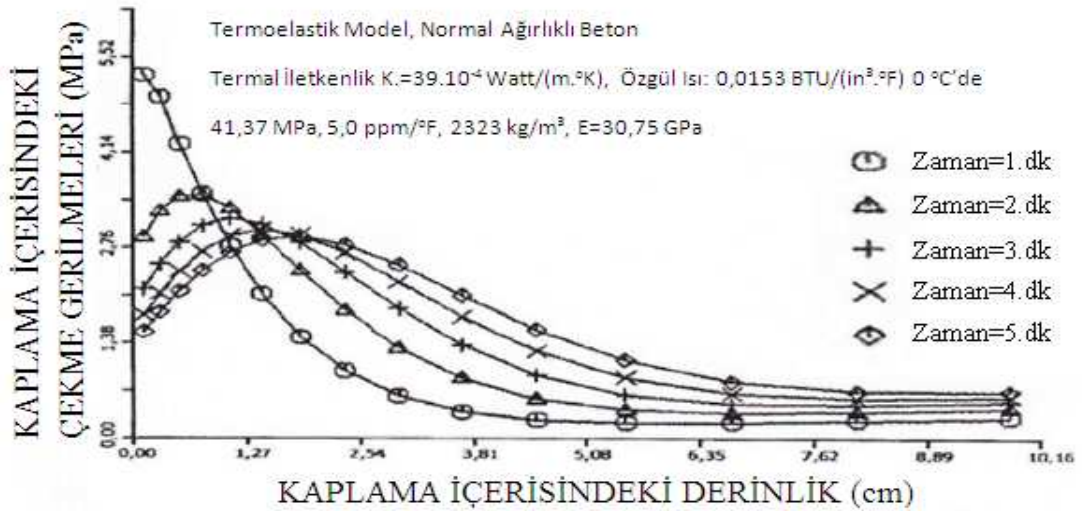
F_c : Silindir numune beton basınç dayanımı, MPa.

NW beton için birim ağırlık 2323 kg/m^3 olarak var sayılır. Bunun sonucu olarak $F_c = 41,37 \text{ MPa}$, E_c (NW) = $30,75 \text{ GPa}$ bulunur. NW beton için termal (ısıl) genişleme katsayısı $9 * 10^{-6} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ($5 \text{ ppm}/^\circ\text{F}$), Ramakrishnan'nın (1989) çalışmalarına dayanılarak seçilmiştir. Bilgisayar kodlarından "Termoelastik (izotropik, elastik) malzeme modeli", ölçülen egzoz gaz sıcaklıklarına eşit olduğu varsayılan kaplama yüzey sıcaklıkları

olarak kullanıldı. Şekil 3.4'de yatay basınç gerilmeleri görülmektedir. Analiz sonucu yüksek düşey çekme gerilmeleri meydana geldi (Şekil 3.5), (Malvar ve Hironaka, 1991).



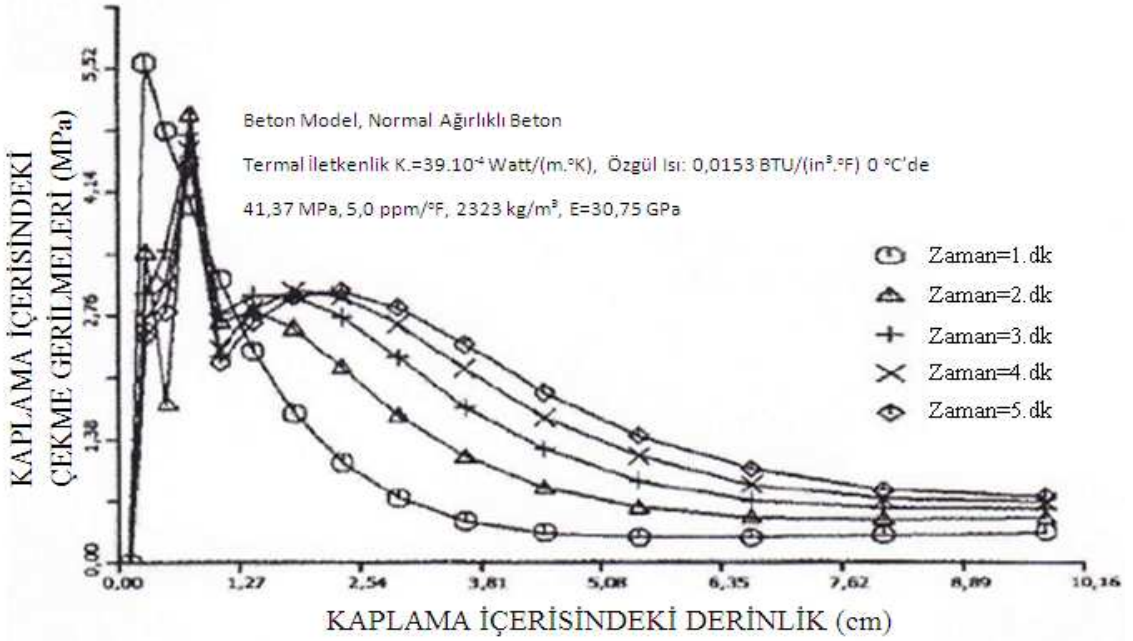
Şekil 3.4 Yatay basınç gerilmeleri, termoelastik model, (Malvar ve Hironaka, 1991).



Şekil 3.5 Düşey çekme gerilmeleri, termoelastik model, (Malvar ve Hironaka, 1991).

İki eksenli basınç gerilmelerinin tek eksenli basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlemlenebilir. Basınç gerilmeleri ezilmeye neden olacaktı (Şekil 3.4), diğer taraftan 5,22 MPa'lık çekme gerilmeleri (Şekil 3.5, zaman=1.dk.), Çizelge 3.2'de görülen yaklaşık 3,58 MPa'lık ACI çekme dayanımından çok daha fazladır (ya da ortalama değer olan 3,76 MPa'dan). Bu gerilmeler 1,27 cm'den fazla derinlikte yatay düzlemsel çatlaklara neden olur (Malvar ve Hironaka, 1991).

Hasarlı bölge şeklinin dikkate alınması ile sonlu eleman modeli göstermiştir ki en dipteki düzlemsel çatlaklar tarafsız eksenden uzaklaşarak üst yüzeye yaklaşmış 51 cm radyal uzaklığa erişmiştir. Hasarlı bölge 102 cm çapında ve merkezden 1,27 cm derinliğinde bir dairedir (Malvar ve Hironaka, 1991).



Şekil 3.6 Düşey çekme gerilmeleri, beton model, (Malvar ve Hironaka, 1991).

Aynı malzeme özellikleri “Uygun beton malzemesi modeli” ile kullanılmıştır. Ezilme yaklaşık 51,71 MPa'lık (iki eksenli etkiler nedeniyle) basınç gerilmeleri ile

oluşmuştur (Kupfer, vd., 1969). Ezilme ile birlikte beton modelinin doğrusal olmayışı, 1 cm derinliğinde yüksek değerler ile 1,27 cm derinliğinin üstüne çıkan çatlama değerleri stabil olmayan çekme gerilmeleri dağılımını vermiştir (Şekil 3.6). Bu 1 cm'deki gerilme yoğunluğu tabakalardaki patlamaların gözlenmesi ile açıklanabilir (Malvar ve Hironaka, 1991).

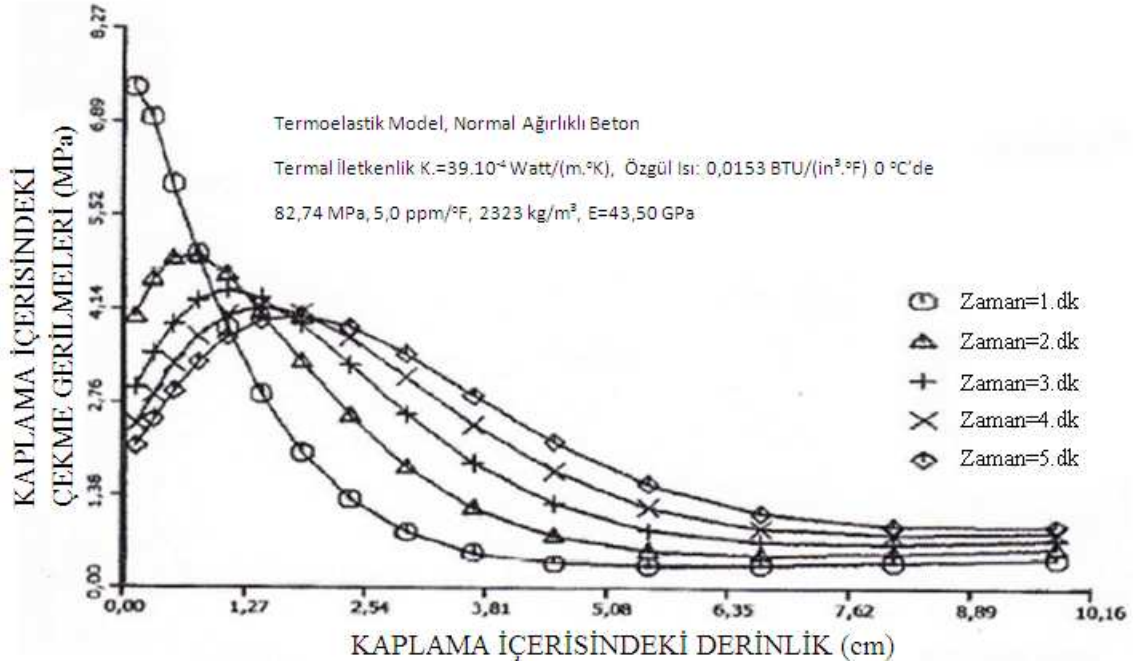
Uçakların destek kuvvet üniteleri ateşlenmeden önce yüksek ortam sıcaklıklarından dolayı beton kaplamaların yüksek referans sıcaklıklarda bulunabileceğine dikkat edilmelidir. Bu analizde yaklaşık 55 °C'de ve buhar basıncı olmadan NW betonun çatlamayacağı desteklenmiştir. 55 °C'nin altında çatlama kademeli olarak görünecektir, başlangıçta çok yüzeysel (0,3 cm ya da daha az) ve küçük bir alanda sınırlı. Daha düşük referans sıcaklıkları için çatlak derinliği artacak bu yüzden daha önce gösterilen 0 °C'lik referans sıcaklığına ulaşıncaya kadar alan daha geniş ve derin bir şekilde etkilenecektir. Uygulamada, NW betonun sıcaklık artışının çok şiddetli olmadığı zamanlarda çok erkenden yetersiz kalması beklenmez. Saha gözlemler raporu, yetersizliğin tam olarak önceden tahmin edilmesine rağmen, yetersizlikler hizmetten aylar sonra, bazı durumlarda ise 2 yıl kadar sonra meydana gelebileceğini raporlar (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6 Parametre Çalışması

3.6.1 Beton dayanımı

Diğer tüm parametreler için önceki NW temel değerleri kullanılarak, beton dayanımı 82,74 MPa'ya arttırılmıştır ve sonlu eleman analizi termoelastik model kullanarak yeniden başlatılmıştır. Elde edilen bu eğriler (Şekil 3.7), 5,06 MPa'lık ACI değerinden daha büyük olan 7,38 MPa'lık en büyük çekme gerilmesini göstermektedir. Fc'nin artması ile ısısal gerilme sorunu çözülmez, Fct artmış olmasına rağmen, termal gerilmeler eşit miktarda artmıştır bunun nedeni Fc karekökü ile orantılı olarak hem E_c

hem de F_{ct} 'nin artmasıdır. Sonuç olarak beton dayanımının artması termal gerilmelere karşı gösterilen direnci etkilemez (Malvar ve Hironaka, 1991).



Şekil 3.7 Yüksek dayanımlı NW beton için çekme gerilmeleri,
 (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.2 İletkenlik

NW temel değerleri ile başlanarak, şu anda sadece termal iletkenlik katsayısı %20 oranında değiştirilerek $32 \cdot 10^{-4}$ Watt/(m.°K) ($0,07$ BTU/(hr.in.².°F))'ye düşürülmüştür. Bu değişiklik termal gerilmeleri %10 artırarak en fazla 5,73 MPa'ya getirmiştir. Sıcaklık derecesi ve gerilme artışı görüldüğü için, iletkenliği düşürmek de sorunu çözmez ama bu ikinci faktör olarak adlandırılır çünkü gerilmelerdeki değişim parametrelerdeki değişimden daha küçüktür (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.3 Isı kapasitesi

NW temel değerlerinden başlayarak, şimdi de, özgül ısı, değerlendirilen parametredir. Bu özgül ısı -18 ile 204 °C sıcaklıkları arasında % 20 azalmıştır. Bu değişim termal gerilmeleri, temel değer olan 5,22 MPa'dan, %10 mertebesinde olmak üzere en fazla 4,74 MPa'ya kadar düşürmüştür. Özgül ısının azaltılması faydalıdır. Bu da iletkenlik için benzer yöntemlerin ikinci faktörüdür (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.4 Termal genleşme katsayısı

Bir diğer yöntem 41,37 MPa ile ama daha düşük termal genleşme katsayısı olan $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ($\alpha = 3.0 \text{ ppm/}^\circ\text{F}$) ile gerçekleştirilmiştir. En büyük çekme gerilmesi olan 3,17 MPa NW için kullanılan ACI değeri 3,58 MPa'dan daha küçüktür (Çizelge 3.2). Termal gerilmelerdeki %40 oranındaki bu düşüm, α 'daki düşüştan kaynaklanmaktadır. Termal gerilmelerdeki bu değişimler α 'daki değişimlere eşittir, bu termal katsayı birinci faktör olarak adlandırılır (Malvar ve Hironaka, 1991).

Bu termal genleşme katsayısı ısıya dayanıklı LW beton için $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ($2.5 \text{ ppm/}^\circ\text{F}$) ile $6,3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ($3.5 \text{ ppm/}^\circ\text{F}$) arasında ve taşıyıcı tüm hafif ağırlıktaki beton için $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ($4 \text{ ppm/}^\circ\text{F}$) civarındadır (AC1, Committee 213, 1987). AC1, Committee 216 (1987), kumlu, genleştirilmiş killi beton için $5,4 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ($3 \text{ ppm/}^\circ\text{F}$)'yi raporlar. Bu nedenle hafif beton incelenmelidir (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.5 Hafif beton

Taşıyıcı hafif betonların birtakım avantajları vardır:

1-Termal genleşme katsayıları önceden bahsedildiği gibi daha düşüktür. Eğer bir kumlu, geliştirilmiş killi beton seçilirse bu katsayı $5 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ ($2.8 \text{ ppm}/^{\circ}\text{F}$) ye kadar düşürülmüş olacaktır (Harmathy ve Allen, 1973).

2-Birim ağırlıkları (w) 1442 ile 1922 kg/m^3 arasında değişir. E_c , $w^{1.5}$ ile orantılı olduğu için, daha hafif olanı seçmek için bir avantajdır ve termal zorlamalar yüzünden oluşan gerilmeleri düşürecektir. Birim ağırlık ile E_c değerlerinin değişimi aşağıda gösterilmiştir:

2323 kg/m^3 için (NW), $E_c = 30,75 \text{ GPa}$

1922 kg/m^3 için (LW), $E_c = 23,17 \text{ GPa}$

1442 kg/m^3 için (LW), $E_c = 15,03 \text{ GPa}$

Bu gerilmeler E_c 'deki düşme nedeniyle iki faktör ile düşürülmelidir. Gerilmeler doğrudan E_c ile ilgili olduğundan dolayı ve E_c , $w^{1.5}$ ile değiştiğinden, birim ağırlık birinci etkindir ve termal genleşme katsayısından (α) daha önemlidir (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.5.1 Deneyim

Hafif beton, termal özellikleri ve yangına dayanıklılığından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle geliştirilmiş killi, hem ince hem kaba agrega olarak kullanılmaktadır. İnce agrega için kullanılan geliştirilmiş killi (tüm hafif betonlar) betonun yangın dayanımını önemli miktarda artırır.

Bir inceleme çalışmasında 30 farklı beton karışımları, düşey iniş kalkış yapabilen uçaklar (VTOL) ve Harrier uçakları (Şekil 3.8) için potansiyel kaplamaları olarak incelenmiştir. Tüm hafif beton agregaları ile yapılan karışımlar $510 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklara bozulma belirtisi olmadan 2 dakikadan daha fazla sürede dayanabilmektedir



Şekil 3.8 Harrier Uçağı Resmi.

Genleştirilmiş killi tüm hafif betonlar F7 Cutlass ve F8U Crusader Navy avcı uçaklarının (Şekil 3.9) egzoz gazlarına dayanabilmesi için başarıyla kullanılmıştır (Burke, 1990). Yüzey sıcaklığı zaman zaman 538 °C'yi aştığı rapor edilmiştir.



a)

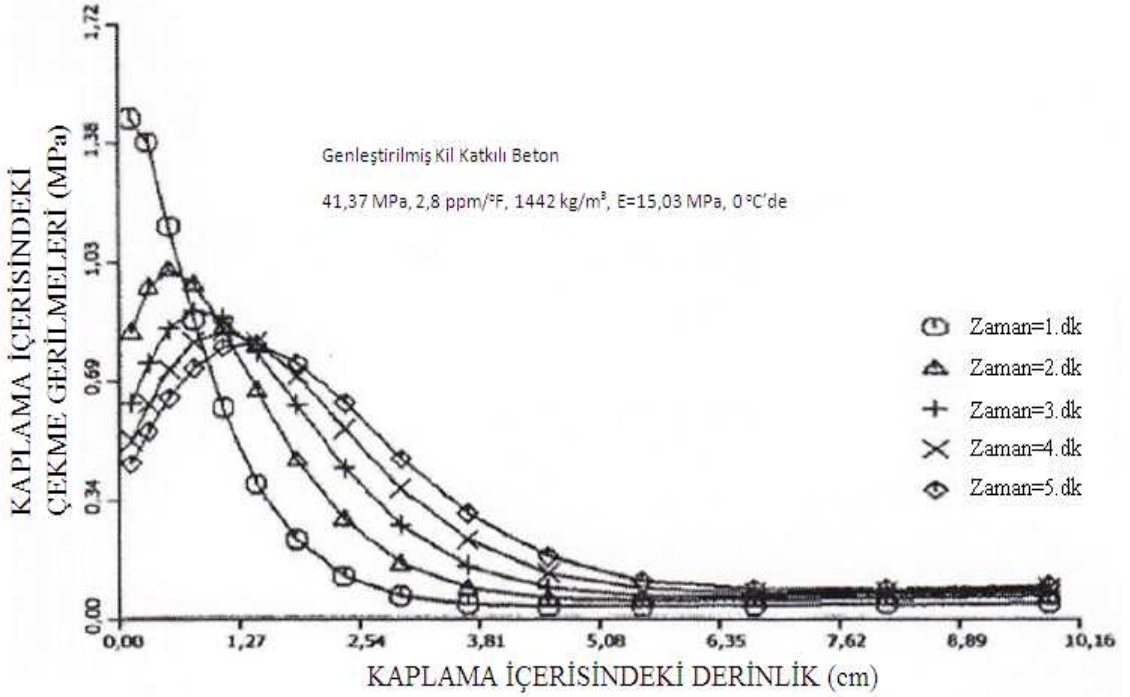
b)

Şekil 3.9 a) F7 Cutlass, b) F8U Crusader Navy

3.6.5.2 Sonlu eleman analizi

Hafif beton için termal özellikler önceden tanımlanmıştı. Isı akışı belirlendiği zaman (ADINA-T ile), gerilmeler bulunabilir (ADINA ile) seçilen hafif beton aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

Hafif ağırlıklıdır bu durum birim ağırlığın azaltılmasını sağlar ayrıca çimento hamuru ile agrega arasındaki termal gerilmelere engel olacaktır (Smith, 1978). Bunu Çizelge 3.2’de kullanılan 0.75 faktörü açıklar (AC1, Committee 318, 1989). En hafif LW taşıyıcı beton, referans sıcaklıkta 1442 kg/m³’lük birim ağırlığa, E_c=15,03 GPa sahiptir. E_c aslında sıcaklıkla azalır (AC1, Committee 216, 1987). 204 °C’de orijinal değerinin %70’i kadar azalacağı varsayılır; tüm hafif genleştirilmiş killi beton için termal genleşme katsayısının 5*10⁻⁶ 1/°C (2.8 ppm/°F) dir (Harmathy ve Allen, 1973). Poisson oranı 0.20 seviyesindedir (AC1, Committee 213, 1987).



Şekil 3.10 Genleştirilmiş killi beton için çekme gerilmeleri.

LW beton için termal iletkenlik NW beton değerine göre %70 civarında azalır. Bu termal gerilmeleri olumsuz olarak etkiler. Ancak bu, özgül ısısındaki yaklaşık %40'lık bir azalma ile telafi edilir. Bu durumda, elde edilen en büyük basınç yaklaşık 13,79 MPa'dır ve en büyük çekme gerilmesi 1,42 MPa'dır. Şekil 3.10'da gösterilen bu gerilme konservatif ACI değeri olan 2,68 MPa'den çok daha düşüktür bu nedenle bu beton kabul edilebilir (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.6.5.3 Sıcaklık dönüşümü

Yüksek basınç gerilme seviyelerinin neden olduğu betondaki ilerleyen bozulmalara rağmen, eğer maksimum basınç gerilmeleri yaklaşık 0.6 Fc 24,82 MPa'nın altında ise, bu oluşmayacaktır (L. J. Malvar and M. C. Hironaka, 1991).

Bu ilk termal döngüden sonra, elastisite modülü azaltılmış (başlangıç değerinin %70'i, dönüşüm 196 °C'de olduğunda) değerinde kalır (Smith, 1978). Bu dönüşüm içerisinde başarılı devirlerde daha az termal gerilmeleri orantılı olarak verir ve betonun bütünlüğünü garanti eder. Daha sonra öyle görünür ki, daha düşük sıcaklıktaki ilk termal dönüşüm faydalı olabilir: E_c , her 38 °C (referans sıcaklığının üzerinde) de yaklaşık %7 oranında azalır, buhar basıncı betonu çatlatacak kadar yüksek seviyede olmaz. Örneğin; eğer E_c 'nin sabit ve başlangıç değeri olan 15,03 GPa'nın %70'ine eşit olduğu varsayılırsa, maksimum termal gerilmeler 1,42 MPa'dan 1,32 MPa'ya düşer (Malvar ve Hironaka, 1991).

196 °C'de, basınç dayanımı F_c genellikle azalır. Ancak hafif beton için bu azalma sadece %5 civarındadır (ACI, Committee 216, 1987). Basınç gerilmeleri bu koşullarda kritik olmadığı için, bu beton performansını etkilemez (Malvar ve Hironaka, 1991).

3.7 Buhar Basıncı

Betonun içerisindeki su muhtevası için, buhar basıncı 196 °C'de 1,43 MPa'dır. Termal gerilmeler nedeniyle en fazla 1,42 MPa'lık bir ilave yapıldığı zaman, toplamda 2,85 MPa'lık gerilme elde edilir ve bir 41,37 MPa'lık beton için ortalama 2,82 MPa çekme gerilmesi olan beton ile karşılaştırılabilir (Çizelge 3.2). Bunun sadece kaplamanın en üst kısmında olacağına dikkat edilmelidir. 0,16 cm derinliğinde, sıcaklık önceden yaklaşık 182 °C'ye düşürülmüştü ve buhar basıncı sadece 1,05 MPa'dır ve de 0,16 cm'den daha az derinliktedir. Buhar serbest bir şekilde uzayda olduğu için, buhar basıncı beklenen değer olan 1,43 MPa'yi hiçbir zaman geçemez. Bu analiz bu nedenle biraz konservatiftir (Malvar ve Hironaka, 1991).

Çimentonun bir kısmının yerine mikrofillerlerin kullanımı (örneğin uçucu kül) betonun gözenekli yapısını azaltmasına karşın, dayanımını az miktarda artırır. Mikrofillerlerin aynı zamanda yüksek sıcaklıklara karşı direnci arttırdığı rapor edilmiştir (Chance Vought).

3.8 En Uygun Hafif Beton Özellikleri

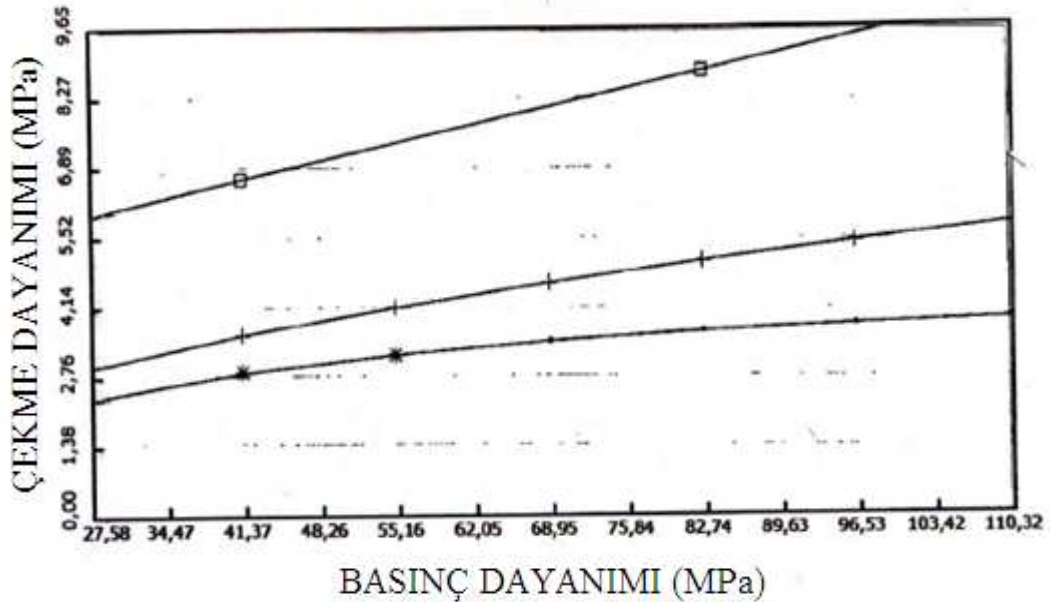
Amerikan Deniz Kuvvetleri şartnameleri F_r (kopma modülünü)'yi en az 4,5 MPa ister. Çizelge 3.2'den, ACI konservatif değerlere bakıldığında, bu en az 55,16 MPa'lık bir basınç dayanımı anlamına gelmektedir. Bu uygun olan 41,37 MPa'dan biraz fazladır ama 68,95 MPa'dan fazla olan değerler elde edilebilir (Robins ve Austin, 1988). Beton dayanımındaki bir artış, betonun genişmesi nedeniyle termal gerilmelere çözüm getirmez ancak buhar basınç gerilmelerine karşı olan direnç kapasitesini az miktarda artırır. F_c 'deki bu artış termal genişleme katsayısının az miktarda artmasına izin verir (Malvar ve Hironaka, 1991).

Aşağıdaki model analiz edilmiştir: $F_c = 55,16$ MPa ve $F_{ct} = 3,18$ MPa (LW, ortalama değer); $\alpha = 5,4 \cdot 10^{-6}$ 1/°C (3.0 ppm/°F), birim ağırlık 1442 kg/m³ (0 °C referans

sıcaklığında, $E_c = 15,03$ GPa sonucunu verir ve E_c , $204,44$ °C'den, doğrusal olarak %70'e düştüğü varsayılır ve poisson oranı $\mu=0.2$ dir.) Elde edilen en büyük termal gerilme $1,75$ MPa dir. Eğer $1,43$ MPa buhar basıncı ilave edilirse, toplam gerilme $3,18$ MPa olur. Bu ortalama çekme dayanımına eşittir (Çizelge 3.2). Bu beton böylece kabul edilebilir (Malvar ve Hironaka, 1991).

Daha yüksek dayanımlara erişmek amacıyla, ACI, Committee 213 (1987) iri daneli agrega boyutunun düşürülmesini önerir. Bu yüksek dayanım gereksinimi, hafif betonların bazı standartlarını aşmamalıdır. Bu E_c için, ACI değeri biraz konservatif olabilir (Malvar ve Hironaka, 1991).

Şekil 3.11 hem termal gerilmelere, hem de buhar basıncına karşı koymaya ihtiyaç duyulacak gerekli çekme dayanımını gösterir. Bu dört durum incelenmiş, LW için iki, NW için iki, yüksek dayanımlarda olsa bile NW'nin açıkça yetersiz olduğu görülmüştür (Malvar ve Hironaka, 1991).



→ Mevcut Fct, LW + Mevcut Fct, NW * Gerekli Fct, LW □ Gerekli Fct, NW

Şekil 3.11 Gerekli çekme dayanımına karşı uygunluk, (Malvar ve Hironaka, 1991).

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA

Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarının egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de özellikle jet uçakları açısından büyük riskler oluşturabilir. Beton inorganik bir malzeme olmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda yanmaz fakat, kimyasal yapısındaki bozulmalar nedeniyle bağlayıcılık özelliğini yitirerek dayanımı düşer ve kaplama yüzeyinde parça ayrışmaları gözlenir bu durum da YAMAHA'ya neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklığa daha iyi dayanabilecek özelliklerde ve ekonomik beton üretimi önem kazanmaktadır. Betonun hafif olmasını sağlayacak yöntemlerden, hafif agrega kullanılması ve bu kullanılan hafif agrega ile üretilen betonların yüksek sıcaklık altındaki davranışının incelenmesi, çalışmanın amacıdır. Çalışmada, hafif agrega olarak ulusal servetimiz olan perlit kullanılmıştır.

Deneysel çalışma bölümünde ilk olarak perlit katkıli hafif beton üretiminde kullanılan malzemelerin tanımlanması yapılmakta, ardından beton karışımları için kabul edilen esaslar, bileşim hesaplamaları ve hafif betonların üretimi anlatılmaktadır. Deneysel çalışma bölümünde son olarak, üretilen hafif betonlara uygulanan deneyler ve deney sonuçları verilmektedir.

4.1 Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

Perlit katkıli hafif beton üretiminde; agrega olarak kırmataş, Aksaray yöresinden sağlanan ham ve geliştirilmiş perlit agregası, bağlayıcı olarak da portland çimentosu

ve su kullanılmıştır. Ham perlit için “HP”, genişletilmiş perlit için ise “GP” kısaltmaları kullanılacaktır.

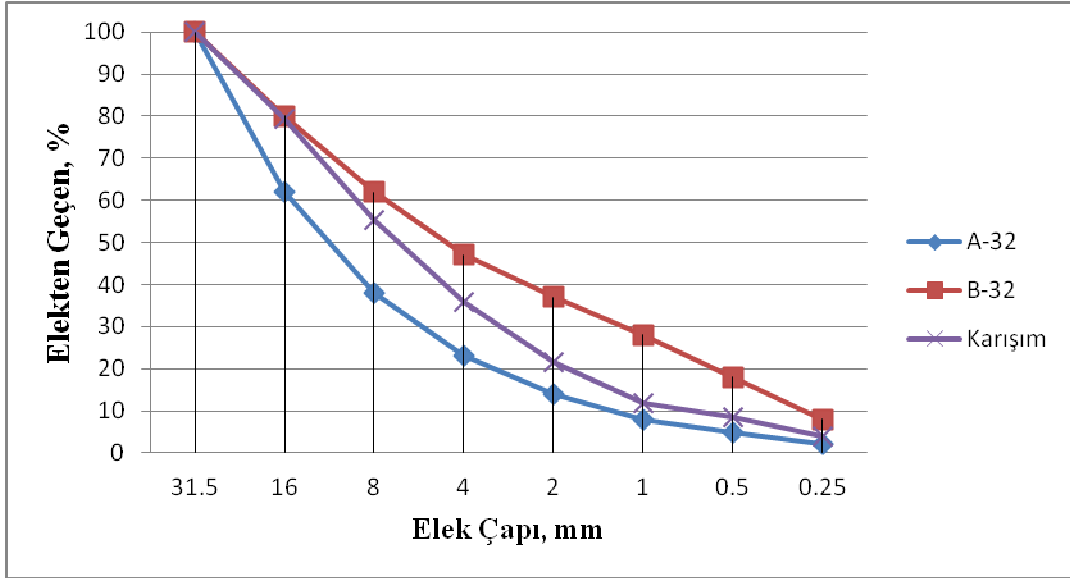
4.1.1 Agregalar

Deneylerde kullanılan agregaların maksimum dane büyüklüğü 31.5 mm'dir. Yapılan deneyler sonucunda kumun, kırmataş I, kırmataş II ve HP'nin yoğunlukları sırası ile 2480, 2700, 2680 ve 1950 kg/m³ olarak bulunmuştur ve genişletilmiş perlit için yoğunluk, firma katalogunda yazan 140 kg/m³ alınmıştır. Birim ağırlıklar ise sırası ile 1650, 1440, 1500, 990 ve genişletilmiş perlit için 40 kg/m³ olarak bulunmuştur. Karışım granülometrisinde kum, kırmataş I ve kırmataş II sırasıyla % 36, 34 ve 30 oranlarında kullanılmıştır. Kullanılan agregaların granülometrisi ve incelik modülleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. HP, kırmataş II yerine, GP de kum yerine kullanılacağı için ham perlit agregasının kırmataş II'ye, genişletilmiş perlit agregasının da kuma yakın granülometride olması sağlanmıştır.

Çizelge 4.1 Agregaların granülometrisi.

Elek açıklığı	Elekten geçen malzeme miktarı, %					
	Kum	Kırmataş-I	Kırmataş-II	HP	GP	Karışım
31.5	100	100	100	100	100	100
16	100	39.6	100	100	100	79.46
8	100	0	64	63.5	100	55.2
4	98.2	0	2.2	2.1	100	36.01
2	59.6	0	0	0	54	21.46
1	33	0	0	0	31	11.88
0.5	23.4	0	0	0	20	8.42
0.25	10.8	0	0	0	16	3.89
İncelik modülü	2.75	6.6	5.33	5.34	2.79	4.84
Yoğunluk (kg/m ³)	2480	2700	2680	1950	140	---

Agrega karışımının granülometri eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Karışım eğrisinin A32 ve B32 eğrileri arasında kaldığı ve bu granülometrinin beton karışımlarında kullanılmasının uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1 Karışımın granülometri eğrisi

4.1.2 Çimento

Deneysel çalışmalarda Eskişehir Çimento Fabrikasının (EŞÇİM) üretmiş olduğu TS EN 197-1 standartlı CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fabrikasından elde edilen kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşim, %	
SiO ₂	20,74
Al ₂ O ₃	5,68
Fe ₂ O ₃	4,12
CaO	63,70
MgO	1,22
Na ₂ O	0,17
K ₂ O	0,53
SO ₃	2,29
Cl	0,019
Kızdırma kaybı	1,34
Çözünmeyen kalıntı	0,57
Serbest kireç	1,29
Fiziksel Özellikler	
Yoğunluk, gr/cm ³	3,14
Özgül yüzey, cm ² /gr	3450
Basınç Dayanımları, MPa	
2 Günlük	26
7 Günlük	38
28 Günlük	59

4.1.3 Perlit

Bu çalışmada belirli oranlarda kırmataş II yerine ham perlit, kum yerinede geliştirilmiş perlit kullanılmıştır. Kullanılacak ham perlitin birim ağırlığı 990 kg/m³ olarak bulunmuş ve granülometrisinin kırmataş II'nin granülometrisine yakın çıkması sağlanmıştır. Geliştirilmiş perlit agregasının birim ağırlığı 40 kg/m³ olarak

bulunmuştur. Su emme yüzdesi ise çok yüksektir bu nedenle perlitler agrega olarak kullanılmadan önce suya doygun duruma getirilmiştir.

4.1.4 Karma suyu

Beton karma suyu olarak laboratuvarımızda bulunan Eskişehir bölge suyu kullanılmıştır. Beton üretiminde kullanılan şebeke suyunun kimyasal analizi Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Şebeke suyuna yapılan kimyasal analizinde suyun TS 1247'deki karma suyu niteliklerine uygun olduğu görülmüştür

Çizelge 4.3 Kullanılan karma suyunun kimyasal analizi

Parametre	Bulunan Değerler
pH	6,85
Kalsiyum (Ca^{+2})	58 mg/l
Magnezyum (Mg^{+2})	83 mg/l
Klorür (Cl^{-1})	46 mg/l
Sülfat (SO_4^{-2})	45 mg/l
Buharlaşma bakiyesi	434 mg/l

4.2 Beton Karışım Oranları

Deneyleerde kullanılan karışım oranları mutlak hacim yöntemi ile belirlenmiş ve bu hacim oranları özgül ağırlıklar gözetilerek hesaplanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarında 400 dozajlı CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento ile hem kontrol karışımları hem de Kırmataş II yerine % 25, 50 ve 75 oranlarında HP, kum yerine % 20 oranında GP kullanılarak farklı serilerde beton numuneler

üretilmiştir. Üretilen bu beton numuneler 20, 300 ve 600 °C sıcaklıkları için toplam 12 seri olacak biçimde hazırlanmıştır ve hem kontrol betonları hem de perlitli betonlar bu sıcaklıkların her biri için test edilmiştir. Üretilen beton numuneler standart kür koşullarında (20 ± 2 °C kirece doymun suda) 28 gün saklanmıştır. 1 m³ betonda kullanılan malzeme miktarı Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4 Beton karışım oranları

Karışım Oranları (kg/m ³)							
Karışım	Kum	Kırmataş I	Kırmataş II	HP	GP	Çimento	Su
NB	601	618	541	0	0	396	191
PB (25,20)	481	618	406	99	6,8	396	191
PB (50,20)	481	618	271	198	6,8	396	191
PB (75,20)	481	618	136	297	6,8	396	191

Çizelge 4.4'te NB perlit içermeyen küp betonların üretilmesi için hazırlanan beton karışımını kodlarken, sırasıyla PB (25,10), PB (50,10), PB (75,10) kısaltmaları ise % 25,50 ve 75 oranlarında HP'nin Kırmataş II yerine, % 20 oranında GP'nin kum yerine kullanılmasıyla üretilen beton karışım oranlarını kodlamaktadır. Beton basınç dayanımındaki azalışı minimize etmek için GP % 20 oranında sınırlandırılmıştır.

4.3 Üretilen Numune Tipleri ve Kür Süresi

Çalışmada kullanılacak betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler için tek bir kür uygulanmıştır, bu kürün süresi 28 gündür ve standart kür koşullarına (20 ± 2 °C kirece doymun suda) bağlı kalınarak yapılmıştır. Şekil 4.2'de standart kür koşullarında bekletilen numuneler görülmektedir.



Şekil 4.2 Standart kür koşullarında bekletilen numuneler.

4.4 Betonlara Uygulanan Deneyler

Betonlara uygulanan deneyler taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri olarak iki ye ayrılmıştır. Taze beton deneyleri olarak, çökme deneyi ve birim hacim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Serleşmiş betonlarda ise tek eksenli basınç deneyi, ultrases deneyi, su emme deneyi, kılcallık deneyi, ısı iletkenlik katsayısı belirleme deneyi yapılmıştır.

4.4.1 Taze beton deneyleri

4.4.1.1 Çökme deneyi

Beton kıvamı genellikle çökme deneyi ile belirlenir. Çalışmada çökme deneyi için standart bir aparat olan ve laboratuvarımızda mevcut bulunan Abrams konisi

kullanıldı. Beton koniye 3 tabaka halinde, her tabaka koninin 1/3'ünü dolduracak şekilde yerleştirildi. Her bir tabaka şişleme çubuğu ile 25'er kez şişlendi. En üst tabaka da şişlendikten sonra koninin üzeri mala ile düzeltildi ve kalıp etrafına dökülen betonlar temizlendi. Koni saplarından tutularak yavaşça ve dikkatlice düşey olarak kaldırıldı. Koni beton kütesinin yanına kondu ve çökme miktarı ölçüldü. Şekil 4.3'de TS EN 12350-2'e uygun olarak çökme deneyi yapılış aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Çökme deneyi yapılış aşamaları.

4.4.1.2 Birim ağırlığı belirleme deneyi

Taze betonlar üzerinde taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Taze birim ağırlığın bulunmasında 15x15x15 cm ebatlarında 3,375 dm³'lük hacme sahip küp şeklinde standart ölçü kabı kullanılmıştır. Taze beton ölçü kabına iki defada şişlemeye ya da sarsma tablasında vibrasyona tabi tutularak yerleştirilmiş ve üst yüzü çelik masterla düzeltilmiştir. Kabın etrafı silindikten ve yapışan harç parçaları temizlendikten sonra terazide tartılmış ve TS EN 12350-6'e uygun olarak taze beton birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

4.4.2 Sertleşmiş beton deneyleri

4.4.2.1 Tek eksenli basınç dayanım deneyi

Basınç deneylerinde kullanılan pres makinelerinden birisi 200 ton kapasiteli, 100 kg hassasiyetli, diğeri ise 300 ton kapasiteli, yükleme hızının otomatik olarak ayarlanabildiği makinelerdir. Pres tablaları arasına yerleştirilmiş numuneler 3 kg/cm² sn'lik sabit hızla yüklenmiş ve basınç dayanım deneyi TS EN 206-1'e uygun olarak, 20, 300, 600 ° C sıcaklık uygulanmış tüm küp numunelere yapılarak dayanım karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır. Şekil 4.5'te basınç testi uygulanmakta olan bir küp numune gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Basınç testi uygulanmakta olan bir küp numune.

4.4.2.2 Ultrases deneyi

Beton numunesi alınarak bunun ucuna ultrases üreten bir verici ve diğeri ucuna

da malzeme içinden geçen ve ses dalgalarını toplayan bir alıcı yerleştirilir. Kaydedilen ses dalgaları sesin bir uçtan diğer uca geçmesi için geçen zamanın milyonda biri olarak kullanılır. Bu deneyin büyük avantajı tek bir numunede bir çok defa deneyin tekrarlanması donma-çözünme, ıslanma, kuruma veya çeşitli agresif solüsyonlarda yapılan deneylerde mukavemetin değişiminin tayin edilebilmesidir. Bu metotta bulunan elastisite modülü klasik metottaki yüklemenin ağır oluşu nedeniyle daha yüksek çıkmaktadır. Bu nedenle bu metotta bulunan elastisite modülüne dinamik elastisite modülü denir. Dinamik elastisite modülü ile ultrases geçiş hızı için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir (Ünverdi, 2003).

$$E=2,26*10^{-5}*v^2*\gamma \quad (4.1)$$

E: Dinamik elastisite modülü (kg/cm²)

v: Ultrases geçiş hızı (km/sn)

γ : Birim ağırlık (kg/m³)



Şekil 4.6 Ultrases deneyi uygulanmakta olan bir küp numune.

Çizelge 4.5 Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesi ilişkisi.

Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Beton kalitesi
4,5	Çok iyi
4,5-3,5	İyi
3,5-3,0	Şüpheli
3,0-2,0	Zayıf
2,0	Çok zayıf

4.4.2.3 Su emme deneyi

Sertleşmiş betonun su emme oranı tayini TS EN 12390'e göre (4.2) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$M = \left(\frac{D - B}{B} \right) * 100 \% \quad (4.2)$$

M: Sertleşmiş beton numunesinin ağırlıkça su emme oranı, %

D: Sertleşmiş beton numunesinin suya doymun ağırlığı, kg

B: Sertleşmiş beton numunesinin etüv kurusu ağırlığı, kg

4.4.2.4 Kılcallık deneyi

Beton yüzeyinin alt yüzünün bir sıvı veya pratikte en çok su ile temas etmesi halinde suyun cismin içinde yükselmesi kılcallık olayı şeklinde tanımlanmaktadır (Postacıoğlu, 1987). Bir yüzü su ile temas eden bir cimin kılcallık yolu ile birim alandan emdiği su miktarı (4.3) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$(Q/A)^2/t=K \quad (4.3)$$

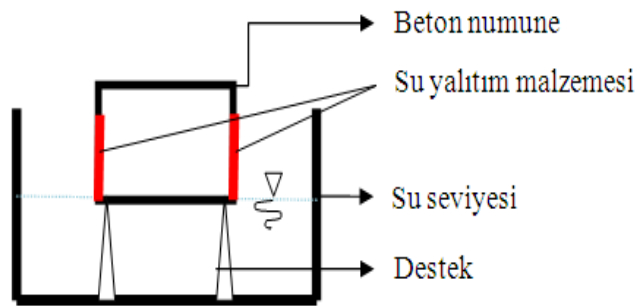
Q: Emilen su ağırlığı, gr

A: Suyun temas ettiği alan, cm²

K: Kılcallık katsayısı

t: zaman, sn

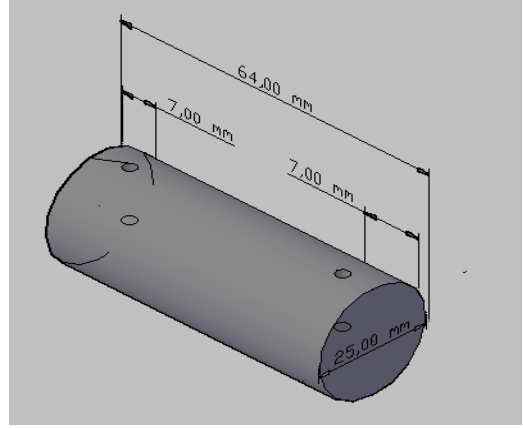
Beton numuneler fırında kurutulduktan sonra numunelerin tek tarafına su değecek şekilde kenarlarına su yalıtım malzemesi sürülmüş ve Şekil 4.7’de görüldüğü gibi numunelerin su emme miktarı belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Kılcallık katsayısı belirleme deney düzeneği.

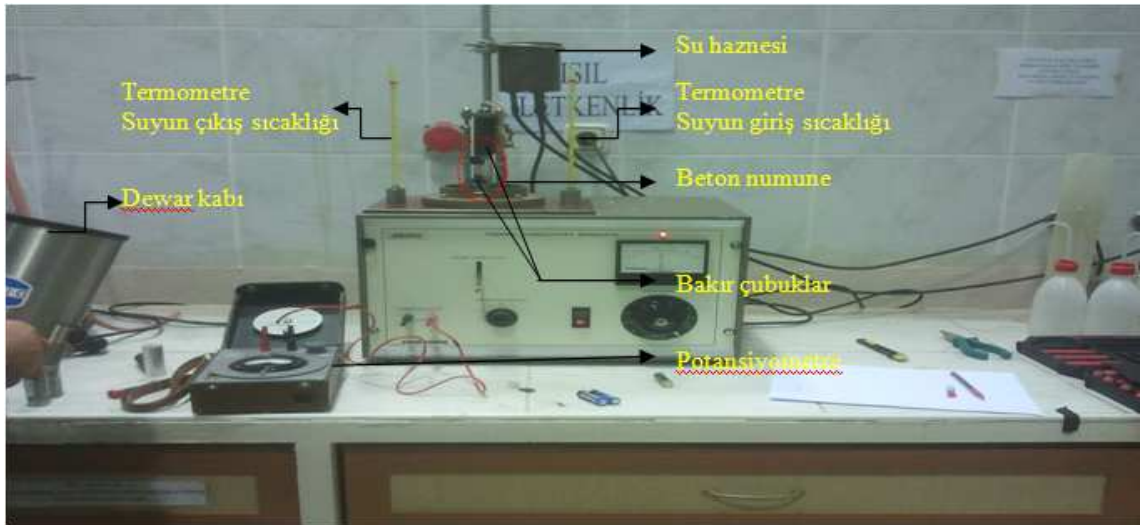
4.4.2.5 Isı iletkenlik katsayısı

Beton numunelerin, çapları 25 mm ve uzunlukları 64 mm olacak şekilde hazırlandıktan sonra (Şekil 4.8) ESOGÜ kimya mühendisliği laboratuvarında bulunan ısı iletkenlik katsayısı belirleme cihazında ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür.



Şekil 4.8 25 mm çapında, 64 mm uzunluğunda beton numuneler.

Deneyleerde kullanılan aygıt iyi iletken ya da ince yalıtkan örneklerin ısı iletkenlik katsayısını belirlemek üzere tasarlanmıştır. Aygıt, elektriksel ısıtıcı kaynağı, kalorimetre, ısı kaybını engellemek için kullanılan bir Dewar kabı ve soğutma suyu tankından oluşur. İki cıvalı termometre suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarının okunmasını sağlar (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Isı iletkenlik katsayısı belirleme cihazı.

Numuneler iki bakır çubuk arasına sıkıştırılır, potansiyometre cihaza bağlanır, Dewar kabı yerine takılır, su kaynağı açılır (düzenli bir debi ile su akışı sağlanır), sistemden 100 cm³ su geçmesi için gerekli zaman ölçülür, giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında fark olması için biraz beklenir ve veriler kaydedilir.

Isıl iletkenlik katsayısı (4.4) bağıntısı kullanılarak W/m.K cinsinden bulunur.

$$K_{\text{Beton}} = \frac{J * M * L * (W_2 - W_1)}{A * t * (T_2 - T_1)} \quad (4.4)$$

J: Birim dönüştürme faktörü, 4186 Joule/kcal.

M: 100 cm³ suyun kütlesi, kg

L: Numunenin uzunluğu, m

W₂: Su çıkış sıcaklığı, °C

W₁: Su giriş sıcaklığı, °C

A: Numunenin kesit alanı, m²

t: 100 cm³ suyun toplanma süresi, sn

T₂₋₁: Isıl çift sıcaklıkları.

4.4.2.6 Yüksek sıcaklık deneyleri

Beton numunelere yüksek sıcaklık uygulaması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi laboratuvarında bulunan yüksek sıcaklık deneyi fırınında yapılmıştır. Beton numuneler 20° C oda sıcaklığı haricinde yüksek sıcaklık fırınında 300, 600 ve 900° C sıcaklıklarda 3 saat süreyle bırakılmışlardır ve bu işlem sonrasında 1 gün boyunca suda bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklıklar uygulanmadan önce her bir seri 100° C'de 1 gün bekletilerek yüksek sıcaklık altında içlerinde kalan su nedeniyle zarar görmelerinin önüne geçilmiştir. Böylece 100° C sıcaklıkta 1 gün muhafaza edilen betonların kurumaları sağlanmış ve yüksek sıcaklıklar altında ani genleşmeler sonucu hasar görmelerinin önüne geçilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler

sertleşmiş beton deneylerine tabii tutulmuş ve deney sonuçları grafiklerle incelenmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan beton numuneler verilerin kolay anlaşılması için; 300 °C sıcaklığa maruz bırakılan NB, PB (25,20), PB (50,20), PB (75,20) betonları sırasıyla 300NB, 300PB (25,20), 300PB (50,20), 300PB (75,20) olarak, 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan NB, PB (25,20), PB (50,20), PB (75,20) betonları ise sırasıyla 600NB, 600PB (25,20), 600PB (50,20), 600PB (75,20) olarak kodlanmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan beton numuneler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan beton numuneler.

BÖLÜM 5

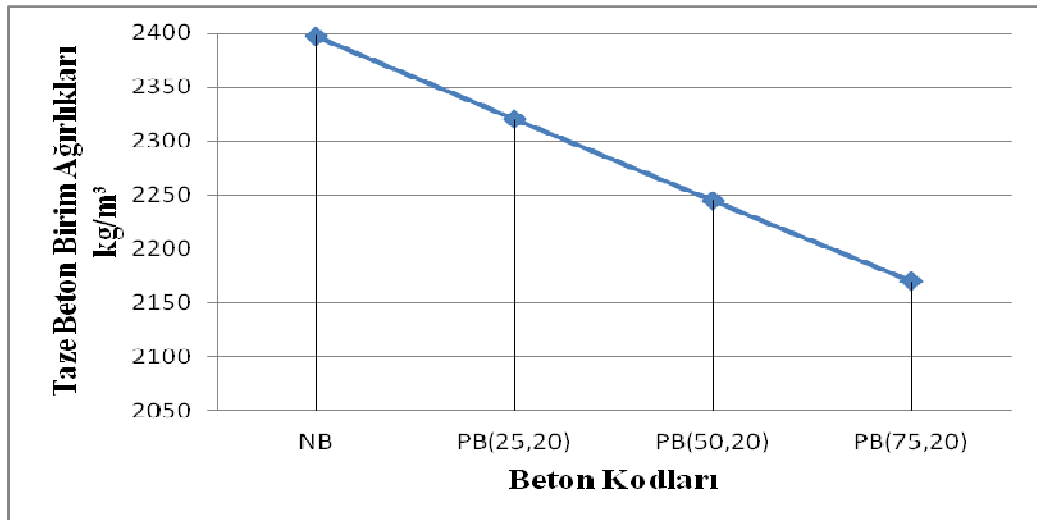
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Taze Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Birim ağırlık deneyi ve çökme deneyi sonuçları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Taze beton birim ağırlıkları ve çökme miktarları.

Beton Kodları	NB	PB (25,20)	PB (50,20)	PB (75,20)
Birim Ağırlık, kg/m ³	2397	2320	2245	2170
Çökme Miktarı, cm	8	10	9	7



Şekil 5.1 Taze beton birim ağırlıkları, kg/m³.

Deney sonuçları incelendiğinde beton içindeki perlit miktarı arttıkça birim ağırlıklarda % 10'a ulaşan azalmalar tespit edilmiştir. Çökme miktarı ise düzensiz değişim göstermiştir, bunun nedeni karışımda kullanılan perlitin yüksek oranda su emmesiyle karışım suyunda azalmaya dolayısıyla kıvam kayıplarına neden olmasıdır.

5.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

5.2.1 Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Tek eksenli basınç dayanım deneyi 20, 300 ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılan küp beton numunelere uygulanmıştır, elde edilen deney sonuçları ve bu deney sonuçlarına göre çekme dayanımları (5.1) ve kopma modülleri de (5.2) bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 5.2 ve Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

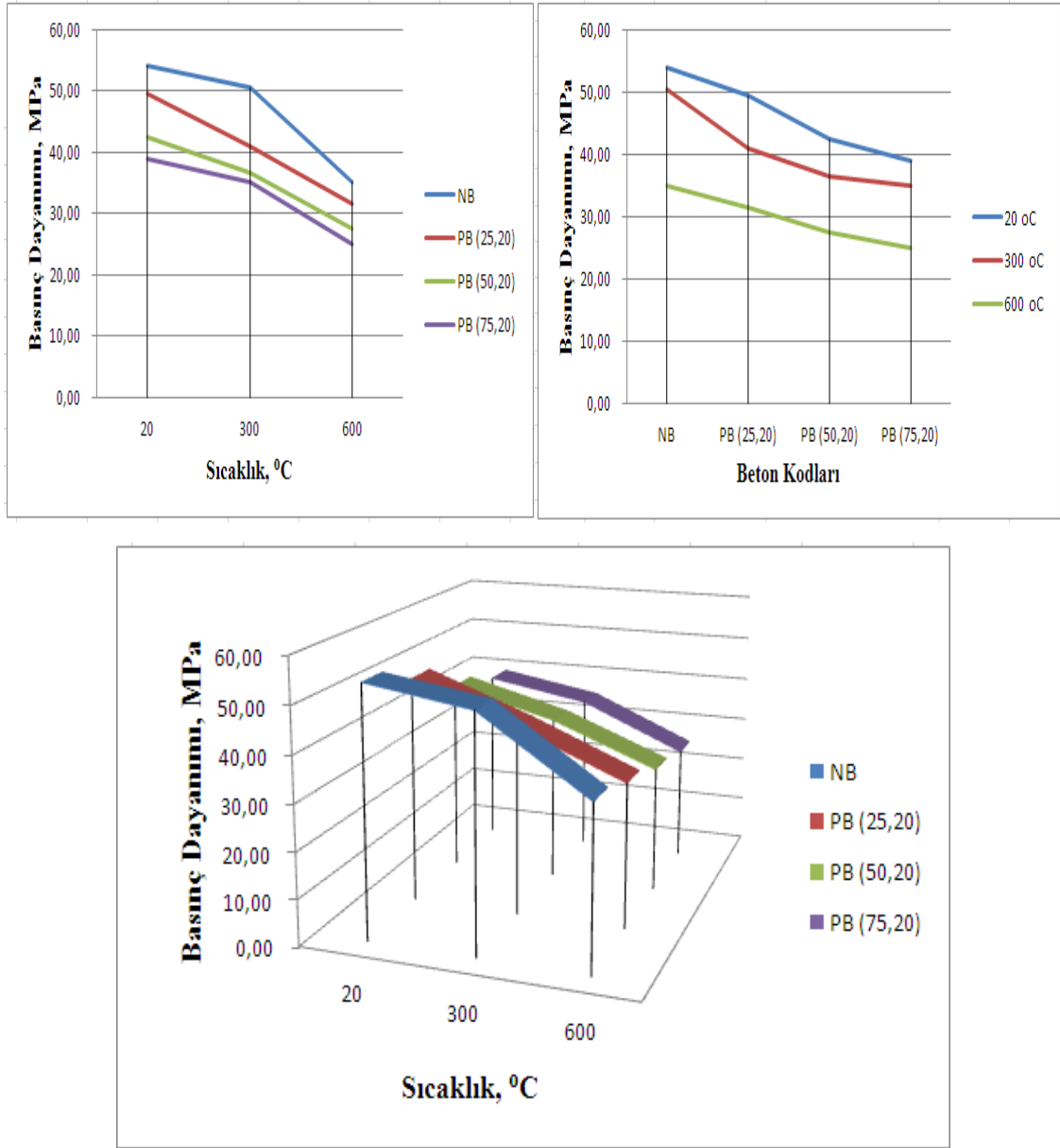
$$F_{ct} = 6,7 * \sqrt{F_c} * 0,083 \quad (5.1)$$

$$F_r = 7,5 * \sqrt{F_c} * 0,083 \quad (5.2)$$

Çizelge 5.2 Tek eksenli basınç dayanım değerleri.

Beton Kodları	Basınç Dayanımları, MPa	Çekme Dayanımları, MPa	Kopma Modülü, Mpa	20NB'ye Kıyasla Basınç Kayıpları, %
20NB	54.00	4.09	4.57	-----
20PB (25,20)	49.50	3.91	4.38	8.33
20PB (50,20)	42.50	3.63	4.06	21.30
20PB (75,20)	39.00	3.47	3.89	27.78
300NB	50.50	3.95	4.42	6.48
300PB (25,20)	41.00	3.56	3.99	24.07
300PB (50,20)	36.50	3.36	3.76	32.41
300PB (75,20)	35.00	3.29	3.68	35.19
600NB	35.00	3.29	3.68	35.19
600PB (25,20)	31.50	3.12	3.49	41.67
600PB (50,20)	27.50	2.92	3.26	49.07
600PB (75,20)	25.00	2.78	3.11	53.70

Çizelge 5.2'de beton kodları önündeki sayılar betonların maruz kaldığı sıcaklıkları göstermektedir.



Şekil 5.2 Tek eksenli basınç dayanım değerleri, MPa.

Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 20NB numunesinde elde edilmiştir, bu basınç dayanımı yaklaşık, 600NB numunesinde %35, 600PB (75,20) numunesinde %54 oranında azalmıştır.

NB numunelerinde 300 °C'den sonra basınç azalımı PB numunelerine kıyasla daha belirgindir. PB (75,20) numunesinde 300 °C'den sonra basınç azalımı 300 °C'den önceki basınç azalımına kıyasla daha keskindir. PB (25,20) ve PB (50,20) basınç azalımı yaklaşık lineerdir (Bkz. Şekil 5.2).

Beton numunelerin basınç dayanımlarının beton karışımlarındaki perlit miktarı ve sıcaklığın artmasıyla azaldığı görülmektedir, bu dayanım azalması perlitli betonların boşluk oranının fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Beton basınç dayanımının artırılması sonucunda betonda yüksek sıcaklık nedeniyle termal gerilmeler oluşmaktadır, beton basınç dayanımının artmasıyla beton basınç dayanımının karesiyle orantılı olarak betonun çekme dayanımında artmaktadır bu artış termal gerilmelerdeki artışla paraleldir dolayısıyla basınç dayanımını arttırmak sorunu çözmez ancak beton basınç dayanımı yüksek sıcaklık nedeniyle oluşacak iki eksenli basınç gerilmelerinden az olmamalıdır. Betonlardaki perlit miktarı arttıkça, betonların yüksek sıcaklık nedeniyle betonda oluşacak iki eksenli basınç gerilmelerine dayanımının belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir.

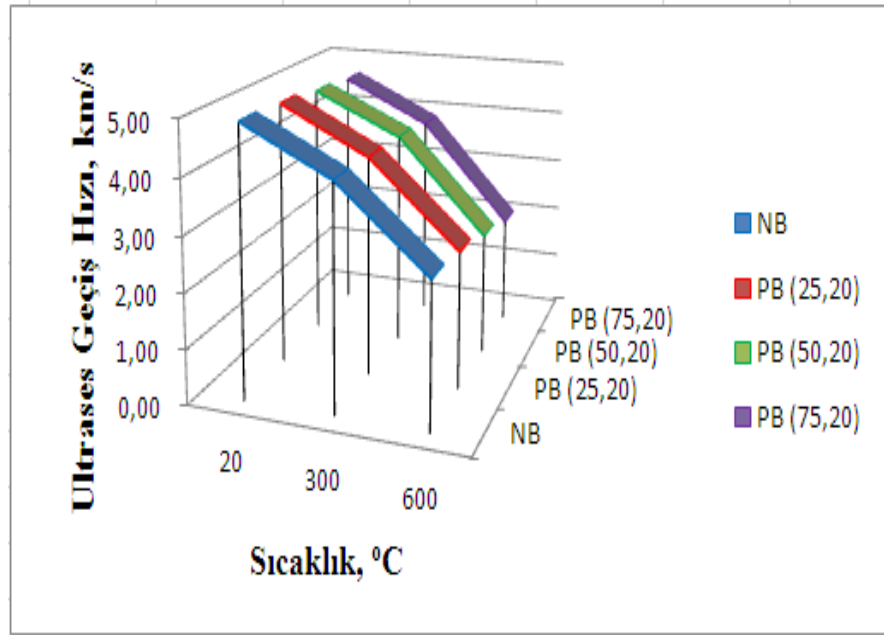
5.2.2 Ultrases deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Farklı sıcaklıklardaki beton numunelere ultrases deneyi uygulanmış, deney sonuçları Çizelge 5.3 ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 Ultrases geçiş hızları.

Beton Kodları	Ultrases, km/s	Birim Ağırlık, kg/m³
20NB	4.90	2277
20PB (25,20)	4.84	2206
20PB (50,20)	4.71	2130
20PB (75,20)	4.61	2048
300NB	4.08	2224
300PB (25,20)	4.01	2162
300PB (50,20)	3.96	2086
300PB (75,20)	3.82	2006
600NB	2.63	2173
600PB (25,20)	2.50	2179
600PB (50,20)	2.23	2041
600PB (75,20)	1.98	1963

Çizelge 5.3'te beton kodları önündeki sayılar betonların maruz kaldığı sıcaklıkları göstermektedir.



Şekil 5.3 Ultrases geçiş hızları, km/s.

Deney sonuçları incelendiğinde ısı işlem görmeyen beton numuneler 4,5 km/s geçiş hızının üzerinde değerlere sahip olduğundan çok iyi dayanım sınıfındadırlar. Numuneler 300 °C'de iyi sınıfına, 600 °C'de zayıf sınıfına geçmişlerdir. Sıcaklık arttıkça bu değerler bütün numunelerde azalmaktadır.

Çizelge 5.4'te dinamik elastisite modülleri gösterilmiştir, bu değerler (5.1) formülü kullanılarak elde edilmiştir.

$$E_{\text{din}} = \frac{10^5 * V^2 * \Delta}{9,81} \quad (5.1)$$

V: Ultrases geçiş hızı.

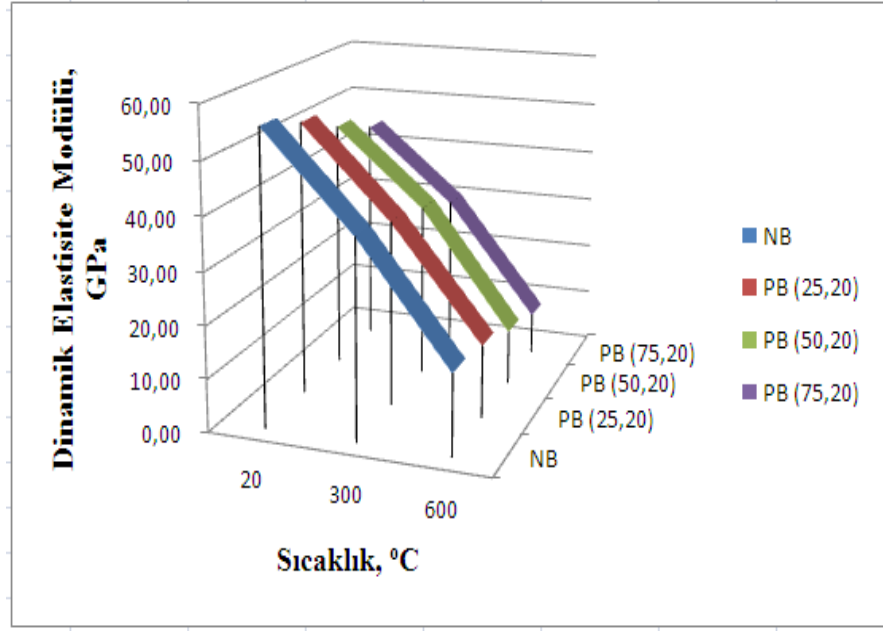
Δ : Sertleşmiş beton numune birim ağırlığı.

E_{din} : Dinamik elastisite modülü.

Çizelge 5.4 Dinamik elastisite modül değerleri.

Beton Kodları	E_{din}, GPa
20NB	55.73
20PB (25,20)	52.68
20PB (50,20)	48.17
20PB (75,20)	44.37
300NB	37.74
300PB (25,20)	35.44
300PB (50,20)	33.35
300PB (75,20)	29.84
600NB	15.32
600PB (25,20)	13.88
600PB (50,20)	10.35
600PB (75,20)	7.84

Çizelge 5.4'te beton kodları önündeki sayılar betonların maruz kaldığı sıcaklıkları göstermektedir.



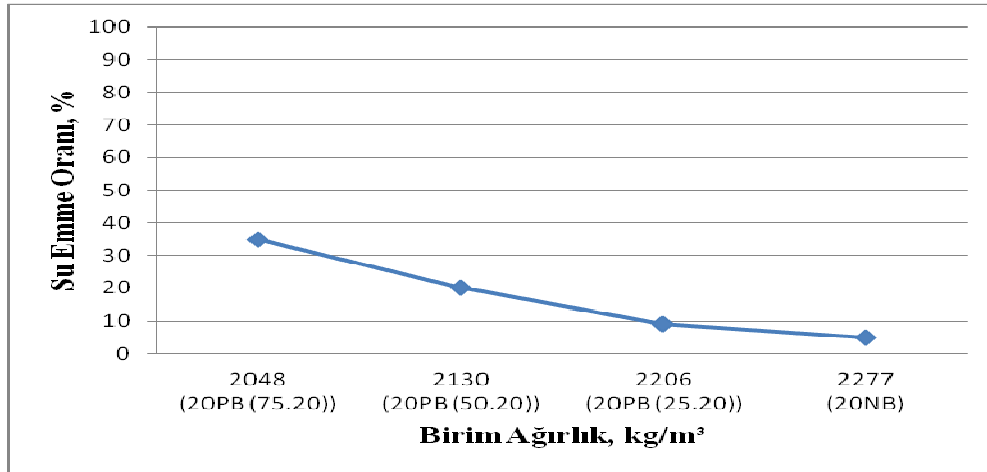
Şekil 5.4 Dinamik elastisite modül değerleri, GPa.

Elastisite modülünün düşürülmesi termal zorlamalar yüzünden oluşacak gerilmeleri düşürecektir. Elastisite modülü $w^{1,5}$ ile orantılı olduğundan daha hafif olan betonu seçmek gerekmektedir. Betonlardaki perlit miktarı artırıldığında betonların birim ağırlıkları azalmıştır bu durum elastisite modülünün azalmasına neden olmakta dolayısıyla betonlarda yüksek sıcaklık altında daha düşük çekme gerilmelerinin oluşmasını sağlamaktadır. Elastisite modülü basınç dayanımının karesiyle orantılı olduğundan (bkz. Formül (3.1)) basınç dayanımındaki azalış elastisite modülünü azaltmaktadır fakat bu azalış yüksek sıcaklık altında oluşacak iki eksenli basınç gerilmelerinden az olmamalıdır.

5.2.3 Su emme deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Farklı birim ağırlıkta üretilen beton numunelerinin su emme oranı ile fırın kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde

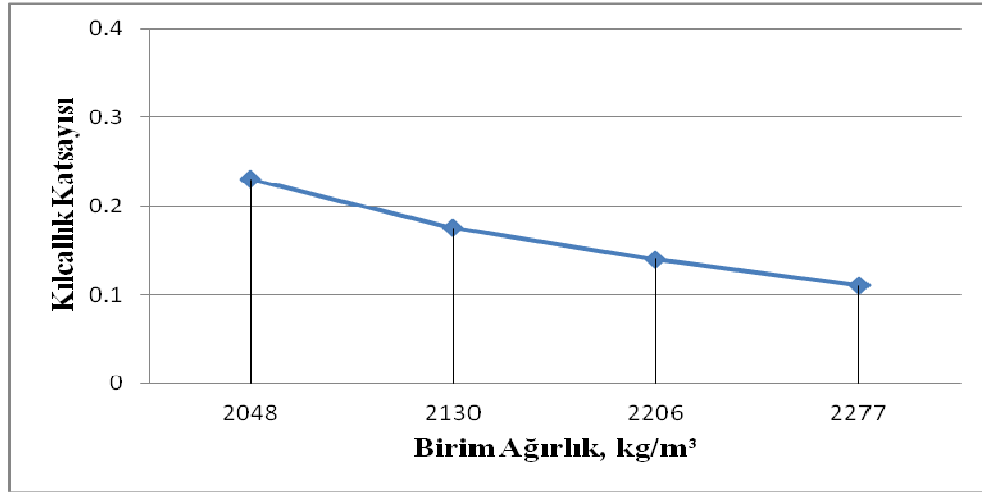
beton numunelerdeki perlit miktarı arttıkça birim ağırlık azalmakta ve betonun su emme oranı artmaktadır. Bu durum karışımdaki perlit miktarının artması ile ilişkilendirilmektedir. Karışımdaki perlit miktarı arttıkça betonun gözenekleri artmakta ve buna bağlı olarak da su emme oranı artmaktadır.



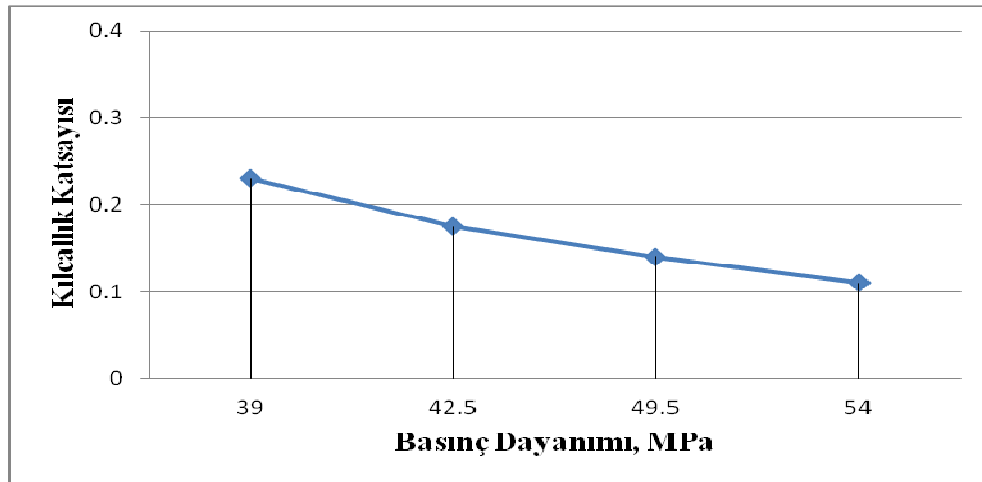
Şekil 5.5 Birim ağırlık ile su emme oranı arasındaki ilişki.

5.2.4 Kılcallık deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Farklı birim ağırlıkta üretilen beton numunelerin kılcallık katsayılarının fırın kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki Şekil 5.6'da, basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 Birim ağırlık ile kılcallık katsayısı arasındaki ilişki



Şekil 5.7 Kılcallık katsayısı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Şekil 5.6 incelendiğinde beton numunelerdeki perlit miktarı azaldıkça kılcallık katsayısı da azalmaktadır, NB da kılcallık katsayısı daha keskin bir azalış göstermektedir. Bu durum karışımdaki perlit miktarının artması ile ilişkilendirilmektedir. Karışımdaki perlit miktarı arttıkça betonun gözenekleri artmakta

ve buna bağlı olarak da kılcallık katsayısı artmaktadır. Beton içerisinde oluşan bu gözenekler betonu donma çözünme sonrasında oluşacak etkilere karşı daha dayanıklı kılar dolayısıyla kılcallık katsayısının arttırılması havaalanı kaplamaları için avavtaj sağlayabilir fakat kılcallık katsayısındaki artışa karşın basınç dayanımındaki azalışın minimize ededilmesi gerektiği göz ardı edilmemelidir.

şekil 5.7 incelendiğinde kılcallık katsayı azaldığında basınç dayanımının arttığı görülmektedir, bu artış PB (75,20)'den PB (50,20)'ye geçişte diğer geçişlere kıyasla daha keskindir. Çimento yerine mikrofillerin (uçucu kül vb.) kullanılması kılcallık katsayısındaki artışa karşın basınç dayanımındaki azalışın minimize ededilmesi için kullanılabilir.

5.2.5 Isı iletkenlik deneyinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Farklı birim ağırlıkta üretilen beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları ile fırın kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişki şekil 5.8'de gösterilmiştir.

şekil 5.8 incelendiğinde birim ağırlık arttıķa ısı iletkenlik katsayısında arttığı görülmektedir. Gazbetonun ısı iletkenlik katsayısı ile birim ağırlıkları arasında ilişkinin belirlenmesinde;

$$\lambda = 0,0003 * \Delta - 0,011 \quad (5.3)$$

λ : Isı iletkenlik katsayısı, W/mK

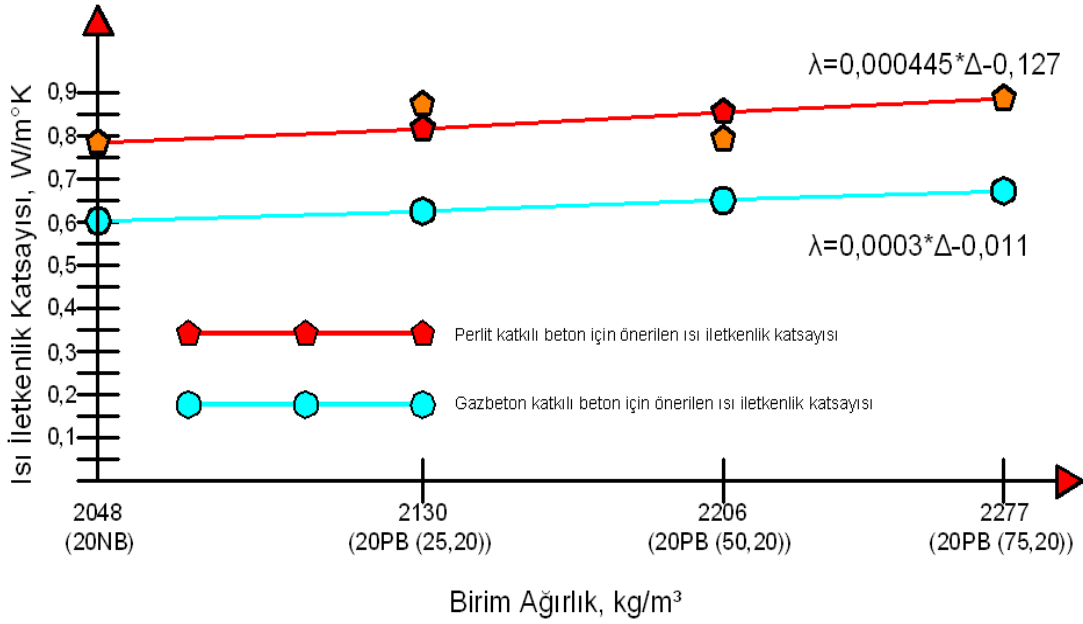
Δ : Birim ağırlık, kg/m³

bağıntısı kullanılabilir (Taşdemir ve Ertokat, 2002). Deney sonuçlarının (5.4) bağıntısı kullanılarak bulunabileceği ve bu değerlerin (5.3) bağıntısı ile bulunan değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

$$\lambda = 0,000445 * \Delta - 0,127 \quad (5.4)$$

λ : Isı iletkenlik katsayısı, W/m.°K

Δ : Birim ağırlık, kg/m³



Şekil 5.8 Birim ağırlık ile ısı iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki.

Isı iletkenlik katsayısının %20 oranında azaltılması termal gerilmeleri yaklaşık %10 oranında artırmıştır, (Malvar ve Hironaka,1991). Dolayısıyla ısı iletkenlik katsayısını düşürmek dezavantaj sağlar fakat termal gerilmedeki bu artış özgül ısıdaki % 40 oranında artış ile telafi edilebilir, (Malvar ve Hironaka,1991). Perlit katkılı betonlarda ısı iletkenlik katsayısındaki azalışdan kaynaklanan termal gerilmelerdeki artış özgül ısının artırılması ile telafi edilmiş olmaktadır.

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

F/A-18 uçaklarının beton kaplamaları üzerindeki etkisi incelenmiş ve bozulma için yaklaşık 10 cm yeterli derinlik olarak tanımlanmıştır çünkü daha derin tabakalar, sıcaklık artışından önemli düzeyde etkilenmeyecektir. Sıcaklığın merkezden 127 cm uzaklıktaki çevre içinde bozulmalara neden olduğu gözlenmiştir (Malvar ve Hironaka, 1991). Uçakların destek kuvvet üniteleri ateşlenmeden önce yüksek ortam sıcaklıklarından dolayı beton kaplamaların yüksek referans sıcaklıklarda bulunabileceğine dikkat edilmelidir. Malvar ve Hironaka (1991) tarafından yapılan analizde yaklaşık 55 °C ortam sıcaklığında ve buhar basıncı olmadan NW betonun çatlamayacağı desteklenmiştir. 55 °C'in altında çatlama kademeli olarak görünecektir, başlangıçta çok yüzeysel (0,3 cm ya da daha az) ve küçük bir alanda sınırlı. Daha düşük referans sıcaklıkları için çatlak derinliği artacak bu yüzden 0 °C'lik referans sıcaklığına ulaşıncaya kadar alan daha geniş ve derin bir şekilde etkilenecektir, dolayısıyla kaplamanın bulunduğu yerdeki ortam sıcaklığı önemli bir etkidir. Yetersizliğin tam olarak önceden tahmin edilmesine rağmen, yetersizlikler hizmetten aylar sonra, bazı durumlarda ise 2 yıl kadar sonra meydana gelir.

Beton basınç dayanımının artırılması sonucunda betonda yüksek sıcaklık nedeniyle termal gerilmeler oluşmaktadır, beton basınç dayanımının artmasıyla beton basınç dayanımının karesiyle orantılı olarak betonun çekme dayanımında artmaktadır bu artış termal gerilmelerdeki artışla paraleldir dolayısıyla basınç dayanımını arttırmak sorunu çözmez ancak beton basınç dayanımı yüksek sıcaklık nedeniyle oluşacak iki eksenli basınç gerilmelerinden az olmamalıdır. Deney sonuçları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 20NB numunesinde elde edilmiştir, bu basınç dayanımı yaklaşık, 600NB numunesinde %35, 600PB (75,20) numunesinde %54 oranında azalmıştır. NB numunelerinde 300 °C'den sonra basınç azalımı PB numunelerine kıyasla daha belirgindir. PB (75,20) numunesinde 300 °C'den sonra basınç azalımı 300

°C'den önceki basınç azalımına kıyasla daha keskindir. PB (25,20) ve PB (50,20) basınç azalımı yaklaşık lineerdir elde edilen basınç dayanımları Malvar ve Hironaka (1991) tarafından önerilen değerden (55,16 MPa) düşüktür dolayısıyla perlit katkılı beton farklı katkı malzemeleri ile desteklenmelidir (genleştirilmiş kil, şist, cüruf veya sinterlenmiş uçucu kül vb.).

Elastisite modülünün düşürülmesi termal zorlamalar yüzünden oluşacak gerilmeleri düşürecektir. Elastisite modülü $w^{1.5}$ ile orantılı olduğundan daha hafif olan betonu seçmek gerekmektedir. Betonlardaki perlit miktarı artırıldığında betonların birim ağırlıkları azalmıştır bu durum elastisite modülünün azalmasına neden olmakta dolayısıyla betonlarda yüksek sıcaklık altında daha düşük çekme gerilmelerinin oluşmasını sağlamaktadır. Elastisite modülü basınç dayanımının karesiyle orantılı olduğundan (bkz. Formül (3.1)) basınç dayanımındaki azalış elastisite modülünü azaltmaktadır. Fakat bu azalış yüksek sıcaklık altında oluşacak iki eksenli basınç gerilmelerinden az olmamalıdır.

Karışımındaki perlit miktarı arttıkça betonun gözenekleri artmakta ve buna bağlı olarak da kılcallık katsayısı artmaktadır. Beton içerisinde oluşan bu gözenekler betonu donma-çözünme sonrasında oluşacak etkilere karşı daha dayanıklı kılar dolayısıyla kılcallık katsayısının arttırılması havaalanı kaplamaları için avantaj sağlayabilir fakat kılcallık katsayısındaki artışa karşın basınç dayanımındaki azalışın minimize edilmesi gerektiği göz ardı edilmemelidir. Çimento yerine mikrofillerin (uçucu kül vb.) kullanılması kılcallık katsayısındaki artışa karşın basınç dayanımındaki azalışın minimize edilmesi için kullanılabilir.

Isı iletkenlik katsayısının azaltılması termal gerilmeleri artırmaktadır. Dolayısıyla ısı iletkenlik katsayısını düşürmek dezavantaj sağlar fakat termal gerilmelerdeki bu artış özgül ısıdaki artış ile telafi edilebilir. Perlit katkılı betonlarda perlit miktarı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı (5.4) bağıntısına uygun olarak azalmıştır bu azalıştan kaynaklanan termal gerilmelerdeki artış özgül ısının artması ile telafi edilmiş olmaktadır.

Termal gerilmelerdeki değişimler termal genleşme katsayısındaki değişimlere eşittir. Termal gerilmeler doğrudan elastisite modülü ile ilgilidir ve elastisite modülünde direk birim ağırlıkla ilgili olduğundan, birim ağırlık birinci etkendir ve termal genleşme katsayısı ikinci etkendir.

NW beton için, betonun dayanımından bağımsız olarak çatlama ve parçalanmaya neden olacak yeterlilikte termal gerilmeler ortaya çıkar. Malvar ve Hironaka (1991) tarafından yapılan analizler konservatif olduğu için, anlık olanlardan daha seyrek olan bazı tekrarlı yük periyotlarının oluşmasından dolayı kaplama bozulmaları beklenir.

Bir beton kaplamanın, 1 dakika içerisinde 196 °C'nin üzerindeki egzoz gazı sıcaklığına dayanabilmesi (0°C referans sıcaklığı dikkate alınarak) için kullanılacak beton aşağıdaki gereksinimleri karşılamalıdır:

- Birim hacim ağırlığı 1442 kg/m³ değerini aşmamalıdır;
- İnce ve iri agregaların her ikisi de hafif ağırlıklı olmalıdır;
- 28 günlük basınç dayanımı en az 55,16 MPa olmalıdır;
- 28 günlük kopma modülü en az 4,48 MPa olmalıdır;
- 28 günlük çekme dayanımı en az 3,17 MPa olmalıdır;
- Termal genleşme katsayısı $5,4 \cdot 10^{-6}$ 1/°C (3 ppm/°F) değerini aşmamalıdır, (Malvar ve Hironaka, 1991).

KAYNAKLAR DİZİNİ

AC1, Committee 213, 1987, Guide for structural lightweight aggregate concrete, AC1 213R-79, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

AC1, Committee 216, 1987, Guide for determining the fire endurance of concrete elements, AC1 216R-81, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

AC1, Committee 547, 1987, Refractory concrete: abstract of state of the art report, AC1 5471-79., Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.

AC1, Committee 318, 1989, AC1 318-89 and AC1 318R-89, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Detroit, MI.

Akman, M.S., 2000, Yapı hasarları ve onarım ilkeleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.

Aköz, F. ve Yüzer, N., 1994, Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 3, İstanbul.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., 1995, Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri, İMO Teknik Dergi, 1, İstanbul.

Alarcon Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E. and Ehrlacher, A., 2005, The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, Cement and Concrete Research, 35, 609-613.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Allen, D.C. and Desai, P.M., 1967, The influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures, Nuclear Engineering and Design, 6, 75-77.

Alonso, C., Andrade, C. and Castellote, M. and Khoury, G.A., 2003 a, Microstructure-solid phases, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Alonso, C., Andrade, C. and Khoury, G.A., 2003 b, Porosity & microcracking, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Aman, R., Ramakrishnan, V. and Krause, W., 1989, Evaluation of heat and thermal shock resistant materials for airfield pavement applications. South Dakota School of Mines -and Technology, Final Report P.O. No. N62583189P1087 to Naval Construction Batallion Center, Port Huenene, CA.

Anderberg, Y., 2003, Thermal Properties & Analysis, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Andrade, C., Alonso C. and Khoury, G.A., 2003 a, Microstructure & moisture, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Andrade, C., Alonso, C. and Khoury, G.A., 2003 b, Relating microstructure to properties, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., 2002, Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 298, İzmir.
- Bishop, J.A., 1953, The effect of jet aircraft on air force pavements; investigation conducted by the Bureau of Yards and Docks Proceedings, American Society of Civil Engineers, 317
- Bortolotti, L., 1990, Interdependence of concrete strength parameters, ACI, 87, 25-26
- Burke, D., 1990, Lightweight aggregate concrete for marine structures, Technical Memorandum 52-90-03, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, CA.
- CEB, Bulletin D'Information, 1991, Fire design of concrete structures, Lausanne.
- Chance Vought tests jets on heat resistant concrete. Chance Vought, 2 pp.-(authors will provide copy).
- Chang, W., Giang, Y., Wang, C. and Huang, C., 1993, Concrete at high temperatures above 1000°C, security technology, proceedings, Institute of Electrical and Electronics Engineers International Carnahan Conference on 13-19 October 1993, 263-268.
- Erdoğan, T.Y., 2003, Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- Ersoy, H.Y., 2001, Kompozit malzeme, Birinci Basım, Literatür Yayınları, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Expanded Shale Clay and Slate Institute, 1972, Fire Resistance of Expanded Shale Clay and Slate Concrete Slab Floors, Lightweight Concrete, Information sheet no: 16, National Press Building, Washington, DC.

Haddad, R.H. and Shannis, L., 2004, Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, Construction and Building Materials, 18, 425-435.

Harmathy, T.Z. and Allen, L.W., 1973, Thermal properties of selected masonry unit concretes, ACI, 70, 132-142.

Kalifa, P., Menneteau, F.D. and Quenard, D., 2000, Spalling and pore pressure in hpc at high temperatures, Cement and Concrete Research, 30, 1915-1927. reassessment, Magazine of Concrete Research, 44, 291-309.

Khoury, G.A., 1992, Compressive strength of concrete at high temperatures: a Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

Khoury, G.A., 2000, Effect of fire on concrete and concrete structures, Progress in Structural Engineering and Materials, 2, 429-447.

Khoury, G.A., 2003 a, Spalling, International Centre for Mechanical Sciences, Progress in Structural Engineering and Materials, 2, 429-447.

Khoury, G.A., 2003 b, Fire & Assessment, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kupfer, H., Hilsdorf H. and H. Rush, 1969, Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI, 66, 656-666.

Bortolotti, L., 1990, Interdependence of concrete strength parameters. ACI Mater. J. 87, 25-26.

Hobbs, L. S., Rocklite Technical Reference Manual. Pacific Lightweight Products, Glendale, CA.

Li, M., Qian, C. and Sun W., 2004, Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research, 34, 1001-1005.

Mahsanlar, N., 2006, Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışı, Yüksek Lisans tezi, Y.T.Ü., F.B.E.

Malvar, L.C. and Hironaka, M.C., 1991, Heat resistant concrete for airfield pavements: preliminary numerical study, Computers & Structures, 40, 303-311.

Neville, A.M., 2000, Properties of concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.

Onaran, K., 2000, Malzeme bilimi, Yedinci Basım, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Paksoy, A.S., 1999, Boya el kitabı, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, İstanbul.
Postacıoğlu, B., 1987, Beton, c.2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Papayianni, I. and Valliasis, Th., 2005, Heat deformation of fly ash concrete, *Cement & Concrete Composites*, 27, 249-254.
- Perkins, P.H., 1986, Repair, protection and waterproofing, of concrete structures, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. and Wong, Y.L., 2001, Comparison of the strength and durability performance of normal-and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 31, 1291-1300.
- Poon, C.S., Shui, Z.H. and Lam, L., 2004, Compressive behavior of fiber reinforced high- performance concrete subjected to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Uncorrected proof.
- Postacıoğlu, B., 1987, Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Ramakrishnan, V., 1988, Cyclic heating and cooling effects on concrete strength. South Dakota School of Mines and Technology, Final Report P.O. No. N62583/88P2206 to Naval Construction Batallion Center, Port Hueneme, CA.
- Ramakrishnan, V., 1989, Cyclic heating and cooling effects on concrete strength. South Dakota School of Mines and Technology, Final Report P.O. No. N62583/89MM710 to Naval Construction Batallion Center, Port Hueneme, CA.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Ramakrishnan, V., Krause, W., Groves, W., Shafai, H. A. F. and Rajpal, S., 1988, Heat resistant materials for F/A-18 pavement. South Dakota School of Mines and Technology, Final Report P.O. No. N62583/88MX784 to Naval Construction Batallion Center, Port Hueneme, CA.
- Ramakrishnan, V., Krause, W., Groves, W., Shafai, H.A.F. and Rajpal, S., 1989, Protective coating and heat resistant pavement materials for F/A-18 pavement. South Dakota School of Mines and Technology, Final Report P.O. No. N62583/89PO336 to Naval Construction Batallion Center, Port Hueneme, CA.
- Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. and Wu, G., 1991, Cyclic heating and cooling effects on concrete durability, Concrete Durability.
- Riley, M.A., 1991, Possible new method for the assessment of fire damaged concrete Magazine of Concrete Research, 43, 87-92.
- Robins, P.J. and Austin, S.A., 1988, Evaluation of alternative concrete mix designs as potential pavement materials for VTOL aircraft. RAF Wittering Research of Pavement Materials Contract No. 4C1/1384, Department of Civil Engineering, Loughborough University of Technology.
- Sakr, K. and El-Hakim, E., 2005, Effect of temperature or fire on heavy weight concrete properties, Cement and Concrete Research, 35, 590-596.
- Schrefler, B.A., Gawin, D., Houry, G.A. and Majorana, C.E., 2003, Physical, Mathematical & Numerical Modelling, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Shoab, M.M., Ahmed, S.A. and Balaha, M.M., 2001, Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars, *Cement and Concrete Research*, 31, 1533-1538.
- Smith, P., 1978, Resistance to high temperatures, ASTM STP 169B, American Society for Testing and Materials, 25, 389419 p.
- Taşdemir, C. ve Ertokat, N., 2002, Gazbetonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine bir değerlendirme, *Mimarlar Odası 1. Sempozyumu, İstanbul*, 2, 425-437.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Ağar, Ş., ve Yerlikaya, M., 2005, Çelik tel donatılı betonların performansa dayalı tasarımı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 6. Ulusal Beton Kongresi, 33-44, İstanbul.
- TS 1247, 1984, Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal Hava Koşullarında), TSE, Ankara.
- TS EN 12350-2, 2010, Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, TSE, Ankara.
- TS EN 12350-6, 2010, Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk, TSE, Ankara.
- TS EN 12390, 2010, Sertleşmiş beton deneyleri, TSE, Ankara.
- TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- TS EN 206-1, 2002, Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, TSE, Ankara.
- Uz, B., 1994, Mineraller kristallografi-mineraloji, Kurtiş Matbaacılık, İstanbul.
- Ünverdi, A., 2003, Lastik agregalı betonların donma çözülme sonrası davranışı, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Vodak, F., Trtik, K., Kapickova, O., Hoskova, S. and Demo, P., 2004, The effect of temperature on strength-porosity relationship for concrete, Construction and Building Materials, 18, 529-534.
- Yeğınobalı, A., 2002, Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı, TÇMB/AR-GE/Y01.01.
- Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk, L.D. ve Kızılkant, A.B., 2003, yüksek sıcaklık etkisinde kalan çimento harcında hasar oranının renk ölçümü ile araştırılması, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, 461-470, İstanbul.
- Yüzer, N., Aköz, F. ve Kızılkant, A.B., 2004, Yüksek dayanımlı betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklık etkisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi.
- Zhang, B., Bicanic, N., Pearce, C.J. and Philips, D.V., 2002, Relations between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures, Cement and Concrete Research, 32, 363-371.