

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

77670

~~77530~~

DEĞİŞİK SOĞUTMA DURUMLARINDA DİK KOMPOZİT
PLAKALARDA SICAKLIK DAĞILIMININ ZAMANA BAĞLI
OLARAK ARAŞTIRILMASI

MEHMET DURANAY

77670

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

1998

ELAZIĞ

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞİK SOĞUTMA DURUMLARINDA DİK KOMPOZİT PLAKALARDA SICAKLIK
DAĞILIMININ ZAMANA BAĞLI OLARAK ARAŞTIRILMASI

MEHMET DURANAY

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 23/10/1998 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu İle Başarılı/Başarısız Olarak
Değerlendirilmiştir.

(İmza)

(İmza)

(İmza)

Danışman

Pof.Dr.Kazım Pıhtılı

Pof.Dr.Onur Sayman

Yrd.Doç.Dr.Mustafa İnallı



ÖZET

Doktora Tezi

DEĞİŞİK SOĞUTMA DURUMLARINDA DİK KOMPOZİT PLAKALARDA
SICAKLIK DAĞILIMININ ZAMANA BAĞLI OLARAK ARAŞTIRILMASI

Mehmet DURANAY

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

1998, Sayfa: 205

Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodu kullanılarak "L" şeklinde birleştirilmiş kompozit plakaların soğuma durumları incelenmiştir.

Kompozit plaka olarak Çelik-Bakır, Çelik-Alüminyum, Çelik-Pirinç ve Pirinç-Bakır malzeme çiftleri seçilmiştir. Malzeme kalınlığı 1mm, 2mm, 3mm, 4mm alınarak ayrı ayrı çözümler yapılmıştır. Ayrıca soğutma ortamları da değiştirilerek farklı ortamlarda soğumanın etkileri araştırılmıştır.

Farklı malzemeler için, birleşme bölgelerine yakın elemanlarda 44°C'yi bulan sıcaklık farklılıkları tesbit edilmiştir. Birleşme bölgesinde yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa bir geçiş bölgesi olduğu görülmüştür. Bu bölge her iki malzeme çifti yönünde toplam 27-35mm kalınlığında olduğu tesbit edilmiştir.

Araştırmada deneysel ve sayısal çözüm sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER : Kompozit levha, L şeklinde levha, soğutma ortamı, sonlu elemanlar metodu.

ABSTRACT

PhD Thesis

AN INVESTIGATION OF TIME DEPENDENT TEMPERATURE DISTRIBUTION
ON VERTICAL COMPOSITE PLATES FOR VARIOUS COOLING CONDITIONS

Mehmet DURANAY

Fırat University

Graduate Scholl of Natural And Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

1998, Page: 205

In this study, using the Finite Element Method (FEM), the cooling proces of L-shaped two contacted composite plates have been investigated numerically and experimentally.

As working composite plates the couple of Fe-Cu, Fe-Al, Fe-Brass, and Brass-Cu have been selected. For the study, the thickness of the plates 1mm, 2mm, 3mm, 4mm have been taken. Further, the effect of cooling medium on the cooling process has been investigated.

For the different materials, in the elements close to the contact region, some temperature differences up to 43°C have been observed. In the contact region, it has been observed that a transient region from the higher temperature to the lower which having 27-35 mm wideness along the both surface of plates have been formed.

It has been found that there was a good agreement between numerical and experimental results.

KEY WORDS : Composite materials, L-shaped plate, cooling process, Finite Element Method (FEM).

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılabilmesini ve yürütülmesini sağlayan ve her türlü yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof.Dr. Kazım PIHTILI'ya sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Tez süresince çalışmalarımda yol gösteren, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof.Dr. Onur SAYMAN'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarımda bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım Prof.Dr. Tevfik AKSOY, Yrd.Doç.Dr. İhsan DAĞTEKİN, Yrd.Doç.Dr. Mustafa İNALLI, Doç.Dr. Mehmet CEBECİ Arş.Gör. Mustafa TOPARLI'ya teşekkür ederim.

Mehmet DURANAY
Makina Yük. Mühendisi

ÖZET
ABSTRACT

TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ

TABLolar LİSTESİ

SİMGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. SONLU ELEMANLAR METODU	7
3.1. Genel Bilgiler	7
3.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanışı	8
3.3. Cismin Sonlu Elemanlara Bölünmesi	9
3.3.1. Çeşitli sonlu eleman tipleri	9
3.3.2. İzoparametrik sonlu elemanlar	11
3.3.3. Sonlu eleman ağının elde edilmesi	12
3.4. İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçilmesi	13
3.4.1. Bir değişkenli interpolasyon fonksiyonu	14
3.4.2. İki değişkenli interpolasyon fonksiyonu	15
3.4.3. Tek boyutlu elemanlarda interpolasyon fonksiyonu olarak Lagrange Polinomlarının kullanılması	17
3.4.4. İki boyutlu elemanlarda interpolasyon fonksiyonu olarak Larange Polinomlarının kullanılması	20
4. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON.....	24
4.1. Problemin Tanımı.....	24
4.2. Problemin Çözümünde Kullanılan Temel Isı Transfer İfadeleri .	25
4.2.1. Temel kondüksiyon denklemi.....	25
4.2.2. Temel ısı taşınımı denklemi.....	27
4.2.3. Hidrodinamik Sınır Tabaka	28
4.2.4. Isıl Sınır Tabaka	31
4.2.5. Doğal Taşınım.....	33
4.2.6. Düşey levhalarda doğal taşınım ile ısı transferi.....	34
4.2.7. Boyutsuz Parametreler	36

4.2.8.	Doğal taşınım için sınır tabaka denklemleri	40
4.3.	Matematiksel Formülasyon	42
4.4.	İzoparametrik Formülasyon	44
4.5.	Sonlu Eleman Formülasyonu	47
5.	SAYISAL ÇÖZÜM SONUÇLARI	53
5.1.	Sonlu Eleman Ağıının Üretilmesi (Mesh Generation)	53
5.2.	Sonlu Eleman Ağıında Düğüm Sayısı Optimizasyonu.	55
5.3.	Başlangıç Şartları ve Kritik Dğümler	57
5.4.	Farklı Soğutma Ortamlarına Bırakılan Çelik-Bakır Kompozit Plakada Sıcaklık Dağılımının Araştırılması.....	60
	a) Havada Soğutma	60
	b) Suda Soğutma	66
	c) Yağda Soğutma	79
	d) Su Püskürtme ile Soğutma	90
5.5.	Kompozit Plakada Sıcaklık Dağılımının Malzeme Kalınlığına Bağılı Olarak Değişimi	102
5.5.1.	Çelik-Bakır kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağılı olarak değişimi.....	102
	a) Havada Soğutma	102
	b) Durgun Suda Soğutma	107
	c) Yağda Soğutma	111
	d) Su Püskürtme ile Soğutma	115
5.5.2.	Çelik-Aluminyum kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağılı olarak değişimi.....	120
	a) Durgun Suda Soğutma	120
	b) Yağda Soğutma	125
	c) Su Püskürtme ile Soğutma	129
5.5.2.	Çelik-Pirinç kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağılı olarak değişimi.....	134
	a) Havada Soğutma	134
	b) Suda Soğutma	138
	c) Yağda Soğutma	143
	d) Su Püskürtme ile Soğutma	147
5.5.4.	Pirinç-Bakır kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağılı olarak değişimi.....	152
	a) Durgun Suda Soğutma	152
	b) Yağda Soğutma	156
	c) Su Püskürtme ile Soğutma	161
5.6.	Kompozit Plakalardaki Sıcaklık Dağılımına, Değişen Soğutma Ortamlarının Etkisinin Araştırılması	165

5.6.1.	Çelik-Bakır plakanın farklı ortamlarda soğutulması.....	165
5.6.2.	Çelik-Alüminyum plakanın farklı ortamlarda soğutulması.....	168
5.6.3.	Çelik-Pirinç plakanın farklı ortamlarda soğutulması.....	170
5.6.4.	Pirinç-Bakır plakanın farklı ortamlarda soğutulması.....	173
5.7.	Kompozit Plakalardaki Sıcaklık Dağılımının Malzeme Cinsi İle Değişimi	175
5.7.1.	Farklı malzeme çiftlerinin havada soğutulması.....	175
5.7.2.	Farklı malzeme çiftlerinin durgun suda soğutulması.....	176
5.7.3.	Farklı malzeme çiftlerinin yağda soğutulması.....	180
5.7.4.	Farklı malzeme çiftlerinin su püskürtme ile soğutulması.....	182
5.8.	Boyutsuz Sıcaklık ve Fourier Sayısı.....	184
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA	188
6.1.	Giriş	188
6.2.	Data Logger ve Özelliği	188
6.3.	Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı	189
6.4.	Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	189
7.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	193

KAYNAKLAR

EKLER

- EK-1.Düğüm Numaraları ve Koordinatları Kullanarak Otomatik Bölmeleme Yapan Program
- EK-2.Düğüm Numaraları ve Koordinatları Hesaplayan Programın Akış Şeması
- EK-3.Sıcaklık Dağılımını zamana Bağlı Olarak Hesaplayan Programın Akış Şeması

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Tek boyutlu elemanlar	9
Şekil 3.2. Çeşitli iki boyutlu elemanlar.	10
Şekil 3.3. Çeşitli üç boyutlu elemanlar.	10
Şekil 3.4. Dönel elemanlar.....	11
Şekil 3.5. Üçgen sonlu elemanlara bölünmüş bir malzeme.	11
Şekil 3.6. Levhanın çeşitli sayıda izoparametrik sonlu elemanlara bölünmesi	13
Şekil 3.7. İncelenen levhanın 219 izoparametrik sonlu elemanlara bölünmesi	14
Şekil 3.8. Çeşitli üçgen elemanlar.....	16
Şekil 3.9. Çeşitli dörtgen elemanlar	16
Şekil 3.10. Elemanın düğümleri ikiden dörde kadar değişebilen çubuk eleman	19
Şekil 3.11. İki boyutta transformasyon	21
Şekil 3.12. Düğüm numaraları 4'den 9'a kadar değişebilen iki boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları	22
Şekil 3.13. İki boyutlu dört düğümlü eleman	23
Şekil 4.1. Araştırmada kullanılan kompozit levha	24
Şekil 4.2. Yatay bir levha üzerinde hidrodinamik sınır tabaka.....	28
Şekil 4.3. Düşey bir levha çevresinde doğal taşınım için hidrodinamik sınır tabaka.....	30
Şekil 4.4. Yatay bir levha üzerinde ısı sınır tabaka.....	32
Şekil 4.5. Düşey bir levha üzerinde sınır tabakanın gelişimi.	36
Şekil 4.6. Dört düğümlü ve iki boyutlu izoparametrik eleman	44
Şekil 4.7. Dört düğümlü ve iki boyutlu izoparametrik elemanın düğüm numaraları ve koordinatları.....	45
Şekil 5.1. Otomatik bölmelenmiş levha.	54
Şekil 5.2. Bazı elemanlar ve düğüm numaraları	54
Şekil 5.3. Değişik sayıda bölmeleme nedeniyle düşey yöndeki komşu düğümlerde sıcaklık değişimi.....	56
Şekil 5.4. Kompozit plakada incelenen eksenler.....	57
Şekil 5.5. Püskürtmede ısı transfer katsayısının değişimi	59
Şekil 5.6. Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümlerde oluşan sıcaklık farkı (Soğutma Ortamı: Hava).....	61
Şekil 5.7. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Hava)	63
Şekil 5.8. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Hava)	63
Şekil 5.9. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Hava)	65
Şekil 5.10. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Hava)	66
Şekil 5.11. Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümlerde oluşan sıcaklık farkı (Soğutma ortamı: Durgun su).....	68
Şekil 5.12. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Durgun su) ...	70

Şekil 5.13.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	71
Şekil 5.14.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	73
Şekil 5.15.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	73
Şekil 5.16.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	75
Şekil 5.17.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	76
Şekil 5.18.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	78
Şekil 5.19.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	78
Şekil 5.20.	Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümelerde oluşan sıcaklık farkı (Soğutma ortamı: Yağ).	80
Şekil 5.21.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)	82
Şekil 5.22.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)	82
Şekil 5.23.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)	84
Şekil 5.24.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)	85
Şekil 5.25.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)	87
Şekil 5.26.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)	87
Şekil 5.27.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)	89
Şekil 5.28.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)	90
Şekil 5.29.	Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümelerde oluşan sıcaklık farkı (Ortam: Su püskürtme).	91
Şekil 5.30.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)	93
Şekil 5.31.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)	94
Şekil 5.32.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)	96
Şekil 5.33.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)	96
Şekil 5.34.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)	98
Şekil 5.35.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümelerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)	99

Şekil 5.36.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)	101
Şekil 5.37.	Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)	101
Şekil 5.38.	Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	103
Şekil 5.39.	Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	103
Şekil 5.40.	Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	104
Şekil 5.41.	Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	104
Şekil 5.42.	Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).....	105
Şekil 5.43.	Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	105
Şekil 5.44.	Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	106
Şekil 5.45.	Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).	106
Şekil 5.46.	Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	107
Şekil 5.47.	Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	108
Şekil 5.48.	Çelik-Bakır Kompozit Levhada 157 Nolu Kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Su)	108
Şekil 5.49.	Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	109
Şekil 5.50.	Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	109
Şekil 5.51.	Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	110
Şekil 5.52.	Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	110
Şekil 5.53.	Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	111
Şekil 5.54.	Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ).....	112
Şekil 5.55.	Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	112
Şekil 5.56.	Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	113
Şekil 5.57.	Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	113
Şekil 5.58.	Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümdede sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	114

Şekil 5.59. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	114
Şekil 5.60. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	115
Şekil 5.61. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	115
Şekil 5.62. Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	116
Şekil 5.63. Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	117
Şekil 5.64. Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	117
Şekil 5.65. Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	118
Şekil 5.66. Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	118
Şekil 5.67. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	119
Şekil 5.68. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	119
Şekil 5.69. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	120
Şekil 5.70. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	121
Şekil 5.71. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	121
Şekil 5.72. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	122
Şekil 5.73. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	122
Şekil 5.74. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	123
Şekil 5.75. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	123
Şekil 5.76. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	124
Şekil 5.77. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	124
Şekil 5.78. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	125
Şekil 5.79. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	126
Şekil 5.80. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	126
Şekil 5.81. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	127

Şekil 5.82.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	127
Şekil 5.83.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	128
Şekil 5.84.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	128
Şekil 5.85.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	129
Şekil 5.86.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	130
Şekil 5.87.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	130
Şekil 5.88.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	131
Şekil 5.89.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	131
Şekil 5.90.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	132
Şekil 5.91.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	132
Şekil 5.92.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	133
Şekil 5.93.	Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	133
Şekil 5.94.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	134
Şekil 5.95.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	135
Şekil 5.104.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	135
Şekil 5.97.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	136
Şekil 5.98.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	136
Şekil 5.99.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	137
Şekil 5.108.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	137
Şekil 5.101.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)	138
Şekil 5.102.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	139
Şekil 5.103.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	139
Şekil 5.104.	Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	140

Şekil 5.105. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	140
Şekil 5.106. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	141
Şekil 5.107. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	141
Şekil 5.108. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	142
Şekil 5.109. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	142
Şekil 5.110. Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	143
Şekil 5.111. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	144
Şekil 5.112. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	144
Şekil 5.113. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	145
Şekil 5.114. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	145
Şekil 5.115. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	146
Şekil 5.116. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	146
Şekil 5.117. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	147
Şekil 5.118. Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	148
Şekil 5.119. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	148
Şekil 5.120. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	149
Şekil 5.121. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	149
Şekil 5.122. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	150
Şekil 5.123. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	150
Şekil 5.124. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	151
Şekil 5.125. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	151
Şekil 5.126. Pirinç-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	152
Şekil 5.127. Pirinç-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	153

Şekil 5.128. Pirinç-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	153
Şekil 5.129. Pirinç-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	154
Şekil 5.130. Pirinç-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	154
Şekil 5.131. Pirinç-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	155
Şekil 5.132. Pirinç-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	155
Şekil 5.133. Pirinç-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)	156
Şekil 5.134. Pirinç-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	157
Şekil 5.135. Pirinç-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	157
Şekil 5.136. Pirinç-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	158
Şekil 5.137. Pirinç-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	158
Şekil 5.138. Pirinç-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	159
Şekil 5.139. Pirinç-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	159
Şekil 5.140. Pirinç-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	160
Şekil 5.141. Pirinç-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)	160
Şekil 5.142. Pirinç-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	161
Şekil 5.143. Pirinç-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	162
Şekil 5.144. Pirinç-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	162
Şekil 5.145. Pirinç-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	163
Şekil 5.146. Pirinç-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	163
Şekil 5.147. Pirinç-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	164
Şekil 5.148. Pirinç-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	164
Şekil 5.149. Pirinç-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)	165
Şekil 5.150. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık:1mm)	166

Şekil 5.151. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)	166
Şekil 5.152. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)	167
Şekil 5.153. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)	167
Şekil 5.154. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)....	168
Şekil 5.155. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)	169
Şekil 5.156. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)	169
Şekil 5.157. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)	170
Şekil 5.158. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)	171
Şekil 5.159. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)	171
Şekil 5.160. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)	172
Şekil 5.161. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)	172
Şekil 5.162. Pirinç-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)	173
Şekil 5.163. Pirinç-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)	174
Şekil 5.164. Pirinç-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)	174
Şekil 5.165. Pirinç-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu d) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)	175
Şekil 5.166. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Hava)	176
Şekil 5.167. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Hava)	176
Şekil 5.168. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)	177
Şekil 5.169. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 0-0.3sn aralığı)	177
Şekil 5.170. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 0.4-1.0 sn aralığı)	178
Şekil 5.171. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 1.1-3.5 sn aralığı)	178

Şekil 5.172. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)	179
Şekil 5.173. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)	179
Şekil 5.174. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)	180
Şekil 5.175. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Yağ)	180
Şekil 5.176. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Yağ)	181
Şekil 5.177. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı: Yağ)	181
Şekil 5.178. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma Ortamı: Yağ)	182
Şekil 5.179. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:1mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)	182
Şekil 5.180. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:2mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)	183
Şekil 5.181. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:3mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)	183
Şekil 5.182. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:4mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)	184
Şekil 5.183. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Hava).....	185
Şekil 5.184. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Yağ).....	185
Şekil 5.185. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Su).....	186
Şekil 5.186. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi.(258, 13 nolu düğ. Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püsk.).....	186
Şekil 5.187. Çeşitli ortamlar için kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi.(258, 13 nolu düğ. Kalınlık: 1mm).....	187
Şekil 5.188. Çeşitli Ortamlar İçin Kompozit Levhada Boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi.(258, 13 nolu düğ. Kalınlık: 1mm).....	187
Şekil 6.1. Deney düzeneği.....	190
Şekil 6.2. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde deneysel ve teorik olarak bulunan sıcaklık dağılımının karşılaştırılması. (Kalınlık:1mm,Soğutma Ortamı:Durgun Hava).....	191
Şekil 6.4. Çelik-Bakır Kompozit Levhada Kritik Düğümlerde Deneysel ve Teorik Olarak Bulunan Sıcaklık Dağılımının 50-100. Saniye Aralığında Karşılaştırılması.(Kalınlık: 1mm, Soğ. Ort.:Hava).....	191
Şekil 6.5. Çelik-Bakır Kompozit Levhada Kritik Düğümlerde Deneysel ve Teorik Olarak Bulunan Sıcaklık Dağılımının Karşılaştırılması. (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı:Durgun su).....	192

TABLOLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Eleman düğümleri 2'den 4'e kadar değişebilen tek boyutlu elemanın interpolasyon fonksiyonları	20
Tablo 5.1. Bazı elemanlar ve düğüm numaraları.....	55
Tablo 5.2. Bazı düğüm numaraları ve koordinatlar.....	55
Tablo 5.3. Dikkate alınan düğüm numaraları	58
Tablo 5.4. Çözümde kullanılan malzemelerin ısı özellikleri.....	58
Tablo 5.5. Çözümde kullanılan çeşitli ortamlar için ısı transfer katsayıları.	58
Tablo 5.6 Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Levha kalınlığı: 1mm, Soğutma ortamı: Hava). ..	61
Tablo 5.7. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Levha kalınlığı:1mm, Soğutma ortamı: Hava)..	62
Tablo 5.8. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Hava)	62
Tablo 5.9. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Hava)	64
Tablo 5.10. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Hava)	64
Tablo 5.11. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Hava)	65
Tablo 5.12. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	69
Tablo 5.13. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	69
Tablo 5.14. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	70
Tablo 5.15. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	71
Tablo 5.16. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	72
Tablo 5.17. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	72
Tablo 5.18. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	74
Tablo 5.19. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	74

Tablo 5.20.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	75
Tablo 5.21.	Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	76
Tablo 5.22.	Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	77
Tablo 5.23.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı:Durgun su) ...	77
Tablo 5.24.	Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)	80
Tablo 5.25.	Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)	81
Tablo 5.26.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)	81
Tablo 5.27.	Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)	83
Tablo 5.28.	Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)	83
Tablo 5.29.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)	84
Tablo 5.30.	Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)	85
Tablo 5.31.	Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)	86
Tablo 5.32.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)	86
Tablo 5.33.	Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)	88
Tablo 5.34.	Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)	88
Tablo 5.35.	Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)	89
Tablo 5.36.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.10.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)	92
Tablo 5.37.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)	92
Tablo 5.38.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)	93
Tablo 5.39.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.10.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)	94

Tablo 5.40.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)	95
Tablo 5.41.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)	95
Tablo 5.42.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.10.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)	97
Tablo 5.43.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)	97
Tablo 5.44.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)	98
Tablo 5.45.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.10.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)	99
Tablo 5.46.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)	100
Tablo 5.47.	Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)	100
Tablo 5.48.	Dikkate alınan kesit ve düşümler.	102

SİMGELELER LİSTESİ

$[B]$	: Sıcaklık değişimi interpolasyon matrisi	
c_p	: özgül ısı	(J/kg°C)
$|C|$	: Eleman kapasitans matrisi	
g	: Birim hacimdeki ısı üretimi	
h	: ısı taşınım katsayısı	(W/m ² °C)
$\bar{h}$	: Ortalama ısı taşınım katsayısı	(W/m ² °C)
k	: ısı iletim katsayısı	(W/m°C)
$|K_c|$	: Eleman iletim matrisi	
$|K_h|$	: Eleman taşınım matrisi	
$|K_r|$	: Eleman ışıınım matrisi	
L	: Karakteristik uzunluk	
$[N]$	: Sıcaklık interpolasyon matrisi	
$|R_T|$	: Tanımlı düğüm sıcaklığı	(°C)
$|R_Q|$	: İç ısı kaynağı	
$|R_q|$	: Tanımlı yüzey ısı akışı ısı yük vektörü	
$|R_h|$	: Tanımlı yüzey taşınımı ısı yük vektörü	
$|R_r|$	: Tanımlı yüzey ışıınımı ısı yük vektörü	
t	: Zaman	(s)
T	: Sıcaklık	(°C)
T_a	: Dış ortam sıcaklığı	(°C)
T_∞	: Yüzey sıcaklığı	(°C)
$\{T(t)\}$	: Eleman düğüm sıcaklıkları vektörü	(°C)
T_0	: Başlangıç sıcaklık dağılımı	(°C)
T_s	: Yüzey sıcaklığı	(°C)
u_∞	: Akışkan hızı	(m/s)
q_r	: Birim alandan radyasyonla ısı akışı	
q_s	: Birim alandan tanımlı ısı akışı	
q_x	: x doğrultusundaki ısı akışı	
q_y	: y doğrultusundaki ısı akışı	

α	: Isıl yayılım katsayısı	(m^2/s)
σ	: Stefan-Boltzman sabiti	
ε	: Yüzey özelliği	
ρ	: yoğunluk	(kg/m^3)
Ω	: Çözüm bölgesi	
Γ	: Yüzey alanı	(m^2)



1. GİRİŞ

Endüstrinin ve günlük hayatın sınırsız istekleri karşısında farklı yapı ve özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

Çalışma şartları gereği malzeme çiftleri zaman zaman yüksek sıcaklık veya düşük sıcaklıktaki ortamlarda uzun süre çalışma zorunda kalırlar. İstenilen dizaynın yapılabilmesi için kritik bölgelerdeki sıcaklık dağılımının bilinmesi önemli olur. Bu çalışma ile bu tür problemlerin çözümüne yardımcı olacak bilgi ve bulgulara ulaşım amaçlanmaktadır.

Homojen yapıya sahip bir malzemenin ısıtılması veya soğutulması sırasında malzeme bünyesinde meydana gelen sıcaklık dağılımları ve iç bünyede oluşan termik gerilmelerin analizi, genellikle belirli sınır ve başlangıç şartları için enerji deklemlerinin çözümü ile mümkün olabilmektedir.

Ancak değişen çevre şartlarında karmaşık geometriye ve özellikle farklı mekanik ve ısı özelliklere sahip malzemelerin, farklı ortamlarda soğutulmaları sırasında malzeme çiftlerinde meydana gelecek sıcaklık dağılımlarının ve yüzeydeki ısı transferinin analizi kapsamlı bir çalışmayı gerektirmektedir. Problemin çözümü çok sayıda faktörün tesbitine bağlıdır.

Bu çalışma bu tür bir analizi gerçekleştirmek için, farklı ısı ve mekanik özelliklere sahip sonlu uzunluktaki iki levha aralarında kayma olmayacak şekilde birleştirilip kompozit bir malzeme oluşturulmuştur. Bu kompozit malzemeyi oluşturan levha, farklı ortamlarda soğutulmaya maruz bırakılarak her bir levhadaki sıcaklık dağılımları ve ısı transfer olayı araştırılmıştır. Homojen olmayan bölgelerdeki sıcaklık değişimleri, yüzeyden olan ısı transferinin diğer bölgelere göre farklı olmasına, bu

farklılık da belirli bölgelerde termik ve mekanik özelliklerin ani değişimine neden olacaktır. Bu bölgelerin önceden tesbiti; imalata yön verilmesi; malzeme seçimi gibi mühendislik çalışmalarını yönlendirme açısından oldukça önemlidir. Bu tür karmaşık problemlerin basit yöntemlerle çözümü mümkün değildir. Bu amaçla, probleme uygun çözüm sağlayacak sonlu elamanlar yöntemi kullanılarak konu araştırılmıştır.

Isı transfer analizleri genellikle sıcaklık değişimlerini, çok yüksek veya düşük sıcaklık seviyelerine maruz kalabilecek yapıların tasarım için veya malzeme seçiminde ilk yardım olarak incelerler. Analizciler çevresel sınır şartlarını gerçekçi olarak modelleyebilmeli, karmaşık geometrileri ifade edebilmeli ve basit izotropik malzemeler dışındaki malzeme çeşitlerini analiz edebilmelidir. Bilinen problem çözümleri böyle durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle sonlu elmanlar metotlarına olan ilgi son yıllarda artmıştır.

Bu çalışma sekiz bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde kompozit plakalarda ısı transferi ve sıcaklık dağılımları ile sonlu elamanlarla ısı transferi problemlerinin çözümü hakkında literatür araştırması yapılmış ve bu konudaki uygulamalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde; sonlu elamanlar metodu ve interpolasyon fonksiyonları ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde; problemin problemin tanımı yapılmış, ardından sonlu elamanlar metodu kullanılarak problemin matematiksel formülasyonu geliştirilmiştir.

Elde edilen sonlu elaman formülasyonunun, bu çalışmada göz önünde bulundurulan "L" şeklindeki dik kompozit plakaya uygulanması incelenmiştir. Problemin matris formülasyonu detaylı bir şekilde elde edilmiştir. Ele alınan interpolasyon fonksiyonları yardımı ile şeklin geometrisine bağlı olarak, sistemin direngenlik matrisi çıkarılmıştır. Sistemde bulunan her bir düğüme ait düğüm deplasmanlarının

hesaplanması gösterilmiştir. Ayrıca bu deplasmanlar yardımı ile her bir düğümdeki sıcaklıkların nasıl elde edildiği incelenmiştir. Bu bölümde ayrıca nümerik integrasyon hesaplamaları ile ilgili bilgilere de yer verilmiştir.

Beşinci bölümde; çeşitli kompozit plakalar için yapılan sayısal çözümler anlatılmış, çalışmalarla ilgili tablo ve grafikler sunulmuştur.

Altıncı bölümde; yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır.

Yedinci bölümde; nümerik çözümle elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmalar yapılarak gerekli irdeleme yapılmıştır.

Ekler kısmında ise bilgisayar programına ilişkin algoritmalar verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Elbashbeshy ve Ibrahim (1993)' de yaptıkları çalışmada düşey bir plaka boyunca değişken viskozite ve ısı difüzyonlu zamana bağlı olmayan doğal konveksiyon akışını incelemişlerdir. Geçerli kütle korunumu, momentum ve enerji denklemleri uygun dönüşümler kullanılarak boyutsuzlaştırılmıştır. Elde edilen boyutsuz adi türevli diferansiyel denklemler analitik ve sayısal olarak çözülmüştür. Euler dönüşümü kullanılmıştır. Analitik ve sayısal sonuçlar plaka yakınında oldukça iyi bir uyum göstermişlerdir. Viskozite azaldığında, plaka yakınında hızının arttığı, karşı etkinin plakadan belli bir uzaklıkta hava veya suyun olduğu gözlenmiştir. Plaka üzerindeki boyutsuz kayma gerilmesi, plaka üzerindeki ısı transferi oranı, hız sınır tabaka kalınlığı ve ısı sınır tabaka kalınlığı değişik α , β , Pr değerleri için hesaplamışlardır.

Harris ve arkadaşları (1996), gözenekli ortamda değişken ısı akısına maruz düşey bir plakada geçici doğal konveksiyonu incelemişlerdir. Küçük ve büyük boyutsuz zaman aralıklarında ve sürekli rejimdeki enerji denkleminin sınır tabaka denklemlerinden bir denklem elde etmişlerdir. Bir explicit sonlu fark yöntemi kullanarak zamana bağlı sınır tabaka denklemlerinin geçici rejimde bir sayısal formülasyonunu elde etmişlerdir. Sayısal çözümden elde edilen sıcaklık profilleri başlangıçta küçük zaman adımı çözümlerine yakın olduğu daha sonra gelişerek bir eğri boyunca zamana bağlı olmayan çözüme asimptotik olarak yaklaştığı gözlenmiştir. Sonuçlar mevcut enerji girişleri seviyesindeki bir artma veya azalmadan geçici rejimin meydana geldiğini göstermişlerdir.

Hossain ve Takhar (1996) Roseland difüzyon yaklaşımını kullanarak üniform yüzey sıcaklıkta ve üniform ısıtılan düşey bir plakada düşük yoğunluklu; sıkıştırılamaz akışkan

için radyasyonunun hem doğal hem de zorlanmış konveksiyon üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Akışı temsil eden sınır tabaka denklemleri uygun dönüşümlerle hem doğal hem de zorlanmış konveksiyonda geçerli olan boyutsuz denklemlere indirgenmiştir. Bu denklemlerin çözümleri implicit sonlu fark metodu ve Keller Box metodunu birlikte kullanarak farklı parametre değerleri için yerel kayma gerilmesi ve yerel ısı transferi oranı cinsinden elde etmişlerdir.

Lin ve Wu (1995), düşey bir plakada laminer doğal konveksiyon için ısı ve kütle transferini incelemişlerdir. Çalışma bir düşey plaka boyunca laminar sınır tabaka akışı nedeni ile oluşan kaldırma kuvvetinden etkilenecek meydana gelen ısı ve kütle transferini sıvı kaldırma kuvvetinin termal kaldırma kuvvetine oranı için yeni bir benzerlik transformasyonu kullanarak gerçekleştirmiş. Kaldırma oranının ve Lewis sayısının ısı ve kütle transfer üzerindeki etkileri gaz ve su akışı için deneysel olarak araştırılmış, gazlı ve aqueous çözümler sunulmuştur.

Miyamoto ve arkadaşları (1994)' de düşey bir plakada geçiş bölgesinde doğal konveksiyon sınır tabakasının karakteristiklerini incelemişlerdir. İçerisinde üniform ısı üretimi olan hava içindeki düşey bir plaka boyunca doğal taşınım sınır tabakasındaki sıcaklık ve akım yönü ve normal hızları ölçmek suretiyle bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bir başlangıç dağılımı dikkate alarak laminar akışın bitiminden tam türbülanslı bölgenin başlangıcından hız ve sıcaklıkların altakiştaki büyümesini incelemişlerdir. Başlangıç dağılım seviyesi izafi olarak küçük olduğunda geçiş bölgesindeki hız profillerinde iki kritik noktanın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Suzuki ve arkadaşları (1995), üniform olarak ısıtılmış iki paralel düşey plaka arasında düşük Reynolds sayılarında yukarıya doğru olan akışı deneysel olarak incelemişlerdir. Akış modelinde boya injeksiyon metodu kullanılmış ve ısı

transfer katsayısının akış yönündeki dağılımı ile aynı zamanda ölçülmüştür. Kaldırma etkisi izafi olarak küçük olduğu zaman akışın tüm kanal boyunca laminer olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber, kaldırma etkisi büyük olduğu zaman boyanın yol çizgisi kanal yarısından itibaren sinüzoidal olarak dalgalanmaya başlamakta ve sonra akış türbülanslı olmaktadır. Duvar sıcaklıklarının değişimi sinüzoidal olmakta ve ısı transfer katsayısı geçişten önce hızlı bir şekilde yükselmektedir. Reynolds sayısı ve düzeltilmiş Grashof sayısının geçiş şartları üzerinde etkisi araştırılmıştır. Türbülanslı akış bölgesinin ısı transfer karakteristikleri de incelenmiştir.

Vehara, Kinoshita ve Matsuda (1995) düşey bir plakada türbülanslı film yoğunlaşmasını teorik olarak çalışmışlardır. Çalışmada momentum denklemleri süreklilik denklemi ve enerji denkleminin çözümü eddy difüzyonitesi kullanılarak yeni bir model önermişlerdir. Geçerli denklemler boyutsuzlaştırılmış ve boyutsuz denklemler sonlu farklar metodu ile sayısal olarak çözülmüştür. Yerel Nusselt sayısı için bir bağıntı geliştirilmiş ve bunun deneysel verilerle uygun olduğu gösterilmiştir.

Yamasaki ve Nagahashi (1992), sonlu uzunluktaki sabit sıcaklıktaki düşey bir plaka boyunca doğal konveksiyon ısı transferi karakteristikleri için sayısal hesaplamalar ve deneysel çalışmalar sunmuşlardır. Sayısal sonuçlar $0.1-10^5$ Grashof sayıları arasında ve 0.71 Prandtl sayısı için elde edilmiştir. Ortalama ısı transfer katsayısı, $50-10^6$ arasındaki Grashof sayıları için ölçülmüş ve elde ettikleri deney sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Akış plaka boyunca yükselmekte üst bölgede bulunan soğuk akışkan nedeniyle plakanın üst tarafına yakın bir yerde dönmekte olduğunu gözlemlemişlerdir. Yerel ısı transfer katsayısının plakanın alt ve üst kenarlarında yüksek ve orta kısmında hemen hemen sabit kaldığını belirlemişlerdir.

3. SONLU ELEMANLAR METODU

3.1. Genel Bilgiler

Sonlu elemanlar metodu, mühendislikte ilk olarak uçak sanayiinde, bu dalda karşılaşılan oldukça fazla sayıda ve karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde kullanılmıştır. Özellikle bilgisayarların daha da üstün özelliklerle donatılması gün geçtikçe bu metodun uygulanma sahasını genişletmiştir.

Sonlu elemanlar metodunda, son yıllarda çok büyük gelişme kaydedilmiştir. Bu zarif ve güçlü metot, bilim adamları ve mühendislere tamamen yeni bir yol açmıştır. Çok yakın bir geçmişte zor ve kompleks olarak bilinen problemler bu metotla daha kolay çözülebilmektedir. Bu metot gelişim sürecinde olup, bilimsel kapsamındaki ve mühendislik çözümlemesindeki yeniliği bakımından araştırmaya açık potansiyelle doludur (Nath,1993).

Sonlu elemanlar metodu ve bilgisayarların bilimsel ve endüstriyel çalışmalarda kullanılması ile, pahalı deneysel yöntemlerle incelenen birçok ısı ve mekanik problemin analizi, kolaylıkla ve kısa bir sürede yapılarak, optimum dizaynı gerçekleştirmek mümkün olabilmektedir. (Topçu, 1991)

Elemanın boyut ve geometrisi ne kadar karışık olursa olsun, cismin sonlu eleman modelinin gerçeğe çok uygun olması sağlanabilir. Cismin içindeki delik, çentik, köşe vb. yerel düzgünlüklerin bulunması, sonlu eleman analizinde güçlük çıkarmaz. Değişken malzeme özelliği veya değişken geometriye sahip problemler, bu metodla kolayca çözülür. Ayrıca sınır şartlarının uyarlanması kolay olup, elde edilen sonuçların doğruluğu oldukça iyidir. (Arslan, 1995)

3.2. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanışı

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp, ardından bütün sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirilerek, sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde değişik metotlar kullanılabilir (Topçu,1990). Bunlardan en çok kullanılanlar şu şekilde ele alınabilirler:

a)Direkt yaklaşım: Bu yaklaşım daha çok tek boyutlu ve basit problemler için uygundur.

b)Varyasyonel Yaklaşım: Bir fonksiyonun extrimize edilmesi demektir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu extrimize eden değerler bulunur. İkinci türevin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değerlerin maximum ya da minimum olduğu görülür.

c)Enerji Dengesi Yaklaşımı: bir sisteme giren ve çıkan termik veya mekanik enerjilerin eşitliği göz önüne alınır.

Ele alınan yaklaşımların hangisi kullanılırsa kullanılsın, sonlu elemanlar metodu ile yapılan çözümlerde şu sıra izlenmelidir:

- a) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi (mesh generation),
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarının seçilmesi,
- c) Eleman direngenlik matrisinin teşkil edilmesi,
- d) Komple direngenlik matrisinin hesaplanması,
- e) Sisteme etki eden dış kuvvetlerin bulunması,
- f) Verilen sınır şartlarının uyarlanması,

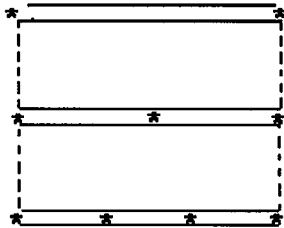
- g) Cebrik sistem denklemlerinin çözümü,
- h) Diğer hesaplamalar (şekil değiştirme, gerilme, asal gerilme vb.)

3.3. Cismin Sonlu Elemanlara Bölünmesi

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerde öncelikle eleman tipinin belirlenmesi gerekir. Daha sonra çözüm bölgesi tamamen düzgün bir ağ ile bölünür. Özellikle sistem, süreksizlik noktalarında daha küçük sonlu elemanlara ayrılmalıdır. Analizde kullanılan sonlu eleman tipinin iyi seçilmesi, o oranda daha iyi sonuçlar elde edilerek gerçek çözüme daha fazla yaklaşılmmasını sağlar. Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılır:

3.3.1. Çeşitli sonlu eleman tipleri

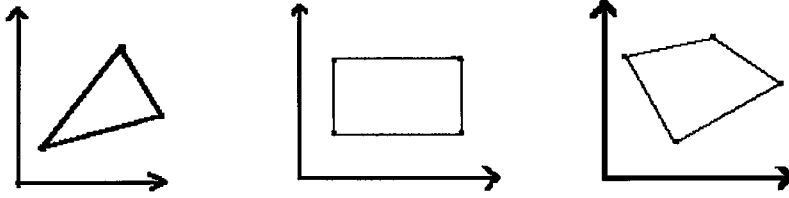
a) Tek boyutlu elemanlar: Tek boyutlu ifade edilen problemlerin çözümünde kullanılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Tek boyutlu elemanlar

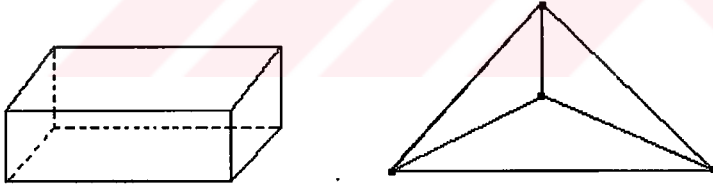
b) İki boyutlu elemanlar: Düzlem problemlerin çözümünde kullanılır. İki boyutlu sonlu eleman olarak en çok kullanılanı üç düğümlü üçgen elemanlardır. Üçgen elemanların altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden türleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon

fonksiyonunun derecesine göre ayarlanır. Bu grubun diğ er bir elemanı dörtgen elemanıdır. Dörtgen elemanı çoğu zaman özel hal olan dikdörtgen eleman olarak kullanılır. Dikdörtgen elemanlarla çözüm bölgesini taramak oldukça kolaylık sağlar. Ancak   z m bölgelerinin ifade edilmesi bakımından üçgen elemanlar daha kullanışlıdır( ekil 3.2). (Topçu, 1991).



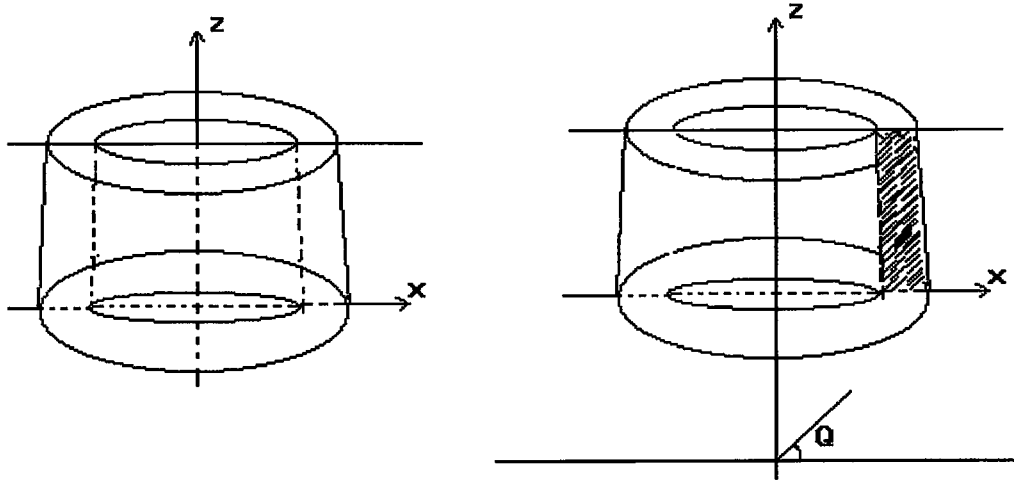
Şekil 3.2. Çeşitli iki boyutlu elemanlar.

c)    boyutlu elemanlar: Bu grupta en çok kullanılan elemen üçgen piramittir. Ayrıca dikdörtgen prizması ve altı yüzlü elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan diğ er eleman tipleridir ( ekil 3.3).

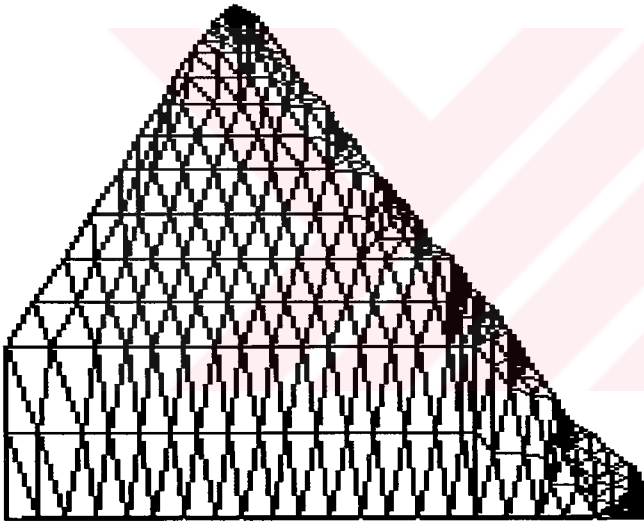


Şekil 3.3. Çeşitli üç boyutlu elemanlar.

d) Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapması ile elde edilirler. Dönel elemanlar yardımı ile pratikte üç boyutlu olan problemler, iki boyutlu problem gibi ele alınarak çözülebilirler. Bu durum, dönel elemanların kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. (Arslan, 1995). ( ekil 3.4).



Şekil 3.4. Dönel elemanlar



Şekil 3.5. Üçgen sonlu elemanlara bölünmüş bir malzeme.

3.3.2. İzoparametrik sonlu elemanlar

Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmış ise, kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek dolayısıyla sayılarını

arttırmak gerekir. Bu durum, çözülmesi gereken denklem sayısını arttırır ve dolayısıyla gerekli olan bilgisayar kapasitesinin ve çözüm zamanının artmasına yol açar. Bu istenmeyen durumu ortadan kaldırmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlara uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç duyulur. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tamamlanır. İzoparametrik sonlu elemanların özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabilir olmasıdır. (Topçu,1991) Bu elemanlara verilen adın anlamı da bu durumu doğrular.

3.3.3. Sonlu eleman ağının elde edilmesi

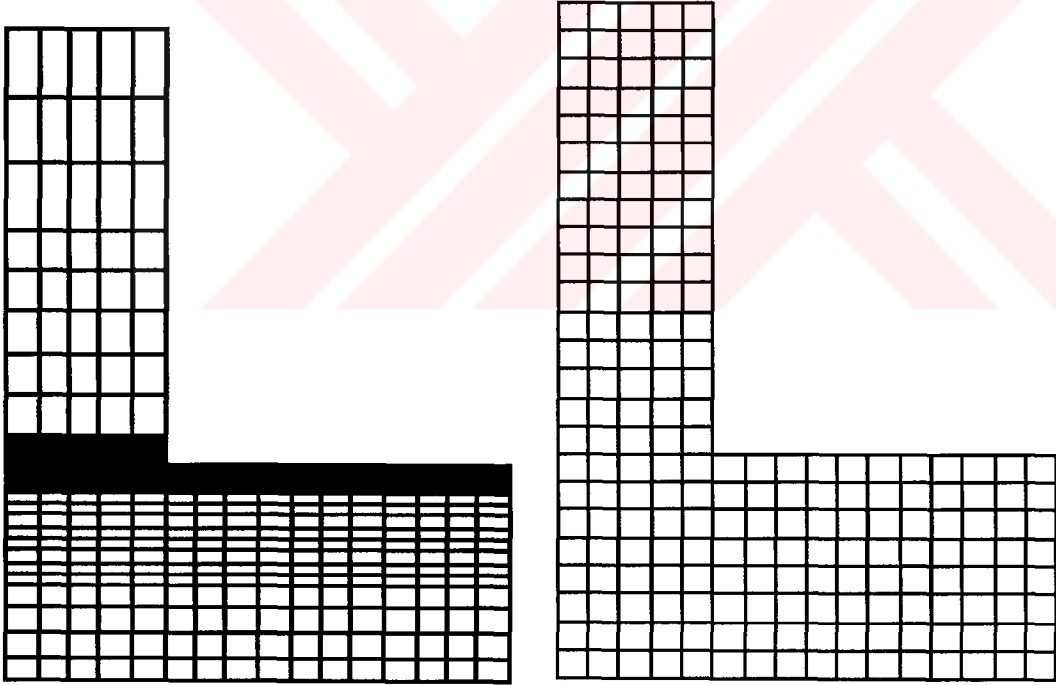
Çözüm bölgesi, seçilen sonlu eleman ile tamamen düzgün bir ağ şeklinde bölünür. Bu bölmelemede çözüm bölgesinin tamamının veya belli bir kısmının sonlu elemanlara bölünmesi gerekebilir. Bu durum; şeklin geometrisine, yükleme şartlarına, malzeme özelliklerine bağlıdır. Eksenel simetrik problemlerde bölgenin yarısının, bazen de dörtte birinin sonlu elemanlara ayrılması, problemin sonlu eleman analizi için yeterlidir.

Sonlu elemanlara ayırma işlemi ve problemin datalarının hazırlanması özellikle eleman sayısı arttıkça hem zaman alıcı olmakta hem de hata yapma oranı artmaktadır. Bundan dolayı elemanlara bölme işleminin bilgisayarla yapıldığı otomatik bölmeleme sistemleri geliştirilmiştir. Elemanların düğümlerinin belli bir sisteme göre yapılması, özellikle çözüm süresinin ve bilgisayar kapasitesinin oldukça azaltıldığı, direngenlik matrisinin bant şekline getirilerek yapılan çözümler için yararlıdır. Sistemin bant genişliğinin düşürülmesinde

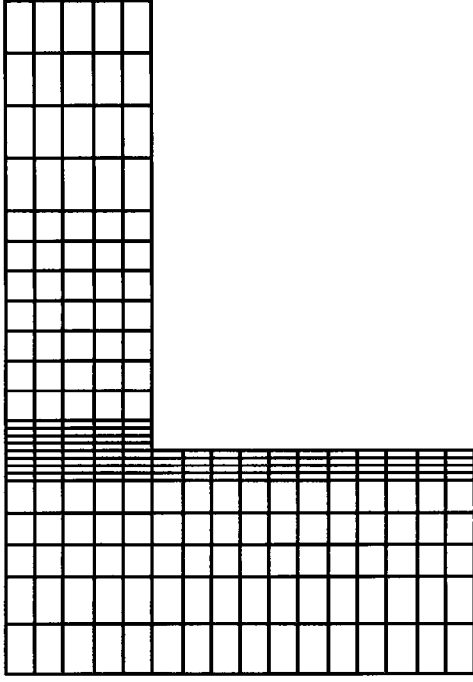
düğümlerin diziminin bile önemi oldukça fazladır. Çünkü; uygun olmayan dizimlerde bant genişliğinin çok büyük çıktığı görülebilir. Otomatik bölmelerde bu durumun da göz ardı edilmemesi gerekir(Arslan,1995). Bu çalışmada levhanın sonlu elemanlara ayrılması, hazırlanan otomatik bölmeleme programı yardımı ile hazırlanmıştır.

3.4. İnterpolasyon Fonksiyonlarının Seçilmesi

İnterpolasyon alan değişkenin eleman üzerindeki değişimini temsil eder. Seçilen sonlu elemanın tipi interpolasyon fonksiyonunu belirler. Çünkü, elemandaki düğüm sayısı fonksiyonun mertebesini tayin eder (Topçu,1991).



Şekil 3.6. Levhanın çeşitli sayıda izoparametrik sonlu elemanlara bölünmesi.



Şekil 3.7. İncelenen levhanın 219 izoparametrik sonlu elemanlara bölünmesi.

Seçilen interpolasyon fonksiyonları elemanların ara yüzeylerinde sürekliliği sağlamalı ve koordinat değişimlerinden etkilenmemelidir. Gerek bu şartların sağlanması gerekse türev ve integrallerin alınmasında sağladıkları kolaylıktan dolayı interpolasyon fonksiyonu olarak polinomlar tercih edilir.

3.4.1. Bir Değişkenli interpolasyon fonksiyonu

Interpolasyon fonksiyonları polinomlar yardımı ile seçilmiştir. Bir boyutlu n . dereceden bir polinom

$$P_n(x) = \sum_{i=1}^{T_n} \alpha_i x^i \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $T_n=n+1$ olup, bu polinom 3. dereceden yazılırsa

$$P_3(X) = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 \quad (3.2)$$

elde edilir.

3.4.2. İki değişkenli interpolasyon fonksiyonu

İki değişkenli n.dereceden bir polinom aşağıdaki genel biçimi ile verilebilir:

$$P_n(x, y) = \sum_{k=1}^{T_n} \alpha_k \cdot x^i \cdot y^j \quad (i + j \leq n) \quad (3.3)$$

burada

$$T_n = [(n+1)(n+2)]/2$$

olup ikinci dereceden bir polinom şu şekilde elde edilebilir.

$$P(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy + \alpha_5 x^2 + \alpha_6 y^2 \quad (3.4)$$

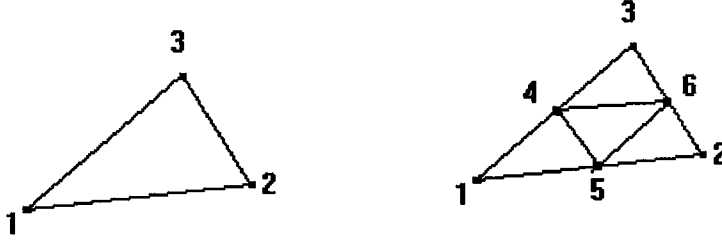
Üç değişkenli bir polinom da benzer biçimde türetilebilir. Seçilen polinomlar değişik sonlu elemanlara uygulanabilir. Sadece köşelerinde düğüm bulunan üçgen eleman için interpolasyon fonksiyonu,

$$P(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y \quad (3.5)$$

kenarların ortasında da düğüm bulunan altı düğümlü üçgen eleman için,

$$P(x,y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 \quad (3.6)$$

yazılabilir.



a) Üç düğümlü

b) Altı düğümlü

Şekil 3.8. Çeşitli üçgen elemanlar

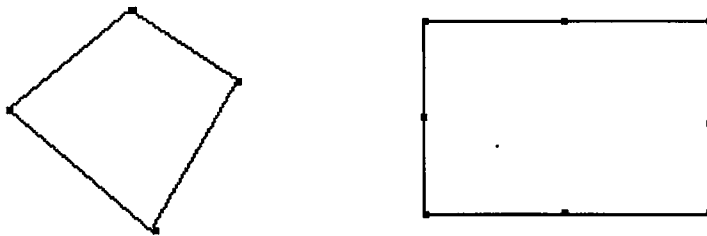
Sadece dört köşesinde düğümler bulunan basit dörtgen eleman için interpolasyon fonksiyonu şu şekilde verilebilir.

$$P(x,y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy \quad (3.7)$$

Kenarların orta noktasında da birer adet düğüm bulunan sekiz düğümlü eleman için (Şekil 3.8) interpolasyon fonksiyonu,

$$P(x,y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 x^2 y + \alpha_7 xy^2 \quad (3.8)$$

olarak elde edilebilir.



Şekil 3.9. Çeşitli dörtgen elemanlar

İnterpolasyon fonksiyonu seçilirken özellikle geometrik izotropinin sağlanmasına özen gösterilmelidir. Örnek olarak, yedi düğümlü bir üçgen eleman için interpolasyon fonksiyonu bu şartı ancak şu şekilde sağlamaktadır:

$$P(x,y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 y^2 + \alpha_5 x^3 + \alpha_6 y^3 \quad (3.9)$$

3.4.3. Tek boyutlu elemanlarda interpolasyon fonksiyonu olarak lagrange polinomlarının kullanılması

İnterpolasyon fonksiyonu olarak genellikle polinomlar kullanılır. Lagrange polinomları sahip oldukları özellikler nedeni ile interpolasyon fonksiyonu olarak kullanılmaya elverişlidirler. İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimindeki zorluk, elemanların ara yüzeylerindeki sürekliliğin sağlanmasıdır. Süreklilik için ortak eleman düğüm koordinatları ve yer değiştirmeleri aynı olmalıdır. Bu da rijit cisim yer değiştirmelerinin olmasıyla sağlanmaktadır. (Nath,1974; Bathe,1982).

İnterpolasyon fonksiyonları seçilirken global koordinatların kullanılması halinde eleman özelliklerinin çıkarılmasında bazı zorluklarla karşılaşilmektedir. Bu zorlukları ortadan kaldırmak için interpolasyon fonksiyonları r , s , t ile gösterilen lokal koordinat sistemlerinde seçilir. Özellikle Lagrange polinomları bu koordinat sisteminde tanımlanacaktır. Daha sonra bu değerler global koordinat sistemine transform edilecektir. n . dereceden bir Lagrange polinomu genel olarak şu şekilde gösterilir.

$$L_k(r) = \prod_{m=0, m \neq k}^n \frac{r - r_n}{r_k - r_m} = \frac{(r - r_0)(r - r_1) \dots (r - r_{k-1}) \dots (r - r_n)}{(r_k - r_0) \dots (r_k - r_{k-1})(r_k - r_{k+1}) \dots (r_k - r_n)} \quad (3.10)$$

Burada $L_k(r)$, n lineer faktörlerinin çarpımıdır. n ise, polinomun derecesini göstermektedir. $r=r_k$ değerini aldığı anda $L_k(r_k)$ 'nın değeri birim değere eşit olacaktır. $r=r_m$ ve $m=k$ olduğunda L_k 'nın değeri sıfıra eşit olur. Bu özelliğinden dolayı Lagrange polinomları keyfi fonksiyonların tanımlanmasında oldukça elverişlidir. Lagrange polinomları kullanılarak elde edilen interpolasyon fonksiyonları tanımlanan noktalarda sürekliliği garanti ettiği için yer değiştirme fonksiyonu da sürekliliği ara yüzeylerde sağlar (Topçu,1991).

Bir $\Phi(r)$ fonksiyonu r_0, r_1, r_2, r_3 noktalarındaki değerleri ile verilmiş ise, bu Φ fonksiyonu üçüncü dereceden bir polinomla tesbit edilebilir. $\Phi(r)$ fonksiyonu,

$$\Phi(r) = \sum_{i=1}^3 \Phi_i L_i(r) = \Phi_0 L_0 + \Phi_1 L_1 + \Phi_2 L_2 + \Phi_3 L_3 \quad (3.11)$$

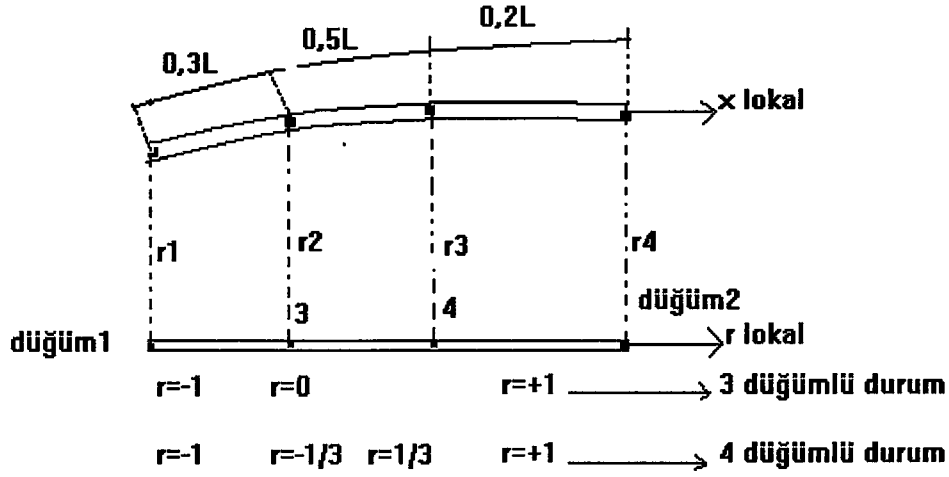
şeklinde gösterilir. Örnek olarak, Φ_3 'ün katsayısı

$$L_3(r) = \frac{(r-r_0)(r-r_1)(r-r_2)}{(r_3-r_0)(r_3-r_1)(r_3-r_2)} \quad (3.12)$$

dir. Bu durumda interpolasyon fonksiyonu tek boyutlu bir eleman için $N_i(r) = L_i(r)$ yazılarak,

$$\Phi = \sum_{i=1}^n N_i r_i \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Örnek olarak, aşağıdaki tek boyutlu elemanın interpolasyon fonksiyonlarının elde edilişi incelenebilir.



Şekil 3.10. Elemanın düğümleri ikiden dörde kadar değişebilen çubuk eleman

Şekil 3.10'da gösterilen çubuğun üç düğümlü hali için 1 nolu düğüme ait interpolasyon fonksiyonları şu şekilde elde edilir:

$$N_i(r) = L_i(r) \quad \text{ve} \quad L_i(r) = \prod_{m=0, m \neq i}^n \frac{r - r_m}{r_i - r_m} \quad \text{idi.}$$

$$L_i(r) = \frac{(r - r_2)(r - r_4)}{(r_1 - r_2)(r_1 - r_4)} = \frac{(r - 0)(r - 1)}{(-1 - 0)(-1 - 1)} = \frac{r(r - 1)}{2} = \frac{1}{2}(1 - r) - \frac{1}{2}(1 - r^2)$$

Benzer olarak, diğer düğümler için de interpolasyon fonksiyonları hesaplanabilir. Bu hesaplamalar Bathe tarafından yapıлып, tablo halinde verilmiştir. (Tablo 3.1). Buradan direkt olarak uygun durum seçilerek, gerekli interpolasyon fonksiyonları alınabilir (Bathe, 1982).

Tablo 3.1. Eleman düğümleri 2'den 4'e kadar değişebilen tek boyutlu elemanın interpolasyon fonksiyonları (Bathe,1982).

$L_1 = \frac{1}{2}(1-r)$	$-\frac{1}{2}(1-r^2) *$	$+\frac{1}{16}(-9r^3 + r^2 + 9r - 1) **$
$L_2 = \frac{1}{2}(1+r)$	$-\frac{1}{2}(1-r^2)$	$+\frac{1}{16}(9r^3 + r^2 - 9r - 1)$
$L_3 = (1-r^2)$	.....	$+\frac{1}{16}(27r^3 + 7r^2 - 27r - 7)$
$L_4 = +\frac{1}{16}(-27r^3 - 9r^2 + 27r + 9)$	....	.....

(*,3 nolu düğüm verilirse dahil ediniz.**,3 ve 4 nolu düğüm verilirse dahil ediniz)

3.4.4. İki boyutlu elemanlarda interpolasyon fonksiyonu olarak larange polinomlarının kullanılması

Kartezyen koordinatlarda verilen bazı iki boyutlu elemanların lokal koordinatlara transformasyonu Şekil 3.11 'de görülmektedir. Burada lokal koordinatlardaki transformasyonu dikdörtgen ve üçgen olan genel halde eğrisel çizgilerle çevrili iki boyutlu izoparametrik elemanlar ele alınmıştır. Genel olarak, Lagrange polinomlarının ikişer ve üçer çarpımları ile sırasıyla iki ve üç boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları bulunur. Örnek olarak sonlu eleman analizinde kullandığımız dört düğümlü bir dikdörtgen izoparametrik elemana ait interpolasyon fonksiyonu;

$$\Phi(r,s) = N_1(r,s)\Phi_1 + N_2(r,s)\Phi_2 + N_3(r,s)\Phi_3 + N_4(r,s)\Phi_4 \quad (3.14)$$

şeklinde yazılır. Burada,

$$N_1(r,s) = L_1(r).L_1(s) , \quad N_2(r,s) = L_2(r).L_2(s) , \quad \dots \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. Bu şekilde ayarlamakla her bir düğüm koordinatları o düğüm için değerleri yerine konulduğunda değeri bir ve yine bu koordinatlar için diğer N katsayıları

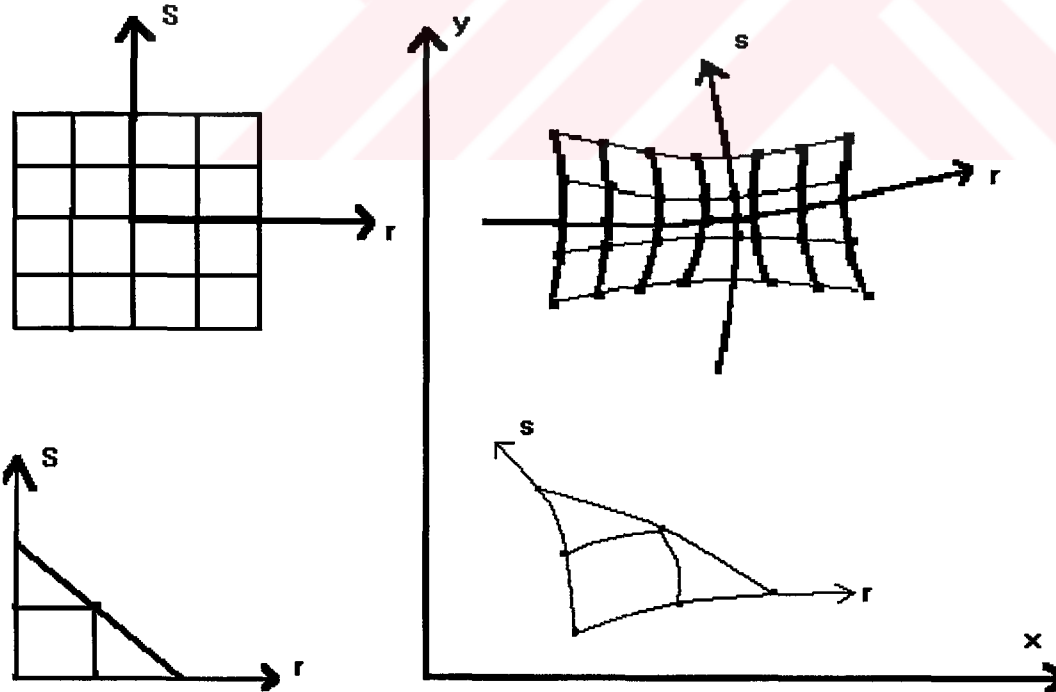
sıfır olmaktadır. Bu sayede ara yüzeylerde bire bir uygunluk sağlanmakta ve dolayısı ile süreklilik meydana gelmektedir. Aynı zamanda interpolasyon fonksiyonu her düğümdeki özellikleri sağlamaktadır. İnterpolasyon fonksiyonlarının elemanları, dört düğümlü dikdörtgen eleman için aşağıdaki şekildedir:

Örnek olarak 3 nolu düğüm için:

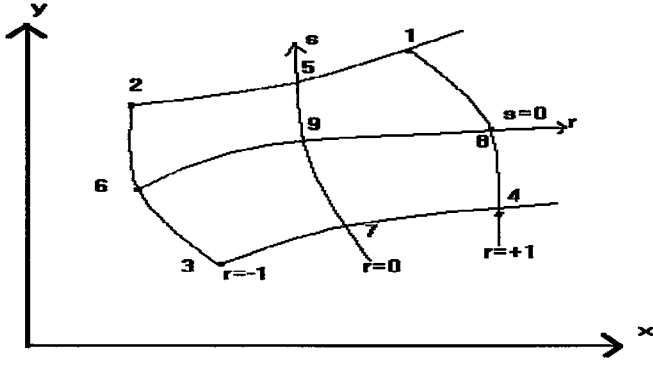
$$N_3(r, s) = L_3(r) \cdot L_3(s), \quad L_3(r) = \frac{r - r_4}{r_3 - r_4} = \frac{r - 1}{-1 - 1}$$

$$L_3(s) = \frac{s - s_2}{s_3 - s_2} = \frac{s - 1}{-1 - 1}, \quad N_3 = \frac{1}{4}(1 - r)(1 - s)$$

elde edilir. Dörtten daha fazla düğümlü izoparametrik elemanlara ait interpolasyon fonksiyonları benzer yolla elde edilir. Bu interpolasyon fonksiyonları Şekil 3.12’de verilmiştir. (Bathe, 1982).

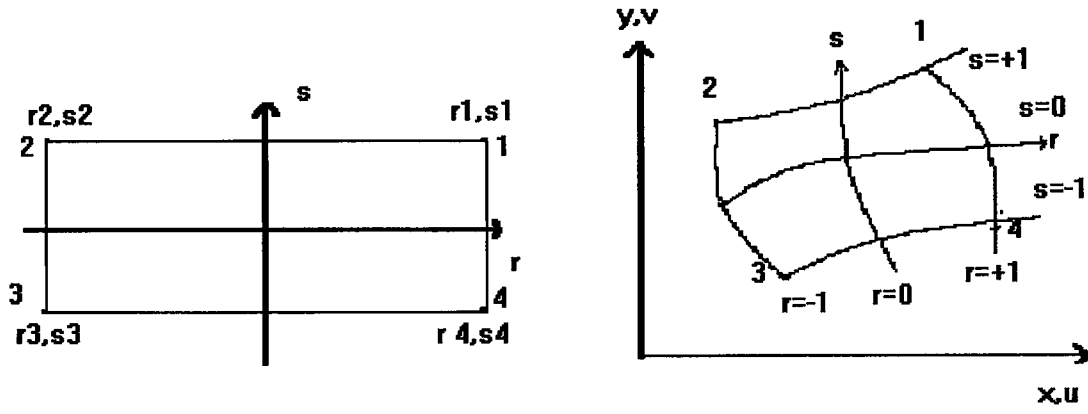


Şekil 3.11. İki boyutta transformasyon



	i = 5	i = 6	i = 7	i = 8	i = 9
$L_1 = \frac{1}{4}(1+r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}L_5$	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_8$	$-\frac{1}{4}L_9$
$L_2 = \frac{1}{4}(1-r)(1+s)$	$-\frac{1}{2}L_5$	$-\frac{1}{2}L_6$	.....	.....	$-\frac{1}{4}L_9$
$L_3 = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)$	.....	$-\frac{1}{2}L_6$	$-\frac{1}{2}L_7$	.....	$-\frac{1}{4}L_9$
$L_4 = \frac{1}{4}(1+r)(1-s)$	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_7$	$-\frac{1}{2}L_8$	$-\frac{1}{4}L_9$
$L_5 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1+s)$	.....	.....	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_9$
$L_6 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1-r)$	.....	.....	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_9$
$L_7 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s)$	.....	.....	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_9$
$L_8 = \frac{1}{2}(1-s^2)(1+r)$	.....	.....	.....	.....	$-\frac{1}{2}L_9$
$L_9 = \frac{1}{2}(1-r^2)(1-s^2)$	.....	.....	.....	.....	.....

Şekil 3.12. Düğüm numaraları 4'den 9'a kadar değişebilen iki boyutlu elemanların interpolasyon fonksiyonları



a) Lokal koordinatlar

b) Kartezyen koordinatlar

Şekil 3.13. İki boyutlu dört düğümlü eleman

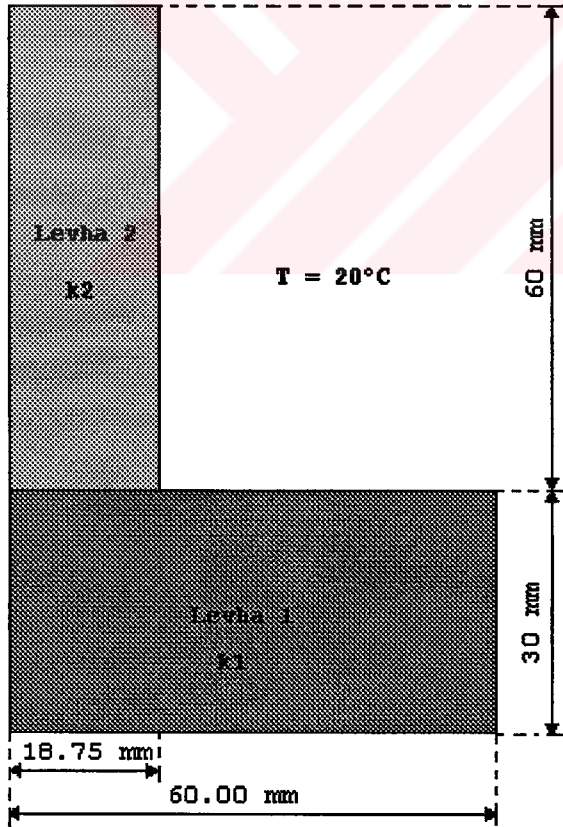
4. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL FORMÜLASYON

4.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada " L " şeklindeki dik kompozit plakalarda zamana bağlı olarak sıcaklık dağılımı incelenmiştir(Şekil 4.1). Başlangıç sıcaklığı 450°C seçilmiş ve ortam sıcaklığı ise 20°C kabul edilmiştir. Levhanın alt ve üst yüzeyinden ısı transferi olduğu varsayılarak işlem yapılmıştır.

Buna göre aşağıdaki veri ve kabuller göz önüne alınmıştır :

- a) Ele alınan problemin geometrisi simetriye uygun değildir.
- b) Problem izotropik olarak çözülmüştür.



Şekil 4.1. Araştırmada kullanılan kompozit levha

c) Analizlerde; plakanın kalınlığı, malzeme cinsi ve soğutma ortamları değiştirilerek sonuçlar alınmıştır.

d) İki malzemenin birleşme noktalarında herhangi bir ara malzemenin olmadığı varsayılmıştır.

4.2. Problemin Çözümünde Kullanılan Temel Isı Transferi İfadeleri

4.2.1. Temel kondüksiyon denklemi

Fourier Kanunu olarak bilinen ısı iletiminin ana ifadesi şöyledir:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.1)$$

Kartezyen koordinatlarındaki ısı akış vektörleri

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.2)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4.3)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.4)$$

yada vektör formunda

$$q = -k \nabla T \quad (4.5)$$

olur. Burada

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (4.6)$$

dır. Kartezyen koordinatlarındaki izotropik olmayan durumda;

$$q_x = -\left(k_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.7)$$

$$q_y = -\left(k_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.8)$$

$$q_z = - \left(k_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.9)$$

İzotropik katılar için genel ısı iletim denklemi;

$$- \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.10)$$

Burada g , birim hacimdeki ısı üretimi, ρ yoğunluğu, c özgül ısıyı, t zamanı göstermektedir.

Sabit ısı özellikleri ve izotropik madde için ısı iletim denklemi, aşağıdaki formu alır.

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.11)$$

α , ısı yayılımı katsayısı olup,

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (4.12)$$

dir. Sabit ısı iletkenlik ve iç ısı üretimi olmaması durumunda, ısı iletim denklemi aşağıdaki denkleme indirgenir:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.13)$$

Bu yayılım denklemidir. Sürekli rejimde Poisson denklemi elde edilir.

$$\nabla^2 T + \frac{g}{k} = 0 \quad (4.14)$$

Isı üretimi olmayan sürekli rejimde,

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4.15)$$

ifadesi ile tanımlanan Laplace denklemi elde edilir (Huebner, 1982).

4.2.2. Temel ısı taşınımı denklemi

Isı taşınım denkleminin çıkarılması için, sıcaklıkları birbirinden farklı olan bir yüzey ve üzerinde akan bir akışkan olduğunu varsayalım. Bu yüzey üzerinden akışkanın V hızı ile aktığını kabul edelim. Yüzey sıcaklığı ile akışkan sıcaklığı birbirinden farklı ise yüksek sıcaklığına sahip olan ortamdan düşük sıcaklıktaki akışkana ısı geçişi söz konusu olacaktır. Yüzeyin daha sıcak olduğunu varsayarsak, Newton'un soğuma yasası uyarınca herhangi bir noktadaki ısı akısı,

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (4.16)$$

şeklinde ifade edilir. (4.16) denklemi ile tanımlanan h parametresi, lokal ısı taşınım katsayısıdır (Incropera, 1990).

Toplam ısı geçişini bulmak için, lokal ısı akılarını yüzey boyunca entegre etmek gerekir.

$$Q = \int_{A_s} q \cdot dA_s \quad (4.17)$$

(4.16) denklemi (4.17)'de yerine konulursa
(4.17)

$$Q = \int_{A_s} h(T_s - T_\infty) \cdot dA_s \quad (4.18)$$

bulunur. Sıcaklığın yüzey boyunca değişmediği, akışkanın serbest akım sıcaklığının da sabit olduğu kabul edilirse, (4.18) denklemi

$$Q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h \cdot dA_s \quad (4.19)$$

haline gelir. $\bar{h}$ bütün yüzey için ortalama bir taşınım katsayısı olarak tanımlanırsa, toplam ısı geçişi için

$$Q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \quad (4.20)$$

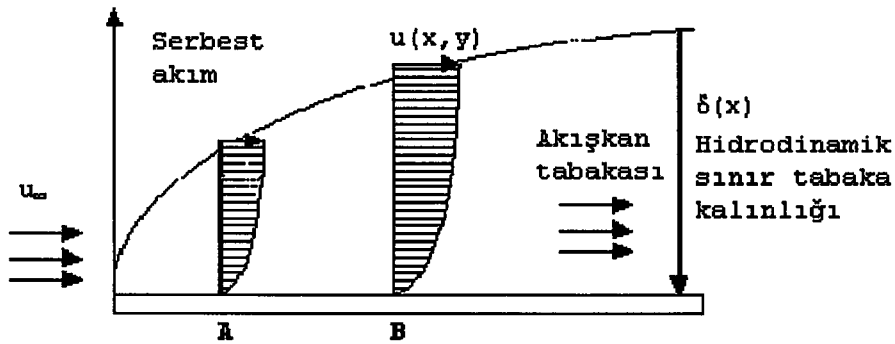
yazılabilir. (4.19) ve (4.20) denklemlerinin eşitlenmesinden, tanımlanan $\bar{h}$ ortalama taşınım katsayısı

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h \cdot dA_s \quad (4.21)$$

olarak bulunur. Bir başka deyişle, lokal taşınım katsayısının yüzeye göre değişimi biliniyorsa, ortalama taşınım katsayısını bulmak mümkündür.

4.2.3. Hidrodinamik sınır tabaka

Bir yüzey çevresinde hareket eden akışkan için kayma gerilimleri nedeniyle hız gradyanlarının olduğu bölgeye hidrodinamik sınır tabaka bölgesi denir (İlken,1996) (Şekil 4.2). u , serbest akım hızıyla sabit bir levha üzerine gelen akışkan, levha ile temas ettiği noktalarda (levha yüzeyinde) durgundur. Herhangi bir A kesitinde hız dağılımına bakılırsa, levha yüzeyinde sıfır olan hızın y yönünde giderek hızlandığı gözlenir. Yüzeyden biraz yukarda olan b sıvı tabakası, alt kısmında yer alan tabaka tarafından da akım yönünde hareket etmeye zorlanmaktadır.



Şekil 4.2. Yatay bir levha üzerinde hidrodinamik sınır tabaka

Üst üste yer alan tabakaların, aralarındaki kayma gerilimleri (τ) nedeniyle bu şekilde hareketlerini etkilemeleri, yüzeyden uzaklaştıkça azalır ve belirli bir uzaklıktan sonra hissedilmez olur. Bu noktadan itibaren akışkan hızı yeniden serbest akım hızı olan u_∞ 'a ulaşır. Pratikte, x yönündeki hız bileşeni u 'nun serbest akım hızının yüzde doksan dokuzuna ulaştığı nokta, hidrodinamik sınır tabakasının bittiği yer olarak tanımlanmıştır. Bu noktanın levhadan uzaklığı δ olarak adlandırılır. x yönünde ilerledikçe viskozitenin yayılması nedeniyle sınır tabaka kalınlığının da arttığı gözlenir. Bu nedenle B kesitinde levha yüzeyindeki hız gradyanı A kesitine oranla daha düşüktür.

Sınır tabaka olarak tanımlanan bölgenin dışında hız gradyanları ve kayma gerilimleri ihmal edilebilecek mertebededir. Serbest akım bölgesi denilen bu kısımdaki akım, çoğu kez potansiyel akım olarak adlandırılır. Kayma gerilmesi ile hız gradyanı arasındaki ilişkinin sınır tabaka içerisindeki herhangi bir noktada

$$\tau_s = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4.22)$$

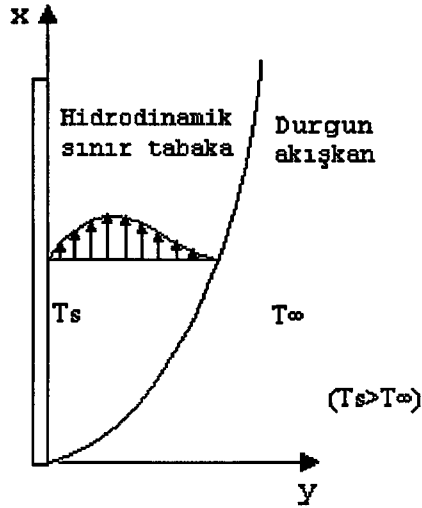
şeklinde olduğu bilindiğinden, yüzey üzerinde sürüklenme kuvveti yaratacak kayma gerilmesi de

$$\tau_s = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial y} \right]_{y=0} \quad (4.23)$$

şeklinde yazılabilir. Lokal sürünme katsayısı C_f ,

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_\infty^2 / 2} \quad (4.24)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Yüzey üzerindeki hız gradyanı x 'e bağlı olarak değiştiğinden, gerek yüzdeki kayma gerilmesi gerekse sürünme katsayısı x 'in fonksiyonudur. Bu nedenle L uzunluğunda bir düz levha için



Şekil 4.3. Düşey bir levha çevresinde doğal taşınım için hidrodinamik sınır tabaka

ortalama sürtünme katsayısını, ortalama taşınım katsayısına benzer şekilde ifade etmek mümkündür.

$$\bar{C}_f = \frac{1}{L} \int_0^L C_f \cdot dx \quad (4.25)$$

Herhangi bir dış etkiyle akışkan hareketinin oluşmadığı doğal taşınım olayında da hidrodinamik sınır tabakasının gelişimi söz konusudur. Şekil 4.2’de şematik gösterimi yer alan düşey bir levha çevresinde doğal bir taşınım için akışkan hareketi, yüzey ve akışkan arasındaki sıcaklık farkının neden olduğu kaldırma kuvveti tarafından oluşturulur. Buna göre, levha yüzeyinde durağan olan akışkan levhadan uzaklaştıkça ısınma etkisiyle hareketlenir. y yönünde giderek artan hız belirli bir noktada maksimum değere ulaşır, ancak daha sonra sürtünme etkisiyle azalmaya başlar, çünkü levhadan daha uzakta olan akışkan tabakaları yanındaki tabakaları durdurmaya çalışır. Bu etkinin giderek artması ile belirli bir noktada akışkan hareketliliği sona erer, bu noktada doğal taşınım için hidrodinamik sınır tabakasının bittiği yeri belirler. Levha sıcaklığının dış ortam sıcaklığından düşük olması durumunda

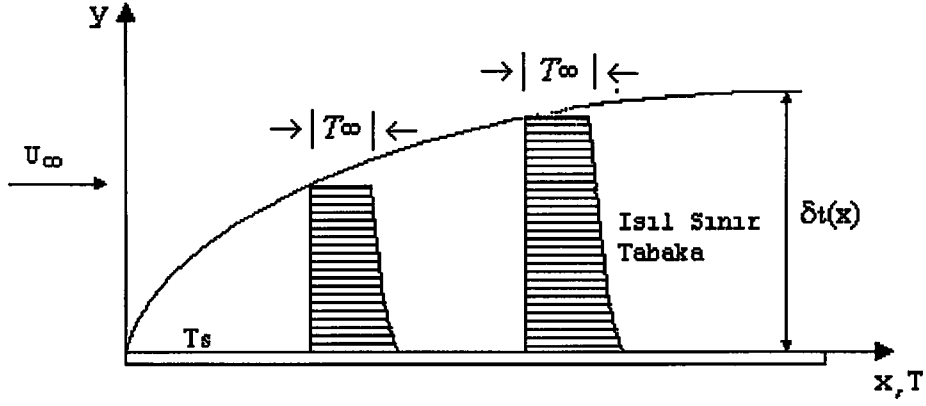
da sınır tabaka oluşumu söz konusudur. Ancak bu kez hız yönü aşağıya doğrudur (İlken,1996).

4.2.4. Isıl sınır tabaka

Bir yüzey ile çevresindeki akışkan arasında sıcaklık farkı olduğunda akışkan içerisindeki belirli bir bölgede sıcaklık gradyanlarının oluşması söz konusudur. Bu bölge, ısı sınır tabaka olarak adlandırılır. Yatay bir levhadan, üzerinde paralel olarak akan akışkana olan ısı geçişi, bu tabakayı tanımlamak için en basit örnektir (Şekil 4.4).

u_{∞} serbest akım hızıyla T_s sıcaklığında sabit tutulan bir levha üzerine gelen akışkan sıcaklığının T_s 'den düşük olması halinde ısınmaya başlayacaktır. Levha yüzeyine bitişik durumda akışkan parçacıklarının sıcaklığı levha sıcaklığına eşit olacak, ancak levhadan uzaklaştıkça sıcaklık gitgide düşecek ve belirli bir noktadan sonra T_{∞} değerine yaklaşacaktır. x yönünde ilerledikçe ısı geçişi etkisinin artması nedeniyle akışkan sıcaklığının T_{∞} değerine yaklaşma uzaklığı (sınır tabaka kalınlığı) giderek artacaktır. Bu nedenle levha ucuna yakın herhangi bir kesitte yüzey üzerindeki sıcaklık gradyanı, ileri bir kesitteki göre daha fazla olacaktır.

Isıl sınır tabaka kalınlığı δ_t , $[(T_s - T)/(T_s - T_{\infty})]$ büyüklüğünün 0.99'a ulaştığı y değeri olarak tanımlanmaktadır. Levha tarafından akışkanın ısıtılması veya soğutulması gibi iki durum söz konusu olabileceğinden, akışkan içerisinde $T = 0.99T_{\infty}$ gibi bir değere ulaşması her zaman mümkün olmayabilir (akışkanın ısıtılması durumunda).



Şekil 4.4. Yatay bir levha üzerinde ısı sınır tabaka

Bu nedenle de ısı sınır tabaka kalınlığı için yukarıda belirtilen türde bir tanımlama daha uygundur.

Yüzeyle bitişik durumda bulunan akışkanın hareket etmediği gözönüne alınırsa, yüzeyde oluşan enerji aktarımının ısı iletimi ile olduğu söylenebilir. Dolayısıyla levhanın herhangi bir yerindeki lokal ısı akışı için Fourier yasası geçerlidir.

$$q = -k_f \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (4.26)$$

Bu ifade Newton'un soğuma yasasına, denklem (4.16) eşitlenirse lokal ısı taşınım katsayısı için

$$h = \frac{-k_f (\partial T / \partial y)_{y=0}}{T_s - T_\infty} \quad (4.27)$$

ifadesi bulunur. (4.16) ve (4.26) denkleminin eşitlenmesi, bir yüzeyden çevresindeki akışkana taşınım yoluyla aktarılan ısı, yüzey üzerindeki durağan akışkana iletilen ısıya eşit olması gerekliliğinin sonucudur. Enerjinin korunumu ilkesi gereği yazılan bu eşitlik, ısı taşınım katsayısı olarak tanımlanan büyüklüğün bağlı olduğu parametreleri ortaya koymakta ve nasıl bulunabileceğine ilişkin ipuçları vermektedir. (4.27) no'lu denklemde yer

alan k_f , T_s ve T_∞ ölçülebilecek büyüklükler olduğundan; yüzey üzerindeki herhangi bir noktada y yönündeki sıcaklık gradyanının x yönünde giderek azaldığı bilinmektedir. Bunun sonucu olarak, (4.27) denklemi uyarınca, lokal taşınım katsayısının da x yönünde azaldığı söylenebilir. $(T_s - T_\infty)$ farkı sabit olduğundan (4.16) no'lu denklem gereği lokal ısı akısı da x yönünde giderek azalır.

Sonuç olarak ısı sınır tabaka sıcaklık gradyanlarının ve ısı geçişinin olduğu bölgeler olarak tanımlanabilir. Akımların bu bölgeler dışında kalan kısımlarında söz konusu gradyanlar ve onlara bağlı olarak ısı aktarımları ihmal edilebilecek seviyelerdedir. Isı sınır tabaka, yüzey ve akışkan arasında sıcaklık farkı söz konusu ise oluşur. Dolayısıyla üstünden aynı sıcaklıkta bir akışkan geçen yüzey üzerine ısı sınır tabaka oluşmaz ve ısı geçişi yoktur. Ancak, varolan hidrodinamik sınır tabaka, yüzey üzerinde daima sürtünme olduğu sonucunu doğurur (İlken,1996).

4.2.5. Doğal taşınım

Sıcaklığı, çevresinde bulunan ortamdan farklı olan bir yüzey ile bu çevre arasında kendiliğinden gerçekleşen ısı geçişine doğal taşınım adı verilir. Bu durumda moleküller hareketliliği oluşturan, içerisinde yoğunluk farklılıkları olan akışkan üzerine etkiyen iç kuvvetlerdir. Yüzey çevresinde doğal taşınımı oluşturan bu net etki, kaldırma kuvveti olarak adlandırılır. Gerçekte, akışkan içerisindeki yoğunluk farklılıkları, sıcaklık gradyanından dolaydır. İç kuvvet kapsamında değerlendirilen ise, yerçekimi kuvvetiyle ilişkilidir ve yoğunlukla orantılıdır. Buradan çıkan sonuç, yüzey ile akışkan arasında sıcaklık farklılığı olmaması durumunda moleküller hareketliliğinin de olmayacağıdır. Zorlanmış taşımında hidrodinamik sınır

tabakanın oluşması için ısı geçişine gerek yoktur, oysa doğal taşınım da bu bir zorunluluktur.

Bir zorlanmış taşınım probleminde (örneğin bir levha üzerinde paralel akımda) ihmal ediliyor olmakla birlikte, gerçekte kaldırma kuvvetlerinin etkisi vardır. Ancak akımı doğuran dış etmenlerin baskın olması nedeniyle sadece zorlanmış ile doğal taşınımın birlikte olması durumunu doğurur. Bu hale karışık (zorlanmış+ doğal) taşınım adı verilir.

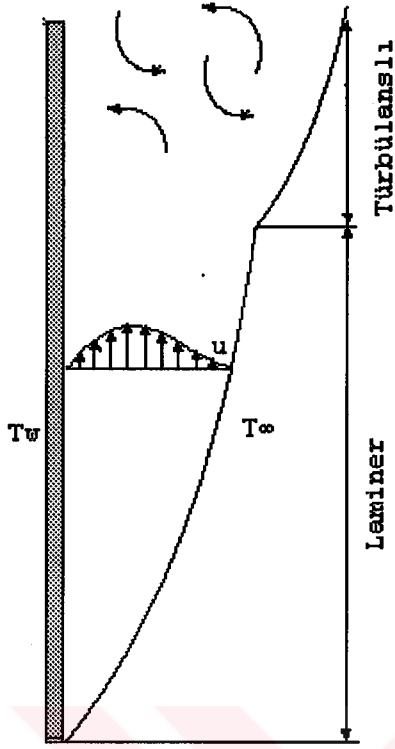
En basit durum olarak, düşey bir levha çevresinde doğal taşınımı alalım. Levha sıcaklığının ortam sıcaklığından yüksek olması halinde levhadan akışkana aktarılan ısı, akışkan yoğunluğunun azalmasına ve dolayısıyla yukarıya doğru bir hareketliliğe neden olacaktır. Yüzeye bitişik olan akışkan parçacıkları, durağan yüzeydeki pürüz boşluklarında tutunacağından, hız yüzey üzerinde sıfırdır. Levhadan uzaklaştıkça giderek artar. Belirli bir maksimum değere ulaştıktan sonra ısı geçiş etkisinin y yönünde azalması nedeniyle, o da azalmaya başlar. levhanın uzağında akışkan durağan olduğundan, hız da belirli bir noktada (sınır tabaka sınırında) sıfır olmak durumundadır. Levha sıcaklığının ortam sıcaklığından düşük olması halinde ise soğuyan akışkanın yoğunluğu azalacağından hareket yönü de aşağıya doğru (yerçekimi yönünde) olur.

4.2.6. Düşey levhalarda doğal taşınım ile ısı transferi

Doğal taşınım ile ısı geçişi, ısı transfer yüzeyinin akışkanın hızına paralel veya dik oluşuna göre ayırılır. Isıl kaldırma kuvvetinin etkisi olarak yer çekimi kuvvetinin ters yönündedir. Bu nedenle doğal olarak düşey doğrultuda meydana gelen akışkan hareketi ısı transfer yüzeyinin düşey veya yatay oluşuna göre farklılık gösterir. Düşey ısı transfer yüzeyi boyunca yükselen akışkan

yükseldikçe daha çok ısınır ve ısındıkça daha hızlı hareket eder. Buna karşılık yatay ısı transfer yüzeyinin alt tarafında ısınan akışkan, kaldırma kuvvetinin etkisiyle önce kenarlara doğru kayar ve kenarları geçince düşey olarak hareket ettiğinden ısı taşınması düşey levhalarinkinden daha yavaş olur. Homojen sıcaklıkta akışkan ortama düşey konumda yerleştirilen bir levhada ısı transferi başlangıçta bütünüyle iletimle olur. Daha sonra sıcak akışkan içerisinde bir sıcaklık gradienti meydana gelir. Akışkan içerisindeki sıcaklık farkından dolayı oluşan yoğunluk gradienti yer çekimi ortamında yükselmeye ve kaldırma kuvvetleri sonucunda konvektif harekete yol açar. Kaldırma kuvvetinin sonucu olarak ortaya çıkan akışkan hareketi tabii yada doğal taşınım olarak adlandırılır.

Doğal taşınımda akışkan hızı, zorlanmış taşınıminkinden çok küçüktür. Bu sebeple doğal taşınım yoluyla ısı transferi zorlanmış taşınım ile ısı transferinden çok küçüktür. Şekil 4.5 kaldırma kuvvetleri sebebiyle oluşan bir düşey levhanın önündeki hız alanının gelişmesini göstermektedir. Levhanın önünde ısınan akışkan dış çevredeki hareketsiz akışkanı iterek yükselmektedir. Sıcak akışkan içinde düşey soğuk bir levhada ise hareketin yönü değişir. Yani plakanın önündeki akışkan düşey olarak aşağı doğru hareket eder. İki durumda da hız sınır tabakası genişler ve en büyük hız bu sınır tabakası içerisinde oluşur. Levha yüzeyinde ve sınır tabakanın kenarında hız sıfırdır. Sınır tabakada laminar ve türbülanslı bölgeler oluşur (Holman,1990).



Şekil 4.5. Düşey bir levha üzerinde sınır tabakanın gelişimi.

4.2.7. Boyutsuz parametreler

Doğal taşınım boyutsuz parametrelerini türetmek için Şekil 4.5.'de görülen bir düşey levha üzerinde serbest taşınımı göz önüne alalım. Analizi basitleştirmek için sınır tabaka akımının sürekli ve laminar olduğunu varsayalım. Doğal taşınımdaki hızların küçük olması sebebiyle enerji denklemindeki viskoz enerjisi sürtünme terimi ihmal edilebilir. Momentum denklemine kaldırma kuvveti terimi konursa temel süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.28)$$

X - Momentum denklemi;

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.29)$$

Enerji denklemi;

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.30)$$

Momentum denklemindeki sağ taraftaki $-\rho g$ terimi negatif x doğrultusunda akışkan elemanı üzerine etki eden kütlelesel kuvveti gösterir. Küçük sıcaklık farkı için, kaldırma kuvveti terimindeki ρ özgül kütlelerinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği düşünülebilir. Ancak bu denklemlerde başka yerlerde görülen özgül kütle terimlerinin sabit kaldığı kabul edilmektedir. $\frac{\partial p}{\partial x}$ basınç gradienti terimini

bulmak için X momentum denklemi sınır tabakanın kenarında

$$U \rightarrow 0$$

$$\rho \rightarrow \rho_\infty$$

olan yerlerde değerlendirilir.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_\infty g \quad (4.31)$$

bulunur. Burada $-\rho_\infty$ sınır tabaka dışındaki akışkanın özgül kütlelerini göstermektedir. Böylece X-momentum denklemindeki $-\rho g - \partial p / \partial x$ terimi şu hale gelir:

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} = (\rho_\infty - \rho)g \quad (4.32)$$

Eğer β akışkanın hacimsel ısı genleşme katsayısı ise, özgül kütlelerinin sıcaklıkla değişimini, β 'ya aşağıdaki ifade ile bağlıdır.

$$-\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) P = \beta \quad (4.33)$$

Bu bağıntılardaki türev terimi sonlu farkla ifade edilirse,

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T \quad (4.34)$$

veya

$$\rho_{\infty} - \rho = -\beta\rho(T_{\infty} - T) \quad (4.35)$$

olur. Bu durumda (4.32) denklemi

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} = -\beta\rho(T_{\infty} - T)g \quad (4.36)$$

halini alır. Bu X momentum denklemine taşınırsa düşey plaka üzerinde doğal taşınım için;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.37)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g\beta(T_{\infty} - T) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.38)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (4.39)$$

denklemleri elde edilir. Doğal taşınımında ısı transferini belirleyen boyutsuz parametrelerini bulmak için yukarıdaki ana denklemleri boyutsuzlaştırmak gerekir. Bunun için aşağıdaki boyutsuz parametreler tanımlanır:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L} \quad (4.40)$$

$$U = \frac{u}{U_0}, \quad V = \frac{v}{U_0} \quad (4.41)$$

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_w - T_{\infty}} \quad (4.42)$$

Burada L karakteristik uzunluğu, U_0 referans hızını, T_w yüzey sıcaklığını ve T_{∞} sıcak levhadan uzakta akışkan sıcaklığını gösterir. Bu yeni değişkenler (4.37), (4.38), (4.39) denklemlerine götürülürse aşağıdaki boyutsuz denklemler bulunur:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (4.43)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{-g\beta (T_w - T_\infty)}{U_0^2} \theta + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad (4.44)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (4.45)$$

Burada Reynolds ve Prandtl sayıları,

$$\text{Re} = \frac{U_0 \cdot L}{\nu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (4.46)$$

şeklinde tanımlanır. Momentum denklemindeki boyutsuz grup;

$$\frac{g\beta (T_w - T_\infty) \cdot L}{U_0^2} = \frac{g\beta L^3 (T_w - T_\infty) V^2}{(L \cdot U_0 / \nu)^2} = \frac{Gr}{\text{Re}^2} \quad (4.47)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Burada Gr, Grashof sayısı olup,

$$Gr = \frac{g\beta L^3 (T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (4.48)$$

şeklinde ifade edilir.

Grashof sayısı fiziksel olarak kaldırma kuvvetlerinin akışkan üzerinde etkin viskoz kuvvetlere oranını göstermektedir. Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısı, atalet kuvvetlerinin akışkan üzerinde etkin olan viskoz kuvvetlere oranını göstermektedir. Zorlanmış taşınımda Reynolds sayısının oynadığı rolü doğal taşınımda Grashof sayısı üstlenmektedir. Zorlanmış taşınımda laminar akıştan türbülanslı akışa geçişi Reynolds sayısı kritik değeri belirlemektedir. Benzer şekilde, doğal taşınımda, laminardan türbülansa geçişi Grashof sayısının kritik değeri belirler. (4.43), (4.44), (4.45) denklemlerinden

serbest ve zorlanmış taşınım etkileri kıyaslanabilir büyüklükte ise Nusselt sayısı Re , Pr ve Gr boyutsuz sayılarına bağlıdır.

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (4.49)$$

(4.47) nolu denklemde tanımlanan Gr/Re^2 parametresi doğal taşınımın zorlanmış taşınıma göre ölçüsüdür.

$$\frac{Gr}{Re^2} \approx 1 \quad (4.50)$$

olduğunda doğal ve zorlanmış taşınım aynı büyüklük mertebesinde. Bu nedenle hesaplamalarda ikisi de dikkate

alınmalıdır. Eğer, $\frac{Gr}{Re^2} \ll 1$ ise akışta zorlanmış taşınım

etkilidir. Eğer, $\frac{Gr}{Re^2} \gg 1$ ise doğal taşınım daha etkin olur.

Bu durumda Nusselt sayısı yalnız Gr ve Pr 'a bağlıdır.

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (4.51)$$

Doğal taşınımda akış hızları yalnız kaldırma kuvvetlerince oluşturulur. Sonuçta Nusselt sayısı Reynolds sayısına bağlı olmaz. $Pr \approx 1$ olan gazlarda, doğal taşınımda Nusselt sayısı yalnızca Grashof sayısına bağlıdır. Yani,

$$Nu = f(Gr) \quad (4.52)$$

şeklinde ifade edilir. Uygulamalarda doğal taşınımda ısı transferini düzenlemek için Grashof sayısı yerine,

$$Ra = Gr.Pr = \frac{g\beta L^3(T_w - T_\infty)}{\nu^2}.Pr = \frac{g\beta L^3(T_w - T_\infty)}{\nu\alpha} \quad (4.53)$$

şeklinde tanımlanan Rayleigh sayısı kullanılır.

4.2.8. Doğal taşınım için sınır tabaka denklemleri

Momentum denklemi Şekil 4.3. deki düşey levhada x yönü için yazılırsa, $-X$ yönünde etkiyen iç kuvvet,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \quad (4.54)$$

olacaktır. Gerçekte, y yönünde basınç değişimi oluşturacak bir iç kuvvet söz konusu olmadığından, basınç sadece X'in fonksiyonudur ve değişimi, seviye farkından dolayıdır

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dp}{dx} = -\rho_\infty g \quad (4.55)$$

(4.55) eşitliği (4.54)'de yerine konulursa,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{g}{\rho} (\rho_\infty - \rho) \quad (4.56)$$

ifadesine ulaşılır. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim viskoz kuvvetlere, ikincisi ise yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvvetlerine karşılık gelmektedir. Buradaki yoğunluk farkı terimi, hacimsel ısı genleşme katsayısı (β) cinsinden ifade edilebilir. Tanım gereği,

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4.57)$$

şeklindedir. Türevsel terimin yaklaşık ifadesi kullanılırsa,

$$\beta \cong -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \quad (4.58)$$

ve

$$\rho_\infty - \rho = \rho \beta (T - T_\infty) \quad (4.59)$$

sonucuna ulaşılır. (4.59) eşitliği (4.56)'da yerine konulursa x yönü momentum denklemi,

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \gamma \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \beta (T - T_\infty) \quad (4.60)$$

olarak elde edilir. Kaldırma kuvvetinin etkisi sadece momentum denkleminde yansdığından, süreklilik ve enerji denklemleri,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.61)$$

ve

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4.62)$$

bulunur.

4.3. Matematiksel Formülasyon

Problemin çözümü için "L" şeklindeki düşey levha hali esas alınarak gerekli formülasyon yapılmıştır. Bu amaçla çözümde şeklin geometrisi ve çözüm bölgesi dikkate alınarak dört düğümlü izoparametrik elemanlar kullanılmıştır. Bu nedenle dört düğümlü sonlu elemana ait formülasyon incelenmiştir. Problem bir levha problemi olup iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Bu durumda sistemdeki bir düğümün x ve y doğrultusunda iki bileşeni olur. Yani sistemin serbestlik derecesi 2'dir. Fourier Kanunu genel olarak yazılırsa,

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.63)$$

$$q_x = -\left(k_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.64)$$

$$q_y = -\left(k_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.65)$$

$$q_z = -\left(k_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.66)$$

ifadeleri elde edilir (Huebner,1982). İzotropik malzeme için,

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.67)$$

Bu ifadede; ρ yoğunluğu, c özgül ısıyı göstermektedir. İki boyutlu levha için;

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.68)$$

Bu son ifadeyi sonlu elemanlar metodu ile çözüm verecek şekilde ifade edersek ve gerekli m katsayı matrisleri oluşturulursa (5.7), (5.8), (5.9) nolu ifadeler elde edilir.

$$\rho c \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.69)$$

$$|C| \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} + \{|K_c| + |K_h|\} \{T\} = \{R_q\} + \{R_h\} \quad (4.70)$$

$$|C| \{T_n\} - |C| \{T_{n-1}\} + \Delta t \{|K_c| + |K_h|\} \{T\} = \{R_q + R_h\} \Delta t \quad (4.71)$$

Katsayı matrisi (Eleman kapasite matrisi),

$$|C| = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \{N\} [N] d\Omega \quad (4.72)$$

Kondüksiyon ifadesi;

$$|K_c| = \int_{\Omega^{(e)}} |B|^T |k| d\Omega \quad (4.73)$$

Konveksiyon ifadesi;

$$|K_h| = \int_{s_3} h \{N\} [N] d\Gamma \quad (4.74)$$

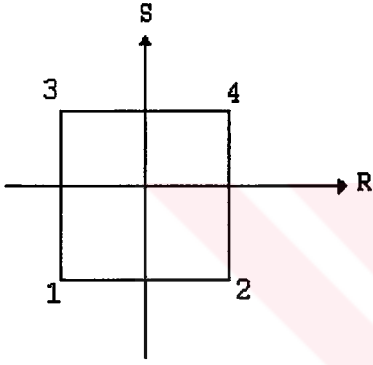
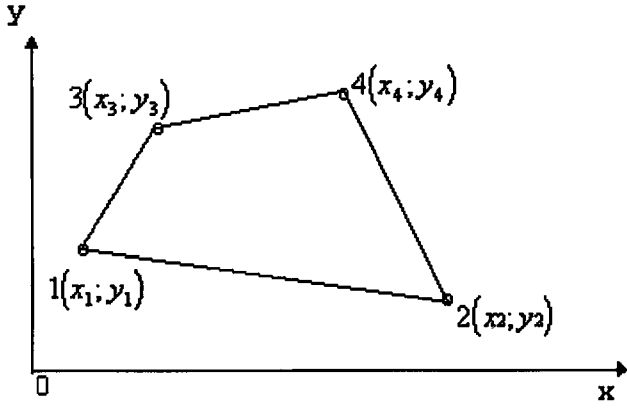
Yüzey ısınması;

$$|R_q| = \int_{s_2} q_s \{N\} d\Gamma \quad (4.75)$$

Yüzey konveksiyonu;

$$|R_h| = \int_{s_3} h T_e \{N\} d\Gamma \quad (4.76)$$

ve transform edilmiş eksen takımındaki durumu elde edilmiş olur.



Şekil 4.6. Dört düğümlü ve iki boyutlu izoparametrik eleman

4.4. İzoparametrik Formülasyon

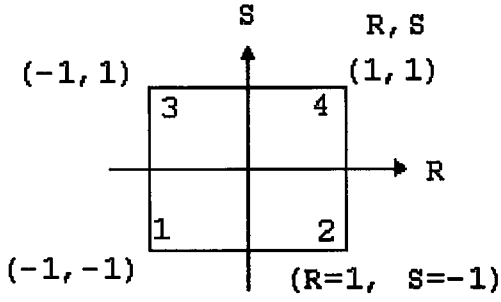
Şekil fonksiyonu elemanları sırasıyla

$$\frac{1}{4}(1+R)(1+S) = N_4 \quad (4.77)$$

$$\frac{1}{4}(1-R)(1+S) = N_3 \quad (4.78)$$

$$\frac{1}{4}(1-R)(1-S) = N_1 \quad (4.79)$$

$$\frac{1}{4}(1+R)(1-S) = N_2 \quad (4.80)$$



Şekil 4.7. Dört düğümlü ve iki boyutlu izoparametrik elemanın düğüm numaraları ve koordinatları.

Bize $\frac{\partial T}{\partial x}$ ve $\frac{\partial T}{\partial y}$ türevleri gerekli olmaktadır.

Bunun için zincir kuralını yazarak

$$dT = \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial R} = \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial R} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial R} \quad (4.81)$$

$$dT = \frac{\partial T}{\partial x} dx + \frac{\partial T}{\partial y} dy \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial S} = \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial S} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial S} \quad (4.82)$$

elde edilir. (4.81) ve (4.82) ifadeleri matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial R} \\ \frac{\partial T}{\partial S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial R} \\ \frac{\partial x}{\partial S} & \frac{\partial y}{\partial S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

Jakobian matris; $J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial R} & \frac{\partial y}{\partial R} \\ \frac{\partial x}{\partial S} & \frac{\partial y}{\partial S} \end{bmatrix} \quad (4.84)$

Buradan gerekli türevler alınır;

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial R} \\ \frac{\partial T}{\partial S} \end{bmatrix} \quad (4.85)$$

İzoparametriklerde x ve y de aynı interpolasyon fonksiyonu ile yazılabilir.

$$X = N_1 x_1 + N_2 x_2 + N_3 x_3 + N_4 x_4$$

$$Y = N_1 y_1 + N_2 y_2 + N_3 y_3 + N_4 y_4 \quad (4.86)$$

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-R)(1-S) \quad (4.88)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1+R)(1-S) \quad (4.89)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1-R)(1+S) \quad (4.90)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1+R)(1+S) \quad (4.91)$$

$$\frac{\partial x}{\partial R} = \frac{\partial N_1}{\partial R} x_1 + \frac{\partial N_2}{\partial R} x_2 + \frac{\partial N_3}{\partial R} x_3 + \frac{\partial N_4}{\partial R} x_4 \quad (4.92)$$

$$\frac{\partial x}{\partial R} = -\frac{1}{4}(1-S)x_1 + \frac{1}{4}(1-S)x_2 - \frac{1}{4}(1+S)x_3 + \frac{1}{4}(1+S)x_4 \quad (4.93)$$

$$\frac{\partial x}{\partial S} = \frac{\partial N_1}{\partial S} x_1 + \frac{\partial N_2}{\partial S} x_2 + \frac{\partial N_3}{\partial S} x_3 + \frac{\partial N_4}{\partial S} x_4 \quad (4.94)$$

$$\frac{\partial x}{\partial S} = -\frac{1}{4}(1-R)x_1 - \frac{1}{4}(1+R)x_2 + \frac{1}{4}(1-R)x_3 + \frac{1}{4}(1+R)x_4 \quad (4.95)$$

$$\frac{\partial y}{\partial R} = \frac{\partial N_1}{\partial R} y_1 + \frac{\partial N_2}{\partial R} y_2 + \frac{\partial N_3}{\partial R} y_3 + \frac{\partial N_4}{\partial R} y_4 \quad (4.96)$$

$$\frac{\partial y}{\partial R} = -\frac{1}{4}(1-S)y_1 + \frac{1}{4}(1-S)y_2 - \frac{1}{4}(1+S)y_3 + \frac{1}{4}(1+S)y_4 \quad (4.97)$$

$$\frac{\partial y}{\partial S} = -\frac{1}{4}(1-R)y_1 - \frac{1}{4}(1+R)y_2 + \frac{1}{4}(1-R)y_3 + \frac{1}{4}(1+R)y_4 \quad (4.98)$$

Buradan Jakobian matris:

$$J = \begin{vmatrix} -\frac{1}{4}(1-s)x_1 + \frac{1}{4}(1-s)x_2 - \frac{1}{4}(1+s)x_3 + \frac{1}{4}(1+s)x_4 & -\frac{1}{4}(1-s)y_1 + \frac{1}{4}(1-s)y_2 + \dots \\ -\frac{1}{4}(1-R)x_1 - \frac{1}{4}(1+R)x_2 + \frac{1}{4}(1-R)x_3 + \frac{1}{4}(1+R)x_4 & -\frac{1}{4}(1-R)y_1 - \frac{1}{4}(1+R)y_2 + \dots \end{vmatrix}$$

bulunur. (4.99)

4.5. Sonlu Eleman Formülasyonu

Problemin sonlu elemanlar metodu ile çözümünü yapabilmek için (4.63), (4.64), (4.65), (4.66) nolu ifadeler matris ortamında yeniden yazılarak sayısal çözüm yöntemi geliştirilebilir.

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.100)$$

Fourier Kanunundan, anizotropik (genel) malzemeler için;

$$q_x = - \left(k_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.101)$$

$$q_y = - \left(k_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.102)$$

$$q_z = - \left(k_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.103)$$

Homojen ve izotropik malzemeler için:

$$k_{12} = k_{13} = k_{21} = k_{23} = k_{31} = k_{32} = 0 \quad (4.104)$$

olduğundan,

$$\begin{aligned} q_x &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y &= -k \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z &= -k \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad k_{11} = k_{22} = k_{33} = k \text{ 'dir.} \quad (4.105)$$

(İki boyutlu çözüm için q_3 terimi kullanılmayacaktır.)

$[N]$: Isı interpolasyon matrisi

$$[N] = [N_1 N_2 N_3 N_4] \quad (4.106)$$

$|B|$: Isı gradyan interpolasyon matrisi şöyle bulunur:

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = |B| \{T\} \quad (4.107)$$

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} \quad T = N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + N_4 T_4 \quad (4.108)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial N_1}{\partial x} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial x} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial x} T_3 + \frac{\partial N_4}{\partial x} T_4 \\ \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\partial N_1}{\partial y} T_1 + \frac{\partial N_2}{\partial y} T_2 + \frac{\partial N_3}{\partial y} T_3 + \frac{\partial N_4}{\partial y} T_4 \end{aligned} \quad (4.109)$$

Matris formunda yazılırsa;

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} \quad (4.110)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{|B|} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\{T\}}$

O halde $|B|$ matrisi;

$$|B| = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad \{T\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{Bmatrix} \quad (4.111)$$

bulunur. (4.110) eşitliği sembolik olarak yazılırsa,

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = |B| \{T\} \quad (4.112)$$

elde edilir.

Direngenlik matrisinin elde edilmesi:

Ağırlıklı kalıcı metod (Galerkin formülü) uygulanırsa (4.10) nolu genel ısı iletim diferansiyel denklemi,

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y}\right) + g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.113)$$

aşağıdaki şekli alır:

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - g + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i d\Omega \quad (4.114)$$

$\int_{\Omega^{(e)}}$: Eleman integralini göstermektedir.

e : Eleman

Ω : Eleman boyunca integral sahası

N_i : i'yinci sıcaklık interpolasyon matrisi (i=1,2,3,4 dür).

$$\int_{\Omega^{(e)}} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) N_i d\Omega \quad (4.115)$$

integral şöyle yazılabilir:

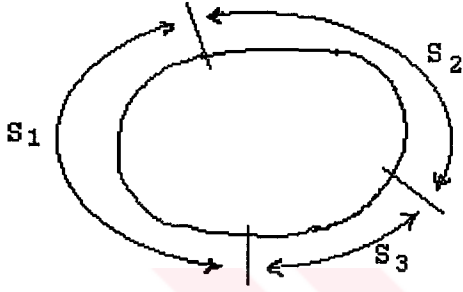
$$\int_{\Omega^{(e)}} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] \begin{Bmatrix} qx \\ qy \end{Bmatrix} d\Omega \quad (4.116)$$

Bu çalışmada içinde ısı üretimi olmayan bir sistem ele alınmıştır. 4.116 nolu ifadeye Gaus teoremi uygulanarak integral işlemi yapılır. (Bu teorem eleman sınırı boyunca ısı akısının yüzey integrallerini işleme sokma anlamını taşımaktadır.) Eleman sınırı $\Gamma^{(e)}$ olsun. Buradan;

$$\boxed{\Omega^{(e)}} \sim \Gamma^{(e)}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega^{(e)}} g c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} d\Omega \\
& = \int_{\Omega^{(e)}} Q N_i d\Omega - \int_{\Gamma^{(e)}} (q \cdot \tilde{n}) N_i d\Gamma \\
& i=1, 2, 3, 4
\end{aligned} \tag{4.117}$$

elde edilir. Yüzey integrali S_1, S_2, S_3 yüzeyleri boyunca integrallerin toplamı olarak yazılabilir.



$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i d\Omega - \int_{\Omega^{(e)}} \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \right] \begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} d\Omega = \\
& \int_{\Omega^{(e)}} Q N_i d\Omega - \int_{S_1} (q \cdot \tilde{n}) N_i d\Gamma + \int_{S_2} q_s N_i d\Gamma - \int_{S_3} h(T - T_e) N_i d\Gamma
\end{aligned} \tag{4.118}$$

q_x ve q_y şöyle de yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = -|k| |B| \{T\} \tag{4.119}$$

veya

$$\begin{Bmatrix} q_x \\ q_y \end{Bmatrix} = -k|B| \{T\} \tag{4.120}$$

sonuç olarak ara işlemlerden sonra,

$$|C| \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [|K_e| + |K_h|] \{T\} = \{R_T\} + \{R_\varrho\} + \{R_q\} + \{R_h\} \tag{4.121}$$

bulunur. Burada

$$|C| = \int_{\Omega^{(e)}} \rho c \{N\} |N| d\Omega \quad (4.122)$$

$$\{N\} = \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{Bmatrix} \quad |N| = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (4.123)$$

$$|K_c| = \int_{\Omega^{(e)}} k |B^T| |B| d\Omega \quad (\text{Kondüksiyon}) \quad (4.124)$$

$$|K_h| = \int_{\Omega^{(e)}} h \{N\} |N| d\Omega \quad (\text{Konveksiyon}) \quad (4.125)$$

$$\{R_T\} = - \int_{s_1} (q \cdot \tilde{n}) \{N\} d\Gamma \quad (\text{Özel düğüm sıcaklıkları}) \quad (4.126)$$

$$\{R_Q\} = \int_{\Omega} g \{N\} d\Omega \quad (\text{İç ısı kaynağı}) \quad (4.127)$$

$$\{R_q\} = \int_{s_2} q_s \{N\} d\Gamma \quad (\text{Özel yüzey ısınması}) \quad (4.128)$$

$$\{R_h\} = \int_{s_3} h T_a \{N\} d\Gamma \quad (\text{Yüzey konveksiyonu}) \quad (4.129)$$

ρ : özgül kütle

c : özgül ısı

veya,

$$|H| \{T\} + |C| \left\{ \dot{T} \right\} + \{F\} = 0 \quad (4.130)$$

Burada,

$$|H| = |K_c| + |K_h| \quad (4.131)$$

$|C|$: Biliniyor.

$$\{F\} = -\{R_Q\} - \{R_h\} \quad (4.132)$$

$$\dot{T} = \frac{T_n - T_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.133)$$

veya daha hassas olarak yazılırsa,

$$\{T\}_{t+\Delta t} = \left[[H] + \frac{3}{2\Delta t} |C|^{-1} \right] \left[-\{F\} + \frac{2[C]}{\Delta t} \{T\}_t - \frac{|C|}{2\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} \right] \quad (4.134)$$

$$\{T\}_{t+\Delta t} = \left([H] + \frac{3}{2\Delta t} |C|^{-1} \right) \left(-\{F\} + \frac{2[C]}{\Delta t} \{T\}_t - \frac{|C|}{2\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} \right) \quad (4.135)$$

elde edilir.

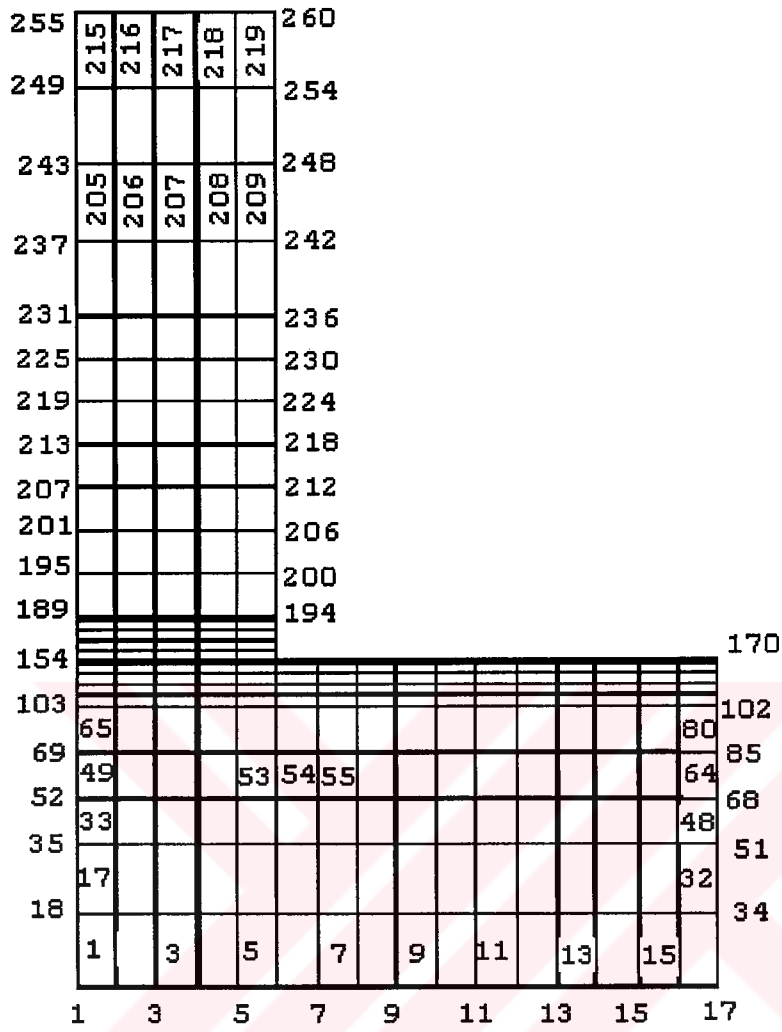


5. SAYISAL ÇÖZÜM VE SONUÇLARI

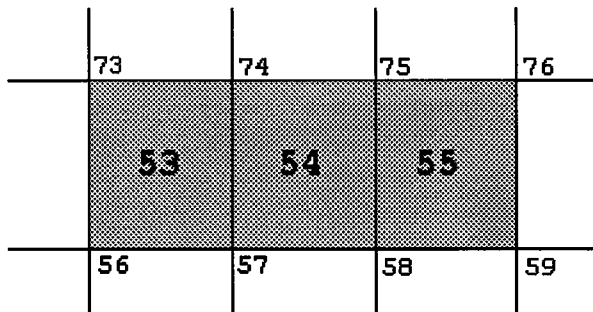
5.1. Sonlu Eleman Ağıının Üretilmesi (Mesh Generation)

Sonlu elemanlar metodu ile yapılan analizlerde sonlu eleman ağının elde edilmesi ilk yapılan işlemdir. Bu ağ, analiz için gerekli olan düğüm koordinatlarını ve her bir elemanı çevreleyen düğüm numaralarını içerir. Her bir elemanın bir kenarında iki, bütün elemanlarda ise toplam dört adet düğüm bulunmaktadır. Elemanların numaralandırılması sistematik biçimde yapılmış ve yine bunun içinde bilgisayar programı hazırlanmıştır. Analizlerde, düğüm numaraları ve düğüm koordinatlarının bilgisayara veri olarak girilmesi gerekmektedir. Yüzlerce düğümün koordinatlarının ve bir o kadar düğüm numaralarının dışarıdan bilgisayara yüklenmesi çok güç ve zaman alıcıdır. Bu şekildeki bir uygulama hata yapma riskini de doğurur. Bunun için sonlu eleman ağı, hazırlanan bilgisayar programı yardımı ile otomatik olarak yapılmıştır. Bu şekildeki otomatik bölmeleme programı Ek 1'de verilmiştir.

Levha " L " şeklinde olup yatay ve düşey kısımdaki x ve y doğrultularında kaç eleman olacağı önceden belirlenmelidir. Çalışma konusu levhanın boyutları da belli olduğundan herbir elemanın boyutları ortaya çıkacaktır. Bunun için önce herbir eleman ve bu elemanın hangi düğümlerde oluştuğu program yardımı ile belirlenir. Daha sonra bu verileri giriş verisi olarak kullanan ikinci bir program düğüm numaralarını ve bunlara karşılık gelen koordinatları belirler. Bu iki programla belirlenen elemanlar ve düğüm numaraları ile düğüm numaraları ve koordinatlar esas çözümü yapan program tarafından giriş verisi olarak kullanılır. Bu şekilde incelenen levha için oluşturulan ağda 219 eleman ve 260 düğüm ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.1. Otomatik bölmelenmiş levha.



Şekil 5.2. Bazı elemanlar ve düğüm numaraları

Tablo 5.1. Bazı elemanlar ve düğüm numaraları

Eleman No	1.Düğüm	2.Düğüm	3.Düğüm	4.Düğüm
53	56	57	74	73
54	57	58	75	74
55	58	59	76	75

Tablo 5.2. Bazı düğüm numaraları ve koordinatlar

Düğüm No	x Koordinatı (mm)	y Koordinatı (mm)
56	15.00	17.33
57	18.75	17.33
58	22.50	17.33
59	26.25	17.33
73	15.00	21.66
74	18.75	21.66
75	22.50	21.66
76	26.25	21.66

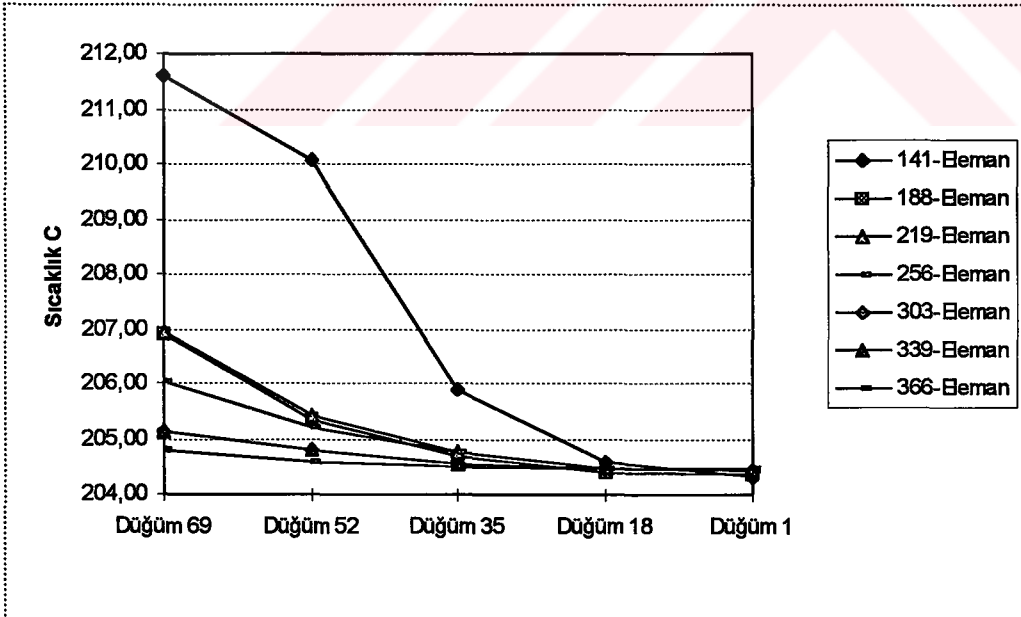
5.2. Sonlu Eleman Ağında Düğüm Sayısı Optimizasyonu

Sonlu eleman analizi için incelenen levha, elemanlara bölünmekte ve düğümler ortaya çıkmaktadır. Sonlu eleman ağındaki toplam düğüm sayısının önemi oldukça büyüktür. Düğüm sayısının fazla tutulması daha hassas sonuçların elde edilmesine yardımcı olur. Ancak arttırma işleminin belirli bir sınırının olması gerektiği de oldukça doğaldır. Yani optimum çözüme gidilmesi zorunluluğu söz konusudur.

İnceleme konusu olan "L" şeklindeki dik kompozit plakalarda uygun düğüm sayısının tespiti için araştırma yapılmıştır. Plaka çeşitli sayılarda elemanlara bölünerek çözümler yapılmıştır. Bu çözümlerde eşit zaman aralığında

elamanlardaki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Düşey yöndeki komşu elemanlar dikkate alınarak, elemanlardaki sıcaklık değişimleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 5.3.'de grafik olarak sunulmuştur.

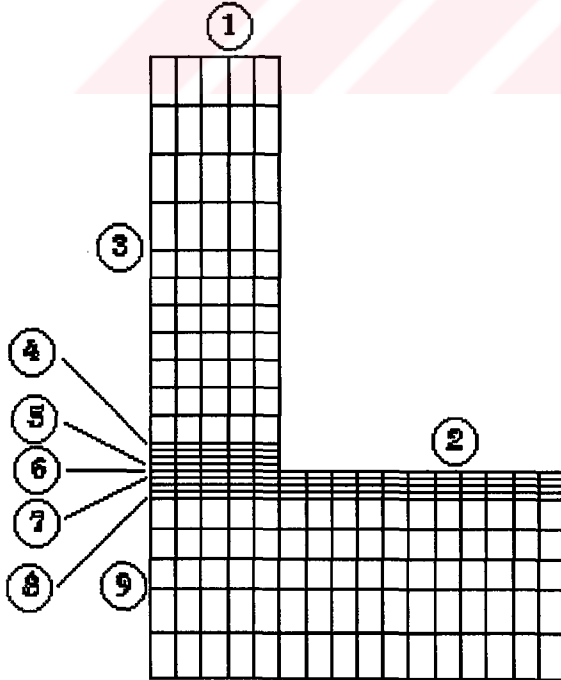
Görüldüğü gibi eleman sayıları 141, 188, 219, 256, 303, 339, 366 olarak alınmıştır. Yapılan analizlerde bulunan sıcaklık değerinin sıcaklık değişimlerini gösteren grafik incelendiğinde küçük eleman sayısı kullanılan örnekte, komşu elemanlar arası sıcaklık değişiminin yüksek olduğu görülecektir. Eleman sayısı arttırıldığında bu eğim düzelmekte, sıcaklık değişimi azalmaktadır. 188-366 eleman aralığında eleman sayısı arttığı halde, sıcaklıktaki değişimin yüksek olmadığı gözlenmektedir. Eleman sayısının tespitinde bu aralık, çalışma aralığı olarak seçilebilir. Bilgisayar çözüm zamanını da dikkate alarak yapılan analizlerde 219 eleman ve 260 düğüm seçilmiştir.



Şekil 5.3. Değişik sayıda bölmeleme nedeniyle düşey yöndeki komşu düğümlerde sıcaklık değişimi.

5.3. Başlangıç Şartları ve Kritik Düğümler

"L" şeklinde birleştirilen dik kompozit ve izotropik plakalarda, malzemenin cinsi değiştirilerek modeller üzerinde sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Malzemenin cinsi değiştirilirken malzeme kalınlığı ve soğutma ortamı da birlikte değiştirilmiştir. Başlangıç sıcaklığı 450 °C alınarak soğutma ortamları ile malzeme kalınlığı değiştirilmiş ve soğuma sırasında plakalarda meydana gelen soğuma eğrileri elde edilmiştir. Bulunan değerler tablo ve grafikler halinde verilmiştir. Grafiklerde kullanılan eğriler için Şekil 5.4 de verilen eksenler üzerindeki düğüm noktaları referans alınmıştır. Şekilde numaralandırılan doğrular boyunca bazı kritik düğümler dikkate alınmış olup, düğüm numaraları Tablo 5.3 de verilmiştir. Ayrıca çözümde kullanılan malzemelere ilişkin ısı özellikler Tablo 5.4, 5.5 ve Şekil 5.5 'dedir.



Şekil 5.4. Kompozit plakada incelenen eksenler.

Tablo 5.3. Dikkate alınan düğüm numaraları

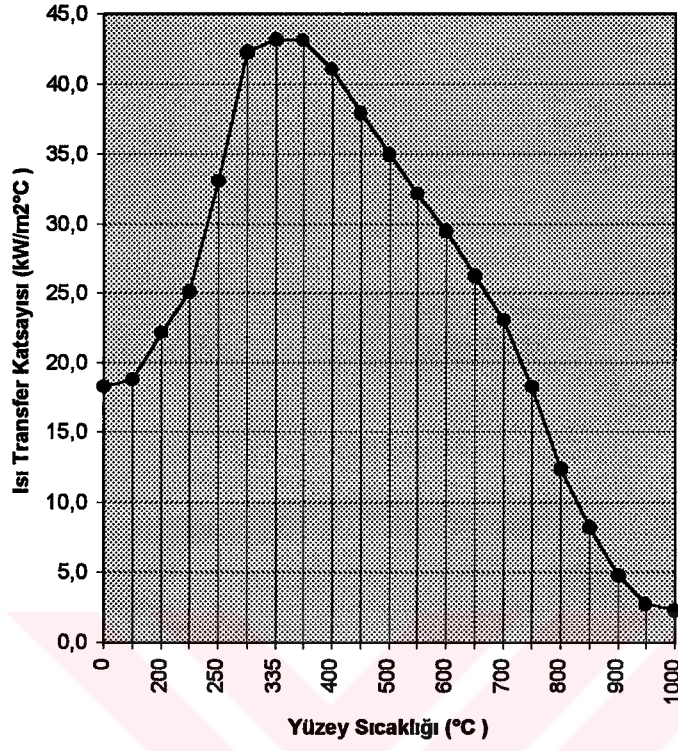
<u>Eksen No</u>	<u>Dikkate Alınan Düğümler</u>
1	258-234-216-198-192-174-157-140-89-72-38-4
2	166-132-98-81-47-13
3	231-232-233-234-235-236
4	189-190-191-192-193-194
5	171-172-173-174-175-176
6	154-155-156-157-158-159-160-161-164-167-170
7	137-138-139-140-141-142-143-144-147-150-153
8	86-87-88-89-90-91-92-93-96-99-102
9	35-36-37-38-39-40-41-42-45-48-51

Tablo 5.4. Çözümde kullanılan malzemelerin ısı özellikleri

	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)	k (W/m°C)
Çelik	7801	473	43
Bakır	8954	383	386
Alüminyum	2707	896	204
Prinç	8522	385	111

Tablo 5.5. Çözümde kullanılan çeşitli ortamlar için ısı transfer katsayıları.

Akışkan	Isı Transfer Katsayısı h (W/m²°C)
Düşük hızdaki hava (Durgun)	$9.297 \cdot 10^{-3} + 1.453 \cdot 10^{-5} \cdot (273+T)$
Su (Durgun)	5.863
Yağ (Durgun)	$0.4188 + 1.256 \cdot 10^{-3} \cdot ((273+T))$



Şekil 5.5. Püskürtmede ısı transfer katsayısının değişimi (Han, 1977) .

5.4. Farklı Soğutma Ortamlarına Bırakılan Çelik-Bakır Kompozit Plakada Sıcaklık Dağılımının Araştırılması

Soğutma sırasında sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimini görmek için aynı tür malzemeler için farklı kalınlıklar ve soğutma ortamları kullanılarak çözümler yapılmıştır. Sayısal çözümde başlangıç sıcaklığı için 450°C, ortam sıcaklığı ise 20°C kabul edilmiştir.

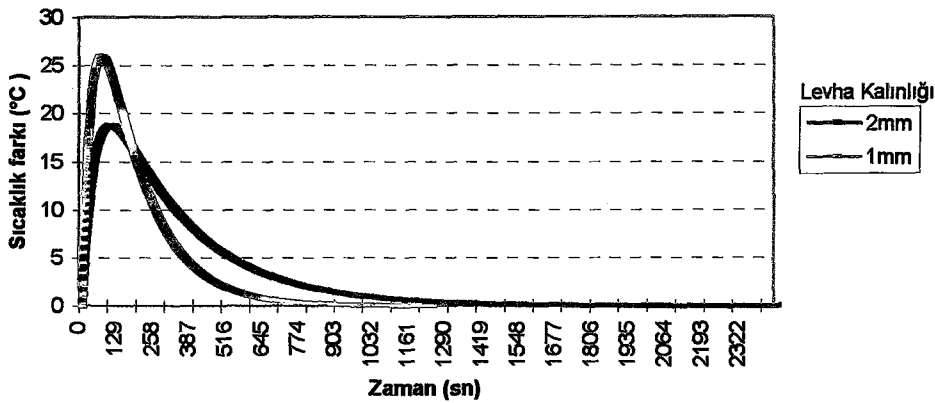
a) Havada Soğutma

Sıcaklık dağılımının kompozit malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimini görmek için öncelikle soğutma sırasında 1.,2.,3. saniye sonunda alınan değerler plakaların şekline uygun olarak tablolar halinde verilmiştir (Tablo 5.6., 5.7., 5.8., 5.9., 5.10., 5.11.).

Sayısal çözümde zaman aralığı 0.0016 saniye alınmıştır. 0.1 saniye aralıkla elde edilen değerler ise yazdırılmıştır. Levha sıcaklığının çevre ile termik dengeye ulaştığı zaman sonunda (sürekli rejim) elde edilen bütün değerler kullanılarak Bölüm 5.3.'de belirlenen kritik düşümler için grafikler çizilmiştir (Şekil 5.7., 5.8., 5.9., 5.10.).

Plakanın farklı malzemelere ait en uzak düşümleri (levha 1'de 13 ve levha 2'de 258. düşüm) incelendiğinde, 1mm kalınlık için, 67. Saniye sonunda 26 °C'lik max sıcaklık farkı oluşmaktadır. Sürekli rejime 1212 ve 1235. saniyelerde ulaşılmaktadır. Grafiklerden görüleceği gibi 21 °C' den 20 °C' ye düşmek için ortalama 350 saniyelik bir süre gerekmiştir. Bunun nedeni sıcaklık farkının çok düşmesi ve ısı transferinin azalmasıdır.

Çözüm 2mm kalınlıktaki kompozit levha için yapıldığında, 100. saniye sonunda (302.45-283.68) 18.77 °C'lik max sıcaklık farkı meydana gelmektedir. Grafiklerden görüleceği gibi 21°C' den 20°C' ye düşmek için ortalama 700 saniyelik bir süre gerekmiştir.



Şekil 5.6.Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümlerde oluşan sıcaklık farkı (Soğutma Ortamı: Hava).

Plakanın farklı kalınlıktaki malzemelere ait en uzak düğümleri (düğüm 13 ile düğüm 258) arasındaki sıcaklık farkları Şekil 5.6 da verilmiştir.

Tablo 5.6 Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Levha kalınlığı: 1mm, Soğutma ortamı: Hava)

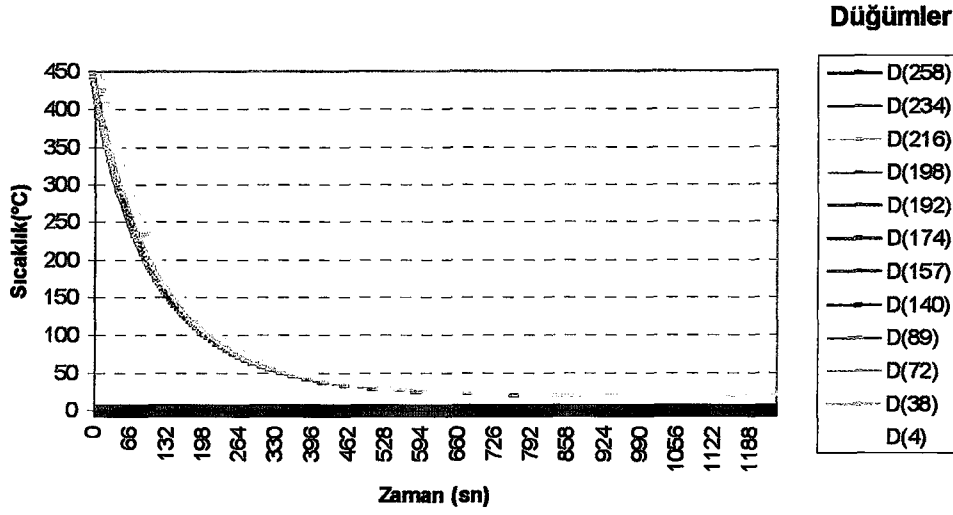
[illegible]

Tablo 5.7. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Levha kalınlığı:1mm, Soğutma ortamı: Hava)

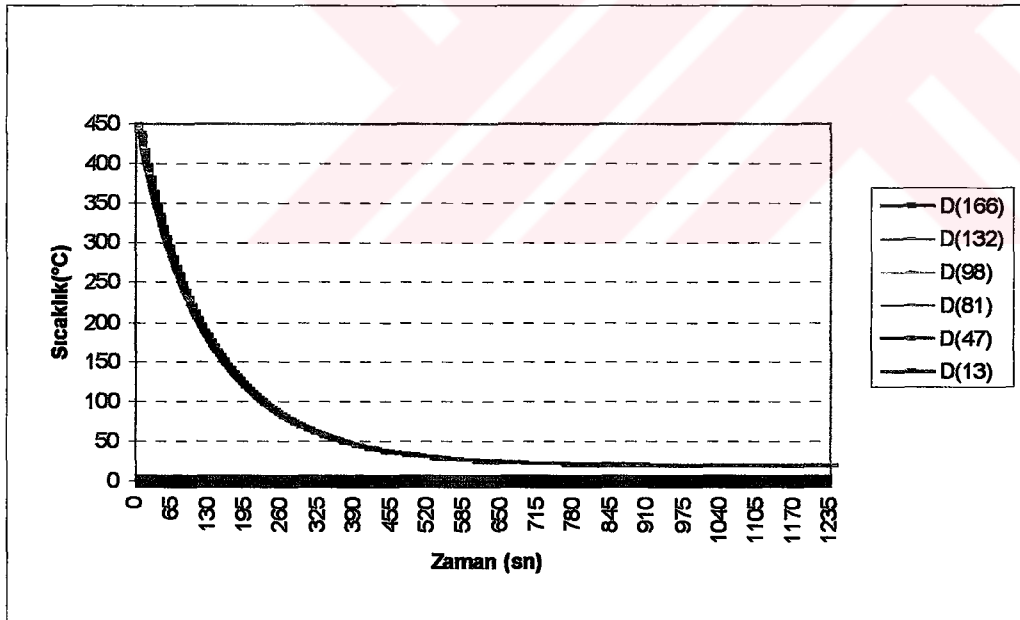
[illegible]

Tablo 5.8. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Hava)

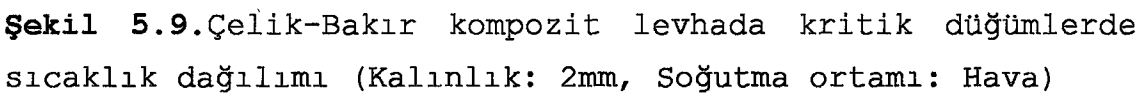
[illegible]



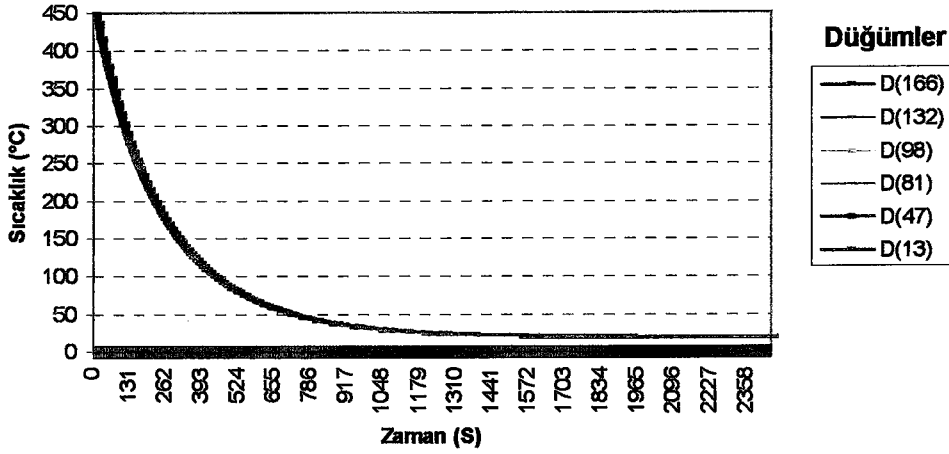
Şekil 5.7. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Hava)



Şekil 5.8. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Hava)

[illegible]

Şekil 5.9.Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Hava)



Şekil 5.10. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Hava)

b) Suda Soğutma

Bulunduğu ortam ile termik dengede bulunan bir kab içindeki suya daldırılarak soğutmaya bırakılan kompozit malzeme yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri, sonlu elemanlar metodu kullanılarak iki boyutlu olarak sayısal çözümleme ile elde edilmiştir.

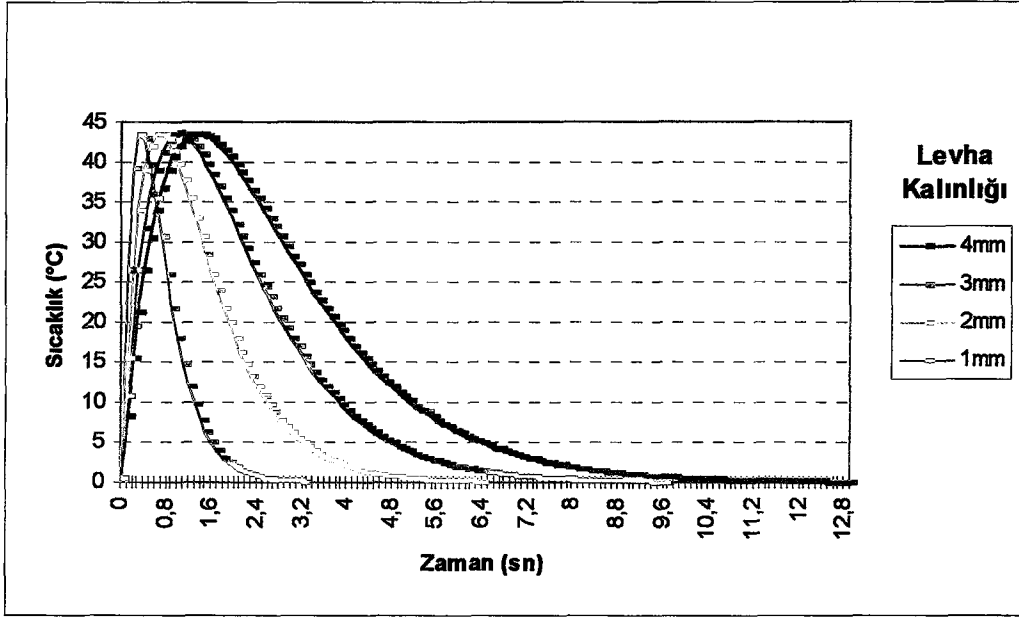
Suda soğutma sırasında, levha kalınlığına bağlı olarak malzeme çiftlerinde 1, 2 ve 3. Saniye sonunda meydana gelen sıcaklık değişimleri ve dağılımları Tablo 5.12., 5.13., 5.14., 5.15., 5.16., 5.17., 5.18., 5.19., 5.20., 5.21., 5.22., 5.23.'de verilmiştir. Tablolarda görüleceği gibi farklı kalınlıktaki malzeme çiftlerinde en uzak düğüm noktalarında (levha-1 de 13 ve levha-2 de 258 nolu düğümler) meydana gelen max sıcaklık farklarına ulaşım için farklı zamanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 5.11. ise 1, 2, 3 ve 4 mm kalınlık için soğumadaki uzak düğümler arası sıcaklık farkını göstermektedir.

Plakanın farklı malzemelere ait (1mm kalınlık için) en uzak düğümleri incelendiğinde, (düğüm 13 ile düğüm 258) 0.3. Saniye sonunda (216.82-173.85) 43.47°C'lik max sıcaklık farkı meydana gelmektedir. 1.8 ve 2.4. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C atına düşerken, ısııl dengeye 2.4 ve 3.2. Saniyelerde ulaşılmaktadır. Yani son 1°C lik (21°C'den 20°C'ye) ısııl dengeye ulaşım süresi ortalama 0.7 saniyeyi gerektirmektedir.

2mm kalınlık için plaka incelendiğinde, 0.7. Saniye sonunda (193.19-149.58) 43.61°C'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 3.6 ve 4.7. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C atına düşerken, ısııl dengeye 4.9 ve 6.4. saniyelerde ulaşılmaktadır. Yani 21°C 'den 20°C 'ye soğuma süresi ortalama 1.5 saniyeyi gerektirmektedir.

3mm kalınlık için plaka incelendiğinde, 1. Saniye sonunda (200.84-157.2) 43.64°C'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 5.4 ve 7.1. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C atına düşerken, rejime 7.5 ve 9.6. Saniyelerde ulaşılmaktadır. Yani son 1°C'lik soğuma süresi ortalama 2.3 saniyeyi gerektirmektedir.

4mm kalınlıktaki plaka incelendiğinde, 1.3. Saniye sonunda (204.98-161.37) 43.61°C'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 7.2 ve 9.4. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C atına düşerken, ısııl dengeye 10 ve 12.9. Saniyelerde ulaşılmaktadır. Son 1°C lik rejime ulaşım süresi ortalama 3.2 saniyeyi gerektirmektedir.



Şekil 5.11.Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümlerde oluşan sıcaklık farkı (Soğutma ortamı: Durgun su).

Sayısal çözümde 0.0016 saniye aralıkla değerler alınmıştır. Bunlardan 0.1 saniye aralıkla elde edilen değerler yazdırılmıştır. Sıcaklığın çevre sıcaklığı ile ısı dengeye ulaştığı zaman sonunda elde edilen bütün değerler kullanılarak Bölüm 5.3.'de belirlenen kritik düğümler için grafikler çizilmiştir. Şekil 5.12., 5.13., 5.14., 5.15., 5.16. 5.17. 5.18., 5.19.,'da verilmiştir.

Tablo 5.12. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

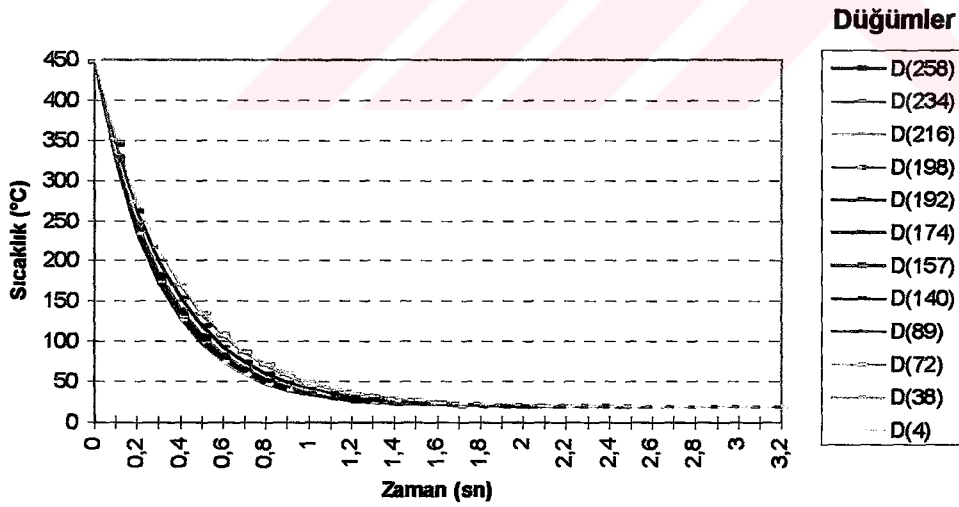
[illegible]

Tablo 5.13. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

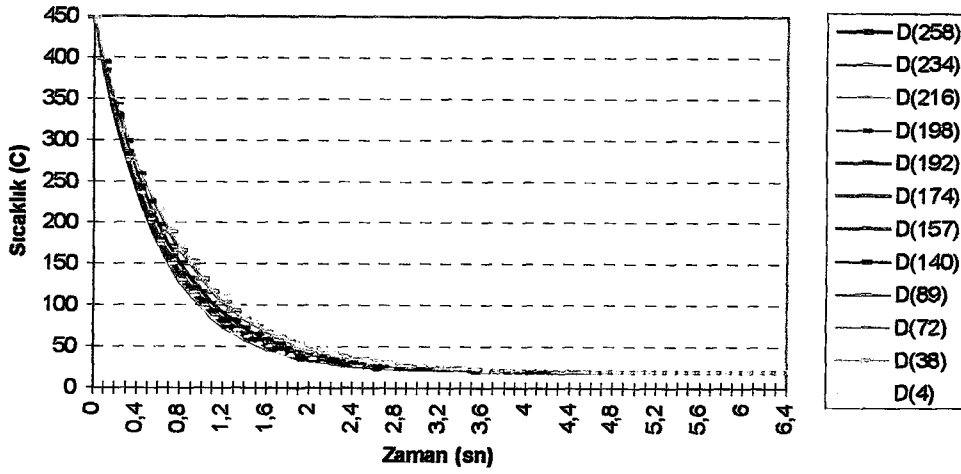
[illegible]

Tablo 5.14. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

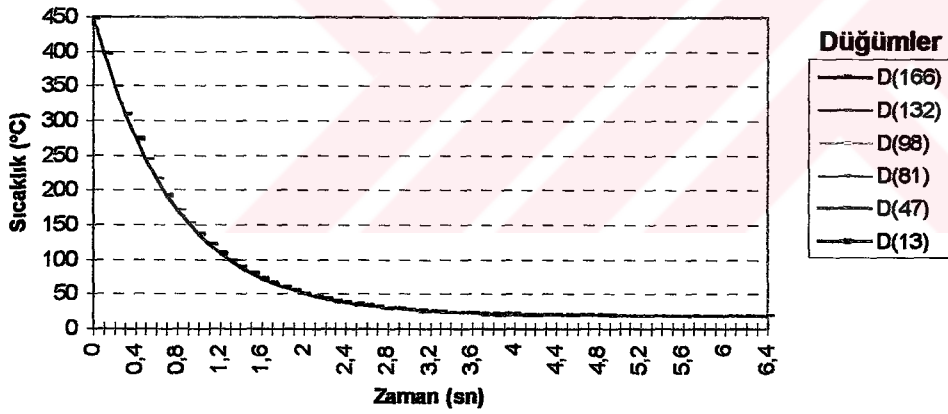
ZAMAN=	3,03					
D,NO=255	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
D,NO=249	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
D,NO=243	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
D,NO=237	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
D,NO=231	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01
D,NO=225	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02
D,NO=219	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02
D,NO=213	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02
D,NO=207	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02
D,NO=201	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02
D,NO=195	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03
D,NO=189	20,03	20,03	20,03	20,03	20,04	20,04
D,NO=183	20,03	20,03	20,04	20,04	20,04	20,04
D,NO=177	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04
D,NO=171	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,05
D,NO=154	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,05
D,NO=137	20,06	20,06	20,06	20,06	20,06	20,08
D,NO=120	20,08	20,08	20,08	20,08	20,08	20,10
D,NO=103	20,09	20,09	20,09	20,09	20,10	20,11
D,NO= 86	20,10	20,10	20,10	20,11	20,11	20,12
D,NO= 69	20,14	20,14	20,14	20,14	20,15	20,15
D,NO= 52	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16
D,NO= 35	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16
D,NO= 18	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16
D,NO= 1	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16



Şekil 5.12. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı:Durgun su)



Şekil 5.14. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su)



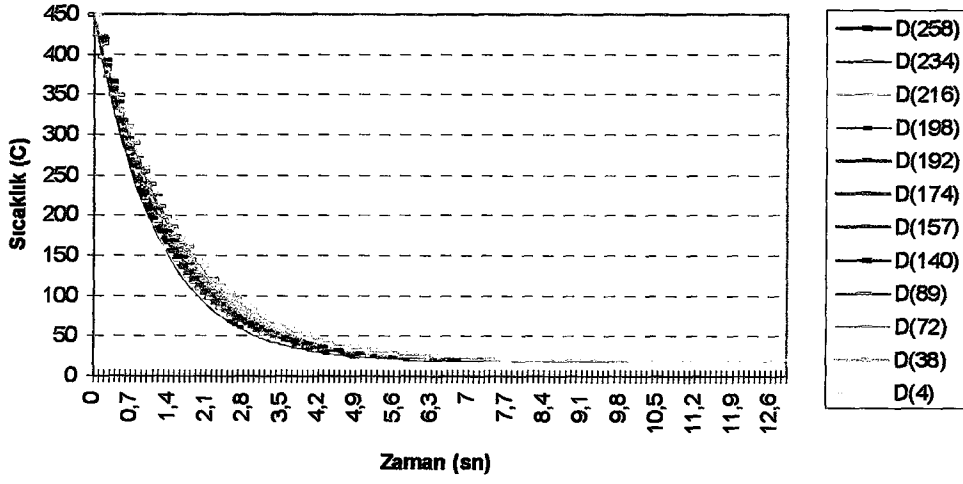
Şekil 5.15. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

Tablo 5.22. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

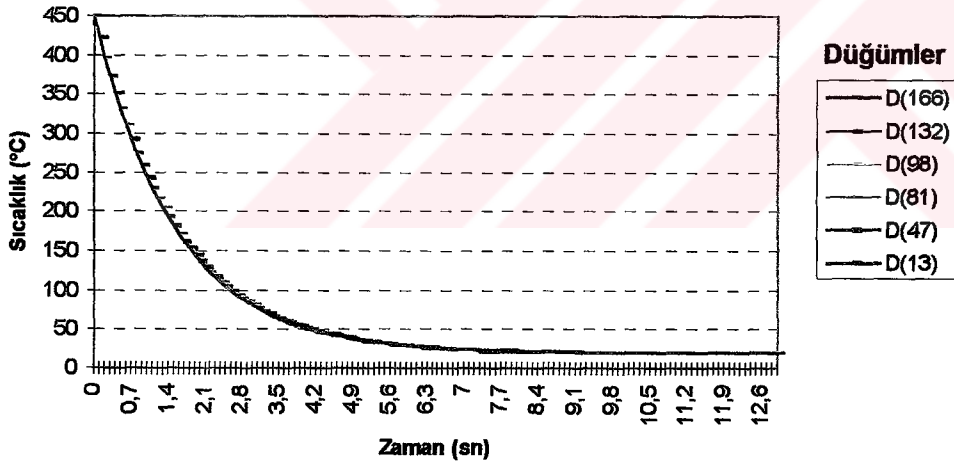
[illegible]

Tablo 5.23. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı:Durgun su)

[illegible]



Şekil 5.18. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Durgun su)



Şekil 5.19. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Durgun su)

c) Yağda Soğutma

Yağda soğutma sırasında sıcaklık dağılımının kalınlığa bağlı olarak değişimini incelemek için 1.,2.,3. saniye sonunda alınan değerler plakaların şekline uygun olarak tablo halinde verilmiştir(Tablo 5.24., 5.25., 5.26., 5.27., 5.28., 5.29., 5.30., 5.31., 5.32., 5.33., 5.34., 5.35., 5.36.).

Plakanın farklı malzemelere ait (1mm kalınlık için) en uzak düğümleri incelendiğinde, (düğüm 13 ile düğüm 258) 1.8. Saniye sonunda (198.38-154.77) 43.61°C 'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 12.2 ve 16.3. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C altına düşerken, ısıt rejime 17.5 ve 22.8. saniyelerde ulaşılmaktadır. 21°C ' den 20°C ' ye geçiş ortalama 5.9 saniyeyi gerektirmektedir.

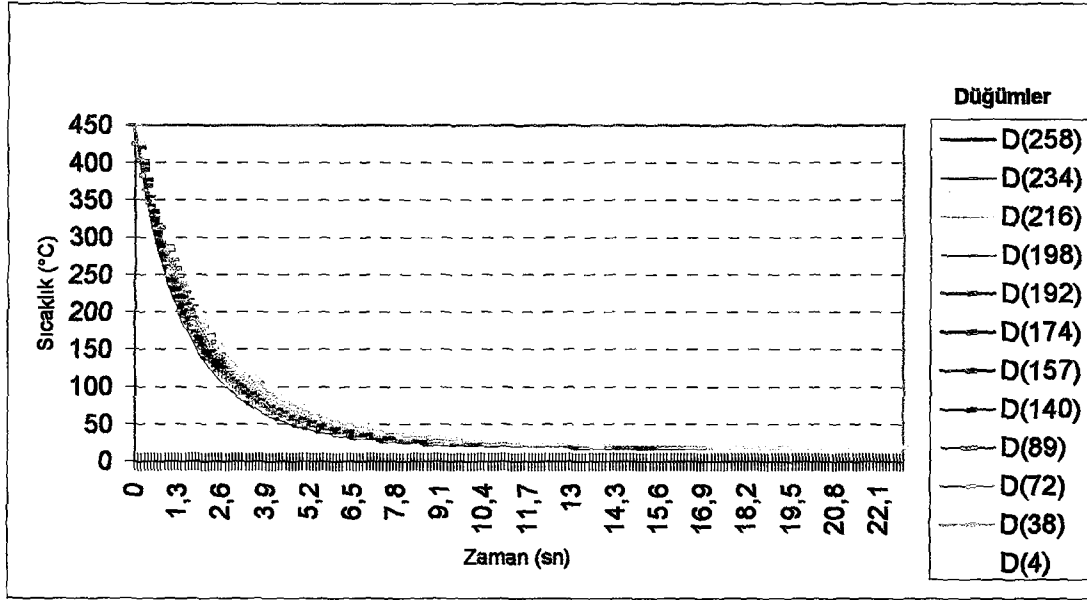
2mm kalınlık için incelendiğinde, 2.9. Saniye sonunda (202.81-159.28) 43.53°C 'lik sıcaklık farkı görülmektedir. Son 1°C lik rejime ulaşım süresi ortalama 9.4 saniyeyi gerektirmektedir.

Plaka 3mm kalınlık için incelendiğinde, 4.3. saniye sonunda (204.38-161.1) 43.28°C 'lik sıcaklık farkı görülmektedir. Sürekli rejime 43.6 ve 53.7. saniyelerde ulaşılmakta ve ısıt dengeye ulaşım süresi ortalama 14.3 saniye olmaktadır.

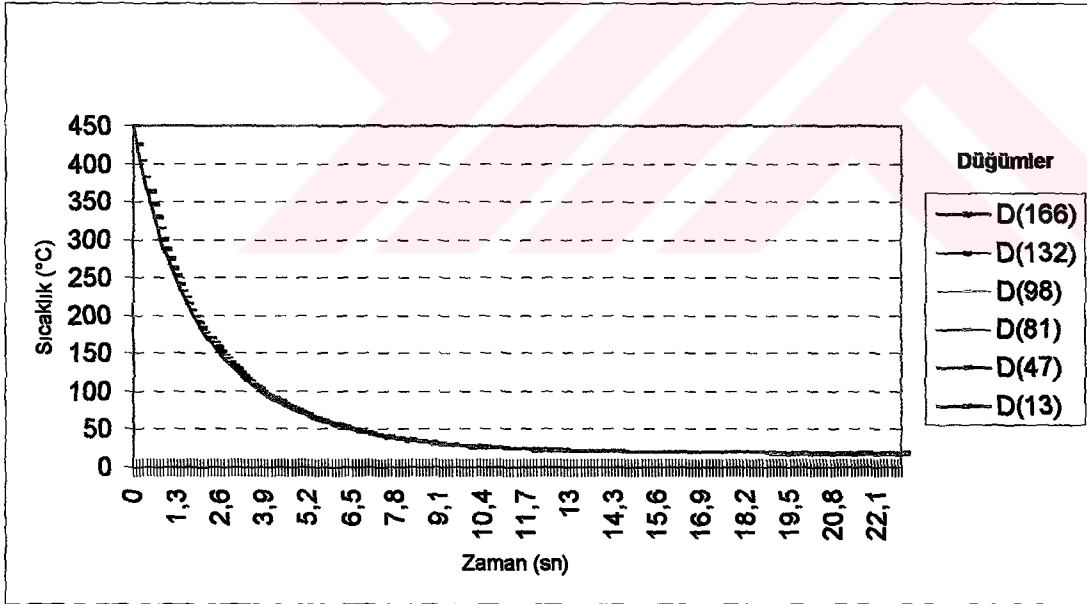
4mm kalınlık için en büyük sıcaklık farkı 5.7. Saniye sonunda (205.16-162.25) 42.91°C olarak bulunmuştur. 40.8 ve 51. Saniye sonlarında malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık 21°C altına düşerken, sürekli rejime 59.2 ve 71.4. saniyelerde ulaşılmaktadır. (Isıt dengeye geliş süresi ortalama 19.4 saniyeyi bulmaktadır.)

Sayısal çözümde 0.0016 saniye aralıkla değerler alınmıştır. Bunlardan 0.1 saniye aralıkla elde edilen değerler yazdırılmıştır. Sıcaklığın çevre sıcaklığı ile dengeye ulaştığı zaman sonunda (sürekli rejim) elde edilen

[illegible][illegible]



Şekil 5.21. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)



Şekil 5.22. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma ortamı: Yağ)

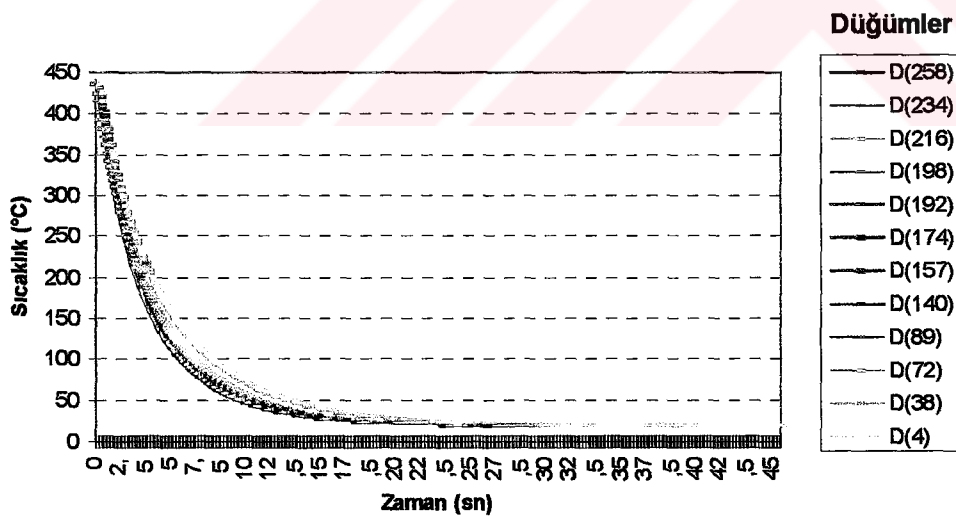
Tablo 5.27. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)

[illegible]

Tablo 5.28. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)

[illegible]

Tablo 5.29. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)

[illegible]

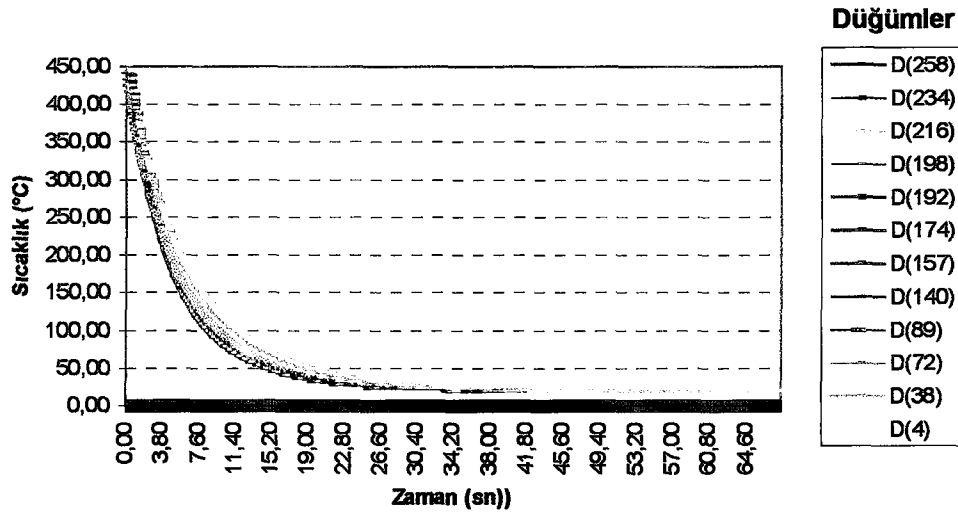
Şekil 5.23. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma ortamı: Yağ)

Tablo 5.31. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)

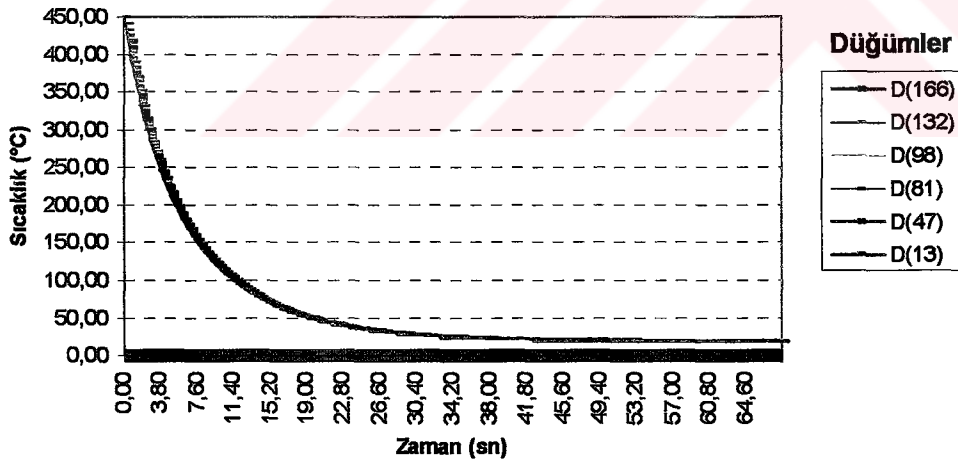
[illegible]

Tablo 5.32. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)

[illegible]



Şekil 5.25. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)



Şekil 5.26. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma ortamı: Yağ)

Tablo 5.33. Çelik-Bakır kompozit levhada 1.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)

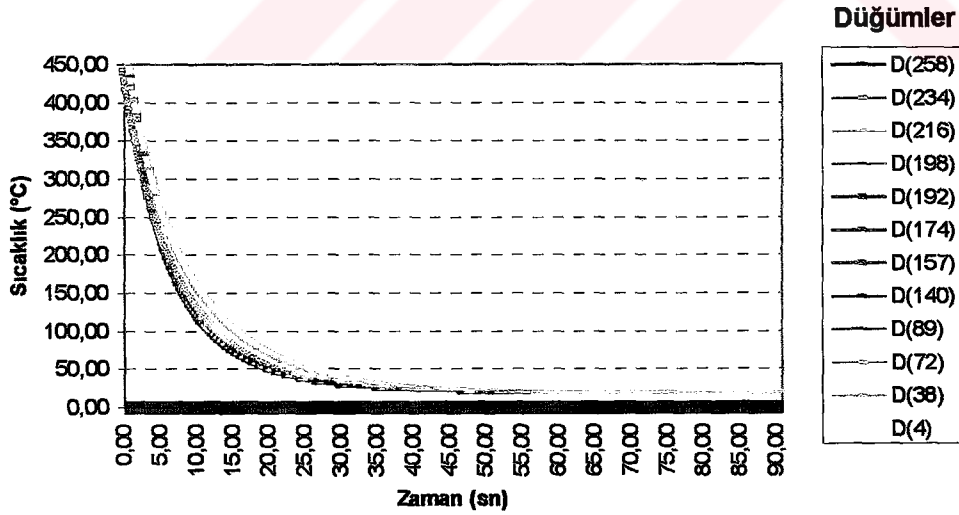
[illegible]

Tablo 5.34. Çelik-Bakır kompozit levhada 2.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)

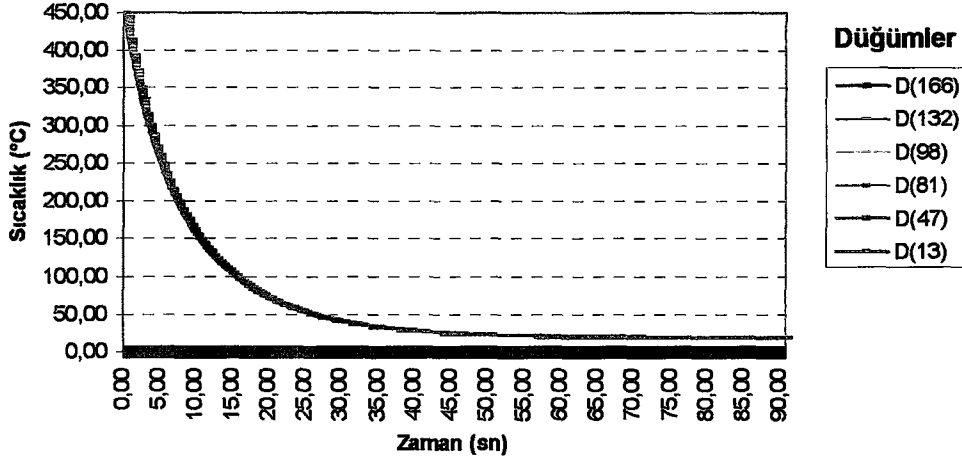
[illegible]

Tablo 5.35. Çelik-Bakır kompozit levhada 3.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)

ZAMAN=	3,00											
D,NO=255	251,66	251,66	251,66	251,66	251,66	251,66						
D,NO=249	251,70	251,70	251,70	251,70	251,70	251,70						
D,NO=243	251,82	251,82	251,82	251,82	251,82	251,82						
D,NO=237	252,09	252,09	252,09	252,09	252,09	252,09						
D,NO=231	252,57	252,57	252,58	252,58	252,58	252,58						
D,NO=225	253,00	253,00	253,00	253,01	253,01	253,01						
D,NO=219	253,57	253,57	253,57	253,58	253,59	253,59						
D,NO=213	254,31	254,32	254,33	254,34	254,35	254,36						
D,NO=207	255,27	255,28	255,31	255,33	255,36	255,37						
D,NO=201	256,49	256,51	256,55	256,61	256,67	256,69						
D,NO=195	258,00	258,02	258,10	258,23	258,36	258,42						
D,NO=189	259,84	259,87	259,98	260,20	260,54	260,78						
D,NO=183	260,35	260,39	260,51	260,74	261,17	261,55						
D,NO=177	260,89	260,93	261,05	261,29	261,80	262,44						
D,NO=171	261,46	261,49	261,62	261,86	262,41	263,55						
D,NO=154	262,05	262,09	262,20	262,49	262,89	265,03	285,21	287,41	288,66	288,85	288,91	288,91
D,NO=137	267,05	267,08	267,19	267,46	267,93	271,47	284,11	287,69	288,60	288,87	288,90	288,91
D,NO=120	271,30	271,33	271,43	271,67	272,34	275,87	284,20	287,74	288,62	288,86	288,91	288,91
D,NO=103	274,89	274,91	275,00	275,23	276,02	279,06	284,73	287,77	288,64	288,86	288,91	288,91
D,NO= 86	277,88	277,90	277,97	278,19	279,00	281,48	285,39	287,85	288,66	288,87	288,91	288,91
D,NO= 69	285,57	285,58	285,62	285,77	286,17	286,90	287,71	288,41	288,77	288,86	288,91	288,91
D,NO= 52	288,19	288,19	288,21	288,26	288,35	288,49	288,65	288,78	288,86	288,90	288,91	288,91
D,NO= 35	288,83	288,83	288,84	288,84	288,85	288,87	288,88	288,89	288,90	288,91	288,91	288,91
D,NO= 18	288,92	288,92	288,92	288,92	288,92	288,92	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91
D,NO= 1	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91	288,91



Şekil 5.27. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)



Şekil 5.28. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma ortamı: Yağ)

d) Su Püskürtme ile Soğutma

Su püskürtme ortamında soğutma sırasında sıcaklık dağılımının kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için 0.10, 0.50, 0.90. saniye sonunda alınan değerler plakaların şekline uygun olarak tablo halinde verilmiştir (Tablo 5.36., 5.37., 5.38., 5.39., 5.40., 5.41., 5.42., 5.43., 5.44., 5.45., 5.46., 5.47.).

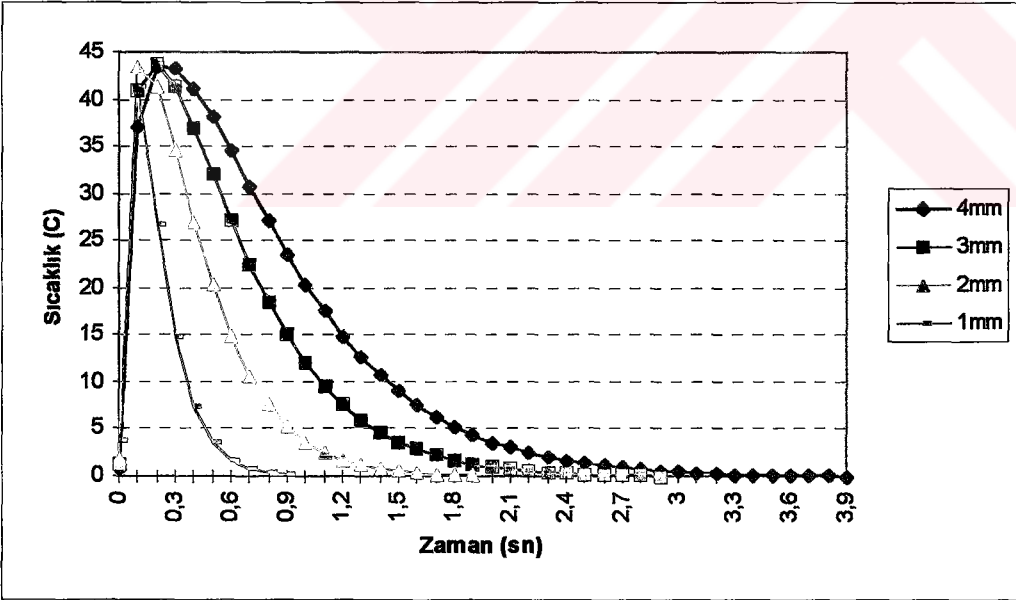
Plakanın farklı malzemelere ait (1mm kalınlık için) en uzak düğümleri incelendiğinde, (düğüm 13 ile düğüm 258) 0.1. Saniye sonunda (147.73-106.29) 41.44°C'lik sıcaklık farkı görülmektedir (Şekil 5.29). Malzemelerin uç noktalarına ait sıcaklık ısı dengeye 0.7 ve 0.9'ncü saniyelerde ulaşılmaktadır.

2mm kalınlık için plaka incelendiğinde, 0.1. saniye sonunda (220.59-177.01) 43.58°C'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 21 °C 'den 20°C 'ye ulaşım süresi ortalama 0.45 saniyeyi gerektirmektedir.

3mm kalınlık için plaka incelendiğinde, 0.2. Saniye sonunda (192.08-148.35) 43.73°C 'lik sıcaklık farkı görülmektedir. 1°C lik ısı dengeye erişim süresi ortalama 0.7 saniyeyi gerektirmektedir.

4mm kalınlık için plaka incelendiğinde, 0.2. Saniye sonunda (221.02-177.61) 43.41°C 'lik sıcaklık farkı görülmektedir. son 1°C lik ısı dengeye ulaşım süresi ortalama 0.95 saniyeyi gerektirmektedir.

Sayısal çözümde 0.0016 saniye aralıkla değerler alınmıştır. Bunlardan 0.1 saniye aralıkla elde edilen değerler yazdırılmıştır. Sıcaklığın çevre sıcaklığı ile dengeye ulaştığı zaman sonunda elde edilen bütün değerler kullanılarak Bölüm 5.3.'de belirlenen kritik düğümler için grafik çizilmiştir. Şekil 5.30., 5.31., 5.32., 5.33., 5.34., 5.35., 5.36., 5.37.,'de verilmiştir.



Şekil 5.29.Çelik-Bakır kompozit levhada en uzak düğümlerde oluşan sıcaklık farkı(Ortam: Su püskürtme).

sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)

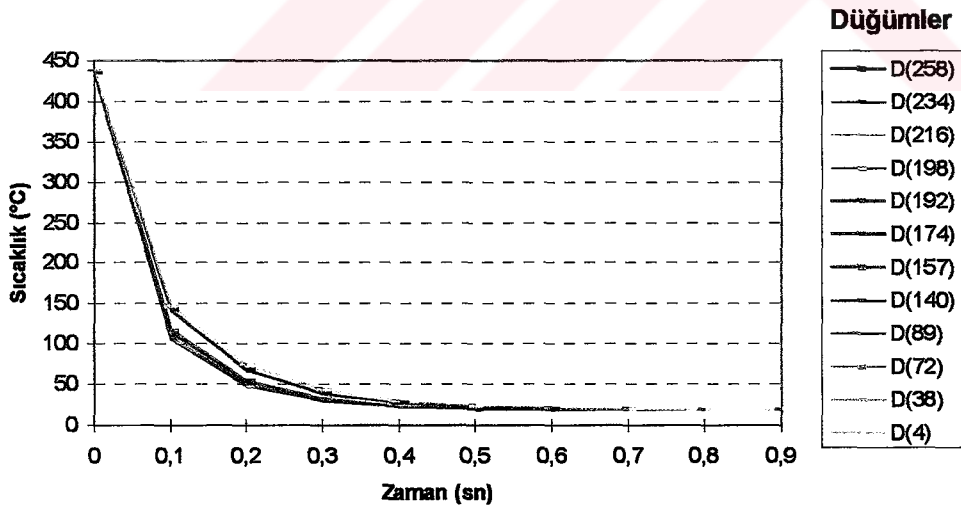
[illegible]

Tablo 5.37. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)

[illegible]

Tablo 5.38. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)

ZAMAN=	0,90											
D,NO=255	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=249	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=243	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=237	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=231	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=225	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=219	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=213	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=207	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01					
D,NO=201	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02					
D,NO=195	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02	20,02					
D,NO=189	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03					
D,NO=183	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03					
D,NO=177	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03	20,03					
D,NO=171	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04					
D,NO=154	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,04	20,06	20,18	20,17	20,18	20,18	20,18
D,NO=137	20,09	20,09	20,09	20,09	20,09	20,09	20,11	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO=120	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13	20,13	20,14	20,17	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO=103	20,15	20,15	20,15	20,15	20,15	20,15	20,16	20,17	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 86	20,16	20,16	20,16	20,16	20,16	20,17	20,17	20,17	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 69	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 52	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 35	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18
D,NO= 1	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18	20,18



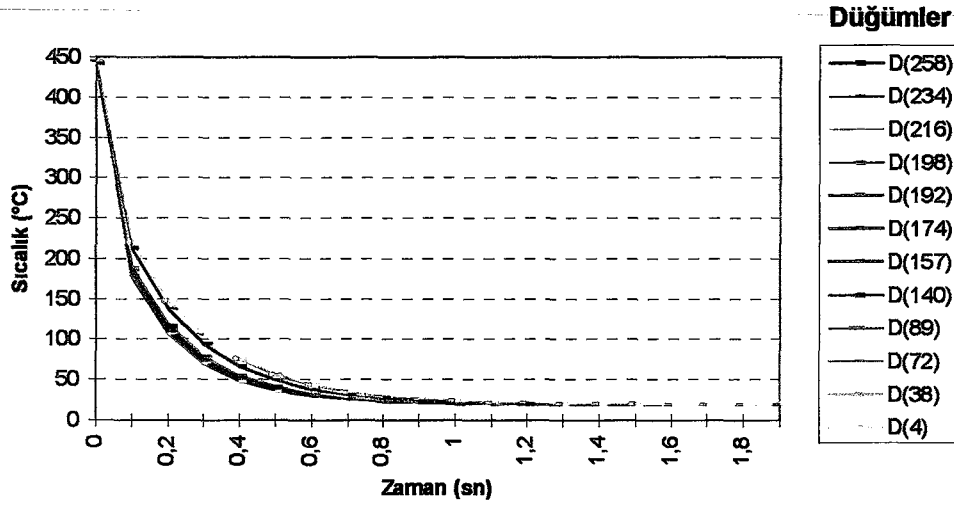
Şekil 5.30. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)

Tablo 5.40. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme) --

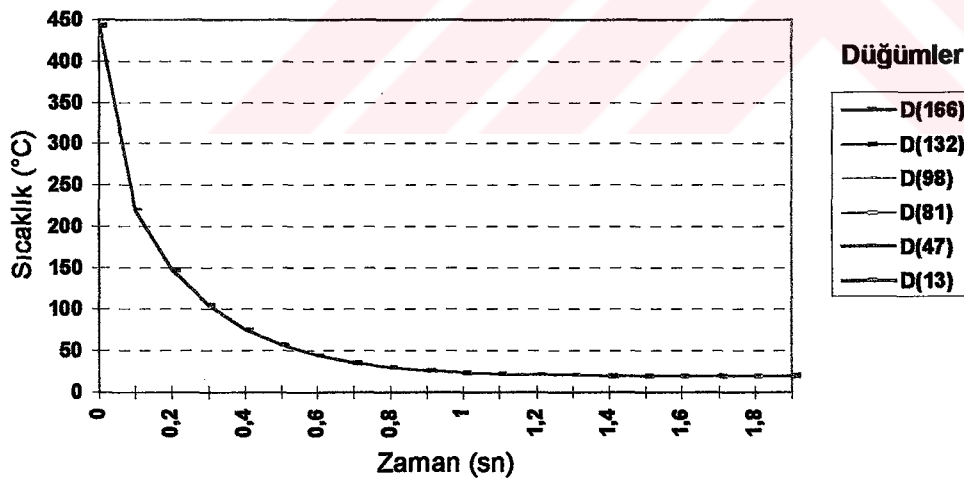
[illegible]

Tablo 5.41. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)

[illegible]



Şekil 5.32. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.33. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Ortam: Su püskürtme)

Tablo 5.42. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.10.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)

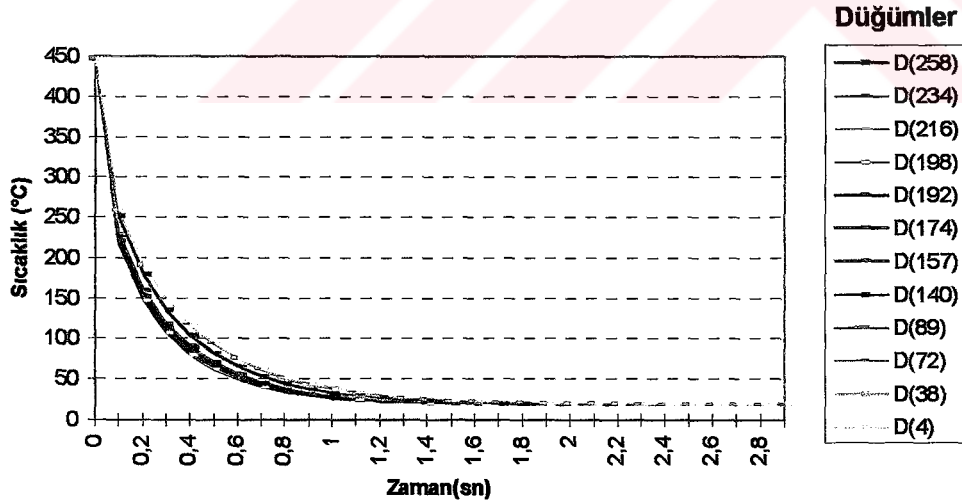
[illegible]

Tablo 5.43. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)

[illegible]

Tablo 5.44. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)

ZAMAN=	0,90											
D,NO=255	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=249	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=243	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=237	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=231	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=225	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11	30,11					
D,NO=219	30,12	30,12	30,12	30,12	30,12	30,12	30,12					
D,NO=213	30,15	30,15	30,15	30,15	30,15	30,15	30,15					
D,NO=207	30,23	30,23	30,23	30,24	30,24	30,24	30,24					
D,NO=201	30,44	30,44	30,44	30,45	30,46	30,46	30,46					
D,NO=195	30,90	30,90	30,91	30,94	30,97	30,98	30,98					
D,NO=189	31,84	31,84	31,86	31,91	32,03	32,14	32,14					
D,NO=183	32,19	32,19	32,21	32,26	32,42	32,61	32,61					
D,NO=177	32,60	32,60	32,62	32,67	32,86	33,20	33,20					
D,NO=171	33,07	33,07	33,09	33,14	33,33	33,97	33,97					
D,NO=154	33,61	33,62	33,63	33,70	33,77	35,05	45,98	44,98	45,10	45,07	45,08	45,08
D,NO=137	38,09	38,09	38,10	38,14	38,15	39,55	45,08	45,18	45,06	45,08	45,08	45,08
D,NO=120	41,15	41,16	41,16	41,17	41,20	42,18	44,89	45,17	45,06	45,08	45,08	45,08
D,NO=103	43,10	43,10	43,10	43,10	43,13	43,69	44,92	45,13	45,07	45,08	45,08	45,08
D,NO= 86	44,25	44,25	44,25	44,25	44,28	44,53	44,99	45,10	45,08	45,08	45,08	45,08
D,NO= 69	45,19	45,19	45,19	45,19	45,19	45,16	45,09	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08
D,NO= 52	45,07	45,07	45,07	45,07	45,07	45,07	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08
D,NO= 35	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08
D,NO= 18	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08
D,NO= 1	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08	45,08



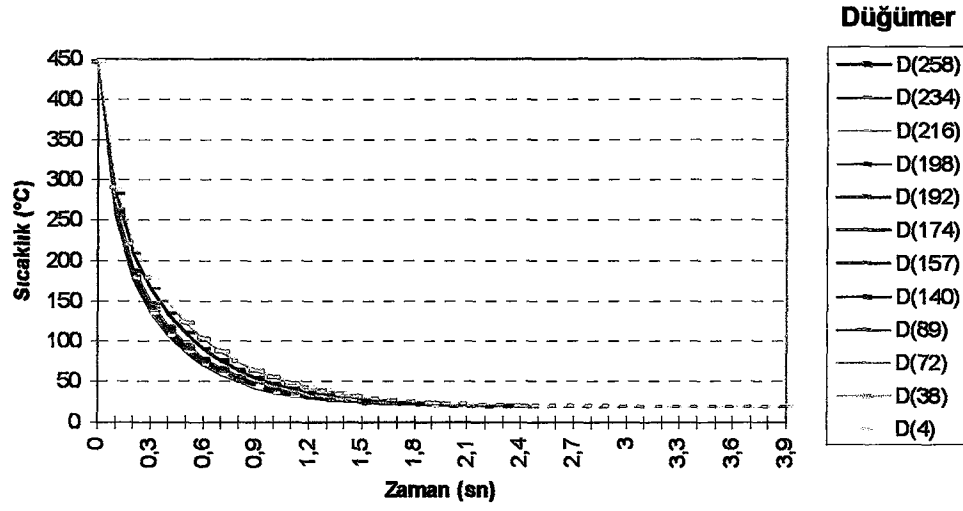
Şekil 5.34. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Ortam: Su püskürtme)

Tablo 5.46. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.50.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)

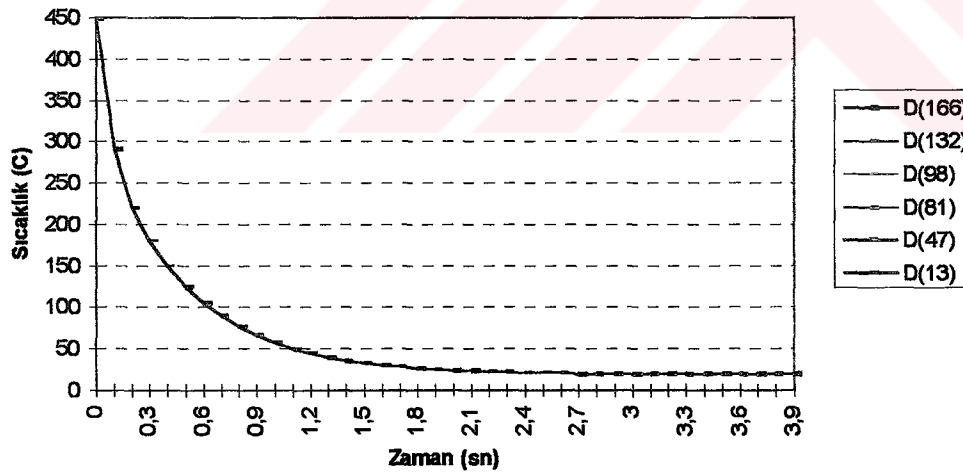
[illegible]

Tablo 5.47. Çelik-Bakır kompozit levhada 0.90.sn sonunda sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)

[illegible]



Şekil 5.36. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.37. Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Ortam: Su püskürtme)

5.5.Kompozit Plakada Sıcaklık Dağılımının Malzeme Kalınlığına Bağlı Olarak Değişimi

Soğutma sırasında sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimini görmek için aynı tür malzemeler için farklı kalınlıklar ve soğutma ortamları verilerek çözümler yapılmıştır. Sayısal çözümde başlangıç sıcaklığı için 450°C referans değer olarak seçilmiş, ortam sıcaklığı 20°C kabul edilmiştir. Bölüm 5.3. de gösterilen kesitlerden aşağıdaki tabloda belirtilen düğüm noktaları dikkate alınarak grafikler çizilmiştir.

Tablo 5.48.Dikkate alınan kesit ve düğümler.

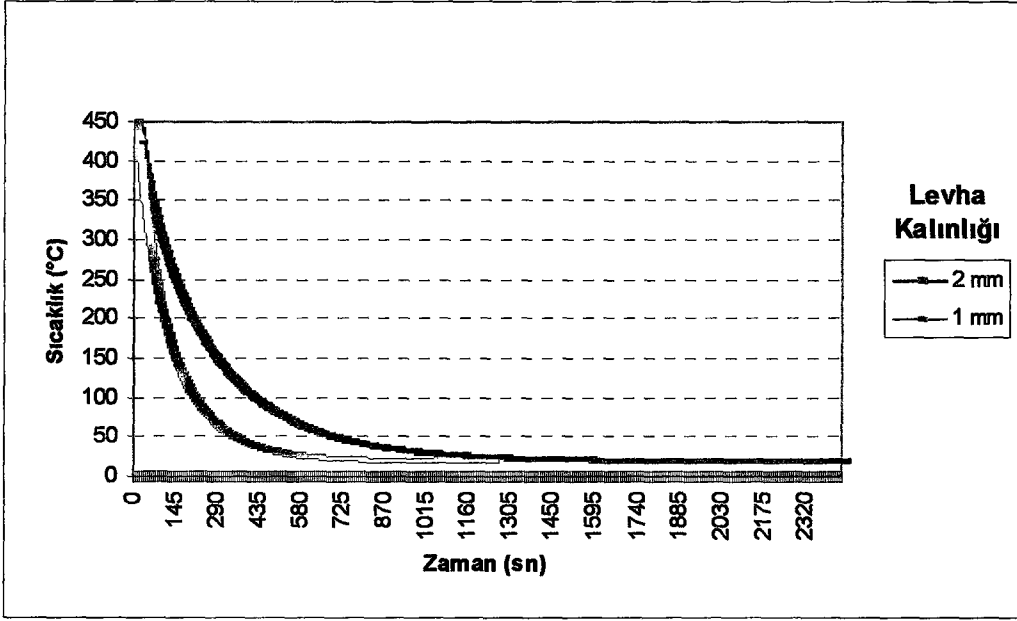
Kesit No	Düğüm No
1 Nolu Kesit	258, 192, 157, 89, 4
6 Nolu Kesit	154, 157, 159, 170

5.5.1.Çelik-Bakır kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimi

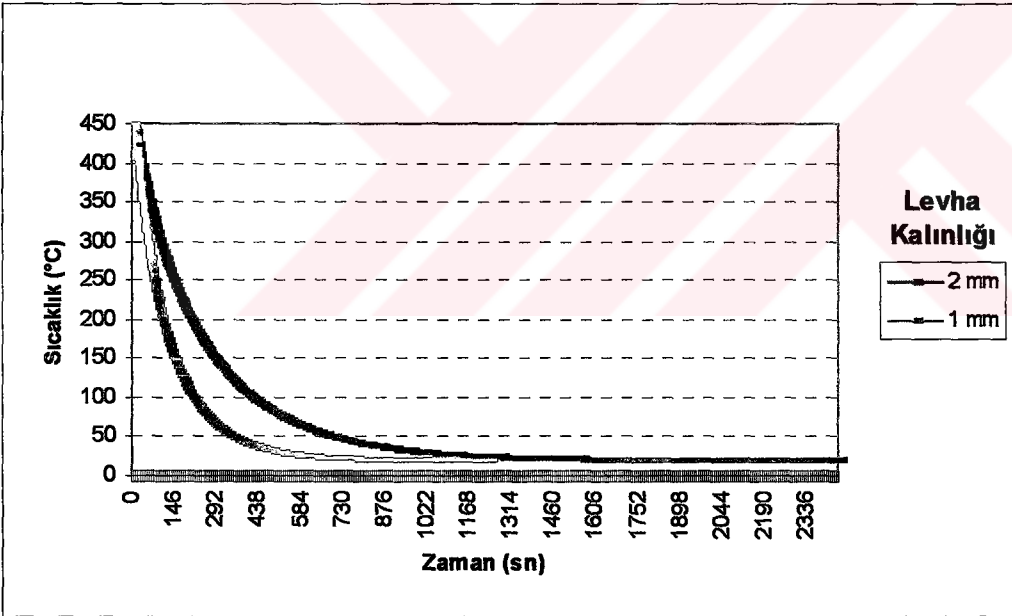
a) Havada Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen havada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48’de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.38., 5.39., 5.40., 5.41., 5.42., 5.43., 5.44., 5.45.)

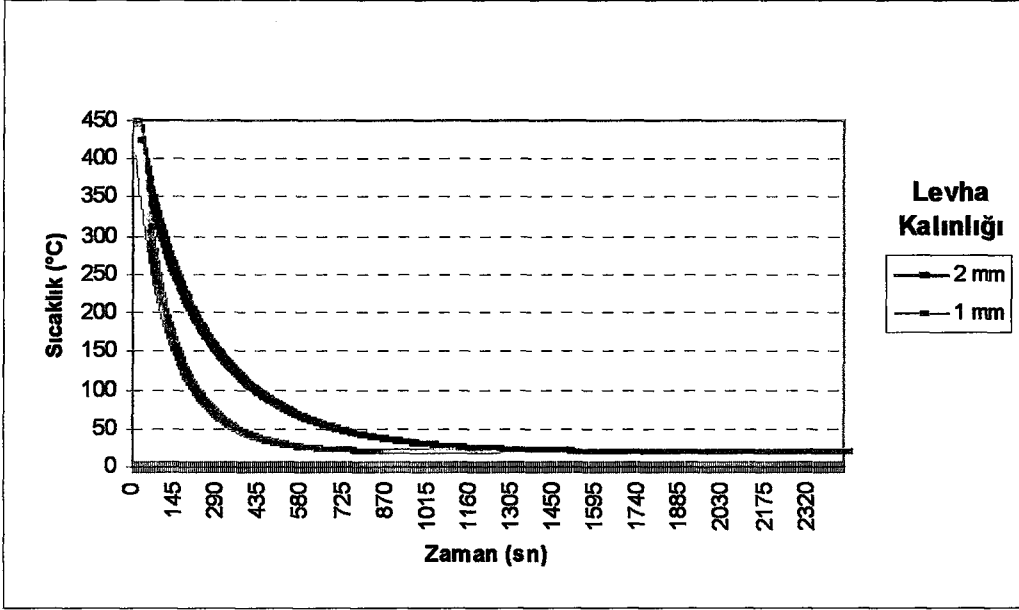
İlgili grafiklerden malzeme kalınlığının soğuma zamanı yönünden önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Malzeme kalınlığı nedeniyle soğuma zamanı yaklaşık iki katına çıkmıştır. 1mm kalınlık için 1235sn, 2mm kalınlık için 2448sn zaman aralığı gerekmiştir.



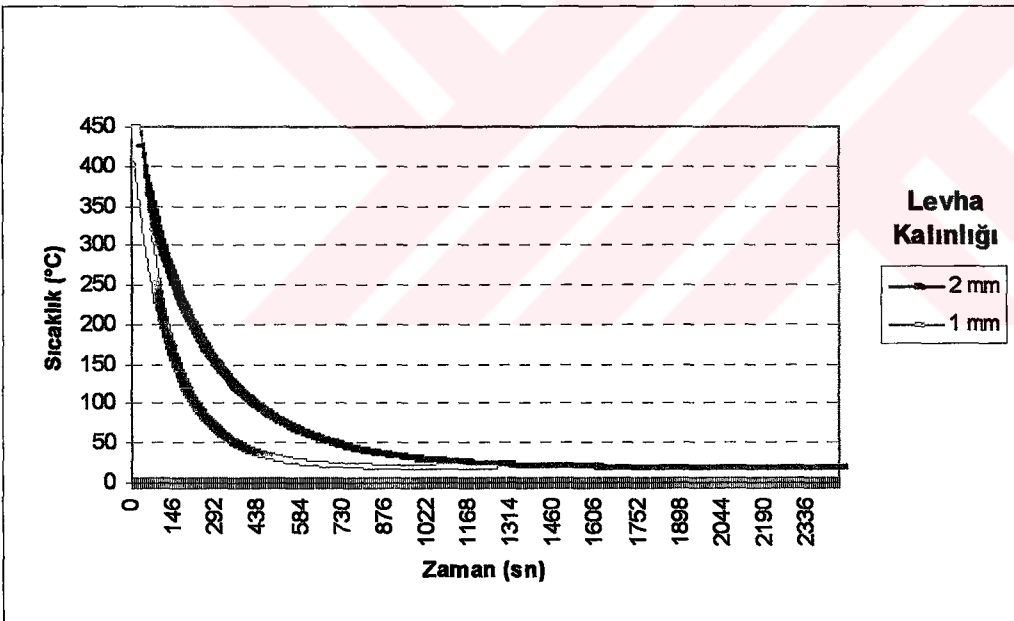
Şekil 5.38.Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



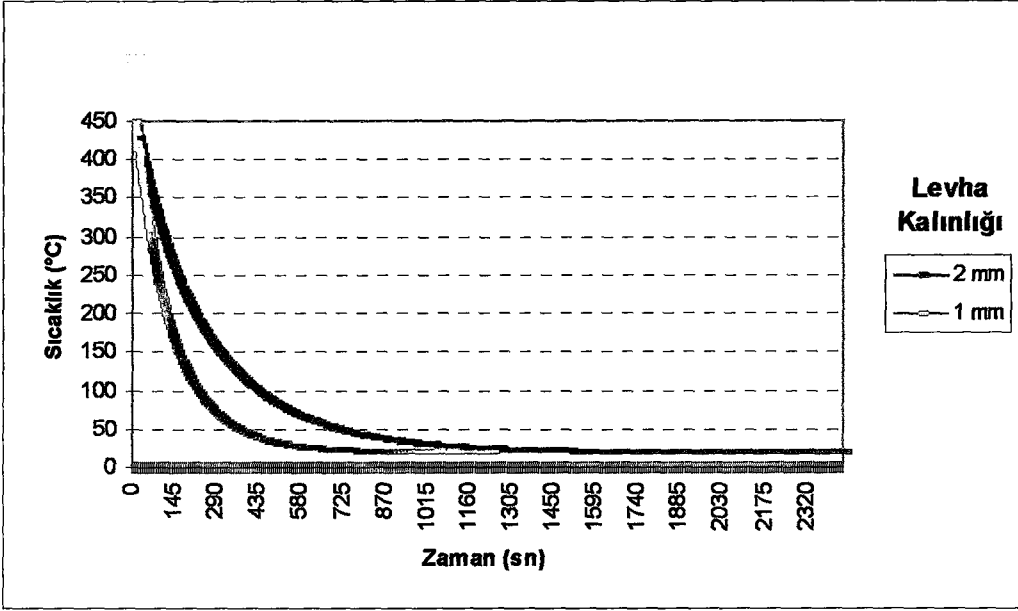
Şekil 5.39. Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



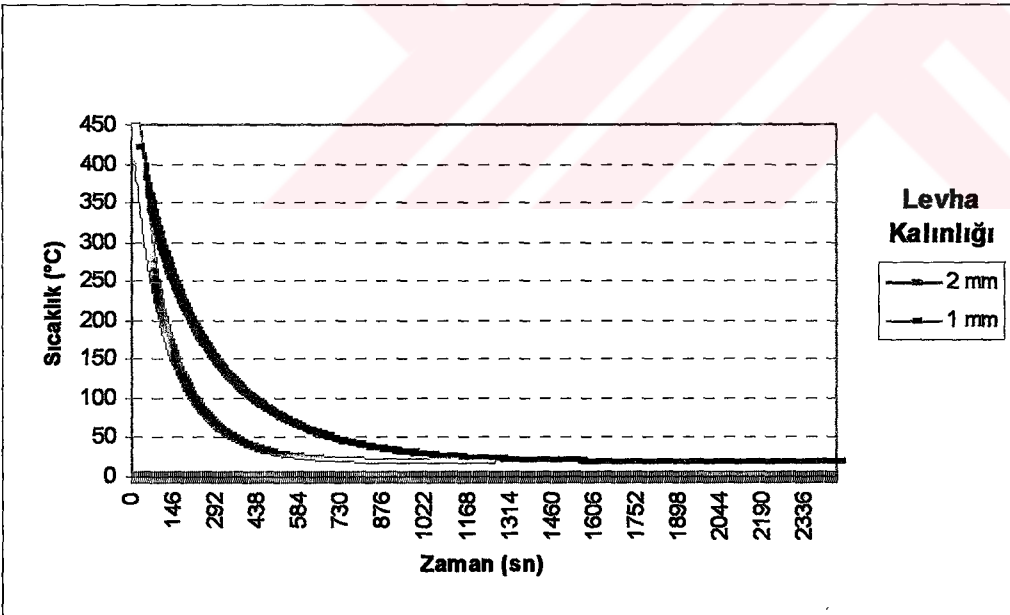
Şekil 5.40. Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



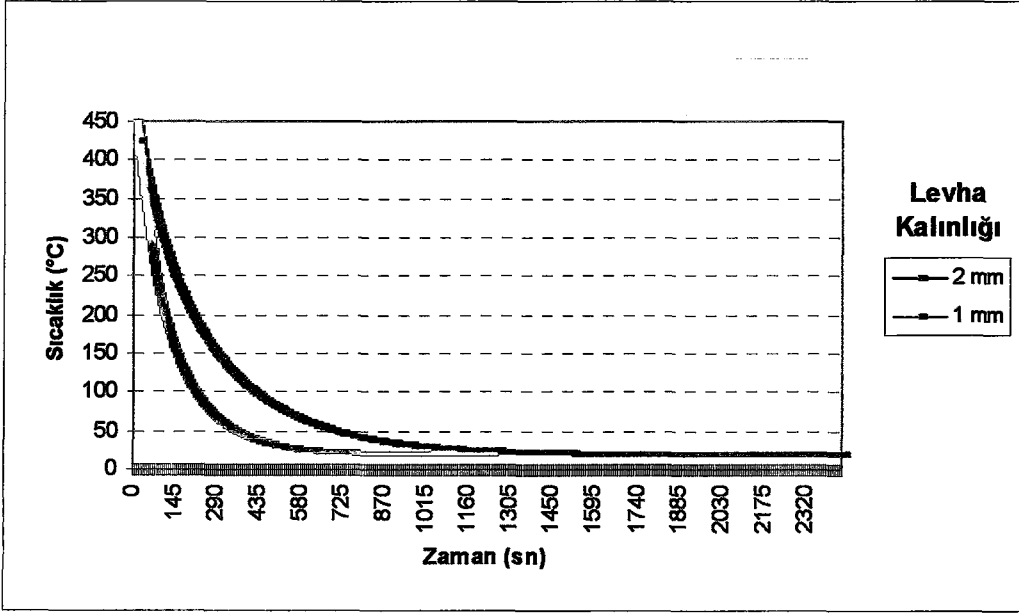
Şekil 5.41. Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



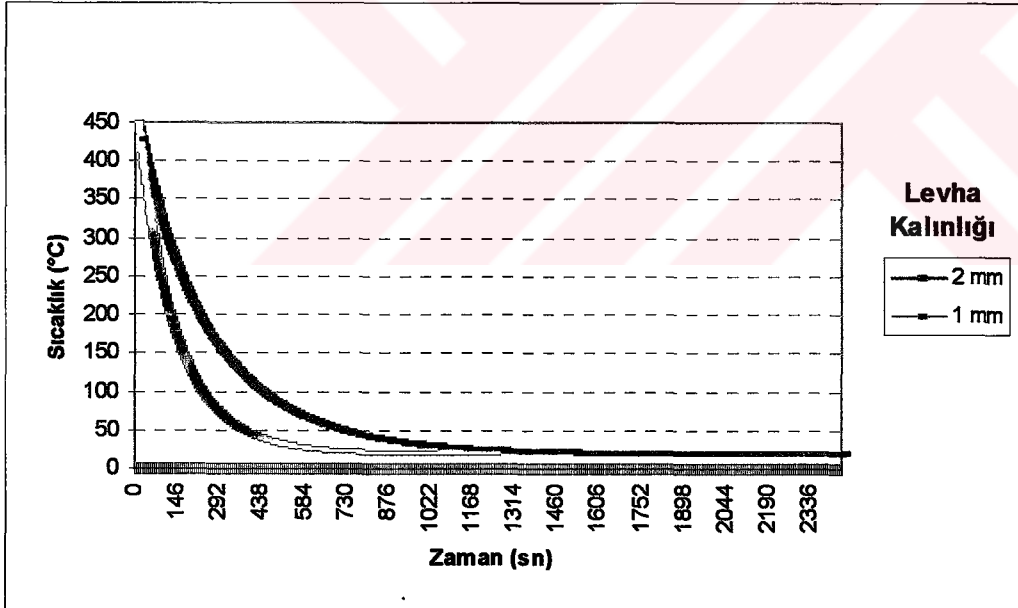
Şekil 5.42. Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



Şekil 5.43. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



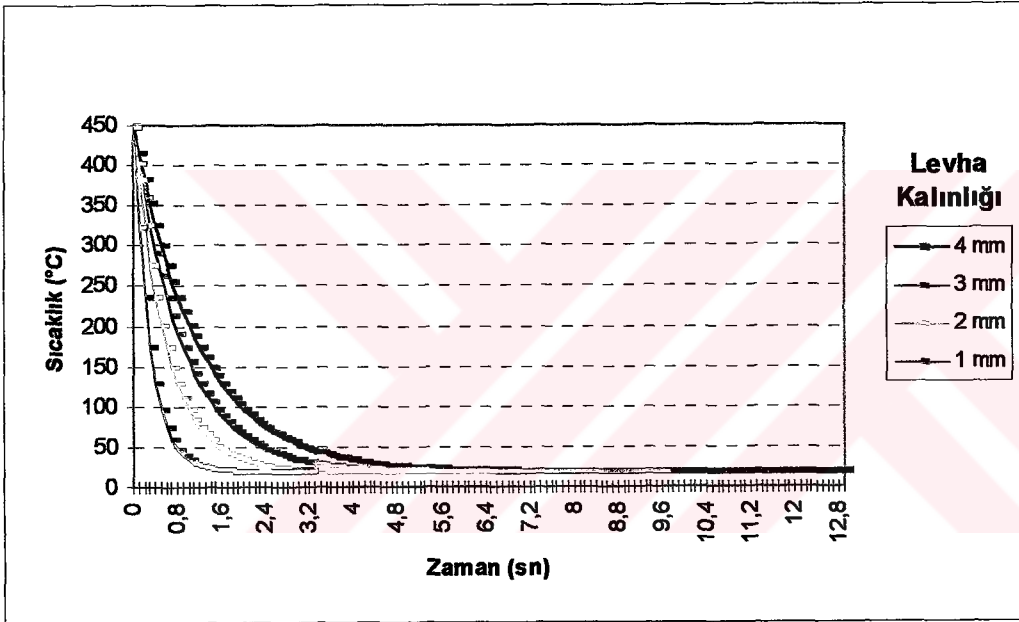
Şekil 5.44. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).



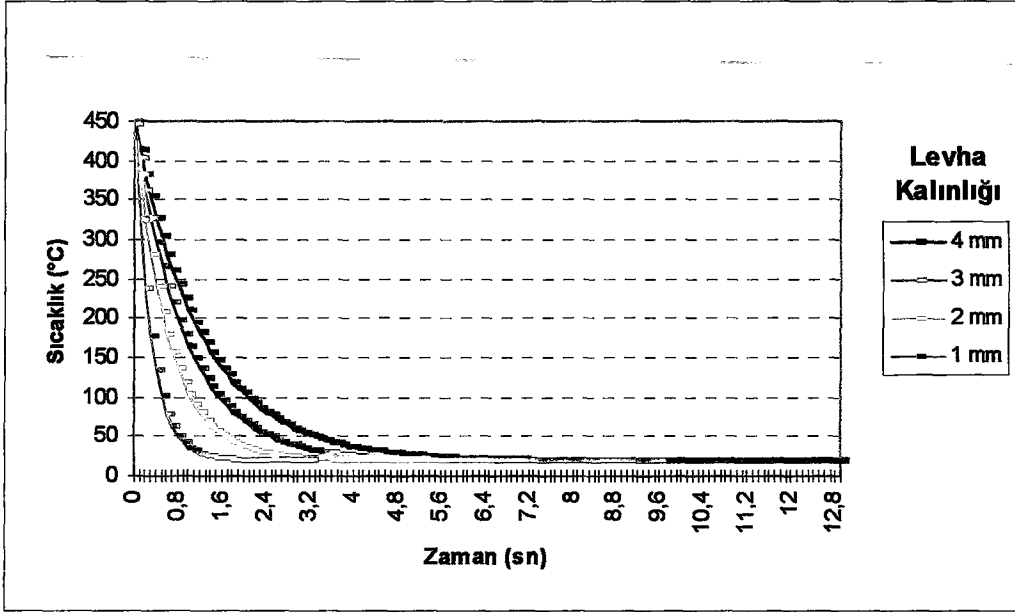
Şekil 5.45. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava).

b) Durgun Suda Soğutma

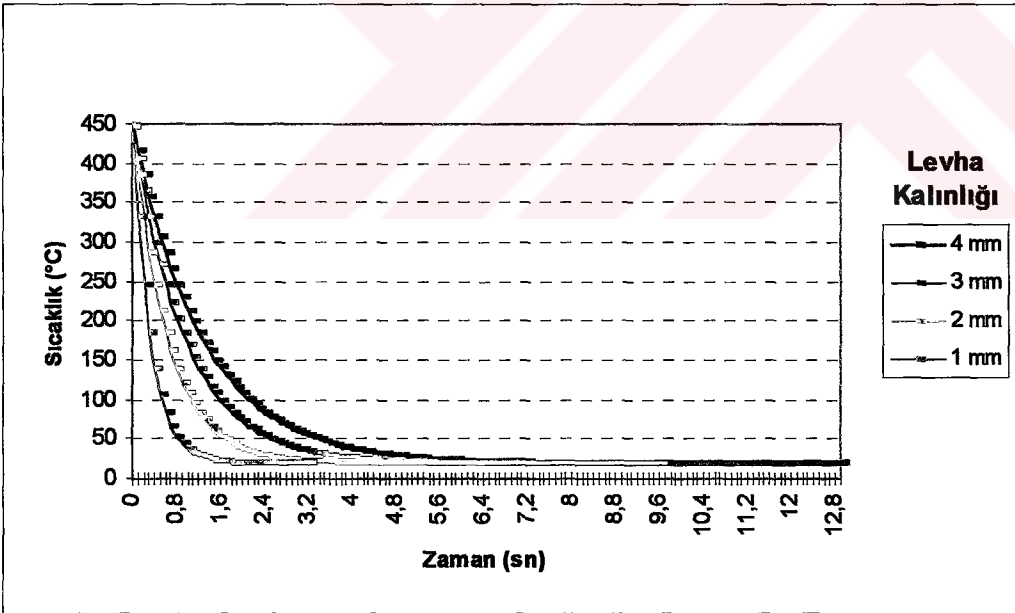
Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen durgun suda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48 de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.46., 5.47., 5.48., 5.49., 5.50., 5.51., 5.52., 5.53.)



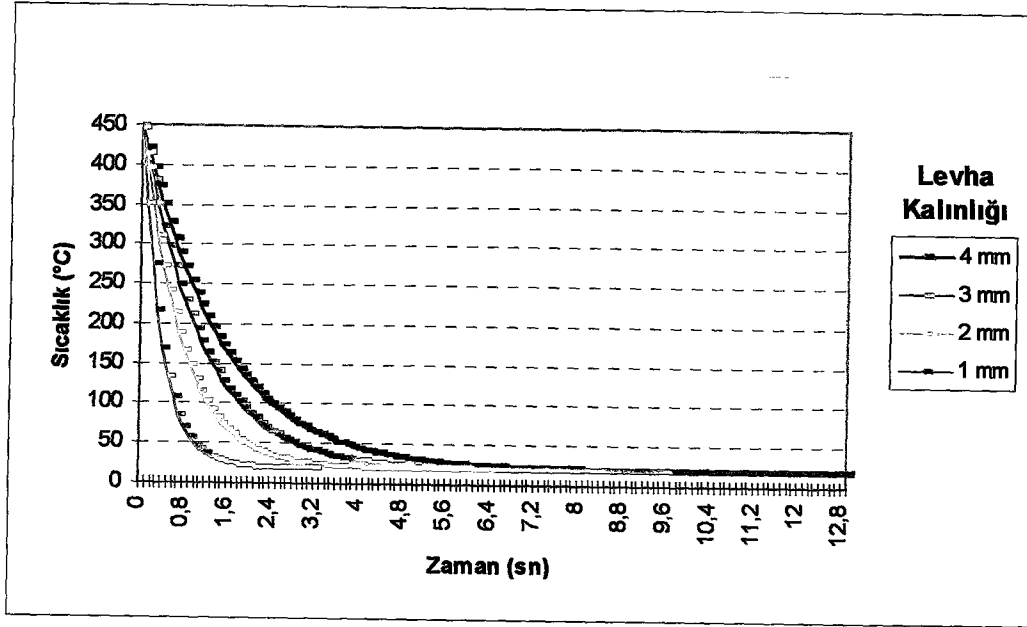
Şekil 5.46.Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



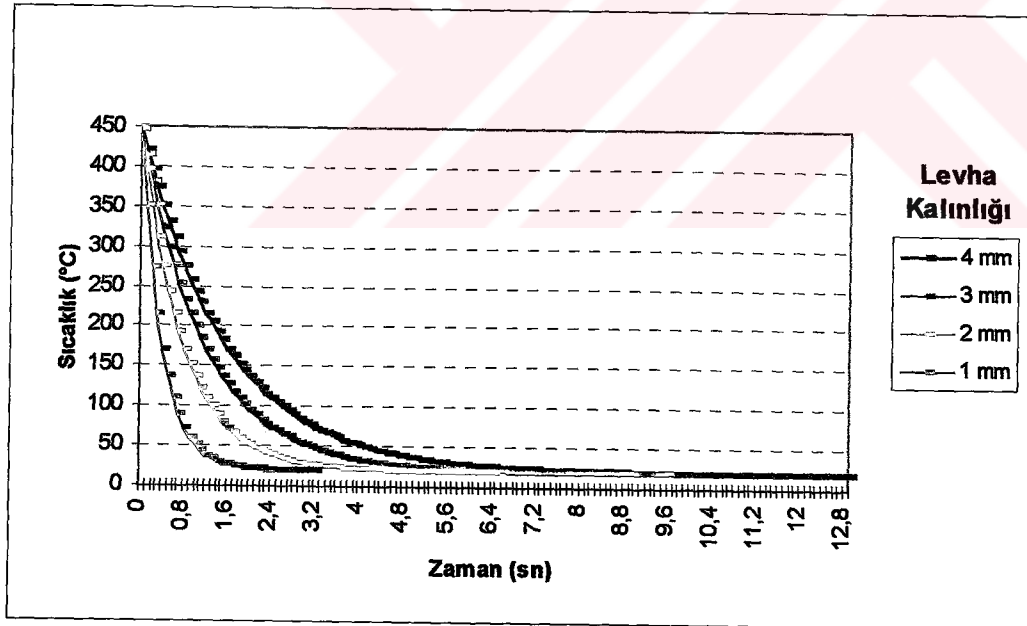
Şekil 5.47. Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



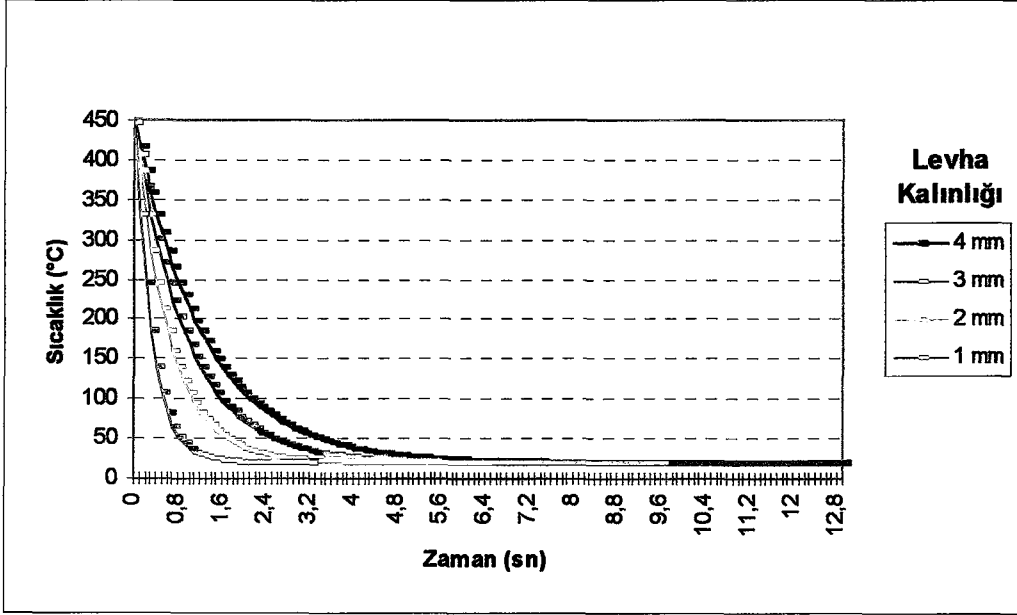
Şekil 5.48.Çelik-Bakır Kompozit Levhada 157 Nolu Kritik Düğümde Sıcaklık Dağılımı (Ortam: Su)



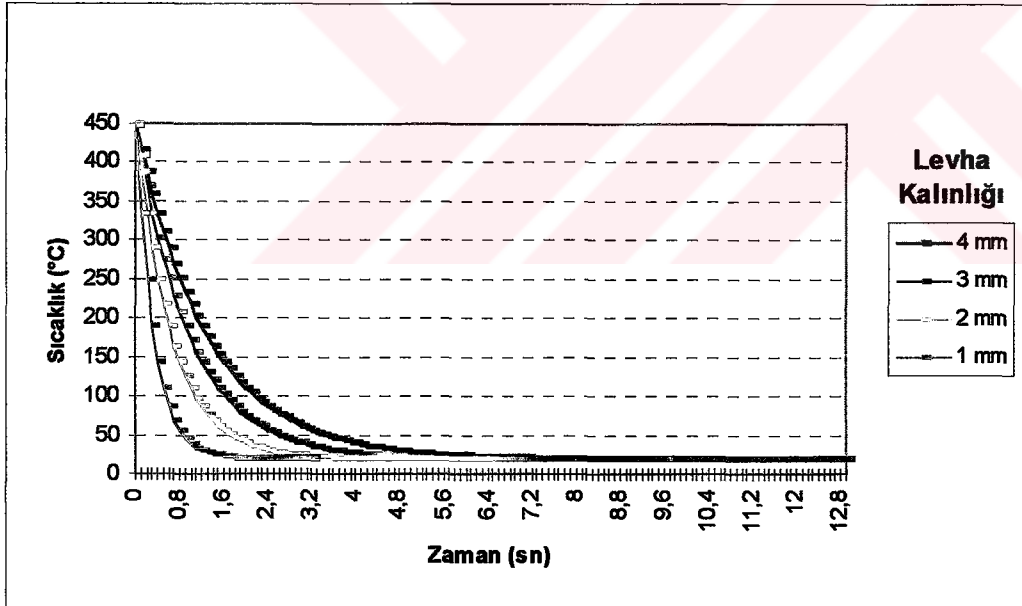
Şekil 5.49. Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



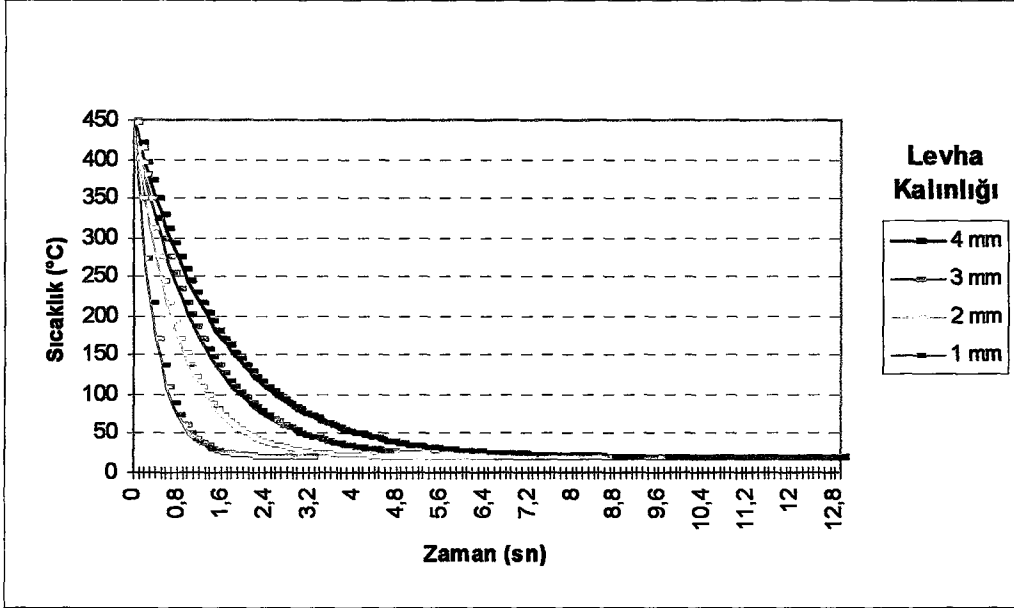
Şekil 5.50. Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.51. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.52. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

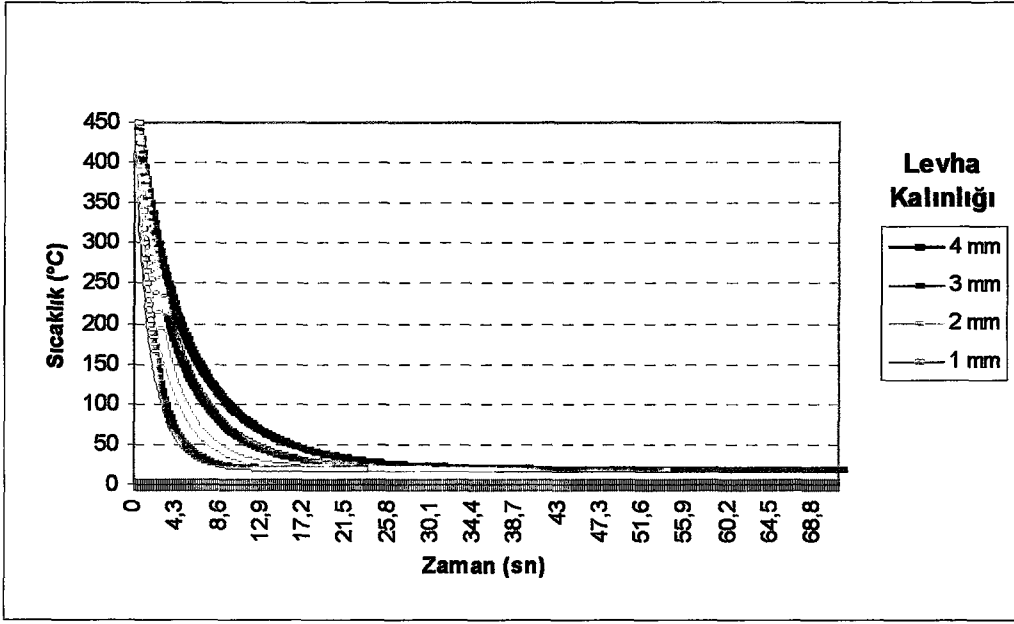


Şekil 5.53. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

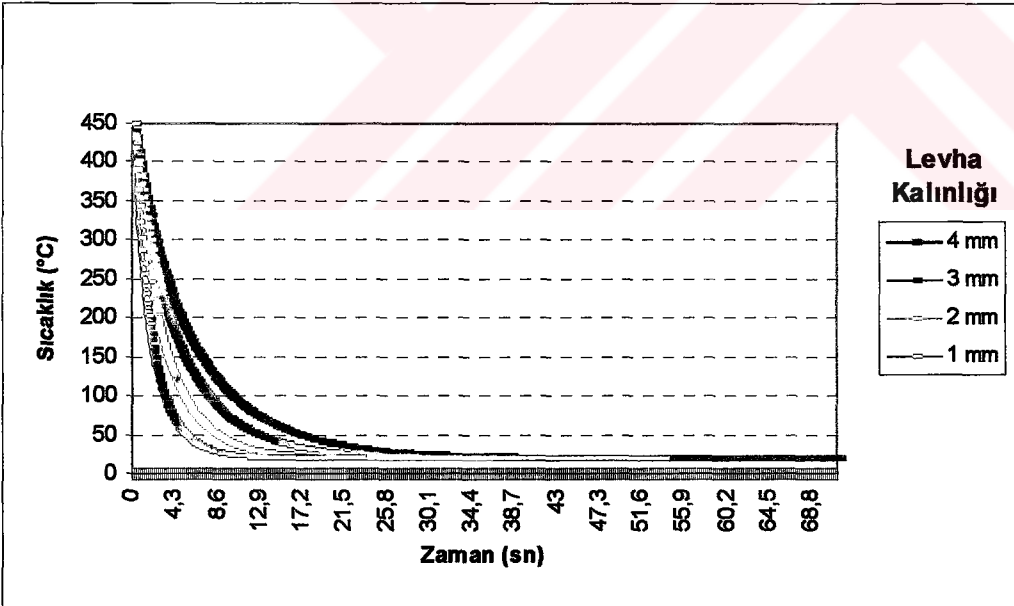
c) Yağda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen yağda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48 de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.54., 5.55., 5.56., 5.57., 5.58., 5.59., 5.60., 5.61.)

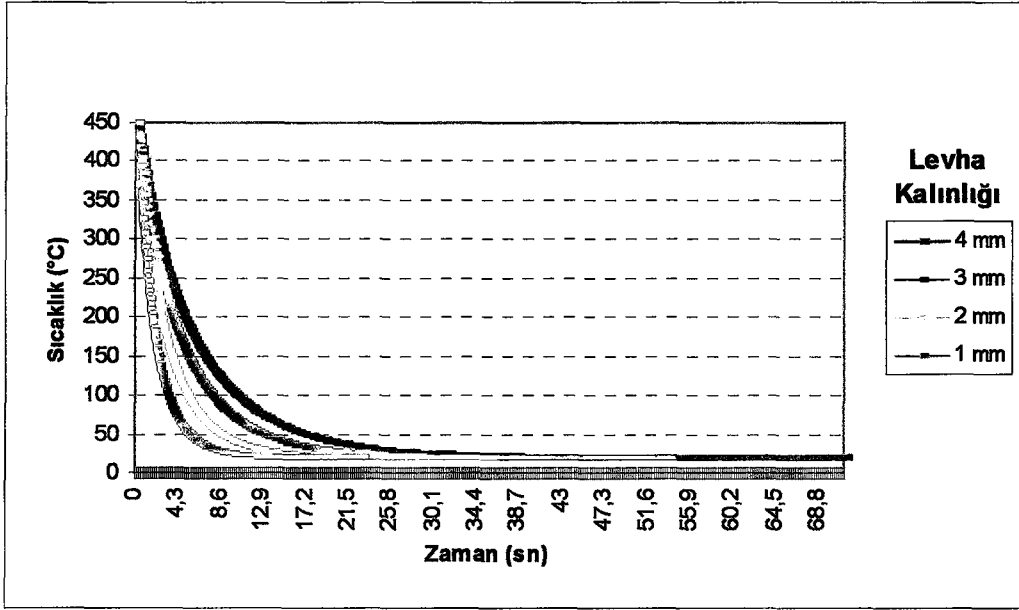
Yağa daldırılarak soğutulma durumlarına ait grafikler incelendiğinde 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğuma zamanının 23.5, 37, 54 ve 71 saniyede gerçekleştiği bulunmuştur.



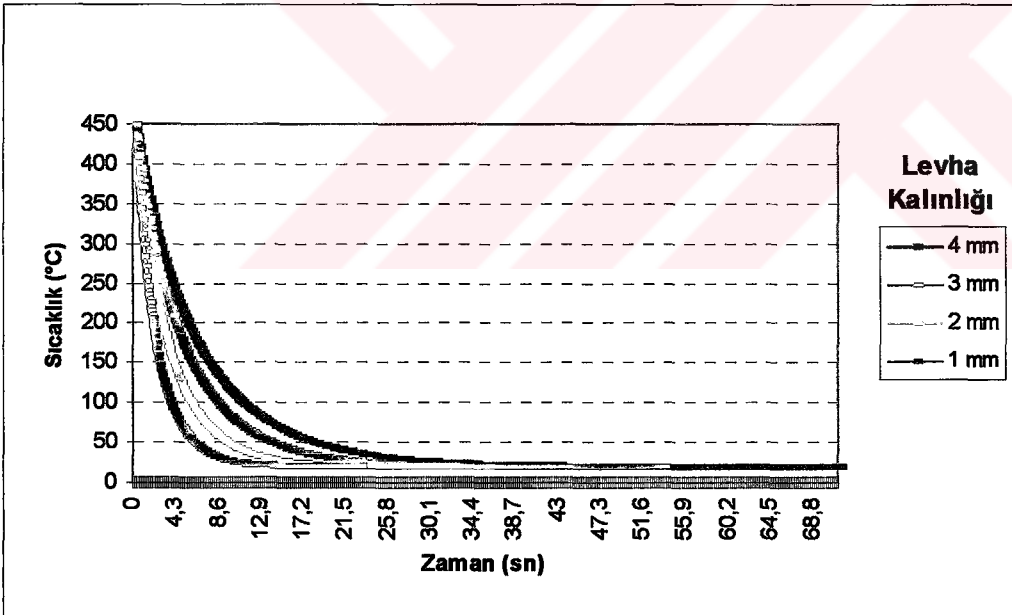
Şekil 5.54.Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



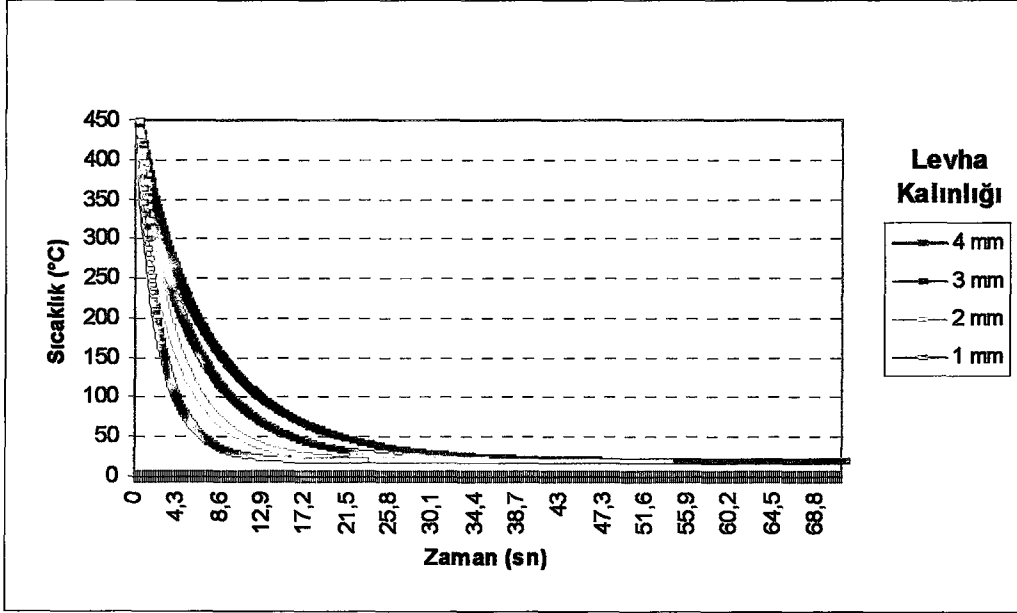
Şekil 5.55. Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



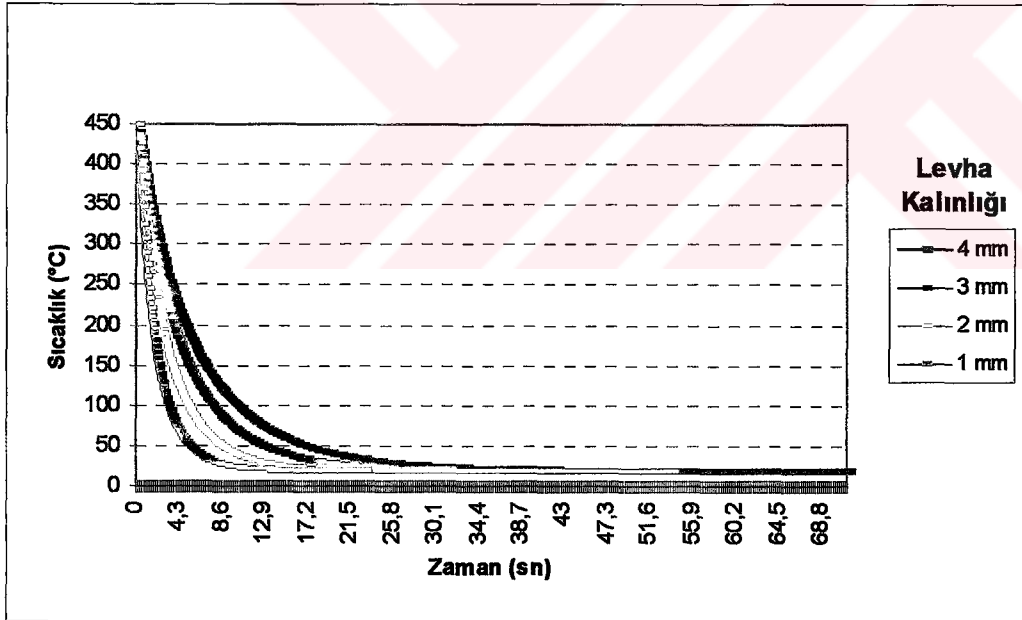
Şekil 5.56. Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



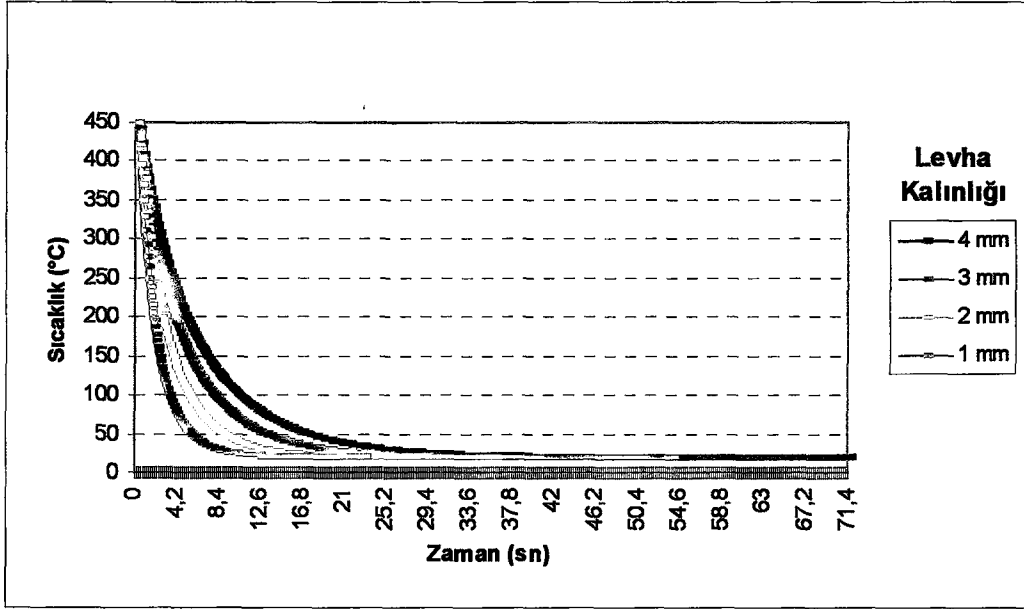
Şekil 5.57. Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



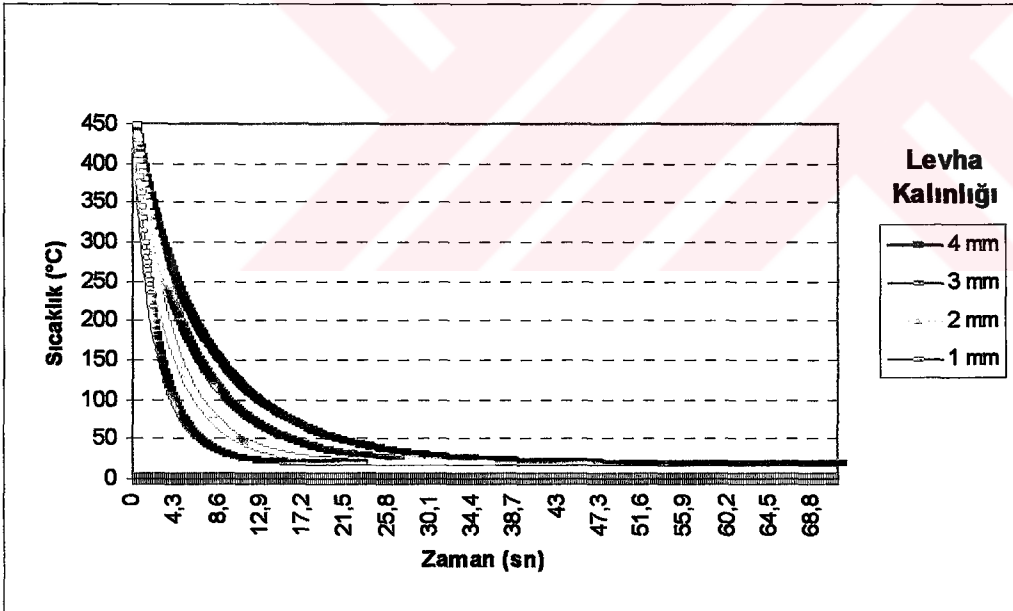
Şekil 5.58. Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.59. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.60. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

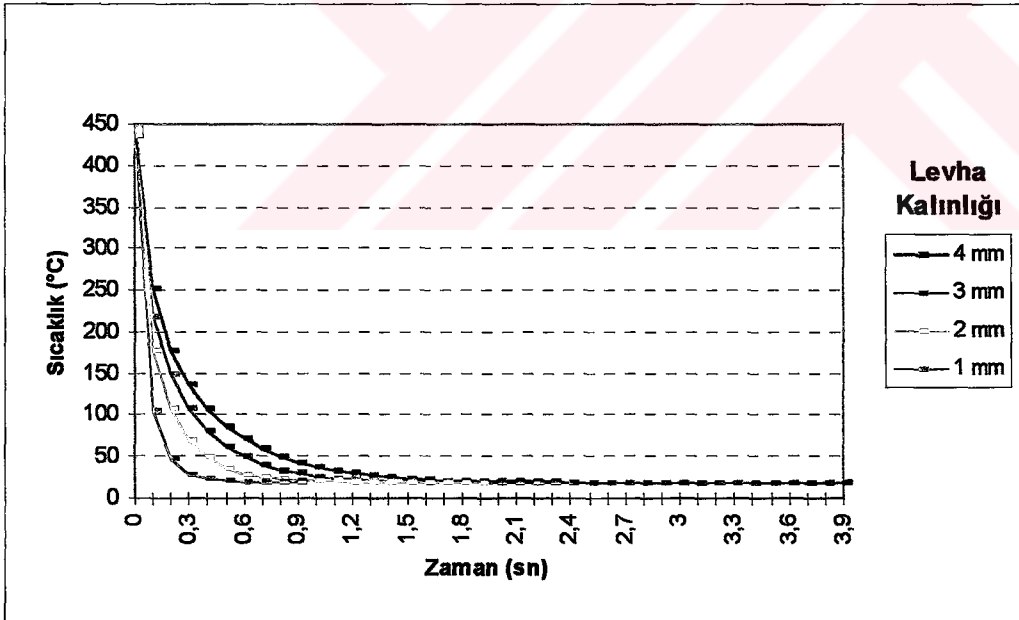


Şekil 5.61. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

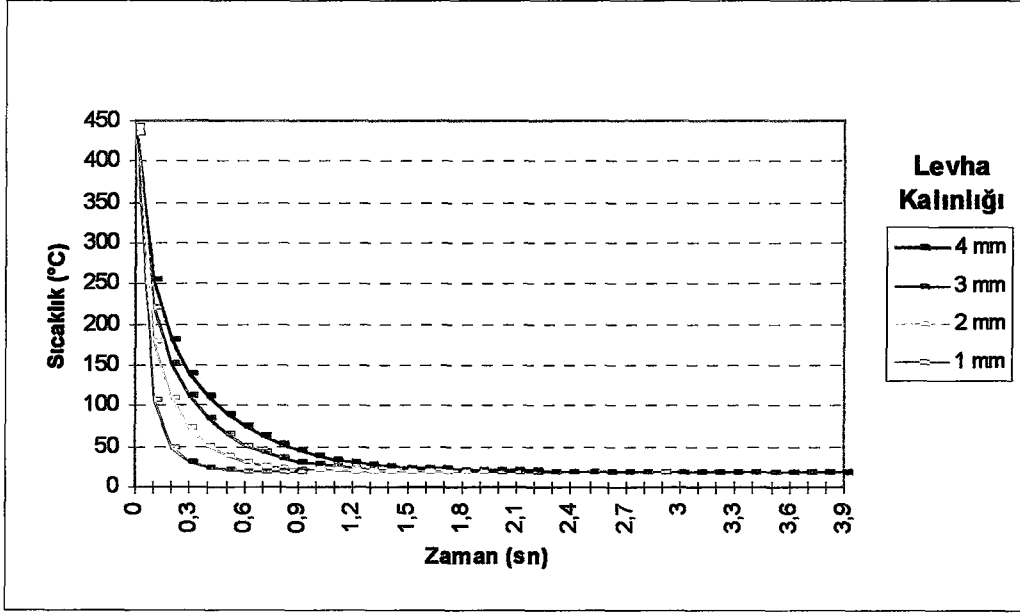
d) Su Püskürtme ile Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen su püskürtme ile soğutmada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.62., 5.63., 5.64., 5.65., 5.66., 5.67., 5.68., 5.69.)

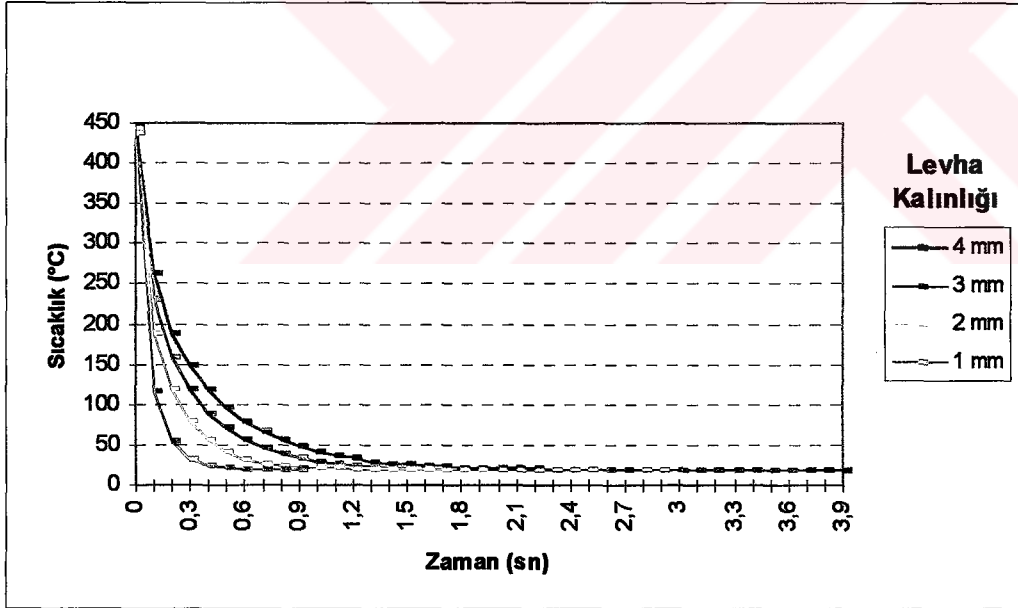
Su püskürtme ile soğutma durumunda, soğumanın kalınlıkla yaklaşık 1, 2, 3 ve 4 katı oranında etkidiği görülmüştür. 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlıklardaki soğuma 0.95, 1.95, 2.95 ve 3.95 saniyelik zamanda gerçekleşmiştir.



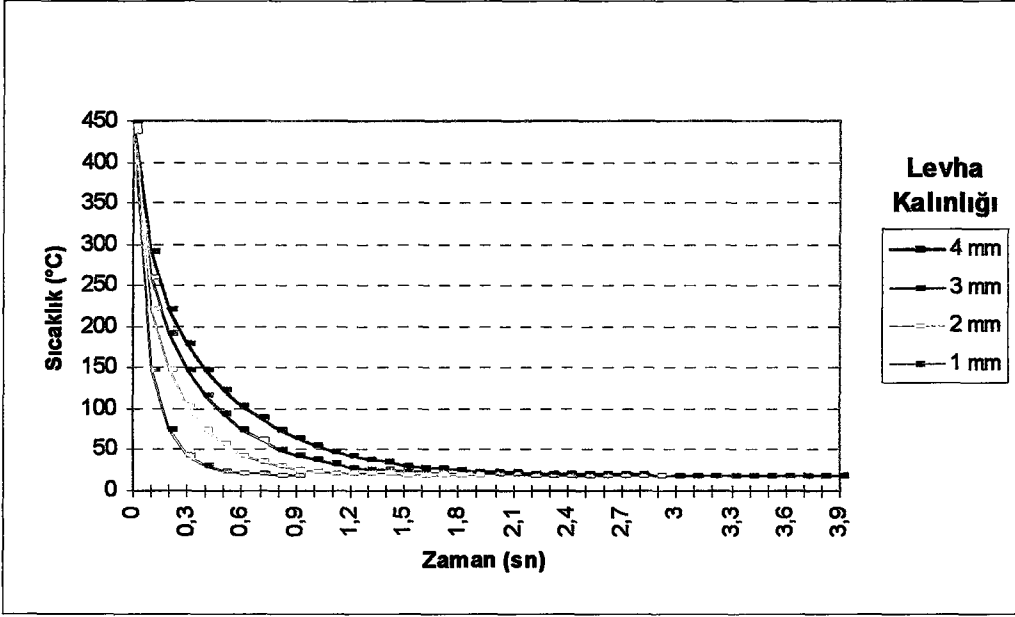
Şekil 5.62.Çelik-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



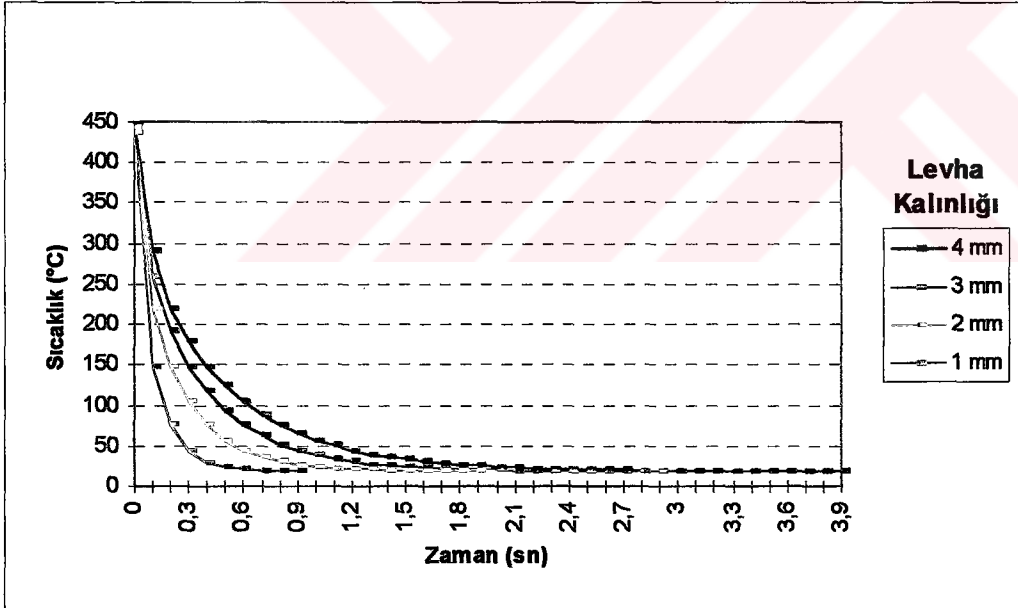
Şekil 5.63. Çelik-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



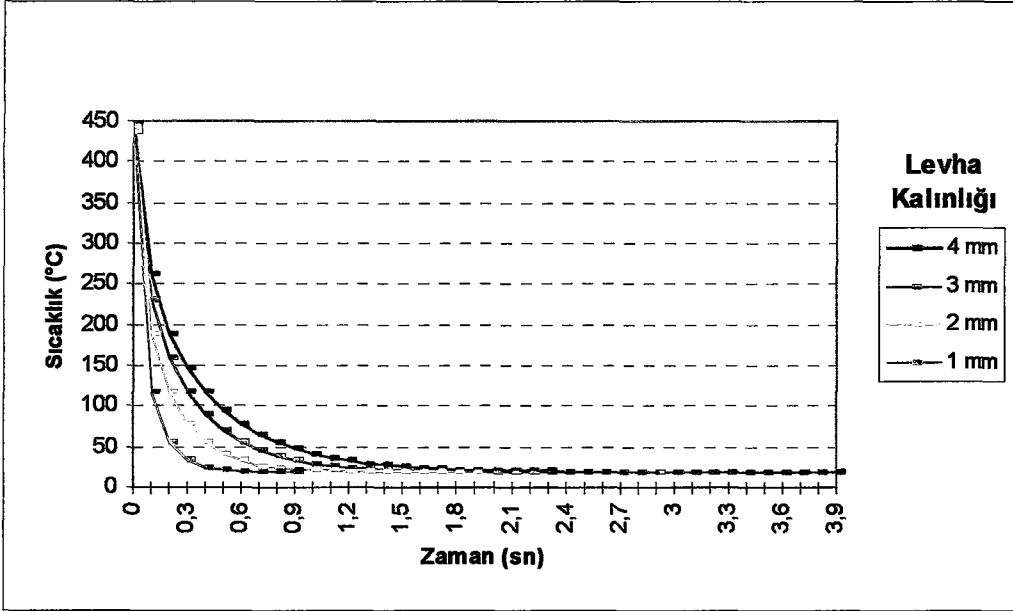
Şekil 5.64. Çelik-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



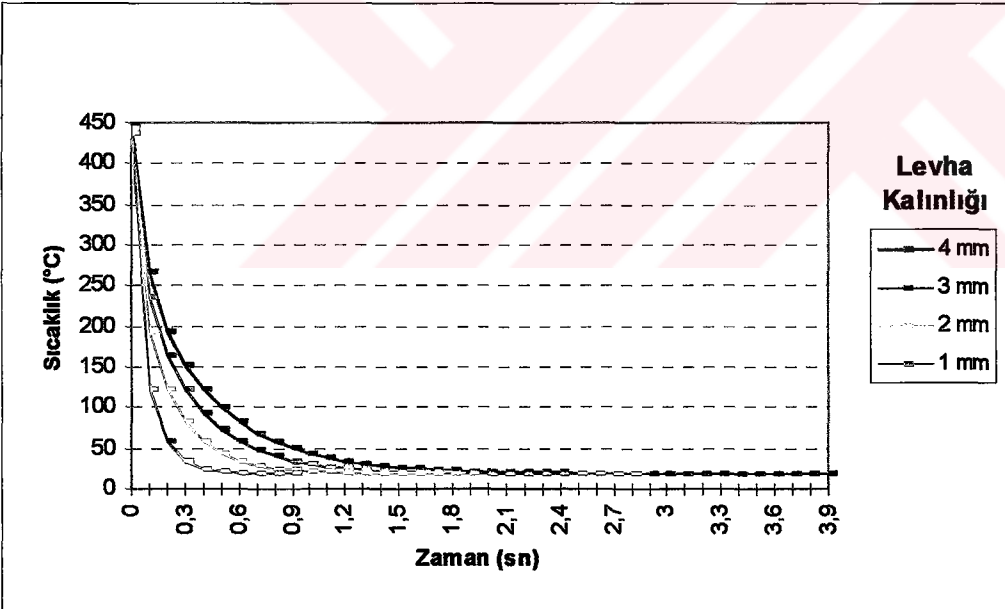
Şekil 5.65. Çelik-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



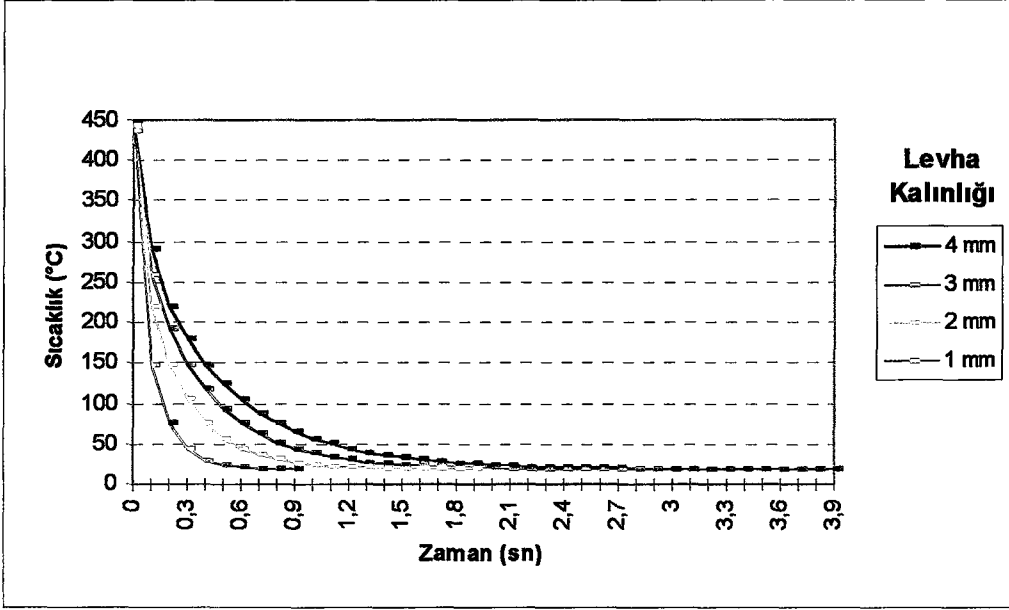
Şekil 5.66. Çelik-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.67. Çelik-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.68. Çelik-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



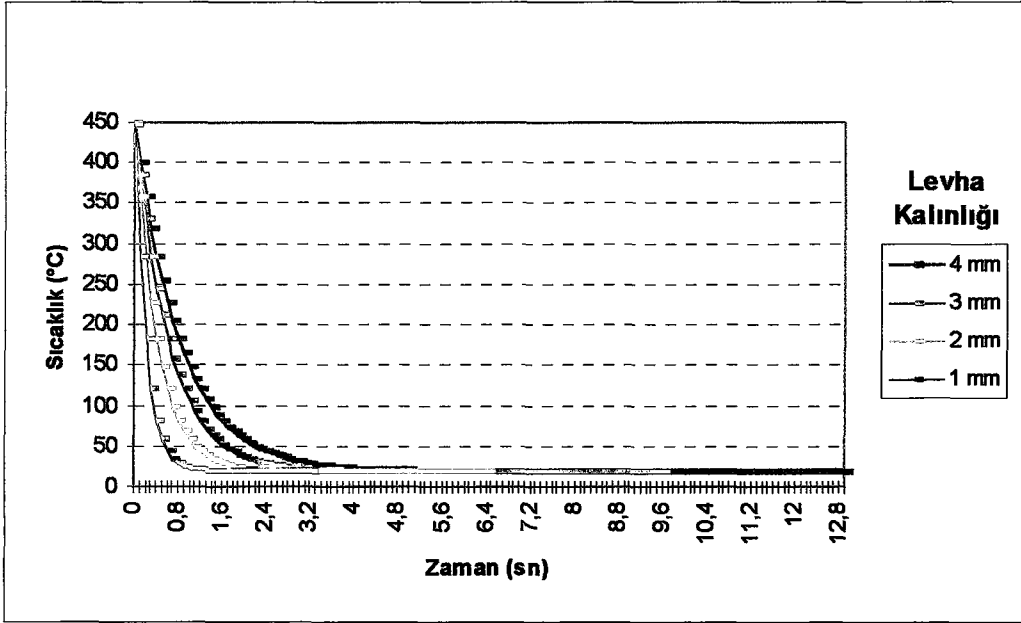
Şekil 5.69. Çelik-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)

5.5.2. Çelik-Aluminyum kompozit plaka

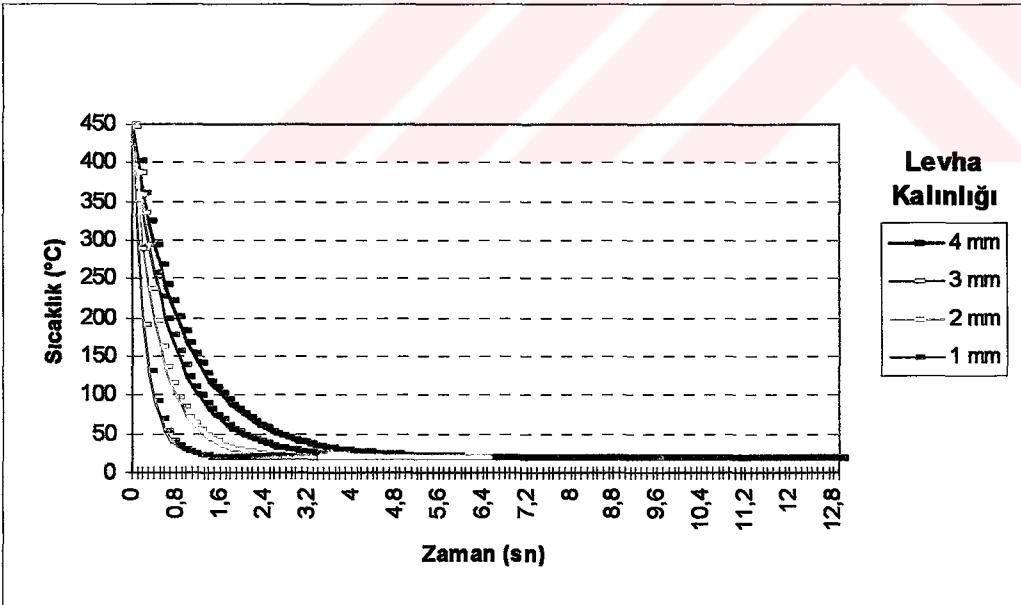
a) Durgun Suda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen durgun suda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.70., 5.71., 5.72., 5.73., 5.74., 5.75., 5.76., 5.77.)

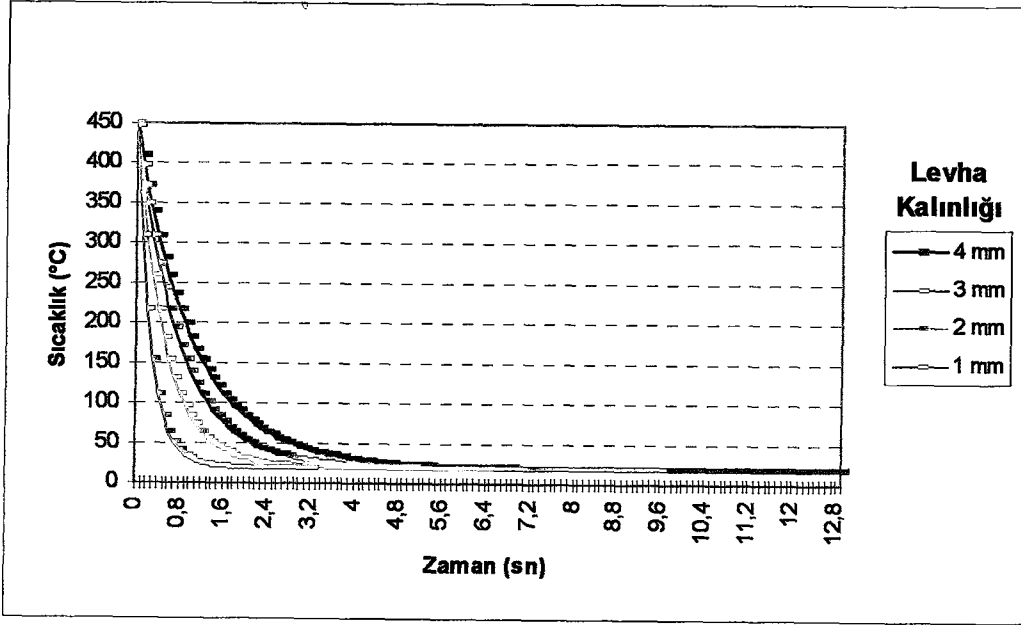
Durgun suya daldırma durumunda, Çelik-Aluminyum kompozit levhada soğumanın kalınlıkla lineer değiştiği görülmüştür. Yaklaşık olarak zamanın katları şeklinde değiştiği; 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için 3.4, 6.6, 9.8 ve 12.10 saniye zaman aldığı belirlenmiştir.



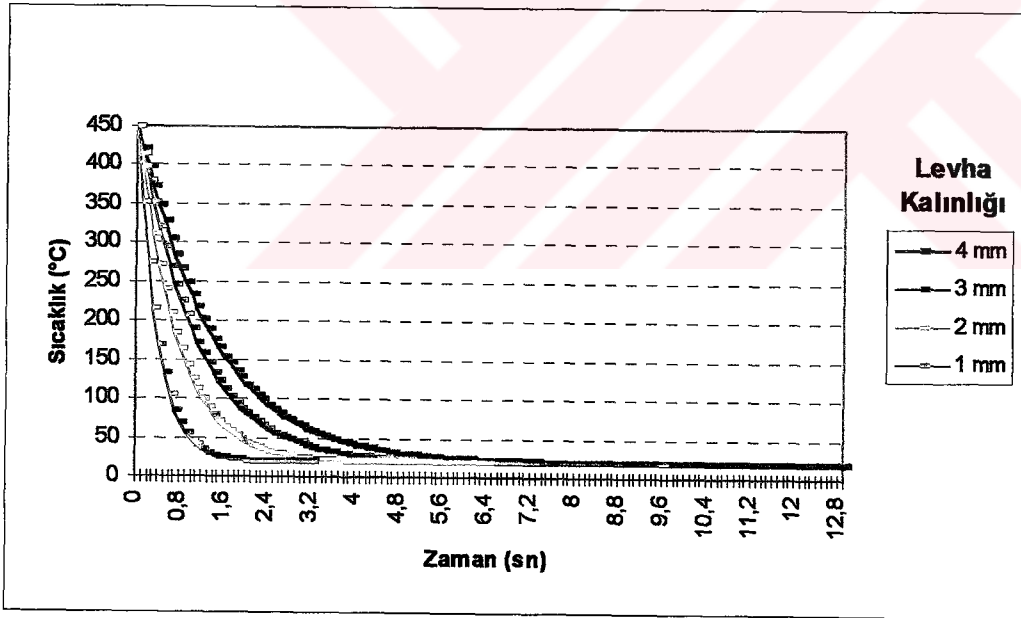
Şekil 5.70. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



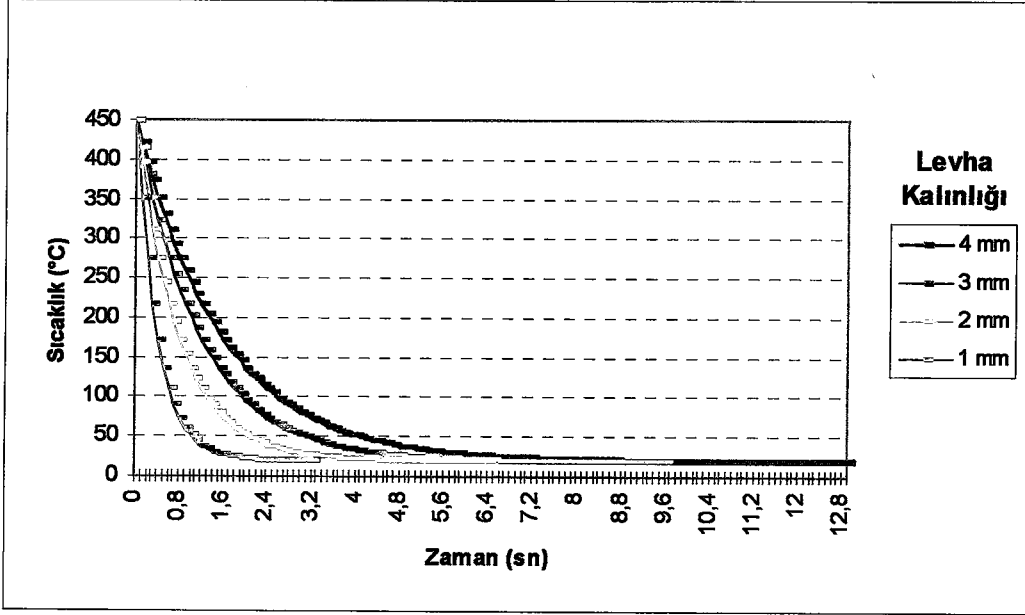
Şekil 5.71. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



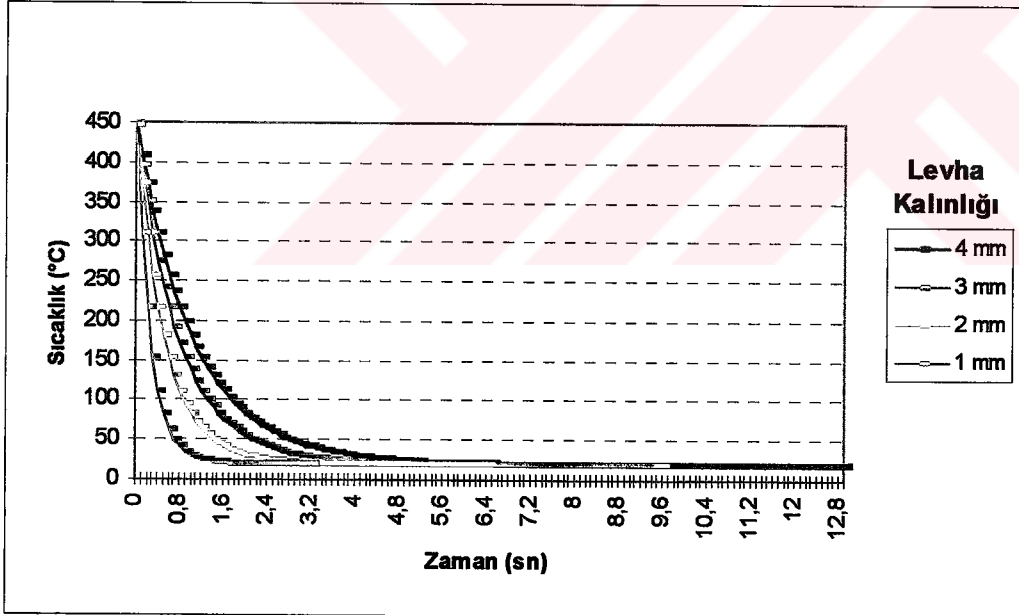
Şekil 5.72. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



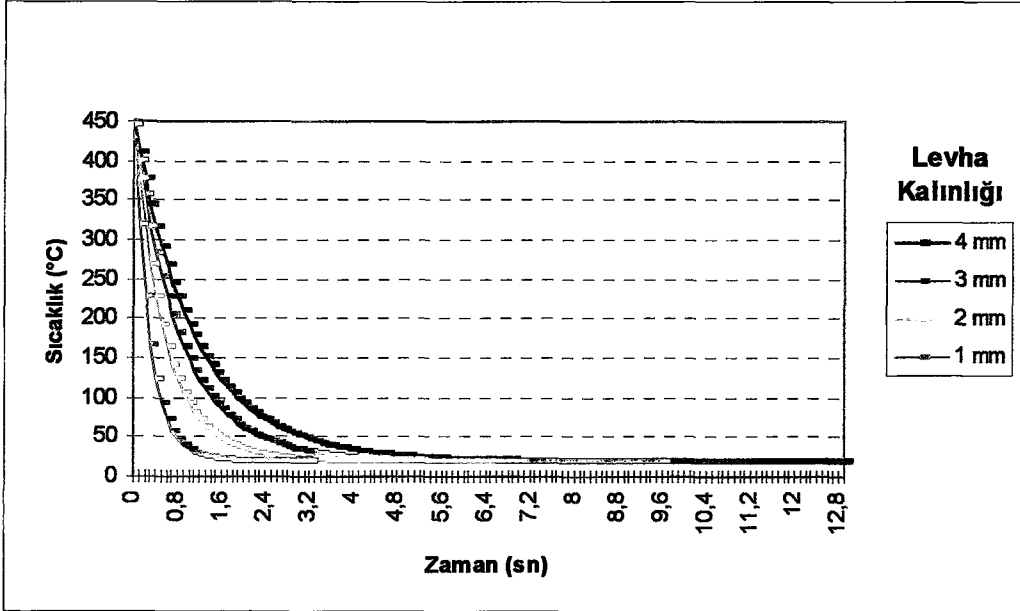
Şekil 5.73. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



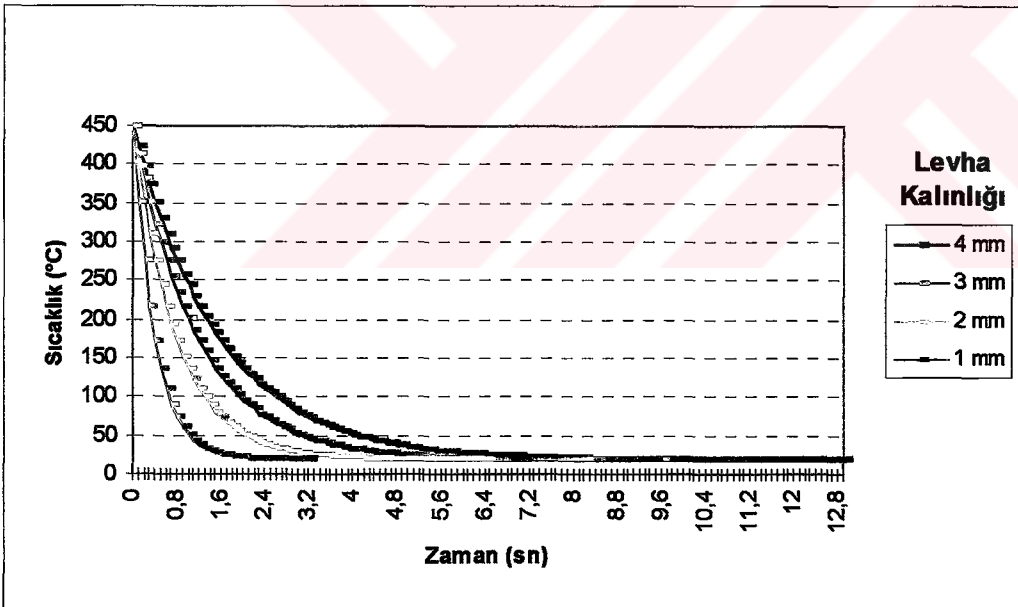
Şekil 5.74. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.75. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.76. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

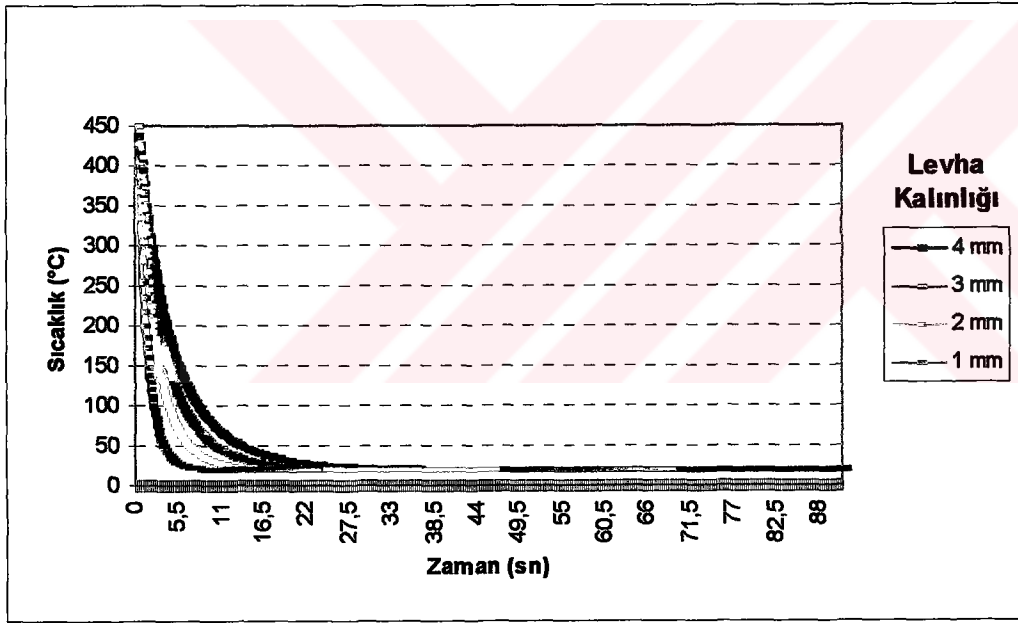


Şekil 5.77. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

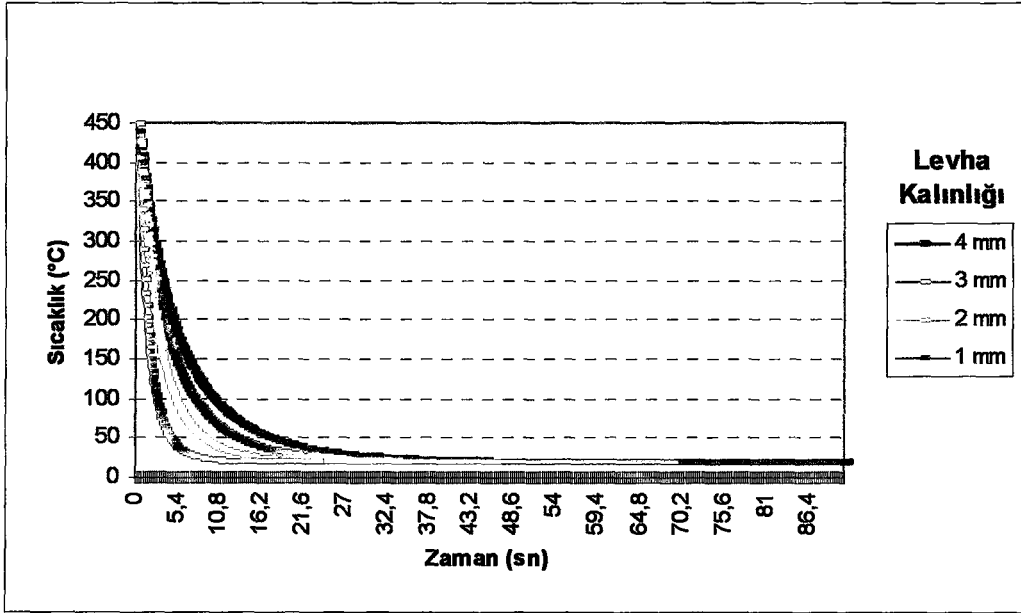
b) Yağda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen yağda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.78., 5.79., 5.80., 5.81., 5.82., 5.83., 5.84., 5.85.)

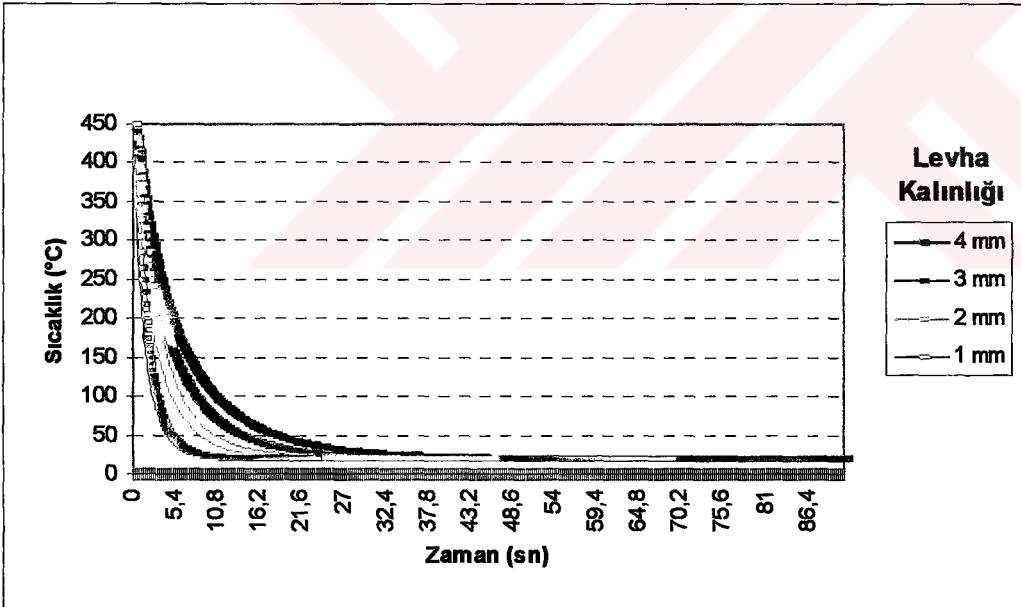
Çelik-Aluminyum kompozit levha yağa daldırıldığında, kalınlıkla soğuma hızının %100 yavaşladığı gözlemlendi. 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğumanın 23.5, 47, 70 ve 95 saniye zaman aldığı tesbit edildi.



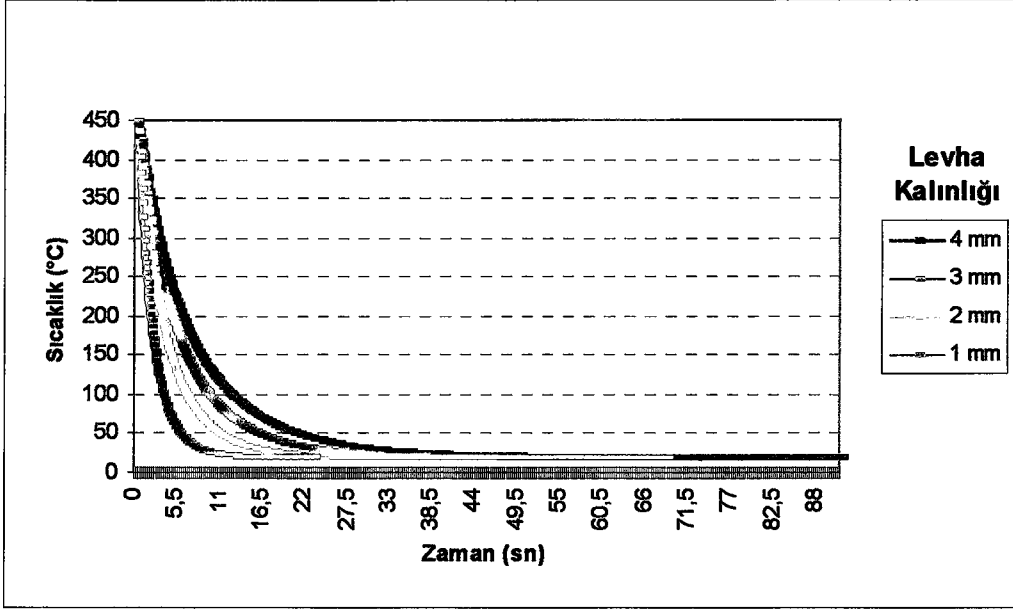
Şekil 5.78.Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



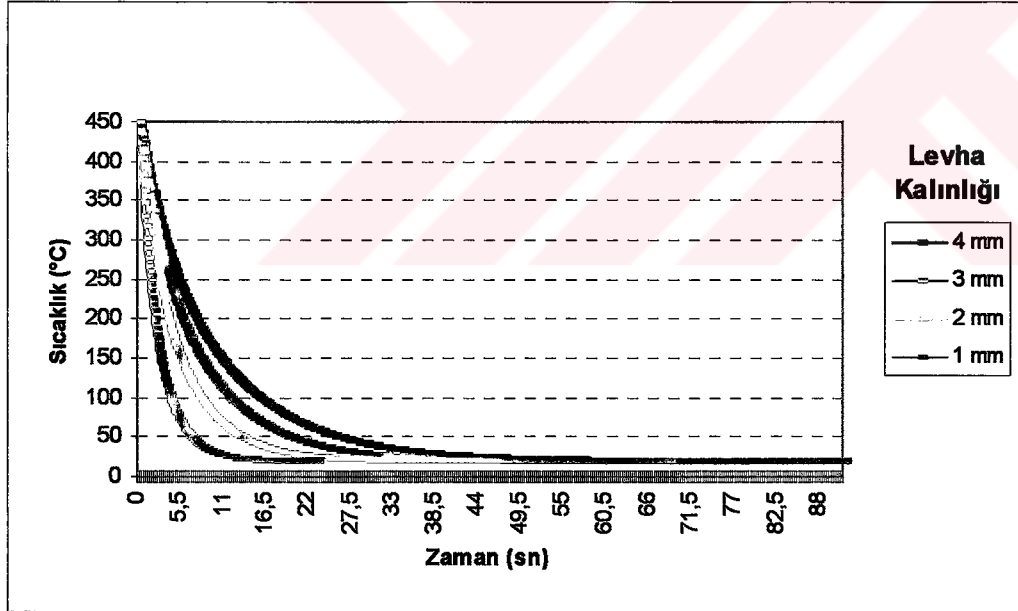
Şekil 5.79. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



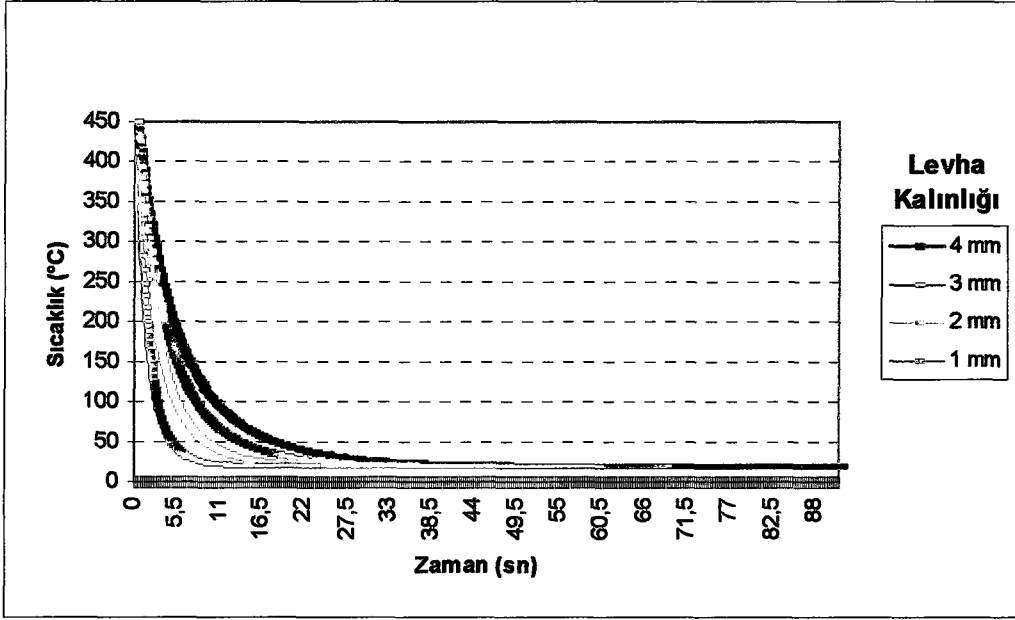
Şekil 5.80. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



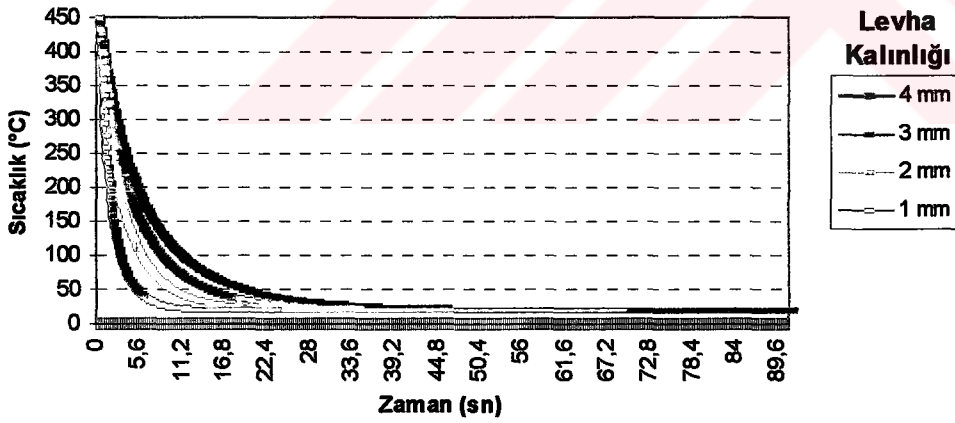
Şekil 5.81. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ))



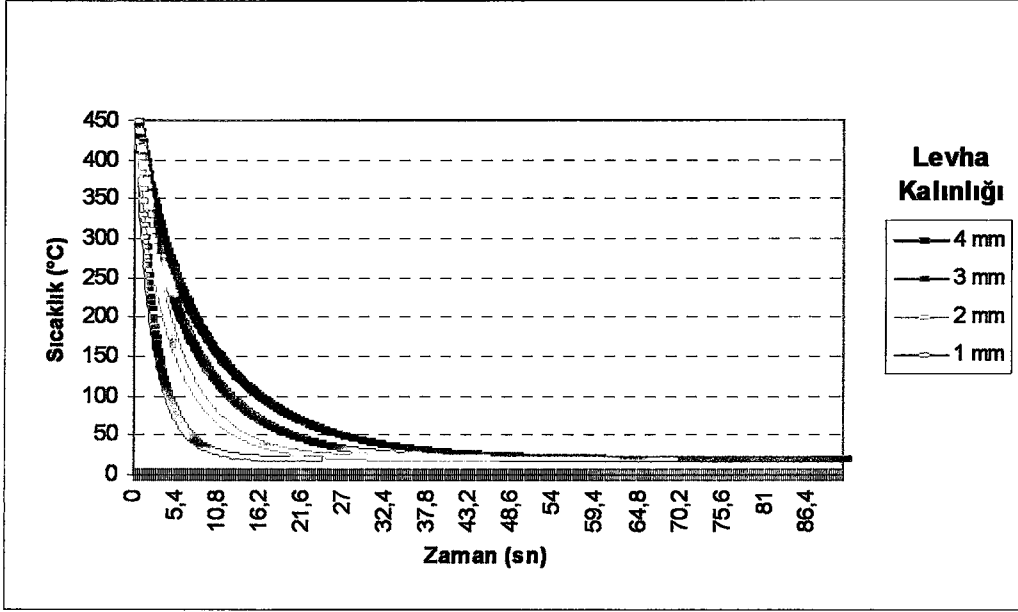
Şekil 5.82. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ))



Şekil 5.83. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.84. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

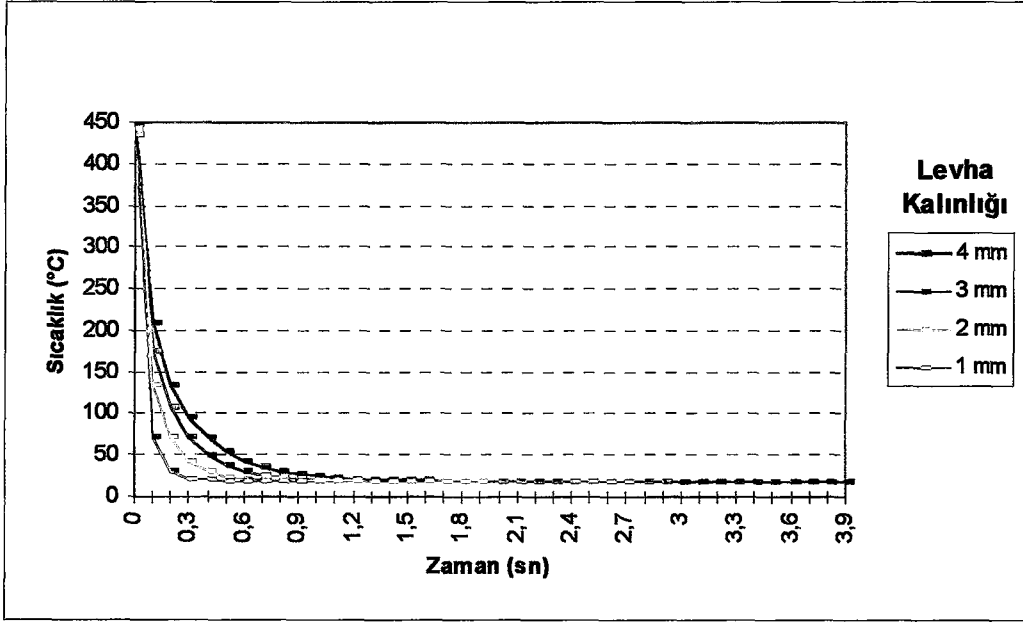


Şekil 5.85. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

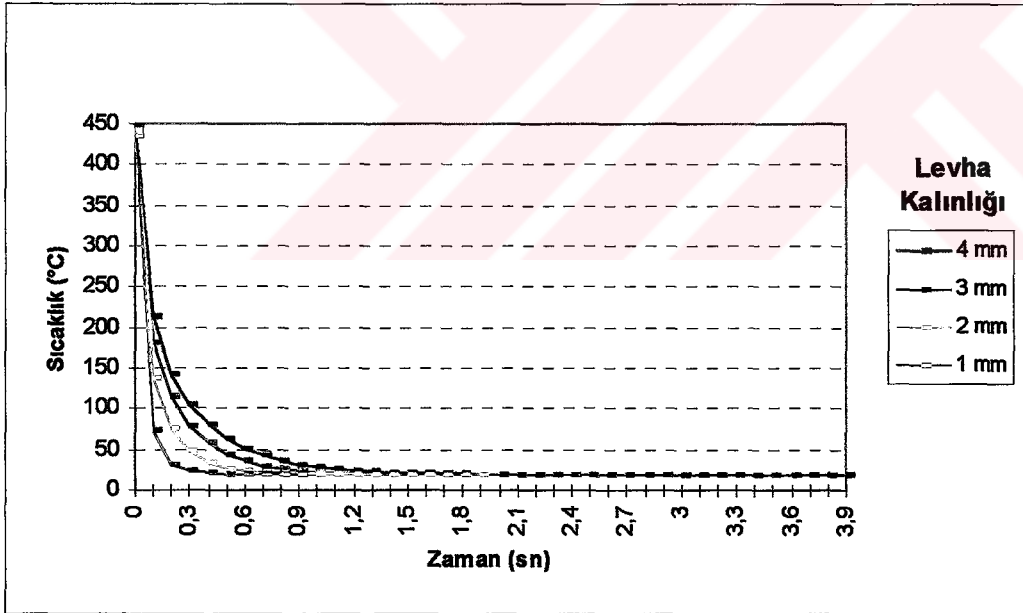
c) Su Püskürtme İle Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen su püskürtme ile soğutmada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48’de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.86., 5.87., 5.88., 5.89., 5.90., 5.91., 5.92., 5.93.)

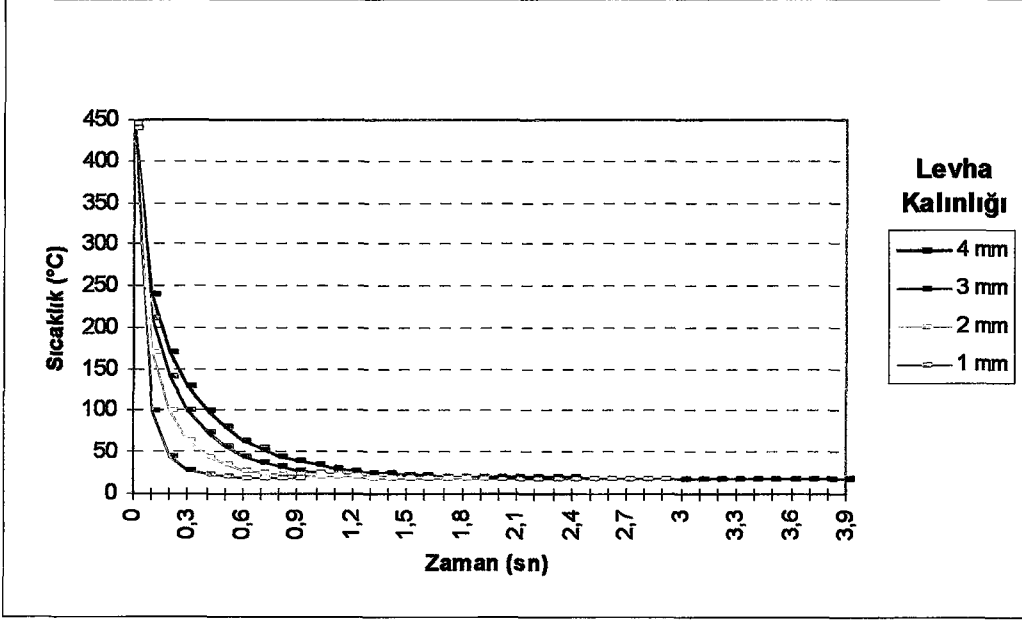
Su püskürtülerek soğutulma sonucunda da kalınlıkla soğuma hızının şu şekilde azaldığı bulunmuştur: Sırası ile 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlıklar için soğuma zamanı 0.95, 1.95, 2.95 ve 3.95 saniye.



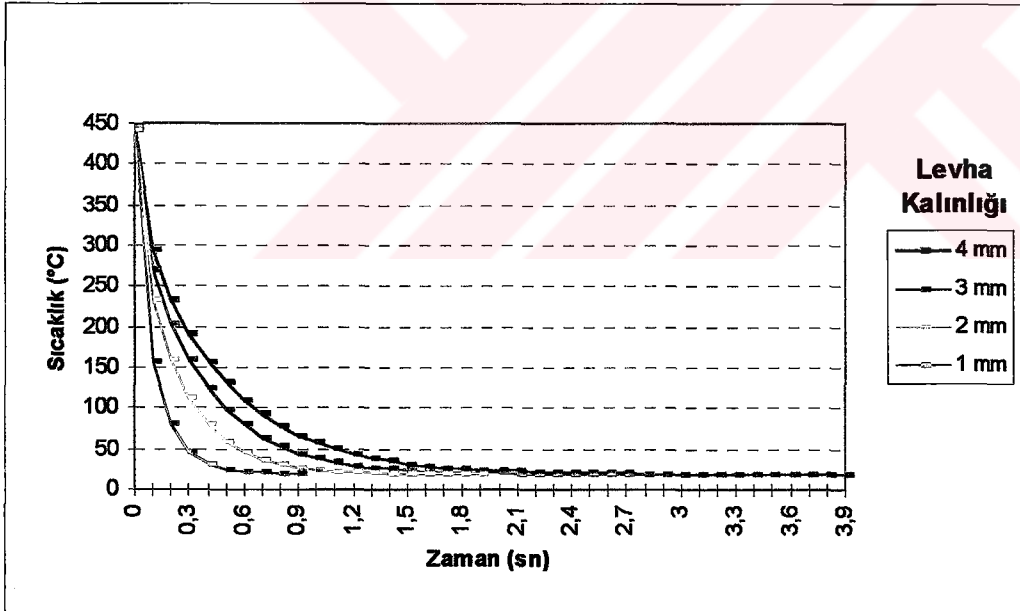
Şekil 5.86. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



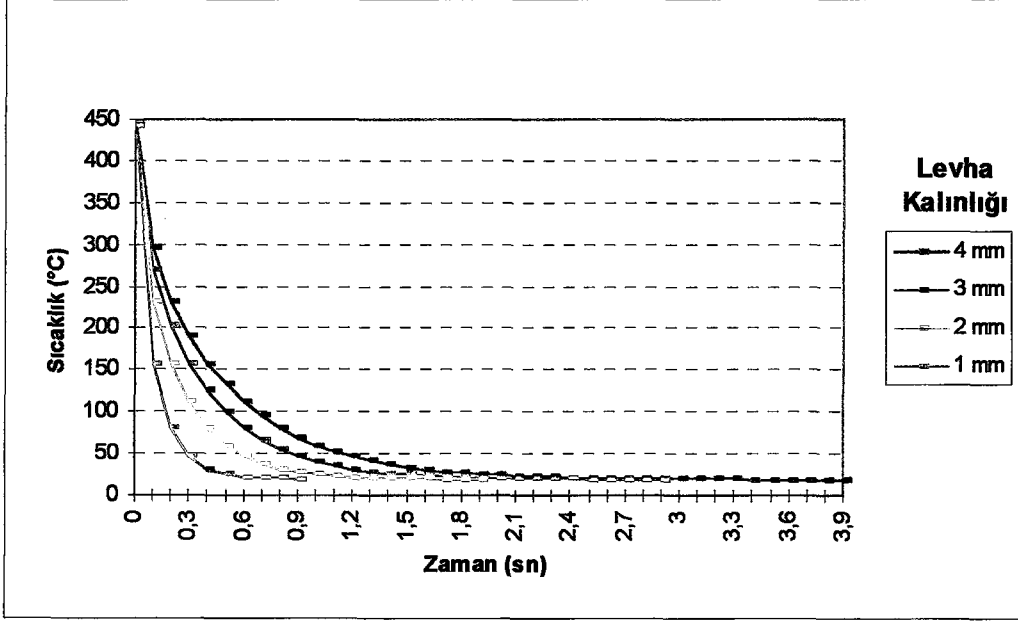
Şekil 5.87. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



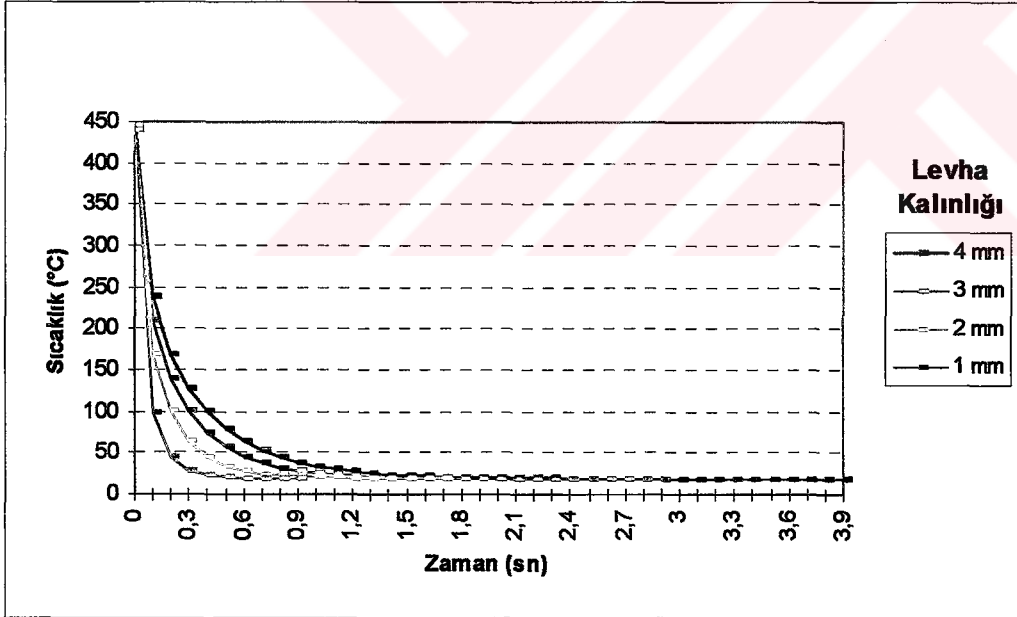
Şekil 5.88. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



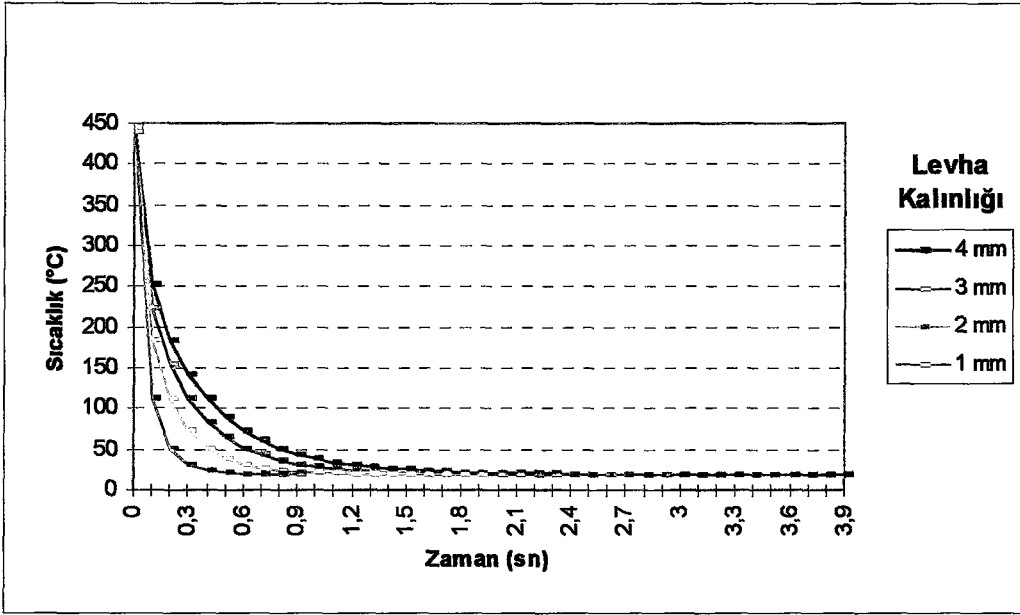
Şekil 5.89. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



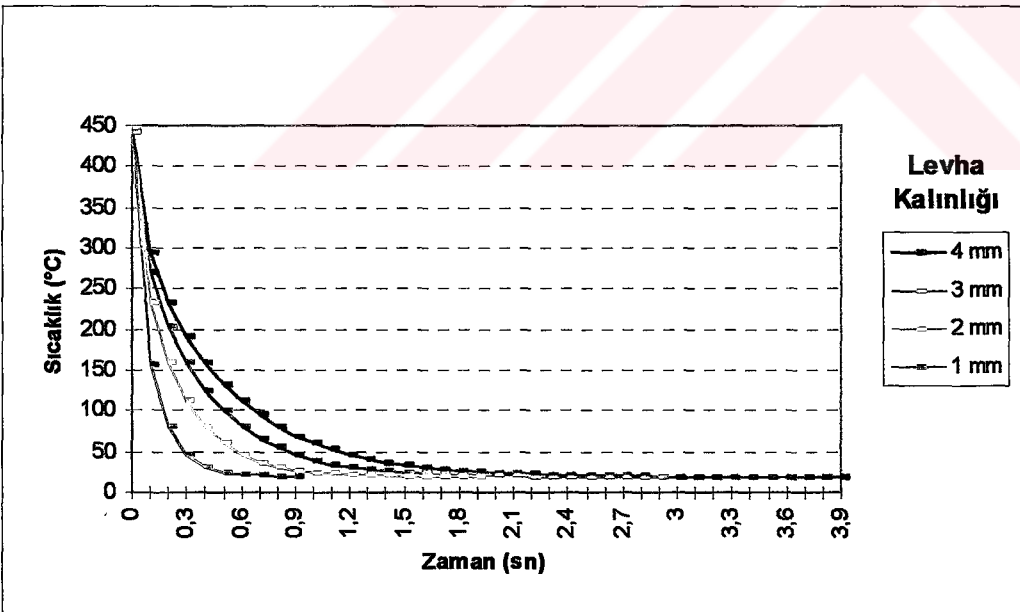
Şekil 5.90. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.91. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.92. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



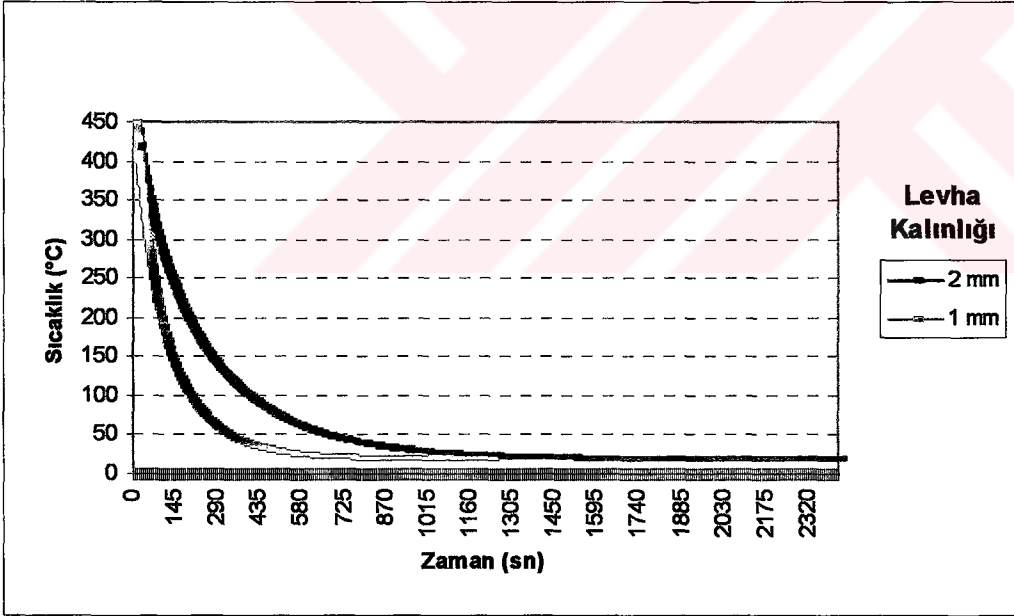
Şekil 5.93. Çelik-Aluminyum kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)

5.5.3.Çelik-Pirinç kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimi

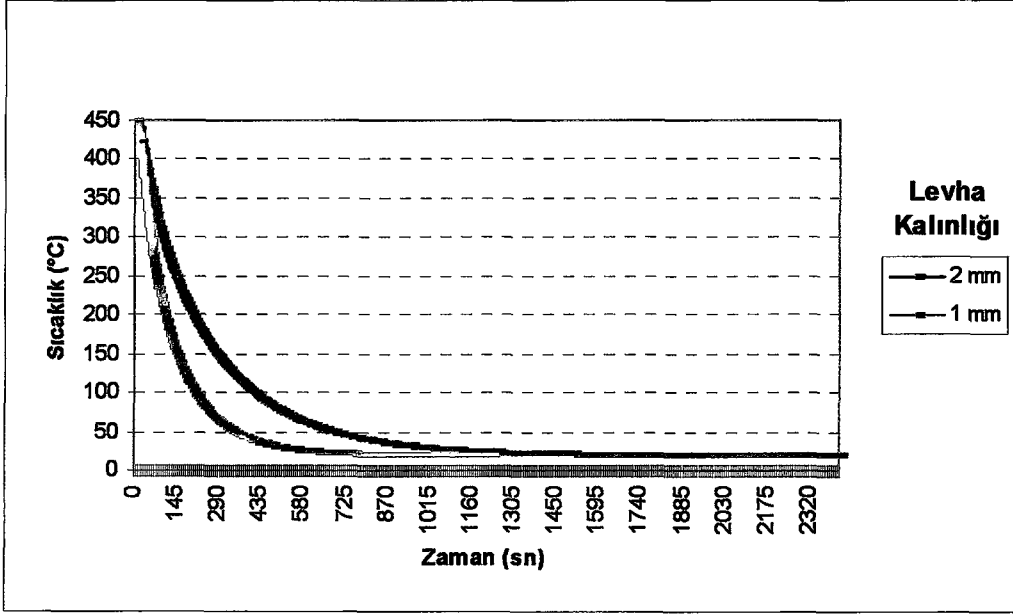
a) Havada Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen havada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48’de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.94, 5.95, 5.96, 5.97, 5.98, 5.99, 5.100, 5.101)

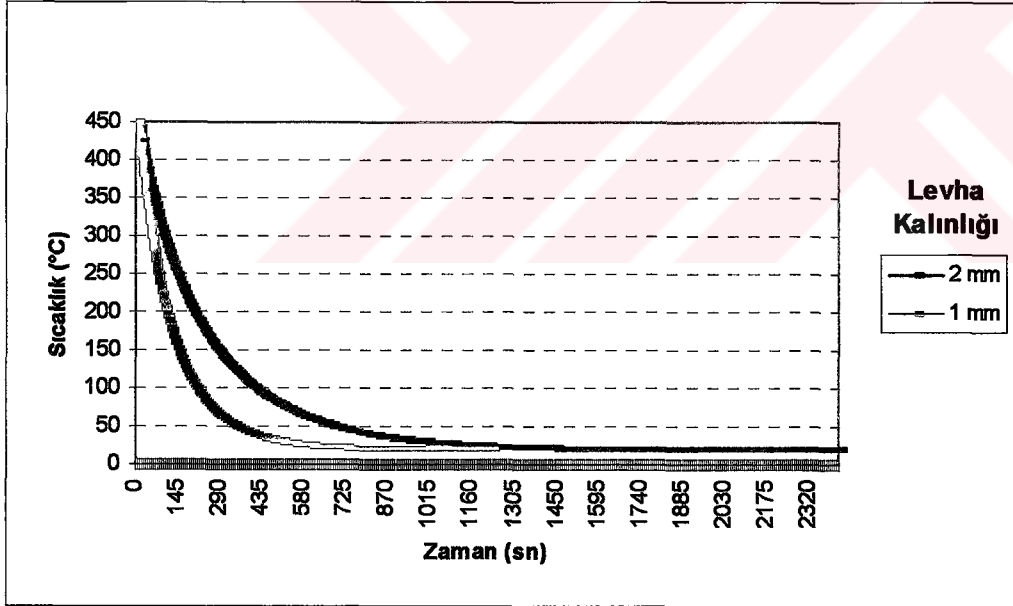
Çelik-Pirinç kompozit plakanın soğuma hızına, kalınlığın %100 etki ettiği tesbit edildi.



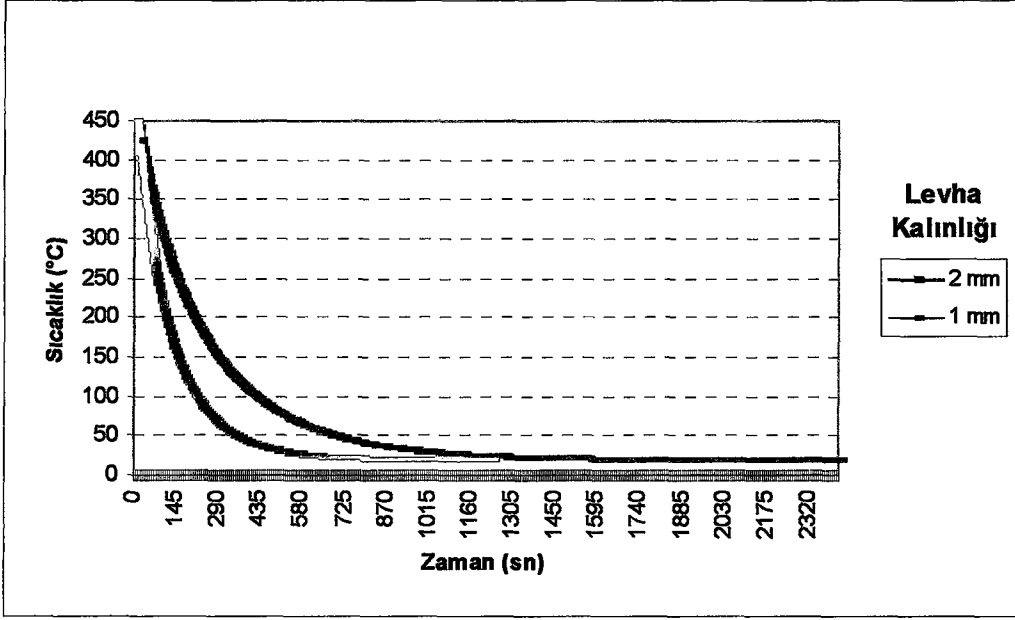
Şekil 5.94. Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



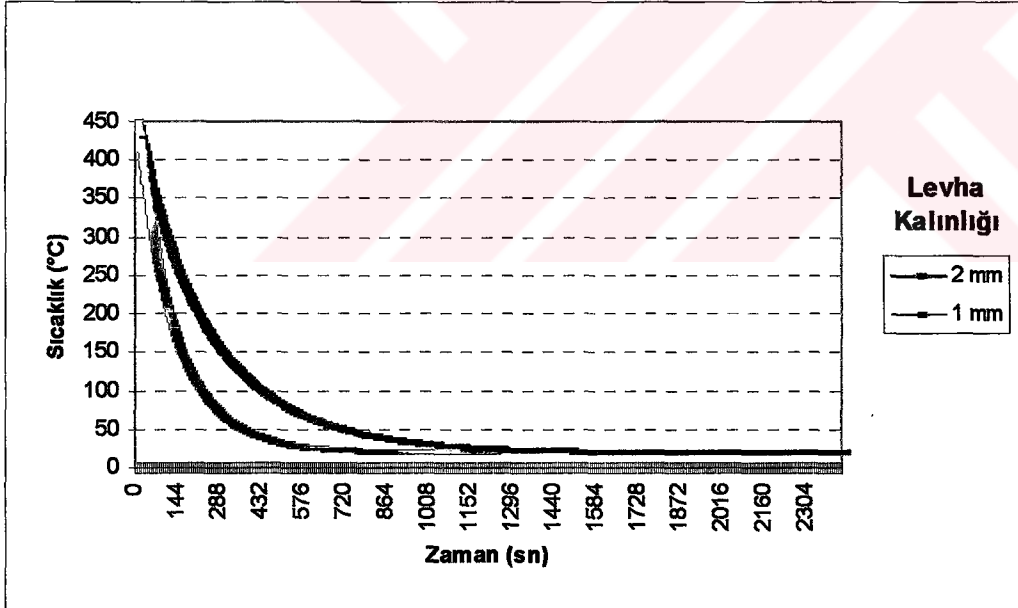
Şekil 5.95. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



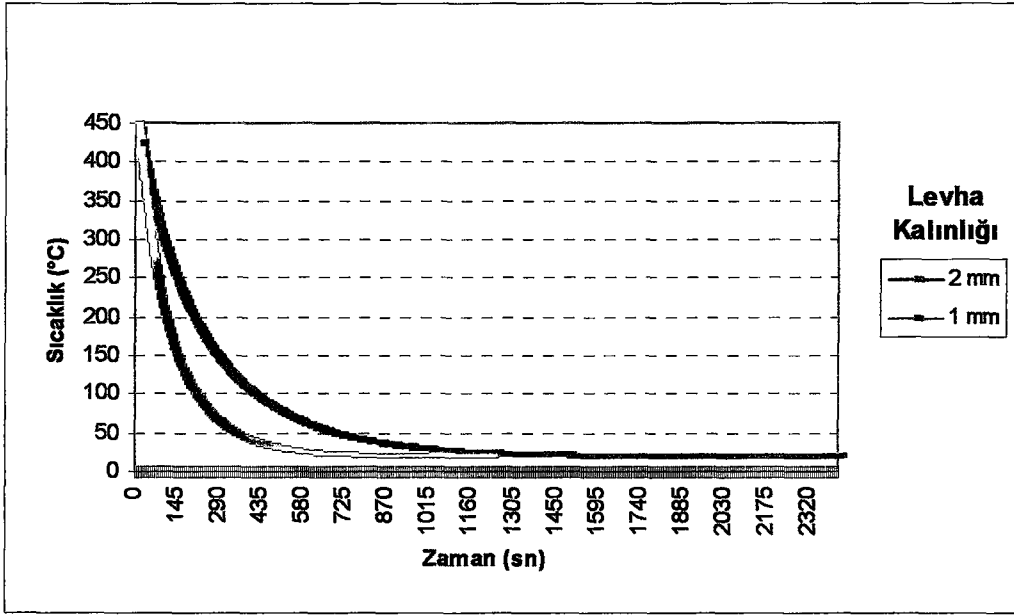
Şekil 5.104. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



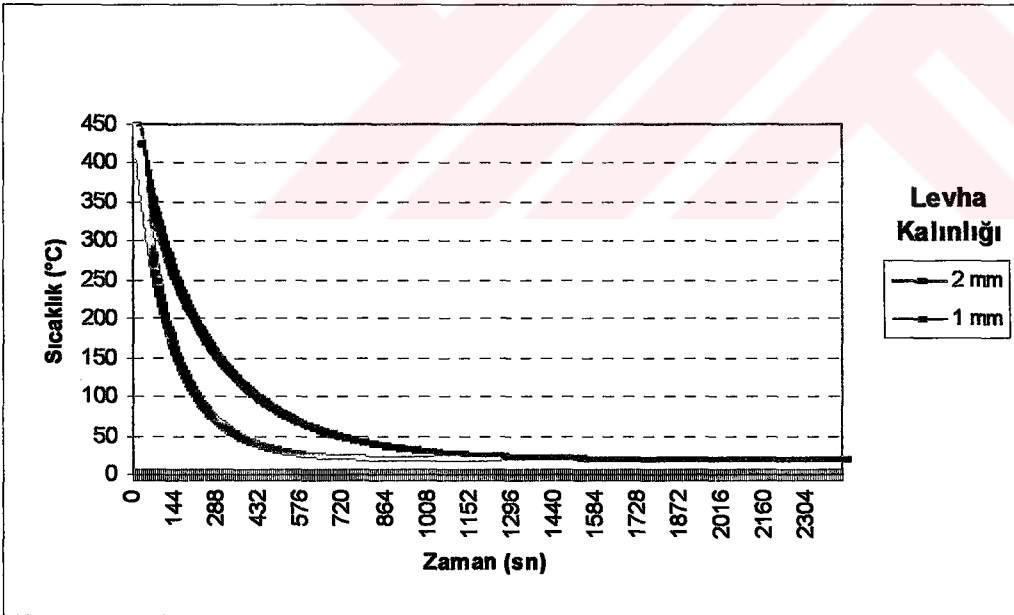
Şekil 5.97. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



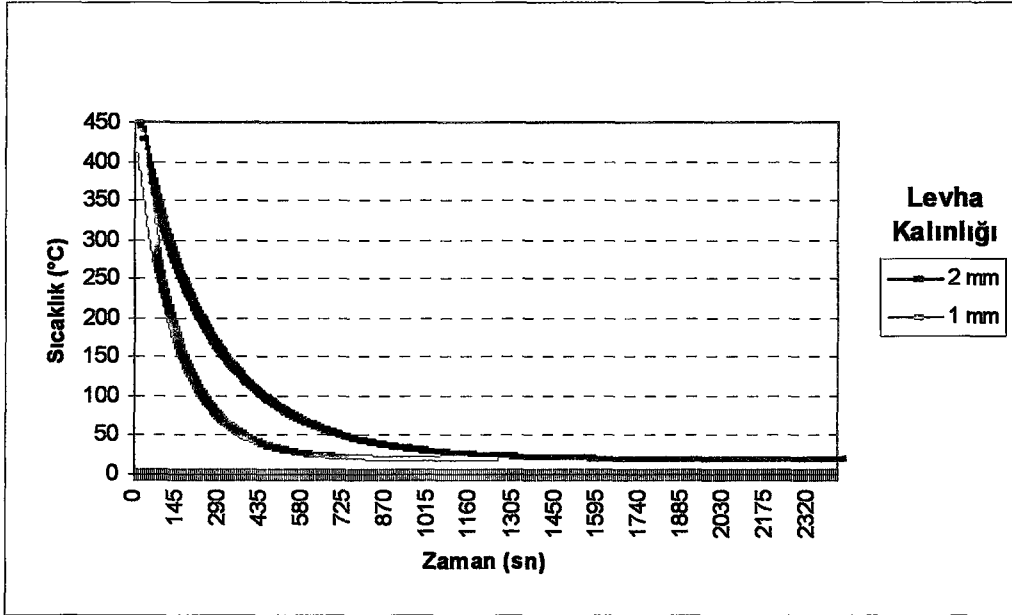
Şekil 5.98. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



Şekil 5.99. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)



Şekil 5.108. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)

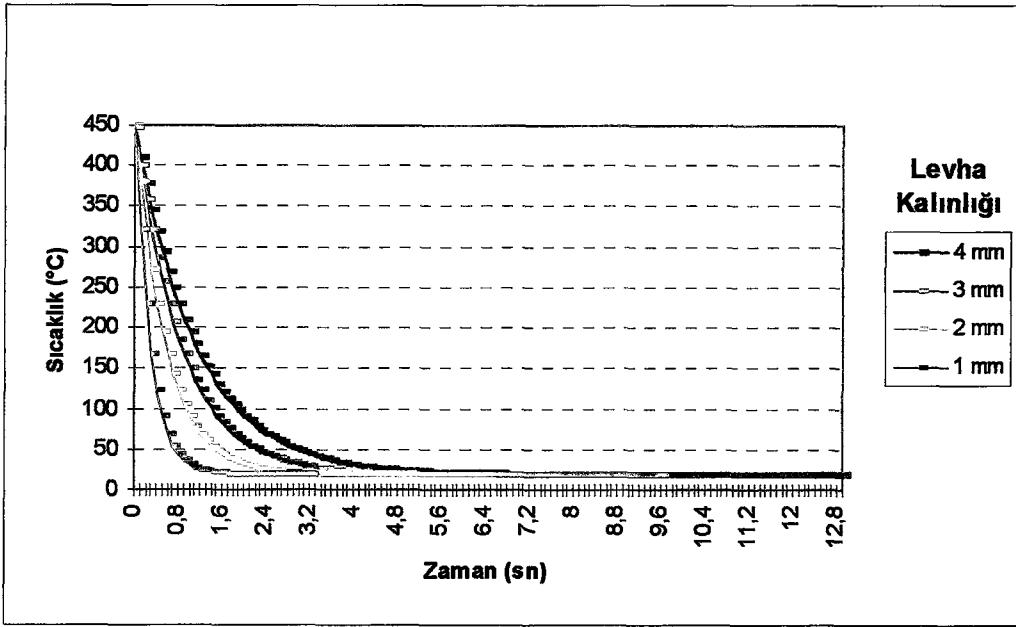


Şekil 5.101. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Hava)

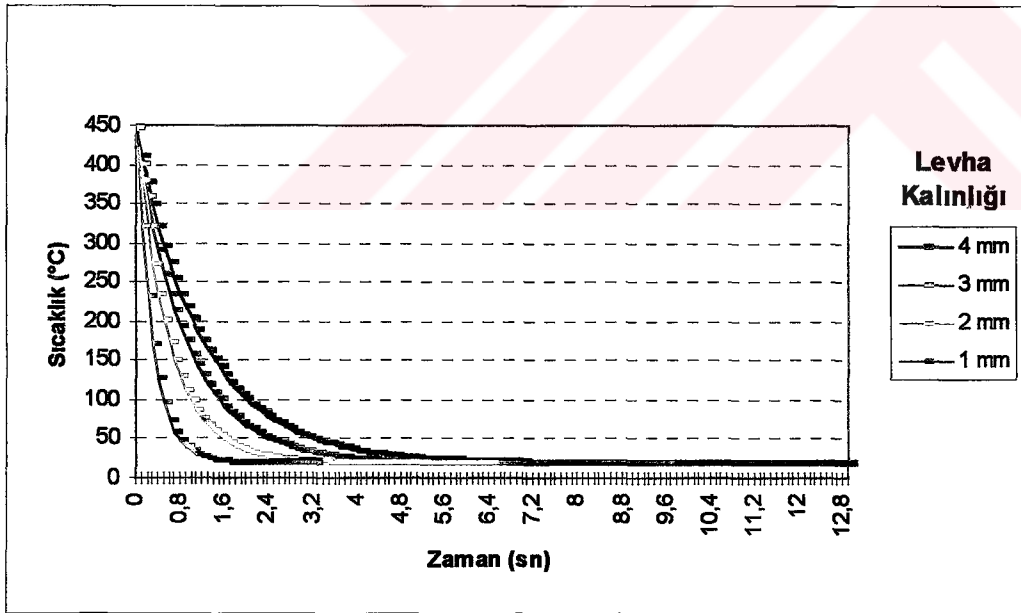
b) Durgun Suda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen durgun suda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.102, 5.103, 5.104, 5.105, 5.106, 5.107, 5.108, 5.109.).

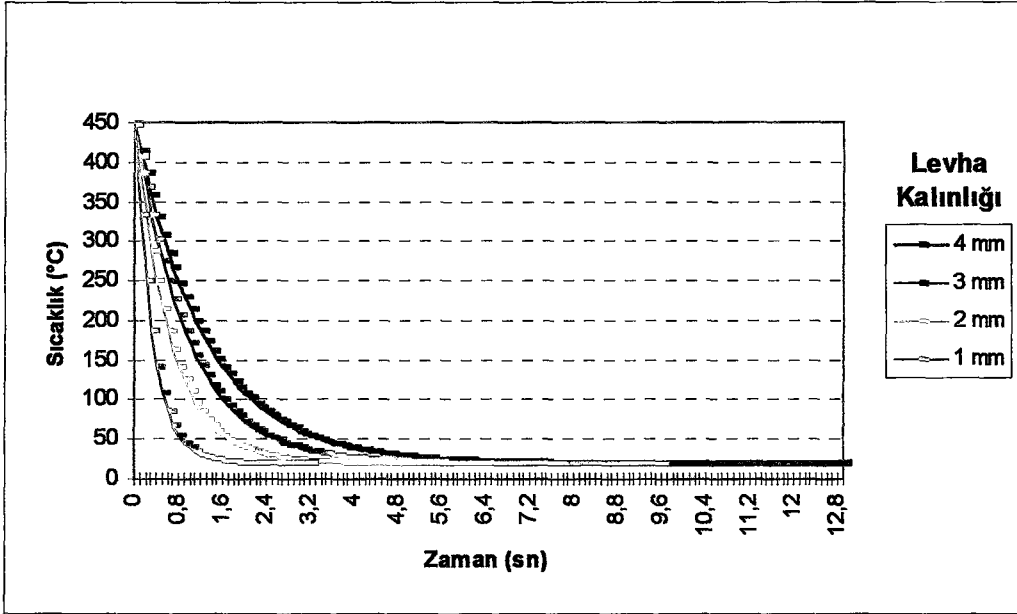
Çelik-Pirinç kompozit levhada soğuma kalınlıkla orantılı olarak yavaşlamaktadır. 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğuma zamanı sırasıyla 3.4, 6.7, 9.9 ve 13 saniyedir.



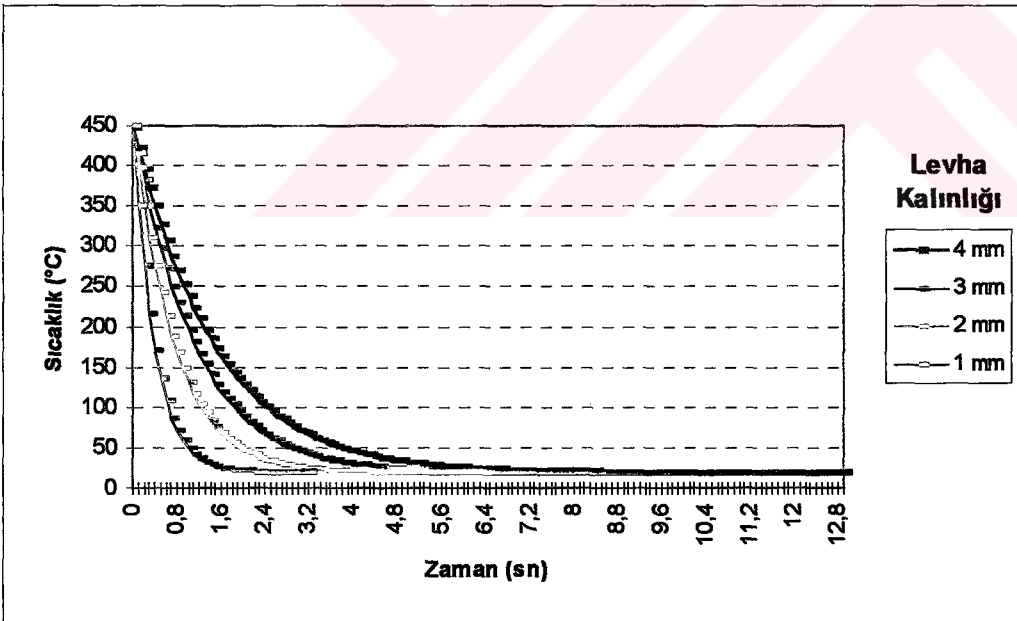
Şekil 5.102. Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



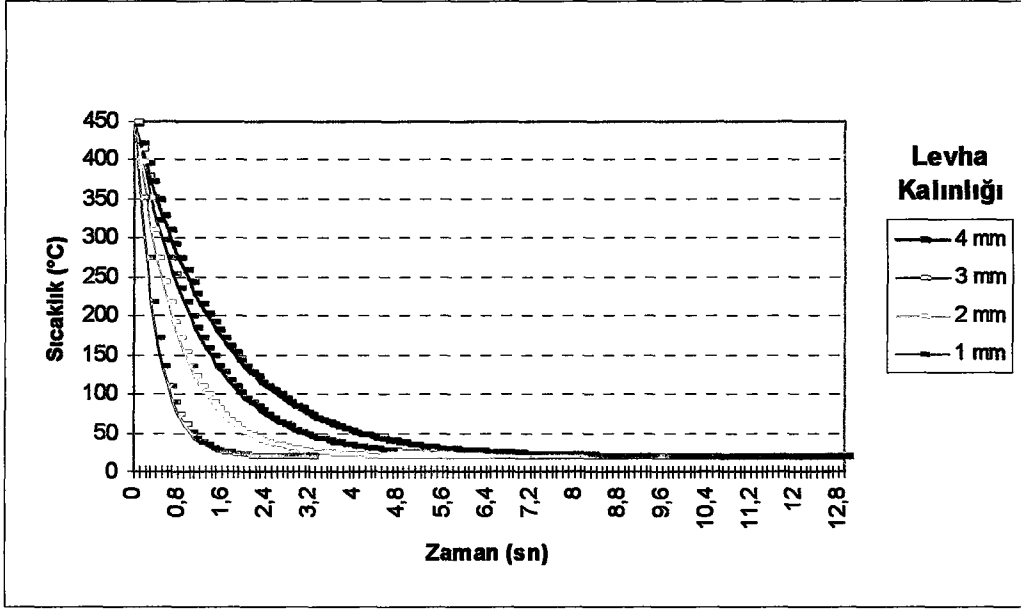
Şekil 5.103. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



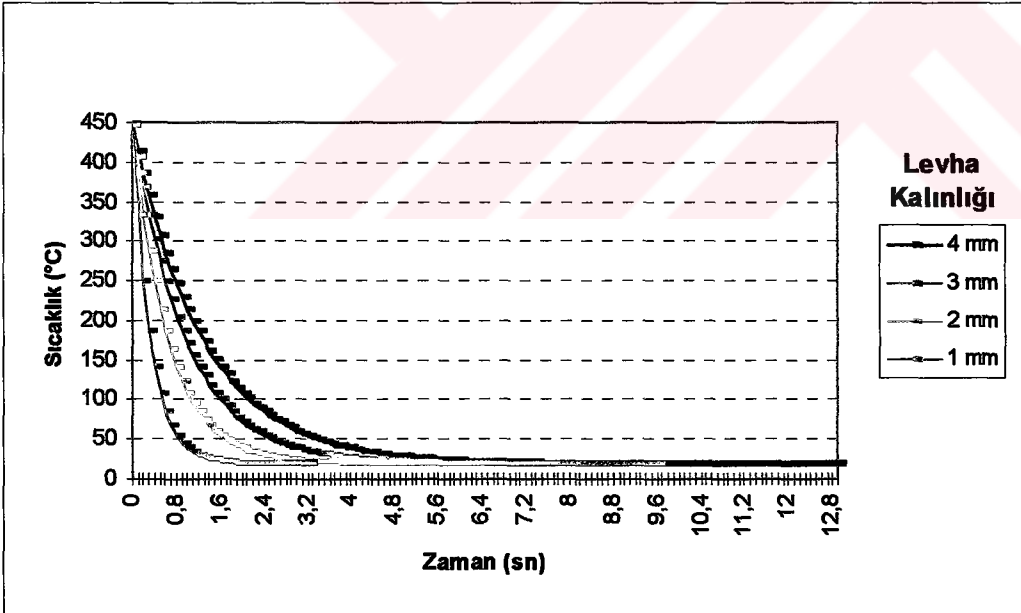
Şekil 5.104. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



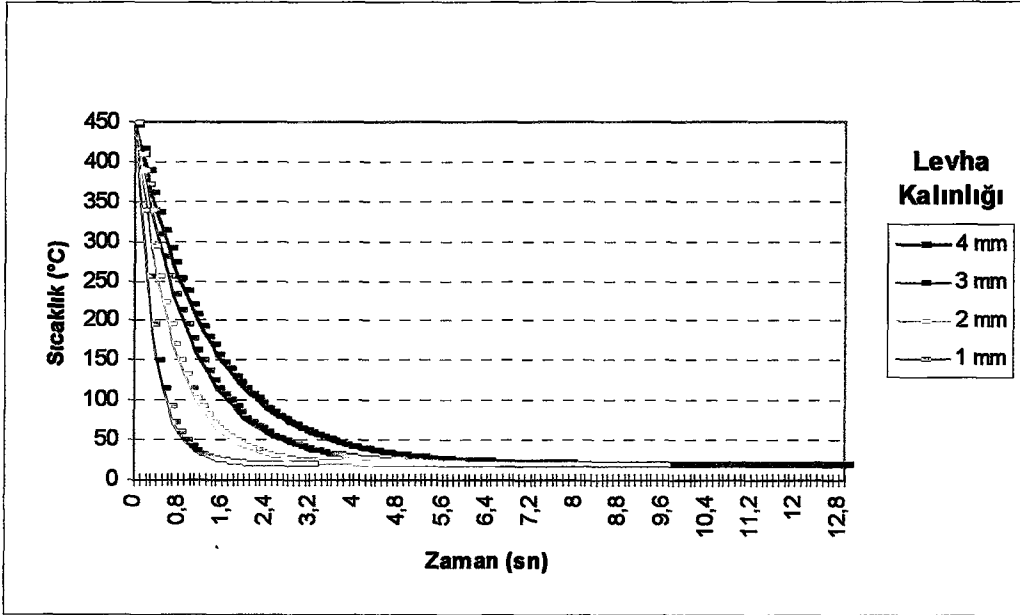
Şekil 5.105. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



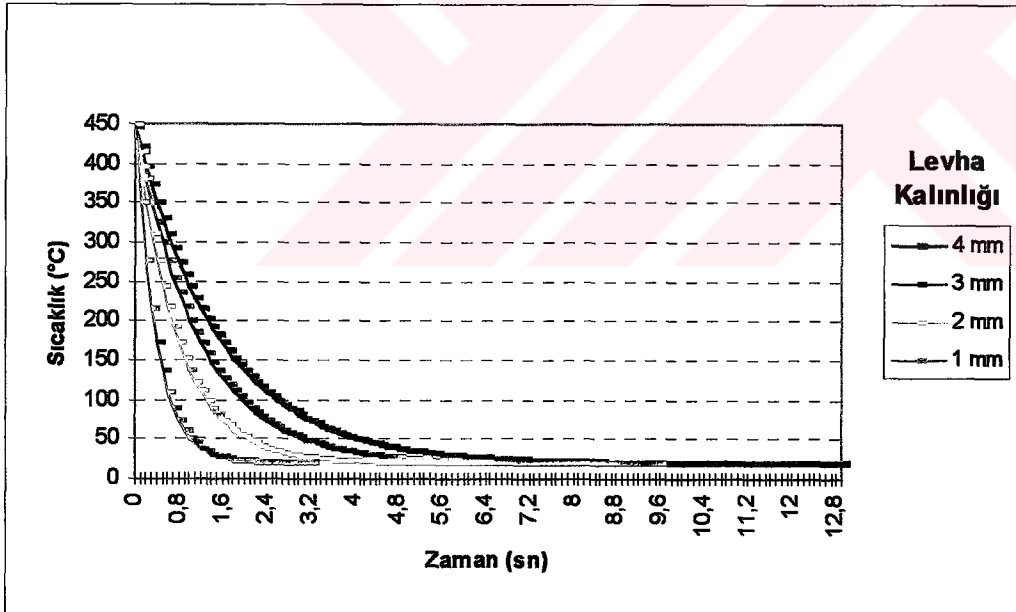
Şekil 5.106. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.107. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.108. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

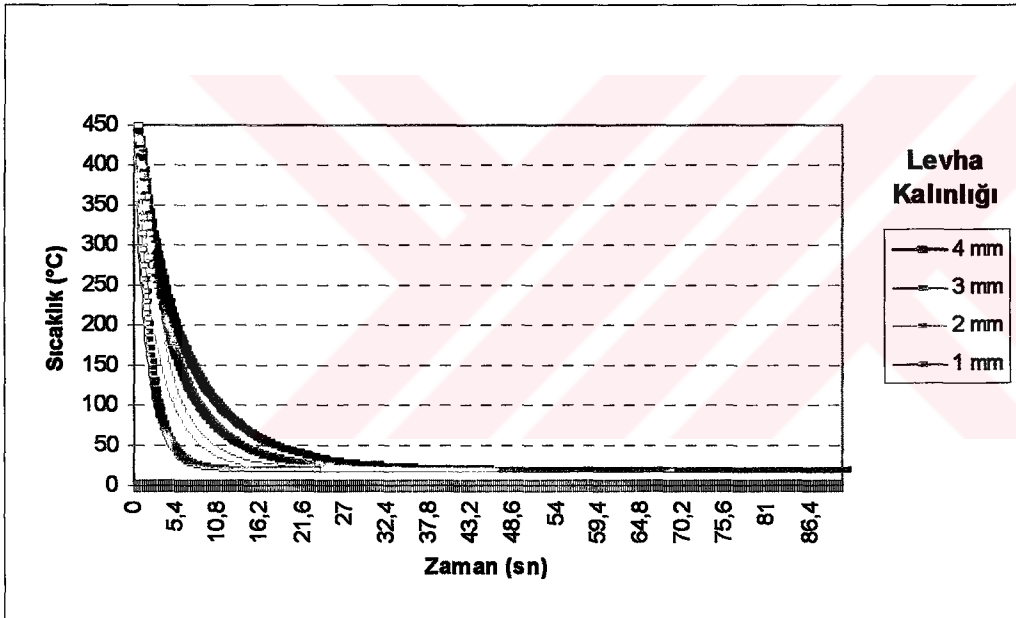


Şekil 5.109. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

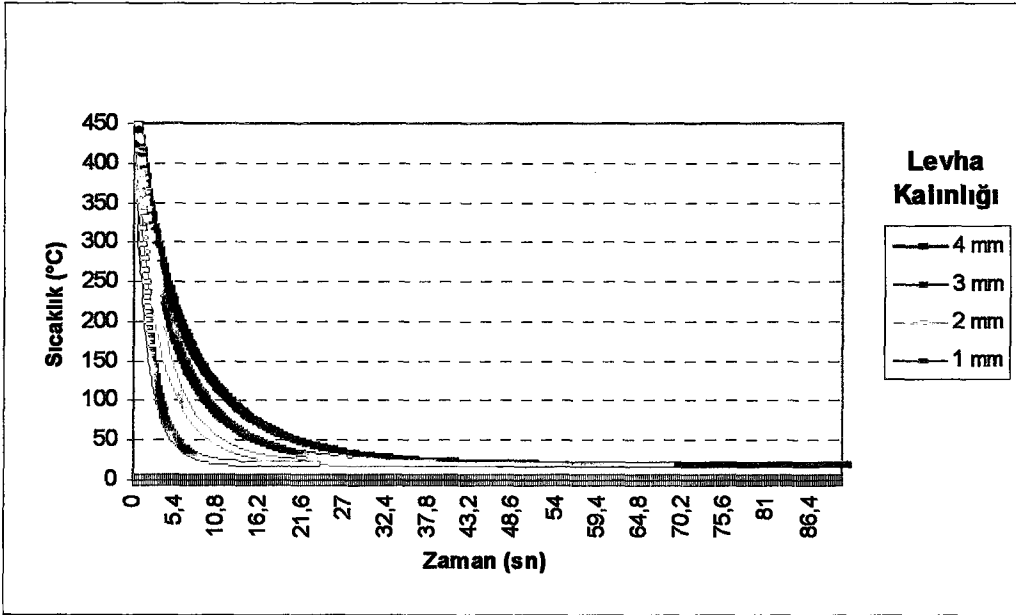
c) Yağda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen yağda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.110, 5.111, 5.112, 5.113, 5.114, 5.115, 5.116, 5.117)

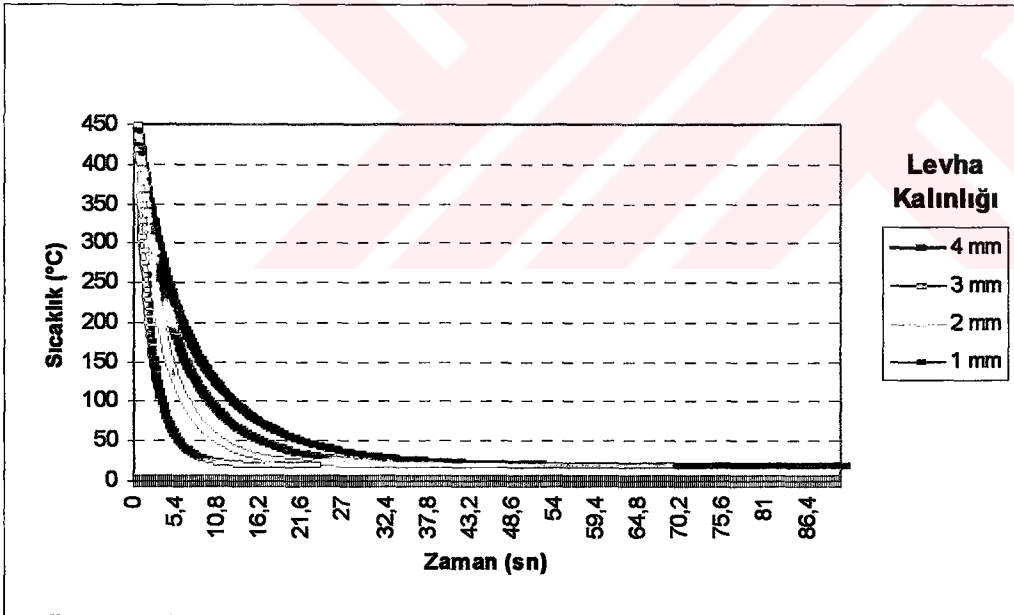
Çelik-Pirinç kompozit levhada kalınlıkla soğuma zamanının şu şekilde değiştiği görüldü : 1mm ,2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için sırasıyla soğuma zamanı; 24.5, 47, 68, 91 saniye bulundu.



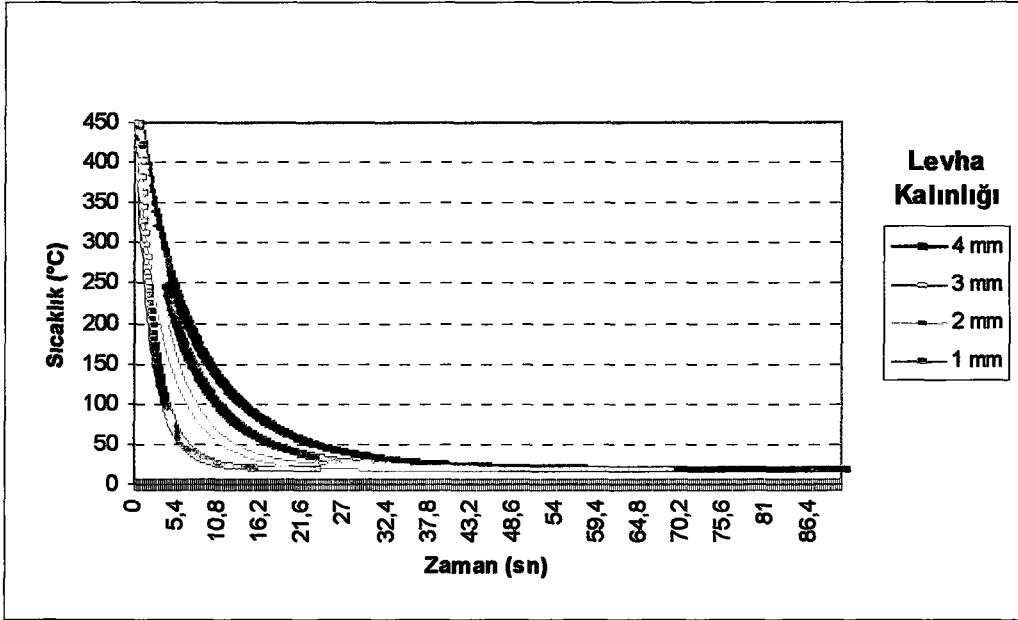
Şekil 5.110.Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



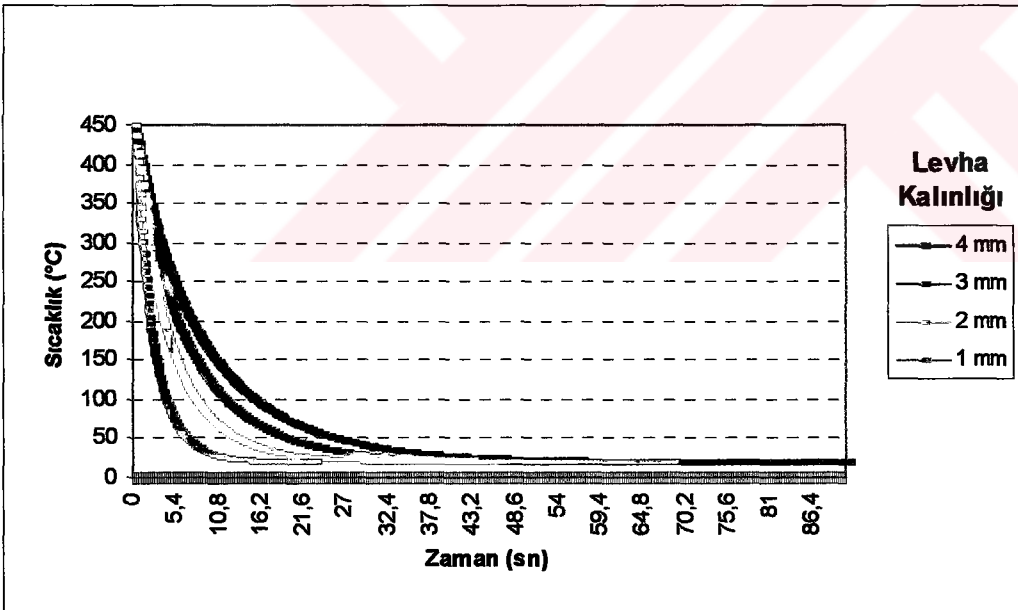
Şekil 5.111. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



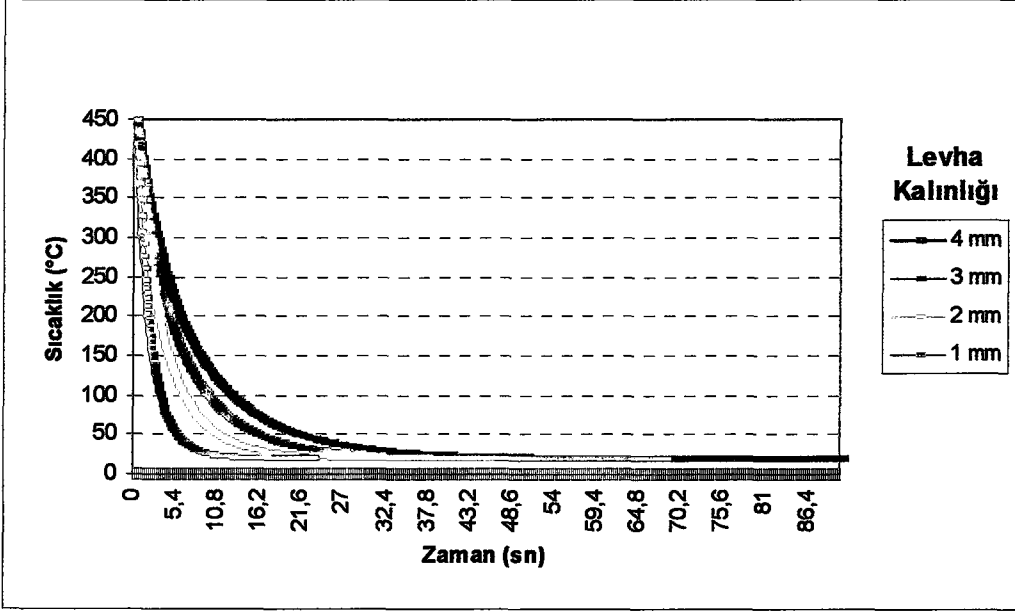
Şekil 5.112. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



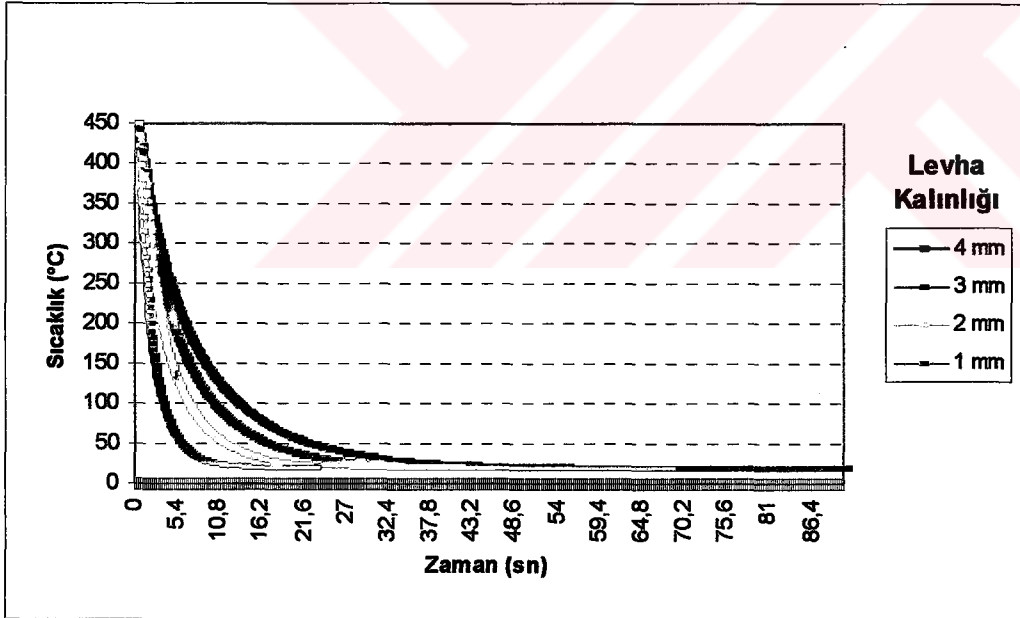
Şekil 5.113. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



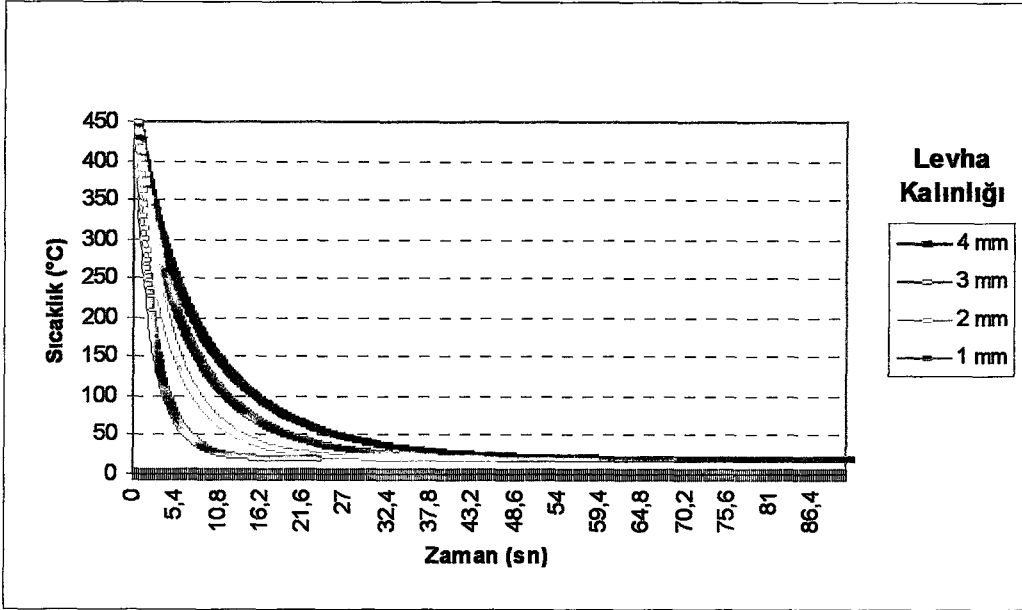
Şekil 5.114. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.115. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.116. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

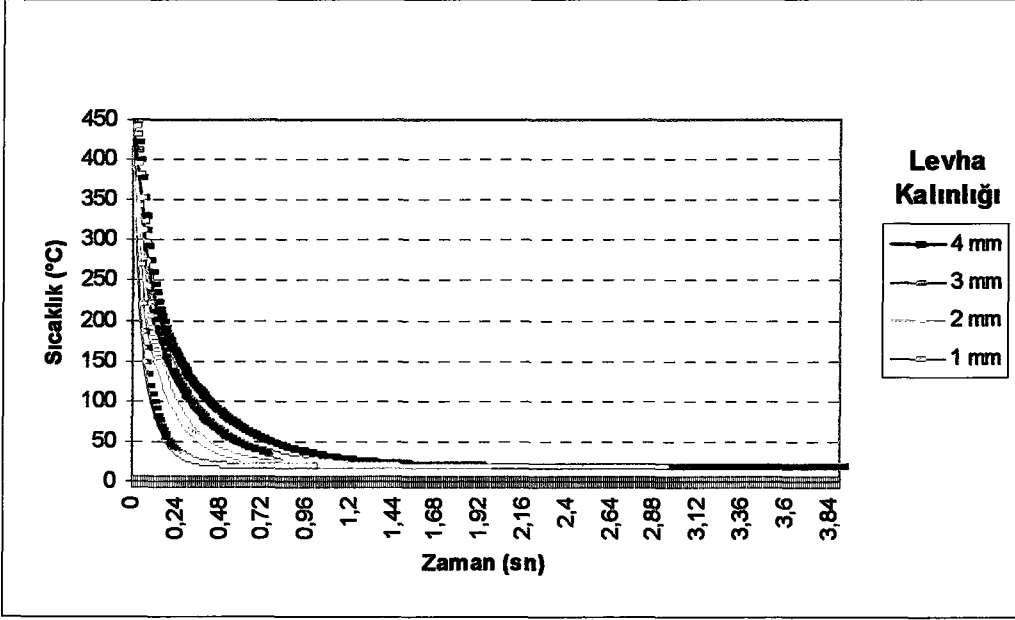


Şekil 5.117. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

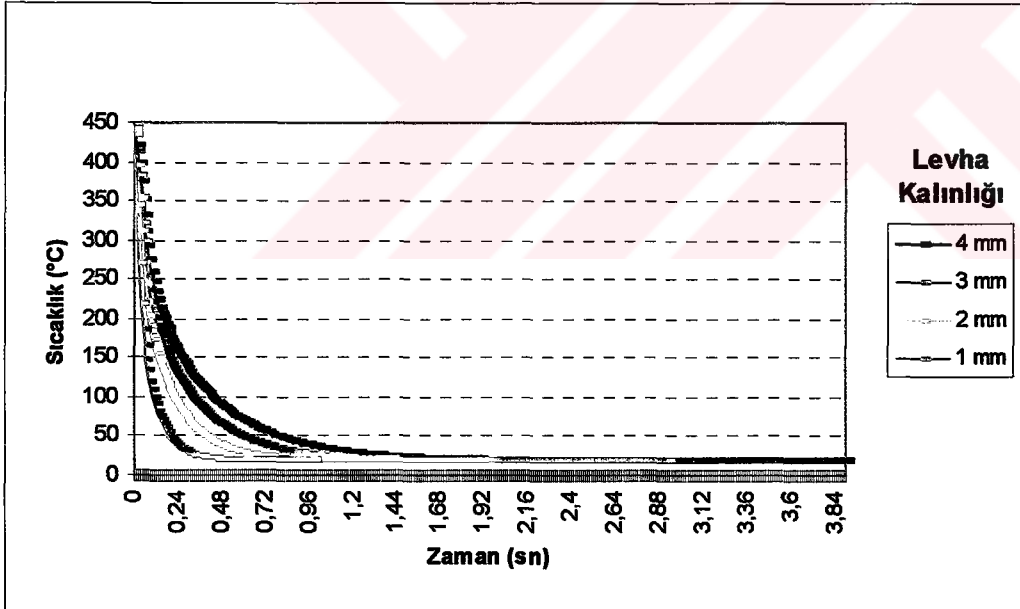
d) Su Püskürtme İle Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen su püskürtme ile soğutmada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.118, 5.119, 5.120, 5.121, 5.122, 5.123, 5.124, 5.125)

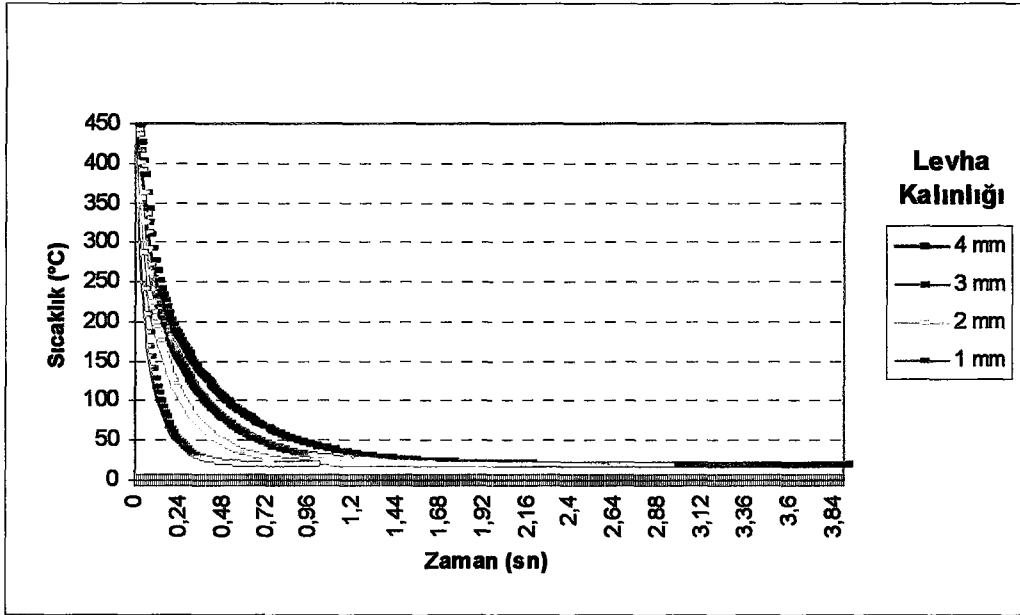
Çelik-Pirinç kompozit levhada soğuma zamanı tabii olarak kalınlıkla artmaktadır. 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğuma zamanı şöyle bulundu: 0.98, 2.0, 3.0, 3.98 saniye.



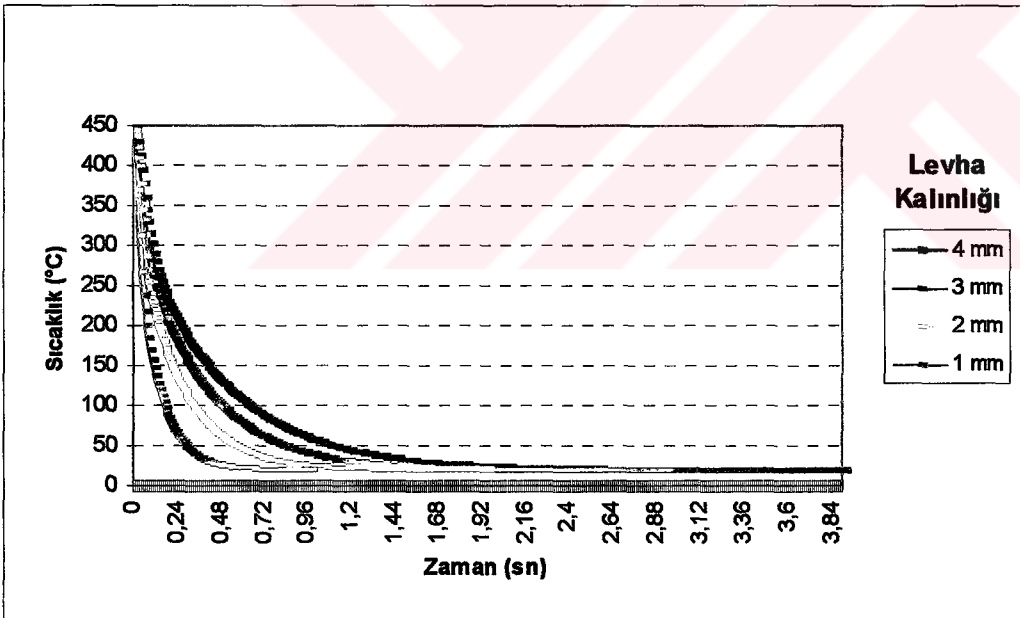
Şekil 5.118. Çelik-Pirinç kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



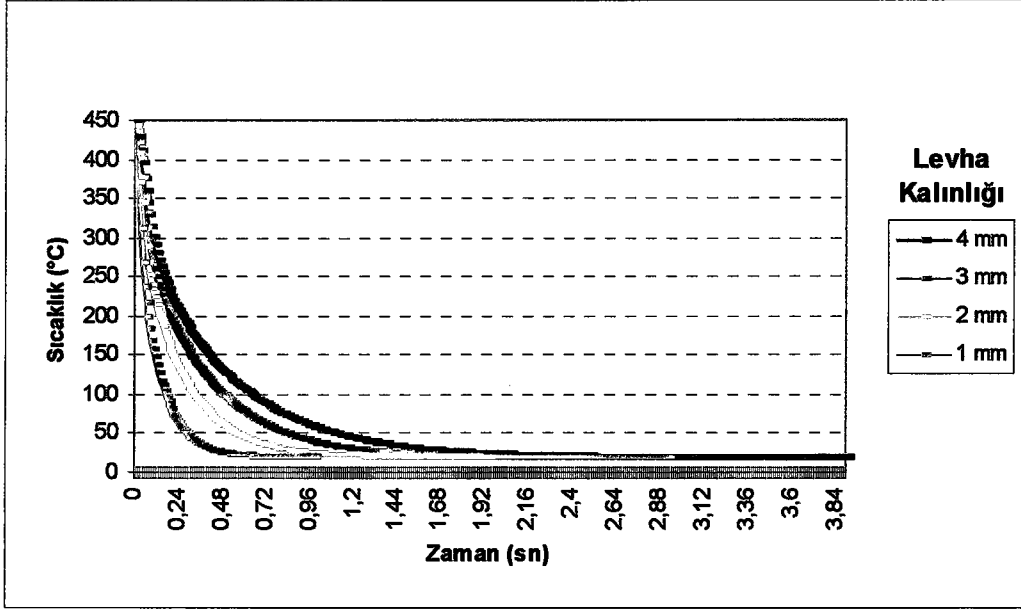
Şekil 5.119. Çelik-Pirinç kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



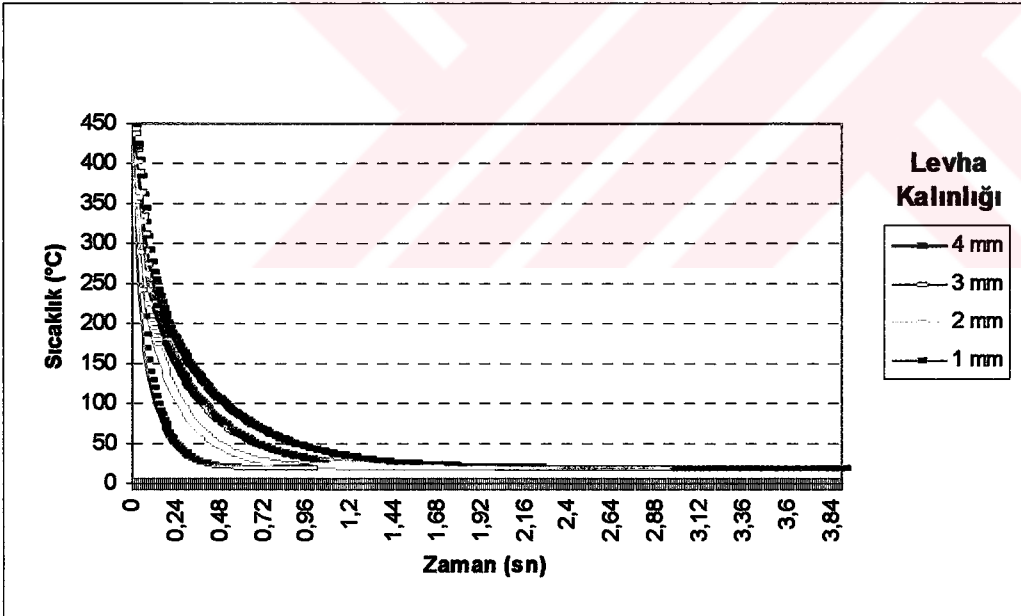
Şekil 5.120. Çelik-Pirinç kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



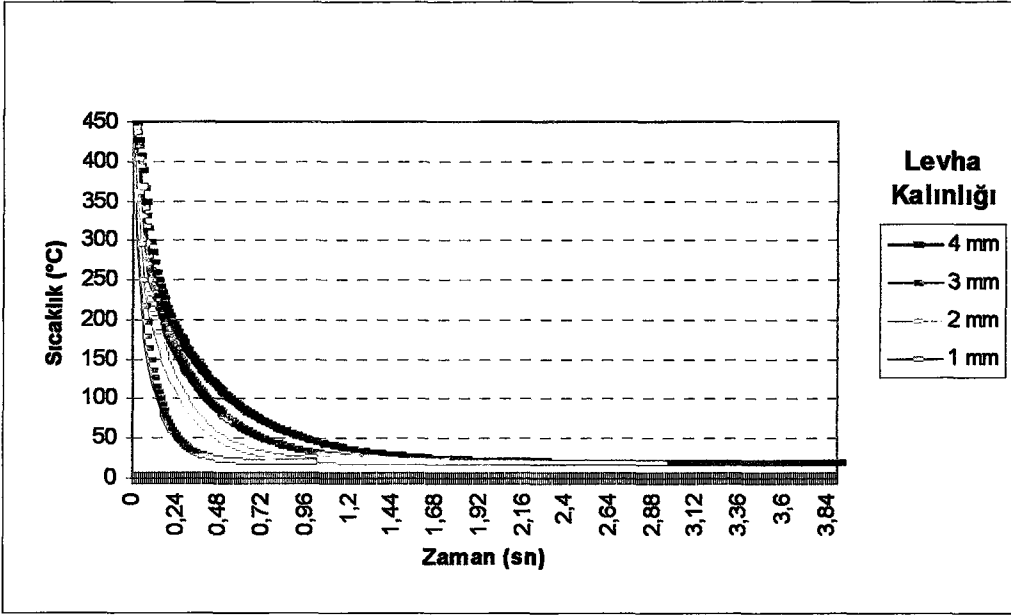
Şekil 5.121. Çelik-Pirinç kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



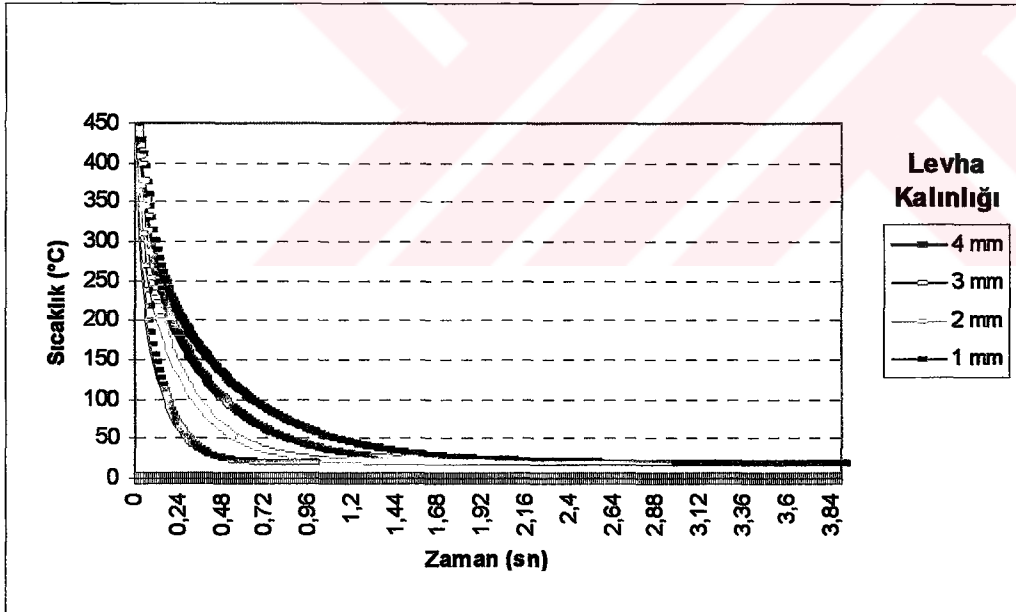
Şekil 5.122. Çelik-Pirinç kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.123. Çelik-Pirinç kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.124. Çelik-Pirinç kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



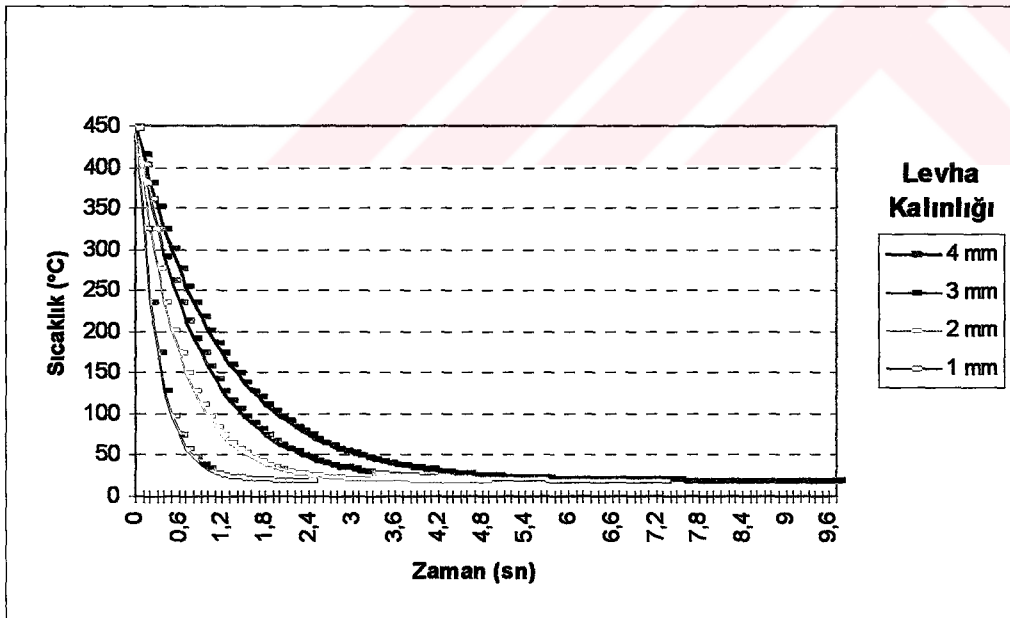
Şekil 5.125. Çelik-Pirinç kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)

5.5.4.Pirinç-Bakır kompozit plakada sıcaklık dağılımının malzeme kalınlığına bağlı olarak değişimi

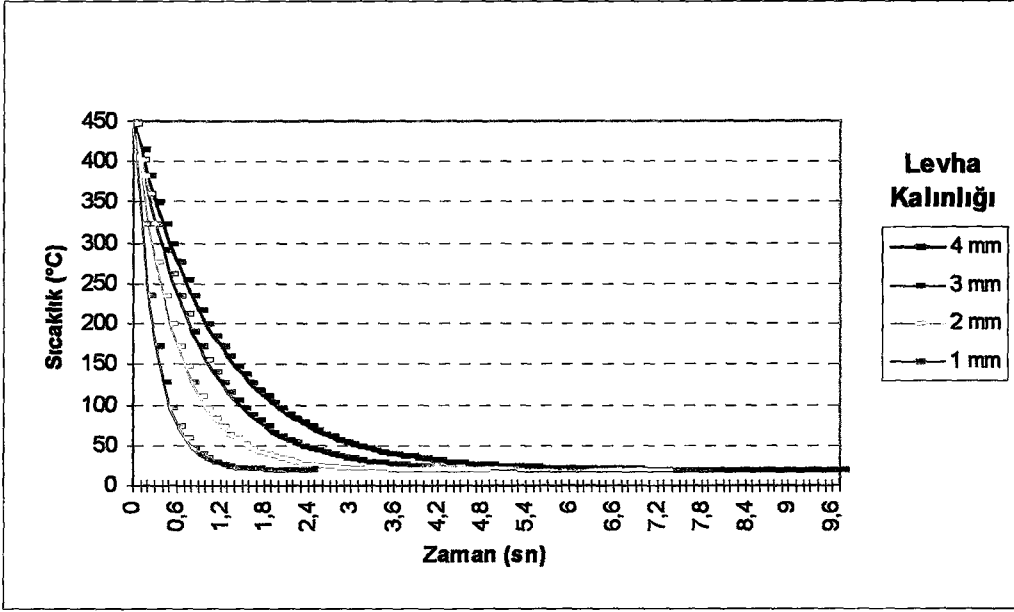
a) Durgun Suda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen durgun suda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48’de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.126, 5.127, 5.128, 5.129, 5.130, 5.131, 5.132, 5.133)

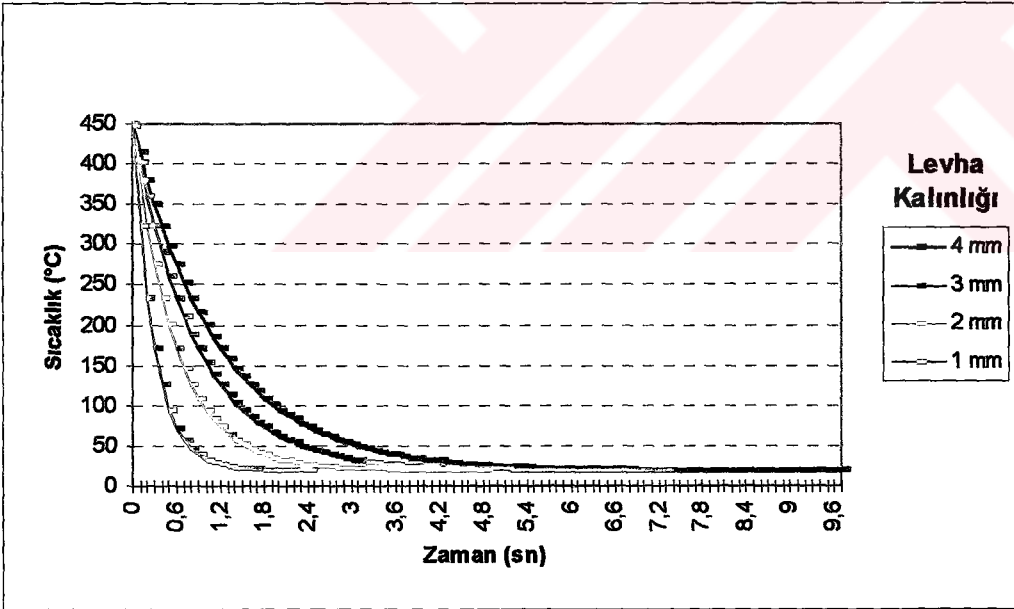
Pirinç-Bakır kompozit levhada durgun suda soğutulma sonucunda kalınlıkla soğuma zamanının şu şekilde değiştiği tesbit edilmiştir: 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğuma zamanları 2.6, 5.0, 7.5 ve 9.8 saniyedir.



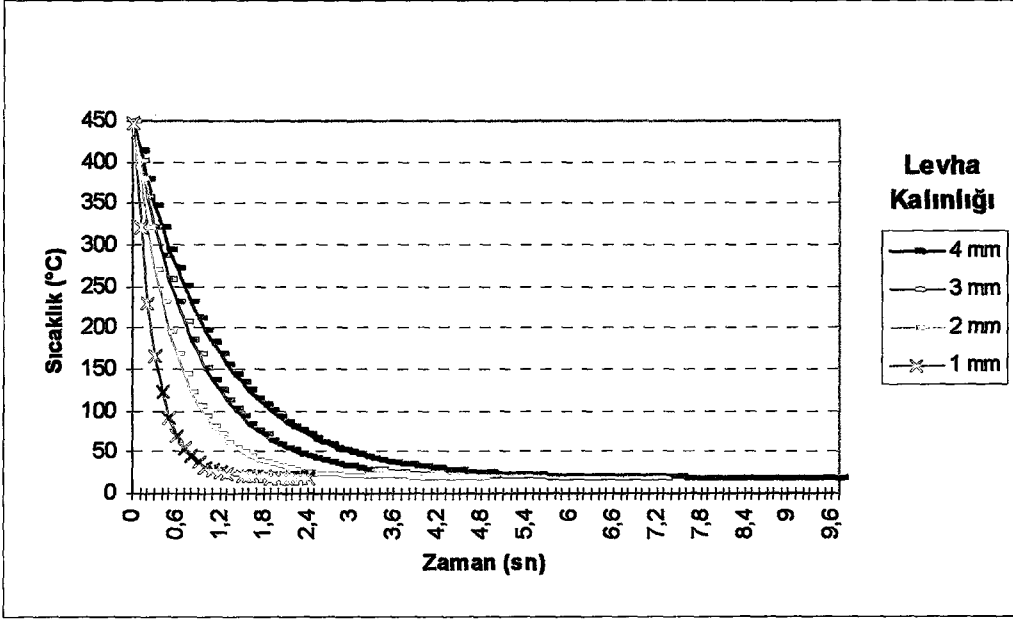
Şekil 5.126.Pirinç-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



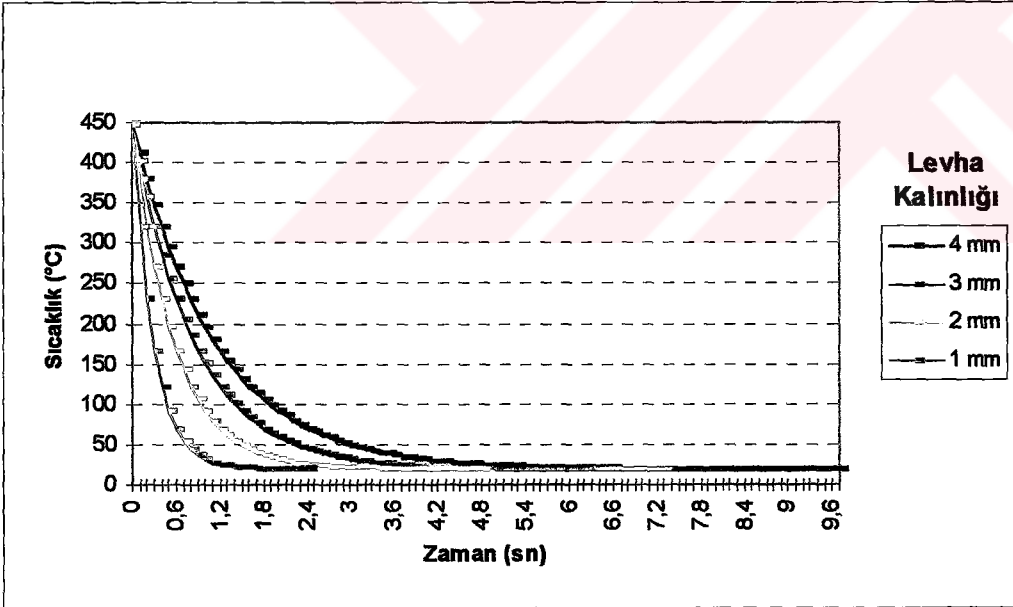
Şekil 5.127. Piriç-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



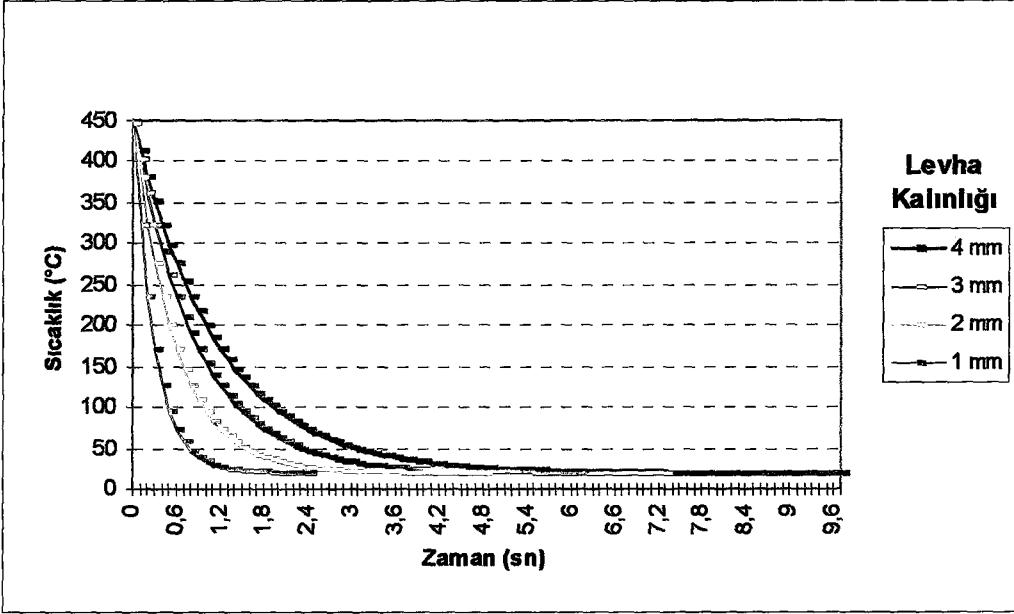
Şekil 5.128. Piriç-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



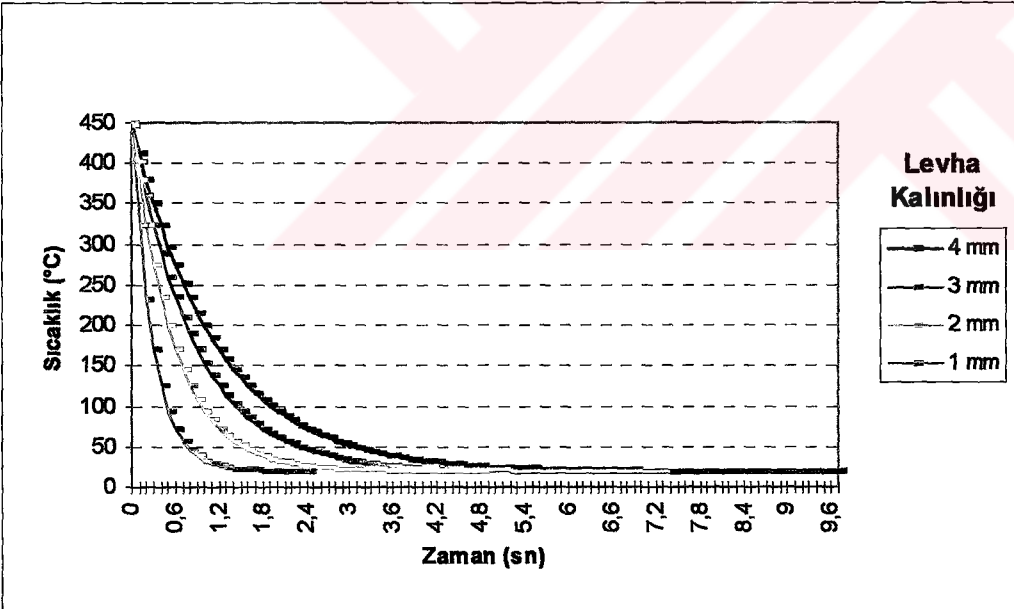
Şekil 5.129. Piriň-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



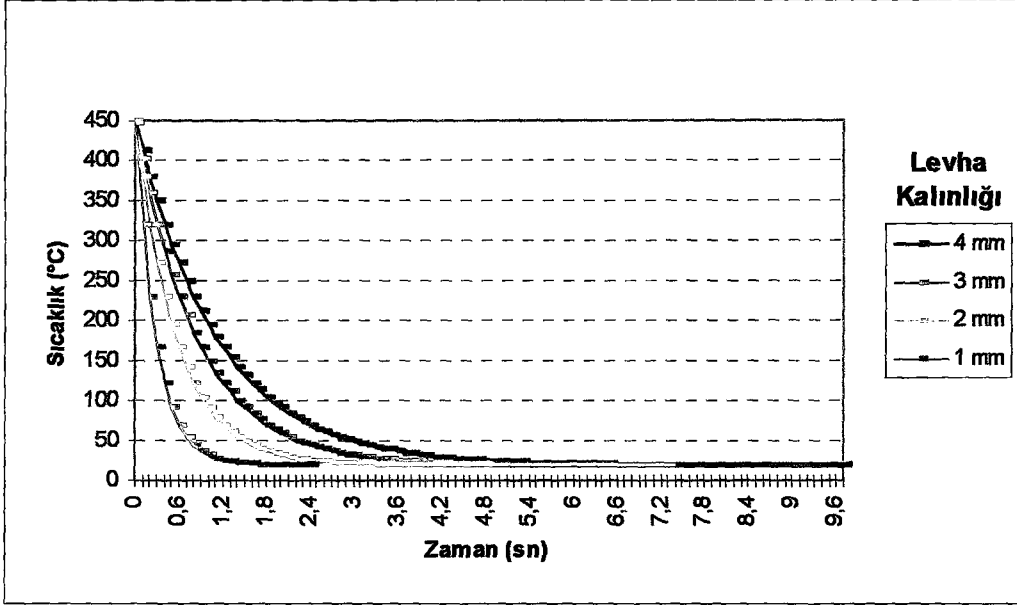
Şekil 5.130. Piriň-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.131. Piring-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)



Şekil 5.132. Piring-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

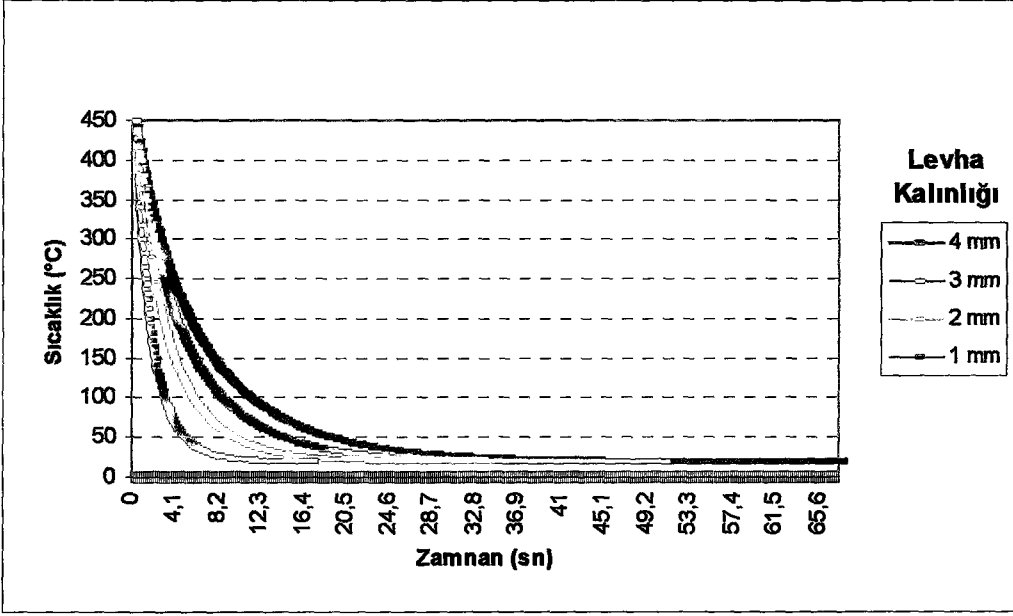


Şekil 5.133. Pirinç-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Durgun su)

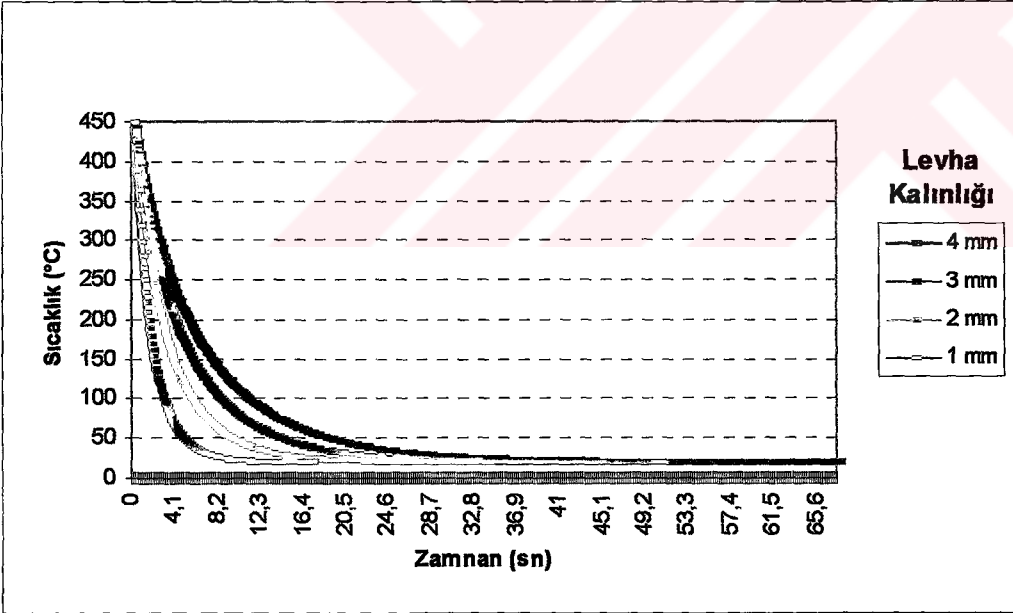
b) Yağda Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen yağda, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.134, 5.135, 5.136, 5.137, 5.138, 5.139, 5.140, 5.141)

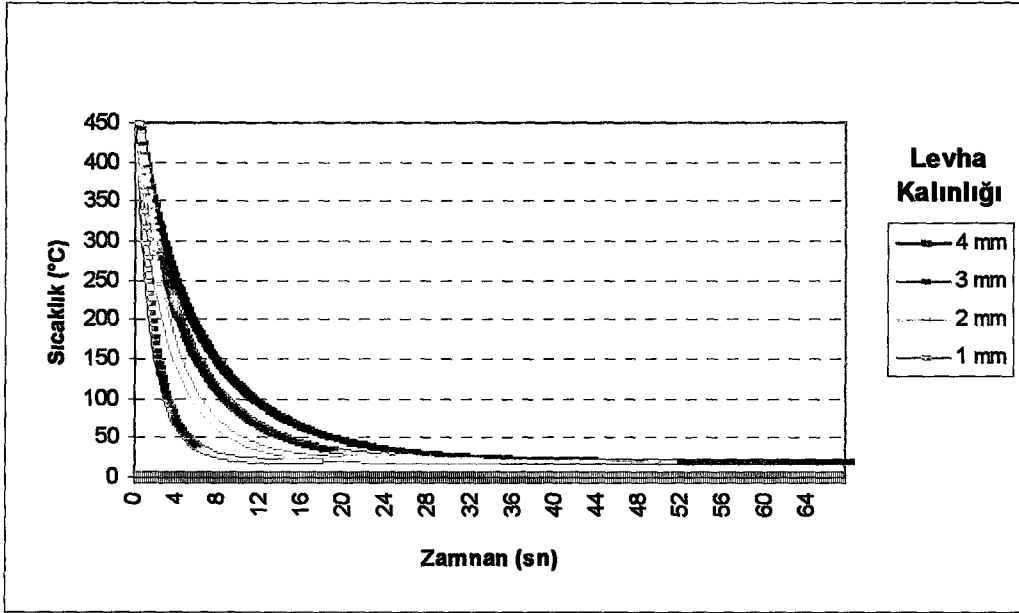
Pirinç-Bakır kompozit levhanın yağda daldırılarak soğutulması sonucu alınan değerlerin kalınlıkla şu şekilde değiştiği görülmüştür: 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için soğuma zamanları 18.5, 35.2, 52.0 ve 69.7 saniyedir.



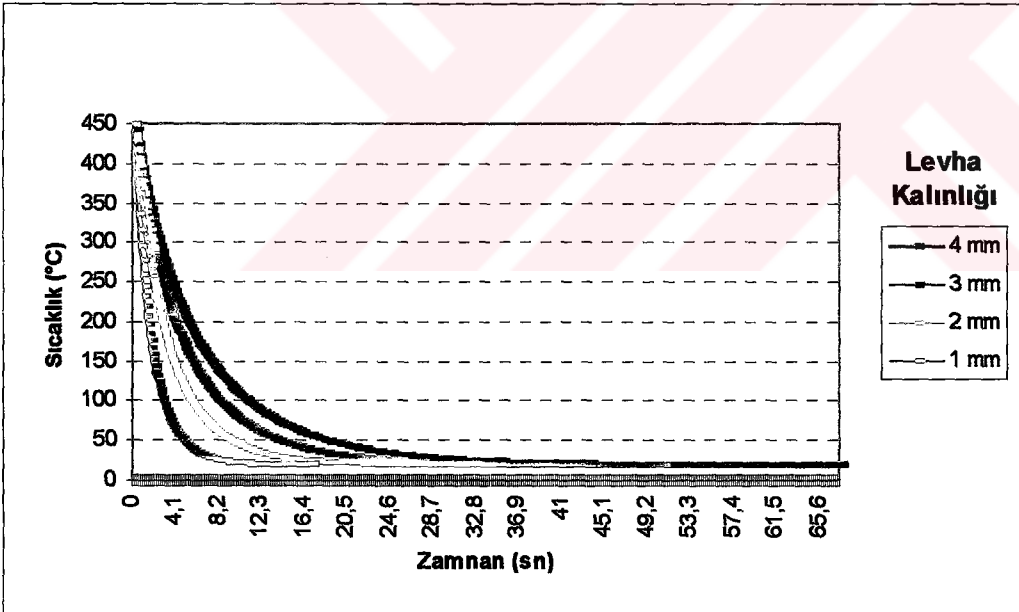
Şekil 5.134. Piring-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



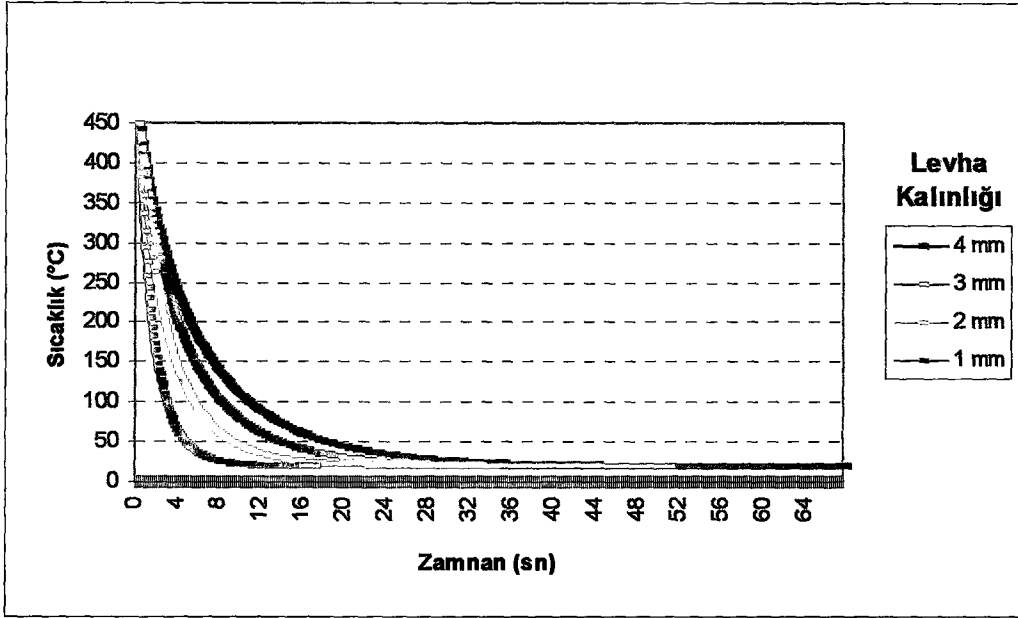
Şekil 5.135. Piring-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



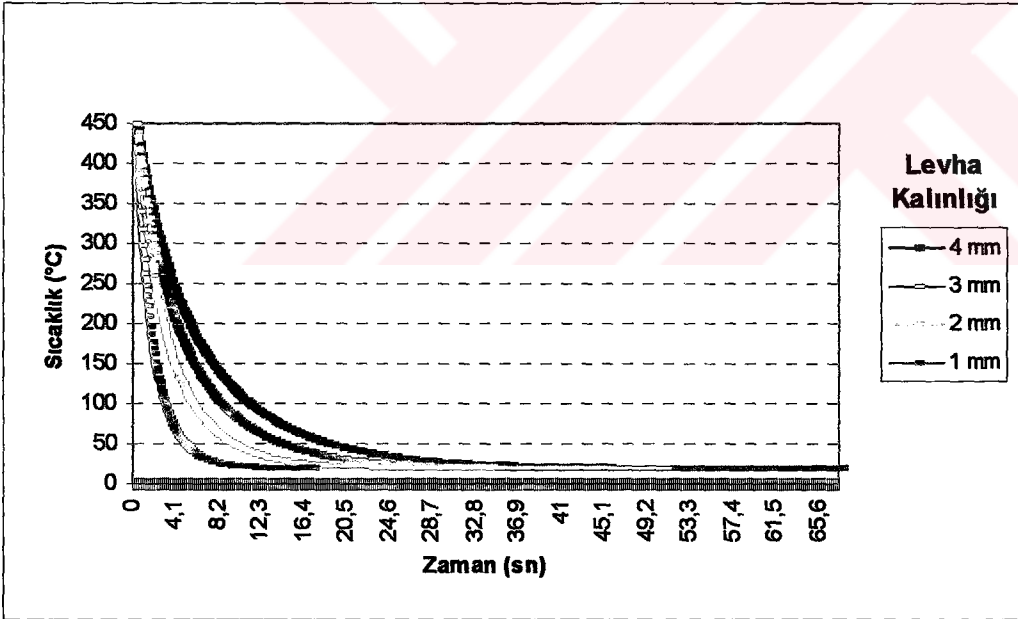
Şekil 5.136. Piring-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



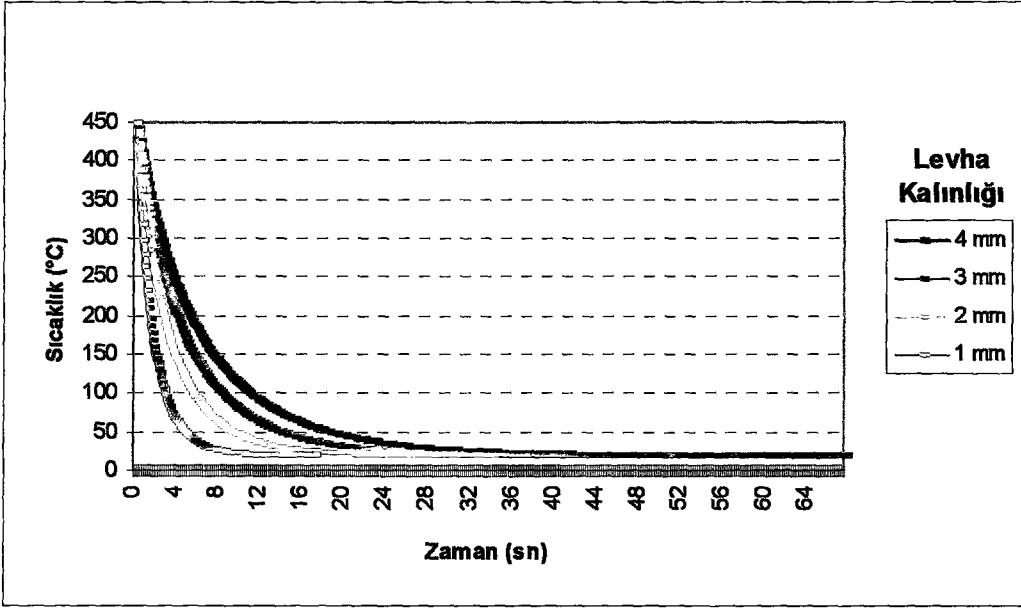
Şekil 5.137. Piring-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



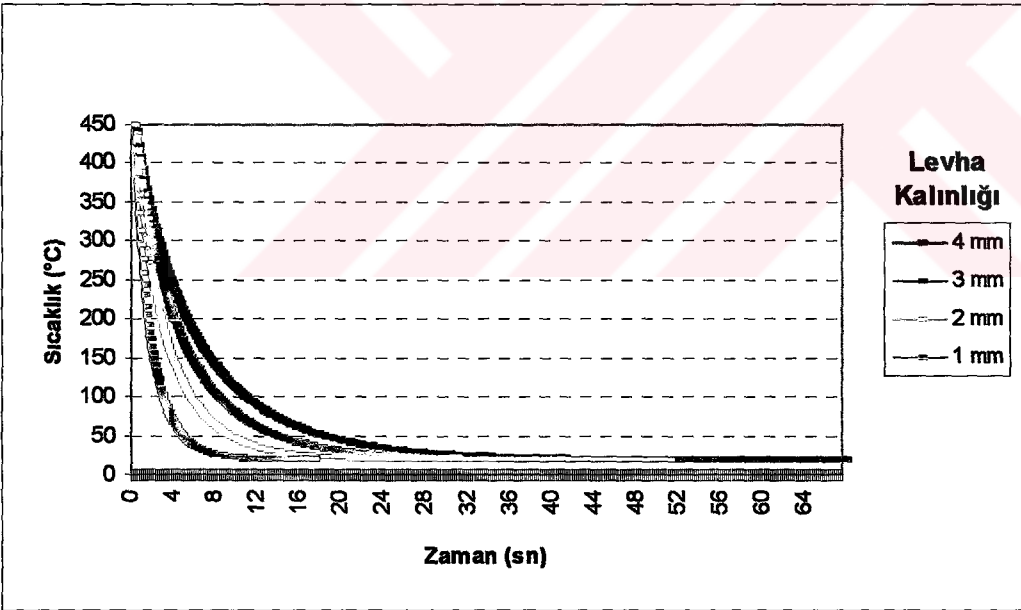
Şekil 5.138. Piring-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.139. Piring-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)



Şekil 5.140. Piring-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

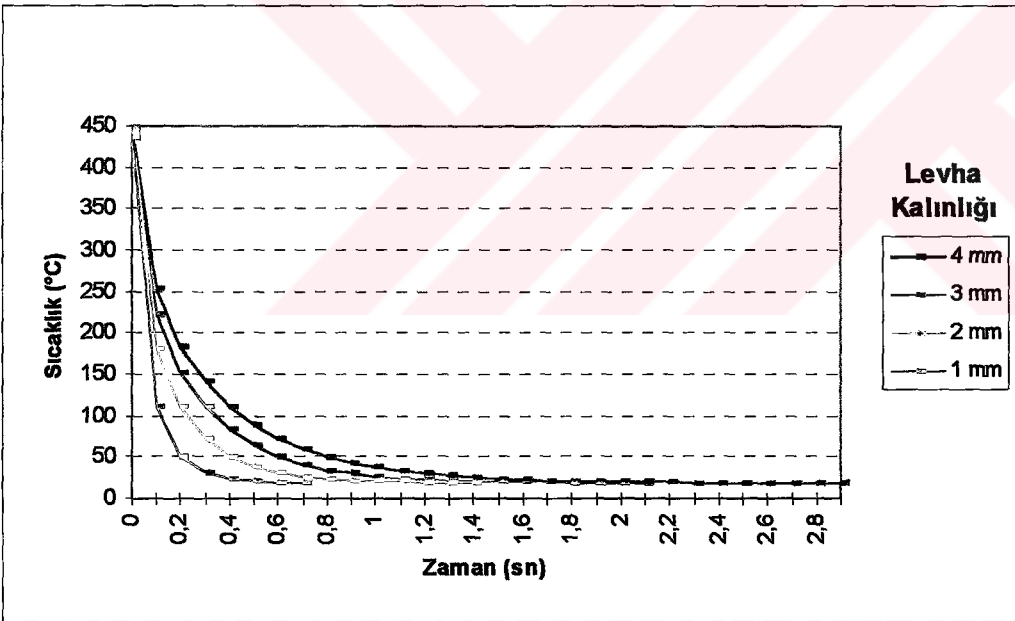


Şekil 5.141. Piring-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Yağ)

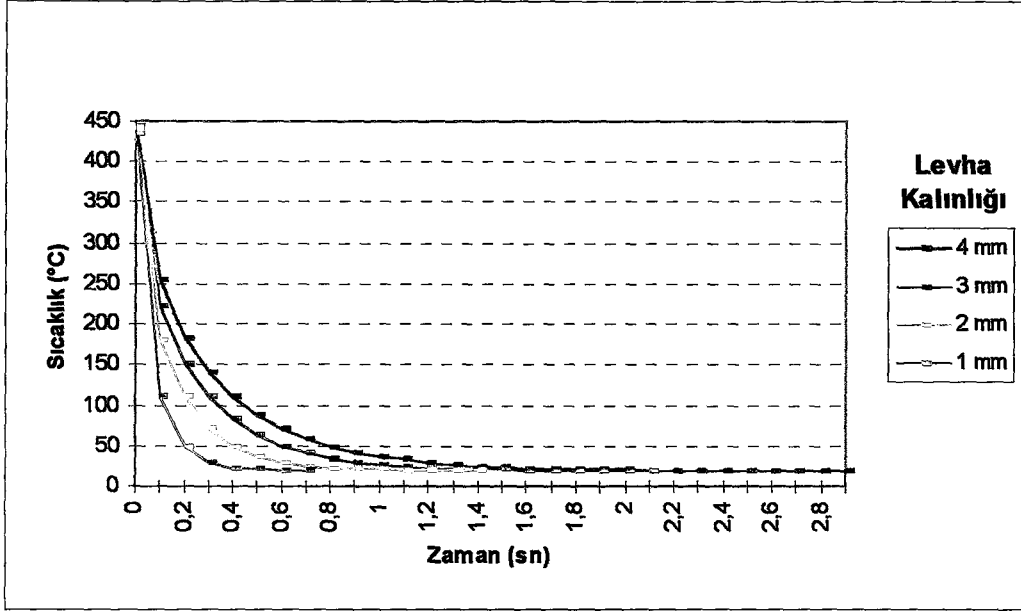
c) Su Püskürtme İle Soğutma

Sıcaklık dağılımının soğutma ortamı seçilen su püskürtme ile soğutmada, kalınlığa bağlı olarak değişimini görmek için soğutma sırasında 0.0016 saniye aralıkla alınan değerlere ilişkin grafikler çizilmiştir. Tablo 5.48'de belirtilen her bir kritik düğüm için grafik ayrı ayrı gösterilmiştir. (Şekil 5.142., 5.143., 5.144., 5.145., 5.146., 5.147., 5.148., 5.149)

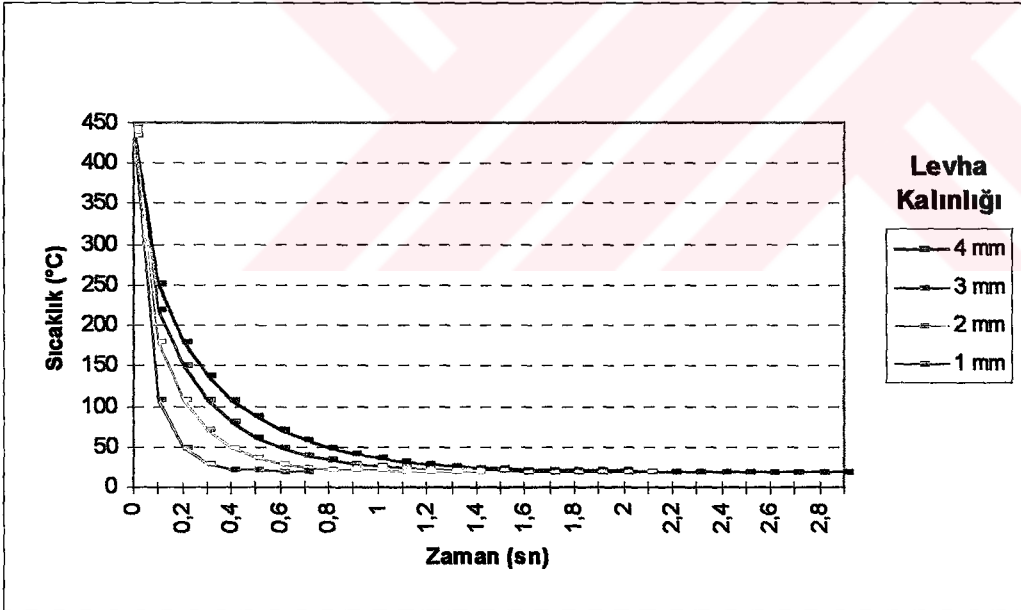
Pirinç-Bakır kompozit levhada soğuma hızının tabii olarak kalınlıkla azaldığı gözlenmiştir. 1mm, 2mm, 3mm ve 4mm kalınlık için bulunan değerler şu şekildedir: 0.72, 1.42, 2.11 ve 2.93 saniyedir.



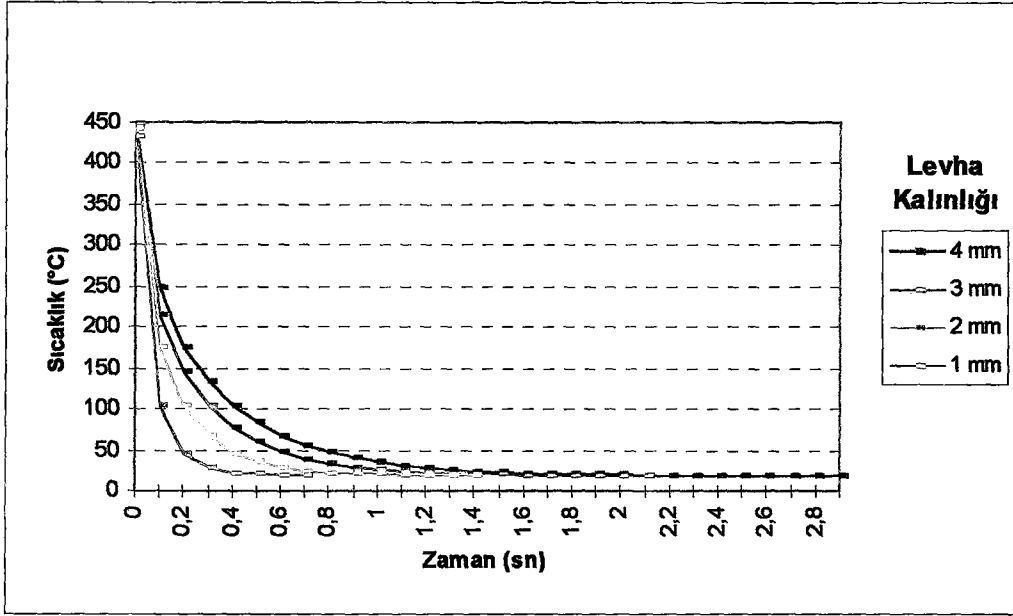
Şekil 5.142. Pirinç-Bakır kompozit levhada 258 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



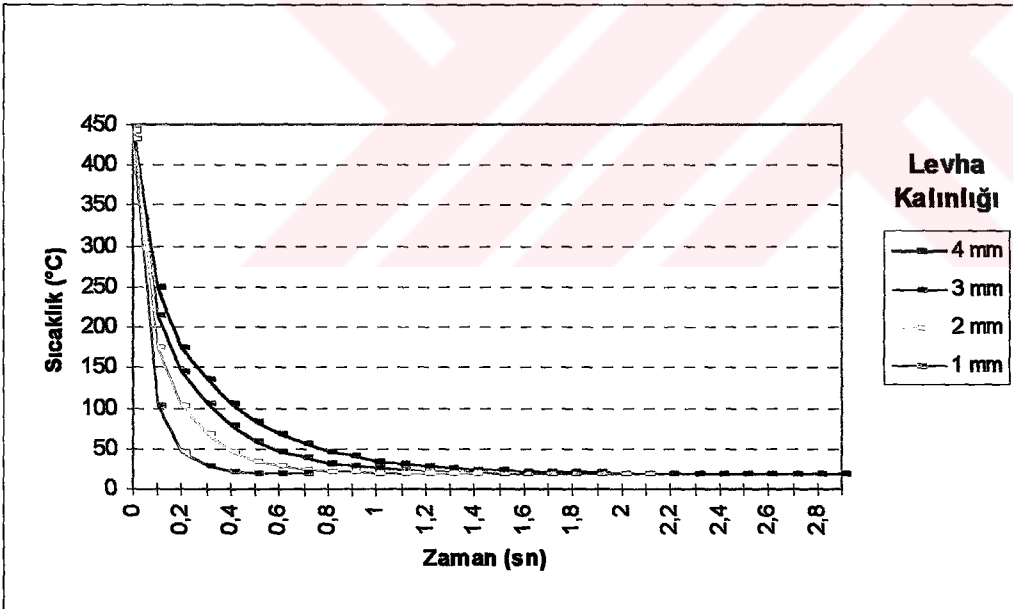
Şekil 5.143. Piring-Bakır kompozit levhada 192 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



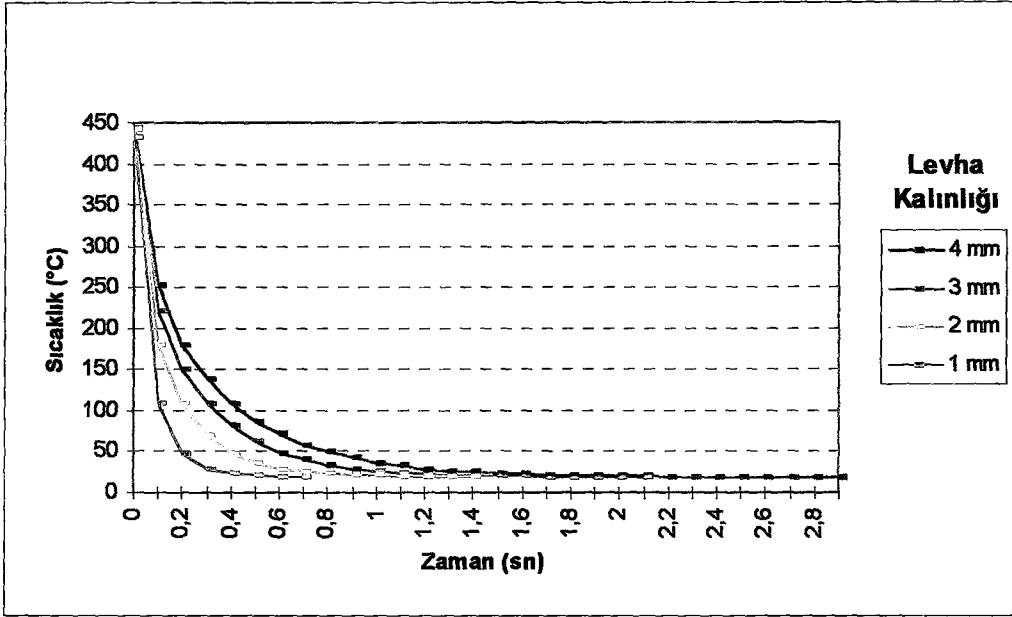
Şekil 5.144. Piring-Bakır kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



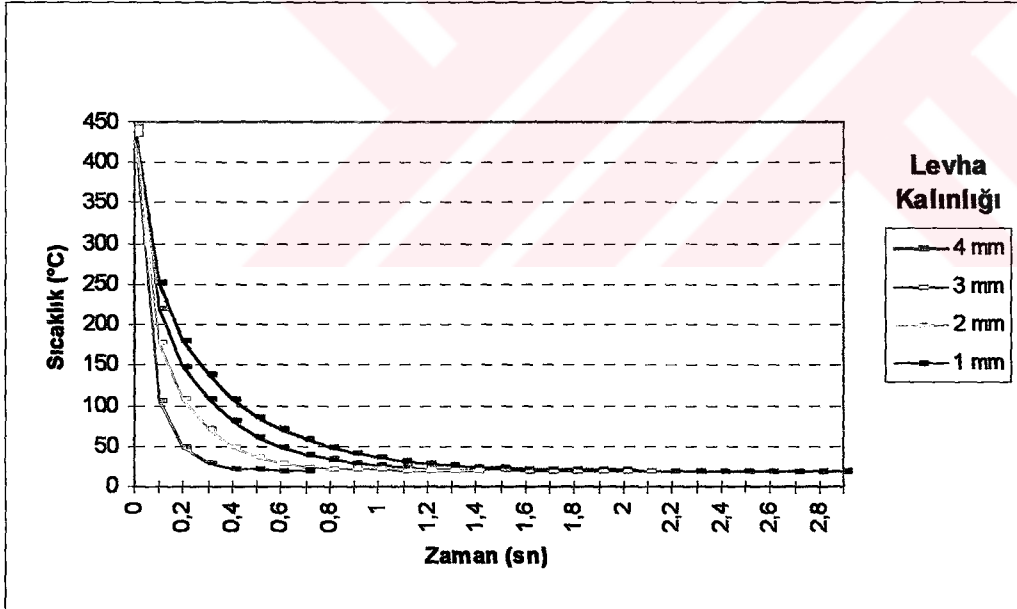
Şekil 5.145. Piriñ-Bakır kompozit levhada 89 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.146. Piriñ-Bakır kompozit levhada 4 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.147. Piriñ-Bakır kompozit levhada 154 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)



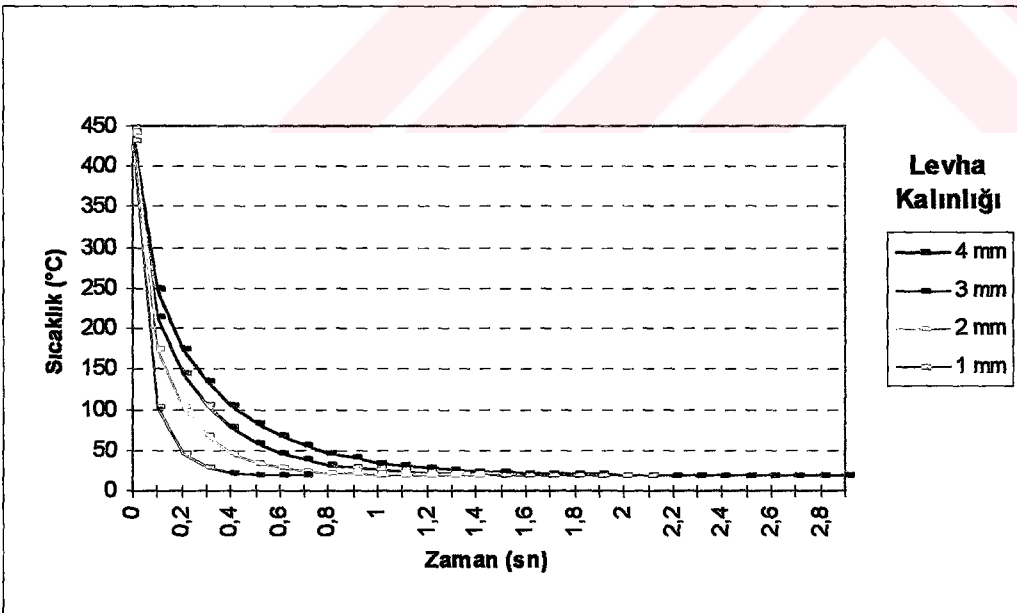
Şekil 5.148. Piriñ-Bakır kompozit levhada 159 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)

5.6.Kompozit Plakalardaki Sıcaklık Dağılımına, Değişen Soğutma Ortamlarının Etkisinin Araştırılması

Bu kısımda, aynı tür malzeme çiftleri kullanılarak soğutma ortamları değiştirilerek sıcaklık dağılımı analiz edilmiştir. Başlangıç levha sıcaklığı 450 °C referans değer olarak alınmış ve havada, suda, yağda ve su püskürtme ile malzemelerin çeşitli düğümlerdeki sıcaklık dağılımı ve soğuma durumu incelenmiştir. Ortam sıcaklığı 20°C kabul edilmiştir. Bölüm 5.5.'de belirtilen düğüm noktalarından sadece iki malzeme arasında ortak olan 157 nolu düğüm dikkate alınarak grafikler çizilmiştir.

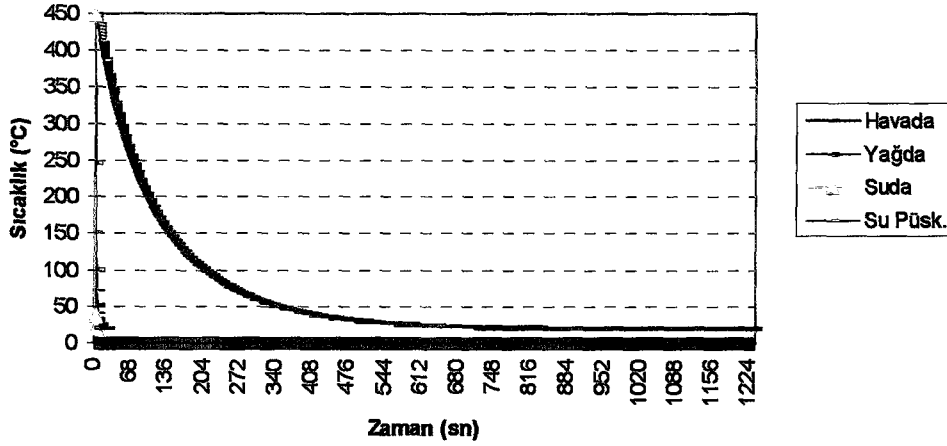
5.6.1.Çelik-Bakır plakanın farklı ortamlarda soğutulması

Çelik-Bakır plakanın soğuma ortamlarına bağlı olarak sıcaklık dağılımını incelemek için değişik kalınlıktaki

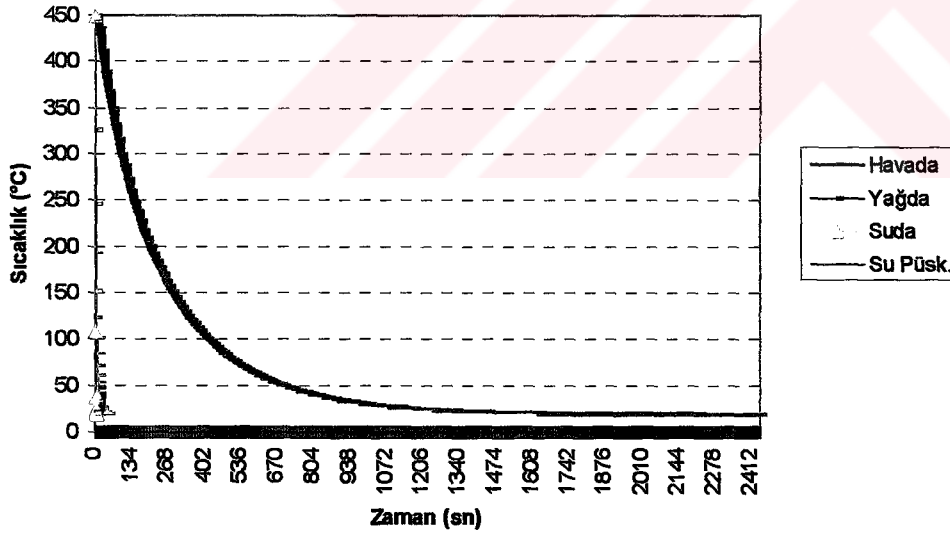


Şekil 5.149. Piring-Bakır kompozit levhada 170 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Ortam: Su püskürtme)

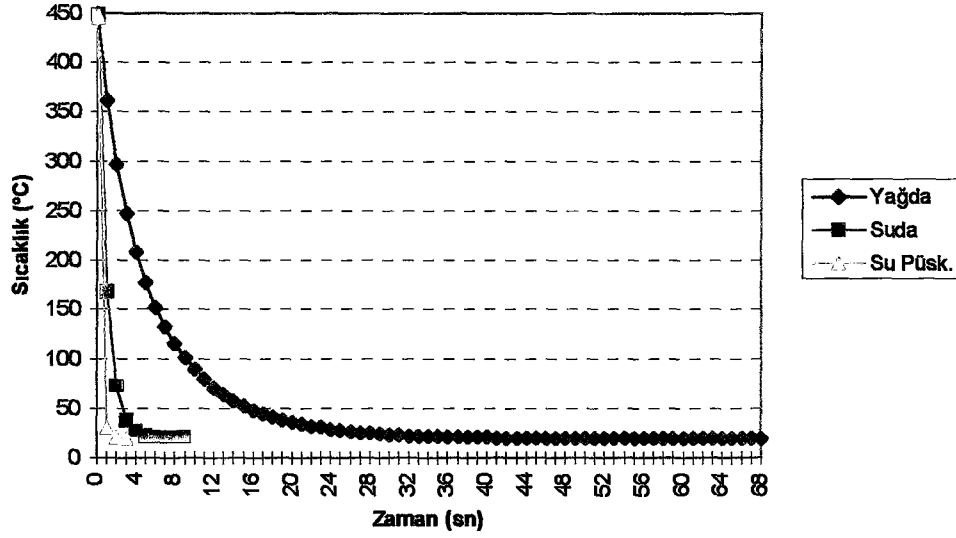
malzemeler için çözümler yapılmıştır. Çözüm sonuçları her kalınlık değeri için ayrı ayrı grafik halinde verilmiştir.



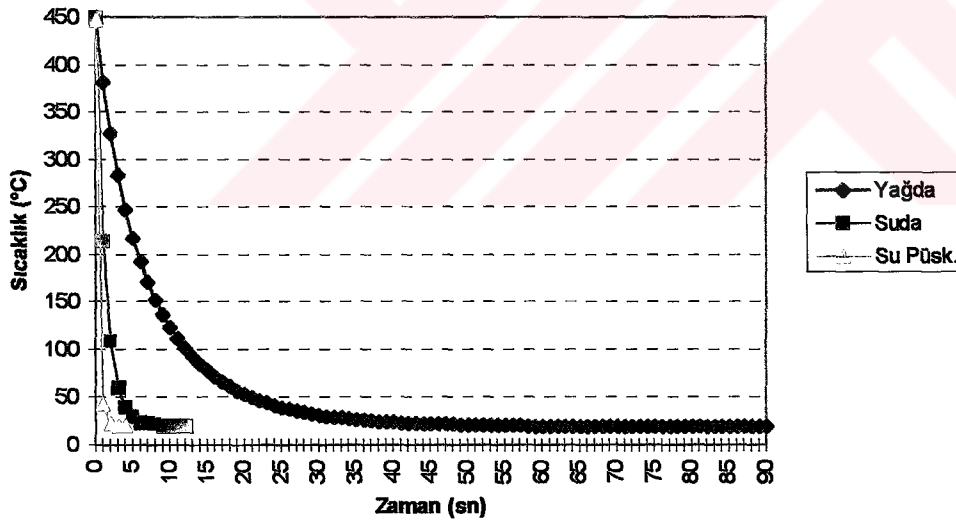
Şekil 5.150. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)



Şekil 5.151. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)



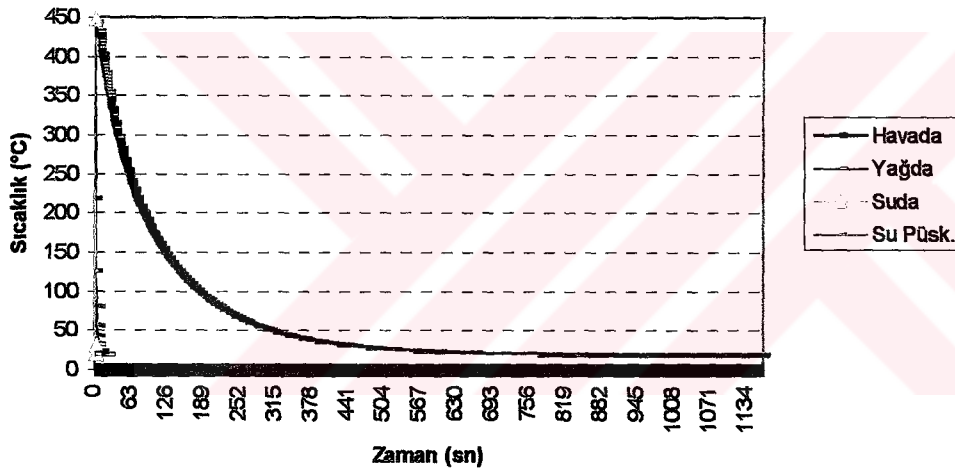
Şekil 5.152. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)



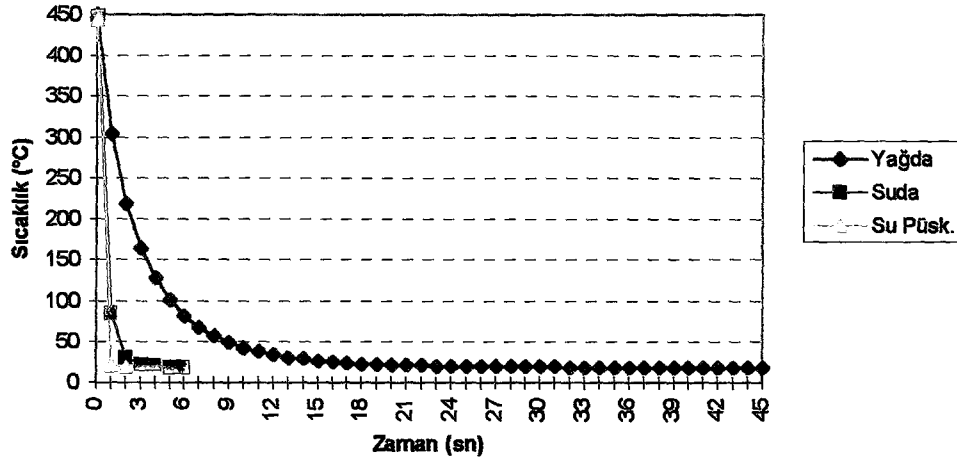
Şekil 5.153. Çelik-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)

5.6.2.Çelik-Aluminyum plakanın farklı ortamlarda soğutulması

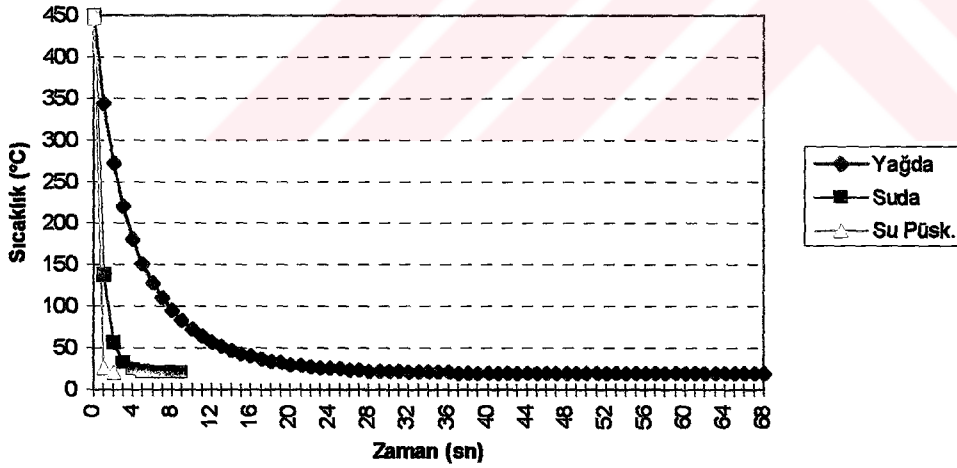
Çelik-Aluminyum plakanın soğuma ortamlarına bağlı olarak sıcaklık dağılımını incelemek için değişik kalınlıktaki malzemeler için çözümler yapılmıştır. Çözüm sonuçları her kalınlık değeri için ayrı ayrı grafik halinde verilmiştir. (Şekil 5.154., 5.155., 5.156., 5.157)



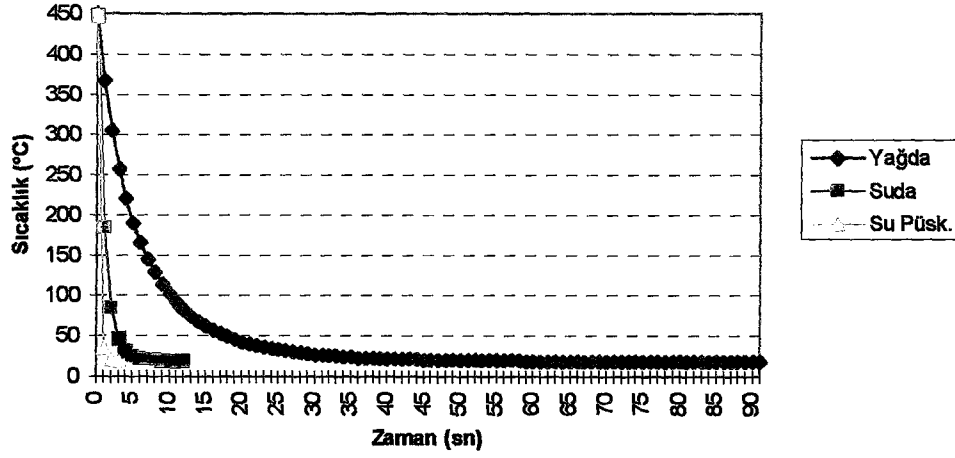
Şekil 5.154.Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)



Şekil 5.155. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)



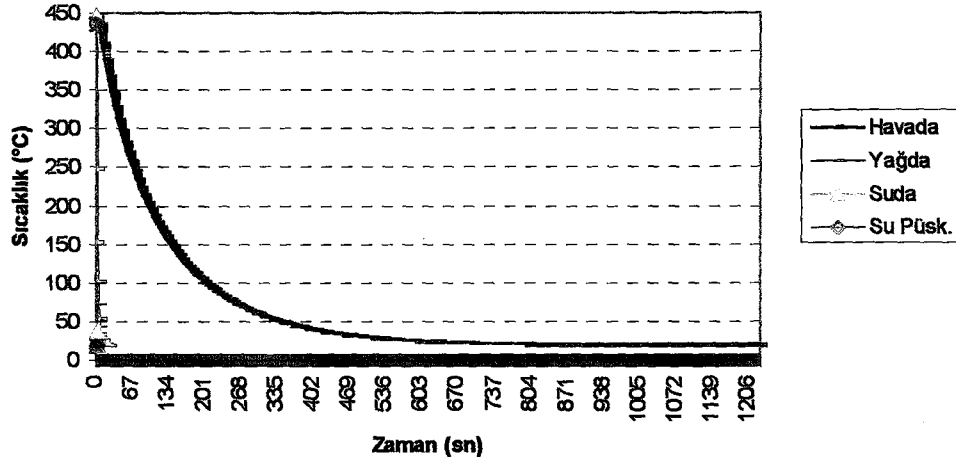
Şekil 5.156. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)



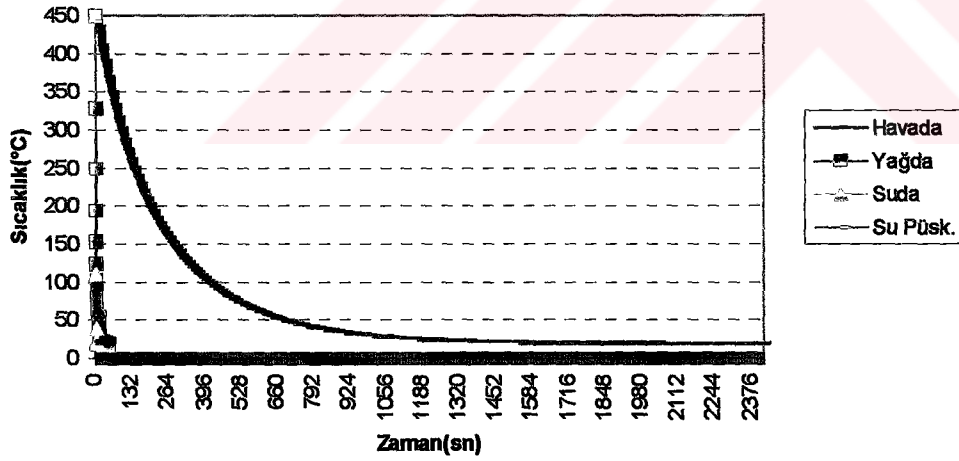
Şekil 5.157. Çelik-Aluminyum kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)

5.6.3.Çelik-Pirinç plakanın farklı ortamlarda soğutulması

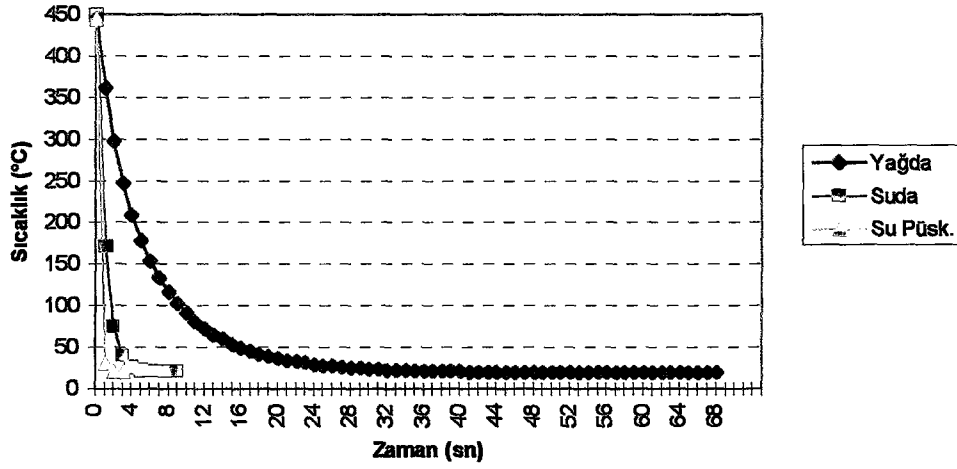
Çelik-Pirinç plakanın soğuma ortamlarına bağlı olarak sıcaklık dağılımını incelemek için değişik kalınlıktaki malzemeler için çözümler yapılmıştır. Çözüm sonuçları her kalınlık değeri için ayrı ayrı grafik halinde verilmiştir. (Şekil 5.158., 5.159., 5.160., 5.161)



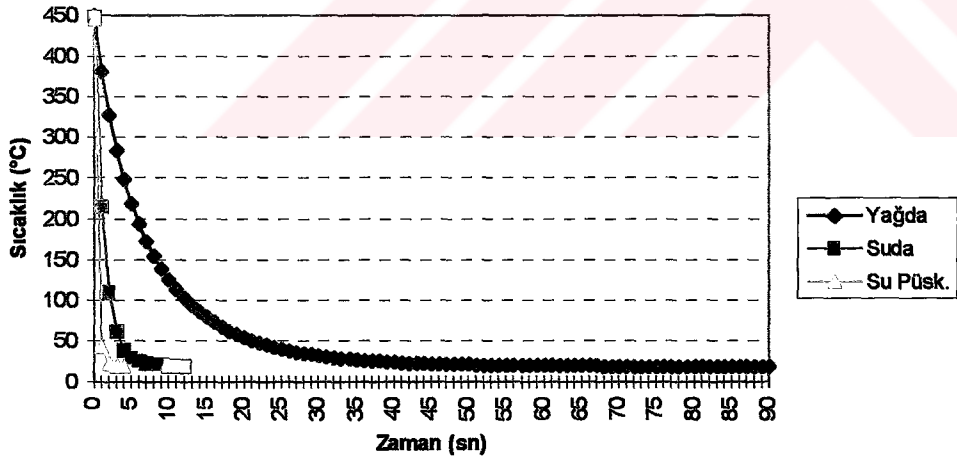
Şekil 5.158.Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)



Şekil 5.159. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)



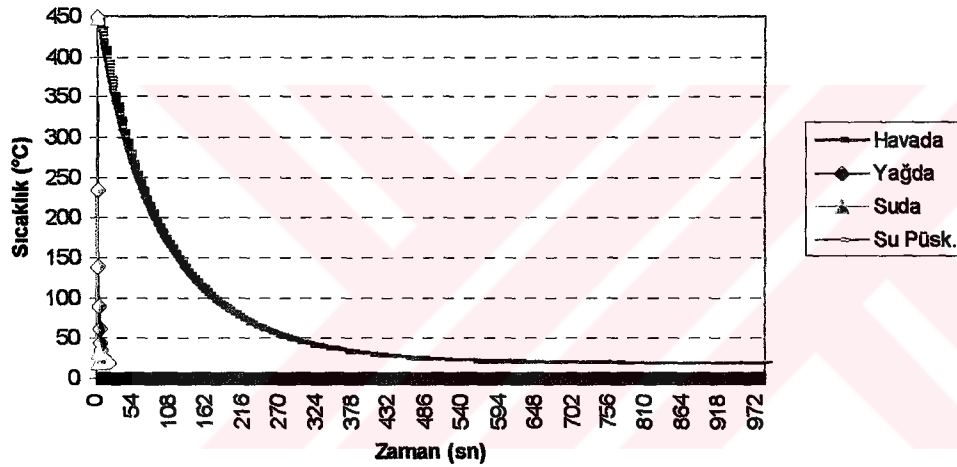
Şekil 5.160. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)



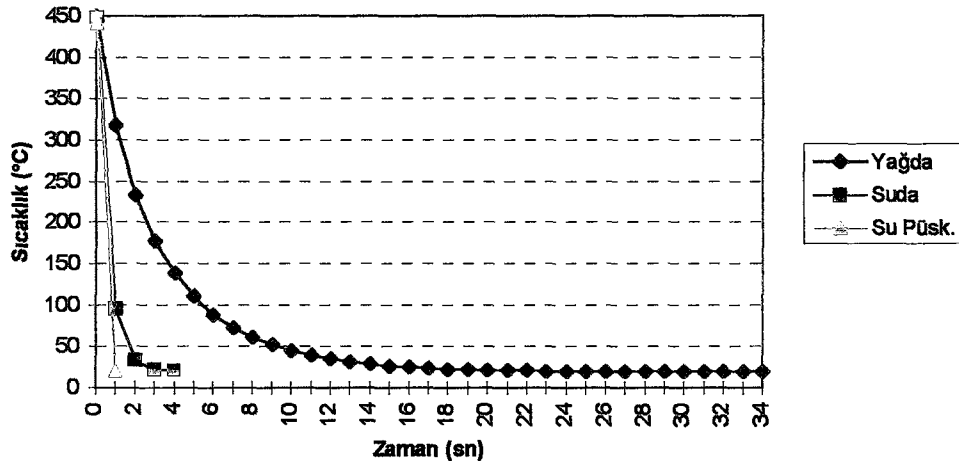
Şekil 5.161. Çelik-Pirinç kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)

5.6.4. Pirinç-Bakır plakanın farklı ortamlarda soğutulması

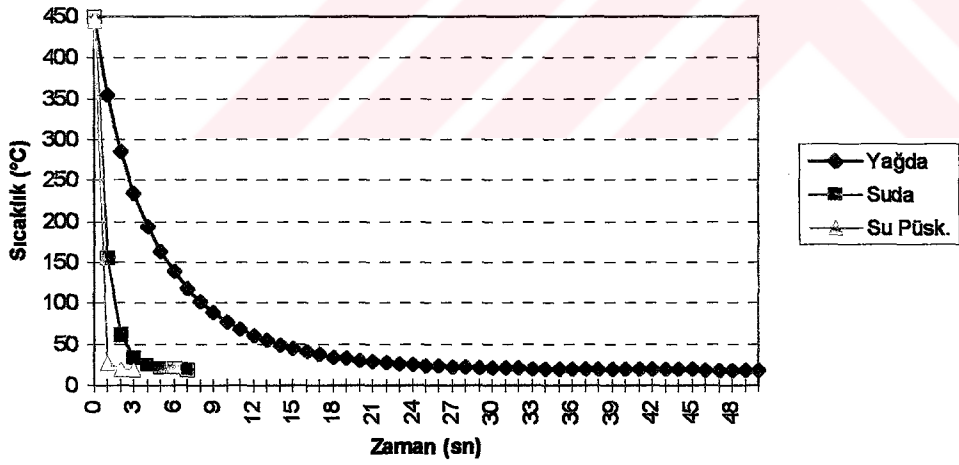
Pirinç-Bakır plakanın soğuma ortamlarına bağlı olarak sıcaklık dağılımını incelemek için değişik kalınlıktaki malzemeler için çözümler yapılmıştır. Çözüm sonuçları her kalınlık değeri için ayrı ayrı grafik halinde verilmiştir. (Şekil 5.162., 5.163., 5.164., 5.165)



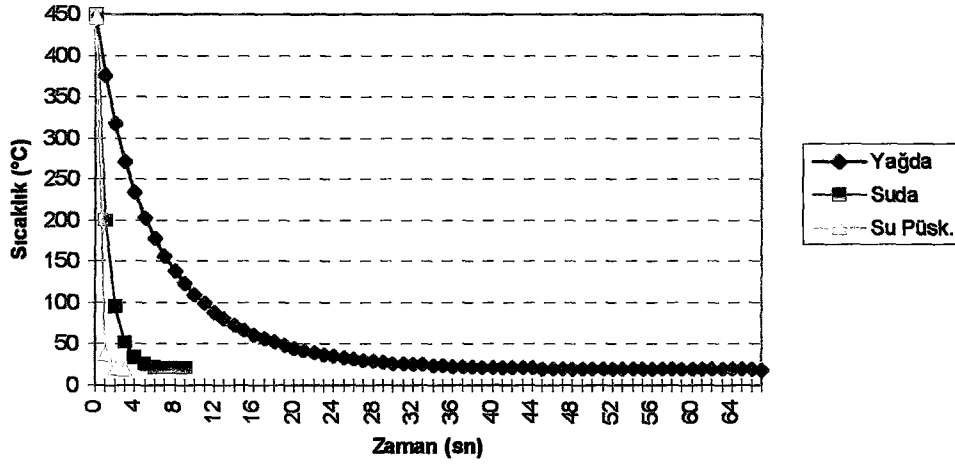
Şekil 5.162. Pirinç-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm)



Şekil 5.163. Piring-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm)



Şekil 5.164. Piring-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm)



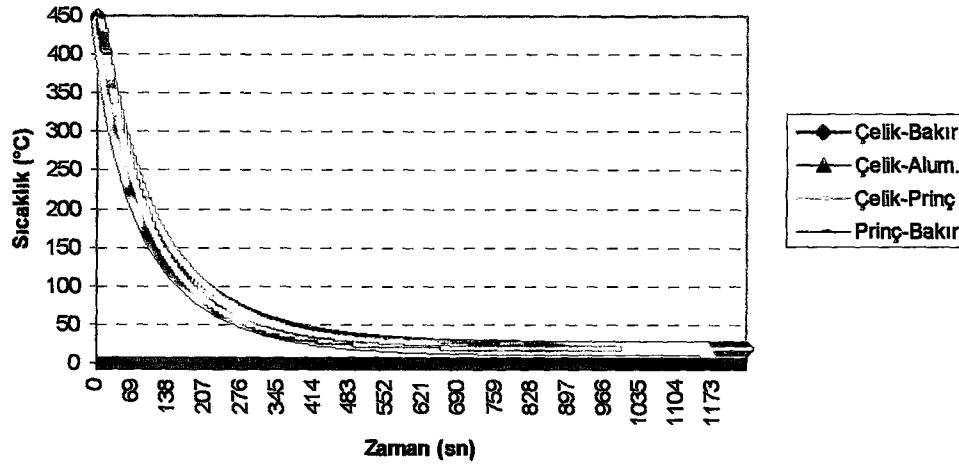
Şekil 5.165. Piring-Bakır kompozit levhada farklı soğutma ortamlarında kritik düğümde (157 nolu düğüm) sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm)

5.7. Kompozit Plakalardaki Sıcaklık Dağılımının Malzeme Cinsi İle Değişimi

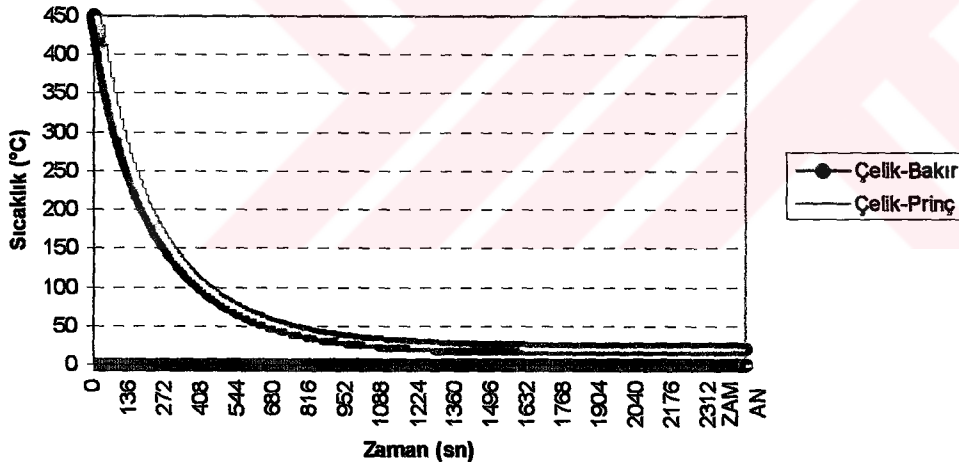
Sıcaklık dağılımının, malzemenin değiştirilmesi ile nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla farklı malzemeler için sayısal çözümler yapılmıştır. Çözümlerde başlangıç sıcaklığı için 450 °C referans değer olarak alınmış ve ortam sıcaklığı 20°C kabul edilmiştir. Bölüm 5.5’de belirtilen düğüm noktalarından sadece iki malzeme arasında ortak olan 157 nolu düğüm dikkate alınarak grafikler çizilmiştir.

5.7.1. Farklı malzeme çiftlerinin havada soğutulması

Doğal şartlarda havada soğumaya bırakılan farklı malzemelerin sıcaklık dağılımının malzemeye bağlı değişimini görmek için Çelik-Bakır, Çelik-Aluminyum, Çelik-Piring, Piring-Bakır malzeme çiftleri kullanılmıştır. Soğuma grafiklerinden görüldüğü gibi piring-bakır kompozit malzeme en hızlı soğuma hızına sahiptir.



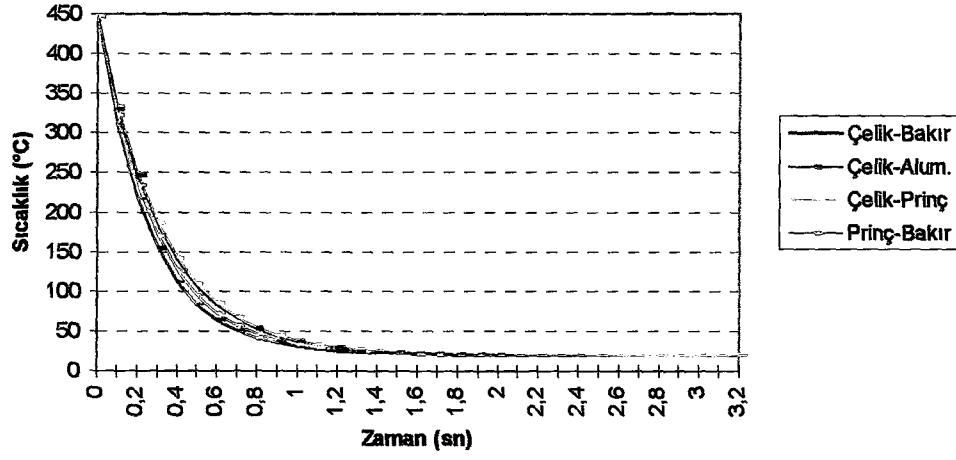
Şekil 5.166. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Hava)



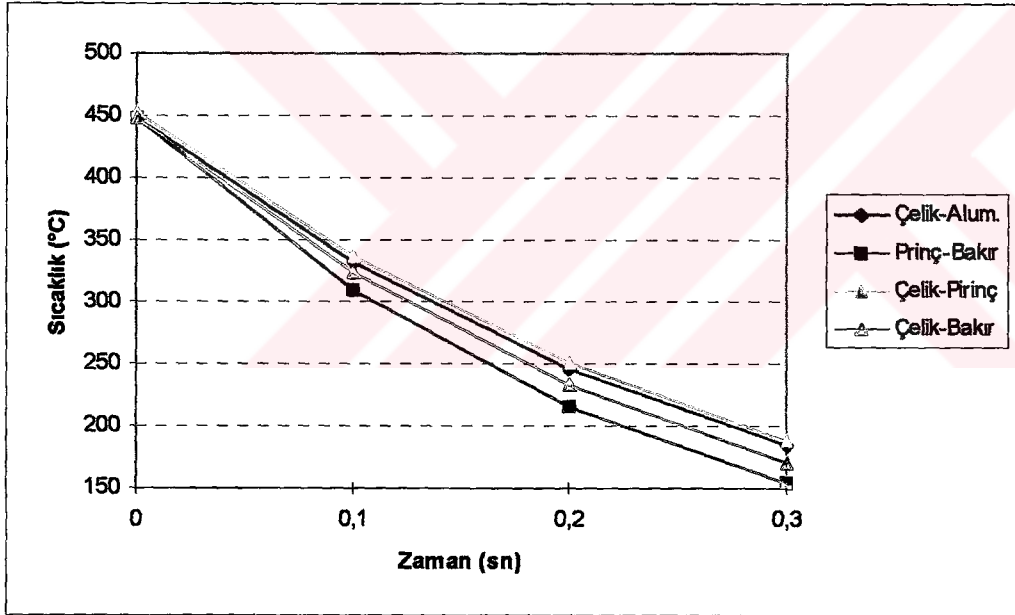
Şekil 5.167. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Hava)

5.7.2. Farklı malzeme çiftlerinin suda soğutulması

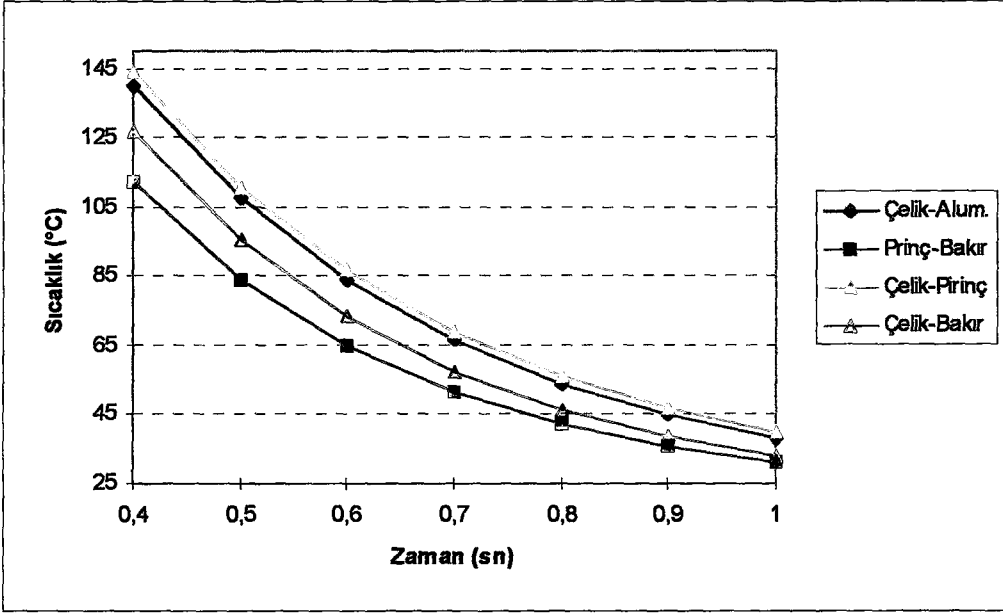
Suda soğumaya bırakılan farklı malzemelerin sıcaklık dağılımının malzemeye bağlı değişimini görmek için Çelik-Bakır, Çelik-Aluminyum, Çelik-Pirinç, Pirinç-Bakır malzeme çiftleri kullanılmıştır.



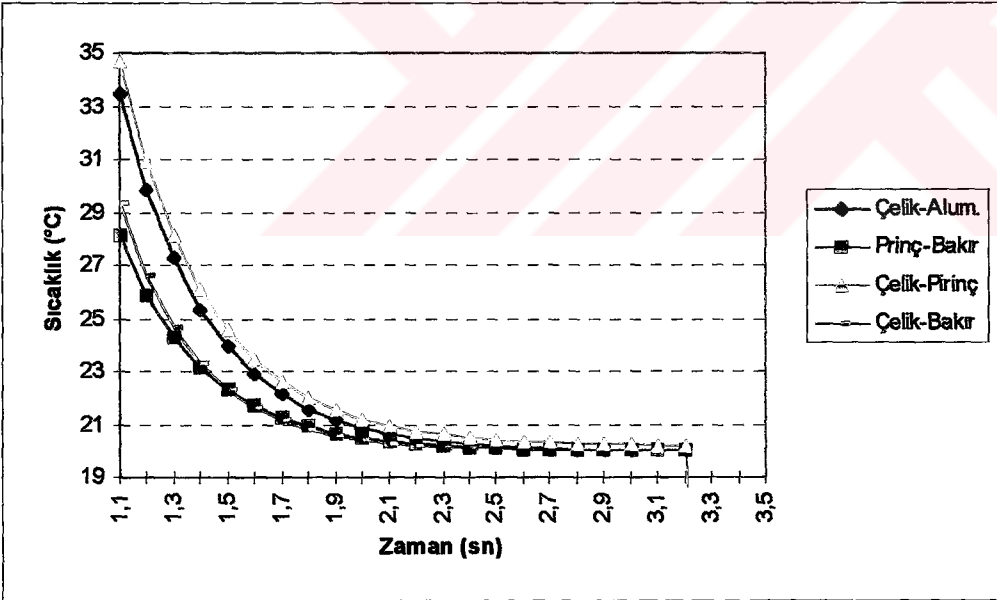
Şekil 5.168. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)



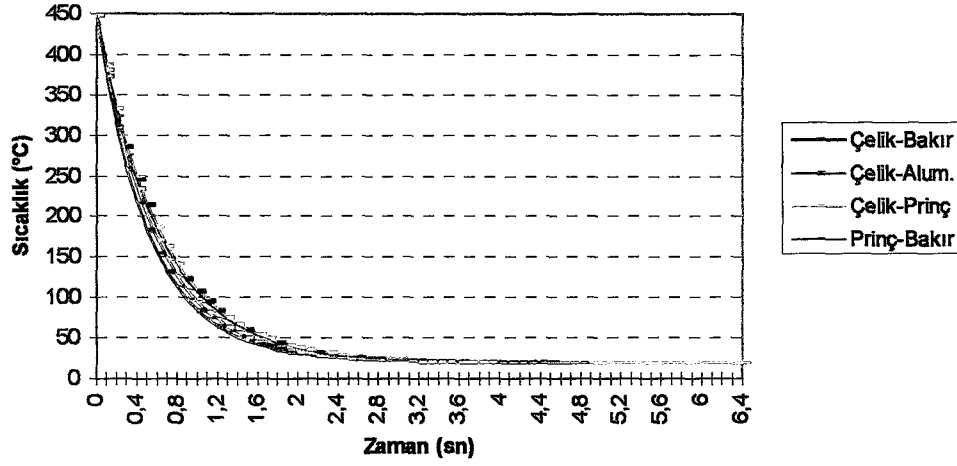
Şekil 5.169. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 0-0.3sn aralığı)



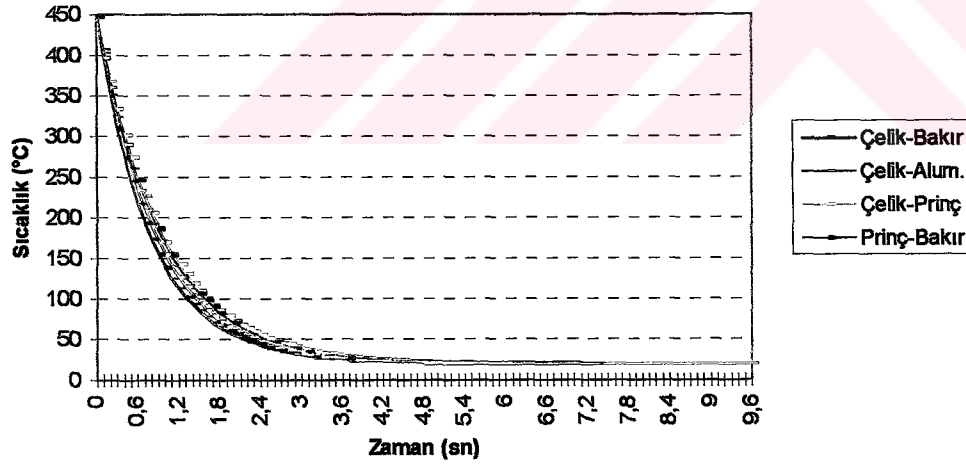
Şekil 5.170. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 0.4-1.0 sn aralığı)



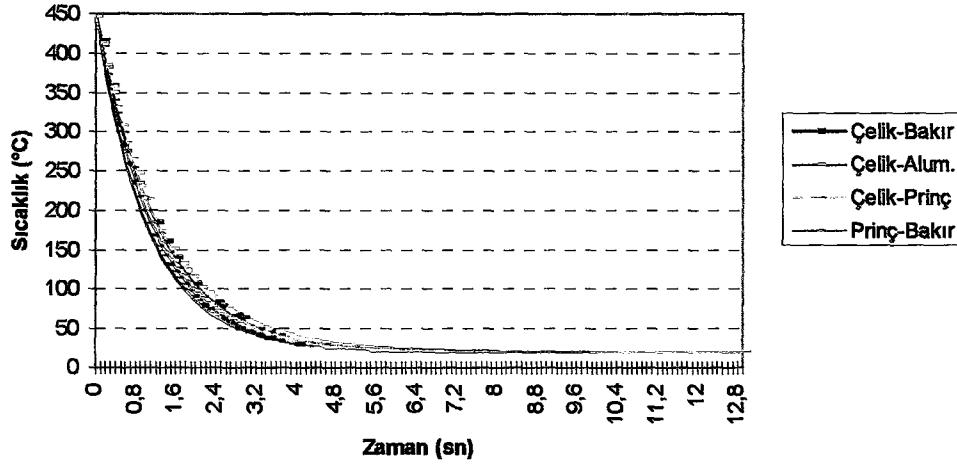
Şekil 5.171. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Durgun su) (Şekil 5.168'in küçük zaman aralıklarındaki durumu, 1.1-3.5 sn aralığı)



Şekil 5.172. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)



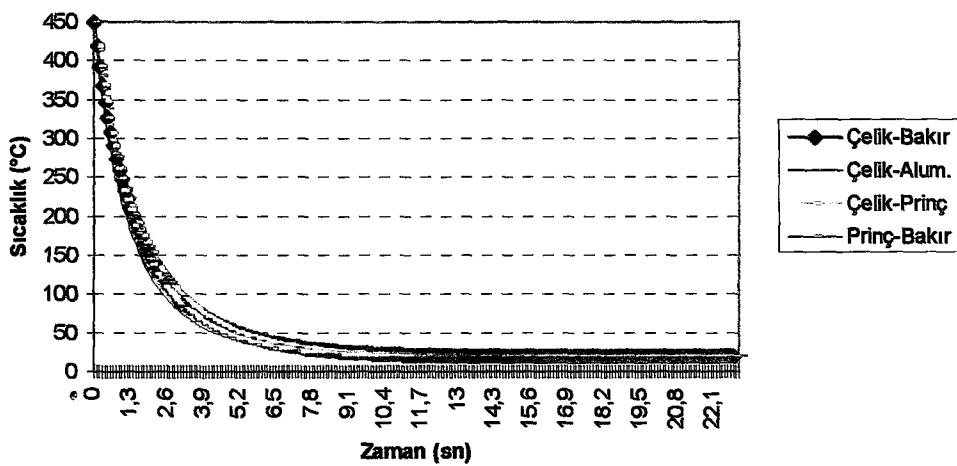
Şekil 5.173. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)



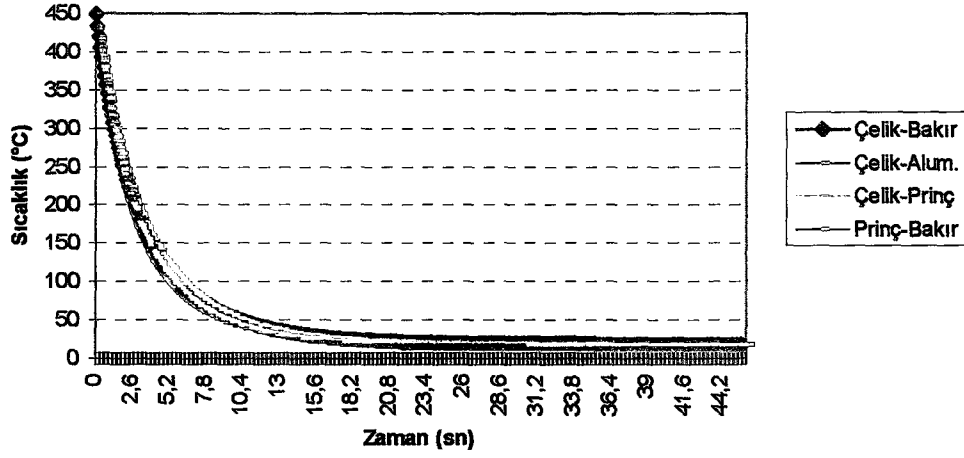
Şekil 5.174. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)

5.7.3.Farklı malzeme çiftlerinin yağda soğutulması

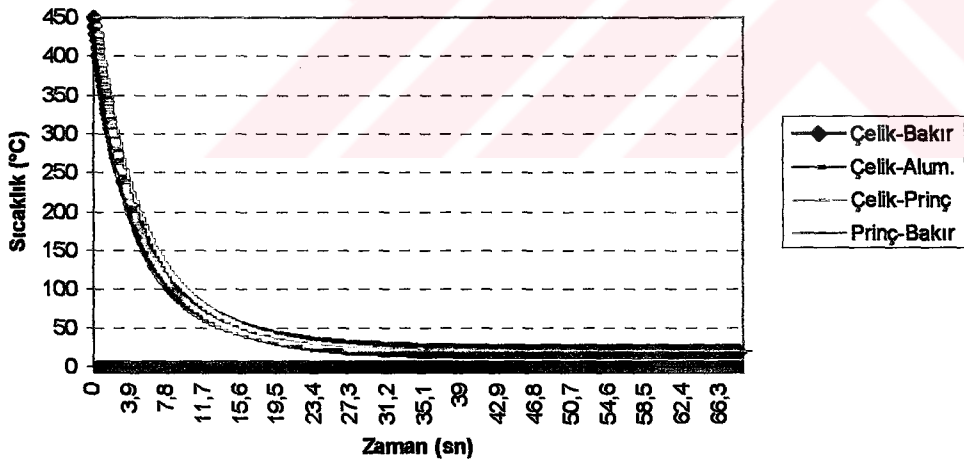
Yağda soğumaya bırakılan farklı malzemelerin sıcaklık dağılımının malzemeye bağlı değişimini görmek için Çelik-Bakır, Çelik-Aluminyum, Çelik-Pirinç, Pirinç-Bakır malzeme çiftleri kullanılmıştır.



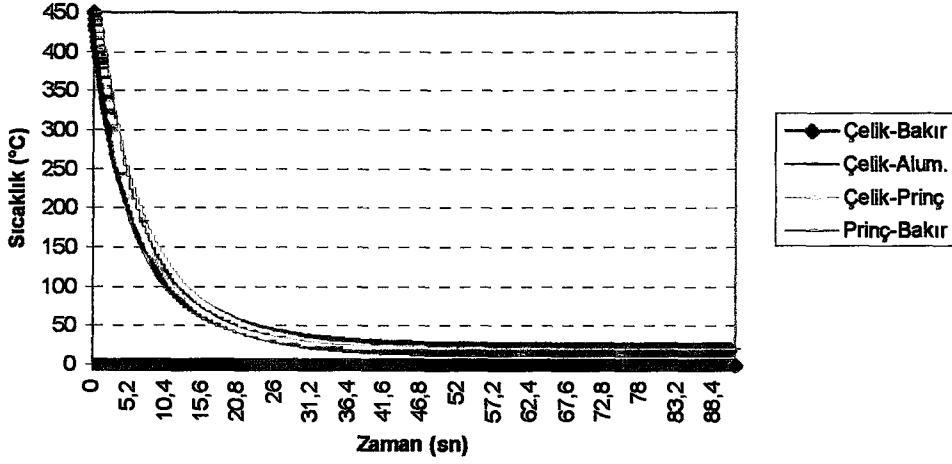
Şekil 5.175. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Yağ)



Şekil 5.176. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 2mm, Soğutma Ortamı: Yağ)



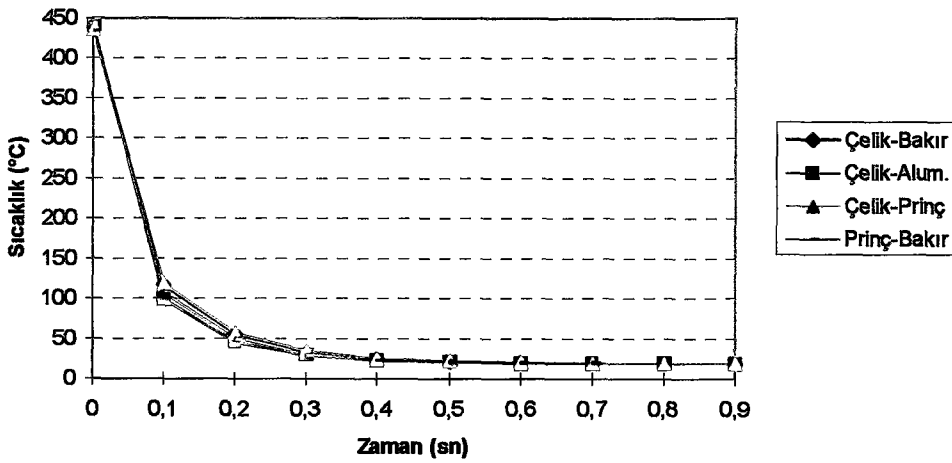
Şekil 5.177. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı: Yağ)



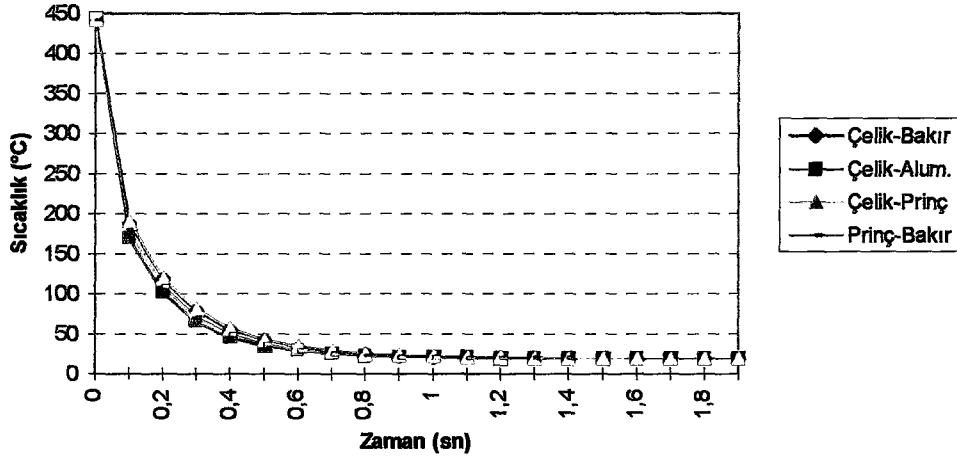
Şekil 5.178. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 4mm, Soğutma Ortamı: Yağ)

5.7.4.Farklı malzeme çiftlerinin su püskürtme ile soğutulması

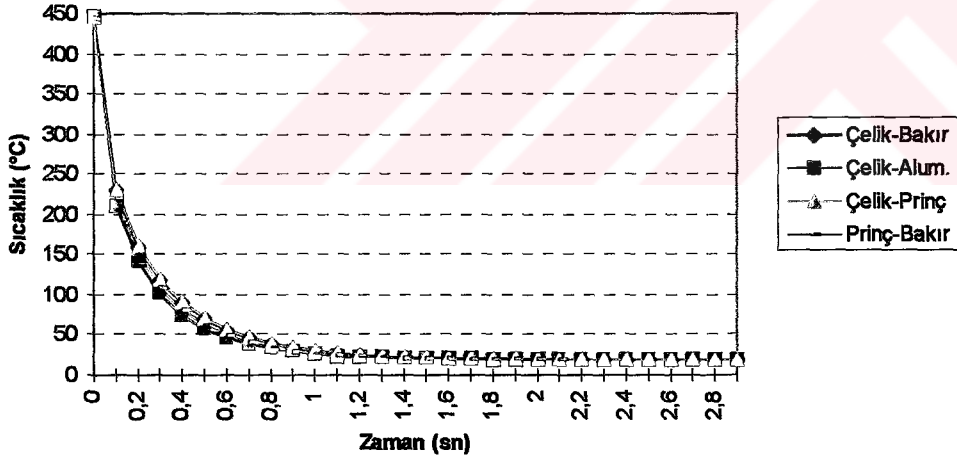
Su püskürtme ile soğutulan farklı malzemelerin sıcaklık dağılımının malzemeye bağlı değişimini görmek için Çelik-Bakır, Çelik-Aluminyum, Çelik-Pirinç, Pirinç-Bakır malzeme çiftleri kullanılmıştır.



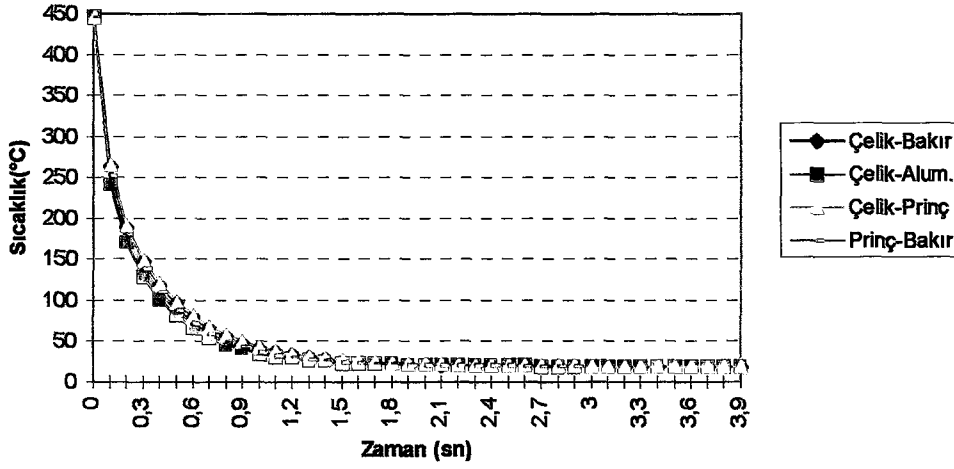
Şekil 5.179. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı: Su püskürt.)



Şekil 5.180. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:2mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)



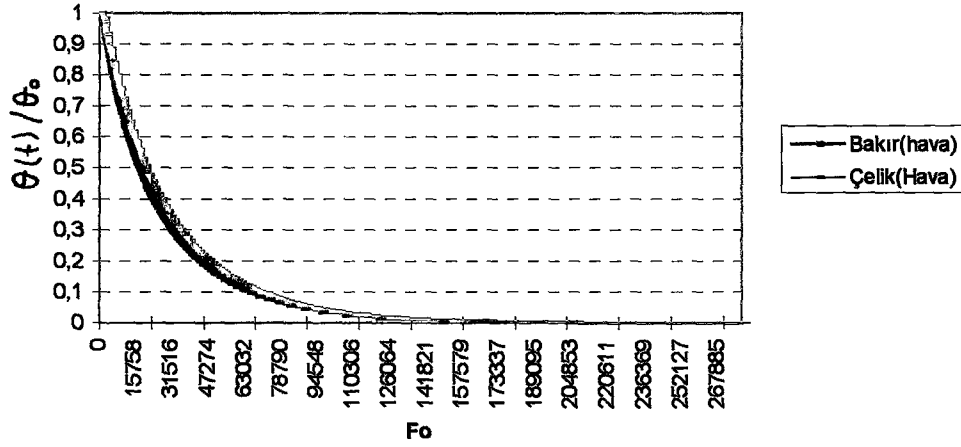
Şekil 5.181. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:3mm,Soğutma Ortamı:Su püskürt.)



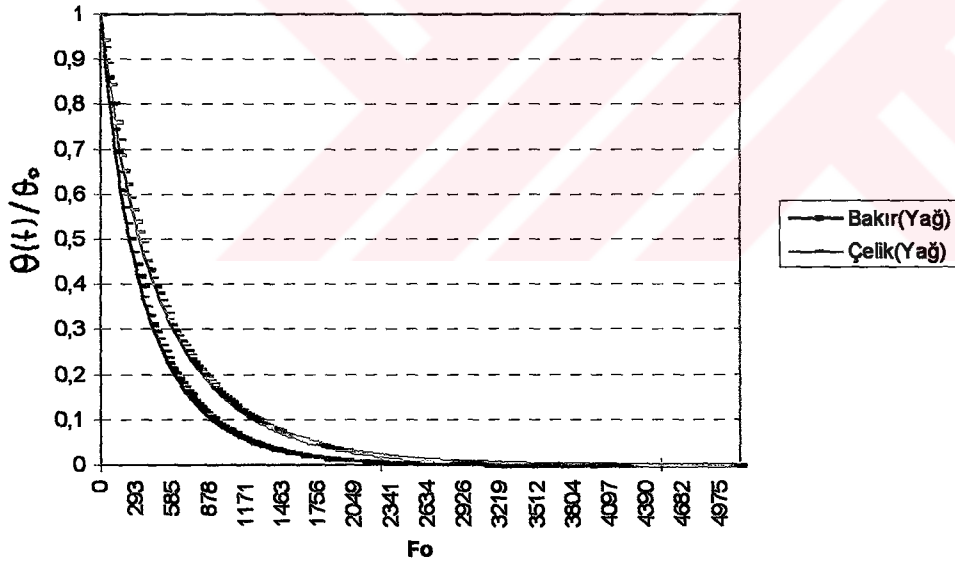
Şekil 5.182. Kompozit levhada 157 nolu kritik düğümde sıcaklık dağılımı (Kalınlık:4mm, Soğutma Ortamı:Su püskürt.)

5.8. Boyutsuz Sıcaklık ve Fourier Sayısı

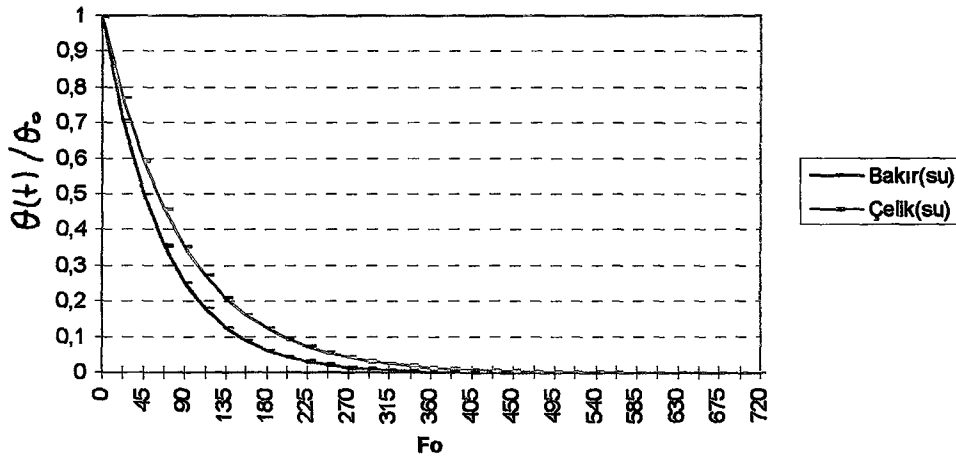
Sıcaklık dağılımı ile ilgili veriler alınarak boyutsuz sayılarla ilgili olarak $\frac{\theta(t)}{\theta_0}$ ile Fo sayısı arasındaki değişimi gösteren Şekil 5.183, 5.184, 5.185, 5.186'de verilen grafikler elde edilmiştir.



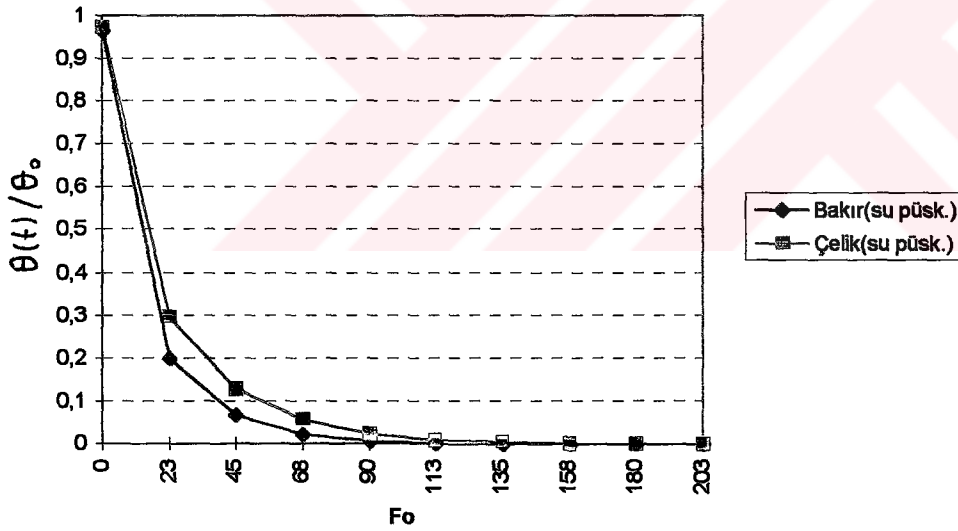
Şekil 5.183. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Hava)



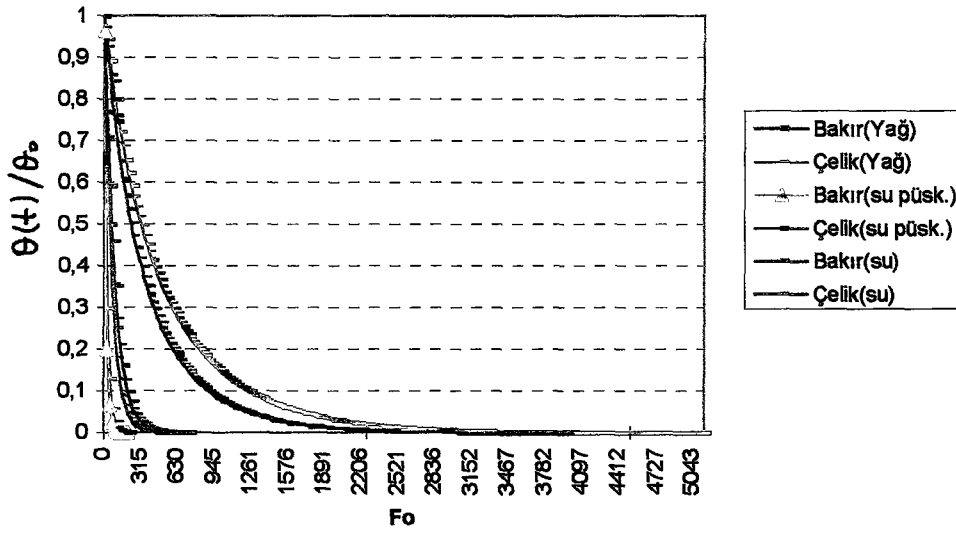
Şekil 5.184. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Yağ)



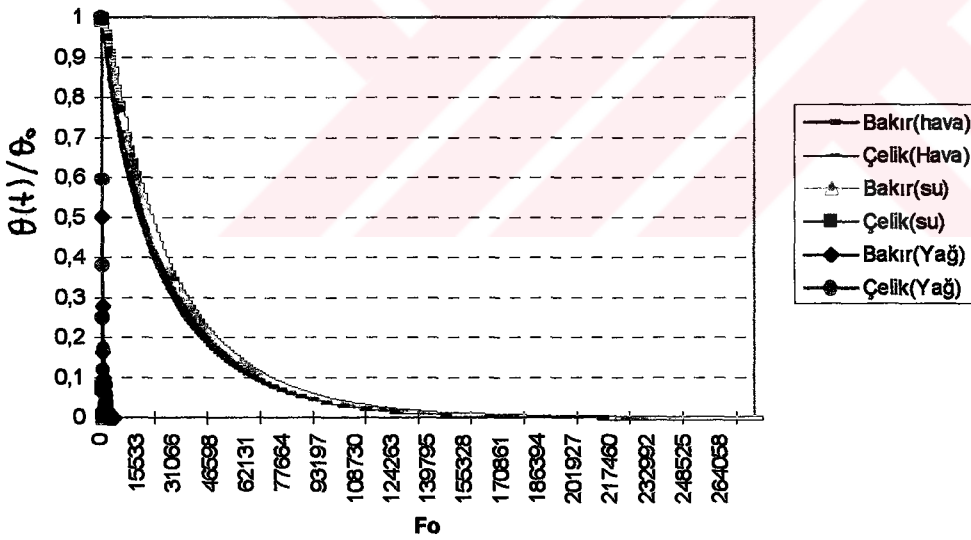
Şekil 5.185. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Su)



Şekil 5.186. Kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm, Ortam: Su püskürtme)



Şekil 5.187. Çeşitli ortamlar için kompozit levhada boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm)



Şekil 5.188. Çeşitli Ortamlar İçin Kompozit Levhada Boyutsuz sıcaklığın Fourier sayısı ile değişimi. (258, 13 nolu düğümler, Kalınlık: 1mm)

6.DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1.Giriş

Önceki bölümlerde incelenen teorik problemin elde edilen sonuçlarının doğruluğunu saptamak amacıyla deneysel çalışmalar gerçekleştirildi. Deneysel çalışmalar, yapılan çalışmayı destekleyecek ve sonuçların irdelenmesini kolaylaştıracaktır. Bu amaçla Şekil 4.1. de görülen ve ölçüleri verilen farklı kalınlıktaki kompozit plaka çiftleri ile soğutma deneyleri yapılmıştır. Deneyde, sıcakları belirleyen ısı çiftleri ve verileri bilgisayar ortamına aktaran Data Logger cihazı kullanılmıştır.

6.2.Data Logger ve Özelliği

Bu çalışmada kullanılan Data Logger P.A.Hilton firmasınca üretilen 43 kanallı bir bilgisayar arabirimi yazılım ve donanımından oluşmaktadır. Arabirim (Data Logger) düşük frekanslı gerçek fiziki parametrelerin kontrol ve görüntülenmesini sağlamaktadır. Tek bilgisayara üç arabirimle bağlanarak, 129 kanal kullanılabilir. Bilgisayara RS232 seri portu ile bağlanan arabirim, 9600 baudda çalışır. Bu kanallardan 15 kanal değişik DC milivolt girişi (± 80 mv DC 'ye kadar) kontrol edilebilir. T veya K tipi ısı çifti yardımıyla doğrudan sıcaklık ölçme için kullanılabilir.

Yazılım Özelliği :

-Kanal seçimi ve parametreler istenilen biçimde kalibre edilebilmektedir.

-Bilgiyi grafik veya nümerik formda ekranda göstermek, kaydetmek ve kağıda çıktı vermektedir.

-İletişim sistem konfigürasyonunu diske kaydeder ve istenildiğinde kullanıma açmak üzere kütüphane oluşturur.

-Herhangi bir giriş kanalı üzerindeki bilgiyle kullanıcının set şartlarına göre çıkış kanallarını kontrol edebilmektedir.

6.3. Deney Düzeneği ve Deneylerin Yapılışı

Değişik malzemelerden meydana gelen kompozit plakaların 13, 89, 198 ve 258 nolu düğümlerinin sıcaklıklarını ölçmek için belirtilen noktalara ısı çiftleri yerleştirildi. Isı çiftlerinin diğer uçları Data Logger cihazının ilgili kanalına bağlandı. Bu durumdaki kompozit plaka hazırlanan sehpa dik olarak yerleştirildi. Uygun bir fırın kullanılarak ısıtılan örnekler durgun havaya ve durgun suya daldırılarak soğutma işlemleri yapıldı. Kurulan sistem bir bilgisayara bağlı olup ve her bir nokta için saniyede bir veri göndermektedir. Plakada belirlenen sıcaklığa ulaşıncaya kadar fırından çıkarılıp, soğumaya bırakıldı. Plakalar ortam ile ısı dengeye gelinceye kadar sıcaklıklar bir saniye aralıklarla kaydedildi. Deney düzeneği Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

6.4. Teorik ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

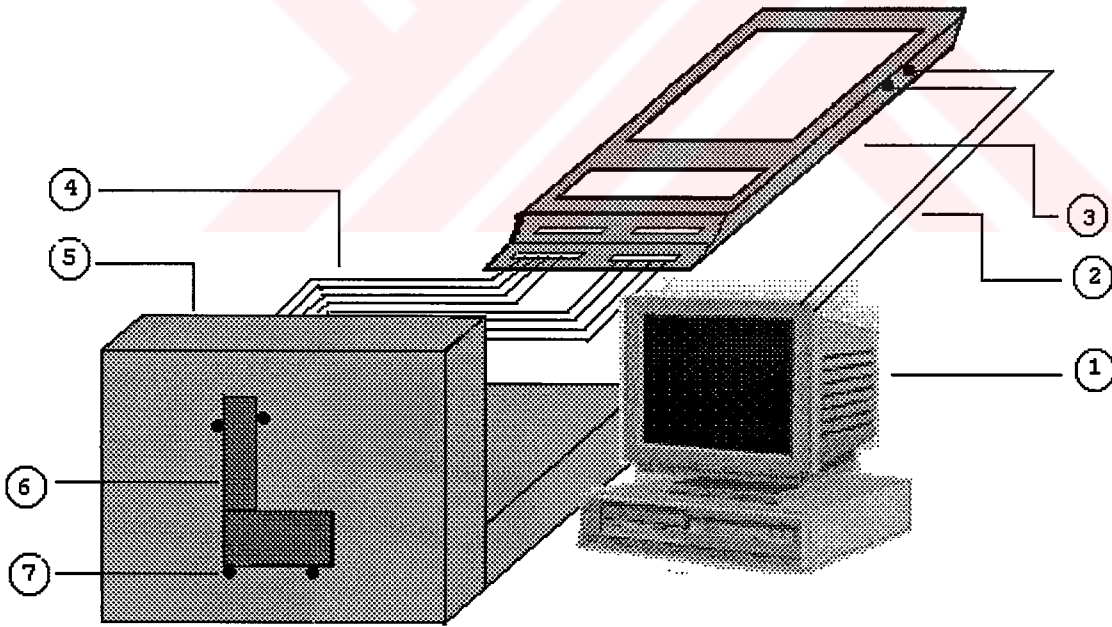
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal çözüm sonuçları ile deneysel sonuçlar Şekil 6.2, 6.3 ve 6.4'de verilmiştir. Kompozit malzemedeki birinci ve ikinci levhaya ait kritik düğümlerden özellikle 13, 89, 192 ve 258 nolu düğümler dikkate alınarak inceleme yapılmıştır.

Şekil 6.2, 1mm kalınlığında çelik-bakır kompozit levhanın havada soğutulmasına ait teorik ve deneysel

sonuçları göstermektedir. 50-100. saniye aralığında soğuma eğrisi Şekil 6.3'de görülmektedir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında eğri boyunca belli bir aralıkta max 15°C'lik bir fark görülmektedir. Bu aralık dışında değerler birbirine daha da yakındır.

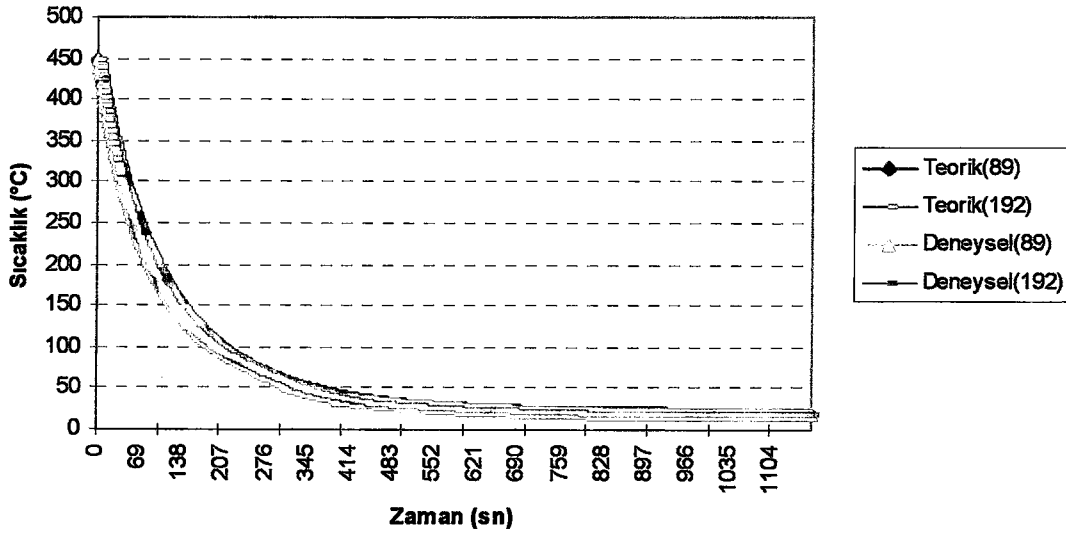
Şekil 6.5'de ise 3mm kalınlığında çelik-bakır kompozit levhanın durgun suya daldırılmasına ilişkin teorik ve deneysel sonuçları verilmektedir. Şekilden görüleceği gibi dördüncü saniyeden sonra deneysel ve teorik sonuçlar iyi uyum göstermektedir. İlk iki saniyede görülen büyük fark, levhanın fırından alınıp suya daldırılma gecikmesinden kaynaklanmıştır. 2-4. Saniye aralığı ise bir geçiş bölümüdür.

Teorik ve deneysel sonuçların birbirine yakın oluşu, kullanılan sayısal çözüm yönteminin doğruluğu ve güvenilirliği açısından önemlidir.

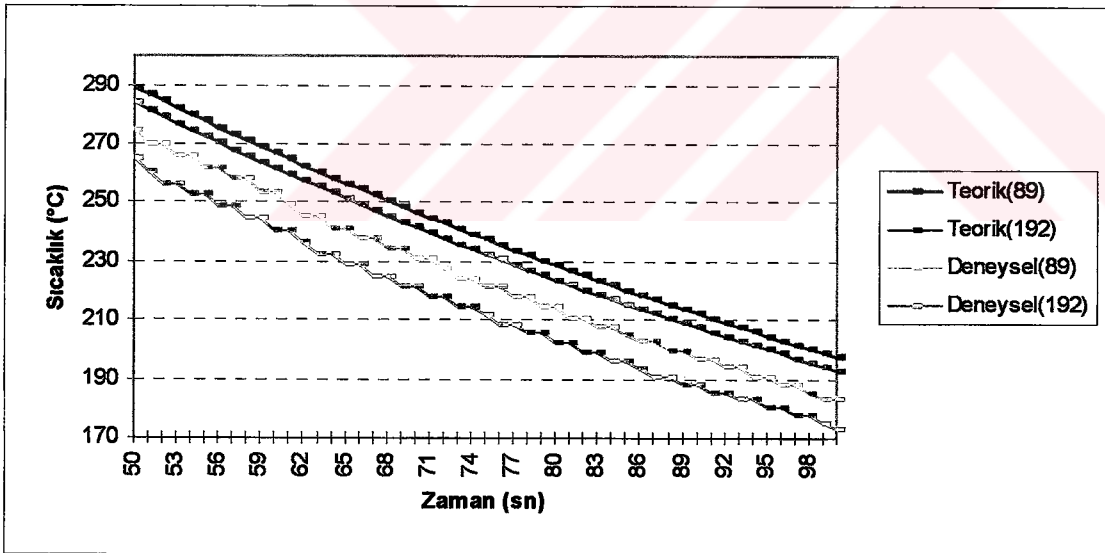


- | | |
|----------------|--------------------|
| 1-Bilgisayar | 5-Sehpa |
| 2-Arabirim | 6-Numune |
| 3-Data Logger | 7-Tutucu elemanlar |
| 4-Isıl çiftler | |

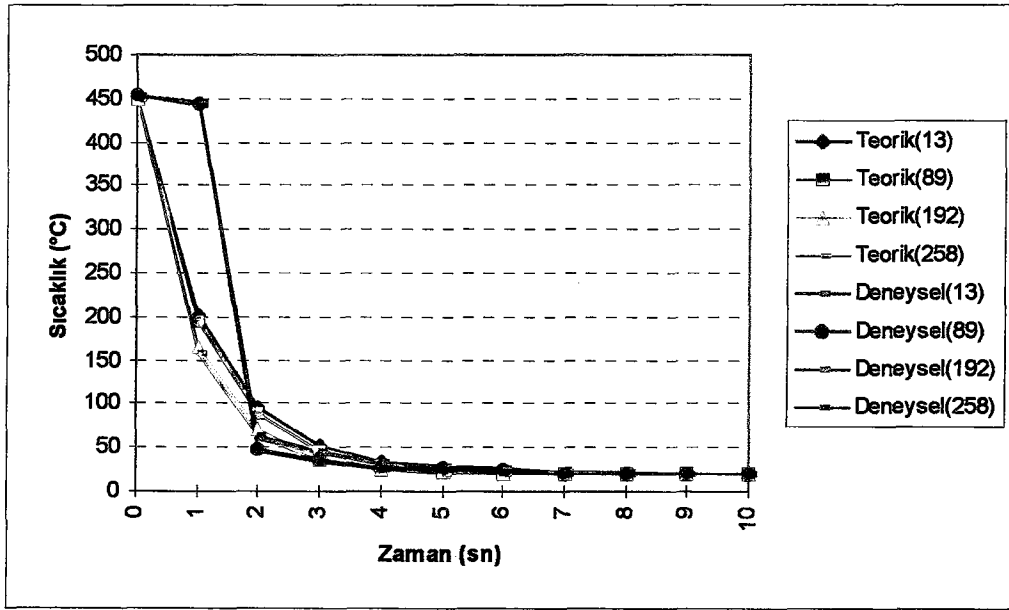
Şekil 6.1. Deney düzeneği.



Şekil 6.2.Çelik-Bakır kompozit levhada kritik düğümlerde deneysel ve teorik olarak bulunan sıcaklık dağılımının karşılaştırılması. (Kalınlık:1mm, Soğutma Ortamı:Durgun Hava)



Şekil 6.4.Çelik-Bakır Kompozit Levhada Kritik Düğümlerde Deneysel ve Teorik Olarak Bulunan Sıcaklık Dağılımının 50-100. Saniye Aralığında Karşılaştırılması. (Kalınlık: 1mm, Soğutma Ortamı:Hava)



Şekil 6.5.Çelik-Bakır Kompozit Levhada Kritik Düzgümlerde Deneysel ve Teorik Olarak Bulunan Sıcaklık Dağılımının Karşılaştırılması. (Kalınlık: 3mm, Soğutma Ortamı:Durgun su)

7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

a)Yapılan bu araştırma ile, izotropik kompozit levhayı oluşturan malzeme çiftleri arasında, malzemelerin farklı ısı özelliklerine sahip olmaları nedeni ile, başlangıçtan bir müddet sonra yüksek sıcaklık farkları meydana geldiği tesbit edilmiştir. Şekil 5.6, 5.11, 5.20 ve 5.29'daki grafikler incelendiğinde, soğutma ortamlarının bu sıcaklık farklarını doğrudan etkilediği görülmektedir.

b)Farklı soğutma ortamlarının, malzemenin soğuma zamanına etkili olacağı beklenen bir sonuçtur. Ancak soğumalarda ani düşüşlerin meydana çıkmadığı görülmüş ve lineere yakın bir sıcaklık dağılımının bulunduğu tesbit edilmiştir. Şekil 5.7, 5.12, 5.21, 5.30'daki grafiklerden bu durum açıkça görülmektedir.

c)Malzeme kalınlığının, soğumada önemli bir faktör olduğu görülmüştür. Kalınlığın hava, su ve su püskürtme ortamında, malzemenin soğumasında %90-%100 oranında etkili olduğu tesbit edilmiştir. Şekil 5.38, 5.54, 5.62'de kalınlığın etkisi görülebilir. Yağda ortamında kalınlık faktörünün soğuma üzerindeki etkisi %50-%60 civarında olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.54).

d)Kompozit malzemenin değişik soğutma ortamlarındaki durumu Şekil 5.150, 5.151, 5.152, 5.153'de görülmektedir. Hava ortamında soğumanın uzun zaman dilimi nedeniyle diğer ortamlardaki soğuma grafiği y-eksenine bitişik durumdadır (Şekil 5.150, 5.151). Havada soğuma, 3mm ve 4mm kalınlık için grafiğe alınmadığından, diğer ortamlardaki soğuma eğrileri Şekil 5.153 ve 5.154'de daha net okunmaktadır. Bu grafiklerde, malzeme kalınlığının ve soğutma ortamlarının soğumaya etkisi açıkça görülmektedir.

e)Kompozit malzemede, malzeme cinsi ve kalınlığının levhalardaki sıcaklık farkını doğrudan etkilediği görölmüştür.

f)Kompozit plakada levhaların birleşme noktalarında sıcaklık değişiminin ani değil, lineer olduğu, yani bir geçiş bölgesinin bulunduğu ve levhaların ısııl yönden birbirlerinden etkilendiği anlaşılmıştır. Malzemelerin birleşme yerlerindeki bu geçiş bölgesi, gerilme yönünden önem taşımaktadır.

g) İzotropik kompozit malzemeyi oluşturan farklı levhaların birleşme noktasından itibaren belirli bir mesafeden anlık bir zaman için düğümlerde sıcaklığın değişmediği görölmüştür. Bu sonuç, kompozit malzemelerin ısıı transferi ve sıcaklık dağılımı açısından belirli bir mesafeye kadar birbirini etkilediği, belirli mesafeden sonra ise, her malzemenin kendi ısııl özelliklerine göre davranarak soğuduğunu göstermektedir.

İzotropik kompozit malzemelerin ısııl yönden birbirini etkileme mesafesi birçok parametreye bağlı olarak değişmekte ise de, bu çalışma sırasında aşığıdaki mesafelerde kalmıştır.

Malzeme	Birleşme noktasından itibaren uzaklık
Çelik	27.0 mm
Pirinç	30.5 mm
Bakır	35.0 mm
Aluminyum	33.0 mm

h) Bu çalışmada örnek olarak ele alınan "L" tipi kompozit malzeme çiftinde, malzeme ve soğutma ortamının cinsine göre, malzemelerin ısııl yönden birbirini etkilemediği kabul edilen mesafelerde bulunan düğüm noktaları arasındaki sıcaklık farkı en fazla 44°C civarında olmuştur. Bu fark çelik-bakır malzeme çiftinde meydana

gelmiş olup, diğer malzeme çiftlerinde daha düşük kalmıştır. Bu farkın büyümesi ısı ve mekanik gerilmeleri önemli oranda etkiler. Bu çalışma ile bu tür problemleri görme imkanı elde edildiğinden dizayn aşamasında gerekli önlemler alınarak imalata yön verilir.

i) Bu çalışma ile farklı malzeme çiftlerinin farklı soğutma ortamlarında bulunmaları halinde ne kadarlık bir süre sonunda istenilen sıcaklığa ulaşabilecekleri tesbit edilebilmektedir.

j) Bu çalışmada malzeme çiftleri iki boyutlu ele alınarak farklı soğutma ortamlarında sıcaklık dağılımları zamana bağımlı olarak çözülmüştür. İleriki çalışmalarda problem üç boyutlu çözülerek, malzeme çifti tüm yönleri ile zamana bağımlı olarak incelenebilecek ve malzeme çiftinin çeşitli nokta ve derinliklerindeki sıcaklık dağılımları farklı çalışma şartları için analiz edilebilecektir. Böylece malzemenin iç kısımlarındaki sıcaklık dağılımları araştırılarak, farklı çalışma ortamları için malzemenin davranışı tesbit edilebilecektir.

k) Yapılan teorik ve deneysel çalışma sonuçlarının biribiri ile uyumlu olması, sayısal çözümün doğruluğu ve güvenilirliği açısından önemli bir sonuç olarak görülebilir.

l) Gerek sayısal ve gerekse deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, malzeme çiftlerinin ısı ve mekanik özelliklerine göre beklenen sonuçlar doğrultusunda bulgular vermiştir.

m) Bu çalışma izotropik kompozit malzemeler üzerinde yapılmıştır. Bir diğer çalışma anizotropik kompozit malzemeler için yapılabilir.

KAYNAKLAR

- ARPACI, V.S., (1966). **Conduction Heat Transfer**. Addison - Wesley Series in Mechanics and Thermodynamics.
- ARSLAN, N., (1995). "U" Çentikli Düzlem Levhalarda Elasto-Plastik Bölgelerin İncelenmesi ve İç Gerilmelerin Araştırılması, **Doktora Tezi**, F.Ü., Elazığ.
- BATHE, K.J., (1982). **Finite Element Procedures in Engineering Analysis**. Prentice-Hall Inc., U.S.A.
- CARNAHAN, B., LUTHER, H.A. and WILKES, O.J., (1969). **Applied Numerical Methods**. John Wiley and Sons, Inc.
- DAĞSÖZ, A.K. (1990). **Isı Geçişi, Isı Transferi**, İTÜ, Makina Fakültesi.
- ELBASHBESY, E.M.A., Ibrahim, F.N., (1993). Steady free convection flow with variable viscosity and thermal diffusivity along a vertical plate, **Journal of Physics**, Vol.26, No.12, 2137-2143.
- HAN, J.Y., (1977). Berechnung Von Abkühlungs-Umwandlungs-, Schweiss-, Sowie Verformung Selgenspannungen Mit Hilfe Der Methode Der Finiten Elemente, Dissertation Universitaet, Karlsruhe.
- HARRIS, S.D., Ingham, D.B., (1996). Transient free convection from a vertical plate subjected to a change in surface heat flux in porous media, **Fluid Dynamics Research**, Vol.18, No.6, 313-324.
- HOSSAIN, M.A., Takhar, H.S., (1996). Radiation effect on mixed convection along a vertical plate with uniform surface temperature, **Heat and Mass Transfer**, Vol.31, No.4, 243-248.
- HOLMAN, J.P., (1990). **Heat Transfer**, McGraw - Hill, Inc. New York.
- HUEBNER, K.H., (1982). **The Finite Element Method For Engineers**, John Wiley and Sons, Inc., Newyork.

- İLKEN, Z., (1996). **Isı Taşınımı**, Makina Mühendisleri Odası, Y.No:10, İZMİR.
- INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., (1990). **Fundamentals Of Heat And Mass Transfer**, John Wiley and Sons Inc.
- KAYS, W.M., CRAWFORD, M.E., (1980). **Convective Heat and Mass Transfer**, McGraw - Hill, New York.
- KAKAÇ, S., YENER, Y., (1979). **Heat Conduction**. Middle East Technical University, Ankara, Publication Number:60.
- LIN, H.-T., Wu, C.-M. (1995). Combined heat and mass transfer by laminar natural convection from a vertical plate, **Heat and Mass Transfer**, Vol.30, No.6, 369-376.
- MIYAMOTO, M., Katoh, Y., Kurima, J., Taguchi, Y., (1994). Characteristics of free-convection boundary layer in transition region along vertical plate, **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers**, Part B, vVol.60, No.571, 971-976.
- NATH, B. (Çeviri GÜNAY, D.) (1993). **Sonlu Elemanlar Metodunun Temelleri**, SÜ, Mühendislik Yayınları.
- ÖZİŞİK, M.N., (1977). **Basic Heat Transfer**, McGraw - Hill Book Company, New York.
- SAYMAN, O., (1988). **Sonlu Elemanlar Metoduna Giriş**. Lisansüstü Programı Ders Notları, Elazığ.
- SUZUKI, T., Mitachi, K., Nishimura, M., Takahashi, Y., (1995) Flow pattern and heat transfer of low-speed upward flow between uniformly heated vertical plates, **Heat Transfer**, Vol.24, No.2, 166-178.
- TAŞGETİREN, S., TOPÇU, M., (1985). Geçişli Hal Isı İletimi Probleminin Sonlu Elemanlar Metodu İle Çözümü, **P.Ü. Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Cilt 1, Sayı 1, S:45-51.
- TOPÇU, M., (1991). Transmisyon Zincirleri Yan Plakalarındaki Elasto - Plastik Gerilme Analizi. **Doktora Tezi**. PAÜ., Denizli.

- VEHARA, H., Kinoshita, E., Matsuda, S., (1995). Theoretical study on turbulent film condensation on a vertical plate, **ASME Thermal Engineering Joint Conference**, Proceedings Vol.2, 391-397.
- YAMASAKI, K., Nagahashi, Y. (1992). Natural- convection heat transfer from a finite vertical plate at low Grashof numbers, **Heat Transfer**, Vol.21, No.4, 376-390.
- ZIENKIEWICZ, O.C., (1982,1979). **Finite Element Method**. McGraw - Hill Book Company.



EK-1.Düğüm Numaraları ve Koordinatları Kullanarak Otomatik Bölmeleme Yapan Program

```

20 REM          MEHMET DURANAY
30 REM =====
40 REM
50 REM  BU PROGRAM OTOMATİK BÖLMELEME YAPAR ve ÇİZER
60 REM =====
70 KEY OFF
80 CLS
90 INPUT "[BOLUNMUS DORTGEN DATALARIN BULUNDUGU UYENIN ADINI GIRINIZ: ", a$
100 OPEN a$ FOR INPUT AS #1
110 INPUT #1, NDE, NEL, npres
130 PRINT : PRINT : PRINT : PRINT
140 PRINT NDE, NEL, npres
150 PRINT
155 INPUT #1, a, b, c, d, e
160 PRINT a, b, c, d, e
170 PRINT
180 PRINT "-----"
190 PRINT
200 DIM XDUGUM(NDE), YDUGUM(NDE), NENN(NEL, 4), NKE(1000), PSI(NDE)
205 DIM REEL(NDE), IMAG(NDE)
210 REM DUGUMLERIN X VE Y KORDINATLARI
215 OPEN "KOR.DAT" FOR INPUT AS #2
220 FOR I = 1 TO NDE
230 INPUT #2, DG9, XDUGUM(I), YDUGUM(I)
240 PRINT I, XDUGUM(I), YDUGUM(I)
250 NEXT I
260 REM BIR DORTGENI CEVRELEYEN DORT DUGUM
265 OPEN "DUG.DAT" FOR INPUT AS #3
270 FOR I = 1 TO NEL
280 INPUT #3, EL9, NENN(I, 1), NENN(I, 2), NENN(I, 3), NENN(I, 4)
310 PRINT NENN(I, 1), NENN(I, 2), NENN(I, 3), NENN(I, 4)
320 NEXT I
520 FOR I = 1 TO NDE
550 INPUT #1, k, PSI(I)
560 PRINT k, PSI(I)
570 NEXT I
580 CLOSE #1, #2, #3
590 REM
600 INPUT "[BUYULTME KATSAYISINI GIRINIZ: MAGX=9 ]", MAGX
610 INPUT "[BUYULTME KATSAYISINI GIRINIZ: MAGY=50 ]", MAGY
620 INPUT "[X IN BASLANGIC NOKTASINI GIRINIZ: XS=2 ]", XS
630 INPUT "[Y NIN BASLANGIC NOKTASINI GIRINIZ: YS=-120 ]", YS
640 CLS : SCREEN 11
850 REM DORTGEN CIZIMLERI
860 FOR I = 1 TO NEL
870 n1 = NENN(I, 1): N2 = NENN(I, 2): N3 = NENN(I, 3): N4 = NENN(I, 4)
880 X1 = XDUGUM(n1) * MAGX + XS
890 x2 = XDUGUM(N2) * MAGX + XS
900 x3 = XDUGUM(N3) * MAGX + XS
901 x4 = XDUGUM(N4) * MAGX + XS
910 Y1 = YDUGUM(n1) * MAGY + YS
920 Y2 = YDUGUM(N2) * MAGY + YS

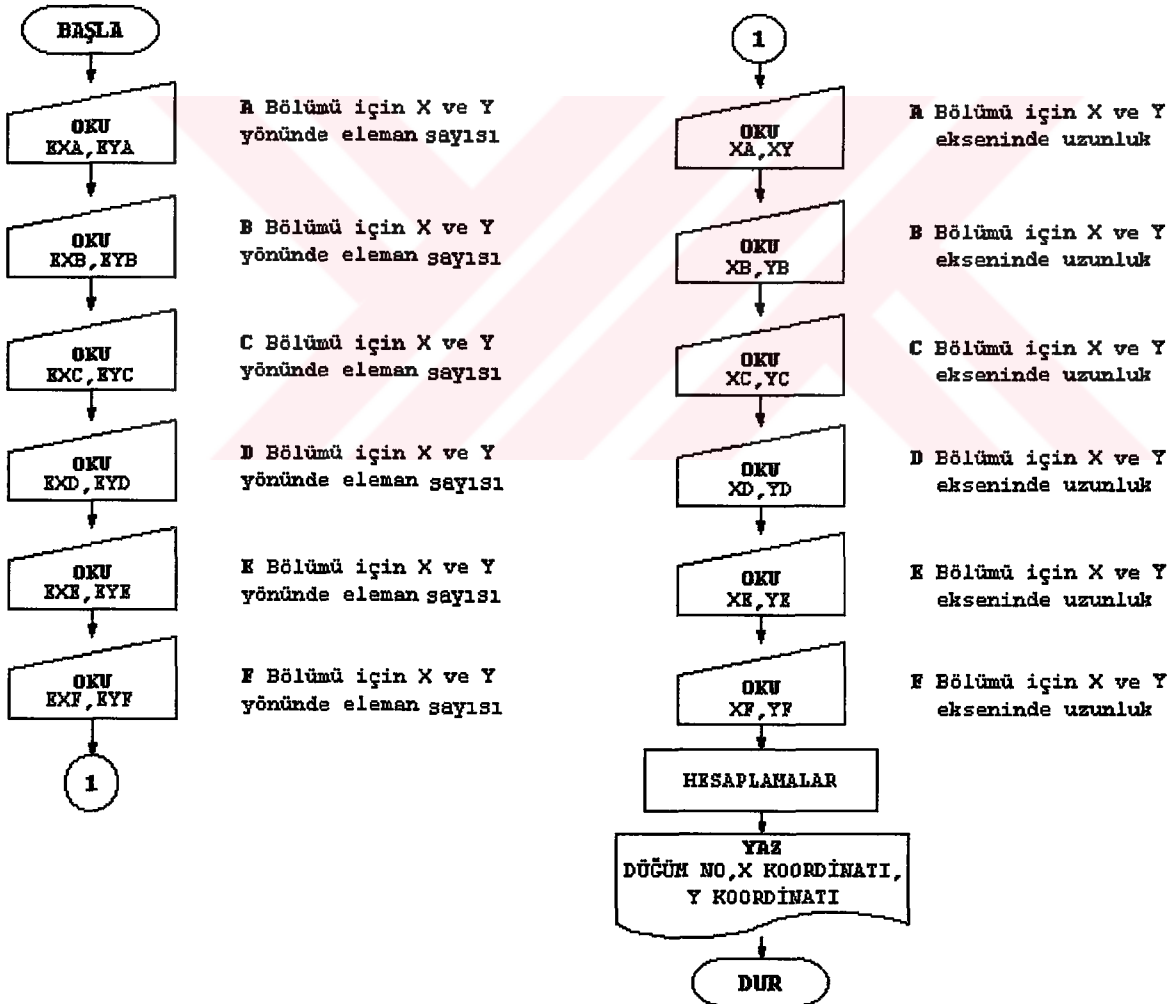
```

```

930 Y3 = YDUGUM(N3) * MAGY + YS
931 Y4 = YDUGUM(N4) * MAGY + YS
940 LINE (X1, 200 - Y1)-(x2, 200 - Y2)
950 LINE (x2, 200 - Y2)-(x3, 200 - Y3)
960 LINE (x3, 200 - Y3)-(x4, 200 - Y4)
961 LINE (x4, 200 - Y4)-(X1, 200 - Y1)
REM INPUT k
970 NEXT I
980 PRINT "KATSAYI DEGISSIN MI? [E/H]"
990 INPUT d$
1000 IF d$ = "E" OR d$ = "e" THEN 590
1010 IF d$ = "H" OR d$ = "h" THEN 1030
1020 IF d$ <> "E" OR d$ <> "e" OR d$ <> "H" OR d$ <> "h" THEN 980
1030 END

```

EK-2.Düğüm Numaraları ve Koordinatları Hesaplayan Programın Akış Şeması



EK-3.Sıcaklık Dağılımını zamana Bağlı Olarak Hesaplayan Programın Akış Şeması

