

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HAVAALANI RİJİT KAPLAMALARINDA FARKLI BETON SINIFLARI İÇİN
SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN SONLU ELEMANLAR VE DENEYSEL
ÇALIŞMALARLA BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

**OCAK 2014
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**HAVAALANI RİJİT KAPLAMALARINDA FARKLI BETON SINIFLARI İÇİN
SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN SONLU ELEMANLAR VE DENEYSEL
ÇALIŞMALARLA BELİRLENMESİ**

İnşaat Mühendisi Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.12.2013
Tezin Savunma Tarihi : 02.01.2014**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR

Trabzon 2014

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Mehmet Tevfik SEFEROĞLU tarafından hazırlanan

**HAVAALANI RİJİT KAPLAMALARINDA FARKLI BETON SINIFLARI İÇİN
SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN SONLU ELEMANLAR VE DENEYSEL
ÇALIŞMALARLA BELİRLENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 17/12/2013 tarih ve 1534 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR

Üye : Doç. Dr. Şeref ORUÇ

Üye : Doç. Dr. Hamdullah ÇUVALCI

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ulaştırma Anabilim Dalı yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, başlangıcından sonuna kadar, gerekli bütün yardım, tavsiye ve yönlendirmeleri yapan, karşılaştığım problemlerin çözümünde deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez yazımım sırasında yardımını ve desteğini benden esirgemeyen Arş. Gör. Ahmet KUVAT'a ve Arş. Gör. Ufuk KANDİL'e teşekkür ederim.

Çalışmalarımın başından sonuna kadar manevi desteğiyle hep yanımda olan sevgili eşim Arş. Gör. Ayşegül Güneş SEFEROĞLU'na ve beni yetiştirip bu topluma kazandıran, eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Havaalanı Rijit Kaplamalarında Farklı Beton Sınıfları İçin Sıcaklık Değişiminin Sonlu Elemanlar ve Deneysel Çalışmalarla Belirlenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/01/2014

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Havaalanı Tanımı.....	2
1.2.1. Havaalanı Yerleşim Yapısı.....	2
1.3. Havaalanı Kaplamaları.....	4
1.3.1. Havaalanı Esnek Kaplama Tasarımı.....	5
1.3.1.1. FAA Metodu ile Havaalanı Esnek Kaplama Tasarımı.....	6
1.3.1.1.1. Uçaklarda Yük Dağılımı.....	6
1.3.1.1.2. Uçakların Teker Konfigürasyonu ve Geometrisi.....	7
1.3.1.1.3. Trafik Hacmi.....	8
1.3.1.1.4. Tasarım Uçağının Belirlenmesi.....	8
1.3.2. FAA Metodu ile Havaalanı Rijit Kaplama Tasarımı.....	10
1.3.2.1. Beton Kaplamaların Eğilme Mukavemeti.....	11
1.3.2.2. Beton Kaplama Altındaki Zeminin Yatak Katsayısı (k) Değeri.....	13
1.3.2.3. Beton Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi.....	14

1.4.	Havaalanı Kaplamalarında Buzlanma ve Sürtünme Katsayısı.....	15
1.4.1.	Sürtünme Seviyesinin Ölçülmesi.....	19
1.4.1.1.	Ölçüm Araçları ve Özellikleri.....	19
1.4.1.2.	Pist Yüzey Sürtünme Seviyesinin Ölçülmesi.....	20
2.	LİTERATÜR TARAMASI.....	22
2.1.	Kar ve Buzlanma ile Mücadelede Mekanik ve Kimyasal Yöntemler.....	22
2.2.	Kar ve Buzlanma ile Mücadelede Termal Yöntemler.....	23
2.2.1.	Kaplama İçine Kurulan Sistemlerle Isıtma.....	23
2.2.1.1.	Toprak Kaynaklı Isı Boruları.....	23
2.2.1.2.	Sıcak Akışkanlı Isı Boruları	24
2.2.1.3.	Güneş Kaynaklı Isı Boruları	25
2.2.1.4.	Elektrikli Isıtma Kabloları	25
2.2.1.5.	Karbon Fiber Isıtma Kabloları	27
2.2.1.6.	Elektrik İletkenli Beton ve Asfalt Kaplamalar.....	28
2.2.2.	Kaplama Dışına Kurulan Sistemlerle Isıtma.....	29
2.2.2.1.	Mikrodalga ile Kar ve Buz Eritme Sistemleri.....	29
2.2.2.2.	Kızılötesi Isı Yayan Kar ve Buz Eritme Sistemleri.....	29
2.3.	Isıtma Sistemlerinin Maliyet Analizi.....	30
2.4.	Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi.....	31
2.4.1.	Agregaya Etkisi.....	31
2.4.2.	Özgül Isıya Etkisi.....	31
2.4.3.	Isı İletim Katsayısına Etkisi.....	32
2.4.4.	Genleşme Katsayısına Etkisi.....	33
2.4.5.	Birim Hacim Ağırlığına Etkisi.....	33
2.4.6.	Elastisite Modülüne Etkisi.....	33
3.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35

3.1.	Deneysel Çalışmalar.....	35
3.1.1.	Isıtıcı Kabloların Yerleştirilmesi.....	35
3.1.2.	Beton Numunelerin Hazırlanması.....	36
3.1.3.	Beton Numunelerin Derin Dondurucuya Yerleştirilmesi.....	40
3.1.4.	Deneylerin Yapılışı.....	42
3.2.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal Analiz.....	43
3.2.1.	Modellemenin Oluşturulması.....	43
3.2.2.	Zamana Bağlı Termal Analizin Yapılması.....	45
3.3.	Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Statik Analiz.....	48
4.	BULGULAR VE İRDELEME.....	49
4.1.	Giriş.....	49
4.2.	Deneysel Çalışmaların Sonuçları.....	49
4.3.	Ansys Termal Analiz Sonuçları.....	62
4.4.	Ansys Statik Analiz Sonuçları.....	69
4.5.	Yapılan Çalışmaların Literatürle İrdelenmesi.....	74
5.	SONUÇLAR.....	75
6.	KAYNAKLAR.....	76
7.	EKLER (1 Adet CD).....	80

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

HAVAALANI RİJİT KAPLAMALARINDA FARKLI BETON SINIFLARI İÇİN SICAKLIK DEĞİŞİMİNİN SONLU ELEMANLAR VE DENEYSEL ÇALIŞMALARLA BELİRLENMESİ

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR
2014, 81 Sayfa, 36 Sayfa Ek

Havaalanı kaplamalarında oluşan buzlanma, önemli sürtünme problemlerine sebep olmakta ve neticede ciddi zaman ve ekonomik kayıplar ortaya çıkmaktadır. Özellikle de sıcaklıkların 0 °C'nin altında seyrettiği bölgelerimizde kar ve buzlanmayla mücadele için her yıl milyonlarca lira harcanmakta, buna rağmen mevcut yöntemler yetersiz kalmakla birlikte uçakların piste inememesinden dolayı da ek bir maliyet oluşmaktadır.

Çalışmamızda, havaalanlarında kar ve buzla mücadelede beton kaplamaların ısıtılması için elektrikli kablo ile ısıtma yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Havaalanı kaplama tipi olarak rijit kaplamalar seçilmiş, laboratuvar ortamında üç farklı beton sınıfı (C25, C30, C35) için numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin içine, yüzeyden 7 cm aşağıya elektrikli ısıtma kabloları döşenmiştir. Bu numuneler dört farklı sıcaklığa (-12,8 °C, -14,7 °C, -17 °C ve -21,3 °C) tabi tutulup, ısıtıcı kabloya elektrik vermek suretiyle numunelerin yüzeyindeki sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu beton numuneler ve sıcaklık değerleri Ansys sonlu elemanlar programında simüle edilip zamana bağlı termal analizler yapılmıştır. Son olarak da bu sıcaklık değişimlerinin beton numunelerde oluşturduğu gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler sonlu elemanlar programında statik analiz yapılarak belirlenmiştir. Maksimum çekme ve basınç gerilme değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmanın sonucunda, beton kaplamaları ısıtmanın, kar ve buzla mücadelede kullanılabilir bir yöntem olduğu kanaatine varılmıştır. Isıtma sürecinde oluşacak gerilmelerin, kaplama dayanım değerlerini aşmadığı anlaşılmıştır. Beton kaplama tabakası boyunca sıcaklık değişimi eksponansiyeldir. Bu değişikliğin, çalışmadaki diğer beton sınıflarıyla önemli ölçüde artmadığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Havaalanı, Rijit kaplama, Isıtma kabloları, Termal analiz, Ansys

Master Thesis Thesis

SUMMARY

DETERMINATION OF TEMPERATURE VARIATION FOR DIFFERENT CONCRETE
CLASSES OF AIRPORT RIGID PAVEMENTS USING FINITE ELEMENT AND
LABORATUARY STUDIES

Mehmet Tevfik SEFEROĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Civil Engineering Graduate Program

Supervisor: Assoc. Prof. M. Vefa AKPINAR

2010, 81 Pages, 36 Pages Appendix

The icing on the airport concrete pavements are the main causes for the decrease in the friction resulting in a significant time and economical losses. Millions of Liras is being spent every year particularly in areas where the tempratures usually are below 0 °C although still existing methods remain incapable and an incremental cost due to planes not being able to land.

In this study, usability of heating through electrical cable method for warming the coatings to strive against snow and ice in airports was examined. Rigid pavements were chosen as the airport pavement type and three different concrete grade's (C25, C30, C35) samples were prepared. Electrical heating cables were located seven centimeters below the surface inside the samples. These samples were set to four different tempratures (-12,8 °C, -14,7 °C, -17 °C and -21,3 °C) and the surface tempratures of the samples were measured by heating the cable. These concrete samples and temprature values were simulated in the Ansys finite eleman program and thermal analysis were applied. Finally, maximum tensile and compression stresses in contrete samples due to the temprature changes were determined by performing static analysis in the Ansys finite element program. Maximum pull and stress values were tried to indicated.

As a result of this study, it was concluded that heating concrete pavements is a effective method for deicing of concrete pavements. It was understood that stresses due to heating processes do not exceed pavement's strength. The temprature varriation through the concrete pavement layer was exponantial. The varriation did not significantly change fort he other concrete classes studied in this research program.

Key Words: Airport, Rigid pavement, Heating cables, Thermal analysis, Ansys

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Havaalanı sistemlerinin kısımları.....	3
Şekil 2. Havaalanı kaplama türleri ve özellikleri.....	4
Şekil 3. Uçaklarda brüt yük dağılımı.....	6
Şekil 4. Uçakların teker konfigürasyonları.....	7
Şekil 5. ASTM C-78 test metoduna göre kiriş yükleme.....	12
Şekil 6. ASTM C-78 metodu kiriş yükleme detayı.....	12
Şekil 7. FAA rijit kaplama kalınlık hesap çizelgesi.....	15
Şekil 8. Teker ile kaplama yüzeyi arasında oluşan alanlar.....	16
Şekil 9. Makro ve mikro pürüzlülüğün sürtünme direncine etkisi.....	18
Şekil 10. Betonlarda ısı iletimi-sıcaklık ilişkisi.....	32
Şekil 11. Betonun bağıl elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi.....	33
Şekil 12. Isıtıcı kablonun beton dökülmeden önceki durumu.....	35
Şekil 13. Küp numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi.....	37
Şekil 14. Kabloların 13 cm beton döküldükten sonraki durumu.....	39
Şekil 15. 20 cm beton döküldükten sonra numunenin durumu.....	39
Şekil 16. Numuneye demir çubukların yerleştirilmesi.....	40
Şekil 17. Derin dondurucu ve beton kaplama altına konulan zemin.....	41
Şekil 18. Yalıtım malzemesi ve ısı çiftlerinin numuneye yerleşimi.....	41
Şekil 19. Derin dondurucuda zemin ve beton numunenin yerleşimi.....	42
Şekil 20.a. K tipi ısı çifti.....	43
Şekil 20.b. Datalogger ve deney düzeneği.....	43
Şekil 21. Ansys ile geometrik modelin çizilmesi.....	44
Şekil 22. Ansys sıcaklık ölçüm noktaları	46

Şekil 23.	Numunenin sonlu elemanlara ayrılması.....	47
Şekil 24.	Ansys boykesit sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 25.	Ansys genel sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 26.	Statik analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı.....	48
Şekil 27.	Farklı beton numunelerinin ısınma süreleri grafikleri.....	49
Şekil 28.	C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	50
Şekil 29.	C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	51
Şekil 30.	C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	52
Şekil 31.	C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	53
Şekil 32.	C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	54
Şekil 33.	C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	55
Şekil 34.	C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	56
Şekil 35.	C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	57
Şekil 36.	C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	58
Şekil 37.	C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	59
Şekil 38.	C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	60
Şekil 39.	C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	61
Şekil 40.	C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	63
Şekil 41.	C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	63
Şekil 42.	C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	64
Şekil 43.	C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	64
Şekil 44.	C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	65
Şekil 45.	C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	65
Şekil 46.	C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	66
Şekil 47.	C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	66
Şekil 48.	C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C).....	67

Şekil 49.	C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C).....	67
Şekil 50.	C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C).....	68
Şekil 51.	C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C).....	68
Şekil 52.	C25 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	71
Şekil 53.	C25 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	71
Şekil 54.	C30 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	72
Şekil 55.	C30 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	72
Şekil 56.	C35 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	73
Şekil 57.	C35 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C).....	73

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Havaalanı kaplamalarını kullanan uçak tiplerine örnekler.....	8
Tablo 2. Tasarım uçağına dönüşüm katsayıları.....	9
Tablo 3. Minimum temel tabakası kalınlığı.....	10
Tablo 4. Beton sınıflarına göre karakteristik ve eşdeğer dayanım değerleri.....	13
Tablo 5. Yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki.....	14
Tablo 6. Pist yüzeyi sürtünme ölçüm cihazları ve özellikleri.....	19
Tablo 7. Sürtünme katsayısına göre pist frenleme durumları.....	20
Tablo 8. Pistte ani frenleme durumunda elde edilen değerler.....	21
Tablo 9. 1960-2012 yılları arasında ölçülen en düşük hava sıcaklıkları.....	21
Tablo 10. Hava sıcaklığı, güç ve kaplama sıcaklığı değerleri.....	27
Tablo 11. Kar ve buzla mücadelede kullanılan yöntemlerin mali açıdan karşılaştırılması.....	30
Tablo 12. Numunelerde kullanılan betonun karışım oranları.....	36
Tablo 13. C25 betonu basınç dayanım raporu.....	37
Tablo 14. C30 betonu basınç dayanım raporu.....	38
Tablo 15. C35 betonu basınç dayanım raporu.....	38
Tablo 16. Beton numunelerin ısınma süreleri.....	45
Tablo 17. Beton numunelerin ve yalıtım malzemesinin ısı özellikleri.....	45
Tablo 18. Beton numunelerin malzeme özellikleri.....	48
Tablo 19. Statik analiz sonucunda oluşan gerilme ve şekil değiştirme miktarları.....	70

SEMBOLLER DİZİNİ

b	: Kiriş genişliği (cm)
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı değeri (%)
C	: Beton (Concrete)
c	: Kirişin basınç derinliği (cm)
E_c	: Elastisite modülü (N/mm^2)
I	: Atalet momenti (cm^4)
F_{ctk}	: Betonun eksenel çekme dayanımı (N/mm^2)
f_{ck}	: Betonun basınç dayanımı (N/mm^2)
h	: Kiriş yüksekliği (cm)
k	: Yatak katsayısı (kN/m^3)
L	: Kirişin oturtulduğu iki mesnet arası mesafe (cm)
M_{max}	: Kirişin ortasında oluşan maksimum moment (N.cm)
P	: Deney kirişinin kırılma yükü (N)
V	: Hız (km/sa)
$^{\circ}C$	: Derece Celsius
$^{\circ}F$	: Derece Fahrenheit
$\sigma_{Eğilme}$	: Betonun eğilmede çekme dayanımı (N/mm^2)
$\mu_{max.}$	: Sürtünme katsayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Hava sıcaklığının 4 °C'nin altına düşmesi ile buzlanma riski başlar. Havaalanı kaplamalarında buzlanmanın oluşması durumunda buz, yüzey ile teker arasında bir film tabakası oluşturarak yüzeyin sürtünme direncini düşürür (ICAO, 1983). Bunun gibi tehlikeli durumların önlenmesi için kar ve buzun kaplamadan uzaklaştırılması gerekir. Ülkemizde geleneksel yöntemlerle yapılan kar ve buz mücadelesi gerek maliyet gerekse etkili olabilme süresi bakımından bir çok sıkıntıyı da beraberinde getirmektedir. Havaalanı kaplamalarında tuz ve kimyasalların buz çözücü olarak kullanıldığı geleneksel yöntemler, asfalta, betona, beton içindeki donatıya, drenaj borularına, uçakların metal aksamalarına ve ekolojik çevreye zarar vermektedir. Bu yaygın buz çözme metotlarının malzeme, makine ve işgücüne olan ihtiyacı kesintisiz devam etmektedir. Bunun yerini yurtdışında sıklıkla kullanılan ancak ülkemizde yeni yeni kullanılmaya başlanan kaplama ısıtma sistemleri almaya başlamıştır. Bu ısıtma sistemleri çeşitli ülkelerde genellikle sulu ısıtma sistemi olarak tercih edilmiştir.

Isıtma sistemleri arasında birçok yöntem vardır. İlerleyen bölümlerde bundan bahsedilecek ve kıyaslamaları yapılacaktır. Bunlar arasından elektrikli kablo ile ısıtma metodu çalışmamızın temelini oluşturmaktadır. Öncelikle havaalanlarında kullanılan kaplama türleri araştırılmış, rijit kaplama kalınlıkları ve dayanımı hakkında bilgi edinilmiştir. Buzlanmanın oluşumu ve kaplama yüzeyinde kalması durumunda ne gibi sakıncaların orta çıkabileceği irdelenmiş ve kaplama yüzeyindeki pürüzlülüğün sürtünme katsayısına etkisinden bahsedilmiştir.

Eğer kaplama ısıtılacak ise beton kaplamayı oluşturan malzemelerin fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği önemli olduğundan bu konu araştırılmış ve sonuçları sonlu elemanlar programında statik analiz yaparken kullanılmıştır.

1.2. Havaalanı Tanımı

Havaalanı, hava ve yolcu araçlarının trafiğinin düzenlenmesini sağlayan binaları, hava araçlarının uçuşlara hazırlanışı ile iniş ve kalkışını sağlamak için gerekli altyapı ve kolaylıkları içinde bulunduran özel bir şekilde hazırlanmış alanlardır (ICAO, 1999).

2920 Sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu; karada ve su üzerinde hava araçlarının kalkması ve inmesi için özel olarak hazırlanmış, hava araçlarının bakım ve diğer ihtiyaçlarının karşılanmasına, yolcu ve yük alınmasına ve verilmesine elverişli tesisleri bulunan yerleri havaalanı olarak tanımlar (T.S.H.K., 1983).

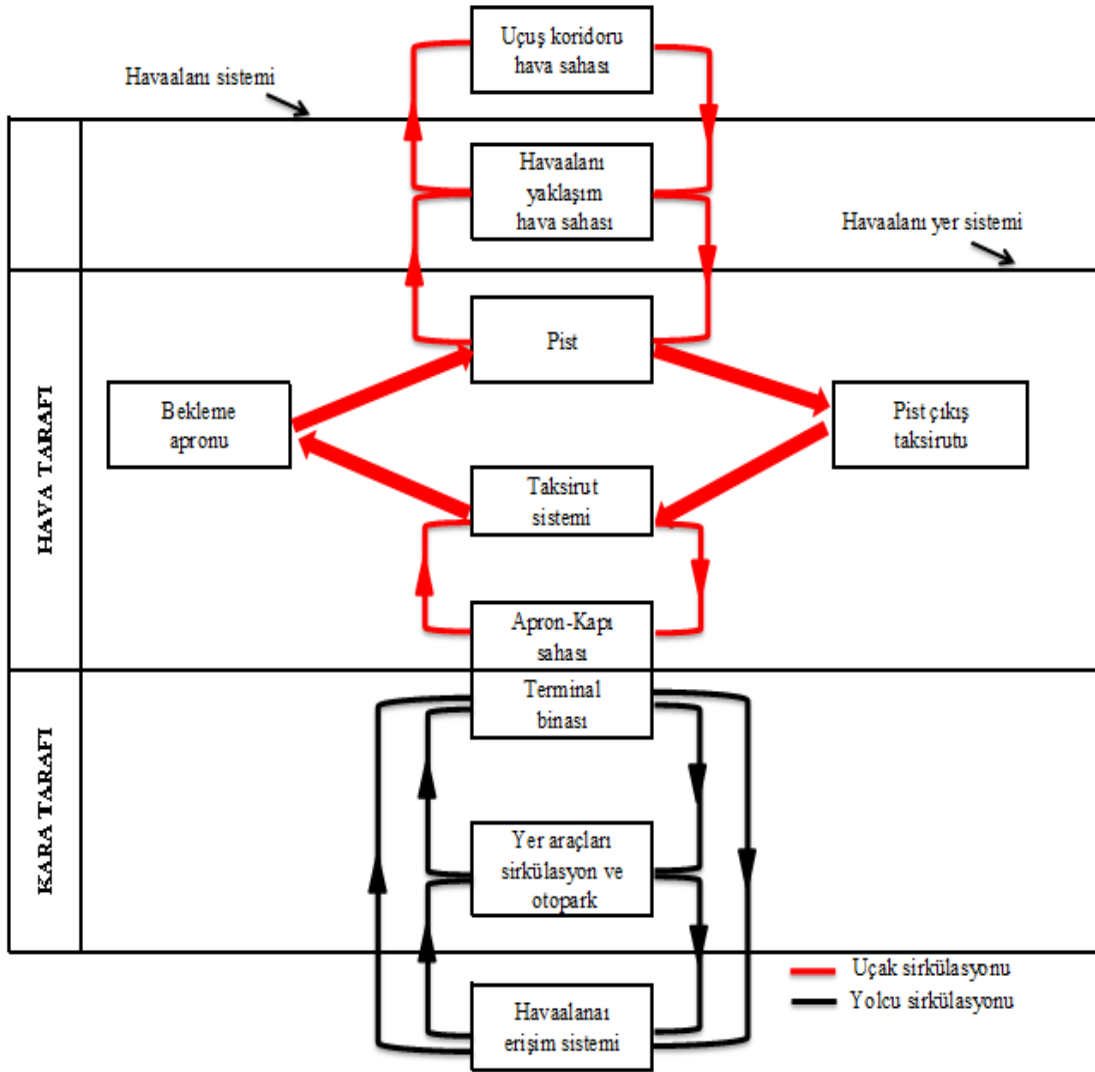
Ulaştırmada kolaylık ve hız sağlayan sistemlerin başında havaalanı gelmektedir. Hava taşımacılığında başrolü üstlenen havaalanları, bir ülkenin dünyaya açılan kapısı ve ülkenin tanıtılmasına büyük katkılar sağlamış, aynı zamanda ülkelerin ekonomik, sosyal ve kültürel açıdan büyümesini sağlayan yapılardır.

Havaalanlarında birçok faaliyet aynı anda yürütülmektedir. Kara taşımacılığının, hava taşımacılığına geçişini sağlayan bu yapılar yolcu ve yük taşınmasında gerekli tüm birimleri bünyesinde bulundurmaktadır.

Havaalanı; motorlu hava araçlarının inip kalkabilmesi için karada veya suda konumlandırılmış pistleri, bu pistler arasında bulunan bağlantı yollarını, hava taşıtlarının hareketsiz halde beklemeleri için ayrılmış yerleri, yolculuk yapmak için bu alanda bulunan yolcuların temel ihtiyaçlarını giderebildiği ve hava trafiğini kontrol etmek için görevli tüm personeli de içinde bulunduran terminal binasını, hava taşıtlarının bakım onarımının ve yakıt ikmalinin sağlanabildiği bölümleri de kapsayan özel bir alandır.

1.2.1. Havaalanı Yerleşim Yapısı

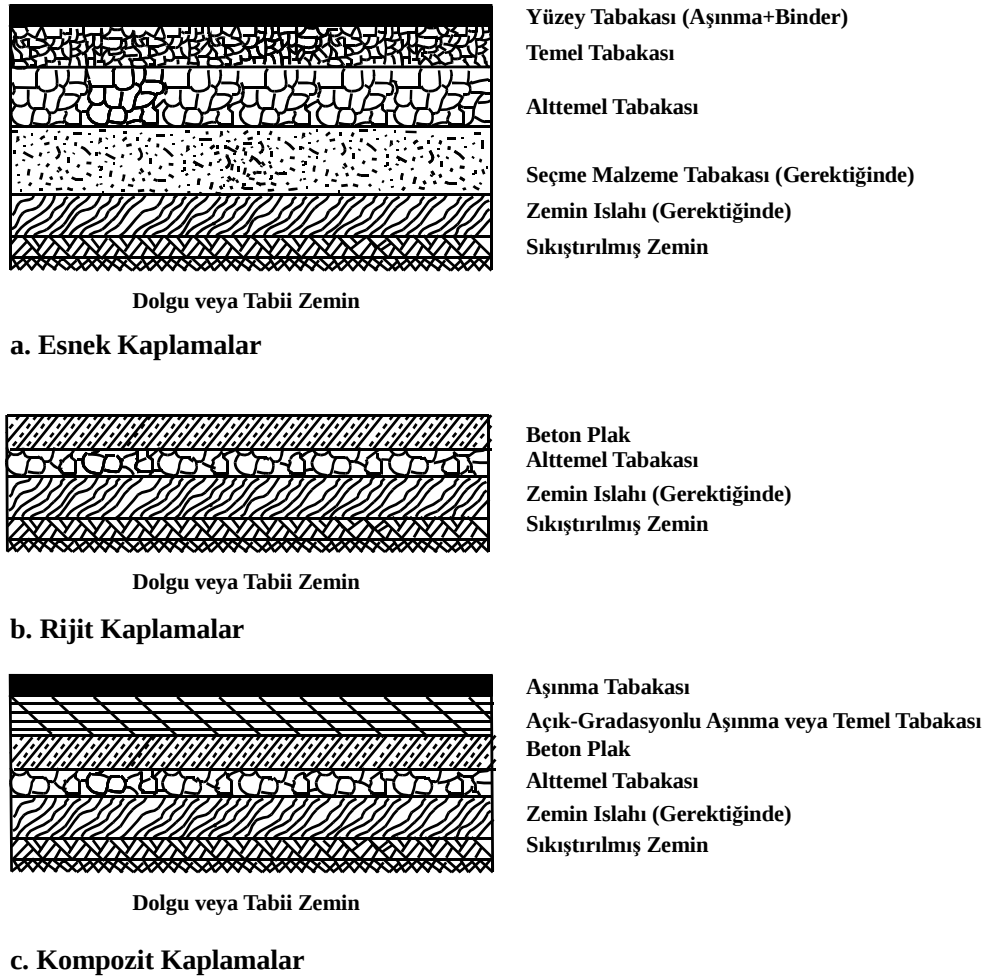
Havaalanları fonksiyonel olarak hava tesisi ve kara tesisi olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Hava tesisi, terminal yakınındaki hava sahası, pist, taksirut ve farklı amaçlar için kullanıma ayrılmış apronlardan oluşmaktadır. Kara tesisi ise yolcu, bagaj veya kargo işlemlerinin yapıldığı yolcu terminali veya kargo terminali, otopark, havaalanına ulaşım yollarını kapsayan kısımlardır.



Şekil 1. Havaalanı sistemlerinin kısımları (Horonjeff, 1994).

1.3. Havaalanı Kaplamaları

Ülkemizde kullanılan havaalanı kaplamaları arasında rijit (beton), esnek (fleksibil) ve kompozit (karışık) türleri bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Havaalanı kaplama türleri ve özellikleri (Tunç, 2007).

Rijit kaplamalar, ağır ve yüksek trafik hacmine sahip yollarda granüler bir alttemel tabakası üzerine yapılan beton plaklardır. Esnek kaplamalar, çok tabakalı bir yapıya sahiptir. Alt tabakalarında drenaj kabiliyeti yüksek granüler malzemeler ve üst tabakalarında ise yüksek stabilite ve sürüş konforu sağlayacak asfalt karışımlar kullanılmaktadır. Kompozit kaplamalar, zaman içerisinde bozulan beton kaplamaların üzerine sıcak asfalt karışım takviye tabakası yapılarak ya da bozulmuş esnek kaplamaların üzerine beton kaplama tabakası yapılarak elde edilen kaplamalardır (Tunç, 2007).

Havaalanı kaplamalarının kalınlık tasarımında dikkate alınan en önemli etkenlerden birisi de kaplamayı kullanacak olan uçak trafiğidir. Belirlenmiş bir uçağın belirlenmiş bir tekerleğinin kaplamada meydana getireceği hasar miktarı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu faktörlerden bir kısmı su şekilde sıralanabilir (Tunç, 2007);

- a) İniş takımı geometrisi
- b) Tekerlek yükü
- c) Lastik temas basıncı
- d) Uçağın kaplamada bulunduğu yer
- e) Kaplamanın daha önceki yüklenme durumu

Karayollarında olduğu gibi, havaalanlarında da kaplama kalınlığının tayini oldukça karmaşık bir iştir. Çünkü kaplama çok farklı yükler ve çok değişken iklim ve çevre koşulları altında hizmet vermektedir. Kaplama kalınlığına etki eden değişkenler hem birbirlerine etki etmekte hem de niceliksel olarak ölçülememektedir (Tunç, 2007).

1.3.1. Havaalanı Esnek Kaplama Tasarımı

Havaalanları esnek kaplamalarının tasarımında FAA, Corps of Eng., LCN, Asphalt Enstitüsü, Fransız ve Kanada Pratiği gibi birçok metot mevcuttur. Bunlardan FAA (Amerika Sivil Havacılık Dairesi) ve Corps of Eng. metotları hemen hemen aynıdır. ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Teşkilatı) FAA metodunu önermektedir.

Asfalt kaplamaların stabilitesi; taşıtlardan gelen sürekli ve uzun süreli statik yükler, hızlanan veya yavaşlayan taşıtların tekerlek etkileri altında oluşan basınç, çekme, kesme kuvveti ve sökülmeye karşı gösterdiği dirençtir. Stabiliteyi kısaca trafik yüklerine karşı ötelenme ve tekerlek izleri oluşmayacak şekilde direnç gösterme yeteneği olarak tanımlayabiliriz. Stabilite, trafik yüklerini karşılayacak değerde olmalıdır. Ancak çok yüksek stabilite, çok sert bir karışım anlamına gelir ki bu tür kaplamalar trafik yükleri altında oluşan deformasyona uyamayıp çatlar. Bu nedenle düşük stabilite gibi çok yüksek stabilite de zararlıdır.

1.3.1.1. FAA Metodu ile Havaalanı Esnek Kaplama Tasarımı

CBR metodu olarak da adlandırılan FAA metodu ile ampirik olarak geliştirilen tasarım abaklarının yardımıyla kaplama kalınlığı belirlenebilmektedir. Bu metot sayesinde kaplamanın tüm kalınlığı ve her bir tabakanın kalınlığı saptanabilmektedir. Kaplamanın kalınlığına etki eden faktörler;

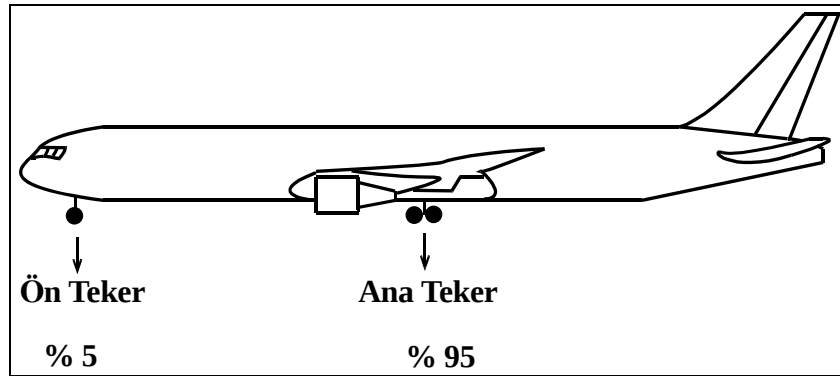
- Uçağın ağırlığı ve karakteristik teker düzeni (konfigürasyonu)
- Trafik hacmi
- İşletme modu (kaplama üzerindeki trafik yoğunluğu ve hızı)
- Zeminin mukavemeti
- Malzemenin karakteristiğidir. Ayrıca havaalanı esnek ve rijit kaplama tasarımında

kaplamayı kullanacak uçakların sahip olduğu karakteristikler şunlardır (Tunç, 2007);

- Uçağın yük dağılımı
- Uçakların teker konfigürasyonu ve geometrisi
- Trafik hacmi
- Tasarım uçağının belirlenmesi

1.3.1.1.1. Uçaklarda Yük Dağılımı

Kaplama tasarımı uçağın brüt ağırlığı esas alınarak yapılır. Bu nedenle, kaplama tasarımı için uçağın maksimum kalkış ağırlığı gözönüne alınmalıdır. Uçağın brüt ağırlığının % 95'inin ana tekerlerde ve %5'inin de burun tekerinde (Şekil 3) olduğu kabul edilmelidir (Tunç, 2007).

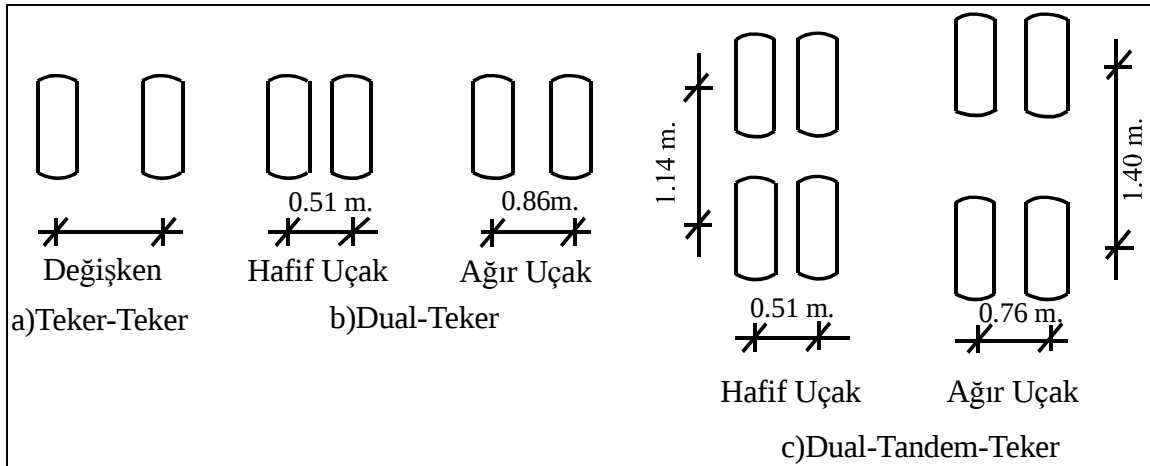


Şekil 3. Uçaklarda brüt yük dağılımı

1.3.1.1.2. Uçakların Teker Konfigürasyonu ve Geometrisi

Tekerlerin konfigürasyonu ve geometrisi uçak ağırlığının kaplama üzerine nasıl dağıldığını ifade ettiğinden, kaplamadaki gerilmeler bu yük dağılımına bağlı olarak değişecektir. Teker yükü, lastik basıncı, lastik temas alanı, vb. hususlar kaplamada oluşan gerilmeler açısından önemli parametreler olsa da, bu metotta dört teker konfigürasyonu göz önüne alınmaktadır. Bu teker konfigürasyonları için geliştirilen tasarım abakları ile kaplama kalınlıkları belirlenmektedir. Bu konfigürasyonlar;

- Tek teker (single-gear) uçaklar
- Dual-teker (dual-gear) uçaklar
- Dual-tandem-teker (dual-tandem-gear) uçaklar
- Geniş gövdeli uçaklar olarak sınıflandırılır (Tunç, 2007). Tasarım eğri abaklarının bu uçaklar için yaptığı geometrik kabuller Şekil 4’te verilmektedir.



Şekil 4. Uçakların teker konfigürasyonları (Tunç, 2007).

Geniş gövdeli uçaklar (örneğin B-747 ve yukarısı, DC-10 ve yukarısı, L-1011 ve yukarısı, vb.) dual tandem tipinde olup ağırlıkları ve geometrisi farklıdır. Bu tip uçaklar için tasarım abakları ayrı ayrı düzenlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Havaalanı kaplamalarını kullanan uçak tiplerine örnekler (Tunç, 2007).

<i>Uçak Tipi</i>	<i>Teker konfi- gürasyonu</i>	<i>Yıllık tahmini kalkış sayısı</i>	<i>Maksimum kalkış ağırlığı lb (kg)</i>	<i>Dual teker kalkış sayısı</i>	<i>Teker yükü lb (kg)</i>	<i>Tasarım uçacağı teker yükü lb (kg)</i>	<i>Tasarım uçacağı yıllık eşdeğer kalkış sayısı</i>
727-100	Dual	3760	160,000 (72,600)	3760	38,000 (17,240)	45,240 (20,520)	1891
727-200	Dual	9080	190,500 (86,500)	9080	45,240 (20,520)	45,240 (20,520)	9080
707- 320B	Dual tandem	3050	327,000 (148,500)	5185	38,830 (17,610)	45,240 (20,520)	2764
DC-9- 30	Dual	5800	108,000 (49,000)	5800	25,650 (11,630)	45,240 (20,520)	682
CV-880	Dual tandem	400	184,500 (83,948)	680	21,910 (9,940)	45,240 (20,520)	94
737-200	Dual	2650	115,500 (52,440)	2650	27,430 (12,440)	45,240 (20,520)	463
L-1011- 100	Dual tandem	1710	450,000 (204,120)	145	35,625 (16,160)	45,240 (20,520)	83
747-100	Duble dual tandem	85	700,000 (317,800)	2907	35,625 (16,160)	45,240 (20,520)	1184
TOPLAM		26,535	-	30,207	-	-	16,241

1.3.1.1.3. Trafik Hacmi

Her bir uçak tipinin yıllık kalkış sayısı ayrı ayrı tahmin edilmelidir.

1.3.1.1.4. Tasarım Uçağının Belirlenmesi

Her tip uçağın yıllık kalkış sayısı tahmin edildikten sonra tasarım uçağı belirlenmelidir. Çünkü bir havaalanı çok değişik tip ve sayıda uçak tarafından ayrı ayrı kullandığından dolayı bunların tek bir uçak cinsinden (yani seçilen bir tasarım uçağı cinsinden) toplam kalkış sayısı belirlenmelidir. Bunun için FAA, en kalın kaplama kalınlığını gerektiren uçak tipini tasarım uçak olarak seçilmesini önermektedir. Ancak tasarım uçağı için en ağır uçak tipinin seçilmesine gerek yoktur (Tunç, 2007).

Tasarım uçağı ile eşdeğer yıllık kalkış sayısının belirlenmesi için önce kaplamayı kullanacak tüm uçakların tasarım uçak tipine dönüştürülmesi gerekir. Bunun için Tablo 2’de dönüşüm katsayıları verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım uçağına dönüşüm katsayıları (Tunç, 2007).

<i>Uçak Tipinden</i>	<i>Uçak Tipine</i>	<i>Dönüşüm Katsayısı</i>
Tek teker	Dual teker	0,8
Tek teker	Dual tandem teker	0,5
Dual teker	Dual tandem teker	0,6
Duble dual tandem	Dual tandem teker	1,0
Dual tandem teker	Tek teker	2,0
Dual tandem teker	Dual teker	1,7
Dual teker	Tek teker	1,3
Duble dual tandem	Dual teker	1,7

Kaplamayı kullanan uçaklar aynı tip uçağına dönüştürüldükten sonra aşağıdaki formülasyon ile tasarım uçağının yıllık kalkış sayısına dönüştürülmelidir (Tunç, 2007).

$$\log R_1 = \log R_2 \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Burada;

R_1 : Tasarım uçağının eşdeğer yıllık kalkış sayısı

R_2 : Tasarım uçağına dönüştürülmüş uçağın yıllık kalkış sayısı

W_1 : Tasarım uçağın teker yükü

W_2 : Tasarım uçağına dönüştürülmüş uçağın teker yükü

Ayrıca FAA’nın tasarım yöntemlerinde esnek kaplamalar için minimum temel tabakası kalınlıkları Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3. Minimum temel tabakası kalınlığı (FAA, 2009).

<i>Tekerlek Geometri Tipi</i>	<i>Tasarım Yüğü</i>		<i>Minimum Temel Tabakası Kalınlığı</i>	
	<i>Lbs</i>	<i>kg</i>	<i>in</i>	<i>Mm</i>
S (single)	30000 - 50000	13600 - 22700	4	100
	50000 - 75000	22700 - 34000	6	150
D (dual)	50000 - 100000	22700 - 45400	6	150
	100000 - 200000*	45400 - 90700	8	200
2D	100000 - 250000*	45400 - 113400	6	150
	250000 - 400000*	113400 - 181000	8	200
2D (B757, B767)	200000 - 400000*	90700 - 181000	6	150
2D veya 2D/D1 (DC10, L1011)	400000 - 600000*	181000 - 272000	8	150
2D/2D2 (B747)	400000 - 600000*	181000 - 272000	6	150
	600000 - 850000*	272000 - 385600	8	200
2D/D1 veya 2D/2D1(A340)	568000 - 840400	257640 - 381200	10	250
2S (C130)	75000 - 125000	34000 - 56700	4	100
	125000 - 175000*	56700 - 79400	6	150
3D (B777)	537000 - 777000*	243500 - 352440	10	250
3D (A380)	1239000-1305000	562000 - 592000	9	230

* Trafik durumuna göre 100000 lbs (45000 kg) dan fazla ağırlıkta olan uçaklara maruz kalacak kaplamalarda stabilize edilmiş temel tabakası gereklidir. Havaalanı esnek kaplamaları bitümlü sıcak karışım aşınma tabakası ve temel tabakasından oluşmaktadır. eğer zemin zayıf ise granüler alttemel tabakasıda kullanılır.

1.3.2. FAA Metodu ile Havaalanı Rijit Kaplama Tasarımı

Havaalanları beton kaplama tasarımı için FAA, Corps of Eng., LCN ve PCA gibi birçok metot mevcuttur. Çalışmamızda FAA metodu dikkate alınarak yapılan havaalanlarında beton kaplama tasarımı üzerinde durulacaktır. Beton kaplamaların projelendirilmesinde ve kaplama kalınlığının tayininde; betonun dayanım değeri, taban zemininin özelliği, yıllık tahmini kalkış sayısı ve uçak ağırlığı gibi parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır.

1.3.2.1. Beton Kaplamaların Eğilme Mukavemeti

Beton kaplamaların kalınlık değeri, mevcut betonun mukavemetine bağlıdır. Havaalanı kaplamalarındaki beton kaplamalar bir üstyapı örneğidir. Üstyapı tabakalarındaki temel özellik çekme gerilmesine karşı dayanıklılık olduğundan, kaplamalarda kullanılacak betonun eğilmede çekme dayanımının (flexural strength) bilinmesi gerekir. Kaplama kalınlık tasarımı, bu parametrenin belirlenmesi ile başlar. Betonun eğilmede çekme dayanımı ASTM C-78 test metodu ile belirlenmeli ya da basınç dayanımı bilinen bir betonun TS 500'deki aşağıdaki formülasyona uyarlanmasıyla eksenel çekme dayanımı hesap edilebilir. Daha sonra eksenel çekme dayanımı 2 kat artırılarak yaklaşık eğilmede çekme dayanımı değeri elde edilebilir (TS 500, 2000).

$$F_{ctk} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

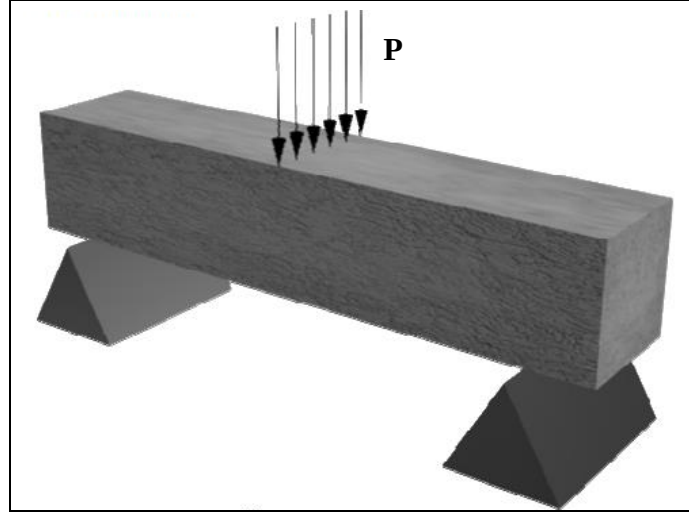
$$\text{Betonun eğilmede çekme dayanımı} = 2 \times F_{ctk} \quad (3)$$

Burada;

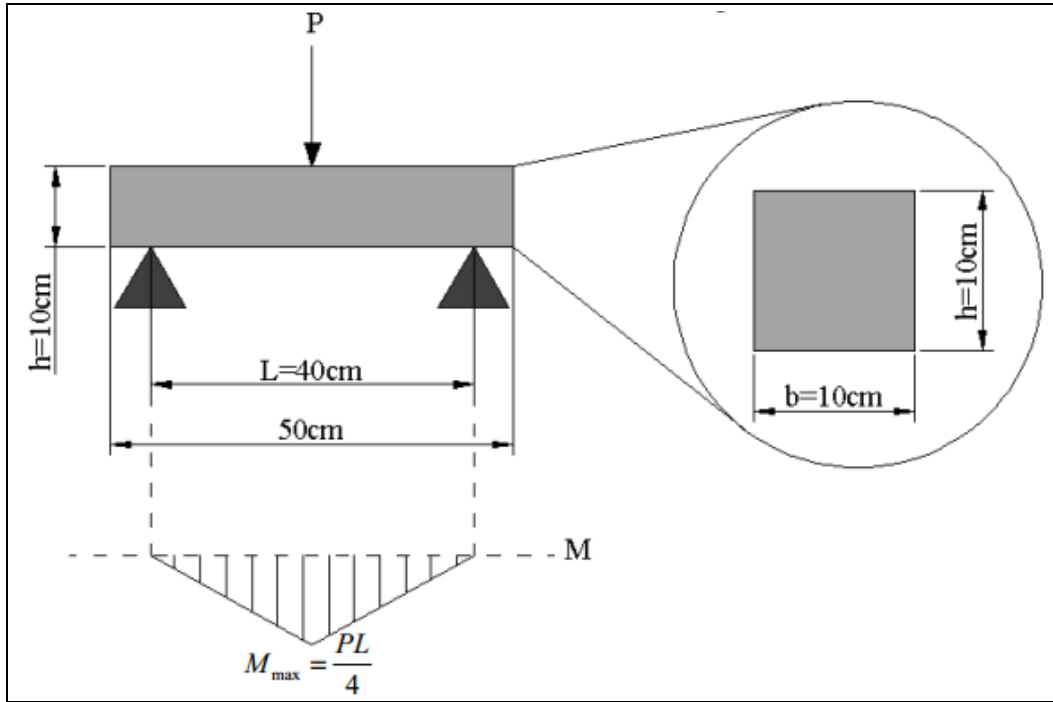
F_{ctk} : Betonun eksenel çekme dayanımı

f_{ck} : Betonun basınç dayanımı

ASTM C-78 test metodu ve sonuçlarından kısaca bahsedecek olursak; ASTM C-78 test metodu ile yapılan deney neticesinde deney kirişinin kırılma yüküne "P" dersek (Şekil 5, 6), diğer değerler de kiriş boyutu ile alakalı olup, aşağıda verilen formüller sayesinde $\sigma_{Eğilme}$ değeri bulunarak, betonun eğilmede çekme dayanımı elde edilebilir.



Şekil 5. ASTM C-78 test metoduna göre kiriş yüklemesi



Şekil 6. ASTM C-78 metodu kiriş yükleme detayı

Betonun eğilmede çekme dayanımının bulunabilmesi için;

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

(4)

$$c = \frac{h}{2} \quad (5)$$

$$M_{\max.} = \frac{PL}{4} \quad (6)$$

$$\sigma_{Eğilme} = \frac{M_{\max.} \times c}{I} \quad (7)$$

Burada;

I : Atalet momenti

M_{max} : Maksimum moment

Beton dayanımları, beton sınıfları arasındaki ilişki ve beton elastisite modülü (E_c) değerleri Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Beton sınıflarına göre karakteristik ve eşdeğer dayanım değerleri (TS 500, 2000).

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, f_{ck}	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk}	28 Günlük Elastisite Modülü, E_c
C16	16	20	1,4	27000
C18	18	22	1,5	27500
C20	20	25	1,6	28000
C25	25	30	1,8	30000
C30	30	37	1,9	32000
C35	35	45	2,1	33000
C40	40	50	2,2	34000
C45	45	55	2,3	36000
C50	50	60	2,5	37000

1.3.2.2. Beton Kaplama Altındaki Zeminin Yatak Katsayısı (k) Değeri

Havaalanı kaplamalarının yapılacağı bölgedeki zeminin yatak katsayısı (k), CBR (California Bearing Ratio-Kaliforniya Taşıma Oranı) değeri bulunduktan sonra aşağıdaki

formülasyona uyarlanmasıyla belirlenmiş olur. CBR değeri, çapı ve yükleme hızı sabit olan bir pistonun standart şartlarda hazırlanmış bir numuneye belirli bir derinlikte batması için gerekli kuvvetin, aynı pistonun maksimum dane çapı 1 in (25,4 mm) olan sürekli gradasyona sahip kalker kırmataş malzemesinden hazırlanan numunede aynı miktarda batma derinliği sağlayan kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır ve yüzde cinsinden ifade edilmektedir.

Zemin yatak katsayısı değeri (k) ile CBR değeri arasındaki ilişki Tablo 5'ten faydalanılarak tayin edilebilmektedir.

Tablo 5. Yatak katsayısı ile CBR değeri arasındaki ilişki (Tunç, 2002).

<i>CBR Değeri, %</i>	<i>k, 10³ kN/m³</i>	<i>CBR Değeri, %</i>	<i>k, 10³ kN/m³</i>
5	13,7	20	60,8
8	27,5	25	70,6
10	34,3	30	78,5
12	43,2	50	103,0
15	52,0	90	131,4

Test sonuçlarına göre CBR değeri 0 ila 3 arasında olan zeminler çok zayıf zeminler olacağından mutlaka ıslah edilmelidir. CBR değeri 3-7 arasında olan zeminler az zayıf-orta zeminler, CBR değeri 10'dan büyük zeminler ise sağlam zeminler olarak kabul edilir. Orta zeminlere ilave tedbir alınıp alınmaması zeminin diğer özelliklerine bağlıdır (Tunç, 2007).

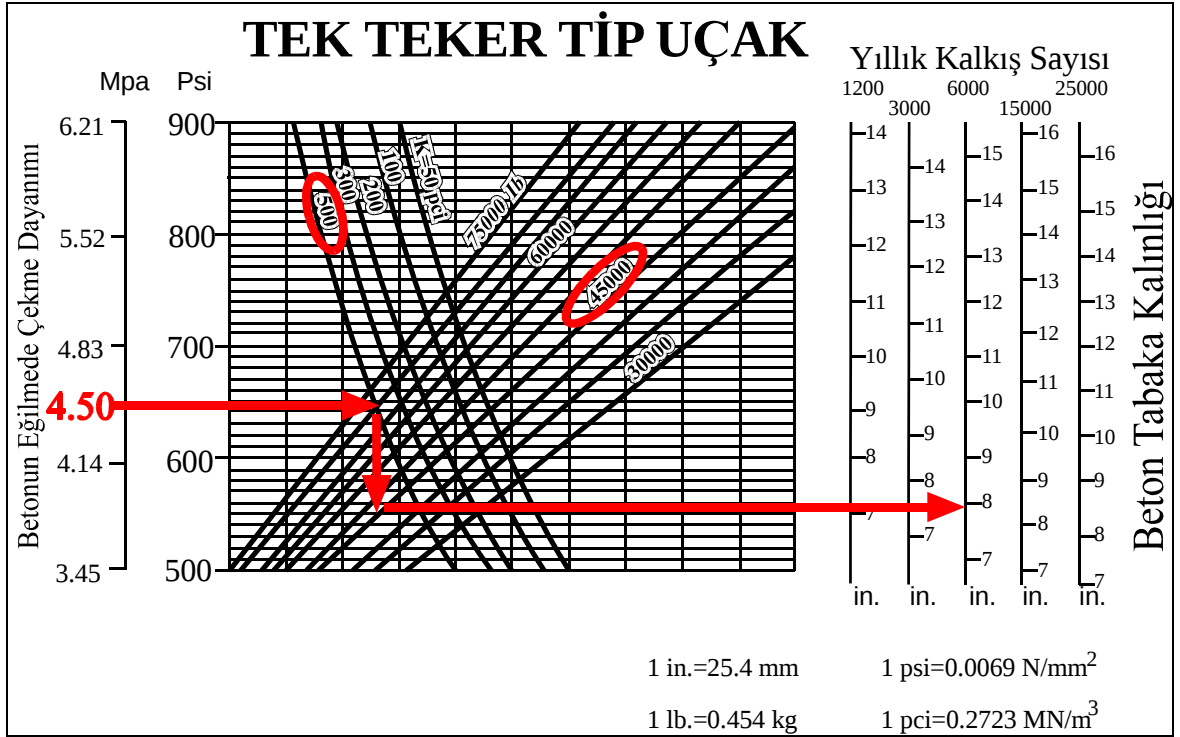
$$k = \left[\frac{1500 \times CBR}{26} \right]^{0.7788} \quad (7)$$

1.3.2.3. Beton Kaplama Kalınlığının Belirlenmesi

FAA, havaalanlarındaki kaplama kalınlığının belirlenebilmesi için betonun eğilmede çekme dayanımı, zeminin yatak katsayısı değeri, tasarım uçak ağırlığı ve yıllık tahmini kalkış sayısını kullanmaktadır. Şekil 7'ye göre betonun eğilmede çekme dayanımından başlanarak yatay iz düşümle zeminin yatak katsayısı değerine kadar bir ok çekilir. Bu noktanın düşey iz düşümü tasarım uçak ağırlığı eğrisine kadar uzatılır. Daha sonra son

noktadan tekrar yatay iz düşüm alınıp kaplama kalınlığı referans çizgilerine kadar uzatılarak istenilen yıllık tahmini kalkış sayısı değerinde durdurularak kaplama kalınlığı belirlenebilir. FAA bu yöntemi artık kullanmamakla birlikte yerine FAARFIELD isimli sonlu elemanlar hesap programını kullanmaktadır. Ancak programda ise temel girdiler yukarıda bahsedildiği gibidir.

FAARFIELD, beton kaplama kalınlığı için minimum 6 in (15,24 cm) tavsiye etmektedir. Ayrıca FAA çoğu havaalanı uygulaması için betonun eğilmede çekme dayanımının 600 ile 700 psi (4,14 ile 4,83 MPa) değerleri arasında olmasını önermektedir.



Şekil 7. FAA rijit kaplama kalınlık hesap çizelgesi (FAA, 1995).

1.4. Havaalanı Kaplamalarında Buzlanma ve Sürtünme Katsayısı

Kaplamanın yüzey yapısı (yüzeysel dokusu, pürüzlülüğü, v.b.) hem sürüş konforunu hem de sürüş emniyetini etkileyen en önemli unsurdur. Yani havaalanı kaplamasını kullanan araçlar için kaplama yeterince düzgün, ama gerekli sürtünme direncini sağlayacak kadar da pürüzlü olmalıdır. Yüzeyin kaygan olması, pistlere inen uçakların kayma direncinden, yani tekerle kaplama arasındaki sürtünme kuvvetinden sorumludur.

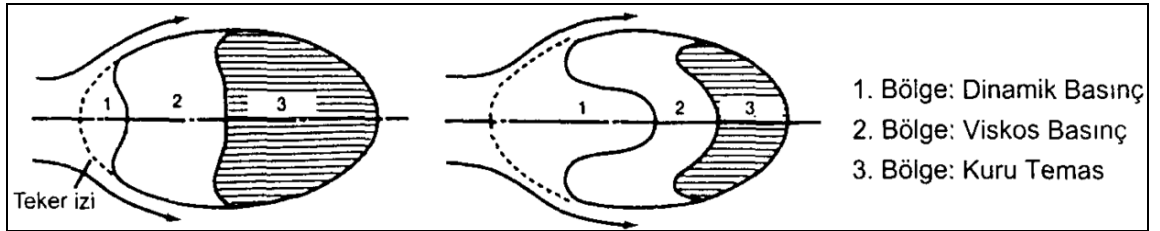
Yüzeydeki sürtünme katsayısı değerini düşüren en önemli etken kar yağışı ve yüzeyde oluşacak buzlanmadır.

Kaplama yüzey sıcaklığının $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve altına düşmesi buzlanmanın oluşumunda önemli etkiye sahiptir. Çünkü su, sıvılar içerisinde sıcaklığı arttıkça yoğunluğu düşen tek sıvıdır. Suyun yoğunluğu $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de maksimum seviyededir. Bu sıcaklığın altına düştükçe suyun hacmi artar, yoğunluğu düşer ve kristalleşme başlar.

Karayolu kaplamalarında olduğu gibi, havaalanı kaplamaları da kuru ve temiz yüzeylere sahip ise frenleme sırasında problem yaratmaz. Kaplama yüzeyi yaş olduğunda ıslaklığın derecesine (rutubetli durumdan birkaç milimetre su tabakasına kadar) bağlı olarak kayma direnci değişmektedir. Bu değişim;

- Mevcut sürtünmenin parçalanması (özellikle yüksek hızlarda)
- Drenaj karakteristiği

• Kaplamanın yüzey yapısı gibi özelliklerden kaynaklanmaktadır. Uçakların piste iniş hızları ve kaplamanın ıslaklığı arttıkça teker ile kaplama ara yüzeyinde Şekil 8'de görüldüğü gibi, kuru sürtünme yüzeyleri azalmakta fakat viskoz ve dinamik basınçlar artarak hidroplan oluşmaktadır (Tunç, 2007).



Şekil 8. Teker ile kaplama yüzeyi arasında oluşan alanlar (ICAO, 1983).

Havaalanlarında uçakların lastik basınçları $8,5$ ila 16 kg/cm^2 arasında olduğundan kritik hız 175 ila 240 km/sa arasında olmaktadır. Uçakların iniş hızları da aynı aralıkta olduğu için hidroplan etkisi uçak operasyonları için tehlike arz etmektedir (Tunç, 2007).

Uçak hızı arttıkça dinamik ve viskoz basınçlar artarak hidroplan olayı gelişmekte ve kuru temas yüzeyi azalarak sürtünme direnci düşmektedir. Lastik temas alanında oluşan bölgeler, mevcut sürtünmenin parçalanması ve hidroplan etkisinin artması sonucu oluşmaktadır. Islak kaplama üzerindeki suların yanal eğimle uzaklaştırılması gerekir. Kaplama üzerindeki su filmi üzerinden geçen tekerin yaptığı basınçla su filmini

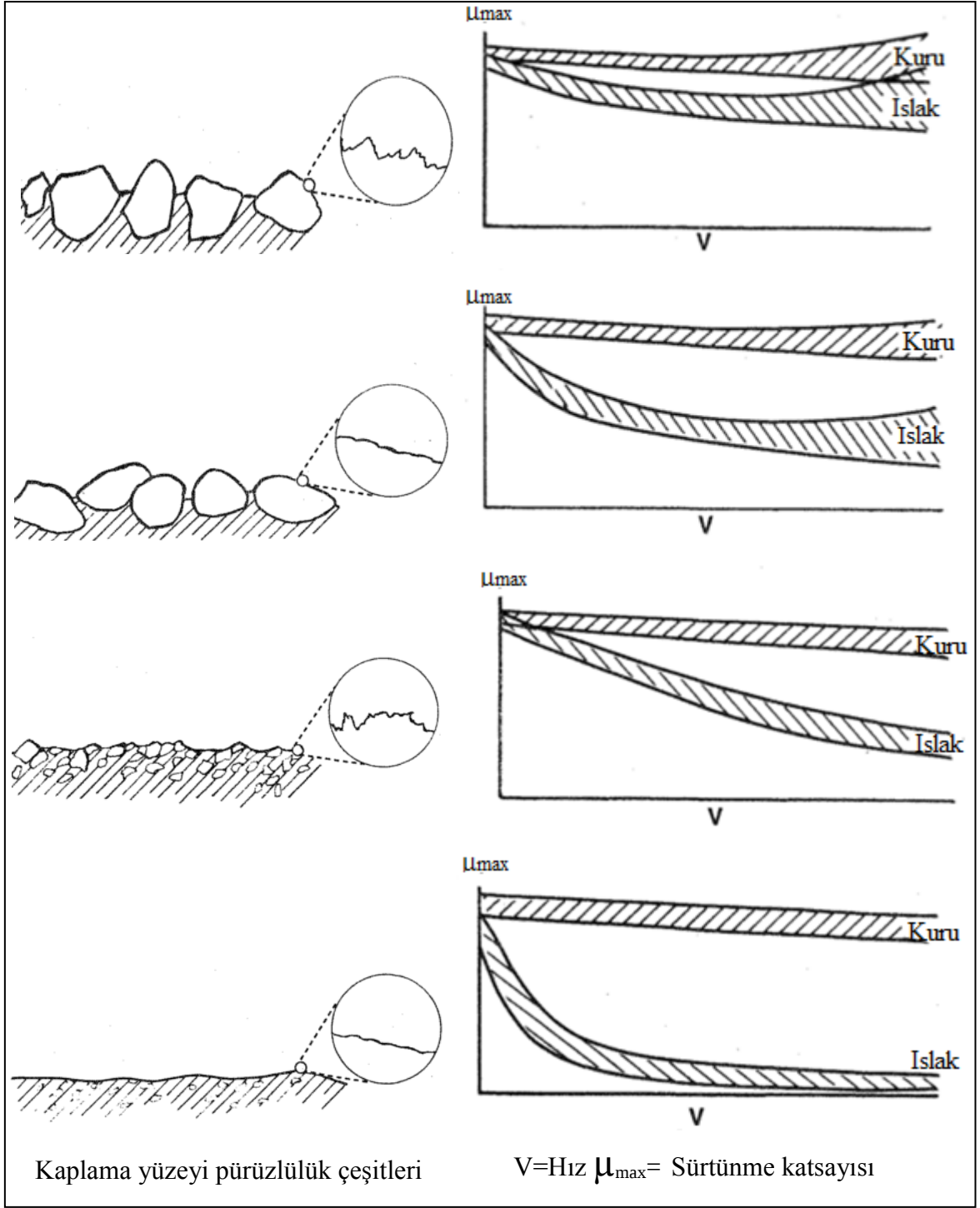
parçalamaya çalışacaktır. Parçalanmış su filmindeki suların bir kısmı tekerin dışına çıkarken (su sıçratması) bir kısmı da teker altında dren olmaya çalışacaktır. Bu dren olayı;

a) Teker/kaplama ara yüzeyindeki makro pürüzlülük ile drenaj

b) Agregada danelerinin yüzeyindeki mikro pürüzlülük ile penetrasyon drenajı şeklinde olmaktadır. Hareket halindeki tekerin altında bulunan su filminin kolay dren olabilmesi için dinamik basınçların az olması gerekir. Bunun için kaplama yüzeyi boşluklar (porozlar) ihtiva etmelidir. Bunu sağlamak için kaplama üzerine geçirimli bir tabaka yapılması veya kaplama yüzeyinin 0,2-1,0 mm derinlikte makro pürüzlülüğe sahip olması ile sağlanır.

Havaalanlarında uçakların iniş hızının uçağın tipi ve büyüklüğüne bağlı olarak 120 ila 250 km/sa olduğu göz önüne alınırsa ıslak kaplamadaki sürüş emniyetinin ne kadar önemli olacağı görülmektedir. Ayrıca sürüş emniyeti hem durma mesafesi hem de yönsel kontrol (manevra) kabiliyeti için de gereklidir. Bu nedenle, yol kaplamaları ile havaalanları kaplamalarının yüzey pürüzlülüğünün gereklilikleri birbirinden farklı olacaktır. Çünkü uçakların hızı ve kütlesi karayolu araçlarınınkinden daha fazladır. Ancak uçak tekerlerinin lastik basınçları karayolu araçlarından daha fazla olması önemli bir avantajdır. Havaalanlarında makro pürüzlülüğü sağlamak için beton kaplamalarda beton dökümünden sonra plastik halde iken fırça ile perdahlanarak veya sertleştikten sonra kaplama yüzeyinde sık aralıklarla enine yivler açılarak sağlanırken esnek kaplamalarda ise kısmen açık gradasyonlu bitümlü tabakalar ile sağlanabilmektedir. Karayolu ve havaalanı esnek kaplamalarında optimumdan daha fazla asfalt kullanılması halinde sıcak havalarda oluşan kuma-terleme ile kaygan yüzeyler meydana gelmekte iken, havaalanı esnek ve rijit kaplamalarında buna ilaveten uçakların tekerrür eden frenleme esnasında teker lastiklerinin eriyip kaplama üzerinde kaygan yüzeyler oluşturmaktadır (Tunç, 2007).

Kaplama üzerindeki ince viskoz su filmi teker basıncı ile parçalanarak agregada daneleri yüzeyindeki mikro pürüzlülük boşluklarına su zerreciklerinin penetre etmesi sonucu teker/kaplama ara yüzeyinde kuru yüzeyler sağlanmaktadır. Ayrıca agregada danelerinin yüzeylerindeki mikro pürüzlülük kaplama yüzeyindeki su filmi testere gibi parçaladığı gibi düşük hızlarda sürtünme direncini de artırmaktadır. Mikro pürüzlülüğün olması için kullanılacak agreganın muhakkak kırmataş olması ve devamlılığı içinde cilalanma direncinin yüksek olması gerekir. Kaplama yüzeylerinin makro ve mikro pürüzlüklerinin sürtünme direncine olan etkileri Şekil 9'da görülmektedir (Tunç, 2007).



Şekil 9. Makro ve mikro pürüzlülüğün sürtünme direncine etkisi (ICAO, 1983).

1.4.1. Sürtünme Seviyesinin Ölçülmesi

1.4.1.1. Ölçüm Araçları ve Özellikleri

Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMİ) tarafından yayınlanan havaalanları pist yüzey şartları yönergesinde belirtildiği üzere, pistlerin yüzey sürtünme seviyesinin belirlenmesinde Mu-Meter, Skiddometer, Grip Tester, Runway Friction Tester (pist sürtünme test cihazı) veya Surface Friction Tester (yüzey sürtünme test cihazı) gibi mekanik-elektronik araç/cihazlar kullanılır. Bu cihazlar farklılık göstermekle birlikte, genel olarak sürtünme ölçüm tekerlekleri olan ve bir çekici ile pist üzerinde çekilirken pistin her 1/3'lik bölümü için frenleme değerlerini, çekici içine konan elektronik aygıta yazılı olarak veren yapıdadırlar. Pist yüzeyinin durumuna göre çekici araç süratleri ve sürtünme ölçüm tekerlek basınç değerleri Tablo 6'da verilmektedir. Verilen bu değerler pistin veya önemli bölümlerinin temsili ortalama değerleridir (DHMİ, 2006).

Tablo 6. Pist yüzeyi sürtünme ölçüm cihazları ve özellikleri (DHMİ, 2006).

<i>Test Cihazı</i>	<i>Yeni Pist Yüzeyi Tasarım Seviyesi</i>	<i>Pist Yüzeyi Bakım Planlama Seviyesi</i>	<i>Pist Yüzeyi Minimum Sürtünme Seviyesi</i>	<i>Hesaplanmış Su Boşaltma Derinliği (mm)</i>	<i>Sürtünme Ölçüm Test Sürati (km/saat)</i>	<i>Sürtünme Ölçüm Tekerlek Basıncı (kPa)</i>
Mu-Meter 1. Metot	0,72	0,52	0,42	1	65	70
	0,66	0,38	0,26	1	95	70
	0,68	0,47	0,42	0,5	65	70
	0,65	0,45	0,39	0,5	130	70
Skiddometer	0,82	0,6	0,5	1	65	210
	0,74	0,47	0,34	1	95	210
Yüzey Sürtünme Test Cihazı	0,82	0,6	0,5	1	65	210
	0,74	0,47	0,34	1	95	210
Pist Sürtünme Test Cihazı	0,82	0,6	0,5	1	65	210
	0,72	0,54	0,41	1	95	210
Grip Tester	0,82	0,53	0,43	1	65	140
	0,72	0,36	0,24	1	95	140

1.4.1.2. Pist Yüzey Sürtünme Seviyesinin Ölçülmesi

Pist yüzeyinde frenleme ölçümü, özellikle pist ıslak veya su birikintili olduğunda ve pist yüzeyi kar veya buzla kaplı olduğunda yapılır. Ölçüm, frenleme ölçüm aracı ile pist eşiğinden ve merkez hattının sağından başlanarak gidiş dönüş yapmak sureti ile tamamlanır. Ölçüm cihazlarının kullanımı sonunda alınan sonuçların değerlendirilmesi Tablo 7’de verilmektedir (DHMI, 2006).

Tablo 7. Sürtünme katsayısına göre pist frenleme durumları (DHMI, 2006).

<i>Ölçülen veya Hesaplanan Sürtünme Katsayısı</i>	<i>Tahmin Edilen Frenleme Durumu</i>	<i>KOD</i>
$\geq 0,40$	İyi	5
0,39-0,36	Orta-İyi	4
0,35-0,30	Orta	3
0,29-0,26	Orta-Zayıf	2
$\leq 0,25$	Zayıf	1

ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu) tarafından havaalanları kaplamalarında uçakların emniyetli operasyonu için;

- 3 m’lik masterla kontrol edildiğinde kaplamanın her yerinde ve her yönünde 3 mm’den daha fazla kot farkı olmaması
- 45 m’lik boyuna mesafede 2,5-3,0 cm’den daha fazla yüzey bozukluğu (öndülasyon) olmaması
- Zamanla oluşan deformasyonlardan ötürü su birikintisinin 3 mm’den daha fazla olmaması şartlarını öngörmektedir.

Sürtünme katsayıları, sıkıştırılmış kar ve buzlu yüzeyler üzerinde elde edilen değerler olacağından kaplamanın tüm şartlarını yansıtan mutlak bir değer olarak kullanılmamalıdır. Eğer yüzey kar ve buzlu iken “İyi” olarak belirtilmişse temiz ve kuru yüzeydeki frenleme etkisi kadar iyi olacağı beklenmelidir. Havaalanı kaplamalarında sürtünme katsayıları, Tablo 6’da belirtilen cihazlar ve şartlarda belirlenmektedir. Ayrıca bu sürtünme katsayıları ortalama değer olmalı ve pistin önemli bir uzunluğunu yansıtmalıdır (Tunç, 2007).

Gerekli özel teçhizatın bulunmadığı durumlarda araç ile frenleme ölçümü yapıldığında, 1500 kg ağırlığında ve tekerlek basıncı 2 kg/cm² olan araç ile 40 km/saat

hızla seyir halindeyken ani yapılan fren sonucunda elde edilen değerler Tablo 8’de verilmektedir. (DHMI, 2006).

Tablo 8. Pistte ani frenleme durumunda elde edilen değerler (DHMI, 2006).

<i>Durma Mesafesi (m)</i>	<i>Zaman (sn)</i>	<i>Rapor Edilecek Değer</i>
15	2,7	5 İyi
16-17	2,9	4 Orta/İyi
18-20	3,2	3 Orta
21-24	3,6	2 Orta/Zayıf
25-40	3,7-5,2	1 Zayıf

Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8’de belirtilen havaalanı kaplama yüzeyi sürtünme ve frenleme değerleri neticesinde uçak seferlerinde erteleme ve iptal kararları alınmaktadır. Uçakların, pistlerin buzlanmasından ötürü iniş-kalkış yapamaması havayolu şirketlerini zarara uğratmakla kalmayıp, havayolunu tercih eden yolcularında mağduriyetine sebep olmaktadır. Bu yüzden havaalanı kaplamalarında buzlanmadan kaynaklanan sürtünme kayıplarının önlenmesi için literatür kısmında bahsedilen kar ve buzla mücadele yöntemleri uygulanmaktadır.

Ülkemizde beton kaplamalı havaalanına sahip, kış mevsiminde düşük hava sıcaklıklarına maruz kalan şehirlerin son 50 yılda gerçekleşen en düşük hava sıcaklıkları istatistikleri Tablo 9’da verilmektedir.

Tablo 9. 1960-2012 yılları arasında ölçülen en düşük hava sıcaklıkları (URL 1).

<i>Şehirler</i>	<i>ARALIK</i>	<i>OCAK</i>	<i>ŞUBAT</i>
	<i>Sıcaklık (°C)</i>		
İSTANBUL	-4,2	-6,8	-6,4
ERZURUM	-37,2	-36	-37
ERZİNCAN	-25	-26,7	-25,2
BİNGÖL	-25,1	-23,2	-21,6
AĞRI	-39,8	-45,6	-42,8
SİİRT	-14,4	-15,6	-14,8
ŞIRNAK	-10,8	-14,5	-13,2
KAYSERİ	-26	-31,4	-31,2
KÜTAHYA	-17,8	-20,1	-22,9
ISPARTA	-15	-19,2	-21

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Kar ve Buzlanma ile Mücadelede Mekanik ve Kimyasal Yöntemler

Mekanik yöntemlerle buzla mücadelede, kaplamadan kar ve buzun kürenerek veya süpürülerek uzaklaştırılması için büyük ekipmanlar ve araçlar kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemde ekipman operatörlerinin istihdam maliyeti önemli ölçüde yüksektir. Buz ve kaplama arasındaki bağın güçlü olması, sıkışmış kar ve buzun süpürme ve küreme yöntemiyle kaplamadan uzaklaştırılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Mekanik yöntemler ayrıca, kazıma işlemi sırasında kaplamaya ve üzerindeki şerit çizgileri ile ışıklandırma ekipmanlarına zarar verebilmektedir (Henderson, 1963).

Kimyasal yöntemler ise buzı eritmek suretiyle kaplama tabakası ile buz arasındaki bağı çözmektedirler. Kaplamadan kar ve buzun uzaklaştırılması, geleneksel olarak mekanik ve kimyasal yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Ucuz ve etkin olmaları sebebiyle en yaygın kullanılan kimyasal solüsyonların başında sodyum klorür, magnezyum klorür ve kalsiyum klorür gibi klorür bazlı tuzlar gelmektedir. Fakat bu solüsyonlar beton pistlerin donatılarına ve çevreye zarar vermektedir. Her ne kadar kimyasal yöntemlerle buzlanmayı çözenin veya engellemenin yeni teknolojik yöntemlere kıyasla maliyeti düşük olsa da kimyasalların depolanması, uygulama araçlarının bakım ve onarımı, çevreye verilen zararın giderilmesi için sarf edilen çabanın maliyeti de bu kıyaslama yapılırken dikkate alınmalıdır.

Beton kaplamalardaki zararları azaltmak için bazı karışık kimyasal solüsyonlar kullanılmıştır. Son yıllarda potasyum asetat, kalsiyum magnezyum asetat (CMA) veya kalsiyum magnezyum potasyum asetat gibi asetat bazlı buz çözücüler hızlı çözündükleri ve klorür içermedikleri için buz çözme işleminde öncelikli olarak kullanılmaktadırlar. Beton ve asfalt kaplamaların dayanımı için bir risk olarak görülen asetatlar aynı zamanda da pahalıdırlar. Kalsiyum magnezyum asetat, beton kaplama donatıları için korozyon riski taşımaz, fakat performansları tuzlardan düşüktür ve çalışma sıcaklık aralığı daha dardır. Ayrıca nakliyesi için büyük kamyonlar gerekmektedir. Son zamanlarda şeker pancarının rafine edilmesi veya damıtılması suretiyle elde edilen etanolün kar ve buzla mücadelede kullanılabildiği tespit edilmiştir. Bu ürünlerin magnezyum klorür gibi klorürlerle karıştırılarak kaplamaya uygulanmasının daha kalıcı ve etkili olduğu saptanmıştır. Buna ek

olarak magnezyum klorür ve organik karışımların kaya tuzu ile karıştırılarak kullanılması, kaplama yüzey birim alanına daha az miktarda uygulanarak etkili olduğu görülmüş ve soğuk hava koşullarında (-34,4°C/-36,6°C) bile uygulanabileceği saptanmıştır (URL 2).

2.2. Kar ve Buzlanma ile Mücadelede Termal Yöntemler

Kış koşullarında kar ve buzlanmanın zararlı etkilerinin etkin bir biçimde azaltılması adına havaalanlarında kaplama ısıtma sistemleri alternatif bir yöntemdir. Ayrıca bu yöntemin; uçak ve pist güvenliğini artırması, kimyasal buz çözücü/önleyicilerin çevresel etkilerini azaltması ve kar ve buzun yerden kalkma süresini belirgin biçimde azaltması gibi avantajları vardır. Bu yöntemin yüksek başlangıç maliyeti ve karmaşık kurulum prosedürü gibi sakıncaları olmasına karşın, kimyasal yöntemlerde kullanılan fazla ekipman ve personel masrafları göz önüne alındığında bu iki yöntem arasında uzun vadede mali bir denge söz konusu olmaktadır (FAA, 2011).

Havaalanı kaplamalarında, karayollarının rampa, köprü, viyadük, tünel giriş ve çıkışlarında, kavşaklarda kar ve buz oluşumunu engellemek amacıyla bir çok termal yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler genel olarak, kaplamanın içine ve dışına kurulan ısıtma sistemleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadırlar.

2.2.1. Kaplama İçine Kurulan Sistemlerle Isıtma

2.2.1.1. Toprak Kaynaklı Isı Boruları

Toprak kaynaklı ısı boruları ile ilgili ilk deneysel çalışmalar 1970 yılında FHWA (Federal Highway Administration) Karayolları Araştırma Merkezi'nde Dynatherm şirketi tarafından yapılmıştır (Bienert vd., 1974).

1975 yılında Batı Virginia Oak Hill'deki bir karayolu rampasına zeminin 18 m derinliğine uzanan 1213 adet ısı borusu döşenerek bir toprak kaynaklı ısıtma sistemi kurulmuştur. Bu sistem kaplama yüzeyinde, rüzgârla oluşan kar yığınları hariç diğer tüm kar ve buz birikimlerinin önlenmesinde başarılı olmuştur (Long ve Baldwin, 1980).

2.2.1.2. Sıcak Akışkanlı Isı Boruları

Sıcak akışkanlı ısı borulu sistemler; pompalara, kontrol sistemlerine, hariçten bir güce veya insan etkisine gerek duymaksızın çalışmaktadırlar. Bu ısı borulu sistem, pasif jeotermal bir köprü ısıtma sistemi olarak da bilinir. Isı borusu kurulum aşamasında amonyak sıvısı ya da freon gazlarıyla doldurulup toprağın içine yerleştirilir. Akışkan, toprağın ısıyla ısı borusunun dibinde (evaporatör kısmında) ısınmaya başlar. Isınan akışkan, ısıtılacak alana serili olan boruların olduğu kondenser bölümüne doğru hareket eder. Yoğunlaşarak ısınıp bırakır. Bu sayede kaplama yüzeyinde kar ve buz oluşumunu engellemiş olur. Yoğunlaşmış akışkan, yerçekiminin etkisiyle çevrimini tamamlayarak evaporatöre geri döner ve işlem sonlanır (Lund, 2000).

Buharlaşma-yoğuşma döngüsü, kaplamanın topraktan daha soğuk olduğu zamanlarda kendiliğinden gerçekleşir. Sistem, buzu tam çözemesi bile topraktan sürekli ısı alır. Sistemin topraktan sürekli ısı çekişi işletim bakımından herhangi bir problem oluşturmaz. Çünkü maliyet sorunu yoktur. Ancak ısı borusunun içinin dikkatli bir şekilde temizlenmesi ve döşemeye dizilen borulara buharın akması için eğim verilmesi gerekir. Boru büyüklüğü veya derinliği arttırıldığında aşırı ısı kaybına önlem alınmalıdır (Nydahl vd., 1984).

Jeotermal su ve buhar ile kaplamada kar/buz eritme sistemleri İzlanda, Japonya ve Amerika gibi çeşitli ülkelerde kullanılmaktadır. Bu sistem yürüyüş yolları, karayolları, rampalar, pistler, park alanları ve köprülere kurulmuştur. Bu sistemde kaplamanın içindeki veya altındaki boruların içinden genellikle sıcak su veya su buharı dolaştırılmaktadır. Jeotermal kaynakların bulunduğu ülkelerde, özellikle de jeotermal kaynaklara yakın olan karayollarında ve havaalanlarında bu sistemler kullanılarak kar ve buzla mücadele maliyetleri azaltılmaktadır (Aoki vd., 1998).

Yeraltına yerleştirilmiş jeotermal sistemlerin kurulum maliyetinin, pompalama sistemleri ve kuyu masraflarına ek olarak yaklaşık 200 \$/m² olduğu belirtilmektedir. Karayollarında ısı borulu ve ısıtma sistemli köprü üstlerinin tasarım maliyeti yaklaşık 1000-1500 \$/m²'dir. Bu tahminler gösteriyor ki; jeotermal kar eritme sistemlerinin kurulum ve işletim maliyetleri çok pahalıdır (Lund, 2000).

Kaplama boyunca yeraltından galvanizli çelik borulardan su veya antifriz solüsyonlar gibi jeotermal ısınmış akışkanlar geçirilerek yüzey sıcaklığının arttırılması ve karın eritilmesi amaçlanmıştır. Yapılan bir çalışma, jeotermal bir tasarımın, çevreye ve insan sağlığına zararlı bir etkisi olmadan karı eritebildiğini göstermiştir. Bu ısıtma sistemi

jeotermal kuyuların kazılmasının yanısıra, mevcut kaplamanın kaldırılmasını ve yeniden yapılmasını gerektirmektedir. Bu kurulum işlemi oldukça maliyetli olup özellikle kaplamanın mevcut olduğu durumlarda elverişsizdir (Ichiyama ve Magome, 2007).

Sulu sistemlerde, akışkan farklı metotlarla ısıtılarak bir sirkülasyon pompası yardımıyla asfaltın altına döşenmiş borular içinden dolaştırılır. Isı, akışkandan yüzeye transfer edilir. İletimsel olarak yüzey ısıtılır. Akışkan olarak su+antifriz karışımı (su ve etilen veya propilen glikol) kullanılır (Ashrae, 1999; Lund, 2000). Sulu sistemler için bir gazlı boyler, elektrikli ısıtıcı, jeotermal su veya endüstri işlemleri sonucunda oluşan atık ısı, alternatif ısıtıcı olarak sayılabilir. Sulu ısıtma sistemi, mevcut ısıtma sistemleri arasında işletme maliyeti olarak en uygun olanıdır (Boyd, 2003).

Sulu sistemler ile pasif ısı borulu sistem karşılaştırıldığında; sulu sistemlerde ısıtılan akışkan, ısıtılması düşünülen alana bir sirkülasyon pompası ile taşındığından ısı borularında olduğu gibi ne borulara bir eğim verilmesi gerekir ne de boruların temizlenmesi önemlidir. Isı döşemeye düzgün bir şekilde taşınır. Bu sistemler diğer sistemlere göre daha yüksek enerji verimine sahiptirler.

2.2.1.3. Güneş Kaynaklı Isı Boruları

Japonya’da Güneş enerjisi kullanılarak kaplama yüzeyindeki kar ve buz eritmek için bir sistem geliştirilmiştir. Yaz mevsiminde sıcaklıkların yükselmesiyle kaplama yüzeyinden alınan ısı yine aynı kaplama içerisine yerleştirilen yatay ve dikey borularda depolanmıştır. Kış mevsiminde, bu depolanan sıcak sular kaplama içindeki borulara aktararak kar ve buz eritme işleminde kullanılmıştır. Bu sistemde sadece depolanan suyun pompalanması için elektrik enerjisine gereksinim duyulmuştur (Zhao vd., 2010).

2.2.1.4. Elektrikli Isıtma Kabloları

Elektrikli ısıtma kabloları 1961 yılında New Jersey-Newark’da kar ve buz uzaklaştırmak için bir köprüde kullanılmıştır (Henderson, 1963). Güç yoğunluğu köprüler için 378 W/m^2 , yol kaplamaları için ise 430 W/m^2 olarak tespit edilmiştir. Verilen elektrik akımı kaplama yüzeyinde saatte 25 mm kar kalınlığını eritebilecek şekilde ayarlanmıştır. Fakat zamanla asfalt ve beton kaplamanın, trafik yükü nedeniyle aşınmasıyla, elektrik

kablolarının yüzeyde görünmeye başlanmasından dolayı bu sistem iptal edilmiştir. Aynı sistem 1964 yılında New Jersey-Teterboro'da iki rampa ve bir köprü için uygulanmıştır. Bu sistem kar ve buz eritmede başarılı olmuş, 375 W/m^2 bir güç yoğunluğu ile çalışmış ve yıllık işletme maliyeti $5 \text{ \$/m}^2$ olarak belirlenmiştir (Zenewitz, 1977). Daha sonra bu sistemin benzerleri Nebraska, Ohio, Oregon, Pensilvanya, Güney Dakota, Teksas ve Batı Virginia'da uygulanmıştır.

Enerji kaynağı olarak elektriğin kullanıldığı elektrikli kar eritme sistemleri, mineral izole edilmiş kablolar ve dirençli elektrik tellerinin kullanılmasıyla oluşturulan buz eritme sistemleridir (ASHRAE, 1999; Lund, 2000). Beton plakalara veya asfaltın altına yerleştirilen teller veya kablolar, betonun çatlamasına veya gerilimden dolayı ısınarak birbirlerinden ayrılmasına neden olabilmektedir. Isınan kablo veya tel kırılabilir. Bunu önlemek için tasarım sırasında genişleme/büzülme mafsallı, sağlamlaştırma ve boşaltma (drenaj) dikkate alınmalıdır (Brinkman, 1975). Bu tür buz ve kar eritici sistemlerin etkili olarak çalışabilmesi için termostat ve sensör, sistemin bir parçası olarak kullanılmalıdır. Termostat ve sensörlerin ısı ve nemi kontrol ederek kar yağışı ile birlikte sistemi çalıştırılması, güç tüketimini mümkün olan en aşağı seviyede tutmaktadır (URL 3).

Yapılan bir çalışmada, Japon Meteoroloji İstasyonu tarafından toplanan hava durumu olasılık verilerini gösteren bir monitör sistem ile donatılmış elektrikli bir kaplama kar eritme sistemi tasarlanmıştır. Bu monitör sistem, kar yağışı olasılığı, yol yüzeyi sıcaklığı, atmosfer sıcaklığı ve kontrol sıcaklığını analiz edip, yüzeyin ön ısıtma sıcaklığını ve enerji çıktılarını ayarlayarak kaplama içine yerleştirilmiş ısıtma kablolarına göndermektedir (Sugawara, 1998).

Başka bir çalışmada, elektrikli bir kondüktör boyunca geçen dalgalı bir akımın doğurduğu elektromanyetik bir alan ile elektromanyetik bir buz çözme sistemi tanımlanmıştır. Elektromanyetik alandan açığa çıkan bu enerji, ferroelektrik, yarı iletken veya ferromanyetik tabaka tarafından absorbe edilerek ısı yüzeye aktarılmaktadır (Petrenko ve Sullavan, 2003).

Farklı bir çalışmada ise, düşen kar ağırlığını ve sıcaklığını ölçen üç katmanlı bir kar ve buz eritme örtüsü geliştirilmiştir. Örtünün alt ve üst tabakasında esnek ve su geçirmez bir muşamba malzeme bulunmaktadır. Bu iki muşamba malzemesinin arasında iletken metal bir tabaka bulunur. Sistemin içerisine ayrıca sıcaklık ve ağırlık sensörleri yerleştirilmiştir. Bu sistemin bir diğer yenilikçi tarafı da muşambanın altına eğimli bir destek yapılarak kar ve eriyen buzun örtü üzerinden uzaklaştırılmasıdır. Sensörler,

sıcaklığın donma noktasının altına düştüğünü veya yeterli miktarda karın biriktiğini algıladığında akım iletken tabakaya gönderilir. Bu ısıtma sisteminin sakıncası, kalıcı olmamasıdır (Walker, 2000).

2.2.1.5. Karbon Fiber Isıtma Kabloları

Kaplama yüzeyinden kar ve buz eritmek için ısıtma elemanı olarak karbon fiber kablolar 2010 yılında Zhao tarafından kullanılmıştır. Öncelikle ANSYS sonlu elemanlar programıyla kaplama içerisine yerleştirilecek karbon fiber kabloların ara mesafelerinin belirlenmesi için bir çalışma yapılmış ve kaplama yüzeyinde ısı dağılımının üniform olabilmesi için kablolar arası en uygun mesafenin 100 mm olduğu belirlenmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmalarda 47,1 MPa basınç dayanımına sahip 200×400×50 mm boyutlarında bir numune hazırlanmıştır. Bu numune içerisine, yüzeyin 25 mm altına karbon fiber kablolar yerleştirilmiş, etrafı 10 mm kalınlığındaki ısı yalıtım malzemesi ile kaplanmış, iç sıcaklığı -25 °C’de tutulan 1100×470×470 mm boyutlarındaki buzdolabına konmuştur. Karbon fiber ısıtma kablolarına 1134 W/m²’lik bir güç verilmiş beş saat sonra kaplama yüzeyinin 6-8,6 °C’ye yükseldiği görülmüştür (Zhao vd., 2010).

Hava sıcaklığının -8 ile -16 °C arasında, nem oranının %20-60 arasında olduğu açık havada yapılan bir deneyde basınç dayanımı 47,1 MPa, boyutları ise 1000×2000×250 mm olan beton numune kullanılmıştır. Kaplama yüzeyinin 40 mm altına karbon fiber kablolar döşenmiş olup, numune en kesitine 50 mm’lik aralıklarla yerleştirilen sıcaklık ölçerler sayesinde 6 saatlik bir ısıtma sonunda Tablo 10’daki veriler alınmıştır (Zhao vd., 2010).

Tablo 10. Hava sıcaklığı, güç ve kaplama sıcaklığı değerleri (Zhao vd ., 2010).

<i>Hava Sıcaklığı (°C)</i>	<i>Beaufort Rüzgar Ölçeği</i>	<i>Verilen Güç (W/m²)</i>	<i>Isıtmadan Önce Kaplama Yüzey Sıcaklığı (°C)</i>	<i>Isıtmadan Sonra Kaplama Yüzey Sıcaklığı (°C)</i>
-5	2	1000	-3,5	18
-7	2	800	-6	12
-4	2	500	-3	6
-2	1	300	-0,5	8
-3	1	150	-1,6	5

2.2.1.6. Elektrik İletkenli Beton ve Asfalt Kaplamalar

Geleneksel beton ve asfaltın elektrik iletkenliği kar ve buzu kendiliğinden eritebilecek kadar iyi değildir. Elektrik iletkenlik katsayısı yüksek karışımların beton ve asfalta eklenerek kaplamaların elektrik iletkenliği yükseltip kalıcı hale getirilebilmektedir. Kanada Ulusal Araştırma Konseyi'nde elektrik iletkenli beton, patent almaya layık görülmüştür (Xie ve Beaudion, 1995).

İletken betonlar iki kısma ayrılabilir. Bunlar; yüksek mekanik dayanım ve düşük iletkenliğe (100 Ω -cm) sahip fiber katkılı iletken beton ile düşük basınç dayanımı ve yüksek iletkenliğe (10-30 Ω -cm) sahip agregaya içerikli iletken betondur. İletken betonun çimento bazlı kompozitleri laboratuvar ve arazide kar/buz eritmek için yüksek iletkenlik ve yüksek dayanım özelliklerini kaybetmeden uygulanabilmektedir (Xie ve Beaudion, 1995).

Fiber çelik ve traşlanmış çelik parçacıkları kullanılarak köprüler için özel bir iletken beton geliştirilmiştir. Fiber çelik ve traşlanmış çelik katkılı elliden fazla karışım hazırlanmıştır. Toplam hacmin %15-20'sini ihtiva edecek şekilde iletken malzeme (çelik fiber ve traşlanmış çelik) kullanılarak hazırlanan iletken beton tarafından sabit ve üniform bir ısı üretimi yapılmıştır (Yehia ve Tuan, 1998). Deneylerde kullanılan küçük boyutlardaki (240×310×50 mm) beton plakalar göstermiştir ki iletken beton tarafından yaklaşık 520 W/m²'lik bir güç yoğunluğu elde edilebilmektedir. Bu betonlar, kaplama sıcaklığının 30 dk içinde -1,1 °C'den 15,6 °C'ye yükselebilmesini sağlamıştır (Yehia ve Tuan, 1998; Yehia ve Tuan, 1999). Her bir kar eritme işlemi için ortalama birim enerji maliyeti; elektrik tüketim maliyetinin 0,08 \$/kWh olduğu varsayılarak 0,8 \$/m² olarak bulunmuştur (Tuan ve Yehia, 2004).

Yapılan bir çalışmada (Minsk, 1971), elektrikli iletken asfalt betonu yapmak için grafit parçaları da işin içine dâhil edilmiştir. Bu sistemin bir avantajı, iletken kaplama malzemesinin, yeniden kaplama inşasına gereksinim duymadan mevcut kaplama malzemesi üzerine ince bir tabaka halinde kolaylıkla uygulanabilmesidir.

2001 yılında iletken betonlarda karbon ürünleri, traşlanmış çeliklerin yerini almaya başlamıştır. Laboratuvar verilerine dayanılarak karbon katkılı iletken betonlar ilk defa buz çözmek amacıyla Roca Spur Köprüsü'nde kullanılmıştır (Tuan ve Yehia, 2004). 36 m uzunluğunda ve 8,5 m genişliğindeki köprüye kış boyuca yaşanacak kar ve buz oluşumlarını izleyebilecek ve kontrol edebilecek şekilde sıcaklık ve akım ölçerlerin de yerleştirildiği bir iletken kaplama döşenmiştir. Kaplama 52 tane 1200×4100 mm'lik

plaklara bölünmüştür. 203~431 W/m² arasında değişen bir güç yoğunluğu ile her bir kar yağış esnasında bu sistem kullanılmıştır (Tuan, 2008).

2.2.2. Kaplama Dışına Kurulan Sistemlerle Isıtma

2.2.2.1. Mikrodalga ile Kar ve Buz Eritme Sistemleri

Yapılan bir çalışmada (Hopstock, 2003), yolda uygulanma potansiyeli olan iki konu için, mikrodalga ve manyetik yük taşıma kapasitesi olan agregaların kullanım fikri ortaya konmuştur. Bu malzemenin kullanıldığı konulardan ilki; dört mevsim boyunca sıcak karışımli yol çukuru yama malzemesi olarak kullanılması ve diğer konu ise havaalanı pistleri, yaya kaldırımları, köprüler ve karayolları gibi asfalt betonu ile kaplanmış yüzeylerin kimyasal kullanmadan kar ve buzdan arındırılması için kullanılmasıdır. Geleneksel mikrodalga fırınların kullanımı sayesinde ortaya çıkan sonuçlar göstermiştir ki; manyetik yük taşıma kapasitesi olan agregalar aslında mükemmel bir mikrodalga yutucudur. Bu agregalar kullanılarak yapılmış bir yol üzerinden mikrodalga jeneratör yüklü bir kamyon geçirilmesiyle, mikrodalgalar buz içerisinden geçerek yol/buz ara yüzeyinde ısı olarak tutulur. Böylece buz kolaylıkla çözülebilir ve erir (Hopstock, 2003; Hopstock ve Zanko, 2005). Buna rağmen bu bilgiler geniş çaplı bir araştırmayla doğrulanmamıştır (Hopstock ve Zanko, 2005).

2.2.2.2. Kızılötesi Isı Yayan Kar ve Buz Eritme Sistemleri

Kızılötesi ısı lambaları Colorado'nun Denver Bölgesi'ndeki Mississippi Köprüsü'nde buzlanmayı önleme amacıyla, dışarıdan ısıtma elemanı olarak kullanılmıştır. Kızılötesi lambalar 75 W/m²'lik bir güç ile köprü'nün altını ısıtmak için kullanılmıştır. Bu ısı lambaları, yetersiz güç ve geç ısınma süresine bağlı olarak yol yüzeyindeki buz oluşumunu önlemekte yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır (Zenewitz, 1977). Sistemin; malzemeye temas etmeden hızlı ve kaliteli ısıtması, rüzgâr ve hava akıntısından etkilenmemesi ve mekân değişikliğinde kolay taşınabilmesi gibi ekonomik avantajları vardır.

2.3. Isıtma Sistemlerinin Maliyet Analizi

Kar ve buzla mücadelede kullanılan gelişmiş ısıtma sistemlerinin, kurulum ve işletme maliyetleri ve sistemlerin güç tüketimleri günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Tablo 11’de gösterilmektedir.

Tablo 11. Kar ve buzla mücadele kullanılan yöntemlerin mali açıdan karşılaştırılması

<i>Isıtma Türü</i>	<i>Yaklaşık İlk Kurulum Maliyeti (\$/m²)</i>	<i>Yıllık İşletme Maliyeti (\$/m²)</i>	<i>Güç Tüketimi (W/m²)</i>
Kızılötesi ısı lambası ile ısıtma <i>Zenewitz, J. A. (1977)</i>	96	Mevcut değil	75
Elektrikli ısıtma <i>Zenewitz, J. A. (1977)</i> <i>Henderson, D. J. (1963)</i>	54	4,8	325-430
Sıcak sulu ısıtma <i>Cress M. D. (1995)</i> <i>Ficenec, J. A. vd. (1993)</i>	161	2,5	473
Gazlı ısıtma <i>Heated Pipes (1998)</i>	378	2,1	Mevcut değil
İletken betonla ısıtma <i>Yehia, S. and Tuan, C. Y. (1998)</i>	48	5,4	516
Karbon fiber kablolarla ısıtma <i>Zhao, H. vd. (2010)</i>	Mevcut değil	0,38-2,8	500-800
Karbon fiber bantlarla ısıtma <i>Yang, Z. vd.(2012)</i>	145	0,09	127

Not:

- Veriler literatür taramasından elde edilmiştir.
- Elektrik maliyetinin 0,08 \$/kWh olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıdaki tablodaki mevcut veriler ışığında; ilk kurulum maliyeti bakımından iletken betonla ısıtma sistemi en düşük ilk kurulum maliyetine sahip olmasına karşın, yıllık işletme maliyetinin en yüksek olduğu görülmektedir. İlk kurulum maliyeti en fazla olan sistem gazlı ısıtma sistemi ve yıllık işletme maliyeti en az olan sistem ise karbon fiber bantlarla ısıtma sistemidir.

2.4. Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Havaalanlarındaki beton kaplamaların ısıtılması durumunda kaplamanın üst ve alt yüzeyinde farklı sıcaklıklar oluşacaktır. Bu sıcaklık farkları betonda gerilmelere neden olmaktadır. Ayrıca uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından çıkan egzoz gazları, havaalanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olurken, kış mevsiminde havaların soğuması ve pist sıcaklıklarının düşmesi ile kaplamada oluşan sıcaklık farkı yine betonda gerilmelere sebep olacaktır. Oluşan bu sıcaklık gerilmelerine maruz kalan betonun fiziksel özellikler zamanla değişebilmektedir. Beton içerisindeki agrega türü, betonun özgül ısısı, ısı iletim katsayısı, ısı genleşme katsayısı, elastisite modülü, birim hacim ağırlığı ve basınç dayanımı sıcaklıklar arttıkça veya azaldıkça değişmektedir.

2.4.1. Agregaya Etkisi

Agregalar betonda %60-80 arasında bir hacmi doldurmaktadırlar. Beton içerisindeki agregaların özelliklerindeki farklılıklar, ısıtılma sırasında betonun ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler. Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C'ye kadar sıcaklıktan ötürü değişim göstermezler (Alonso vd., 2003). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona olan etkisi mineral yapılarına ve boşluk oranına bağlıdır (Bazant ve Kaplan, 1996).

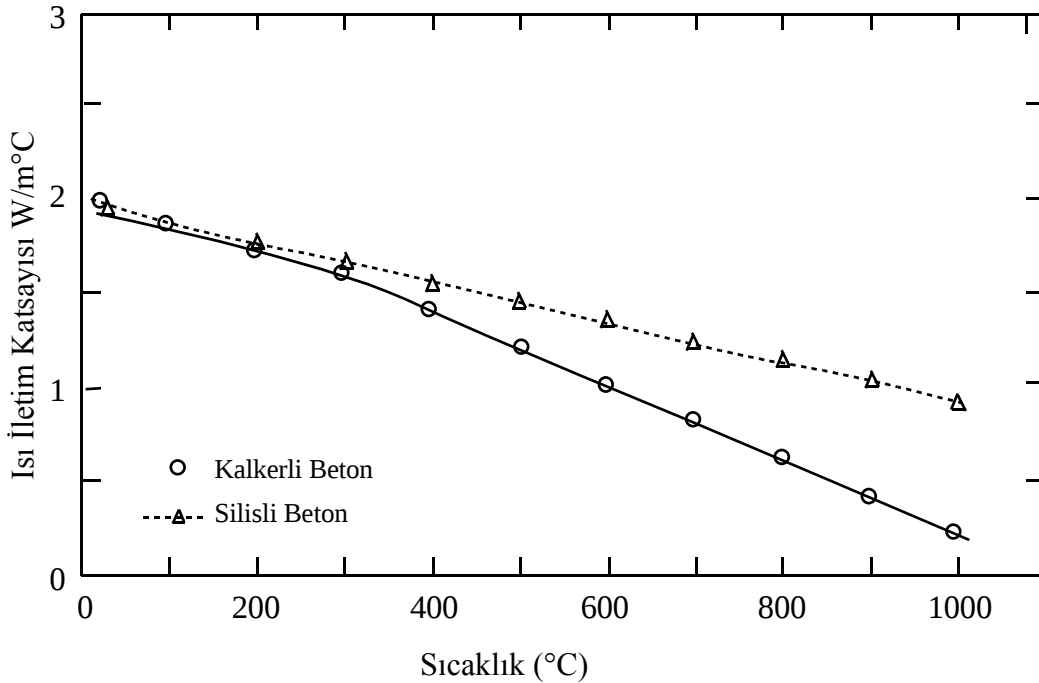
2.4.2. Özgül Isıya Etkisi

Bir cismin birim kütesinin sıcaklığını 1 °C arttırmak için gerekli olan enerjiye özgül ısı denir. Ortam sıcaklığındaki normal betonun özgül ısısı 0,50 ile 1,13 kJ/kgK (0,12-0,27 cal/g°C) arasında değişmektedir. Normal sıcaklıklarda, kullanılan agrega türü, karışım oranı ve yaşı, betonun özgül ısını önemli ölçüde etkilemez. Özgül ısıyı etkileyen en önemli parametre betonun nem içeriğidir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun özgül ısının değişimi, sıcaklığın büyüklüğüne ve kullanılan agrega türüne göre farklılıklar gösterir (Bazant ve Kaplan, 1996).

2.4.3. Isı İletim Katsayısına Etkisi

Betonun ısı iletkenlik katsayısı kullanılan agregâ türüne ve nem içeriğine bağılıdır. Normal sıcaklıklarda betonun ısı iletkenlik katsayısı, kullanılan agregâ türüne göre 1,0 W/mK ile 3,6 W/mK arasında değişmektedir. Betonda kullanılan agregâ hacmi arttıkça ısı iletimi artmaktadır. Betonda kullanılan agregâ türü ve miktarının yanısıra nem oranı da ısı iletimine etki eden önemli faktörlerdendir. Nem miktarı arttıkça ısı iletimi de artar. Havanın ısı iletim katsayısı 0,0034 W/mK iken bu değer su için 0,515 W/mK'dir. Bu yüzden betonun kuruması ısı iletimini azaltmaktadır. Çimento hamurunda meydana gelen büzülme, mikro çatlaklar ve artan boşluk oranı ısı iletimini düşürür (Bazant ve Kaplan, 1996).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan yüksek dayanımlı beton üzerinde yapılan deneysel çalışmada, ısı iletiminin artan sıcaklıkla beraber azaldığı (Şekil 10), 200-1000 °C'ler arasında silis esaslı agregâ ile üretilen betonun ısı iletkenlik katsayısının kalker esaslı agregâlı betona göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Kodur ve Sultan, 2003).



Şekil 10. Betonlarda ısı iletimi-sıcaklık ilişkisi (Kodur ve Sultan, 2003)

2.4.4. Genleşme Katsayısına Etkisi

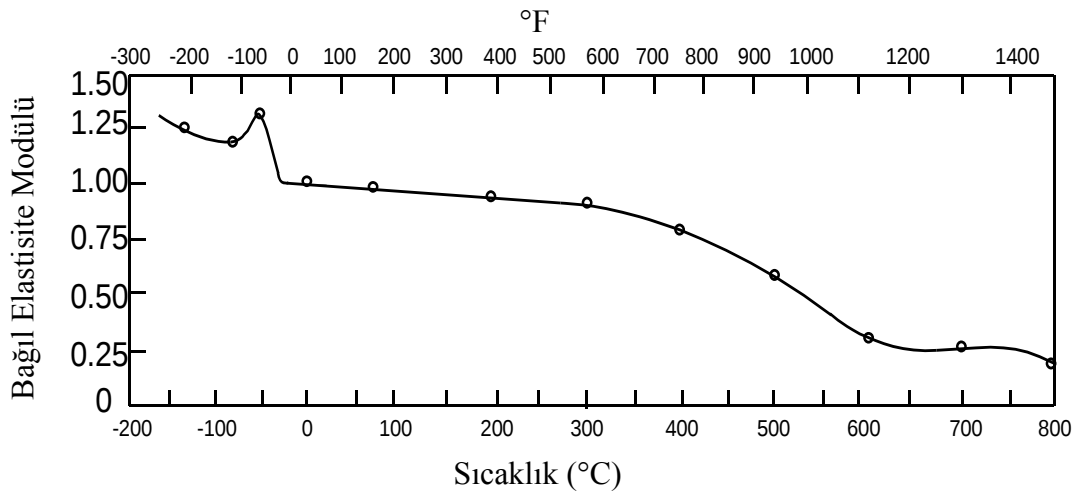
Betonun ısıtılması durumunda şekil değiştirmesini etkileyen bir diğer özelliği de ısı genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı, üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır.

Agregaların ısı genleşme katsayısı içerdiği silis oranına bağlıdır. Yüksek oranda silika içeren kuvars gibi doğal taşların ısı genleşme katsayısı kalker göre daha yüksektir. Yüksek sıcaklık etkisi altındaki çimento hamurunda 150-300 °C sıcaklığın üzerinde büzülme gözlenirse de betonun ısı genleşmesi artar. Bunun sebebi agregada gözlenen genleşmenin çimento hamuru büzülmesine oranla daha baskın olmasıdır (Bazant ve Kaplan, 1996).

2.4.5. Birim Hacim Ağırlığına Etkisi

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar. Anderberg sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agregalar ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda 100 °C'ye kadar ağırlık kaybının önemli olmadığını ancak sıcaklık 800 °C gibi bir değere ulaştığında %3-4 oranında azalma olduğunu belirtmiştir (Anderberg, 2003).

2.4.6. Elastisite Modülüne Etkisi



Şekil 11. Betonun bağıl elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

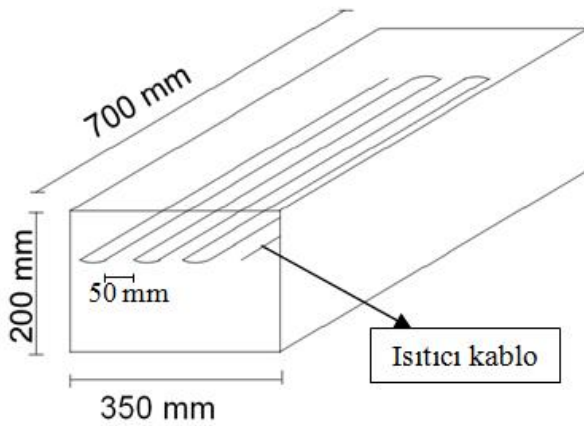
Sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi Şekil 11’de gösterilmektedir. Şekil 11’e göre betonun elastisite modülü, -50 ile -25 °C arasında sıcaklık arttıkça azalma göstermekte, -25 ile 100 °C arasında sabit kalmakta ve 100 °C’den daha büyük sıcaklıklarda tekrar azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Betonun davranışı büyük oranda elastisite modülü ile alakalıdır. Elastisite modülü sıcaklıkla değişim göstermekte ve genellikle de sıcaklık arttıkça azalmaktadır.

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Deneysel Çalışmalar

3.1.1. Isıtıcı Kabloların Yerleştirilmesi

Bu çalışmada 350x700x200 mm ebatlarındaki beton numuneleri ısıtmak için Deviflex DTCE-30 markalı, çift iletken tipli, 220 V gerilimle 30 W/m güce ulaşan, 7 mm çapında, 5 m uzunluğunda ısıtıcı kablo kullanılmıştır. Kablo aralık ve derinlikleri FAA AC-150/5370/17 (Isıtılacak Kaplamaların Havaalanlarında Kullanım) yönergesinde belirtilen aralıklarda seçilmeye çalışılmış ancak sadece derinlik için verilen kritere uyulmuştur. FAA tarafından belirtilen kablo derinliği 5-7,5 cm (2-3 in), kablo aralığı 7,5-22,5 cm (3-9 in)'dir. Kablolar farklı 3 beton sınıfındaki (C25, C30 ve C35) numunelerin içerisine yüzeyden 7 cm (2,75 in) aşağıda, 5 cm aralıklarla kıvrılmak suretiyle yerleştirilmiştir (Şekil 12). Kablo derinliğinin 7 cm seçilmesinin nedeni maksimum FAA derinliğine yakın bir değer olmasıdır. Kablo aralığının 5 cm olarak seçilmesinin nedeni ise beton numunelerin içerisinde oluşacak güç yoğunluğunun literatürdeki değerlere yakın bir değer olarak ortaya çıkmasındandır.



Şekil 12. Isıtıcı kablonun beton dökülmeden önceki durumu

Deneye başlamadan önce kablolardaki akım ve voltaj miktarları oda sıcaklığında (24 °C) ölçülmüş, elde edilen veriler 0,60 Amper ve 220 Volt olarak bulunmuştur. Bu durumda kablonun 5 metresinden 132 Watt güç geçtiği hesaplanmıştır. Ayrıca kablo yüzeyine temas ettirilen ısı çiftten 65 °C sıcaklık ölçülmüştür.

3.1.2. Beton Numunelerin Hazırlanması

Ülkemizde kullanılan havaalanlarındaki beton kaplamaların beton sınıfları araştırılmış ve bu betonların FAA yönetmeliklerine uyularak hazırlandığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden çalışmamızdaki beton numuneler, ülkemizdeki havaalanı beton kaplama standartlarını tutturabilmek amacıyla üç farklı beton sınıfı (C25, C30 ve C35) olarak hazırlanmıştır. Beton numuneler Trabzon Aşkale Çimento Fabrikası Beton Tesisleri'nde özel olarak hazırlanmış ve bu üç sınıftaki betonun standart dayanımlarının üzerinde dayanımlar elde edilmiştir. Beton numunelerin malzeme özellikleri Tablo 12'de verilmektedir. Kullanılan agrega türü kalkerdir.

Tablo 12. Numunelerde kullanılan betonun karışım oranları

		C25/30	C30/37	C35/45
Çimento Miktarı (CEM I) (kg)		340	380	430
Su Miktarı (kg)		205	205	198
Agrega Miktarı (kg)	0-7 mm	984	852	805
	7-15 mm	376	405	410
	15-22,4 mm	464	528	528
Süper Akışkanlaştırıcı Katkı Miktarı (kg)		4,08	5,7	6,88
Su/Çimento Oranı		0,6	0,54	0,46
1 m ³ Betondaki Agregat Miktarı (kg)		1824	1785	1743
Taze Beton Sıcaklıkları (°C)		24	26	27,5

Beton numuneler hazırlanırken, kullanılan betondan, daha sonra basınç dayanımlarını belirlemek üzere 6 farklı numune alınmıştır. Bu numuneler en fazla 28 gün olmak üzere kür havuzunda bekletilmiş ve betonun 3, 7, 28 günlük dayanımları basınç dayanımı kırılarak ölçülmüştür (Şekil 13). Elde edilen veriler Tablo 13, 14 ve 15'te gösterilmektedir. Ayrıca Ansys sonlu elemanlar programında da 28 günlük basınç dayanım değerleri kullanılmıştır.



Şekil 13. Küp numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesi

Tablo 13. C25 betonu basınç dayanım raporu

C25/30 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8046	2,38	28	928,6	41,27
2	Küp	150	150	225	150	3375	8151	2,42	28	920	40,88
C25/30 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	7998	2,37	7	824,7	36,65
2	Küp	150	150	225	150	3375	8055	2,39	7	810,2	36
C25/30 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8080	2,39	3	662,9	29,46
2	Küp	150	150	225	150	3375	7904	2,34	3	667,9	29,68

Tablo 14. C30 betonu basınç dayanım raporu

C30/37 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8030	2,38	28	1002,8	44,57
2	Küp	150	150	225	150	3375	8050	2,38	28	1039,7	46,21
C30/37 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8022	2,38	7	920,2	40,89
2	Küp	150	150	225	150	3375	7996	2,37	7	944,9	41,99
C30/37 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	7985	2,37	3	696,6	30,96
2	Küp	150	150	225	150	3375	7971	2,36	3	688,5	30,6

Tablo 15. C35 betonu basınç dayanım raporu

C35/45 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8181	2,42	28	1266,4	56,28
2	Küp	150	150	225	150	3375	8248	2,44	28	1307,4	58,1
C35/45 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8215	2,43	7	1275,1	56,67
2	Küp	150	150	225	150	3375	8168	2,42	7	1319,2	58,63
C35/45 Betonu Basınç Dayanımı Raporu											
No	Tip	En (mm)	Boy (mm)	Alan (cm) ²	Yükseklik (mm)	Hacim (cm) ³	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Yaş	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (Mpa)
1	Küp	150	150	225	150	3375	8222	2,44	3	928,6	41,27
2	Küp	150	150	225	150	3375	8133	2,41	3	888	39,46

Beton numuneler önceden hazırlanan kalıplara önce 13 cm yüksekliğinde dökülmüştür (Şekil 14). Daha sonra yine önceden hazırlanan ısıtıcı kablo yerleştirilmiş ve üzerine 7 cm daha beton dökülerek 20 cm'lik yükseklik oluşturulmuştur (Şekil 15). Beton dökümü tamamlandıktan sonra 3 mm çapında demir çubuklar kullanılarak betonda 5, 10, 15 cm derinliğinde delikler açılmıştır (Şekil 16). Bunun sebebi beton ısıtılırken, beton içindeki sıcaklık değişimlerini inceleyebilmektir. Bu demir çubuklar 24 saat sonra betondan rahatça çıkarılmış ve betonda istenilen derinliklerin olduğu görülmüştür.



Şekil 14. Kabloların 13 cm beton döküldükten sonraki durumu



Şekil 15. 20 cm beton döküldükten sonra numunenin durumu



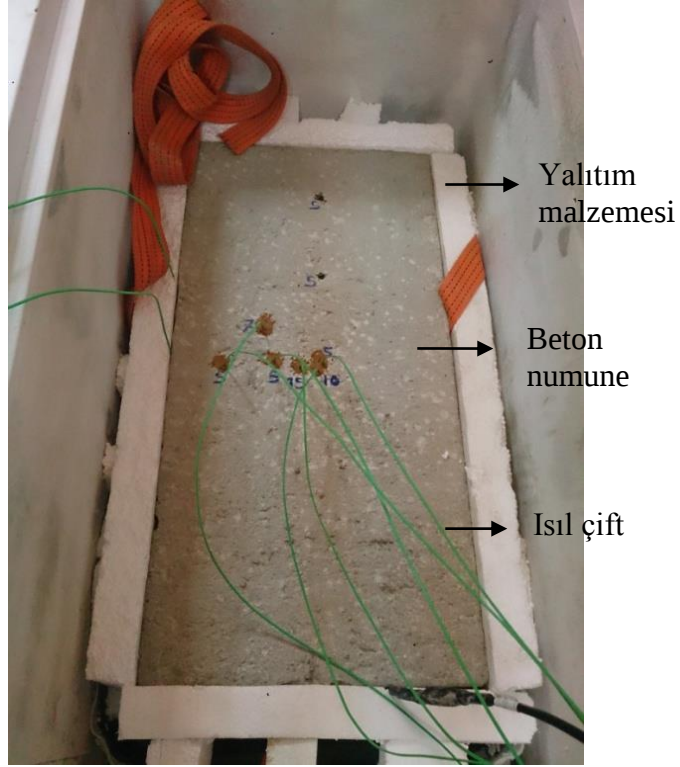
Şekil 16. Numuneye demir çubukların yerleştirilmesi

3.1.3. Beton Numunelerin Derin Dondurucuya Yerleştirilmesi

Çalışmamızda, kış mevsiminde havaalanlarındaki beton kaplamaların yüzeyinde buzlanma olmaması istendiği için deneylerimiz soğuk bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Bunun için -15 ile -25 °C arasında çalışabilen bir derin dondurucu temin edilmiştir (Şekil). Numunelerimiz, beton kaplamaların gerçek durumunu yansıtabilmesi amacıyla derin dondurucu içerisine yerleştirilen 20 cm yüksekliğindeki zeminin üzerine konulmuştur (Şekil 17). Bu sayede beton kaplama, altında zemin olduğu durumda deneylere tabi tutulmuştur. Numune dolabın içerisine yerleştirildikten sonra ısıtma sırasında oluşacak ısıнын numune kenarlarından çıkarak kaybolmaması ve yüzeye doğru hareket etmesi için 5 cm kalınlığında 16 kg/m³ birim hacim ağırlığına sahip polistiren malzemeden yalıtım yapılmıştır (Şekil 18). Yapılan bu yalıtım derin dondurucunun ölçülerinin müsaade ettiği kadardır. Daha sonra yapılan ölçümlerle yalıtımın işlevini yerine getirip getirmediği araştırılmış ve beton yan yüzeylerinde 12 °C sıcaklık varken yalıtımın dış yüzeyinde -12 °C sıcaklık olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede yalıtım kalınlığının yeterli olduğu kanaatine varılmıştır. Derin dondurucu içindeki zemin ve numunenin yerleşimi Şekil 19’da boy kesit olarak gösterilmektedir. Buradaki ölçüler ‘‘mm’’ cinsindendir.

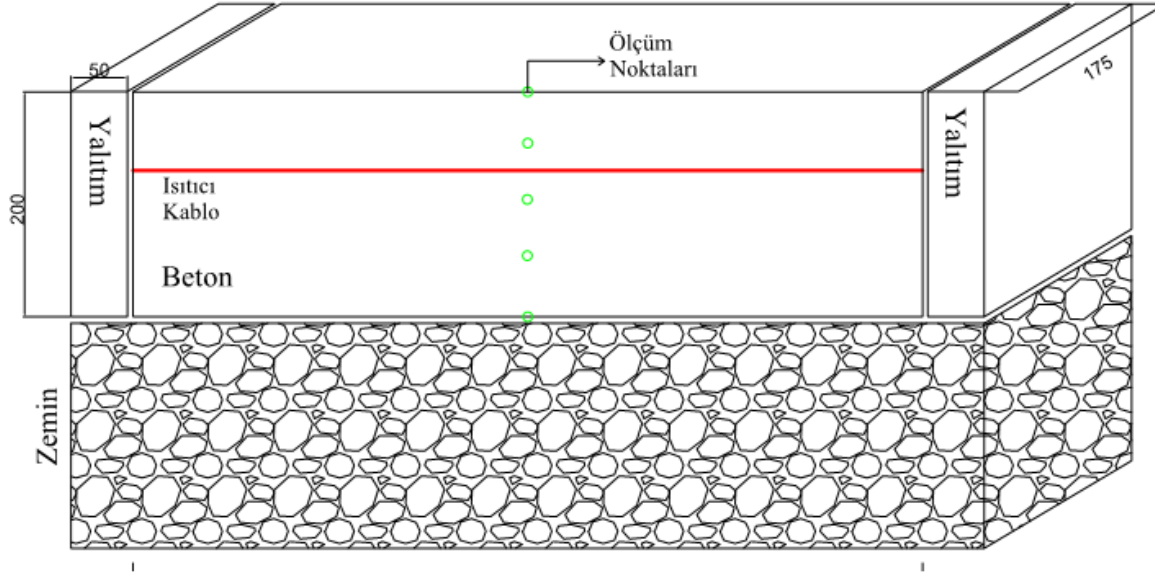


Şekil 17. Derin dondurucu ve beton kaplama altına konulan zemin



Şekil 18. Yalıtım malzemesi ve ısı çiftlerinin numuneye yerleşimi

Numune yalıtımı yapıldıktan sonra beton döküm esnasında oluşturulan deliklerin içerisine gres yağı sürülerek belirlenen noktadaki sıcaklıkların net olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Daha sonra bu deliklerden içeri ısı çift denilen sıcaklık okuyucular sarkıtılarak yüzeyde oluşan boşluklara mastik silikon türü malzeme sürülmüş ve ısı çift ucunun değdiği noktadaki sıcaklığın ortam sıcaklığından etkilenmemesi sağlanarak istenilen mesafedeki sıcaklık ölçümleri alınmıştır.

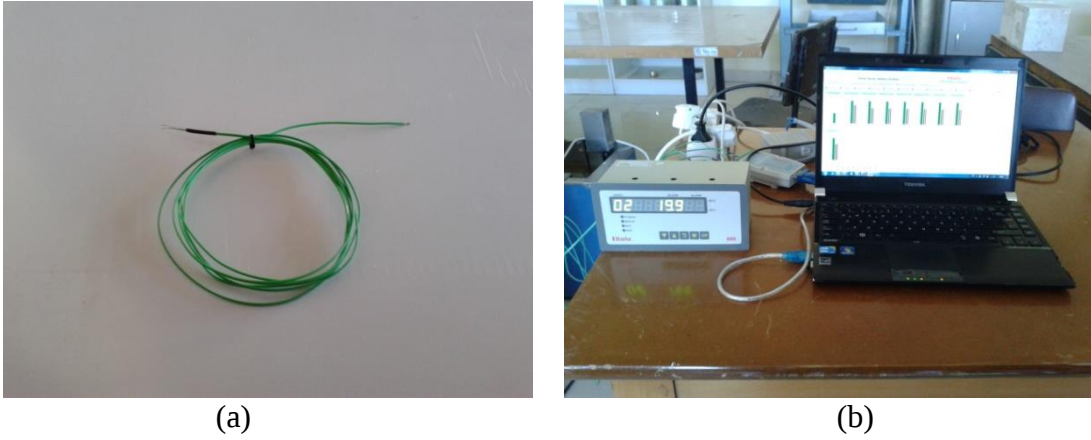


Şekil 19. Derin dondurucuda zemin ve beton numunenin yerleşimi

3.1.4. Deneylerin Yapılışı

Laboratuar ortamındaki deneyler, beton numunenin içerisine yerleştirilen ısı çiftlerinin veri toplama cihazına (datalogger), cihazın da bilgisayara bağlanması ile başlamıştır. Isıl çiftler K tipi olup -200 ile 1200 °C arasındaki sıcaklıkları ölçebilecek özelliktedir. (Şekil 20.a, 20.b). Her bir deney numunesi -12,8 °C, -14,7 °C, -17 °C ve -21,3 °C olmak üzere 4 farklı sıcaklığa maruz bırakılarak deneyler yapılmıştır. Bu sıcaklıkların seçilmesinin nedeni bütün numuneler için aynı şartları oluşturabilmektir. Özel olarak bu değerler belirlenmemiş, sadece derin dondurucunun sıcaklık ayar düğmesinin dijital değil analog olmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin; dolap 3 numaralı ayara getirildiğinde sıcaklık değeri -12,8 °C olmaktadır.

Numuneler dolaba yerleştirilip gerekli yalıtım yapıldıktan sonra ısı çiftler veri toplama cihazına bağlanmış ve numune 1 gün dolapta bekletilerek numunenin her yerinde üniform sıcaklıklar oluşturulmaya çalışılmıştır. Ertesi gün numunede istenilen sıcaklıklar yakalandıktan sonra ısıtıcı kabloya elektrik vermek suretiyle deney başlatılmış ve veri toplama cihazının yazılım programıyla numunenin ısıtılma sürecinde bütün veriler 30 saniyede bir kaydedilmiştir. Bütün deneyler için 4 farklı sıcaklık grubunda alınan veriler grafikler halinde Ekler kısmında sunulmuştur.



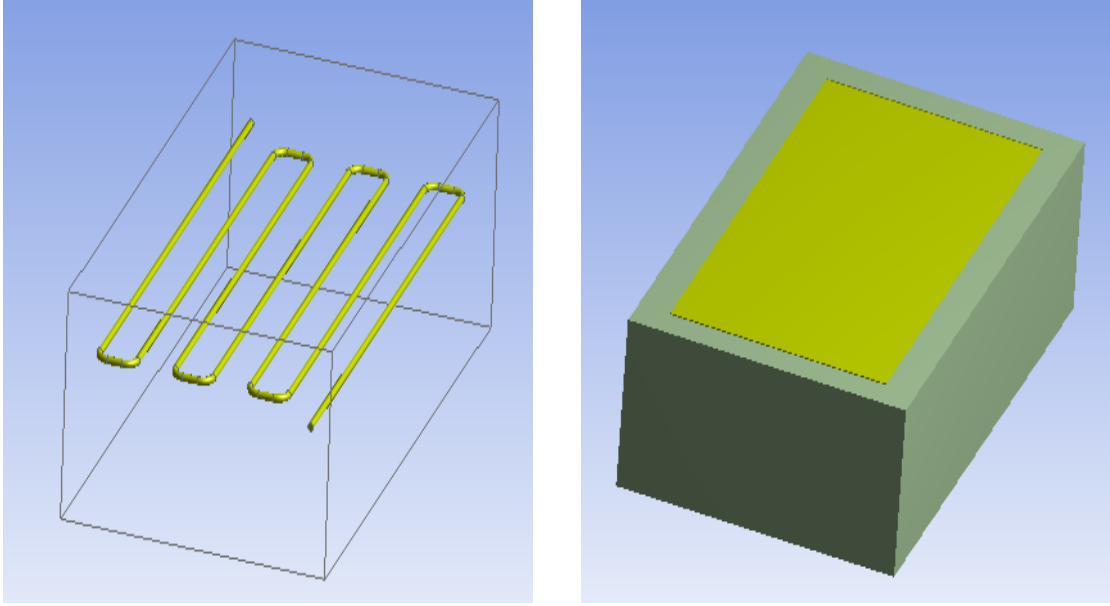
Şekil 20. a. K tipi ısı çift b. Datalogger ve deney düzeneği

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal Analiz

Çalışmamızın bu kısmında son zamanlarda en çok tercih edilen Ansys sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bu program, modellenen geometrik şekle istenilen malzeme özelliklerini atayabilme şansı sunmaktadır. Ayrıca çalışmamız bir termal analiz türü olduğundan, Ansys zamana bağlı analiz yapabilmek içinde en uygun programlardan biridir.

3.2.1. Modellemenin Oluşturulması

Çalışmamızda Ansys 14.0 versiyonu Workbench arayüzü kullanılmıştır. Geometrik model (Şekil 21) deneyde kullanılan beton numune (350x700x200 mm), içerinden geçen ısıtıcı kablo (5 m) ve etrafındaki 50 mm kalınlığındaki yalıtım tabakasından ibarettir.



Şekil 21. Ansys ile geometrik modelin çizilmesi

Modelde beton için (concrete) eleman, yalıtım için polisitren eleman seçilmiştir. Kablo için herhangi bir eleman seçilmemiştir çünkü ileriki aşamalarda kablo ısıtıcı eleman olarak belirlenecek ve analiz bu şartlara göre yapılacaktır. Ansys'te zamana bağlı termal analiz yapabilmek için malzeme özellikleri kısmında seçilen malzemelere 3 parametre girilmiştir. Betonun birim hacim ağırlığı, ısı iletim katsayısı ve özgül ısı termal analiz için girilmiştir. Daha sonra deneyde kullanılan ortam şartları sırasıyla numuneye eklenmiştir.

- Isıtıcının gücü
- Numunenin başlangıç yüzey sıcaklığı
- Yüzeydeki havanın taşınım katsayısı
- Laboratuvar deneylerine göre numune tabanında oluşan sıcaklıkların 30 dk arayla girilmesi
- Laboratuvarda yüzey sıcaklığının 0 ile 4 °C arasındaki bir değere ulaşması için geçen sürenin analiz süresi olarak belirlenmesi
- Ortam sıcaklığının girilmesi

3.2.2. Zamana Bağlı Termal Analizin Yapılması

Ansys programında da laboratuardaki gibi 3 farklı beton numune için 4 farklı ortam sıcaklığında zamana bağlı analiz yapılmıştır. Laboratuardan elde edilip Ansys'e girilen ısınma süreleri Tablo 16'da gösterilmektedir. Farklı beton numuneleri ve yalıtım malzemesi için belirlenen özellikler Tablo 17'de verilmektedir. Bu özelliklerden betonun birim hacim ağırlık değeri, laboratuvar deneylerinde kullanılan betonların dökümü esnasında alınan 6 farklı küp numunenin ortalama değeridir. Betonun özgül ısı ve ısı iletim katsayısı değerleri ise (URL 4). Yalıtım malzemesinin birim hacim ağırlığı, ısı iletim katsayısı ve özgül ısı satın alınan firmadan temin edilmiştir.

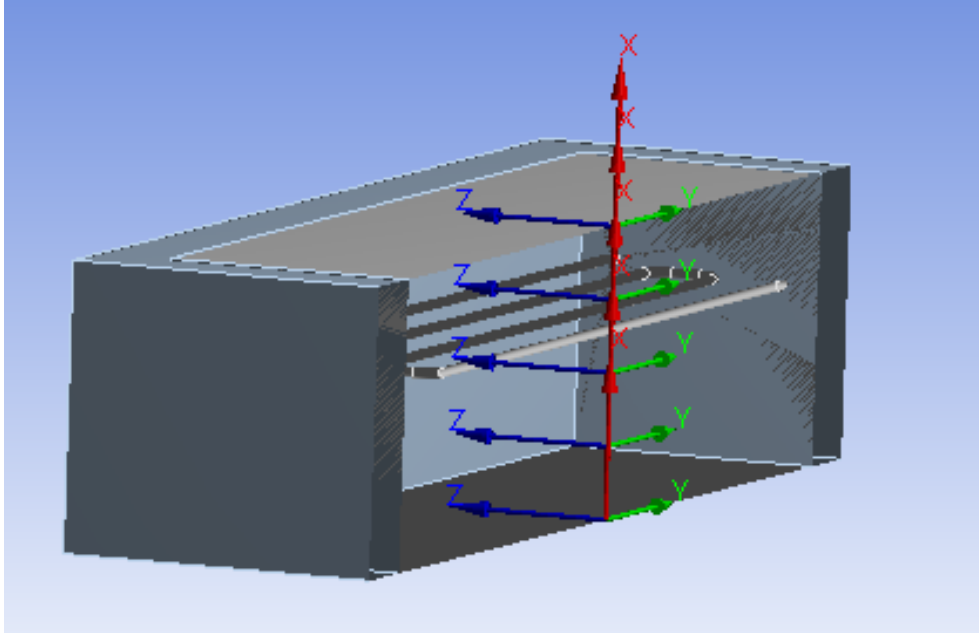
Tablo 16. Beton numunelerin ısınma süreleri

<i>Beton Sınıfı</i>	<i>Ortam Sıcaklığı (°C)</i>	<i>Toplam Isınma Süresi (dk)</i>
C25	-12,8	330
	-14,7	385
	-17	540
	-21,3	660
C30	-12,8	345
	-14,7	400
	-17	540
	-21,3	660
C35	-12,8	330
	-14,7	385
	-17	500
	-21,3	640

Tablo 17. Beton numunelerin ve yalıtım malzemesinin ısı özellikleri

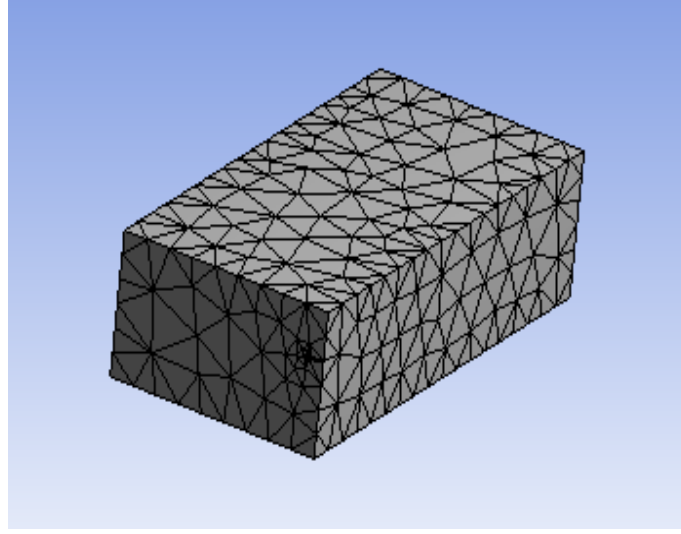
<i>Malzeme Özellikleri</i>	<i>C25</i>	<i>C30</i>	<i>C35</i>	<i>Yalıtım Malzemesi</i>
Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	2380	2370	2420	16
Isı İletim Katsayısı (W/m°C)	1,5	1,6	1,7	0,039
Özgül Isı (J/kg°C)	750	750	750	1500

Numunenin merkezinde yüzeyden tabana kadar 5 cm aralıklarla sabit noktalar oluşturulmuştur (Şekil 22). Ölçüm noktaları her bir "Z" doğrultusuna denk gelen noktalardır. Bu noktaların oluşturulma sebebi analiz sonunda o noktalarda oluşacak sıcaklık değerlerinin rahatça belirlenebilmesidir.

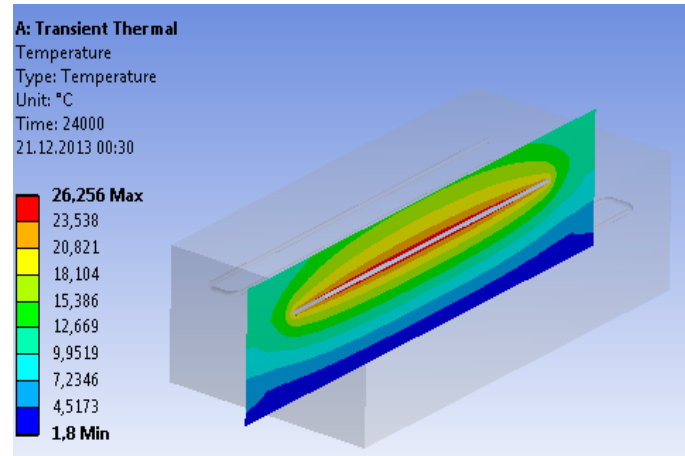


Şekil 22. Ansys sıcaklık ölçüm noktaları

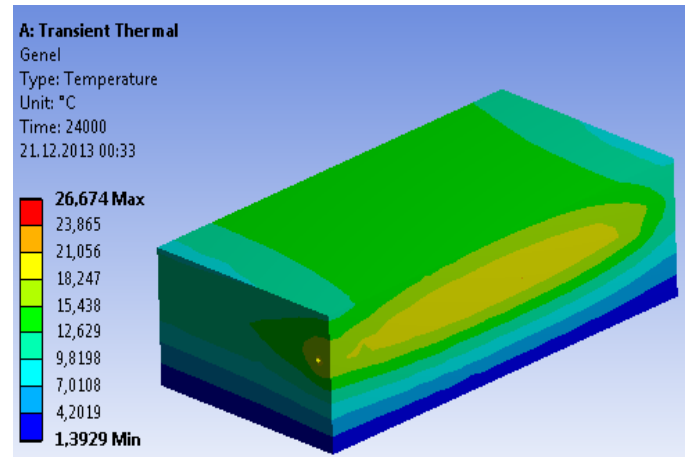
Geometrik model oluşturduktan sonra numuneye mesh işlemi uygulanmış ve 77000 adet eleman oluşturulmuştur (Şekil 23). Eleman sayısını daha fazla artırma seçeneği kullanılmış ancak sonuçların çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bu analizde temel prensip ısıtıcı kabloda verilen gücün oluşması ve bu güçten dolayı oluşan sıcaklığın analiz süresi boyunca modelimize etki etmesidir. Termal analiz bittikten sonra belirlenen noktalardaki sıcaklıklardan ölçümler alınmış ve bulgular kısmında sunulmuştur. Burada sadece numune ısıtıldıktan sonra sıcaklık dağılımının nasıl olduğu Şekil 24 ve Şekil 25'te gösterilmiştir.



Şekil 23. Numunenin sonlu elemanlara ayrılması



Şekil 24. Ansys boykesit sıcaklık dağılımı



Şekil 25. Ansys genel sıcaklık dağılımı

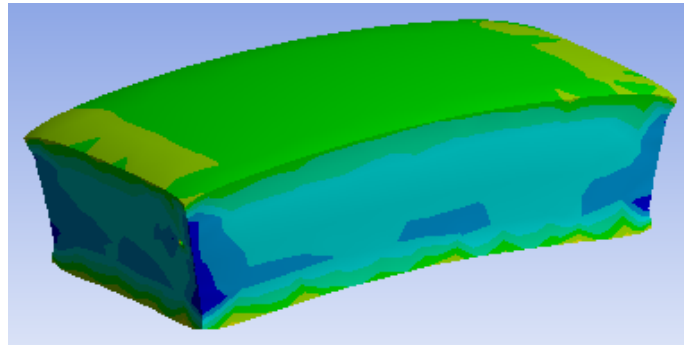
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Statik Analiz

Farklı numuneler için yaptığımız termal analiz bittikten sonra modellerde oluşan sıcaklık dağılımları statik yük olarak uygulanmış ve sadece sıcaklık değişiminden ötürü oluşan çekme ve basınç gerilmeleri incelenmiştir. Daha sonra bu gerilmelerin, betonların, kendi çekme ve basınç dayanım değerlerini aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Statik analiz yapabilmek için betonların malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişim oranları literatür kısmında anlatılmış ve çalışmamızdaki betonlarda oluşan minimum -25 °C ile maksimum 25 °C arasındaki sıcaklık dağılımının, betonun termal genleşme katsayısına, elastisite modülüne, basınç dayanımına, birim hacim ağırlığına ve poisson oranına önemli ölçüde etki etmediği anlaşılmıştır (Tablo 18). Beton yollarla ilgili Ansys kullanılarak bir çok çalışma mevcuttur (Akpınar, 2000; Akpınar vd.,2001; Kaya, 2011; Kaya ve Akpınar, 2011; Özcanan, 2011; Akpınar, 2008). Burada betonların elastisite modülü, poisson oranı ve termal genleşme katsayısı TS 500'e göre belirlenmiştir.

Tablo 18. Beton numunelerin malzeme özellikleri

<i>Malzeme Özellikleri</i>	<i>C25</i>	<i>C30</i>	<i>C35</i>
Elastisite Modülü (Mpa)	34810	35800	38536
Poisson Oranı	0,2	0,2	0,2
Termal Genleşme Katsayısı (°C ⁻¹)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵
Basınç Dayanımı (Mpa)	41	45	57

Malzeme özellikleri belirlendikten sonra statik analiz yapılmıştır (Şekil 26). Detaylı sonuçlar bulgular kısmında ele alınacaktır.



Şekil 26. Statik analiz sonucu oluşan gerilme dağılımı

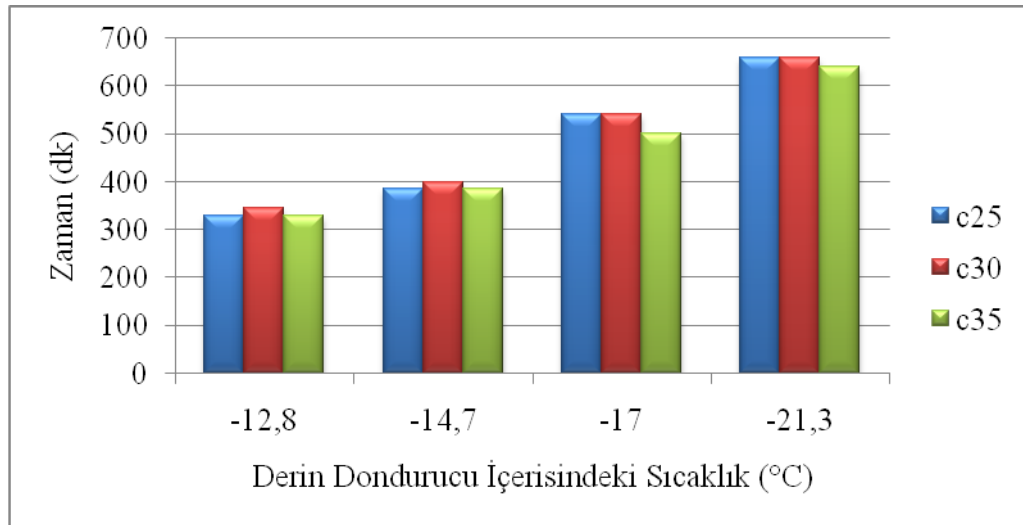
4. BULGULAR VE İRDELEME

4.1. Giriş

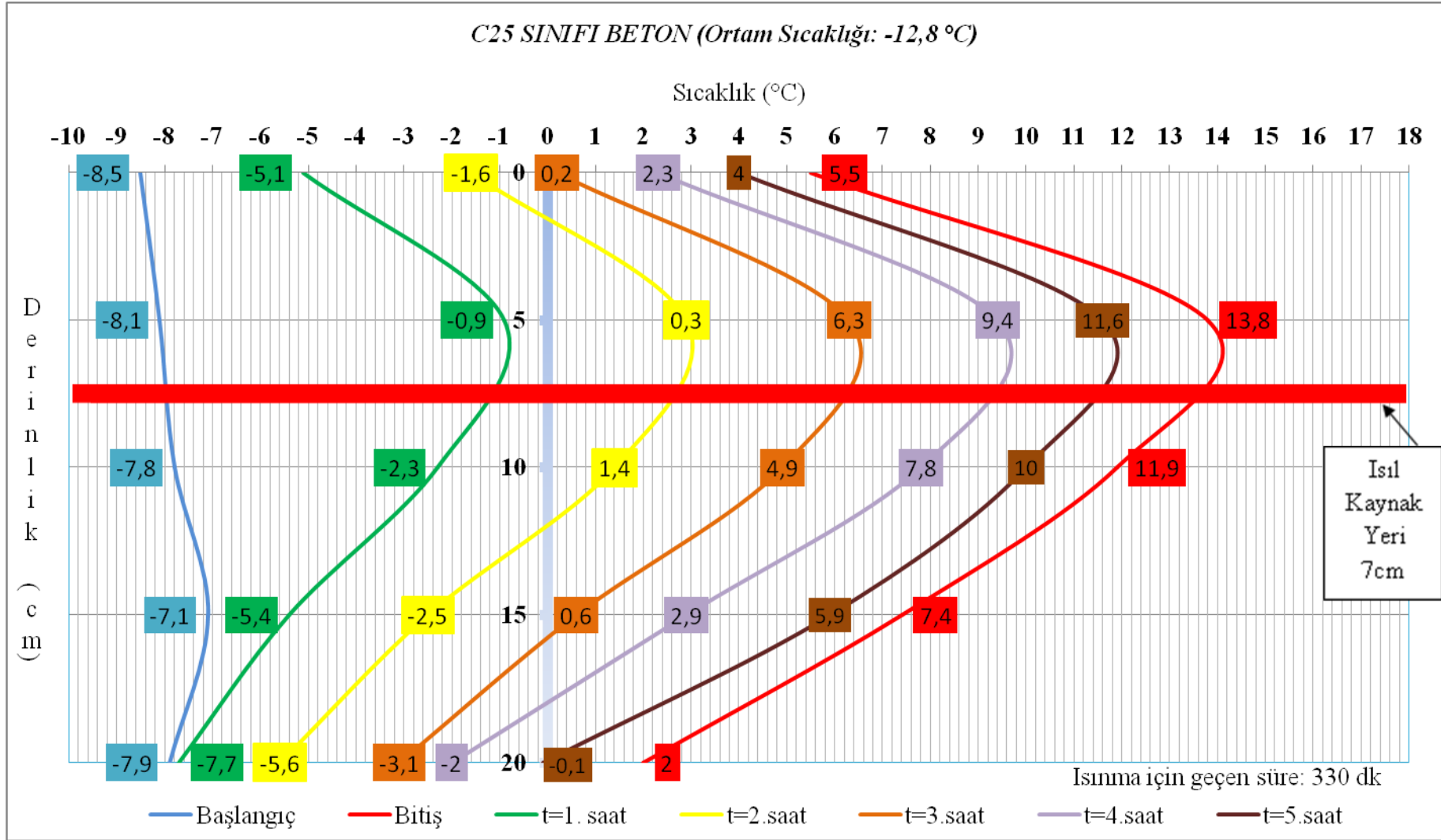
Çalışmamızın bu kısmında laboratuarda ve sonlu elemanlar programıyla yapılan deneylerin sonuçlarından bahsedilecek ve bu sonuçların birbiriyle olan ilgisi anlatılacaktır. Varsa, farkların neden kaynaklandığı hakkında yorum yapılacaktır.

4.2. Deneysel Çalışmaların Sonuçları

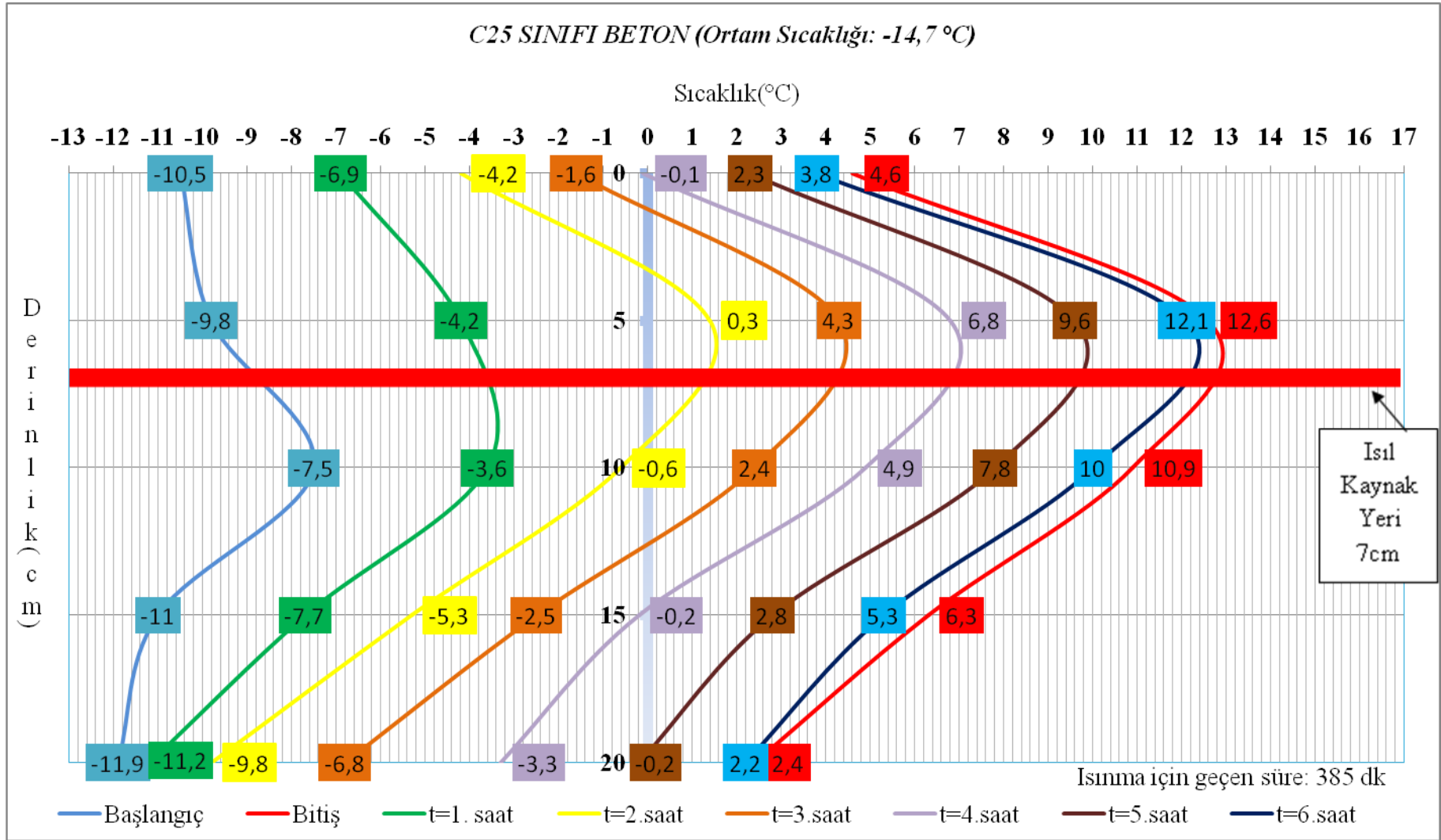
Laboratuar ortamında 3 farklı beton için toplamda yapılan 12 farklı deney neticesinde çeşitli sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlardan emin olabilmek için aynı şartlarda tekrar edilmiştir. Kaplama yüzeyinden 7 cm aşağıya yerleştirilen 132 watt gücündeki kablo, deney başlangıcında elektrik verilerek ısıtılmış, bu sayede beton yüzeyinde ve içerisinde oluşan sıcaklıklar incelenmiştir. Aynı ortam sıcaklığında farklı betonlar için sabit başlangıç sıcaklıkları korunmak istense de sağlanamamış ancak deney başlangıç sıcaklığı ile deney bitiş sıcaklığı arasındaki farka özen gösterilmiştir. 12 farklı numune için toplam ısınma süreleri Şekil 27 ve Tablo 15’te gösterilmiştir. Aynı ayrı bütün numunelerin ısınma grafikleri Şekil 28-39 arasında sunulmaktadır.



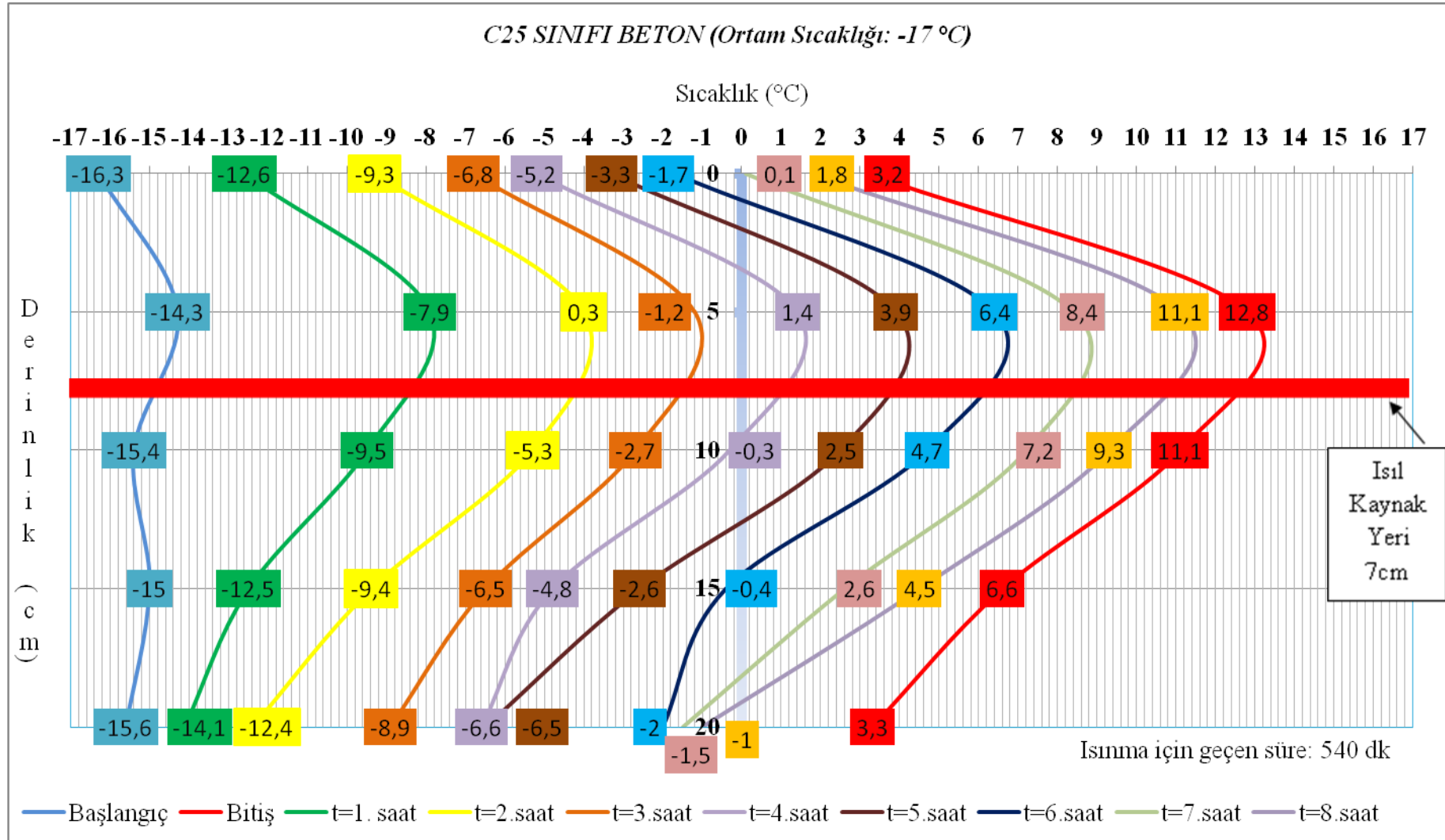
Şekil 27. Farklı beton numunelerinin ısınma süreleri grafikleri



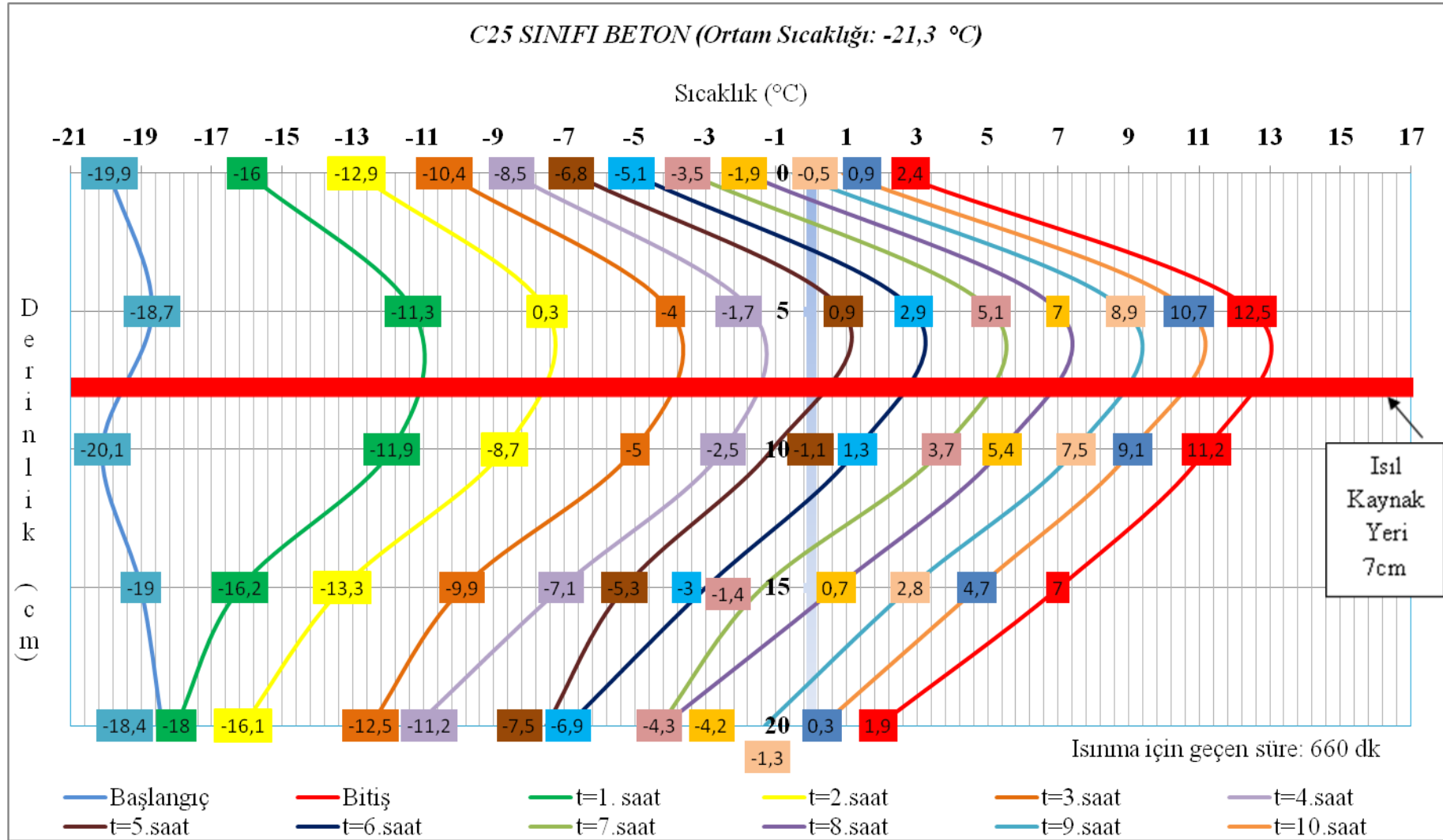
Şekil 28. C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



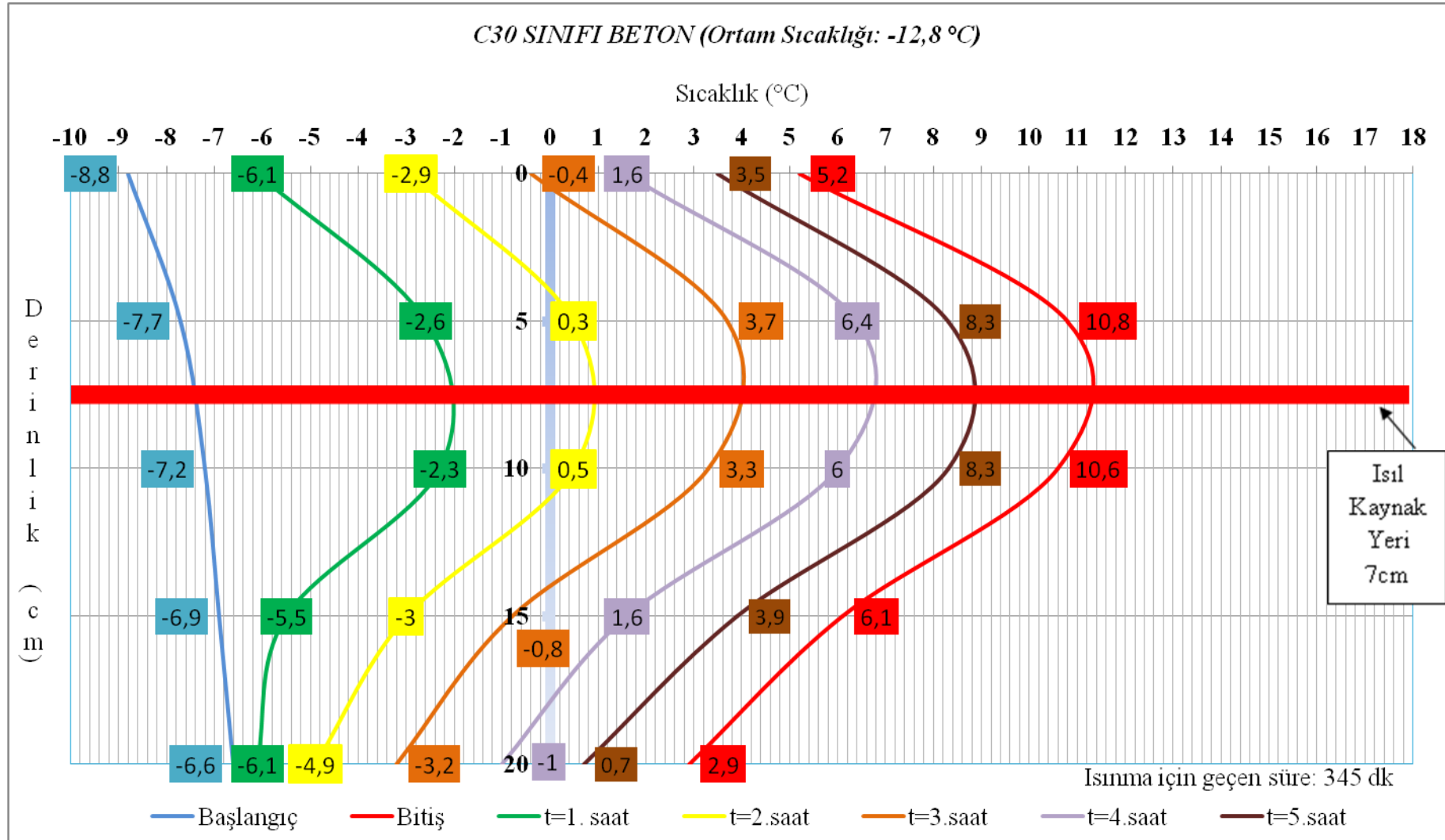
Şekil 29. C25 betonu laboratuar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



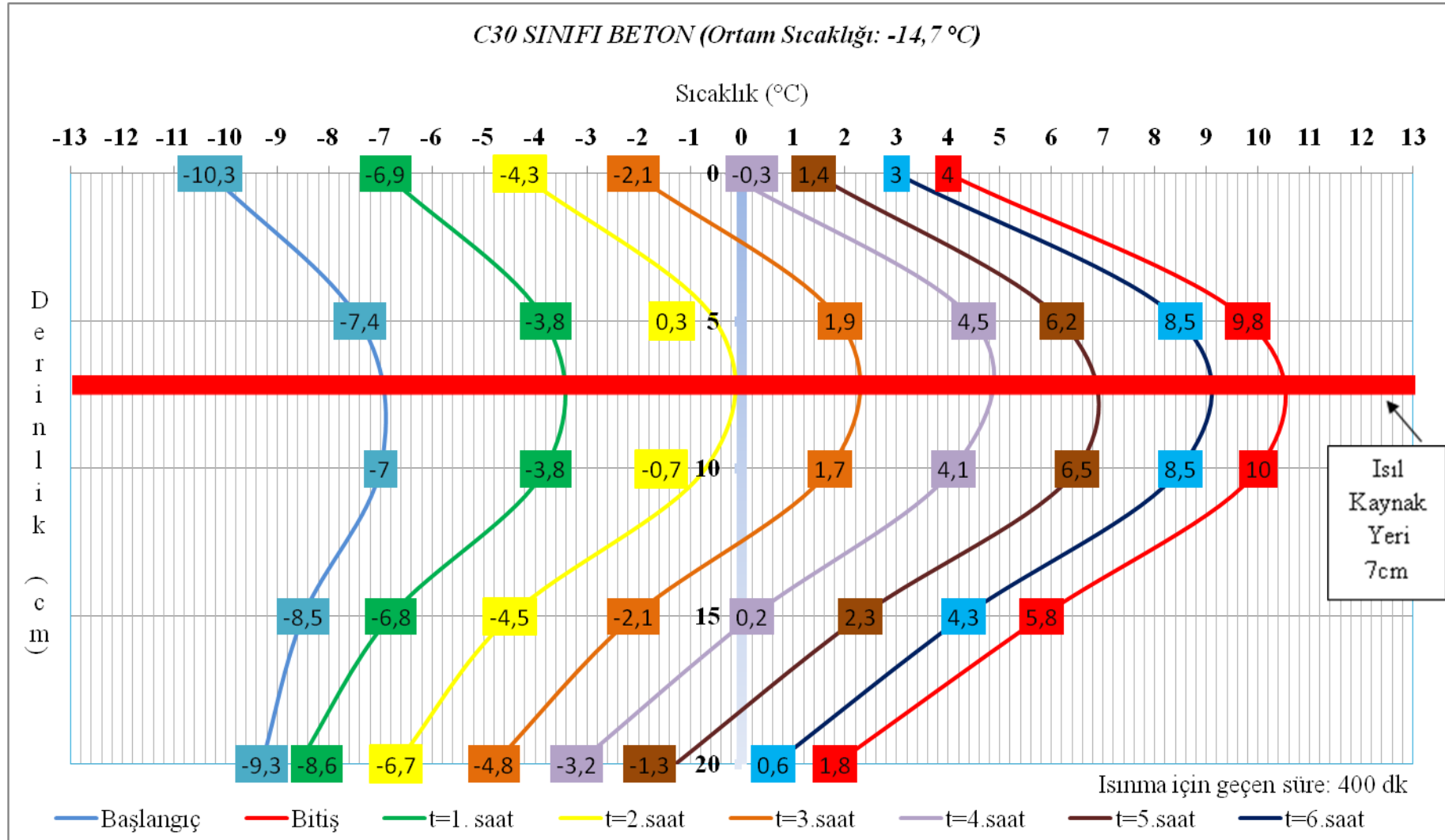
Şekil 30. C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C)



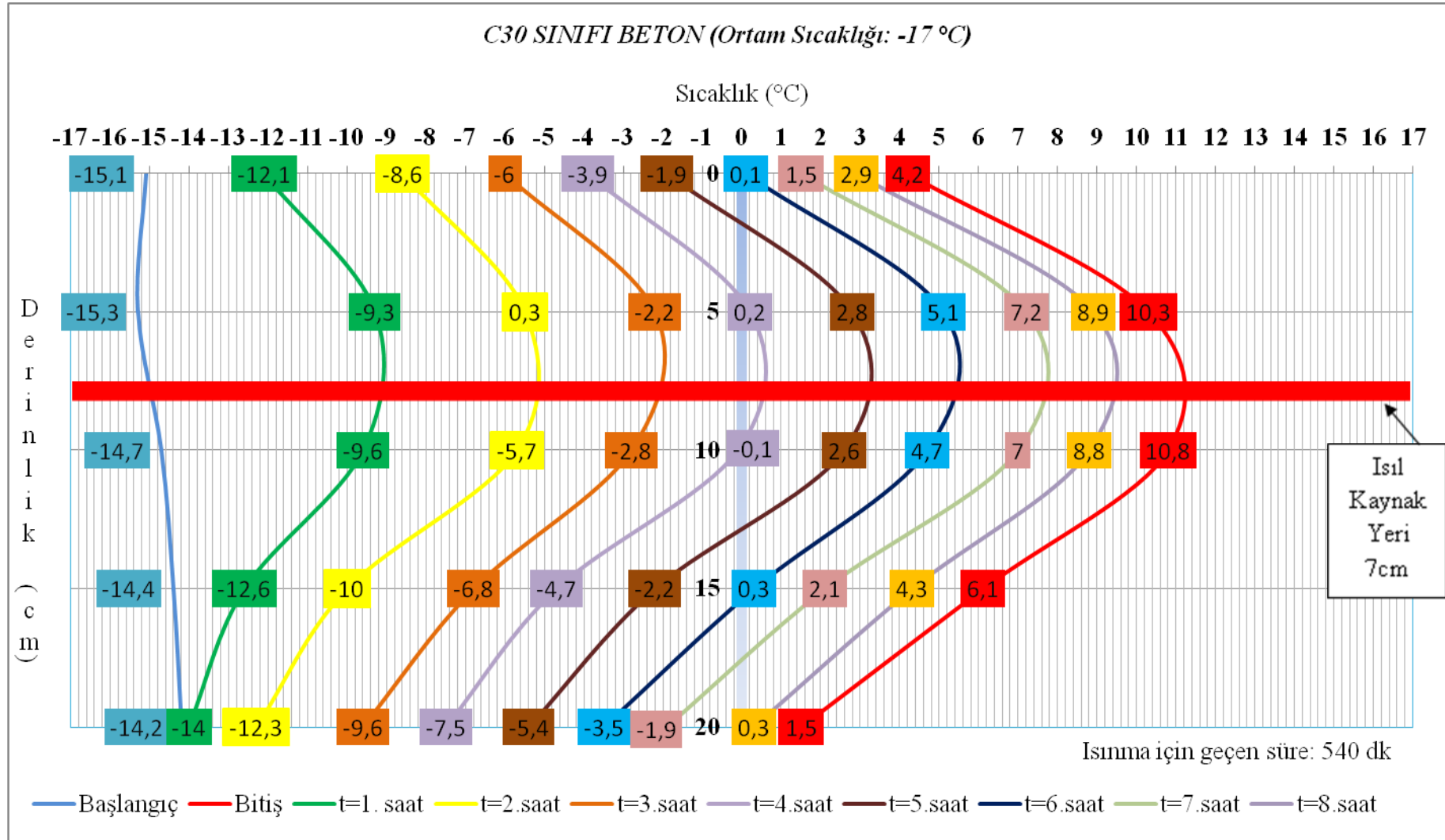
Şekil 31. C25 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)



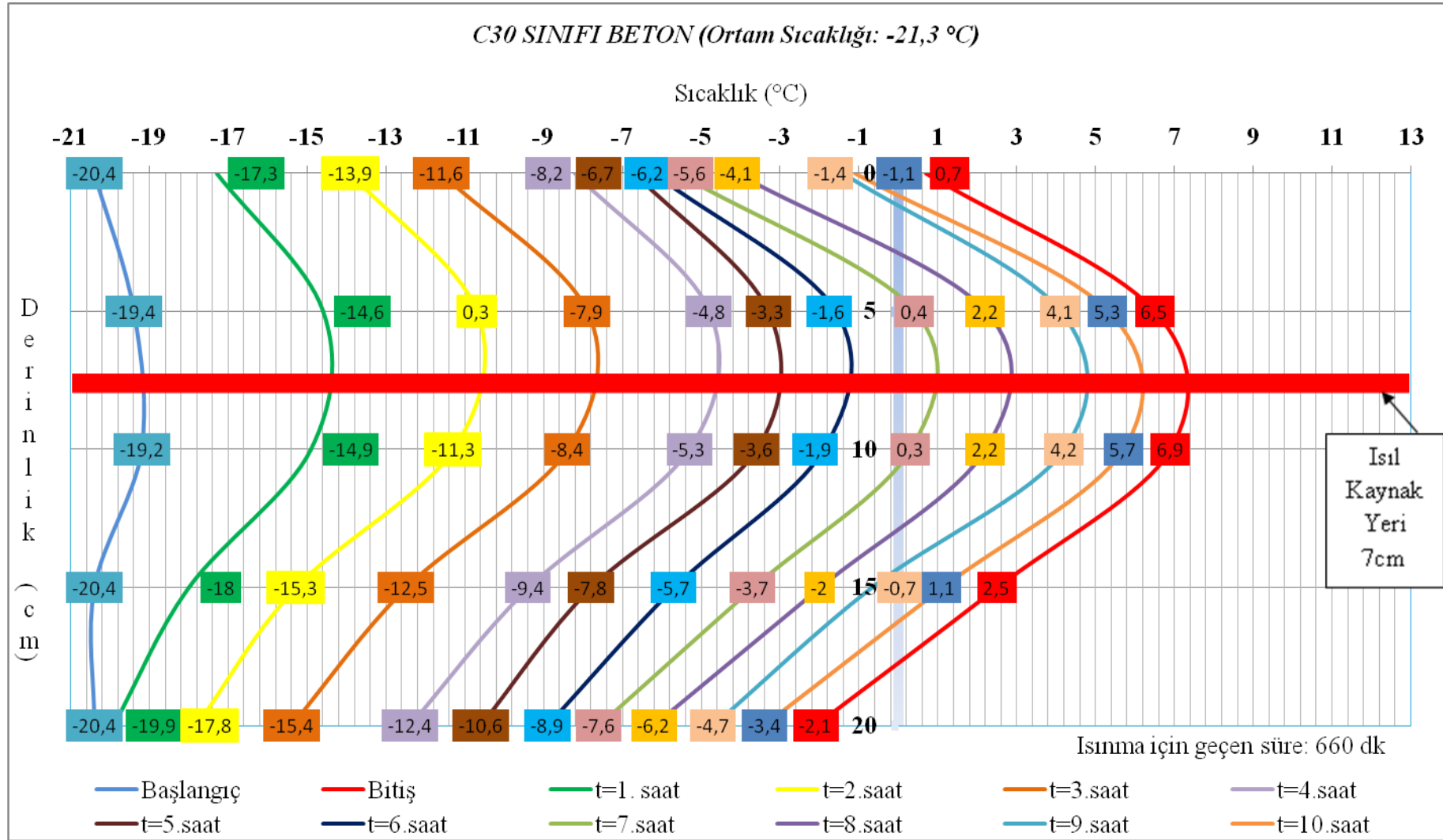
Şekil 32. C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



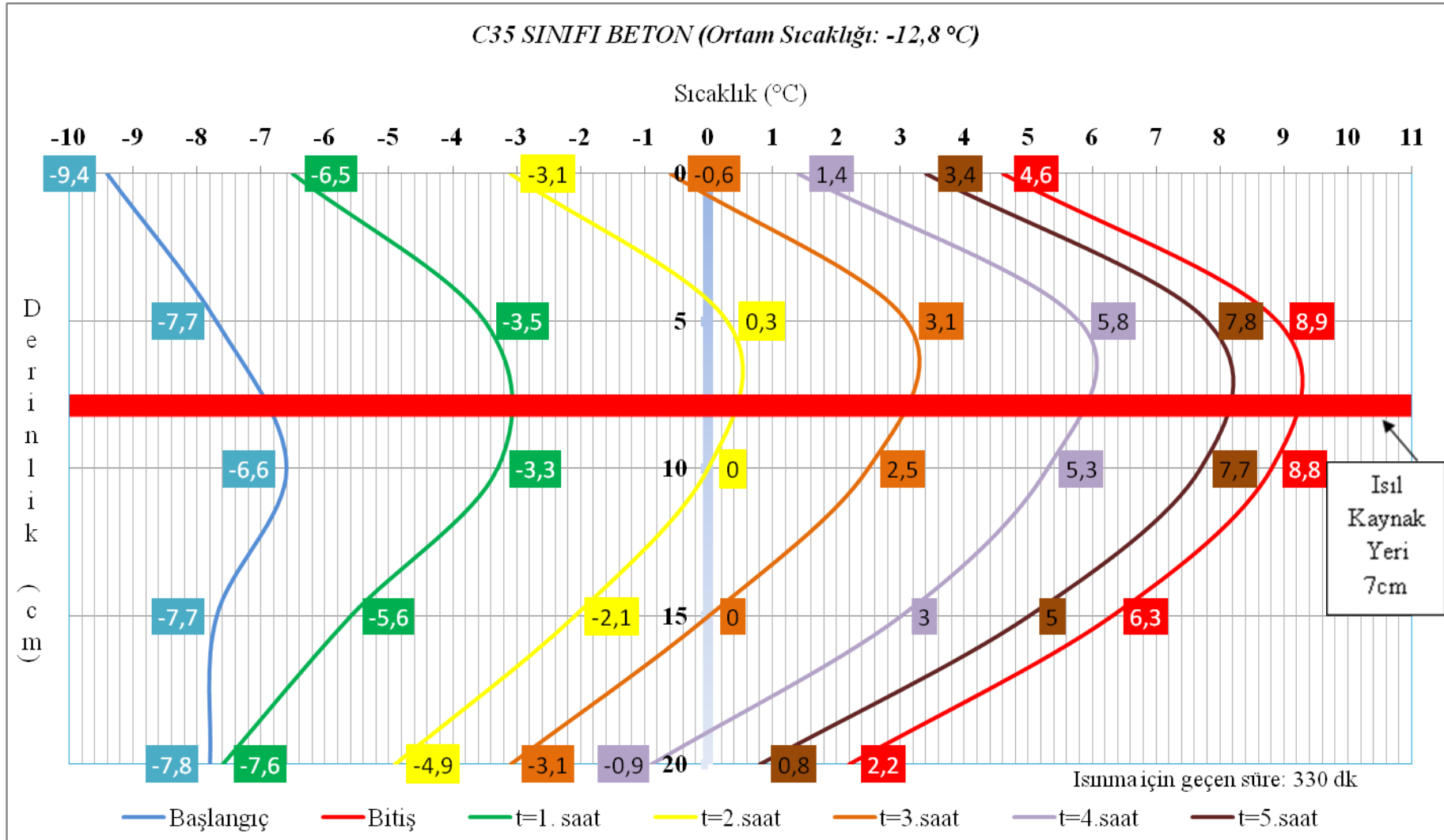
Şekil 33. C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



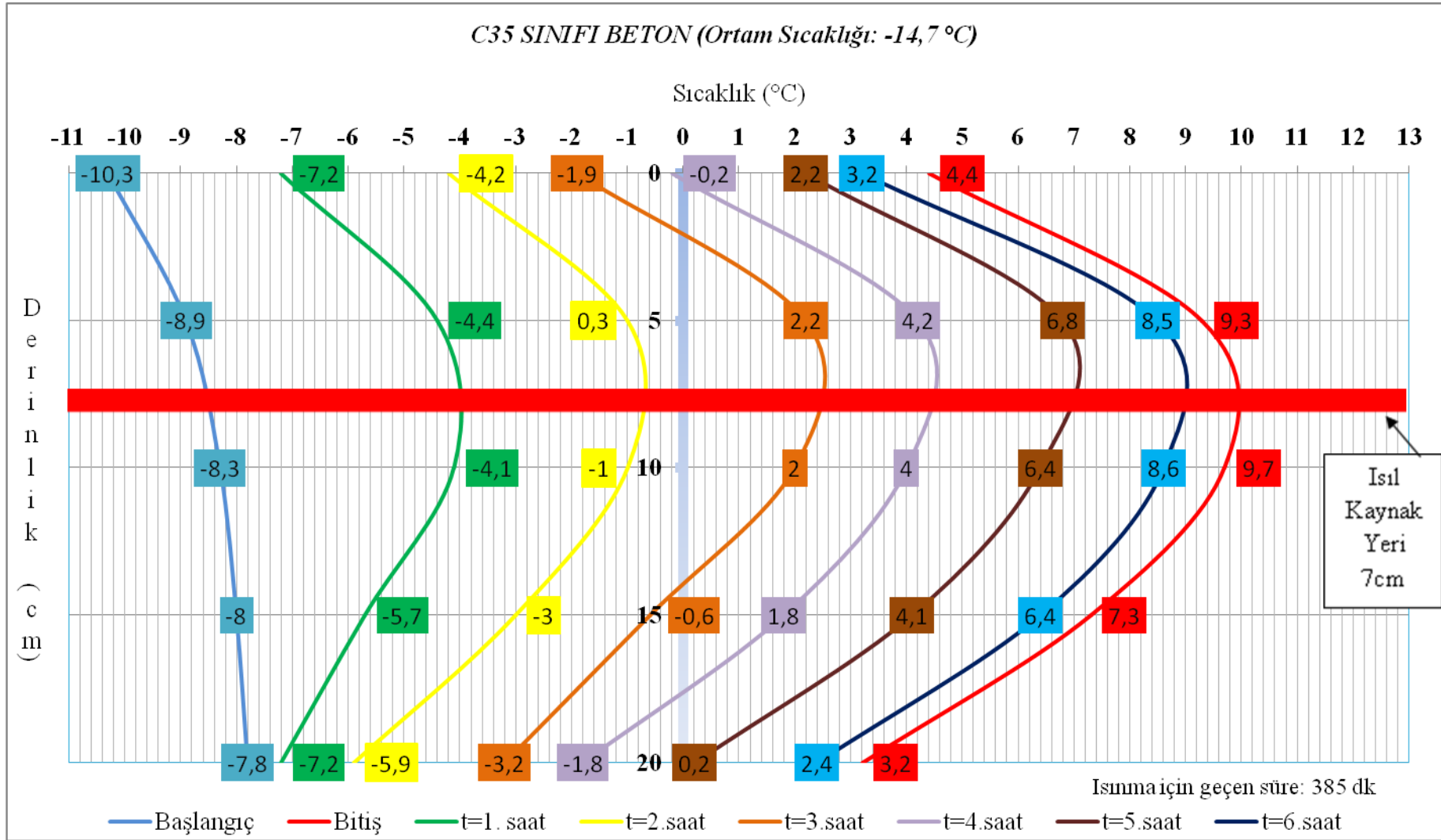
Şekil 34. C30 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C)



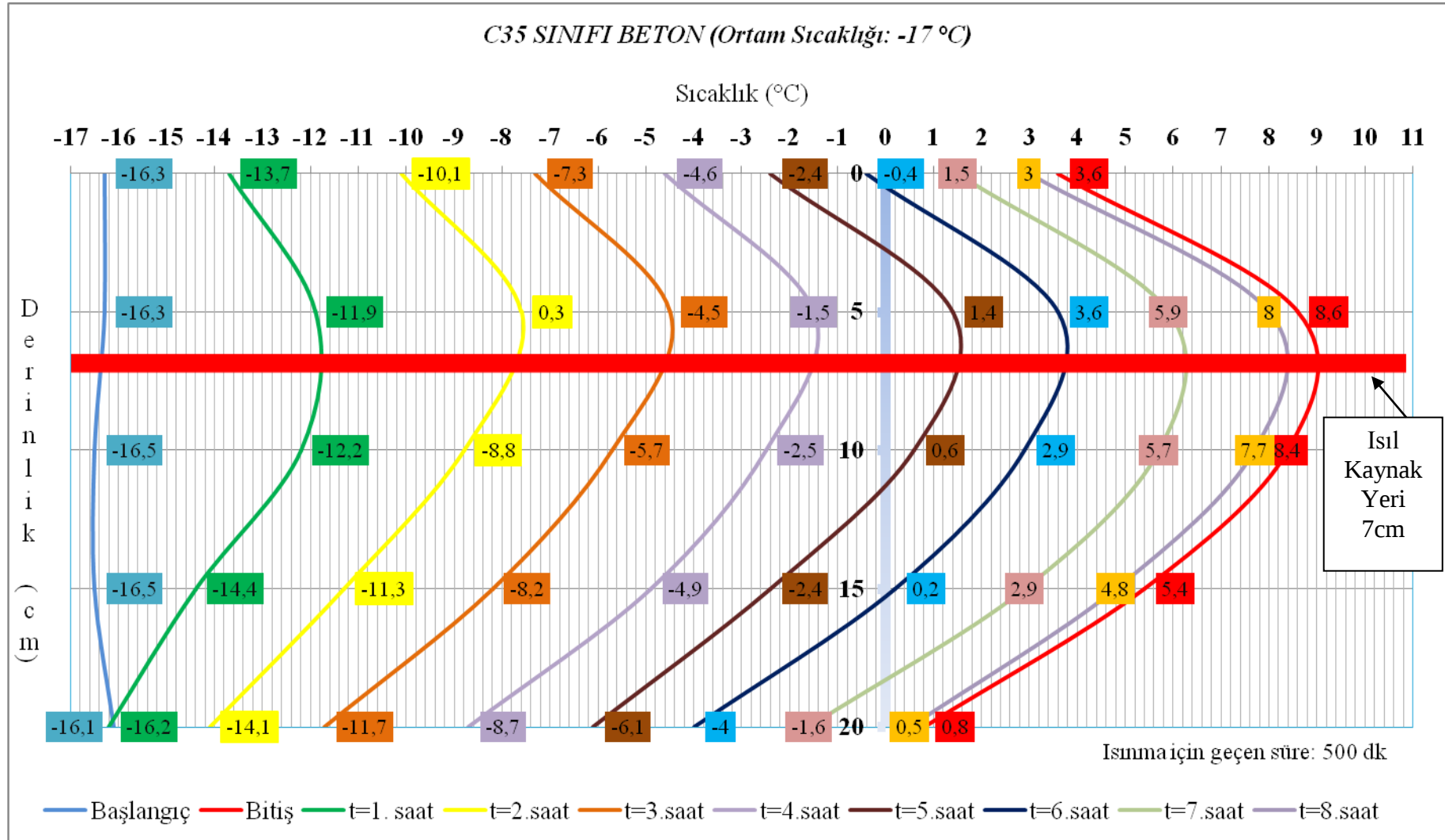
Şekil 35. C30 betonu laboratuar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)



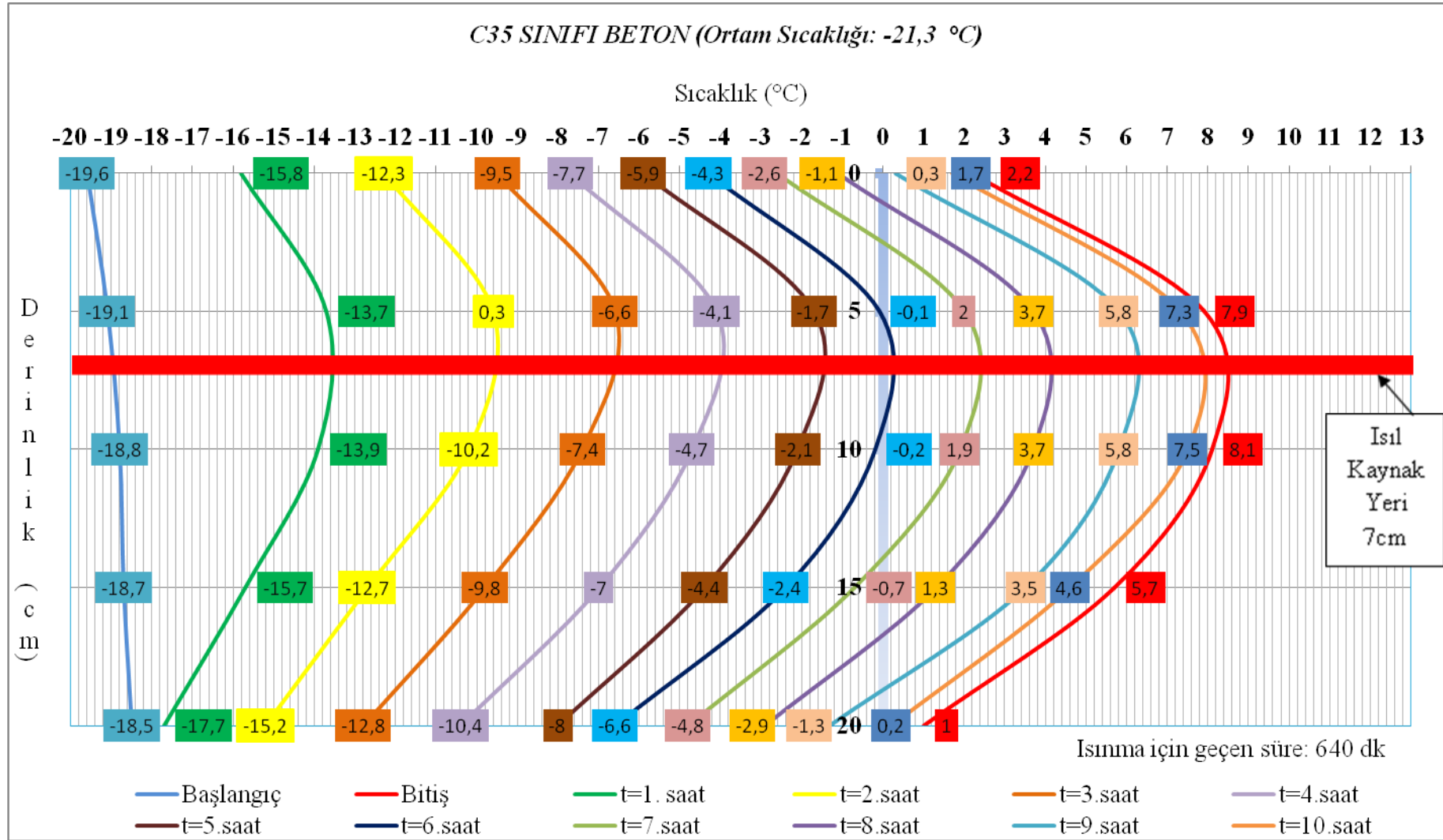
Şekil 36. C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



Şekil 37. C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



Şekil 38. C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-17 °C)



Şekil 39. C35 betonu laboratuvar sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)

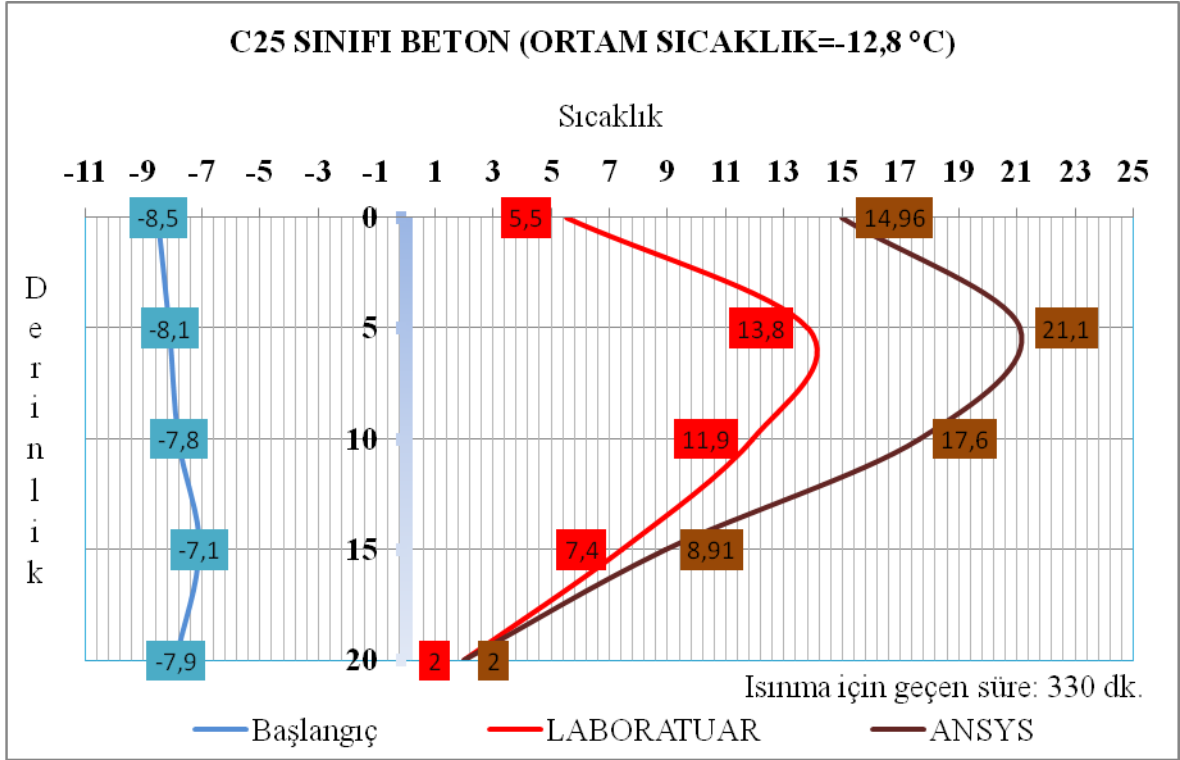
Beton numunelerdeki sıcaklık dağılımları 1 saat aralıklarla grafik haline getirilmiştir. Bütün grafiklerde görülen en belirgin özellik oluşan sıcaklık eğrilerinin temel şeklinin 1. saatte oluşması ve son süreye kadar aynı şekilde devam etmesidir. Bu da beton kaplamamızda oluşan sıcaklık farklarının ani olmadığı ve kaplamaya ani sıcaklık değişiminden ötürü bir zarar vermeyeceği anlamına gelmektedir. Grafiklere göre genel olarak en fazla sıcaklık miktarı sırasıyla ısıtıcı kabloya en yakın nokta olan yüzeyden 5 cm aşağıdaki noktada, daha sonra 10 cm aşağıda, 15 cm aşağıda, yüzeyde ve tabanda oluşmuştur. Deneylerde ısınma süreleri, yüzeydeki başlangıç sıcaklığı ile bitiş sıcaklığı arasındaki farkın oluştuğu süre anlamına gelmektedir.

Çalışmada kullanılan numunelerden C25 betonu, 41 Mpa dayanıma sahip olup çimento oranı C30 ve C35'e göre en az, su/çimento oranı en fazla olandır. Bilindiği üzere çimento miktarının fazla olması betonun ısı iletim katsayısının yükselmesinde önemli bir etki oluşturmaktadır. Ayrıca betonun bünyesinde suyun fazla olması ilerleyen zamanlarda mevcut suyun buharlaşarak kaybolmasına ve betonda boşluk oluşumuna sebep olmaktadır. Bu boşluklar, betonda ısının iletimi yavaşlatmaktadır. Betonda ısı iletiminin en iyi olacağı durum betonun boşluksuz yapıda olmasına bağlıdır. Buna göre C25 betonunun ısınma süreleri diğer iki beton sınıfına göre daha fazla olmalıdır. Ancak laboratuvar deney verilerine göre C25 betonu sadece -17 ve -21,3 °C'deki sıcaklıklarda C35 betonundan geç ısınmıştır. -12,8 ve -14,7 °C'de aynı sürede ısınmıştır.

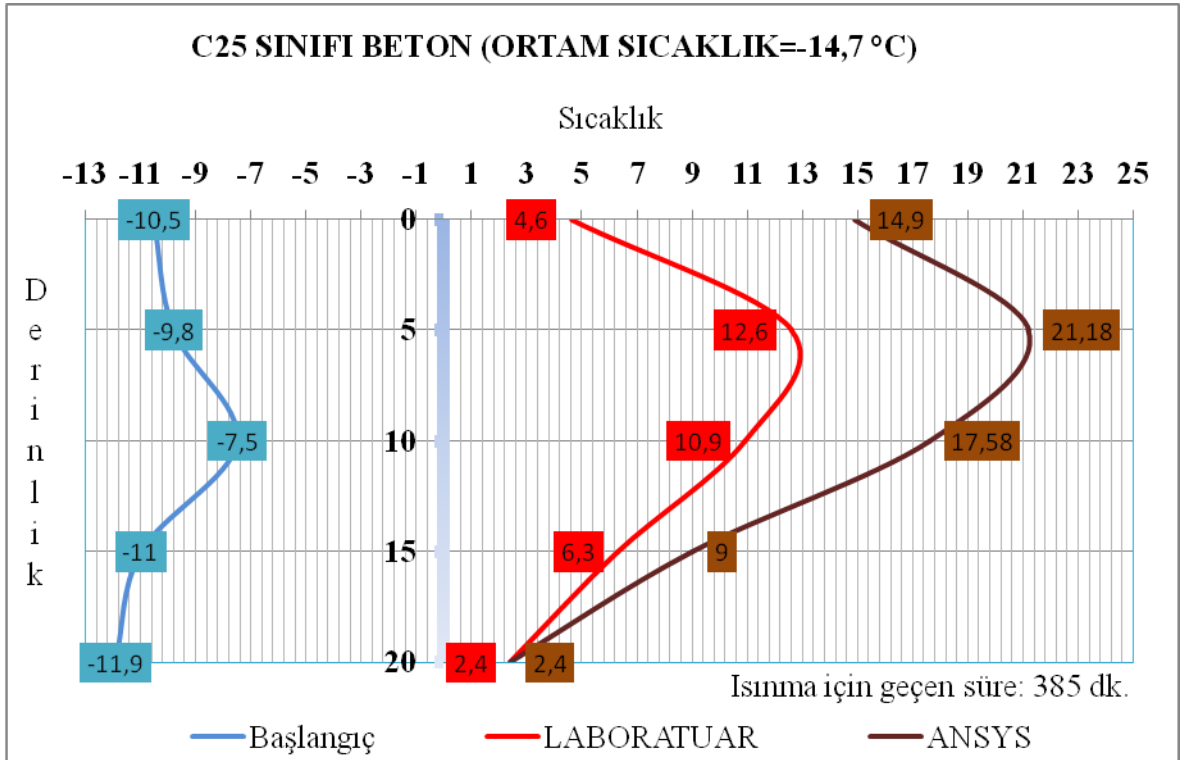
C30 betonu, C25'den daha erken ısınması gerekirken -17 ve -21,3 °C'deki sıcaklıklarda C25 betonu ile aynı sürede ısınmış ancak -12,8 ve -14,7 °C'de daha geç ısınmıştır. Beklenildiği gibi bütün sıcaklıklarda C35'den daha geç ısınmıştır.

4.3. Ansys Termal Analiz Sonuçları

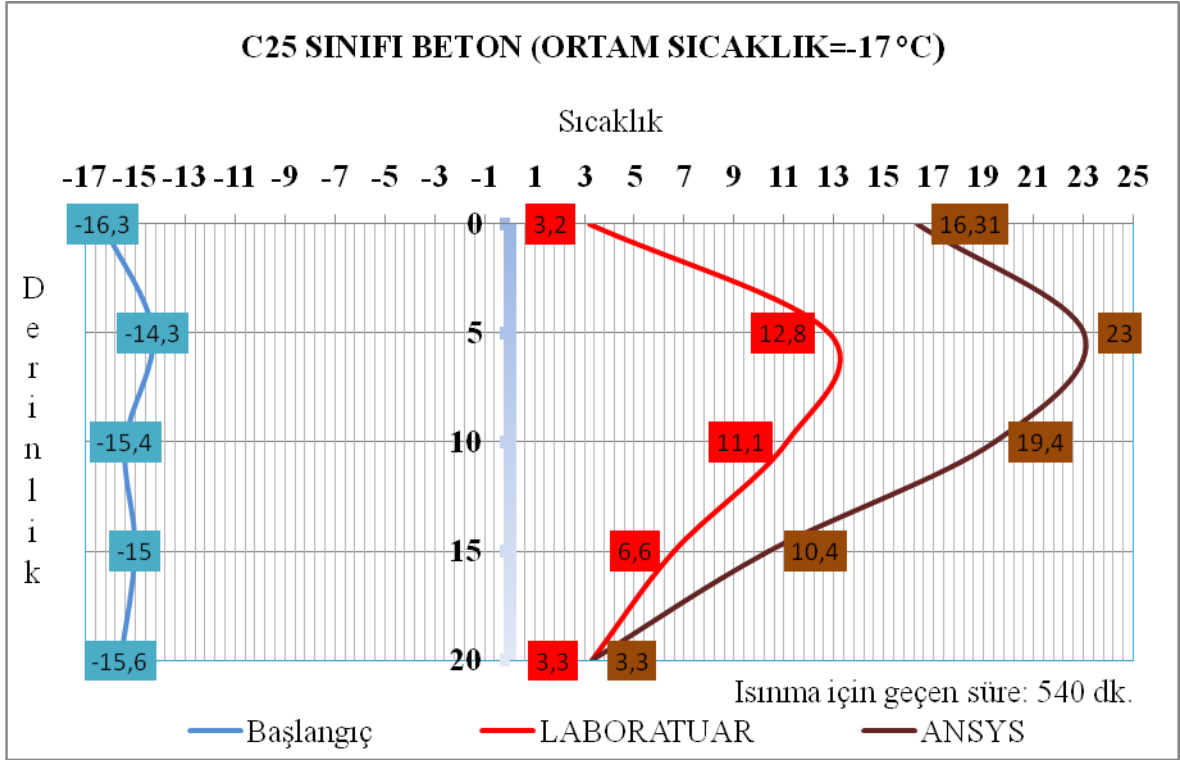
Yapılan çalışmalar kısmında bahsedildiği gibi termal analizler Ansys programında yapılmış ve laboratuvar çalışmaları sonuçlarıyla beraber grafik halinde sunulmuştur (Şekil 40-51). Bu grafiklerde 7 cm derinlik, ısıtıcı kablonun konumudur.



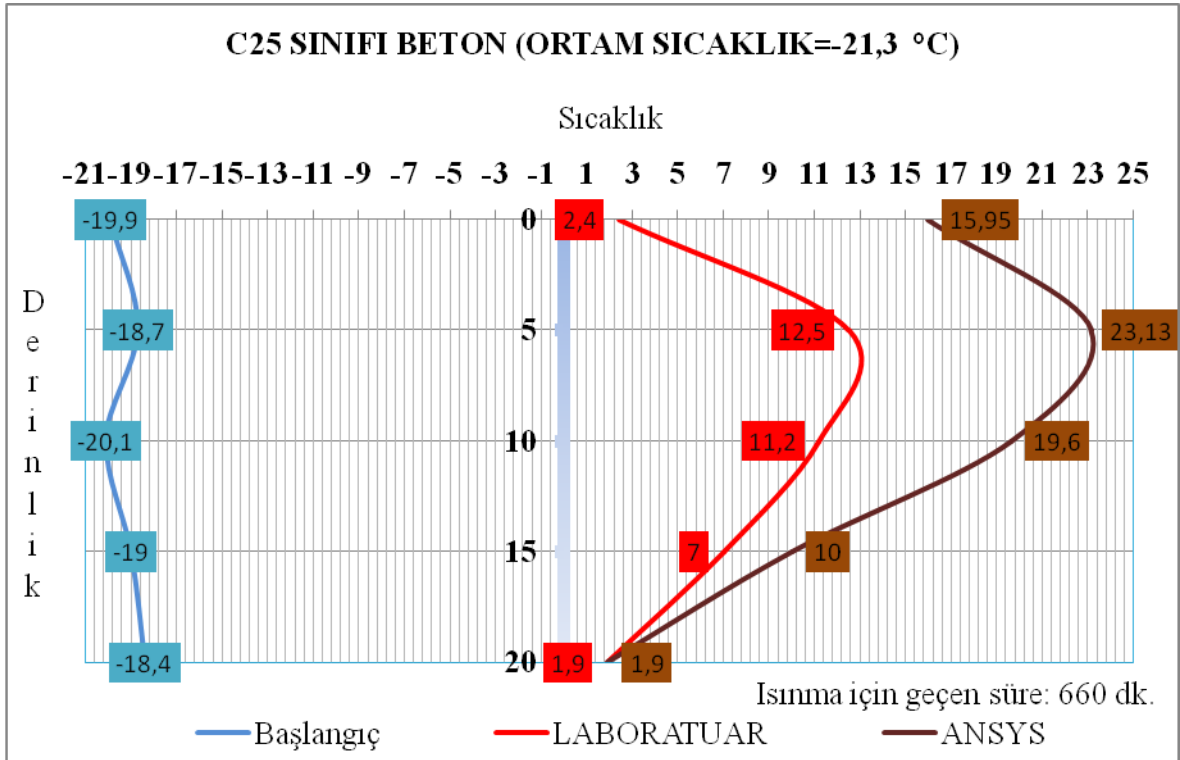
Şekil 40. C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



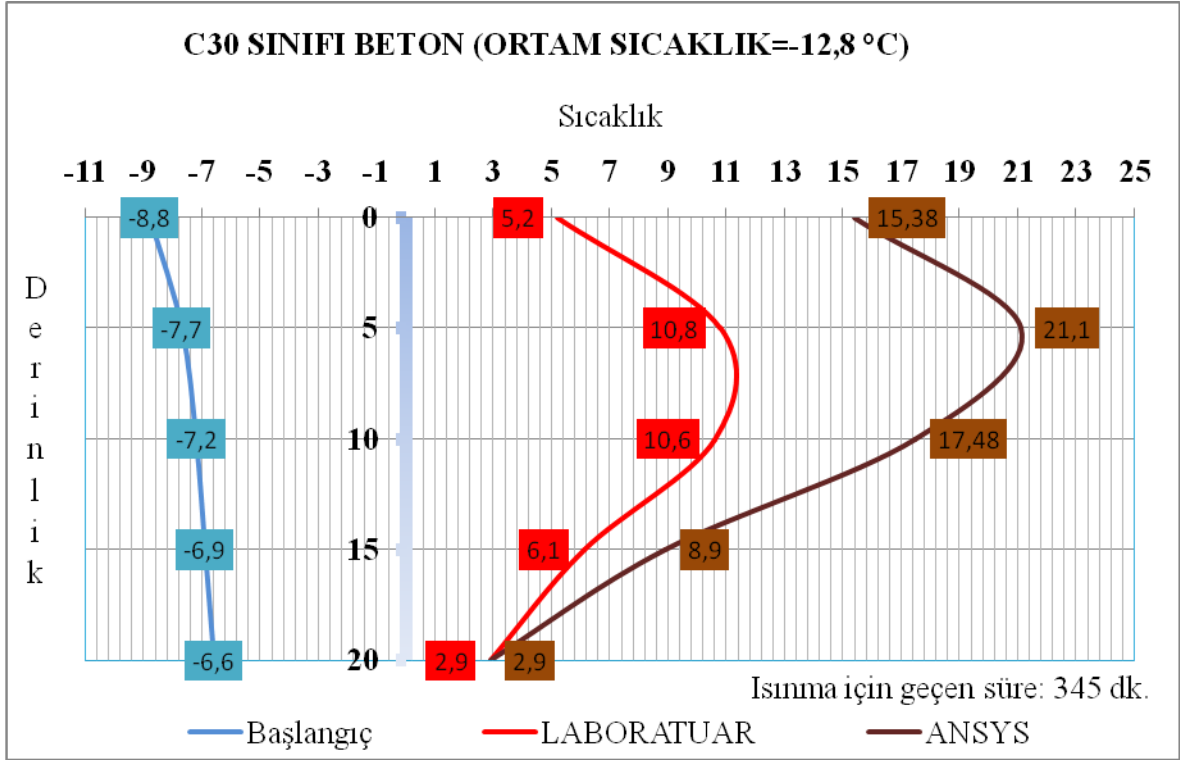
Şekil 41. C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



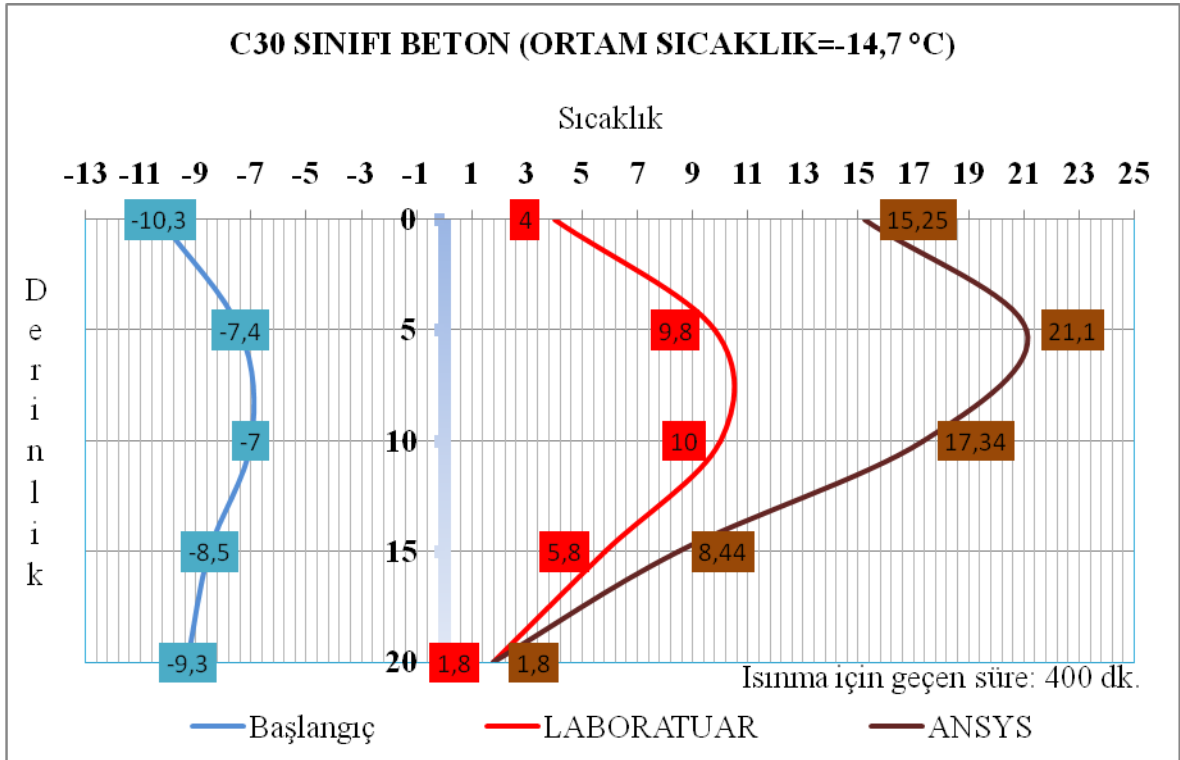
Şekil 42. C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C)



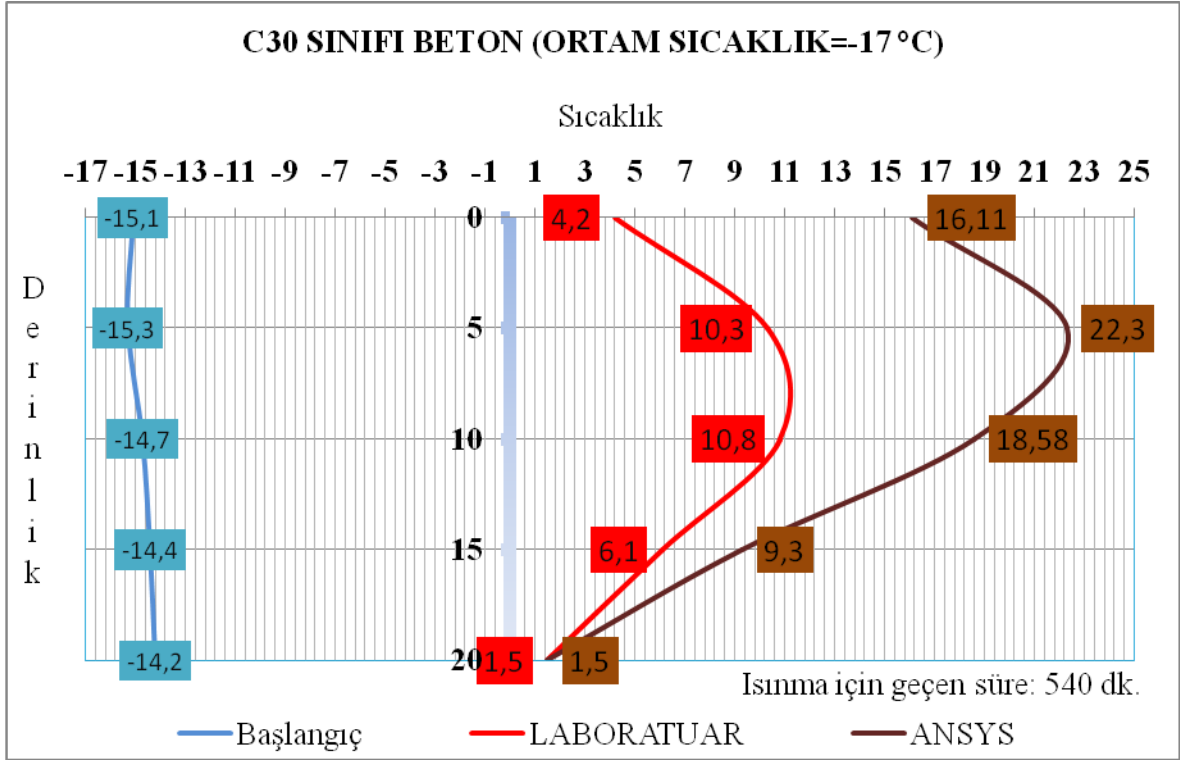
Şekil 43. C25 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)



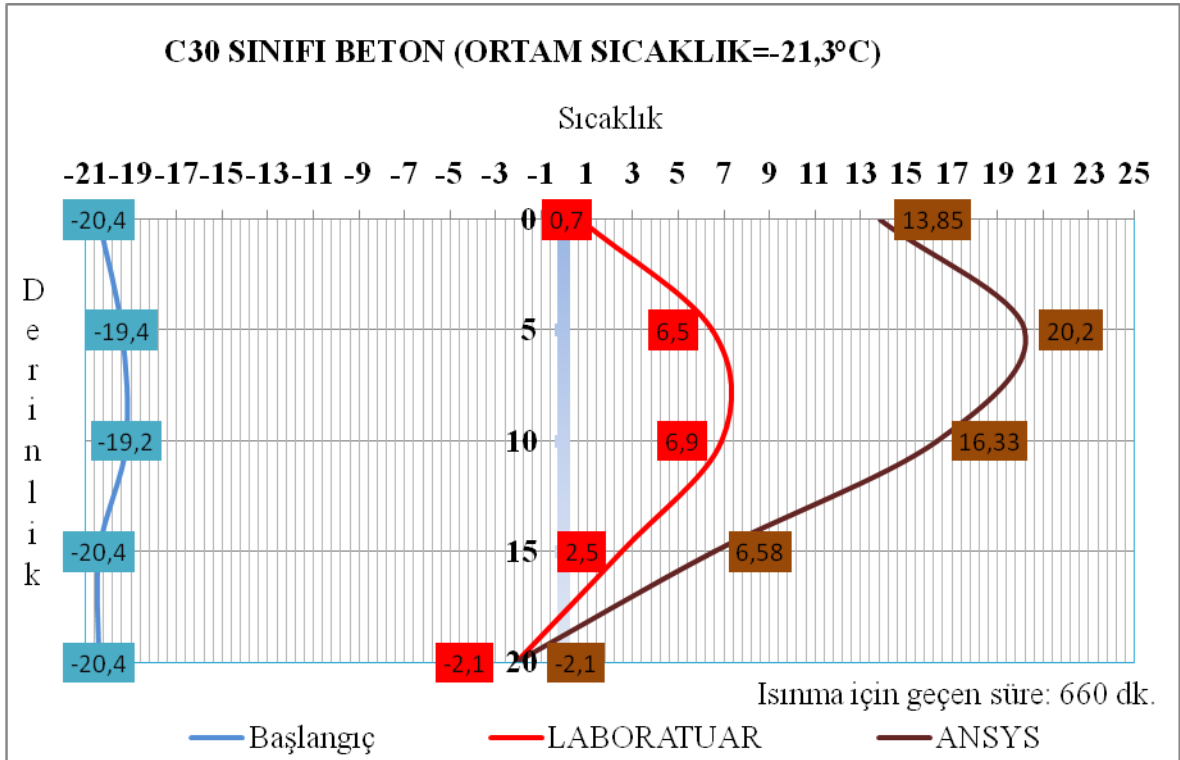
Şekil 44. C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



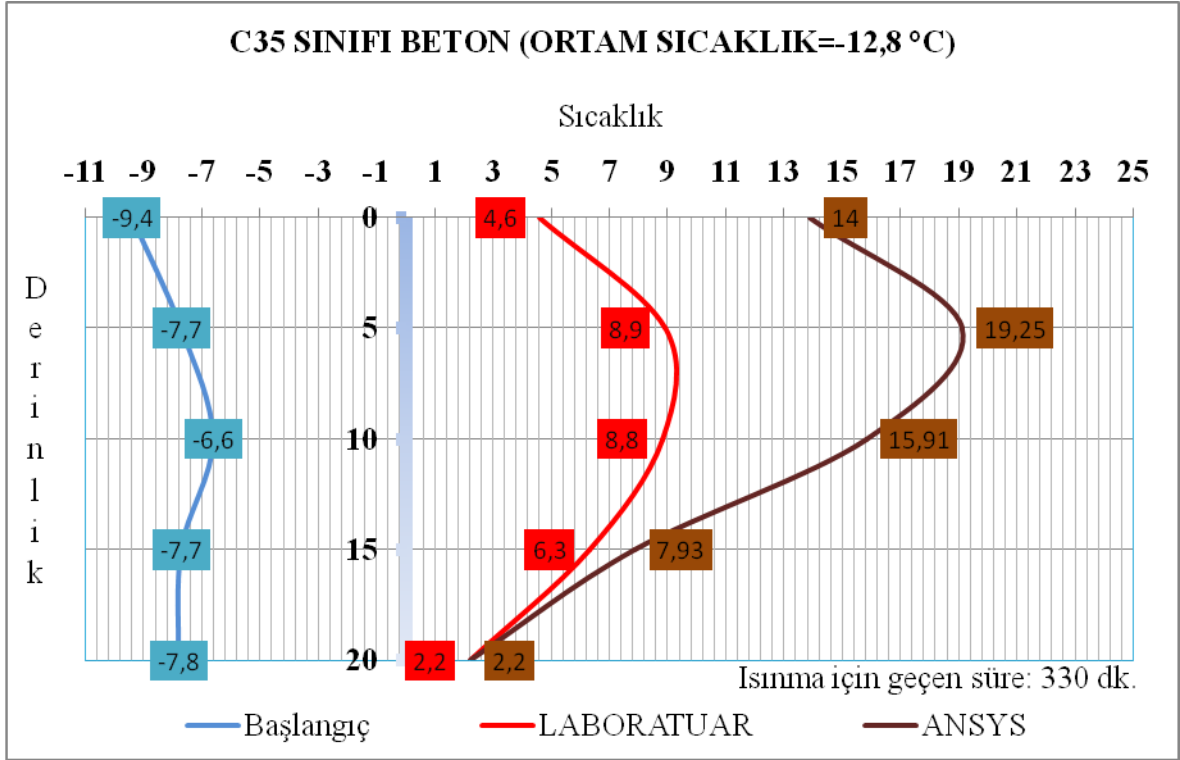
Şekil 45. C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



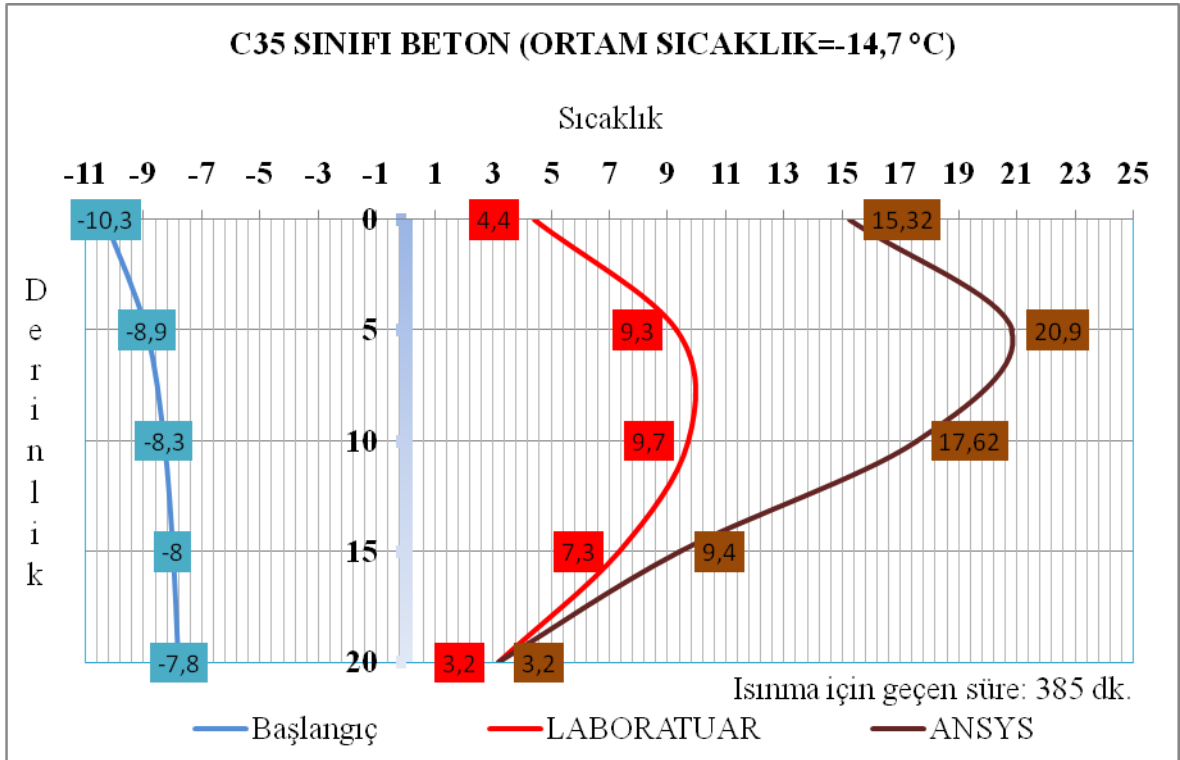
Şekil 46. C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C)



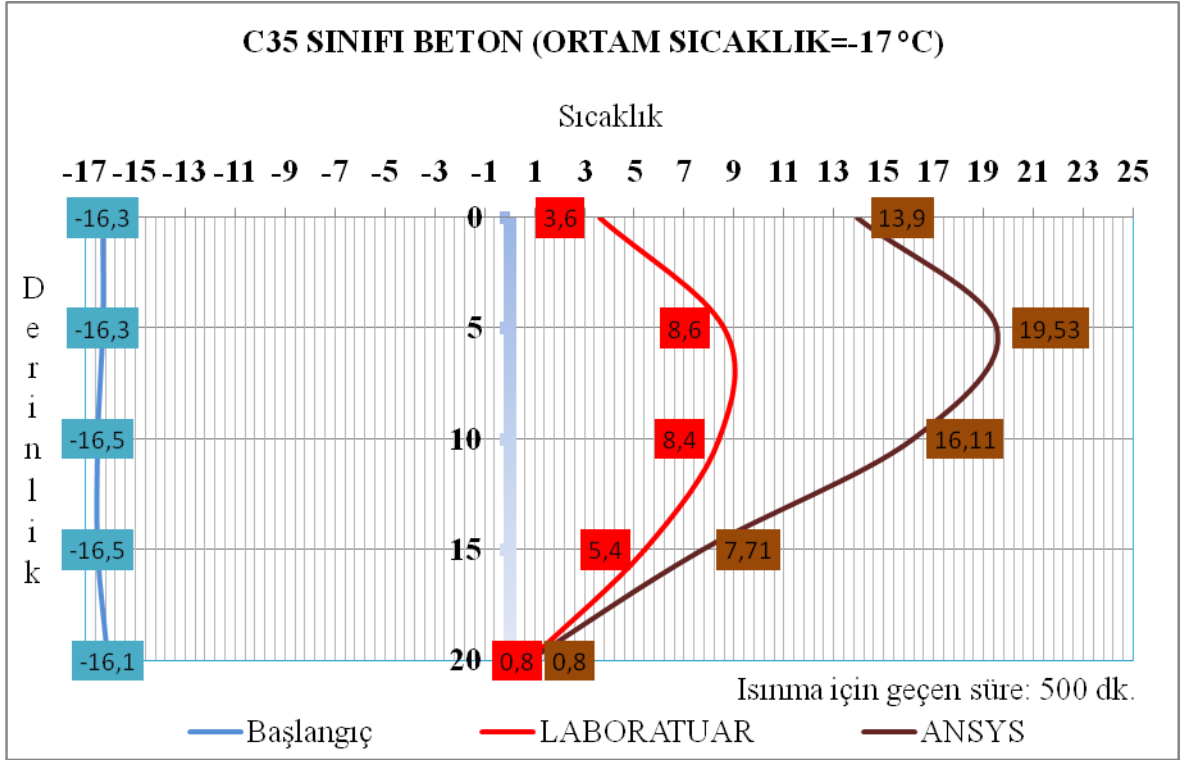
Şekil 47. C30 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)



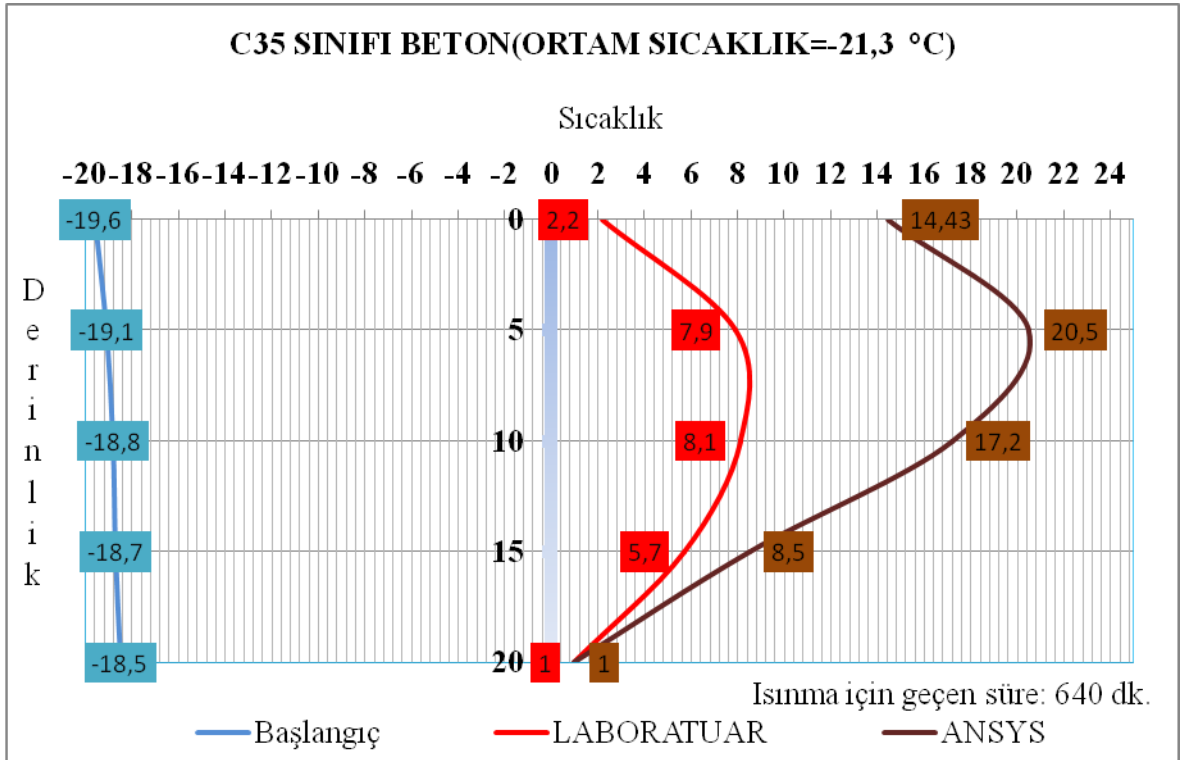
Şekil 48. C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-12,8 °C)



Şekil 49. C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-14,7 °C)



Şekil 50. C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-17 °C)



Şekil 51. C35 betonu Ansys sıcaklık dağılımı (-21,3 °C)

Ansys termal analiz sonuçları ile laboratuvar deney sonuçları arasında oluşan sıcaklık farkı yaklaşık 12 °C'dir. Bu farkın temel nedeni ısıtıcı güç miktarı, betonların farklı ısı iletim katsayıları ve özgül ısılarıdır. Laboratuvar ortamında kullanılan betonların ısı özelliklerinin belirlenebilme imkanının olmaması, Ansys'te termal analiz yaparken malzeme bilgilerinin literatürden alınmasını gerektirmiştir. Ancak analiz sırasında ısıtıcı için belirlediğimiz 132 Watt güç değeri azaltılarak 100 Watt'a kadar düşürülmüş ve sonuçların laboratuvar deney sonuçlarına yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, Ansys ile laboratuvar çalışması arasındaki temel farkın, ısıtıcı gücünün büyüklüğüne bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Nitekim oda sıcaklığında yapılan ısıtıcı kablo yüzey sıcaklığı ölçümünde 132 Watt güç karşılığında 65 °C sıcaklık elde edilmiştir. Ancak laboratuvar ortamında soğumaya bırakılan beton, içerisindeki kabloyla birlikte soğumuş ve ısıtma sürecinde kablo, önce 132 Watt güçle kendini ısıtmaya çalışmış daha sonra ısıyı betona iletmeye başlamıştır. Halbuki Ansys'te soğuma işlemi söz konusu değildir. Verilen ısıtıcı gücü analiz başladığında betona etki etmekte ve analiz süresi boyunca bu durum sürmektedir. Yapılan bu termal analizin çalışmamıza en önemli katkısı laboratuvar deneylerini süre anlamında destekler nitelikte olmasıdır. Yani bir beton plaka maruz bırakıldığı hava koşullarında soğuyacak ve tekrar ısıtılacaksa yüzeyde oluşacak sıcaklıklar için laboratuvar deney koşullarında alınan veriler daha gerçekçidir.

4.4. Ansys Statik Analiz Sonuçları

3 farklı beton sınıfı için 4 farklı sıcaklıkta toplam 12 statik analiz yapılmış ve en büyük gerilmeler -21,3 °C sıcaklığa maruz bırakılıp ısıtılan betonlarda oluşmuştur. Bu yüzden sadece üç durum için alınan sonuçlardan bahsedilecektir. Ansys sonlu elemanlar programında yapılan statik analiz sonucunda, beton numunelerde sadece sıcaklık değişiminden dolayı belirli bölgelerde çekme ve basınç gerilmeleri oluşmuştur. Buna bağlı olarak numunelerde şekil değiştirmeler meydana gelmiştir. Isıtıcı kabloların yüzeye yakın mesafeye yerleştirilmesi, numunelerin genelinde yüzey sıcaklıklarının tabandakinden daha fazla olmasına sebep olmuştur. Bu yüzden numunelerdeki şekil değişimi, yüzey kısmın genişlemesi ve tabanın daralmasıyla sonuçlanmıştır. Bu şekil değişikliği maksimum çekme gerilmelerinin yüzeyde meydana gelmesine sebep olmuştur.

Beton numunelerin basınç dayanımlarının C25 (41 MPa), C30 (45 MPa) ve C35 (57 MPa) olarak bulunduğu önceki bölümlerde anlatılmıştır. Eğilmede çekme dayanımları (2) ve (3) nolu formülasyonlardan faydalanılarak hesaplanmış ve C25 için (4,48 MPa), C30 için (4,70 MPa) ve C35 için (5,28 MPa) olarak bulunmuştur. Sadece sıcaklık değişiminden dolayı oluşan çekme ve basınç gerilmeleri betonların kendi çekme ve basınç dayanım değerleri ile birlikte Tablo 19’da gösterilmektedir.

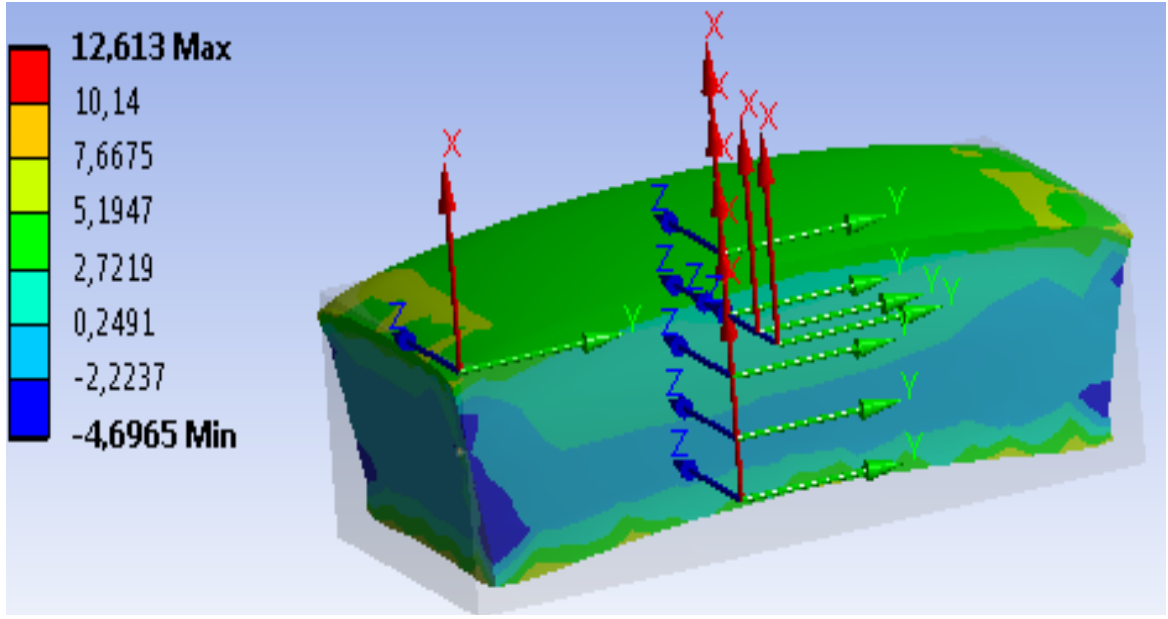
Tablo 19. Statik analiz sonucunda oluşan gerilme ve şekil değiştirme miktarları

Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Basınç Gerilmesi (MPa)	<u>X</u> Yönündeki Değişim (mm)	<u>Y</u> Yönündeki Değişim (mm)	<u>Z</u> Yönündeki Değişim (mm)
C25	41	4,48	4,25	21,5	$8,03 \times 10^{-2}$	$1,68 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$
C30	45	4,70	4,17	21,26	$7,61 \times 10^{-2}$	$8,71 \times 10^{-3}$	$1,24 \times 10^{-2}$
C35	57	5,28	4,09	19,77	$6,77 \times 10^{-2}$	$6,81 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-2}$

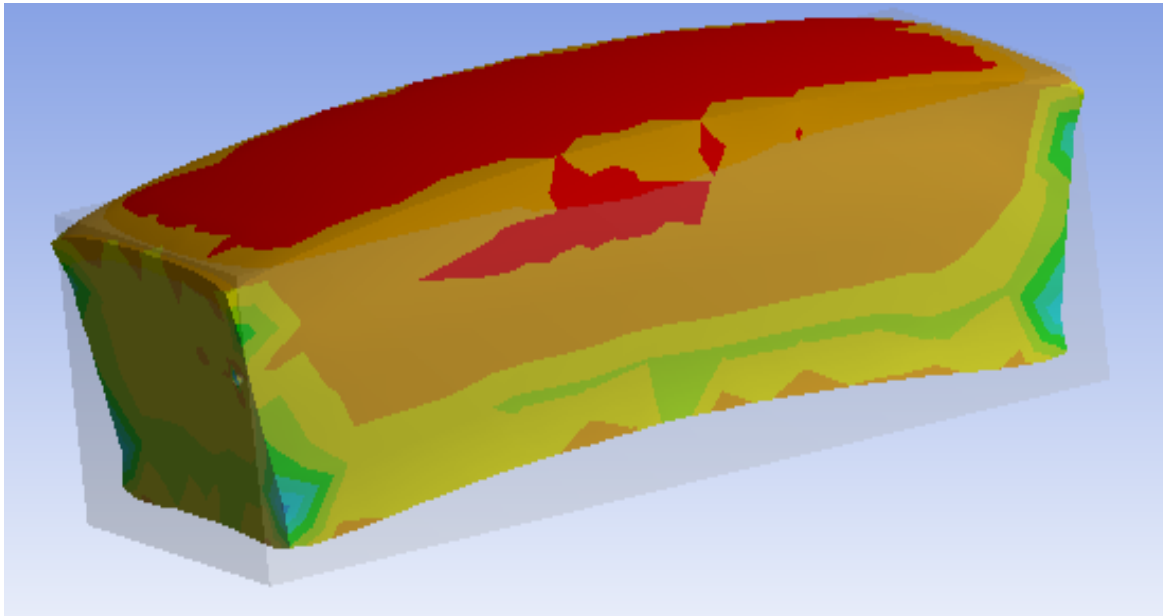
Sıcaklık değişiminden ötürü C25 betonunda oluşan maksimum çekme gerilmesi kendi çekme dayanımı olan 4,48 MPa değerine oldukça yakındır. Bu nedenle beton yüzeyinde çatlaklar oluşabilir. Aynı durum C30 betonu için de geçerlidir. Ancak C35 betonunun 5,28 MPa’lık çekme dayanımı analiz sonucunda elde edilen maksimum çekme gerilmesinden fazladır. Bu yüzden betonda sıcaklık farkından ötürü çatlaklar oluşmayabilir. Laboratuvar ortamında yapılan deneyler sonucu, beton numuneler çıplak gözle incelenmiş ve bu 3 betonda da herhangi bir çatlak gözlenmemiştir.

Statik analiz sonucu oluşan şekil değiştirmeler neticesinde X, Y ve Z doğrultularındaki yer değiştirme mesafeleri incelendiğinde mm’nin yüzde biri kadar bir değişim olduğu anlaşılmıştır. Beton numunenin, havaalanı kaplamasının derz bölgesinin bir parçası olduğu düşünülecek olursa özellikle Z ve Y doğrultularındaki uzamaların derzler arası mesafeyi etkilemeyecek boyutta olduğunu söyleyebiliriz. Ancak bu durum, mevcut numune boyutlarından elde edilen bilgiye dayanılması halinde söz konusu olmaktadır.

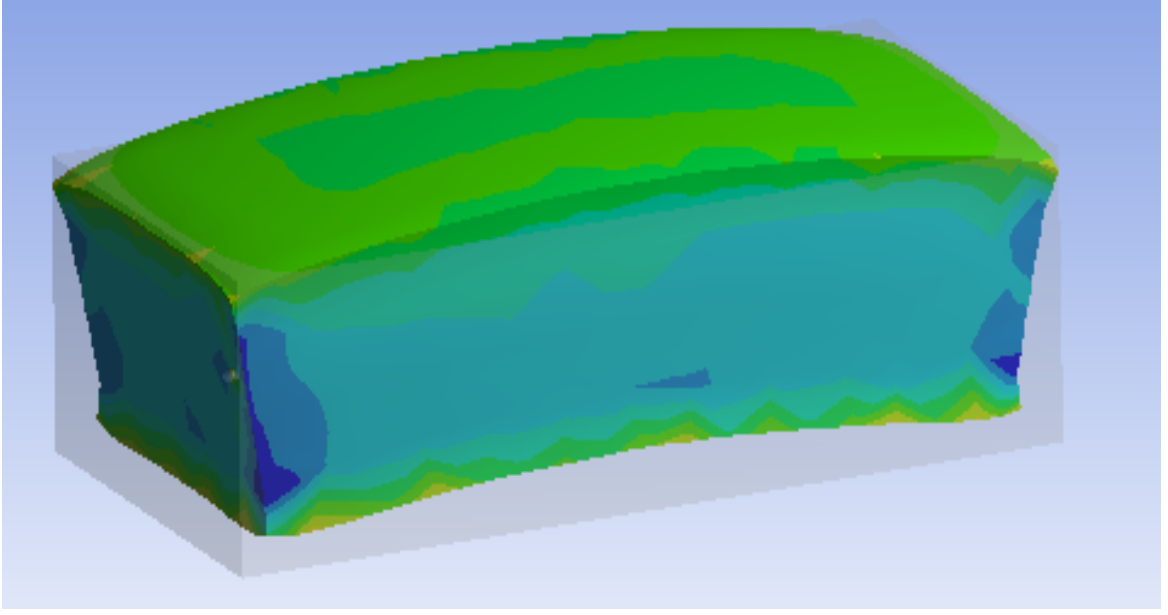
Sonuç olarak 41 MPa ve 45 MPa basınç dayanımına sahip betonlarda mevcut şartlarda oluşacak sıcaklık değişiminden dolayı meydana gelen çekme gerilmelerinin karşılanabilmesi için beton numunelerde donatı kullanılabilir. Ancak 57 MPa basınç dayanımına sahip beton numunelerde fazladan bir donatıya gerek olmayabilir.



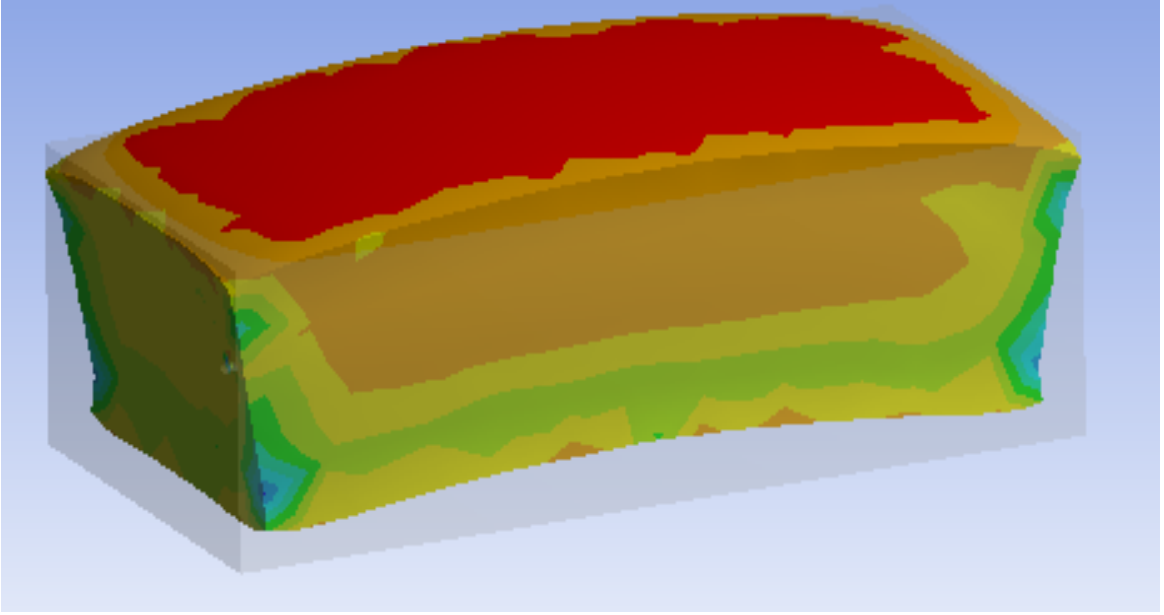
Şekil 52. C25 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)



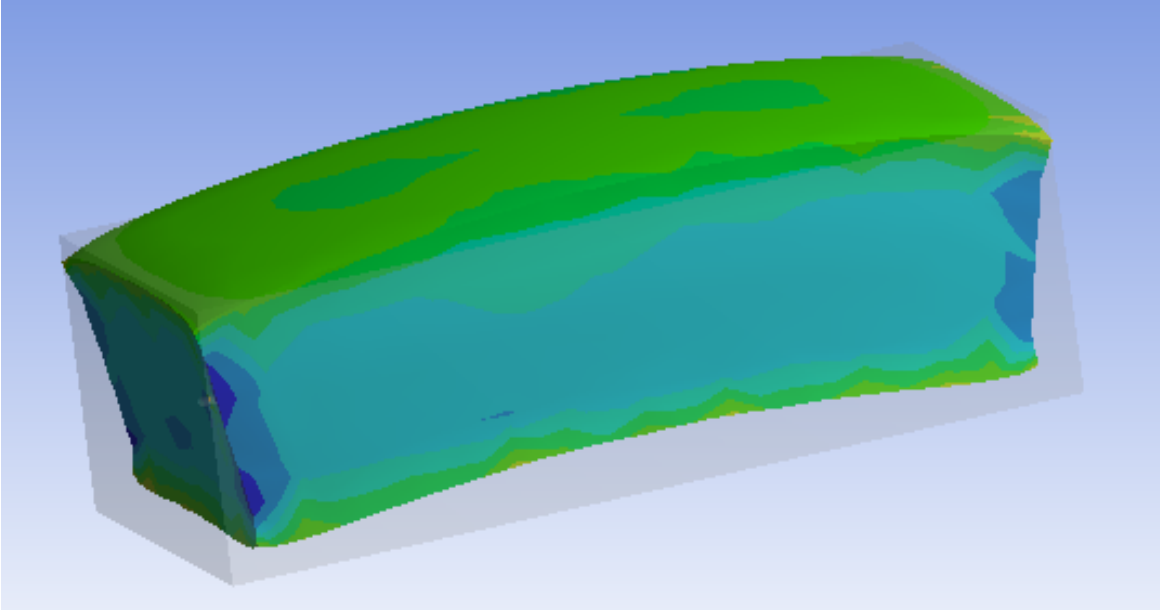
Şekil 53. C25 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)



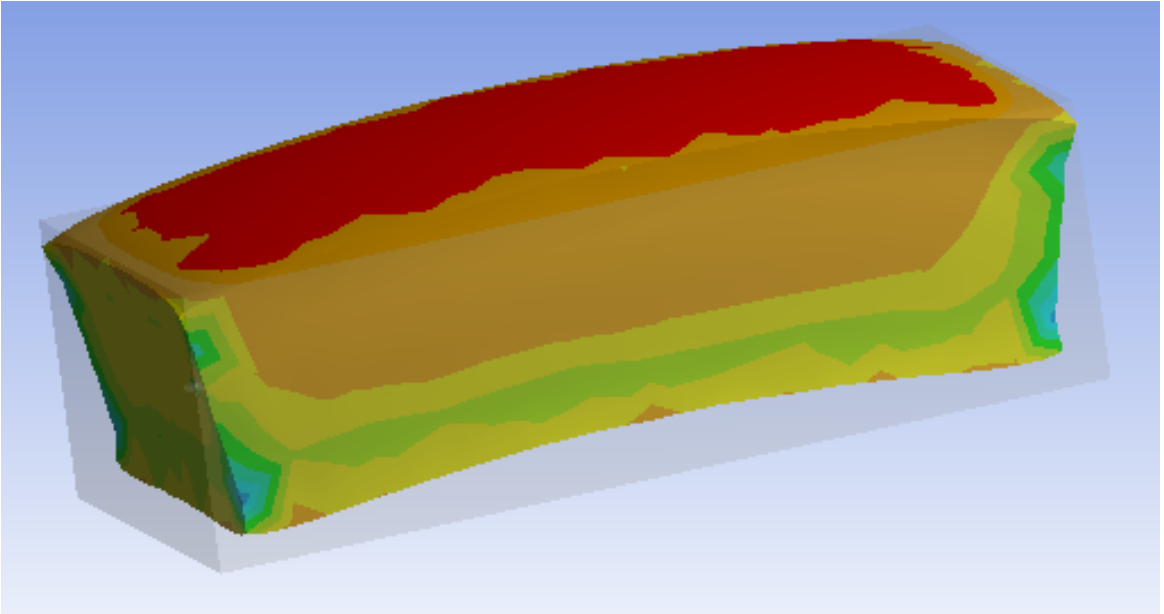
Şekil 54. C30 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)



Şekil 55. C30 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)



Şekil 56. C35 betonu Ansys'teki çekme gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)



Şekil 57. C35 betonu Ansys'teki basınç gerilmesi dağılımı (-21,3 °C)

4.5. Yapılan Çalışmaların Literatürle İrdelenmesi

Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde, elektrikli kablo, yüzeyden 7 cm aşağıya 5 cm aralıklarla yerleştirilmiş ve numune boyutu 350x700x200 mm olarak belirlenerek 41, 45 ve 57 MPa basınç dayanımına sahip 3 farklı özellikte beton üretilmiştir. Kaplama yüzey alanı 0,245 m² olup, kabloya verilen gücün 132 Watt olduğu düşünülecek olursa kaplama yüzeyinde 538 W/m²'lik güç yoğunluğu oluşturulmuştur. Bu güç yoğunluğuyla, beton kaplama içinde ve yüzeyindeki düşük sıcaklıklar belirli sürelerde artırılmıştır. Çalışmamız, literatürdeki çalışmaları kapsamakla birlikte çok daha düşük sıcaklıkları da içermektedir. Numune yüzeyinde buzlanmanın oluşmaması için gereken minimum sıcaklık aralığına (0 ile 4 °C) ulaşabilmek için -12,8 °C ortam sıcaklığına maruz bırakılan betonlardaki ısınma süresi en az 330 dk, -14,7 °C'de 385 dk, -17 °C'de 500 dk ve son olarak -21,3 °C'de ise 640 dk olarak bulunmuştur. Yüzeydeki başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasındaki fark en az 14 °C'dir. Bu çalışmada, sıcaklık farkından dolayı beton numunelerde oluşan gerilmelerin hesabı yapılırken en soğuk ortama (-21,3 °C) bırakılarak ısıtılan numunelerin gerilme sonuçları sunulmuştur. Yapılan bu uygulamanın sebebi, beton plakların alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkının artmasının oluşacak gerilmeleri artırmasıdır (Wastergaard, 1948). Çalışmamız da literatürdeki çalışmalardan farklı olarak Ansys'te termal ve statik analizler de yapılmıştır.

Zhao vd., tarafından yapılan deneysel çalışmada 47,1 MPa basınç dayanımına sahip 1000x200x250 mm boyutlarında bir beton numune kullanılmış, ısıtıcı kablo yüzeyin 4 cm altına ve 5 cm aralıklarla yerleştirilmiş ve Tablo 10'daki veriler alınmıştır. Bu verilere göre yaklaşık 500 W/m² güç yoğunluğuyla 360 dk'lık bir ısıtma sonucunda ortam sıcaklığı -4 °C iken yüzey sıcaklığı -3 °C'den 6 °C'ye çıkarılmıştır. Açık havada yapılan bu deneyde Beaufort rüzgar ölçeği değerin 2 olduğu kabul edilmiştir (Zhao vd., 2010).

Yapılan başka bir çalışmada beton içerisine tıraşlanmış çelik parçaları konarak oluşturulan numunelere 520 W/m²'lik güç yoğunluğu uygulanarak 30 dk içerisinde yüzey sıcaklığı -1,1 °C'den 15,6 °C'ye çıkarılmıştır (Yehia ve Tuan, 1998). Bu tıraşlanmış çeliklerin betona yerleştirilmesi, betonun ısı iletim kalitesini artırmış ve bu sayede kısa sürede ısınmalar gerçekleşmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, havaalanlarında kar ve buzla mücadelede beton kaplamaların ısıtılması için elektrikli kablo ile ısıtma yönteminin laboratuvar ortamında ve sonlu elemanlar yönteminde üç farklı beton sınıfı (C25, C30, C35) için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu numuneler dört farklı sıcaklığa (-12,8 °C, -14,7 °C, -17 °C ve -21,3 °C) tabi tutulup, ısıtıcı kabloya elektrik vermek suretiyle numunelerin yüzeyindeki sıcaklıklar ölçülmüştür. Numunelerin yüzeyindeki sıcaklığın, kar ve buz oluşumunun engellenmesi için gerekli olan minimum sıcaklık aralığına (0 ile 4 °C) erişim süreleri, üç beton sınıfı için tespit edilmiştir. Çalışmanın sonunda bu sıcaklık değişimlerinin beton numunelerde oluşturabileceği gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler sonlu elemanlar programında statik analiz yapılarak belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

1. Beton kaplamaları ısıtmanın, kar ve buzla mücadelede kullanılabilir bir yöntem olduğu göz önünde bulundurulabilir.

2. Laboratuvar ve sonlu elemanlar çalışması, beton kaplama tabakası boyunca bütün numuneler için sıcaklığın eksponansiyel olarak değiştiğini göstermiştir. Çalışılan 4 farklı sıcaklıkta (-12,8 °C, -14,7 °C, -17 °C, -21,3 °C) beton numunelerin toplam ısınma sürelerinin sırasıyla (330, 385, 540 ve 640 dk) olduğu ve her beton sınıfı için bu sürelerin benzerlik taşıdığı anlaşılmıştır.

3. Havaalanı beton kaplamalarında, ısıtma süreleri açısından çalışmamızda kullanılan beton sınıflarının farklı olmasının önemli olmadığı söylenebilir.

4. Beton kaplamalı havaalanlarında ısıtıcı kablolarla buzlanmanın engellenmesi istendiğinde meteoroloji bölge müdürlüklerinden tahmini hava sıcaklıkları alınarak bu sistem önceden çalıştırılır ve beklenen düşük hava sıcaklıkları için önlem alınabilir.

5. Çalışmamızın bu konuya olan katkısı ne kadar süre önce sistemin çalıştırılması gerektiği hakkında bize bilgi vermesidir.

6. Sadece ısıtma sürecinde (uçak yükleri hariç) kaplama yüzeyinde oluşabilecek çekme gerilmeleri göz önünde bulundurulduğunda, C25 (41 MPa) ve C30 (45 MPa) beton kaplamalarında yüzeyde çatlama ihtimali olacağı ve bundan dolayı yüzeye donatıların koyulması gerekebileceği; C35 (57 MPa) betonda donatıya ihtiyaç olmayacağı anlaşılmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Akpınar, M. V., 2000. Defining Roller Compactor Position and Slope of Tapered Surface in a Longitudinal Joint Construction Using 2-D Finite Element Model, PhD, Kansas State University, Kansas.
- Akpınar, M. V., Hancock, J., Hossain, M. ve Gisi, A. J., 2001. Theoretical Investigation of Cross Tensioned Concrete Pavement, 7th International Conference on Concrete Pavements, Orlando, Florida, USA.
- Akpınar, M. V., 2008. Effects of Truck Load Position on Longitudinal Joint Deterioration, Indian Journal of Engineering Material Science, 15, 41-50.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. ve Khoury, G.A., 2003. Microstructure-Solid Phases, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Italy.
- Anderberg, Y., 2003. Thermal Properties and Analysis, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Italy.
- Aoki K., Hattori, M. ve Ujiie, T., 1998. Snow Melting by Heating from the Bottom Surface, The Japan Society of Mechanical Engineer International Journal, 269.
- Ashrae, 1999. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Handbook of HVAC Applications, Atlanta.
- ASTM C-78, 2010. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete.
- Bazant, Z. P. ve Kaplan, M. F., 1996. Concrete at High Temperatures, Longman Group Limited, London.
- Bienert, W. B., Pravda, M. F., Suelau, H. H. ve Wolf, D. A., 1974. Snow and Ice Removal from Pavements Using Stored Earth Energy, Report FHWA-RD-75-6, U.S. Department of Transportation.
- Boyd, T., 2003. New Snow Melt Projects in Klamath Falls, Geo-Heat Center, Quarterly Bulletin.
- Brinkman, C. P., 1975. Space Age Technology for Deicing Hazardous Highway Locations, Public Roads, 89-95.
- Cress M. D., 1995. Heated Bridge Deck Construction and Operation in Lincoln, Nebraska. IABSE Symposium, San Francisco, 449-454.
- DHMI, Temmuz 2006. Havaalanları Pist Yüzey Şartları Yönergesi.
- FAA, 1995. Airport Pavement Design and Evaluation, AC 150/5320-6D.

- FAA, 2009. Airport Pavement Design and Evaluation, AC 150/5320-6E.
- FAA, 2011. Airside Use of Heated Pavement System, AC 150/5370-17.
- Ficenec, J. A., Kneip, S. D., Tadros M. K. ve Fischer L. G., 1993. Prestressed Spliced I Girders: Tenth Street Viaduct Project, Lincoln, PCI Journal, Nebraska, 38-48.
- Heated Pipes Keep Deck Ice Free, 1998. ASCE, 68, 1, 19-20.
- Henderson, D. J., 1963. Experimental Roadway Heating Project on a Bridge Approach, Highway Research Records, 14-23.
- Hopstock, D. M., 2003. Microwave-Absorbing Road Construction and Repair Material, Final Report to NRRI on Idea Evaluation Subcontract.
- Hopstock, D. M. ve Zanko, L. M., 2005. Minnesota Taconite as A Microwave-Absorbing Road Aggregate Material for Deicing and Pothole Patching Applications, Final Report.
- Horonjeff, R. ve McKelvey F. X., 1994. Planning and Design of Airports, U.S.A..
- ICAO, 1983. Aerodrome Design Manual, Part 3-Pavement, Second Edition.
- ICAO, 1999. Aerodromes-Annex 14, Aerodrome Design and Operations.
- Ichiyama, T. ve Magome, T., 2007. Snow Melting Panel, U.S. Patent No. 7, 261, 145, B2, Washington D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
- Kaya, A.G., 2011. Karayolu Tabakalarında Plaka Yükleme Deneyinin Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Kaya, A.G. ve Akpınar, M. V., 2011. Research on Feasibility of Plate Loading Testing on Highway Pavement Layers, International Participated Construction Congress, Elazığ, Turkey.
- Kodur, V. K. R. ve Sultan, M. A., 2003. Effect of Temperature on Thermal Properties of High Strength Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 15, 101-107.
- Long, D. C. ve Baldwin, J. S., 1980. Snow and Ice Removal from Pavement Using Stored Earth Energy, Report FHWA-TS-80-227, U.S. Department of Transportation.
- Lund, J. W., June 2000. Pavement Snow Melting, Geo-Heat Center, GHC Bulletin.
- Minsk, L. D., 1971. Electrically Conductive Asphaltic Concrete, U.S. Patent No. 3, 573, 427. Washington D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
- Neville, A.M., 2000. Properties of Concrete, Fourth Edition, New York/USA.

- Nydahl, J., Pell, K., Lee, R. ve Sackos, J., 1984. Evaluation of An Earth Heated Bridge Deck, University of Wyoming, Larime.
- Özcanan, S., 2011. Tekerlek ve Aks Konfigürasyonuna Bağlı Olarak Yolda Oluşan Deformasyonların Sonlu Elemanlarla Analizi, Yüksek Lisans, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Petrenko V. ve Sullavan C., 2003. Methods and Systems for Removing Ice from Surfaces, US Patent No. 6, 653, 598, B2, Washington D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
- Sugarawa, N., 1998. Energy Saving Characteristics of a New Type of Road-Heating System, Atmospheric Research, 113-122.
- T.C. Resmi Gazete, 1983. 2920 Sayılı Türk Sivil Havacılık Kanunu, 18196.
- T.S.E., TS 500, Şubat 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara.
- Tuan, C. Y. ve Yehia, S., 2004. Evaluation of Electrically Conductive Concrete Containing Carbon Products for Deicing, ACI Materials Journal, 101, 4, 287–293.
- Tuan, C. Y., 2008. Roca Spur Bridge: The Implementation of An Innovative Deicing Technology, Journal of Cold Regions Engineering, 22, 1, 1–15.
- Tunç, A., 2002. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, Ankara.
- Tunç, A., 2003. Havaalanı Mühendisliği ve Uygulamaları, Asil Yayın Dağıtım, 1. Baskı, Ankara.
- Tunç, A., 2007. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayınevi, İstanbul.
- Walker, L., 2000. Snow and Ice Melting Blanket Device, U.S. Patent No. 6, 051, 812, Washington, D.C.: U.S. Patent and Trademark Office.
- Wastergaard, H. M., 1948. New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields, ASCE, 133.
- Xie, P. ve Beaudion, J. J., 1995, Electrically Conductive Concrete and Its Application in Deicing, Advances in Concrete Technology Proceedings Second CANMET/ACI International Symposium, Las Vegas, Nevada, 399-417.
- Yang, Z., Yang, T., Song, G. ve Singla, M., 2012. Experimental Study on an Electrical Deicing Technology Utilizing Carbon Fiber Tape, 48.
- Yehia, S. ve Tuan, C. Y., 1998. Bridge Deck Deicing, Transportation Conference Proceedings, Iowa, USA, pp. 51–57.

Yehia, S. ve Tuan, C. Y., 1999. Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing, ACI Materials Journal, 96, 3, 382–390.

Zenewitz, J. A., 1977. Survey of Alternatives to the Use of Chlorides for Highway Deicing, Report No. FHWA-RD-77-52.

Zhao, H., Wang, S., Wu, Z. ve Che, G., 2010. Concrete Slab Installed With Carbon Fiber Heating Wire for Bridge Deck Deicing, Journal of Transportation Engineering, 500–509.

URL 1. <http://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=ISTANBUL#sfB> 20 Eylül 2013

URL 2. <http://www.magicsalt.info/magic%20salt.htm> 13 Nisan 2013

URL 3. <http://www.devi.com> 4 Mart 2013

URL 4. <http://www.engineeringtoolbox.com> 6 Ekim 2013

7. EKLER

Bu bölümde laboratuvar ortamında yapılan bütün deneylerin sıcaklık kayıt grafikleri mevcuttur ve 1 adet CD halinde sunulmuştur. Grafiklerde dikey eksen sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), yatay eksen zamanı ifade etmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Tervfik SEFEROĞLU, 1986 yılında Erzurum’da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise tahsilini Erzurum’da tamamladıktan sonra 2004 yılında Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2009 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2010 yılında vatani görevini yerine getirdikten sonra 2011 yılında Gümüşhane Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2013 yılından itibaren görevine Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde araştırma görevlisi olarak devam etmekte olan Mehmet Tervfik SEFEROĞLU, yabancı dil olarak iyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir erkek çocuk babasıdır.