

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ LASTİĞİ PİŞİRME SÜRECİNİN
MODELLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Y.Müh. Bağdagül KARAAĞAÇ

Anabilim Dalı: Kimya Mühendisliği



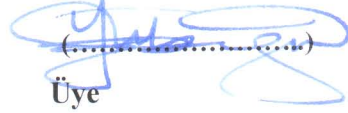

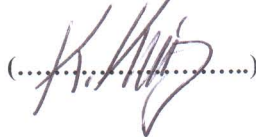
Danışman: Prof. Dr. Veli DENİZ

KOCAELİ, 2009

ARAÇ LASTİĞİ PIŞIRME SÜRECİNİN
MODELENMESİ

DOKTORA TEZİ
Y.Müh. Bağdagül KARAAĞAÇ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Kasım 2009
Tezin Savunulduğu Tarih: 04 Aralık 2009

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Prof.Dr.Veli DENİZ	Prof.Dr.Burak ERMAN	Prof.Dr.Yüksel GÜNEY
		
	Üye	Üye
Yrd.Doç.Dr.Nurhan VATANSEVER	Yrd.Doç.Dr. Kemal KARADENİZ	
		

KOCAELİ, 2009

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam sırasında tüm olanaklarını sunan, değerli vaktini benden esirgemeyen ve kendisini tanıdığım günden sonra hayata bakış açımı değiştiren değerli hocam Prof. Dr.Veli DENİZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımın büyük bölümünü gerçekleştirdiğim Türk Pirelli Lastikleri A.Ş.'nin, başta Fabrika Müdürü Ali Adil KARAHÖYÜKLÜ olmak üzere, tüm değerli çalışanlarına çok teşekkür ederim. Isıl iletkenlik ölçümlerim sırasında, laboratuvarlarından yararlanmama olanak tanıyan değerli İzocam San.ve Tic.A.Ş. çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü öğretim üyesi değerli hocam Doç.Dr.Melih İNAL'a çalışmama katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın bu zor bölümünde hep yanımda olan canım arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr.Ayşe AYTAÇ, Serap GÜMÜŞ ve Şebnem KEMALOĞLU'na içten teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Verdikleri sonsuz destekten dolayı aileme çok teşekkür ederim. Varlığı ile hayatıma anlam katan, çalışmam sırasında her zaman anlayışlı ve sabırlı olan sevgili eşim İlhan KARAAĞAÇ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Biricik oğlum Buğra'dan ise kendisinden çaldığım değerli vakitler için çok çok özür dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET.....	xi
İNGİLİZCE ÖZET	xii
1. GİRİŞ	1
2. PİŞİRME	3
2.1. Lastik Pişirme Sürecinin Tanımı.....	6
2.2. Lastik Pişirme Sürecinin Modellenmesi Konusunda Yapılmış Önemli Çalışmalar	7
2.3. Pişirme Derecesini Belirlemek İçin Kullanılan Yöntemler	9
2.3.1. Gözenekliliğin ölçülmesi	9
2.3.2. Eşdeğer pişirme süresi hesabı.....	9
2.3.3. Isıl çözümlenmeler	10
2.3.4. Kimyasal yöntemler	11
2.3.5. Reometri.....	12
2.4. Pişirmenin Kinetiği	12
2.4.1. Kabul gören çaprazbağlanma kinetik modelleri	15
2.4.1.1. Klasik model	15
2.4.1.2. Kamal modeli	16
2.4.2. Temel tepkime kinetiği	17
2.5. Lastik Bileşenlerinin Isıl Özellikleri	23
2.5.1. Lastik bileşenlerinin ısı sığaları	23
3. YAPAY SİNİR AĞLARI	26
3.1. YSA'nın Yapısı ve Elemanları	26
3.2. YSA'nın Özellikleri	27
3.3. YSA'nda Öğrenme Çözüm Yolları.....	28
3.4. YSA Mimarileri	28
3.5. Çok Katmanlı Almaç YSA'larda İşlem Birimi Matematiği	29
3.6. Genelleştirilmiş Bağlanım YSA.....	33
3.7. Elman YSA	34
3.8. Kauçuk ve Lastikte YSA Çalışmaları	34
4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FINITE ELEMENT METHOD)	36
4.1. Sonlu Eleman Tipleri	38
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Isıl Çözümleme	39
4.2. ANSYS İle Modelleme	39
4.2.1. Problemin tanımlanması	41
4.2.1.1. Başlığın belirlenmesi.....	41
4.2.1.2. Modelin oluşturulması	41
4.2.1.3. Eleman tipinin belirlenmesi	41
4.2.1.4. Malzeme özelliklerinin girilmesi	42

4.3.2. Modelin elemanlara bölünmesi	42
4.3.3. Yüklerin tanımlanması ve çözüm.....	42
4.3.3.1. Çözümleme tipinin belirlenmesi	42
4.3.3.2. Yüklerin uygulanması	42
4.3.3.3. Çözüm	43
4.3.4. Sonuçların değerlendirilmesi	43
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	44
5.1. YSA Kullanılarak Reometre Eğrilerinin Modellenmesi.....	45
5.2. Eşdeğer Pişme Süresi Hesabı	45
5.3. Çeşitli Düzeylerde Pişirilmiş Olan Lastik Karışımlarının Yoğunluklarının Belirlenmesi	45
5.4. Lastik Karışımlarının Isıl İletkenliklerinin Ölçülmesi	46
5.5. Model Lastik Bileşenlerinin Çaprazbağlanma Isılarının Belirlenmesi	47
5.6. Model Lastik Bileşenlerinin Isı Sığalarının Belirlenmesi.....	48
5.7. Pişmesi Sürecinde Model Lastiğin İçindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilmesi.....	48
5.7.1. Modelin oluşturulması	49
5.7.2. Eleman tipinin belirlenmesi	50
5.7.3. Malzeme özelliklerinin girilmesi	51
5.7.4. Modelin elemanlara bölünmesi (Meshing)	53
5.7.5. Yüklerin tanımlanması	57
5.7.6. Çözüm	61
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	63
6.1. YSA Kullanılarak Reometre Eğrilerinin Modellenmesi.....	63
6.2. Eşdeğer Pişme Süresi Hesabı	70
6.3. YSA ile Analitik Hesaplamaların Karşılaştırılması	71
6.4. Lastik Karışımlarının Yoğunlukları	77
6.5. Lastik Karışımlarının Isıl İletkenlikleri.....	81
6.6. Lastik Bileşenlerinin Çaprazbağlanma Isıları	82
6.7. Lastik Bileşenlerinin Isı Sığaları	84
6.8. Lastik Karışımlarının Pişme Düzeylerinin Sıcaklık ve Zamana Göre Modellenmesi.....	86
6.8.1. Klasik model ve Yeni model 1	86
6.8.2. Kamal modeli ve Yeni model 2	100
6.8.3. Yeni model 2'nin literatürdeki örnek çalışmalara uyarlanması	109
6.9. Pişmesi Sürecinde Model Lastiğin İçindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilmesi	112
6.9.1. Lastik karışımlarında ısı üretimi olmadığı kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi.....	118
6.9.2. Lastik karışımlarında sabit ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi	120
6.9.3. Lastik karışımlarında Kamal modeli uyarınca ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi	121
6.9.4. Lastik karışımlarında Yeni model 2 uyarınca ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi	122
6.9.5. Pişirme sürecinin 150 s kısa ve 150 s uzun sürmesi sonucu lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı benzetimi	132

6.9.6. Isıtma buharı basınç göstergesinin arızalı olduğu durumda pişen lastik içindeki sıcaklık dağılımı	134
6.9.7. Lastiğin seçilen bir bölgesinde farklı bir karışım kullanıldığı durumda pişen lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	139
7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR	148
EKLER.....	154
ÖZGEÇMİŞ	158

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1:	Piştirme sırasında oluşabilecek çeşitli çaprazbağ tipleri	4
Şekil 2.2:	Piştirme sırasında oluşabilecek diğer değişimler	5
Şekil 2.3:	Buhar cepli bir piştirme presi kesitinin şematik olarak gösterimi	6
Şekil 2.4:	Tipik bir reometre eğrisi.....	13
Şekil 2.5:	Bir lastik karışımının farklı sıcaklıklardaki reometre eğrileri	14
Şekil 2.6:	BaCO ₃ için $\ln T - \ln [g(X)]$ grafiği	23
Şekil 2.7:	Örnek bir DSC termogramından direkt yöntem ile ısı sığasının Hesaplanması	25
Şekil 2.8:	Örnek bir çoklu DSC termogramından safir yöntemi ile ısı sığasının Hesaplanması	25
Şekil 3.1:	Bir yapay işlem biriminin temel yapısı	27
Şekil 3.2:	Çok katmanlı, ileri ve geri beslemeli YSA mimarileri.....	29
Şekil 3.3:	Bir YSA işlem birimi modeli	30
Şekil 3.4:	Aktarım fonksiyonları. (a) sigmamsı, (b)çift yönlü sigmamsı	31
Şekil 3.5:	Çok katmanlı almaç YSA modeli.....	32
Şekil 3.6:	GRNN mimarisinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.7:	Temel Elman YSA yapısı.....	34
Şekil 4.1:	Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar	37
Şekil 5.1:	Isıl iletkenlik ölçümü cihazı örnek haznesinin şematik gösterimi	47
Şekil 5.2:	Lastik modelinin CAD resmi	49
Şekil 5.3:	Modelin ANSYS ekranındaki görüntüsü	49
Şekil 5.4:	ANSYS'te eleman tipinin belirlenmesi	50
Şekil 5.5:	SOLID 70 elemanının geometrisi	51
Şekil 5.6:	Malzeme özellikleri giriş ekranı-1	52
Şekil 5.7.:	Malzeme özellikleri giriş ekranı-2	52
Şekil 5.8:	Malzeme özellikleri giriş ekranı-3	52
Şekil 5.9:	Malzeme özellikleri giriş ekranı-4	53
Şekil 5.10:	Temel eleman boyutu tanımlama ekranı	54
Şekil 5.11:	Bölünmüş hacim için eleman ve malzeme tipi atama ekranı	55
Şekil 5.12:	Eleman boyutu belirleme ekranı	55
Şekil 5.13:	Modelin elemanlara bölünmüş görüntüsü	56
Şekil 5.14:	Modelin bir kısmının elemanlara bölünmüş görüntüsü.....	56
Şekil 5.15:	Başlangıç sınır sıcaklık yükü tanımlama ekranı.....	57
Şekil 5.16:	Sınır sıcaklık yükleri giriş ekranı	57
Şekil 5.17:	Sınır sıcaklık yükleri tablo seçim ekranı	58
Şekil 5.18:	Sınır sıcaklık yükleri için örnek tablo içeriği	58
Şekil 5.19:	Isı üretimi yüklerinin hesaplandığı ANSYS fonksiyon ekranı.....	59
Şekil 5.20:	Isı üretimi yüklerinin hesaplandığı fonksiyonların yük tablosu haline dönüştürüldüğü ANSYS ekranı	60
Şekil 5.21:	Isı üretimi yüklerinin yük tablolarından tanımlandığı ANSYS ekranı	61
Şekil 5.22:	ANSYS temel çözüm tipi tanımlama ekranı	61
Şekil 5.23:	ANSYS temel çözüm etkenleri tanımlama ekranı	62
Şekil 6.1:	7 nolu ağıın benzetim grafiği.....	67

Şekil 6.2:	7 nolu ağın eğitim başarımı	67
Şekil 6.3:	10 nolu ağın benzetim grafiği.....	68
Şekil 6.4.:	10 nolu ağın eğitim başarımı	68
Şekil 6.5:	12 nolu ağın benzetim grafiği.....	69
Şekil 6.6:	12 nolu ağın eğitim başarımı	69
Şekil 6.7:	Örnek bir karışımın (3 nolu) yoğunluğunun pişme düzeyi ile değişimi	78
Şekil 6.8:	2 numaralı bileşene (lastik karışımı) ait DSC termogramı.....	83
Şekil 6.9:	3 numaralı bileşene (lastik karışımı) ait DSC termogramı.....	83
Şekil 6.10:	Örnek karışım için Kamal modeli hız değişmezlerinin (K_2) pişirme sıcaklığı ile ilişkisi.....	108
Şekil 6.11:	Örnek bir SBR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	109
Şekil 6.12:	Örnek bir NR karışımı için farklı sıcaklıklardaki reometre eğrileri.....	110
Şekil 6.13:	Örnek bir NR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	110
Şekil 6.14:	Devulkanize lastik atıklarının tekrar pişirilmesi sırasında elde edilen reometre eğrileri	111
Şekil 6.15:	Devulkanize lastik atıklarının tekrar pişirilmesine ait sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	112
Şekil 6.16:	Lastik pişirme sürecindeki sınır ısıtma yükleri	113
Şekil 6.17:	1. bölge sınır sıcaklığı	113
Şekil 6.18:	2. bölge sınır sıcaklığı	114
Şekil 6.19:	3. bölge sınır sıcaklığı	114
Şekil 6.20:	Lastik üzerindeki sıcaklık kontrol noktaları.....	115
Şekil 6.21:	1.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi	116
Şekil 6.22:	2.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi	116
Şekil 6.23:	3.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi	117
Şekil 6.24:	4.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi	117
Şekil 6.25:	5.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi.....	118
Şekil 6.26:	Isı üretimi olmadığı durumda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	119
Şekil 6.27:	Sabit ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	120
Şekil 6.28:	Kamal modeline göre ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	121
Şekil 6.29:	Yeni model 2'ye göre ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	123
Şekil 6.30:	Çeşitli benzetimler için 1. kontrol noktası sıcaklıkları.....	129
Şekil 6.31:	Çeşitli benzetimler için 2. kontrol noktası sıcaklıkları.....	129
Şekil 6.32:	Çeşitli benzetimler için 3. kontrol noktası sıcaklıkları.....	130
Şekil 6.33:	Çeşitli benzetimler için 4. kontrol noktası sıcaklıkları.....	130
Şekil 6.34:	Çeşitli benzetimler için 5. kontrol noktası sıcaklıkları.....	131
Şekil 6.35:	Pişirme sürecinin 150 s kısa sürmesi durumunda pişirme süreci sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı.....	132
Şekil 6.36:	Pişirme sürecinin 150 s uzun sürmesi durumunda pişirme süreci sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	132
Şekil 6.37:	1. ve 2. kontrol noktalarındaki lastik karışımlarının 171°C'de reometre eğrisi .	133
Şekil 6.38:	3. ve 4. kontrol noktalarındaki lastik karışımlarının 171°C'de reometre eğrisi .	133

Şekil 6.39:	5. kontrol noktasındaki lastik karışımının 171°C’de reometre eğrisi.....	133
Şekil 6.40:	a) Pişirme başladıktan 60 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme başladıktan 60 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	135
Şekil 6.41:	a) Pişirme başladıktan 420 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme başladıktan 420 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı.....	135
Şekil 6.42:	a) Pişirme başladıktan 810 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme başladıktan 810 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	135
Şekil 6.43:	Basınç göstergesi arızası durumunda 1.kontrol noktası için sıcaklıklar ..	137
Şekil 6.44:	Basınç göstergesi arızası durumunda 2.kontrol noktası için sıcaklıklar ..	137
Şekil 6.45:	Basınç göstergesi arızası durumunda 3.kontrol noktası için sıcaklıklar ..	138
Şekil 6.46:	Basınç göstergesi arızası durumunda 4.kontrol noktası için sıcaklıklar ..	138
Şekil 6.47:	Basınç göstergesi arızası durumunda 5.kontrol noktası için sıcaklıklar ..	139
Şekil 6.48:	Karışım değişikliği durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı	140
Şekil 6.49:	Lastikte seçilen bir bölgede farklı karışım kullanıldığı durumda kontrol noktası sıcaklıkları	142

TABLolar DİZİNİ

Tablo 6.1:	Model lastik karışımı için farklı YSA mimarileri uygulanarak hesaplanan hata değerleri	63
Tablo 6.2:	Model karışım için 7,10 ve 12 nolu YSA ile yapılan enuygun pişme süresi benzetimleri.....	66
Tablo 6.3:	Lastik karışımlarının tepkime hız değişmezi ve etkinleşme enerjileri	70
Tablo 6.4:	Model karışım için analitik yöntem ve YSA	71
Tablo 6.5:	1 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	72
Tablo 6.6:	2 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	72
Tablo 6.7:	3 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	73
Tablo 6.8:	4 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	73
Tablo 6.9:	5 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	74
Tablo 6.10:	6 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	74
Tablo 6.11:	7 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	75
Tablo 6.12:	8 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	75
Tablo 6.13:	9 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	76
Tablo 6.14:	10 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA	76
Tablo 6.15:	YSA ve analitik yöntemin enuygun pişme süresi tahmininde ortalama yaklaşım hataları.....	77
Tablo 6.16:	Lastik karışımlarının 176 °C’de belirli pişme düzeylerine ulaşabilmeleri için gerekli pişirme süreleri	79
Tablo 6.17:	Karışımların ve diğer lastik bileşenlerinin belirli pişme düzeylerindeki yoğunlukları.....	80
Tablo 6.18:	Karışımların yoğunluklarının pişme düzeyi ile değişimini ifade eden 6. derece polinomların katsayıları	81
Tablo 6.19:	Bileşenlerin ısıl iletkenlikleri	82
Tablo 6.20:	Lastik bileşenlerinin çaprazbağlanma ısıları	84
Tablo 6.21:	Model lastik bileşenlerinin pişme öncesi ısı sığaları.....	85
Tablo 6.22:	Model lastik bileşenlerinin pişme sonrası ısı sığaları.....	85
Tablo 6.23:	Model lastik bileşenlerinin ortalama ısı sığaları.....	86
Tablo 6.24:	1 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	87
Tablo 6.25:	2 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	88
Tablo 6.26:	3 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	89
Tablo 6.27:	4 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	90
Tablo 6.28:	5 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	91
Tablo 6.29:	6 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	92
Tablo 6.30:	7 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1’in başarımları	93

Tablo 6.31:	8 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları	94
Tablo 6.32:	9 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları	95
Tablo 6.33:	10 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in Başarımları	96
Tablo 6.34:	11 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları	97
Tablo 6.35:	12 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları	98
Tablo 6.36:	13 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları	99
Tablo 6.37:	1 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	101
Tablo 6.38:	2 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	101
Tablo 6.39:	3 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	102
Tablo 6.40:	4 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	102
Tablo 6.41:	5 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	103
Tablo 6.42:	6 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	103
Tablo 6.43:	7 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	104
Tablo 6.44:	8 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	104
Tablo 6.45:	9 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları	105
Tablo 6.46:	10 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları.....	105
Tablo 6.47:	11 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları.....	106
Tablo 6.48:	12 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları.....	106
Tablo 6.49:	13 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımları.....	107
Tablo 6.50:	Model lastik karışımlarının Yeni model 2'deki K_2 değişmezlerinin sıcaklıkla değişimi	108
Tablo 6.51:	Örnek bir SBR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	109
Tablo 6.52:	Örnek bir NR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	110
Tablo 6.53:	Devulkanize lastik atıklarının tekrar pışirilmesine ait sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi	111
Tablo 6.54:	Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 1.kontrol noktasının sıcaklıkları	124
Tablo 6.55:	Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 2.kontrol noktasının sıcaklıkları	125
Tablo 6.56:	Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 3.kontrol noktasının sıcaklıkları	126
Tablo 6.57:	Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 4.kontrol noktasının sıcaklıkları	127
Tablo 6.58:	Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 5.kontrol noktasının sıcaklıkları	128
Tablo 6.59:	Modellerin benzetim hataları.....	131
Tablo 6.60:	Isıtma buharının 1 bar düşük olduğu durumda kontrol noktası sıcaklıkları	136
Tablo 6.61:	Lastikte seçilen bir bölgede farklı karışım kullanıldığı durumda kontrol noktası sıcaklıkları	141

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

ANFIS	:Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems
ANN	:Artificial Neural Networks
ÇKA	:Çok katmanlı almaç
DSC	:Diferansiyel taramalı kalorimetre
EP	:Etkin pişirme
EPM	:Etilen-Propilen monomeri
FEA	:Finite element analysis (Sonlu elemanlar çözümlemesi)
FEM	:Finite element method (Sonlu elemanlar yöntemi)
GP	:Geleneksel pişirme
GRNN	:Genelleştirilmiş bağlantım tipi yapay sinir ağları
MDR	:Hareketli kalıplı reometre
MH	:Enyüksek tork değeri
ML	:Endüşük tork değeri
NR	:Doğal kauçuk
ODR	:Salınımlı disk reometresi
OMH	:Ortalama mutlak hata
SBR	:Stiren-Bütadien kauçuğu
Yarı-EP	:Yarı etkin pişirme
YSA	:Yapay sinir ağları

ARAÇ LASTİĞİ PİŞİRME SÜRECİNİN MODELLENMESİ

Bağdagül KARAAĞAÇ

Anahtar Sözcükler: Lastik, Pişirme, Çaprazbağlanma, Yapay Sinir Ağları, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Lastik üretimi sürecinde, lastik pişirme makinası içinde karkasa aktarılan ısı etkisiyle lastik karışımları pişerek, sağlam ve esnek birer malzemeye dönüşür. Bu çalışmada, farklı pişme özellikleri gösteren çok sayıda karışımın aynı anda istenen düzeyde pişirilebilmesi için, sürece ait etkenler uygun sayısal yöntemlerle modellenmiştir.

Bu amaçla, bölgemizde faaliyet gösteren bir lastik fabrikası bünyesinde üretim miktarı oldukça yüksek olan bir ölçü seçilmiştir. Model lastikte yer alan karışımlar için çaprazbağlanma tepkimesinin ilerleyişi, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile, farklı ağ mimarileri kullanılarak modellenmiştir. Aynı lastik karışımları için, eşdeğer pişme süresi yöntemi ile de enuygun pişme süreleri hesaplanarak, YSA'ndan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Pişirme sürecinde, model lastik içindeki sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ve ANSYS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu amaçla, model lastik içinde yer alan tüm bileşenlerin fiziksel ve ısıl özellikleri belirlenmiştir. Lastik karışımları için çaprazbağlanma tepkimesinin pişme sürecinde ve değişen sıcaklık koşullarında ilerleyişi, literatürde kabul gören kinetik modeller uyarınca belirlenmiştir. Mevcut kinetik modellerde bazı değişiklikler yapılarak, başarımları daha yüksek olan yeni modeller geliştirilmiştir.

Sonlu elemanlar ile çözümlenmede, literatürdeki ve yeni geliştirilen kinetik modeller kullanılmıştır. Oluşturulan modellerin başarımları, lastik içerisinde kritik noktalar için ve belirli zaman aralıklarında, gerçekte ölçülen sıcaklıklar ile modelin tahmin ettiği sıcaklıklar karşılaştırılarak belirlenmiştir. Çaprazbağlanma sırasındaki ısı üretimi Yeni model 2'ye göre tanımlandığında, diğer modellere kıyasla, genel olarak gerçek durumun daha yüksek bir başarımla temsil edildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca pişirme sürecindeki olası arıza durumlarının benzetimleri yapılarak, lastiğin pişmesine olan etkileri öngörülme çalışılmıştır. Böylelikle, süreçte ve/veya lastik bileşimindeki herhangi bir değişikliğin pişirmeye olan etkilerini kolay ve hızlı bir şekilde tahmin etmek olanaklı olabilecektir.

MODELLING OF TIRE CURING PROCESS

Bağdagül KARAAĞAÇ

Keywords: Tire, Curing, Crosslinking, Artificial Neural Networks, Finite Element Analysis

In tire curing process, green tire is converted to a strong and elastic material by internal and external heat treatment. In this study, curing process parameters were modelled with appropriate numerical techniques for crosslinking all the rubber compounds in a tire at the respective target level.

A model tire that has a high production rate in a local tire factory was studied. Curing behaviour of rubber compounds in the model tire was modelled using various Artificial Neural Networks (ANN) architectures. Equivalent cure concept, that is traditionally used in rubber and tire industries, was also applied to calculate optimum cure times of the same compounds. The ability of ANN and equivalent cure concept for determining optimum cure times of the compounds were compared.

Finite Element Method (FEM) and ANSYS software were used to obtain temperature distribution in the model tire during curing. Physical and thermal properties of all compounds in the model tire were measured. Curing kinetics of the rubber compounds at different temperature conditions were studied by using different methods given in literature. More efficient new kinetic models were suggested for improving the weakness of available models.

Available and new kinetic models were used for Finite Element Analysis (FEA). The ability of models were determined by comparing the measured and predicted temperature data obtained from critical zones of the model tire for definite curing times. FEA that use New model 2 is more successful for predicting the temperature profile when compared with other kinetic models. Various conditions that might take place in curing process and their conjectural effects on product were also studied. Using this information, it will be possible to estimate the effects of process and/or tire compound variations on the product quality.

1.GİRİŞ

Kauçuklar, en çok kullanılan endüstriyel polimerler arasında yer alırlar. Elastomer sınıfındadırlar. Genel olarak elastomerlerin tanımı şöyle yapılır: “Bir kuvvet etkisinde boyunun en az iki katına kadar uzayabilen ve uygulanan kuvvet kaldırıldığında tekrar ilk boyuna dönebilen malzemelerdir (Koenig, 1999). Lastik gibi kauçuk kökenli malzemeler, pişmeden (curing, vulcanization) önce yeteri kadar sağlam değildirler, tıpkı bir sakıza benzetilebilirler. Ayrıca bu malzemeler pişirilmeden önce oldukça yapışkan, mekanik dayanımları düşük, yüksek baskı etkisinde şeklini koruyamayan ve kimyasallara karşı dayanıksızdırlar (Mark ve diğ., 1994). Pişirme sırasında meydana gelen tepkimeler sonucunda, başlangıçta serbest halde bulunan polimer zincirlerinin çaprazbağlarla birbirlerine bağlanması yoluyla oldukça sağlam ve esnek bir malzeme haline getirilirler. Kauçukların en çok kullanıldığı alan lastik üretimidir.

Lastik üretimi sürecinde öncelikle katmanlar halinde hazırlanan karkas, istenilen sırt/tabana (tread) deseni verilmek üzere pişirme sürecine tabi tutulur. Pişirme süreci lastik pişirme makinası (pres) içinde gerçekleştirilir. Presin içinde karkasa ısı aktarımı, sıcak su ve/veya kızgın buhar kullanılarak ısıtılan kalıp ve pişirme torbası (bladder) içinde dolaştırılan sıcak su ve/veya kızgın buhar ile sağlanır. Aktarılan ısı ile lastik karışımları pişerek, sağlam ve esnek bir malzemeye dönüşür. Farklı pişme özellikleri gösteren çok sayıda karışımın aynı anda istenen düzeyde pişirilebilmesi için, işletme koşulları dikkatli bir şekilde ayarlanmalıdır. Bunun için en ucuz ve en kullanışlı yöntem, sürece ait tüm etkenlerin (parametre) birlikte değerlendirildiği bir matematiksel model oluşturmaktır. Lastik gibi karmaşık yapılı bir malzeme için çok sayıda pişirme etkeninin doğru şekilde modellenmesi ancak sayısal yöntemler kullanarak olanaklı olur.

Bu çalışmanın amacı, kaliteli lastik elde ederken, pişirme süreci için harcanan enerji maliyetini en aza indirecek işletme etkenlerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, bölgemizde faaliyet gösteren bir lastik fabrikası bünyesinde üretim miktarı oldukça yüksek olan bir ölçü, model lastik olarak seçilmiştir. Pişirme sürecinde, bu lastik

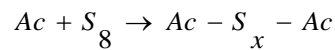
içindeki sıcaklık dağılımının sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmesi planlanmıştır. Sıcaklık dağılımını elde etmek için, model lastik içinde yer alan tüm bileşenlerin (lastik karışımları, çelik ve tekstil kord) fiziksel ve ısıl özellikleri belirlenmiştir. Çaprazbağlanma tepkimesinin pişme sürecinde ve değişen sıcaklık koşullarında ilerleyişi, literatürde kabul gören kinetik modeller uyarınca belirlenmiştir. Mevcut kinetik modellerde bazı değişiklikler yapılarak, başarımları daha yüksek olan yeni modeller geliştirilmiştir. Ayrıca, çaprazbağlanma tepkimesinin ilerleyişi, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi kullanılarak da modellenmiştir.

2. PİŞİRME

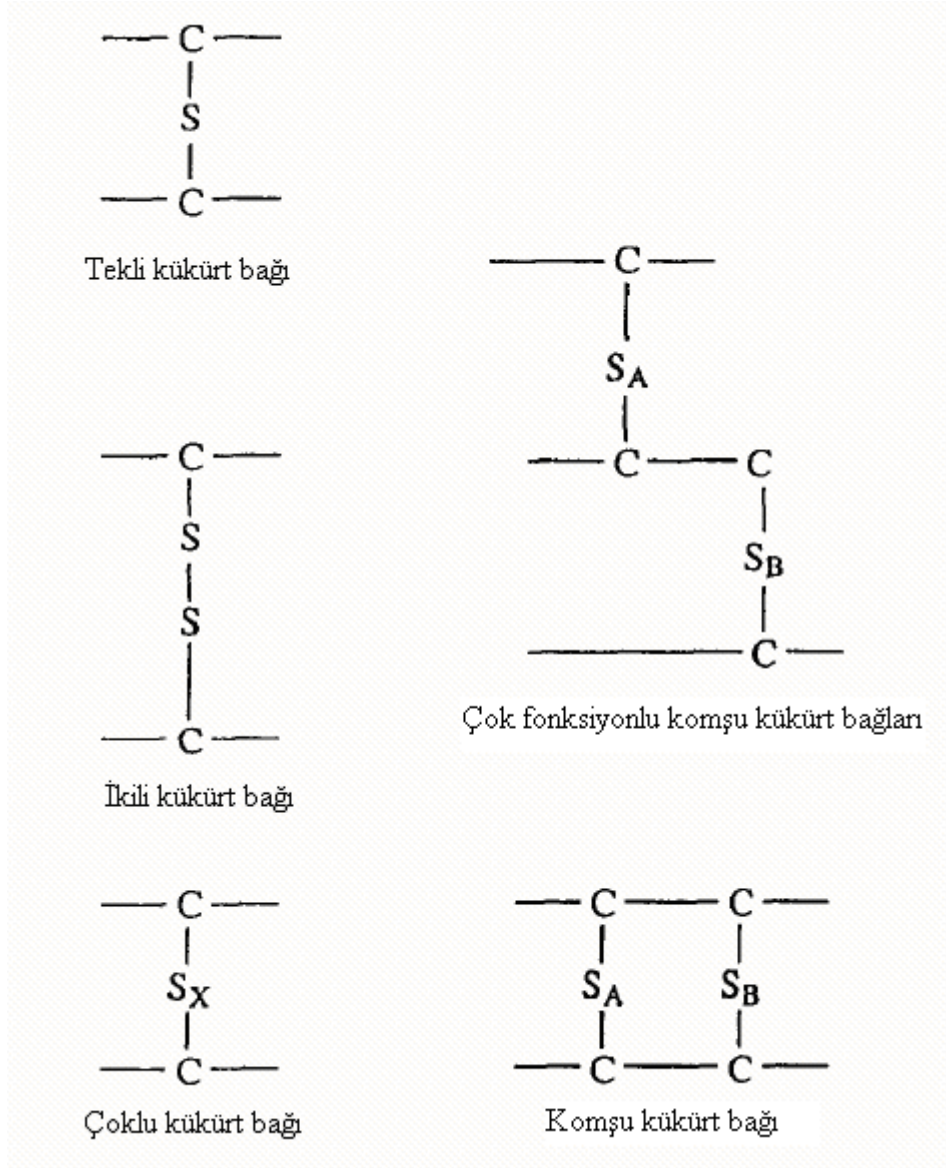
Kauçukların çaprazbağlanması için çok çeşitli pişirme sistemleri vardır. Bunlar kükürtle, peroksitle ve reçinelerle pişirme sistemleri olarak sayılabilir. En yaygın olarak kullanılan sistem ise pişirici olarak kükürt veya kükürt vericiler, hızlandırıcılar ve aktivatörler kullanılarak gerçekleştirilen hızlandırılmış pişirmedir. Bu sistem de kendi arasında geleneksel (konvansiyonel, GP), etkin (EP) ve yarı etkin (yarı-EP) pişirme sistemleri olmak üzere üç farklı ana başlık altında incelenebilir. Kullanılan kükürt ve hızlandırıcı miktarları ayarlanarak hangi mekanizmanın etkin olacağı önceden belirlenebilir. GP’de oluşan çaprazbağlar genellikle çoklu kükürt (polisülfidik) bağlarıdır ve elde edilen pişiğin (vulkanizat) kopma dayanımı, aşınma dayanımı ve yorulma direnci yüksek olur. Yarı-EP’de oluşan çaprazbağlar ağırlıklı olarak ikili kükürt bağları (disülfidik), EP’de ise tekli kükürt bağları (monosülfidik) şeklindedir. Bu şekilde kısa çaprazbağlar içeren pişmiş lastik malzemenin ise ısı dayanımı, geri dönme (reversiyon) dayanımı ve baskı altında kalıcı şekil değiştirme (deformasyon) direnci oldukça iyidir. Pişirme sırasında oluşabilecek çaprazbağ tipleri Şekil 2.1 ve 2.2’de görülmektedir (Akima ve Hashim, 1997).

Kükürt ve hızlandırıcı kullanılarak gerçekleştirilen pişme tepkimesi dizisinin mekanizması yaygın olarak dört adımda incelenir:

1. Pişiricilerin birbiri ile etkileşimi sonucu aktif kükürtleyici ara bileşik oluşumu



Burada Ac hızlandırıcı molekülünü belirtmektedir. Başlangıçta kükürt molekülü 8 atomlu halka şeklindedir. Hızlandırıcılar bu halkayı açarak etkin hale getirirler. İki hızlandırıcı molekülü arasındaki kükürt molekülü atom sayısı, pişme tepkimesinin karakterine göre farklılık gösterebilir.

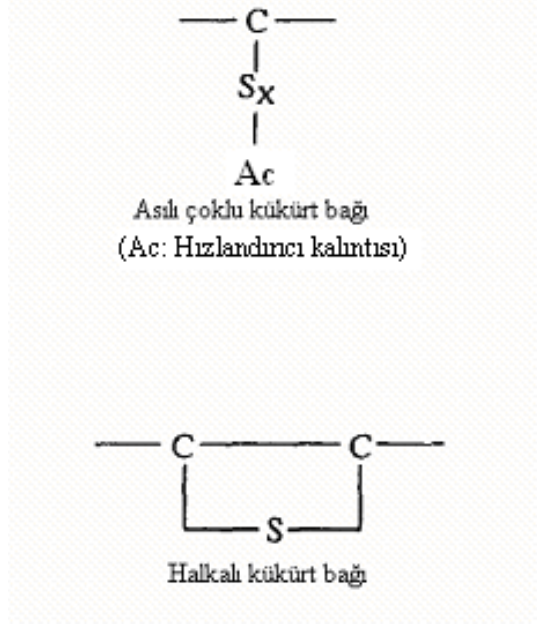


Şekil 2.1: Pişirme sırasında oluşabilecek çeşitli çaprazbağ tipleri

2. Polimer zincirlerinin aktif kükürtleyici bileşiklerle etkileşerek, hızlandırıcı grupları ile sonlanmış iki kükürt asılı (pendant) grupların oluşumu

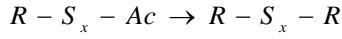


Burada RH , kauçuk zincirini (organik yapı) belirtmektedir.

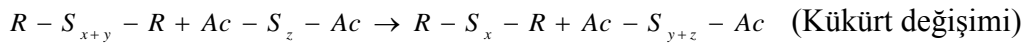
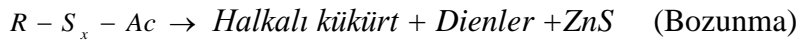


Şekil 2.2: Pişirme sırasında oluşabilecek diğer değişimler

3. Çoklu kükürt çaprazbağlarının oluşumu



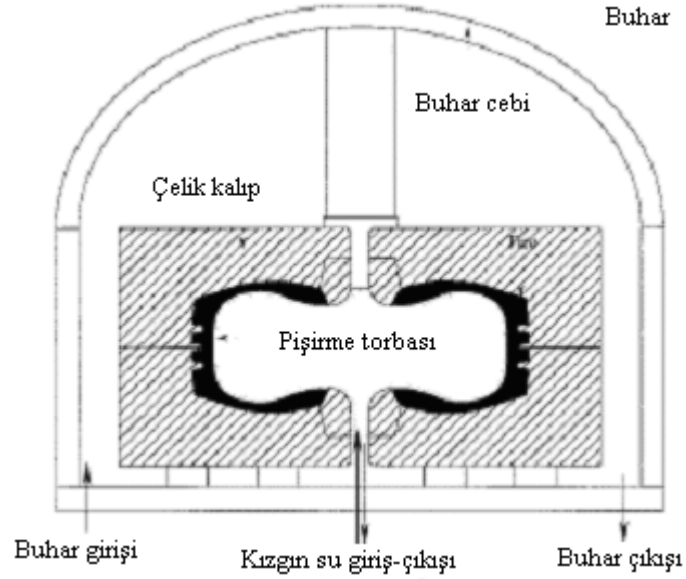
4. Ağyapının doyması ve etkin olmayan çaprazbağların oluşmasına neden olan yarışan yan tepkimelerin meydana gelmesidir ve ısıl bozunma da bu tepkimelerin oluşmasını tetikler.



Pişirme sırasında çaprazbağlanma, kükürt çıkışı ve bozunma tepkimeleri mutlaka meydana gelir (Koenig, 1999, Akima ve Hashim, 1997).

2.1. Lastik Pişirme Sürecinin Tanımı

Lastiğin pişirilmesinde çeşitli tiplerde presler kullanılır. Yaygın olarak kullanılan “buhar cepli (Dome)” tipi bir pişirme presinin kesiti şematik olarak Şekil 2.3’te verilmiştir (Han ve diğ., 1999).



Şekil 2.3: Buhar cepli bir pişirme presi kesitinin şematik olarak gösterimi

Pişirme, enerji tüketen bir süreçtir ve pişirme sürecinin koşulları, lastik kalitesini etkiler. Lastik karışımlarının istenilen düzeye kadar pişirilebilmesi için pişirme ortamının sıcaklık ve basıncının zamana bağlı olarak uygun şekilde değişmesi istenir. Fakat pratikte ısı aktarım mekanizmasının karmaşık olması dolayısıyla, farklı pişme özellikleri gösteren çok sayıda karışımın aynı anda istenen düzeyde pişirilebilmesi oldukça zordur. Lastiğin en iç bölgesindeki karışımın uygun düzeyde pişirilebilmesi için verilen ısı etkisiyle, en dış kısımdaki karışım aşırı pişebilir. Lastik fabrikalarındaki genel eğilim, sadece önceden belirlenen sıcaklık değerlerinin lastik içinde seçilen bölgelerde sağlanıp sağlanmadığının denetimi şeklindedir. Bu sıcaklık koşullarında gerçekten istenilen enuygun (optimum) pişme düzeylerine ulaşılabildiği sıklıkla denetlenmemektedir. Bunun için çok zaman gerektirmeyen, ucuz ve güvenilir olarak kullanılacak matematiksel modellere gereksinim vardır.

2.2. Lastik Pişirme Sürecinin Modellenmesi Konusunda Yapılmış Önemli Çalışmalar

1972’de Ambelang ve Prentice pişirme sırasında lastiğe olan ısı akışını hesaplamak üzere sayısal bir model geliştirmişlerdir (Prentice and Williams, 1980). Bu modeli oluştururken, pişirme sırasında lastik karışımlarının ısı yayılım katsayısını, ısı üretim hızlarını ve sınır koşullarını değişmez tutmuşlardır. Geliştirdikleri ısı aktarım problemini çözmek için ise sonlu farklar yöntemini (finite difference method) kullanmışlardır. Daha sonraları ise Prentice ve Williams, Ambelang ve Prentice’in yaklaşımını önemli ölçüde geliştirmiş ve karışımların ısı iletkenliklerini sıcaklığın, kimyasal olarak üretilen ısıyı da hem sıcaklığın hem de pişme derecesinin bir fonksiyonu olarak değerlendirmişlerdir. Sınır koşullarının zamanla değiştiğini de gözönünde bulundurmuşlardır. Ayrıca bu çalışmada, geliştirilen model yardımıyla hesaplanan ve ölçülen sıcaklık dağılım ve değişimlerinin (profil) birbiri ile uyumlu olabilmesi için karışımların ısı iletkenliklerinin mutlaka sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmesinin gerektiği deneysel olarak kanıtlanmıştır. Fakat karışımların yoğunluk ve ısı sığası (kapasitesi) değerleri her sıcaklık ve pişme derecesinde değişmez kabul edilmiştir.

Shlanger (1983) ise karmaşık yapıdaki lastik kesitini tek boyutlu eşdeğer bir dilime indirgemiş ve lastiğin eşit ısı ve fiziksel özelliklerdeki karışımlardan oluştuğunu varsayarak, pişirme sırasındaki ısı aktarımı için tek boyutlu bir sayısal model elde etmiştir. Bu amaçla Shangler de sonlu farklar yöntemini kullanmıştır. Ayrıca geliştirdiği modelde, lastiğin kalıptan çıkarıldıktan sonraki soğuma sürecinde de pişmeye devam ettiğini gözönünde bulundurmuştur.

Kong ve diğerleri (1986), halka şeklindeki bir lastik malzemenin pişirilmesi sırasındaki sıcaklık dağılım ve değişimini sonlu farklar yöntemi ile üretmiştir. Bu çalışmada, farklı süreler boyunca pişirilen örneklerin artık pişme ısıları diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile ölçülerek ısı denklemindeki tepkime ısı-ısı-pişme derecesi ilişkisini ortaya koymuşlardır. Ayrıca bu çalışmada karışımların ısı iletkenliklerinin karışım içindeki dolgu maddesi, yağ ve kükürt miktarı ile nasıl

değiştirdiği de belirlenmiştir. Fakat bu çalışmada da elde edilen sıcaklık dağılımı ve değişimi silindirik koordinatlarla sınırlı kalmıştır.

Veltman ve Hastenberg (1988) Etilen-Propilen-Monomer (EPM) kauçuğunun peroksitle pişirildiği bir pişirme sistemi için silindirik koordinat sisteminde sıcaklık dağılımı ve değişimini tıretmiştir. Bu çalışmanın öncekilerden en önemli farkı, pişirilen karışım içinde, sıcaklık artışı ile artan basıncın da gözönünde bulundurulmuş olmasıdır.

Lastiğin karmaşık yapılı, çok katmanlı ve değişken sınır koşullarına sahip olduğu düşünülerek başka bir çalışmada ise böyle bir eniyileme (optimizasyon) probleminin ancak sonlu elemanlar yöntemi ile çözülebileceği ileri sürülmüştür (Toth ve diğ., 1991). Kullanılan modelde, incelenen türdeki lastiğin yapısında bütün karışımların ısı iletkenlik ve ısı sığası değerleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada kullanılan kinetik modelde, pişme (curing) süreci yanısıra ön ısıtma (induction) süreci de incelenmiştir. Ön ısıtma sürecinin, pişme hızı üzerinde etkili olabileceği düşünülürse, bu oldukça iyi bir yaklaşımdır. Tepkime ısısı değerleri de toplam pişme ısısı değerinin, seçilen kinetik modele göre diferansiyel bir eşitlik ile belirlenen pişme derecesinin çarpımından elde edilmiştir. Fakat bu çalışmada da lastik karışımlarının pişme sonrası bölgesinde sadece düzlük (plato) davranışı sergiledikleri yaklaşımı kabul edilmiş ve yoğunluk değerlerinin pişme derecesi ile değişmediği kabul edilmiştir. Ayrıca ısı aktarımını modellenmesi adımıında, kalıp ve pişirme torbası bölgeleri değerlendirme dışında bırakılmış ve bu bölgelerin sıcaklıkları sadece değişmez sınır koşulu olarak alınmıştır.

Han ve diğ. (1996) bir çalışmalarında, Toth'un geliştirdiği modele ek olarak, lastik kesitinin yanısıra ısı aktarımından sorumlu pişirme torbası ve kalıp bileşenlerinin de değerlendirildiği daha kapsamlı bir model geliştirilmiştir. Bu modelin oluşturulması için de elde edilen problemin çözümünde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Toth'un çalışmasında değerlendirilen lastik için 10 farklı karışım kullanılmışken, Han, 16 farklı karışım için problemi çözmüştür. Ayrıca, karışımların yoğunlukları da pişme derecesinin bir fonksiyonu olarak alınmıştır.

Başka bir çalışmada ise, lastik karışımlarının pişirilmesi için geri dönmeyi de hesaba katarak yeni bir kinetik model ortaya atılmıştır (Rimondi ve diğ., 1996).

Han, 1999 ve 2000 yıllarında yaptığı iki çalışmada (Han ve diğ., 1999, Han ve diğ., 2000), pişirme süreci için Rimondi ve Toth'un önerdikleri kinetik modelin bir benzerini kullanarak, ilk çalışmalarında, basit bir pişirme presinde üç farklı karışımdan oluşan bir lastik malzeme diliminin pişirilmesi sırasında pişme derecesini zamana ve pişirme sıcaklığına bağlı bir fonksiyon olarak modellemiştir. Daha sonraki çalışmasında ise, basit pişirme presi yerine endüstriyel boyuttaki bir lastik pişirme makinasında, karmaşık yapıdaki lastiğin pişmesinin modellenmesinde bu kinetik modeli uygulamıştır. Ancak bu çalışmada, lastiğe ısı aktarımını gerçekleştiren kalıp ve pişirme torbasındaki sıcaklık dağılım ve değişimleri değerlendirilmemiştir.

2.3. Pişme Derecesini Belirlemek İçin Kullanılan Yöntemler

2.3.1. Gözenekliliğin ölçülmesi

Lastik karışımlarında enuygun pişme derecesini ölçmek için farklı teknikler kullanılır. Bilinen en eski ve en basit yöntem, lastiği oluşturacak karışımları ayrı ayrı olmak üzere belirli sürelerde pişirip gözenekliliğine bakmaktır. Gözenekliliğin kaybolduğu an enuygun pişme süresi olarak tanımlanabilir. Pratikte gözenekliliğin kaybolduğu an, karışımın yoğunluğunun değişmez kalmaya başladığı süre olarak kabul edilir. Ayrıca belirli sürelerde pişirilmiş bu karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri ölçülebilir ve bu özelliklerin en iyi düzeyde olduğu pişirme süresi de enuygun pişirme süresi olarak tanımlanabilir. Fakat bu da oldukça zahmetli ve uzun zaman gerektiren bir yöntemdir (Mandal ve diğ., 2005).

2.3.2. Eşdeğer pişme süresi hesabı

Lastik gibi kalın kesitli ve karma (kompozit) yapıli malzemeler için pişme düzeyini tahmin etmekte yaygın olarak kullanılan bir yöntem de eşdeğer pişme hesabıdır. $X(t_r, T_r)$, keyfi olarak seçilen bir T_r sıcaklığında t_r süresinde elde edilen pişme düzeyini belirtmek üzere, $X(t, T)$ ifadesi de aynı karışımın çiğ halinden alınan

örneğin, t süresi boyunca bir T sıcaklığında pişirilmesi sonunda elde edilen pişme düzeyini ifade etmektedir. $X(t_r, T_r) = X(t, T)$ olduğunda t_r süresine pişme eşdeğeri ya da daha doğru bir ifade ile eşdeğer pişme süresi denir. Buna göre eşdeğer pişme süresi aşağıdaki eşitlik yardımıyla bulunabilir:

$$t_r = t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.1)$$

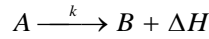
Bu hesaplarda esas alınan Arrhenius eşitliğidir. Dolayısıyla E_a ilgilenilen karışımın etkinleşme (aktivasyon) enerjisi, R ise ideal gaz değişmezidir. Bu yaklaşımda eşdeğer pişme süresi hesaplanırken, pişme tepkimesinin 1. derece tepkime kinetiğine göre yürüdüğü kabulü yapılmaktadır. Bu durum, yöntemin en önemli eksikliğidir. Oysa, lastik karışımlarının pişirilmesi sırasında meydana gelen tepkimelerin çok daha karmaşık bir kinetik mekanizma ile yürüdüğünü gösteren çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Redding ve Smith, 1971, Isayev ve Deng, 1988, Chan ve diğ., 1994, Ding ve Leonov, 1996). Eşdeğer pişme hesabı yapılan noktalar genellikle lastikte en zor pişen ve pişme sırasında geri dönme olasılığı yüksek bölgelerden seçilir (Toth ve diğ., 1991).

2.3.3. Isıl çözümlenmeler

DSC de elastomerik sistemler için hem ısıveren (ekzotermik) olan pişme hem de ısılanan (endotermik) geri dönme süreç özelliklerinin belirlenmesi için kullanılacak uygun bir ısıl tekniktir. Bu teknikte, seçilen lastik karışımları belirlenen sıcaklık aralığında ve oksijenli parçalanmaya engel olmak için inert bir atmosferde belirli bir hızda ısıtılarak pişme tepkimesinin gerçekleşmesi sağlanır. Termogramlardaki ısıveren bölgeden elde edilebilecek olan entalpi değeri J/g cinsinden pişme ısını verir. Isılanan bölgenin varlığı ise pişme tepkimesinin tamamlanmış olduğunu ve artık çaprazbağların parçalanması şeklinde gerçekleşen bozunma (geri dönme) olayının olduğunu gösterir.

Çiğ bir karışım DSC’de ısıtıldığında, polimerin yapısına, pişiricilerin ve karışımdaki diğer katkı maddelerinin türüne ve miktarına bağlı olarak farklı entalpi değerleri elde edildiği görülmüştür. Aynı karışım, değişmez sıcaklıkta farklı sürelerde pişirildikten sonra DSC termogramları çekildiğinde ise, pişme derecesi arttıkça, entalpi değerinin düştüğü görülmüştür. Tamamen pişmiş bir lastik malzeme örneği incelendiğinde ise, entalpi değeri 0’dır. Bu örnek daha fazla ısıtıldığında ise, ısılan bir davranış gösterir ve burada elde edilen entalpi değerinden ise geri dönme derecesi tahmin edilebilir (Mandal ve diğ., 2005, Chough ve Chang, 1996, Likozar ve Krajnc, 2006, Lopez-Manchado ve diğ., 2003).

Kauçukların kükürtle pişirilmesi sırasında meydana gelen temel tepkimede dönüşme şöyle tanımlanabilir:



Burada A: Pişme tepkimesine giren maddeler

(Kauçuk+kükürt+hızlandırıcılar+aktivatörler)

B: Çaprazbağlı ürün (pişik/vulkanizat)

k: Özgül hız değişmezi

ΔH : Tepkime ısısı

Dönüşüm (pişme derecesi) ise şöyle tanımlanabilir:

$$X_n = \frac{\Delta H_u - \Delta H_{ct}}{\Delta H_u} \quad (2.2)$$

Burada; ΔH_u = Çiğ karışımın entalpisi, $\Delta H_{ct} = t$ süresince pişmiş karışımın entalpisidir.

2.3.4. Kimyasal yöntemler

Pişmenin belirli adımlarında çaprazbağ yoğunluğunu kimyasal yollarla ölçerek pişme derecesini tahmin etmek de bilinen en eski yöntemlerden biridir (Nordlander, 1928,

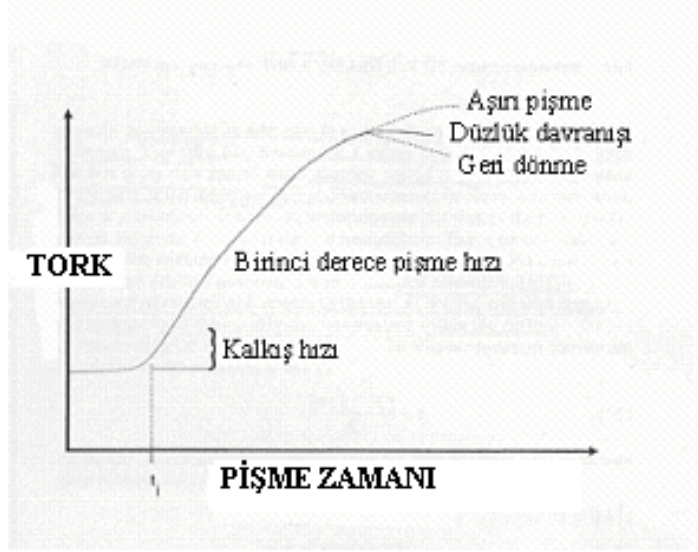
Blake, 1930). Bu yöntemde tepkime ilerledikçe serbest kükürt miktarının azalacağı temelinden yola çıkılarak, kimyasal olarak serbest kükürt miktarını sürekli ölçmek yoluyla, pişme derecesinin tahmin edilmesidir. Bu yolla elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde pişme hızının sadece bir bileşenin derişimindeki değişimle orantılı olduğu ve tepkimenin birinci dereceden bir hız eşitliği ile ifade edilebileceği söylenebilir. Oysa pişme olayının çaprazbağlanma yanında kükürt çıkışı, zincir parçalanması ve zincirin değişikliğe uğraması gibi tepkimelerin gerçekleşmesi sonucu, sadece tek bir bileşenin derişimindeki değişimle ifade edilmesinin zor olduğu açıktır (Redding ve Smith, 1971).

2.3.5. Reometri

Pişme derecesini ölçmek için en gerçekçi sonuçların alınabildiği tekniklerden biri de reometri tekniğidir. Bu amaçla ODR (salınlımlı disk reometresi) veya MDR (hareketli kalıplı reometre) kullanılır. Bu cihazlarda verilen bir hareketli (dinamik) zorlanma için gereken tork değeri ölçülerek kaydedilir. Tork değerlerinin zamanla değişimini gösteren eğriye de “reometre eğrisi” adı verilir. Pişme sırasında aprazbağlanmadaki net artış, tork değerindeki artış olarak kendini gösterir (Wang ve diğ., 2005, Arrilaga ve diğ., 2007).

2.4. Pişirmenin Kinetiği

Pişme sırasında lastiğin sınır koşullarının belirtilmesi ve geometrik olarak tanımlanmasına ek olarak, pişme derecesinin tahmin edilebilmesi için doğru kinetik modelin seçilmesi de çok önemlidir. Pişme tepkimesinin ilerleyişi, tipik bir reometre eğrisinden yola çıkılarak incelendiğinde temel olarak üç bölgeden meydana geldiği görülür. Lastik karışımları için elde edilen üç temel tork-zaman ilişkisi Şekil 2.4’te verimiştir (Toth ve diğ., 1991). Bu bölgeler ön ısıtma, pişme ve pişme sonrası (over-cure) bölgeleri olarak adlandırılırlar.



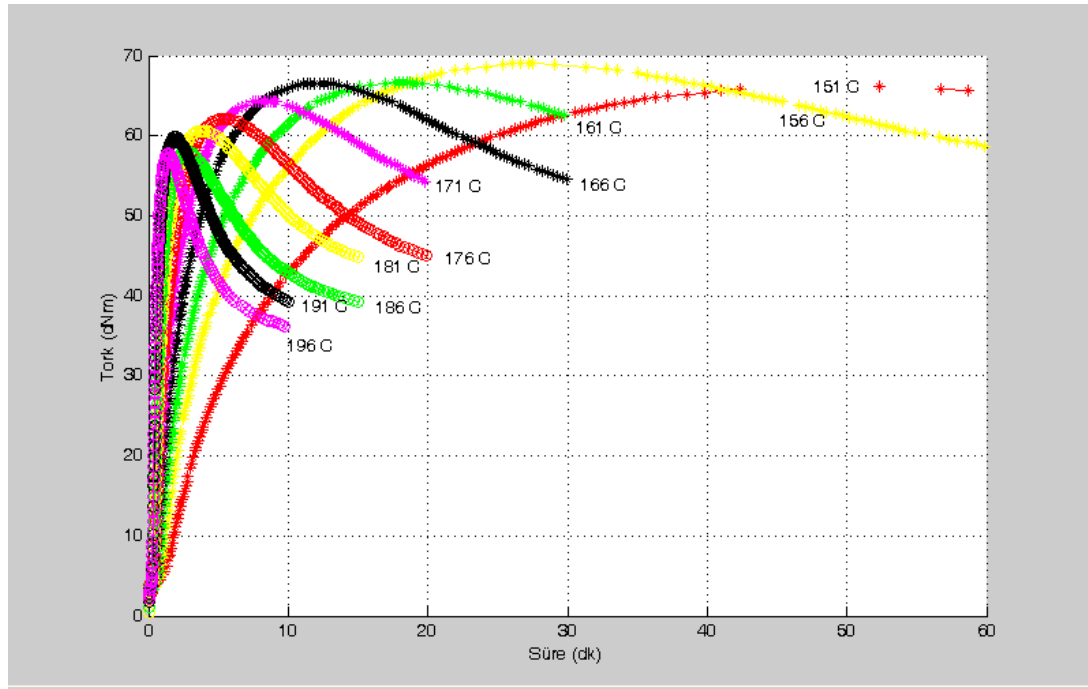
Şekil 2.4: Tipik bir reometre eğrisi

Isıtmanın başlangıcında, t_i ön ısıtma süresinde tork değeri hiç değişmez ya da fark edilemeyecek kadar az değişir. Bu bölgede karışım yumuşamış, kalıbı doldurmuş ve kükürt halkaları açılmaya başlamıştır. Daha sonra tork değerinde ani bir artış olur. Bu sıçrama bölgesindeki eğime kalkış hızı (accelerating rate, initial rate) denir. Bu bölgeden sonra çaprazbağlanmanın enyüksek (maksimum) olduğu ilk noktaya (t_m) kadar olan bölgede (curing bölgesi) hız, birinci dereceden bir tepkime hızı modeline uyar. Pişme sonrası bölgesindeki eğri, lastik karışımının ve kullanılan pişirici sistemin özelliklerine bağlı olarak üç farklı şekilde olabilir. Çaprazbağ miktarı enyüksek olduktan sonra ısıtma devam etse de değişmiyorsa bu tip davranış düzlük (equilibrium, non-reversion) davranış olarak adlandırılır. Eğer sıcaklık arttıkça çaprazbağ oluşumu, pişme bölgesinden farklı hızda devam ediyorsa, bu duruma aşırı pişme (marching cure) denir. Bu noktadan sonra pişmiş lastik malzemenin kopma dayanımı değişmemesine karşın zorlanım katsayısı (modülüs) ve sertlik değerleri artar, esnekliği azalır. Oluşan çaprazbağlar ısı etkisiyle artık bozulmaya başlamışsa bu durum geri dönme olarak tanımlanır ve reometre eğrisinde tork değerinin hızla düşmesi şeklinde kendini gösterir.

Lastik karışımlarının pişme hızları ve enuygun pişme süreleri bu eğriler kullanılarak belirlenir. Reometre eğrisinin en düşük ve en yüksek tork değerlerinin alındığı bölge, kuvvet ekseninde (y) 100 eşit parçaya bölündüğünde küçükten büyüğe doksanınıcı

noktanın zaman eksenindeki (x) karşılığına “enuygun pişme süresi”, bir başka deyişle “ t_{90} ” adı verilir.

Farklı bileşimlerdeki lastik karışımlarının pişme davranışlarının farklı olduğu bilinmektedir. Özellikle karbon siyahının dolgu maddesi olarak kullanıldığı karışımlarda kauçuk-dolgu etkileşimi nedeniyle, farklı sıcaklıklardaki pişme tepkimelerinde, aynı pişme düzeyi için elde edilen tork değerinin çok farklı olabildiği görülmüştür (Toth ve diğ., 1991, Wagner ve Sellers, 1959). Bu etki Şekil 2.5’te açıkça görülmektedir. Şekilde, aynı lastik karışımının farklı sıcaklıklarda çekilmiş reometre eğrileri birlikte verilmiştir. Pişirme sıcaklığı arttıkça, elde edilen en yüksek tork değeri azalmaktadır. Böylelikle, bir lastik karışımının pişmesi sırasında elde edilebilecek tork değerinin karışımın bileşimine ve pişmenin gerçekleştiği sıcaklığa bağlı olduğu söylenebilir.



Şekil 2.5: Bir lastik karışımının farklı sıcaklıklardaki reometre eğrileri

2.4.1. Kabul gören çaprazbağlanma kinetik modelleri

2.4.1.1. Klasik model

Lastik karışımlarının pişme düzeyinin belirlenmesinde kullanılan en eski yaklaşımlardan biri reometre eğrisi üzerinden herhangi bir anda okunan tork değerini, enyüksek ve endüşük tork değerleri ile kıyaslamaktır. Buna göre herhangi bir andaki pişme düzeyi;

$$X(t) = \frac{\Gamma_t - \Gamma_0}{\Gamma_{\max} - \Gamma_0} \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada Γ_t herhangi bir anda okunan tork değerini, Γ_{\max} ve Γ_0 ise sırasıyla enyüksek tork değeri (MH) ve endüşük tork değerini (ML) vermektedir. Bu yaklaşımın en önemli eksikliği düşük pişirme sıcaklıklarında daha yüksek MH değerleri elde etmeyi açıklayamamasıdır. Bunun üzerine yapılan çalışmalarda, ele alınan tek bir karışım için geniş sıcaklık aralıklarında reometre eğrileri çekilmiş ve çalışılan en düşük sıcaklıktaki ML ve MH değerleri kullanılarak klasik yaklaşım iyileştirilmiştir (Alliger and Sjothun, 1965, Isayev ve Sujan, 2006, Likozar ve Krajnc, 2007). Buna göre pişme düzeyi aşağıdaki eşitlikle açıklanmaktadır:

$$X(t) = \frac{\Gamma_r(T) - \Gamma_0(T)}{\Gamma_{\max}(\min T) - \Gamma_0(\min T)} \quad (2.5)$$

Burada (T) indisi ile gösterilen büyüklükler pişme düzeyinin hesaplanması istenen pişirme sıcaklığı, $(\min T)$ indisi ile gösterilenler ise çalışılan endüşük sıcaklıktaki tork değerlerini ifade etmektedir.

2.4.1.2. Kamal modeli

Literatürde lastik karışımlarının çaprazbağlanma kinetiğini açıklamak için sık kullanılan modellerden biri de Kamal modelidir (Kamal, 1974, Toth ve diğ., 1991, Isayev ve Sujan, 2006, Ghoreisy, 2005, Ghoreisy, 2006). Bu modele göre, pişme hızı K_1 , K_2 olmak üzere iki hız değişmezi ve m ve n gibi iki etken ile aşağıdaki gibi açıklanabilir:

$$\frac{dX}{dt} = (K_1 + K_2 X^m)(1 - X)^n \quad (2.6)$$

Burada K_1 tepkimenin geri dönme hızı ile, K_2 ise ilerleme hızı ile ilgili bilgi veren etkenlerdir. m ve n ise, tepkime hızının sıcaklık bağımlılığını tanımlayan etkenlerdir. Geri dönme eğilimi olmayan bazı lastik karışımları ile yapılan çalışmaların sonucunda, (2.6) eşitliğindeki değişkenleri $n=1$, $m=1/2$ ve $K_1=0$ olarak kabul etmenin, kaydadeğer bir hata getirmediği görülmüştür. Bu sadeleştirmeler sonucunda (2.7) eşitliği elde edilir.

$$\frac{dX}{dt} = K_2 X^{1/2} (1 - X) \quad (2.7)$$

(2.7) eşitliği, değişmez sıcaklıkta X pişme düzeyine erişmek için gerekli süreyi bulmak üzere çözüldüğünde, (2.8) eşitliği elde edilir.

$$t = t_i + \left(\frac{1}{K_2} \right) \ln \left(\frac{1 - \sqrt{X_i}}{1 + \sqrt{X_i}} \right) - \left(\frac{1}{K_2} \right) \ln \left(\frac{1 - \sqrt{X}}{1 + \sqrt{X}} \right) \quad (2.8)$$

Burada geçen X_i terimi, tepkimenin henüz çaprazbağlanmanın başlamadığı ön ısınma bölgesindeki pişme düzeyini, t_i ise bu noktaya ulaşmak için geçen süreyi temsil etmektedir. Pratik olarak $X_i=0$ alınabilir. Böylece (2.8) eşitliği sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$t = t_i - \frac{1}{K_2} \ln \left(\frac{1 - \sqrt{X}}{1 + \sqrt{X}} \right) \quad (2.9)$$

(2.9) eşitliği uyarınca çalışılan farklı sıcaklıklarda elde edilen $\ln \left(\frac{1 - \sqrt{X}}{1 + \sqrt{X}} \right)$ değerleri zamana karşı grafiğe geçirilirse, eğimden K_2 değerleri hesaplanabilir. Bu modelde K_2 değerinin tepkime sıcaklığına Arrhenius eşitliği uyarınca bağlı olduğu söylenmektedir. (2.9) eşitliği pişme düzeyini bulmak için daha kullanışlı bir halde aşağıdaki gibi yazılabilir:

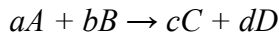
$$X(t) = \left\{ \frac{1 - w \exp[-K_2(t - t_i)]}{1 + w \exp[-K_2(t - t_i)]} \right\}^2, \quad w = \frac{1 - \sqrt{X_i}}{1 + \sqrt{X_i}} \quad (2.10)$$

Ayrıca (2.10) eşitliğindeki w değerinin de pratikte 1'e eşit alınabileceği belirtilmektedir. Buna göre Kamal modeli sadeleştirilmiş olarak (2.11) eşitliğinde görüldüğü gibidir:

$$X(t) = \left[\frac{1 - \exp(-K_2 t)}{1 + \exp(-K_2 t)} \right]^2, \quad K_2 = A \exp \left(\frac{-E_a}{RT} \right) \quad (2.11)$$

2.4.2. Temel tepkime kinetiği

Kimyasal tepkimeler için kullanılan temel kinetik tanımlamada, A ve B tepkimeye giren iki farklı tepken ve C ve D bu tepkimenin sonucu oluşan ürünler olmak üzere, tepkime şematik olarak aşağıdaki gibi gösterilir:



Burada a , b , c ve d ilgili türlerin stokiometrik katsayılarıdır. Bu kimyasal tepkime, “ r ” ile gösterilen tepkime hızı ile ifade edilir. Tepkime hızı, tepkime sırasında zamanla türlerin derişimindeki değişim ile orantılıdır. Tepkime hızı r ;

$$r = -\frac{1}{a} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d} \frac{d[D]}{dt} \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $[X]$, X türünün derişimi göstermektedir. Tepkime hızı ayrıca,

$$r = k[A]^m [B]^n \quad (2.13)$$

şeklinde, tepkenlerin herhangi bir andaki derişimleri cinsinden de gösterilir. Burada k , tepkime hızının sıcaklığa bağımlılığını belirleyen tepkime hız değişmezi, $m + n$ toplamı da tepkimenin toplam derecesidir. Tepkime hız değişmezinin sıcaklık bağımlılığı 1884'te J.H. van't Hoff ve 1889'da S. Arrhenius tarafından ampirik bir eşitlikle tanımlanmıştır. Bu eşitlik, “*Arrhenius yasası*” olarak bilinmektedir (Levenspiel, 1972).

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (2.14)$$

Burada E_a tepkimenin etkinleşme (aktivasyon) enerjisini, A bir ön-üstel değişmezi, k_B Boltzman değişmezini ve T de sıcaklığı temsil etmektedir. Etkinleşme enerjisi E_a , tepkenlerin ürüne dönüşebilmesi için potansiyel enerji yüzeyinde aşmaları gereken enerji engeli olarak tanımlanır. Arrhenius yasasına göre, hız değişmezi $k(T)$, sıcaklığın artmasıyla artar. Birçok tepkimenin hızının Arrhenius yasasına uygun bir sıcaklık bağımlılığı göstermesiyle birlikte, bu yasaya uymayan tepkimelerin sayısı da oldukça fazladır. Bu durum genellikle, tamamlanmış kabul edilmesine karşın, tepkenlerin ve ürünlerin kararlı hale geçmek için etrafını çevreleyen moleküllerle çarpışmaya devam ettiği tepkimelerde görülür. Bu çarpışmalar sadece henüz enerji açasından yüklü (energetic) olan ara türlerin arasında gerçekteşir. İyon-molekül tepkimeleri, katalitik tepkimeler ve katı faz tepkimeleri, tepkime hızının sıcaklık bağımlılığının genellikle Arrhenius yasasına uymadığı tepkime türlerine örnek olarak verilebilir.

Arrhenius yasasına uyan tepkime kinetiğinde, r_i türü atomların çarpışma sayısının, r_j türü atomların çarpışma sayısına oranı yaklaşık olarak $\exp((E_j - E_i)/k_b T)$ ile orantılıdır. Burada E_i ve E_j , sözü geçen iki türün etkinleşme enerjileridir. Tepkimeye giren atomların çok fazla enerji yüklü ve sıcak olmaları durumunda ise bu oran önemli ölçüde değişir. Bunun gibi dengede olmayan, yüksek enerjili ve farklı fazlarda olabilen türlerin girdiği tepkimelerin hızlarını tahmin etmek üzere kapsamlı kuramlar geliştirilmiştir (Kostin, 2008).

Sözü geçen karmaşık sistemlere örnek olarak gaz-sıvı karışımları arasında gerçekleşen tepkimeler verilebilir. Bu tür tepkimelerin ilerleme mekanizmaları genellikle iyi bilinmez ve basit kinetik mekanizmalarla açıklanmaları çok zordur. Farklı hızlarda gerçekleşen çok sayıda alt adımdan oluşan tepkime mekanizmaları vardır. Simon (2007), mekanizmanın karmaşık olduğu tepkimelerin $\frac{d[X]}{dt} = k(T)f([X])$ şeklinde temel tepkime kinetiği ile açıklanamayacağını göstermiştir. Bununla birlikte hız değişiminin sıcaklık bağımlılığının tepkimenin tamamında Arrhenius yasasına uymadığı gösterilmiştir. Özellikle karmaşık katı faz tepkimelerinde, hızın sıcaklık bağımlılığının, tepkimenin farklı dönüşüm aralıklarında ayrı ayrı incelenmesi gerektiği gösterilmiştir. Farklı bölgeler için hız değişimini tanımlayan ampirik eşitliklerdeki katsayıların da, etkinleşme enerjisi ve ideal gaz değişimi gibi fiziksel anlamlar taşımasının gerekmediği belirtilmiştir (Kolek ve diğ., 2007).

Katı faz tepkimeleri genellikle çok sayıda fiziksel ve kimyasal olayın birlikte gerçekleştiği karmaşık tepkimelerdir. Bu sistemleri temsil eden karmaşık kinetik eşitlikleri birlikte çözmek oldukça zordur. Bunun yerine tepkimeyi belirli dönüşüm aralıklarında ayrı ayrı inceleyerek, elde edilen deneysel sıcaklık-hız ilişkisi bilgilerini kendi aralarında değerlendirmek, uygulaması daha kolay ve daha doğru bir yöntemdir (Simon, 2005a, Simon, 2005b, Simon ve Kolman, 2001, Simon, 2006, Simon, 2004).

Çok sayıda çalışmada hız değişiminin sıcaklık bağımlılığı Arrhenius yasasına uymayan eşitliklerle açıklanmaya çalışılmıştır (Flynn, 1997, Rodante ve diğ., 2000,

Dollimore ve diğ., 1996a, Dollimore ve diğ., 1996b, Laidler, 1972). Önerilen bu eşitlikler arasından en yaygın tercih edilenler ise aşağıdaki gibidir:

$$k(T) = AT^m \quad (2.15)$$

$$k(T) = Ae^{DT} \quad (2.16)$$

(2.15) ve (2.16) eşitliklerine sırasıyla “Harcourt ve Esson eşitlikleri” denir ve burada A , m ve D , incelenen tepkimeye göre değişiklik gösteren değişmezlerdir. Bu eşitlikler, günümüzde katı hal parçalanma tepkimelerinin kinetik olarak aydınlatılmasında başarıyla uygulanmaktadır.

Bir çalışmada, SrCO_3 ve BaCO_3 karbonatların katı haldeki parçalanma tepkimeleri Harcourt ve Esson’un Arrhenius yasasına uymayan kinetik yaklaşımları kullanılarak açıklanmıştır. Harcourt yaklaşımında, tepkimelerin çekirdeklenme ve büyüme adımlarının çözümlenmesi (analiz) için klasik eşitlikler temelinde eşsıcaklık (izotermal) katı hal tepkime kinetiği kullanılmıştır. Parçalanma adımı $\ln(\text{zaman})$ ’a karşı $\ln(1-X)$ grafiği (X : tepkime ilerleme derecesi) için, sıcaklık arttıkça doğrusallıktan uzaklaştığı saptanmıştır (Maitra ve Bandyopadhyay, 2008).

Sözü geçen çalışmada Harcourt ve Esson eşitlikleri klasik tepkime kinetiğine uyarlanarak açıklanmıştır. Tepkime hızının sıcaklıkla ilişkisini tanımlayan Arrhenius yasası aşağıdaki gibi gösterilir:

$$k(T) = Ae^{-E/RT} \quad (2.17)$$

Burada R , (2.14) eşitliğinden farklı olarak ideal gaz değişmezini göstermektedir. Klasik tepkime kinetiğinde tepkime hızı, hız değişmezi ve dönüşme cinsinden şöyle verilir:

$$\frac{dX}{dt} = k(T)f(X) \quad (2.18)$$

Eşsıcaklıkta olmayan tepkimeler için ise bu kinetik eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$k = \frac{(dX/dT)b}{f(X)} \quad (2.19)$$

Burada b terimi ısıtma hızını temsil etmektedir. Arrhenius yasası (2.19) eşitliğine uygulandığında,

$$\ln \left[\frac{(dX/dT)b}{f(X)} \right] = \ln A - E/RT \quad (2.20)$$

eşitliği elde edilir. (2.20) eşitliği çözüldüğünde (2.21) eşitliği elde edilir:

$$g(X) = \int_0^X \frac{dX}{f(X)} = \frac{A}{b} \int_{T_i}^T e^{-E/RT} \quad (2.21)$$

Burada T_i tepkimenin başlangıç sıcaklığı ve T de tepkimenin ilgilenilen bölgesindeki sıcaklıktır. Tepkime kinetik verilerinin (2.21) eşitliği kullanılarak çözümlenmesine “integral yöntem” denir. $\int e^{-E/RT} dT$ teriminin analitik yolla çözümü olanaksız olduğundan, (2.21) eşitliğinin yaklaşık çözümünü elde etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Wanjun ve diğ., 2003, Maitra ve Bandyopadhyay, 2008). Bu çalışmalarda $f(X)$ fonksiyonunu, Arrhenius yasasındaki E_a ve A 'e eşdeğer kinetik değişmezlerle çözümlenmeye çalışılmıştır. Burada, tepkime hızının, iki katı faz arasındaki arayüzeyde olan hareketin hızıyla denetim altında tutulduğu kabul edilmiştir.

Bazı araştırmacılar Arrhenius yasasına uymayan katı hal tepkimelerinde tepkime hızının sıcaklıkla olan ilişkisini, kuvvet serilerine açarak çözümlenmişlerdir (Simon, 2005a, Flynn, 1997). Bu amaçla, kolay denetlenebilen ve ürün derişimleri kolay saptanabilen katı hal tepkimelerinden bazılarını seçerek, bu tepkimeler için Arrhenius yasasının yerine kullanılacak ampirik eşitlikler türetmişlerdir. Bu

eşitliklerden Harcourt ve Esson eşitlikleri, çok sayıda çalışmada kullanılmıştır (Shih, 2007, Rodante ve diğ., 2000, Dollimore ve diğ., 1996a, Dollimore ve diğ., 1996b.)

Harcourt ve Esson eşitliğini (2.19) eşitliğine uyguladığımızda,

$$\ln \left[\frac{(dX/dT)b}{f(X)} \right] = DT^m \quad (2.22)$$

elde edilir ve (2.22) eşitliğinin çözümü sonucu,

$$\int g(X) = \int_0^X \frac{dX}{f(X)} = \frac{D}{b} \int_{T_i}^T T^m dT \quad (2.23)$$

elde edilir. Burada T_i tepkimenin (bozunmanın değil) başlangıç sıcaklığı ve T ise tepkimenin ilgilenilen bölgedeki (X ,bozunma) sıcaklıktır. (2.23) eşitliği aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$g(X) = \frac{D}{b} \frac{T^{m+1}}{m+1} + C \quad (2.24)$$

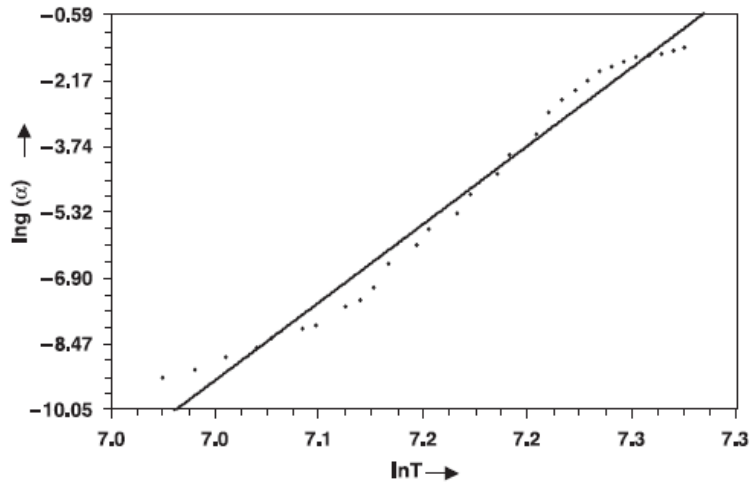
Burada $g(X) = \int_0^X dX/f(X)$ ve C de integrasyon değişmezidir. Bu eşitlik basitçe şöyle yazılabilir:

$$g(X) = BT^{m+1} + C \quad (2.25)$$

Burada $B = D/b(m+1)$ 'dir. T yeteri kadar yüksek olduğunda, D sayısı da yeterince küçük olur ve ihmal edilebilir. Bu durumda (2.25) eşitliğinin her iki tarafının da logaritmaları alındığında,

$$\ln [g(X)] = \ln B + (m+1) \ln T \quad (2.26)$$

elde edilir. Burada m , $\ln T - \ln [g(X)]$ grafiğinin eğiminden hesaplanabilir (Şekil 2.6). BaCO_3 ve SrCO_3 'ün katı halden parçalanarak tepkimeye girmelerinin incelendiği sistemler için bu ilişki incelendiğinde bağlanım (regresyon) katsayıları sırasıyla 0,9536 ve 0,9701 gibi değerler almıştır. Bu da Harcourt ve Esson eşitliklerinin, Arrhenius yasasına uymayan benzer katı hal tepkimelerinde, tepkime hızı-sıcaklık ilişkisinin belirlenmesinde oldukça başarılı olabileceği sonucunu vermektedir.



Şekil 2.6: BaCO_3 için $\ln T - \ln [g(X)]$ grafiği (Maitra ve Bandyopadhyay, 2008)

Simon (2006), poliolefinlerin ısı parçalanması hızının sıcaklık ile değişiminin Arrhenius yasasına uymadığı, bunun yerine, kinetik verilerin (2.15) ve (2.16) eşitlikleri ile daha iyi açıklanabildiği göstermiştir. Dondurulmuş gıdaların farklı düşük sıcaklıklarda saklandıklarındaki ömürlerini belirlemek üzere yapılan çalışmalarda da, gıdaların bozunma hızlarının, saklama sıcaklığı ile değişiminin Arrhenius yasasından önemli ölçüde sapmalar gösterdiği görülmüştür (Leenson, 1999, Petrou ve diğ., 2002).

2.5. Lastik Bileşenlerinin Isıl Özellikleri

2.5.1. Lastik bileşenlerinin ısı sığaları

Özgül ısı sığası (spesifik ısı kapasitesi), maddelerin ayırt edici özelliklerinden olup, birim miktardaki (kütle ya da mol sayısı) maddenin sıcaklığını 1°C arttırabilmek

için gerekli ısı enerjisinin miktarı olarak tanımlanır. Katılar ve sıvılar için büyüklüğü $0,1-5 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ aralığında değişir. Birçok madde için ısı sığası değerleri sıcaklıkla artar.

Lastiğin pişirilmesi sırasında sıcaklık dağılımını etkileyen etkenlerden biri de model lastiği oluşturan bileşenlerin ısı sığalarıdır. Isı denkleğini çözmek için bu büyüklüklerin sıcaklığa ve pişme düzeyine bağımlılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. İlgilenilen bileşenlerin çoğunda olduğu gibi, karışımların ısı sığası değerleri, karışımı oluşturan bileşenlerin ısı sığalarının ağırlıkça ortalamalarına eşittir (Tong ve Yan, 2003). Bir karışımda vulkanizasyonun herhangi bir anında hem çaprazbağlanmış, hem de çaprazbağlanmamış kısımların birlikte bulunduğu göz önüne alınarak, herhangi bir anda bir bileşenin ısı sığası:

$$C_p = XC_{pc} + (1 - X)C_{pu} \quad (2.27)$$

olarak gösterilebilir. Burada X pişme düzeyi olmak üzere,

C_{pc} : Tamamen çaprazbağlı karışımın ısı sığası,

C_{pu} : Tamamen çığ karışımın ısı sığası

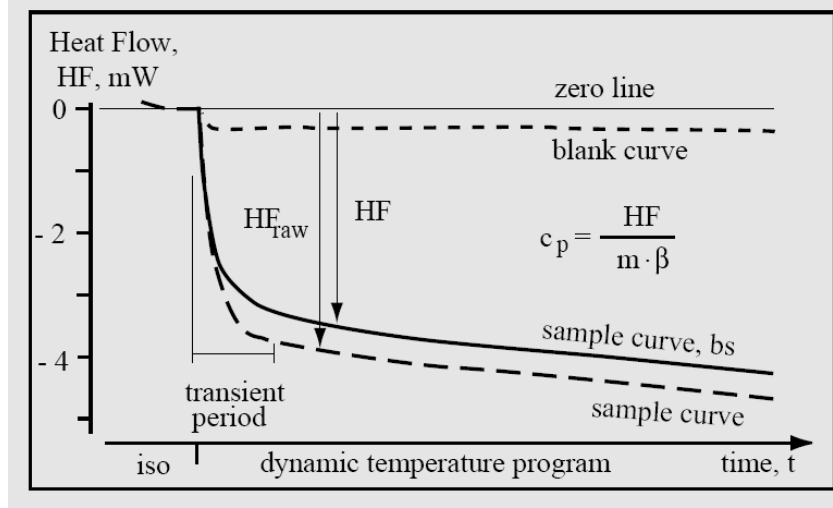
değerlerini göstermektedir. Bu büyüklükler ayrıca pişme sırasında erişilmiş olan sıcaklığa da bağlıdır. Bu bağıllık katılar için genellikle doğrusal olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir. Daha yüksek dereceden polinomlarla ifade edilmesi yoluyla ise daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

$$C_{pc} = a_c + b_c T \quad (2.28)$$

$$C_{pu} = a_u + b_u T \quad (2.29)$$

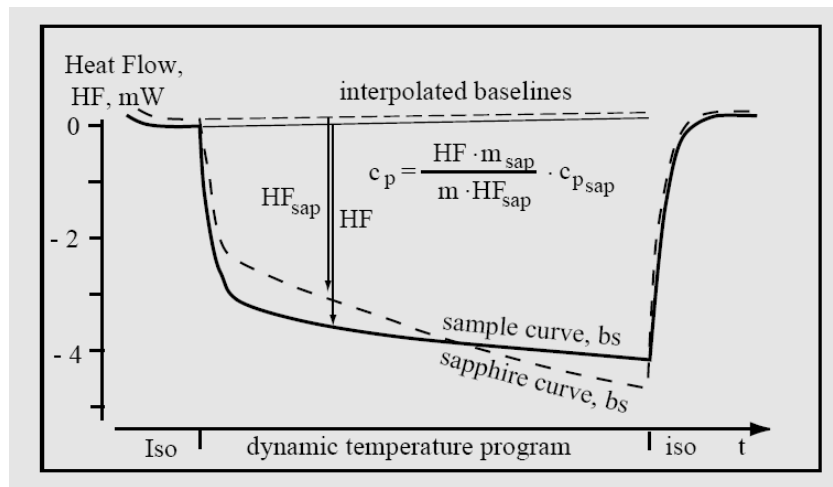
Maddelerin ısı sığalarını belirlemede kullanılan en yaygın teknik DSC tekniğidir. DSC tekniğinde bu amaçla uygulanan iki yöntem vardır. Bunlarda birincisi “Direkt yöntem”, ikincisi ise “Safir yöntemi”dir. Direkt yöntemde ısı sığası, ısı aktarımı olayında dinamik denge kurulduğu andan sonra ısı akısının ısıtma hızı ve örnek

kütlesi çarpımına bölünmesi ile bulunur. Şekil 2.7’de bu amaçla alınan bir DSC termogramı şematik olarak verilmiştir (Buhr ve diğ., 1998, Reisen ve diğ., 1998).



Şekil 2.7: Örnek bir DSC termogramından direkt yöntem ile ısı sığasının hesaplanması (Buhr ve diğ., 1998)

Safir yöntemi ise, ayar (kalibrasyon) örneği olarak safir kullanılmasından dolayı bu adı almıştır. Bu yöntemde, incelenecek olan örneğin DSC termogramının, safirin DSC termogramı ile karşılaştırılması yoluyla ısı sığasının belirlenmesi esastır. Bunun için 3 ölçüm yapılması gereklidir. Birincisi boş örnek kabı, ikincisi safir ve son olarak da bilinmeyen örnek aynı koşullarda ısı akısına tabi tutulur. Şekil 2.8’de safir yöntemi ile ısı sığası hesaplanması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Örnek bir çoklu DSC termogramından safir yöntemi ile ısı sığasının hesaplanması (Buhr ve diğ., 1998)

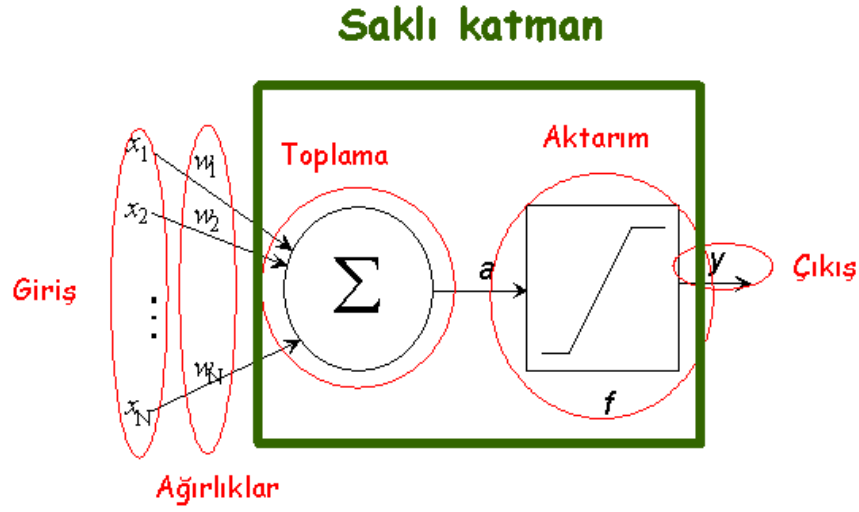
3. YAPAY SINIR AĞLARI

YSA, biyolojik sinir sisteminin çalışma biçiminden esinlenerek yazılmış, örnekler sayesinde ortaya çıkarılmış özellikler üzerinde çeşitli genelleştirmeler yaparak, daha sonra ortaya çıkması olası, ya da o ana kadar hiç rastlanmamış olaylara çözüm getirebilen bilgisayar programları olarak tanımlanabilir. Geleneksel hesaplama yöntemlerinin aksine YSA, bir eğitim takımından çözümü öğrenerek başka hesaplama biçimleri sunar (Efe ve Kaynak, 2000, Elmas, 2003).

3.1. YSA'nın Yapısı ve Elemanları

YSA, genellikle bir giriş katmanı, bir ya da daha fazla saklı katman ve bir çıkış katmanından oluşur. Bir yapay işlem biriminin (nöron) temel yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir. Her katmanın çıkışları bağlantılar aracılığı ile bir sonraki katmana iletilir. Bu bağlantılara ağırlık denir. i . işlem birimi j . işlem birimine işaret (sinyal) gönderdiğinde, i . ağırlık ile çarpılır. i . İşlem biriminin çıkışı x_i olarak gösterilir. j . işlem biriminde ağırlıklandırılmış girişler ($w_{ji} \cdot x_i$) toplanır. Elde edilen toplam, etkinlik (aktivasyon) olarak adlandırılır. Etkinlik, işlem biriminin iç durumudur. Etkinlik belirlendikten sonra işlem birimi, çıkışı belirlemek için işaret aktarım (transfer) fonksiyonlarına uygular.

İnsan beyni; öğrenme, birleştirme, uyarılma ve genelleştirme yeteneği nedeniyle son derece karmaşık, doğrusal olmayan ve paralel dağıtılmış bir bilgi işleme sistemi olarak tanımlanabilir. Beynin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, işlem birimleri arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel yapıda bir işlemcidir.



Şekil 3.1: Bir yapay işlem biriminin temel yapısı

Öğrenme süreci, arzu edilen hedefe ulaşmak için YSA ağırlıklarının yenilenmesini sağlayan öğrenme çözüm yollarını içerir. Genelleme, eğitim ya da öğrenme sürecinde karşılaşılmayan girişler için YSA'nın uygun tepkileri üretmesi olarak tanımlanır. Bu üstün özellikleri ile YSA, karmaşık problemleri çözebilme yeteneği sonucu, günümüzde bir çok alanda uygulama yeri bulmuştur (Elmas, 2003). En yaygın uygulama alanları ana başlıklar altında aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Denetim
- Sistem modelleme
- Tahmin
- Ses tanıma
- El yazısı tanıma
- Parmak izi tanıma
- Fizyolojik işaretleri tanıma, izleme ve yorumlama

3.2. YSA'nın Özellikleri

YSA'nın en temel iki özelliği vardır. Bunlar, doğrusal olmama ve eğitilebilme olarak sıralanabilir (Yurtoğlu, 2005). Doğrusal olmama, bütün sonuçların herbir giriş ile etkileşim içinde olabileceği anlamına gelir. Oysa, doğrusal bir sistemde girişlerin biri

değiştiğinde, çıkış bu değişime orantılı olarak değişir. Bu etki sadece değiştirilen girişin değeri ile bağlantılıdır. YSA, problemin çözümüne özgü olarak uyum sağlayabilme (adaptasyon), bir başka deyişle ağırlıkları yenileme özelliğine sahiptir. YSA'nın bir problemi öğrenebilmesi için, problemin giriş verilerine karşı gelen çıkış verilerinin sağlanması gerekir. Giriş ve çıkış verileri ile tanımlanan öğrenme kümesi yeterli sayıda örnek içermelidir. Öğrenme süreci, sistem girişleri ve sistem çıkışları arasındaki ilişkinin elde edilmesi süreci olarak da tanımlanabilir.

3.3. YSA'nda Öğrenme Çözüm Yolları (Algoritmaları)

YSA, gösterilen örnekten öğrenerek kendi kurallarını oluşturur. Öğrenme, giriş örneklerine veya bu girişlerin çıkışlarına bağlı olarak ağırlık bağlantı ağırlıklarını değiştiren veya ayarlayan öğrenme kuralı ile gerçekleştirilir. Öğrenme kurallarına örnek olarak Delta kuralı, geriye yayılım (back-propagation) öğrenme çözüm yolu, Hopfield ve Hebb kuralları verilebilir.

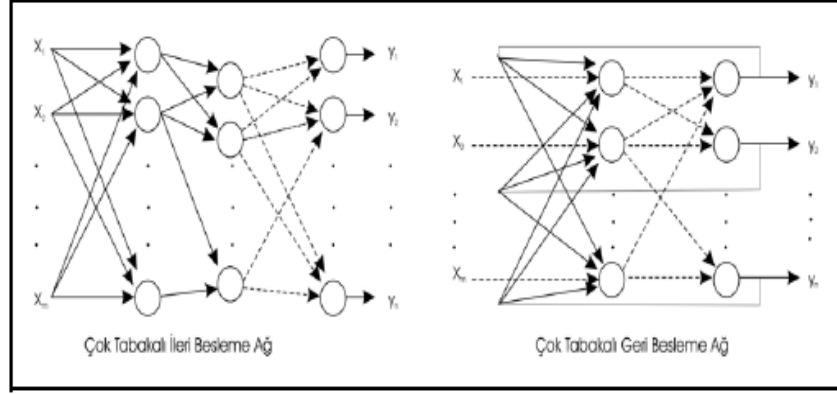
İki tür öğrenme söz konusudur. Bunlar Eğitici ve Eğitici olmayan öğrenme olarak adlandırılırlar: Eğitici öğrenme, kullanılan veri serisi için giriş değerlerine karşı çıkış değerlerinin bilindiği öğrenme tipidir. YSA'nın ürettiği çıkış, gerçek (hedef) değer ile karşılaştırılır. Her giriş için aradaki fark değeri, bazı matematiksel işlemlere tabi tutularak mevcut ağırlık değerine eklenecek değer belirlenir ve böylece yeni ağırlık değeri elde edilmiş olur. Ağa tanımlanan yineleme sayısı (epoch number) kadar bu işlem tekrarlanır. Amaç, hatayı en aza indirmektir.

Eğitici olmayan öğrenme tipinde ise, çıkış değerleri önemli değildir. Eğitimin amacı ağa uygun etkenleri ayarlamakla giriş vektörü kümesine özgü olabilecek konuma uygunlukları belirlemektir.

3.4. YSA Mimarileri

En yaygın sınıflama şekli, ileri beslemeli (feed-forward) ve geri beslemeli (recurrent) ağlar olarak ikiye ayırmaktır. Bu mimariler de kendi arasında tek katmanlı ve çok katmanlı (multi layer) olarak ayrılırlar. Şekil 3.2'de çok katmanlı ileri

beslemeli ve geri beslemeli ağ mimarileri şematik olarak verilmiştir (Yurtoğlu, 2005).



Şekil 3.2: Çok katmanlı, ileri ve geri beslemeli YSA mimarileri (Yurtoğlu, 2005)

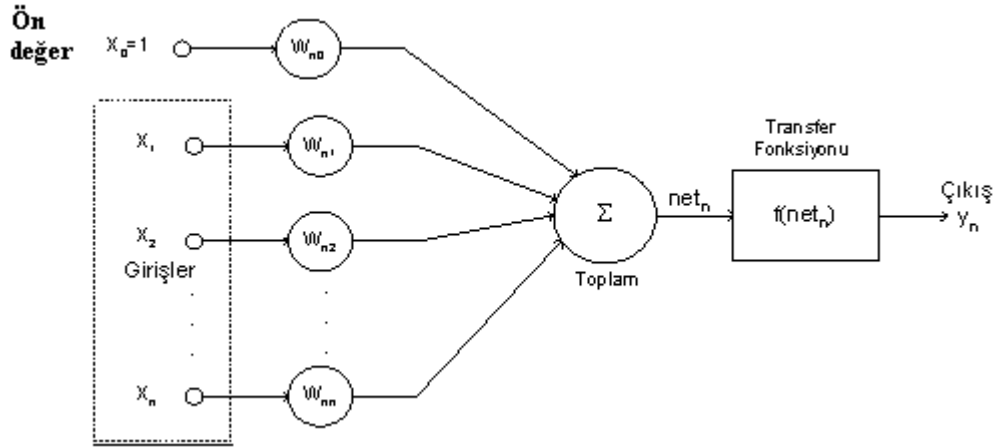
İleri beslemeli ağlarda katmanlar sadece ileri yöndedir, tersine bir yönelme yoktur. Herbir katmandaki işlem birimleri sadece bir sonraki katmanın işlem birimlerine beslenir. Ortada en az bir gizli katman bulunmaktadır. Bu tip ağlarda, herbir giriş, ilk gizli katmandaki her işlem birimine bağlıdır. Tamamı birbirine bağlı olduğu durumda “tam bağlı (fully-connected)” adını alır. Geri beslemeli ağlarda ise en az bir işlem birimi sonraki katmanlardaki işlem birimlerine de beslenir. Böylece girişler, hem ileri, hem de geri yönde aktarılmış olur. Bu mimari, daha çok eğitimsiz öğrenmede uygulanır.

3.5. Çok Katmanlı Almaç YSA’nda İşlem Birimi Matematiği

İleri beslemeli YSA’nın en yaygın ve en çok kullanılanı Çok Katmanlı Almaç (ÇKA, Multi-Layer Perceptron, MLP) modelidir. YSA’nın en temel elemanı olan işlem birimi modeli Şekil 3.2’de görülmektedir. Giriş çapraz listesi (matris), x_1, x_2, \dots, x_n elemanlarının ağırlıklarla çarpımının toplamı genellikle doğrusal olmayan bir aktarım fonksiyonundan $f(net)$ geçirilerek işlem biriminin çıkışı aşağıdaki eşitlikte görüldüğü gibi elde edilir:

$$y_n = f(net_n) = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ni} x_i + w_{n0}\right) \quad (3.1)$$

burada, W_{ni} ve W_{n0} ; n. işlem biriminin ağırlıkları olup, W_{n0} ; $X_0=1$ olarak seçilen ön değer (bias) bağlı olduğu ağırlıktır.



Şekil 3.3: Bir YSA işlem birimi modeli (Yurtoğlu, 2005)

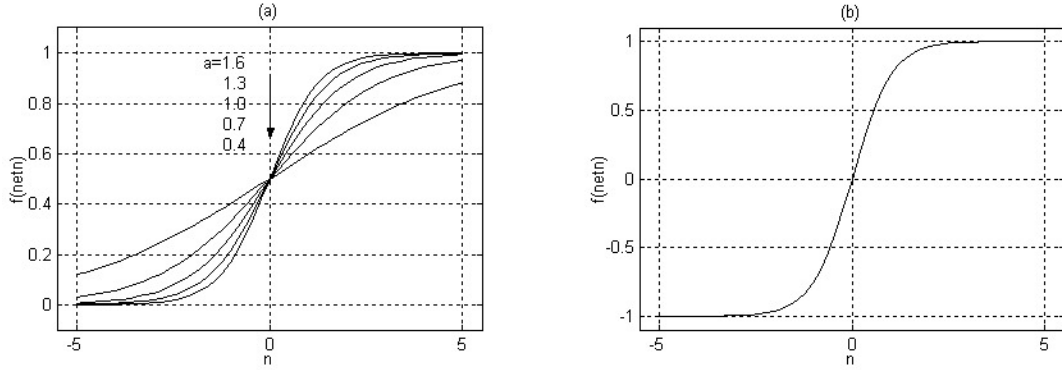
Ön değer girişinin amacı hücrenin çıkışına etki edecek zayıflatıcı etkenleri ortadan kaldırmaktır. Şekil 3.3'te gösterilen toplam işlemi, ağ yapısına göre enbüyük alan, enküçük alan, ya da çarpım fonksiyonu olabilir. İşlem birimi modellerinde, gerçekleştirilecek işleve göre çeşitli tipte aktarım fonksiyonları kullanılabilir. Doğrusal (pureline), doyumlu-doğrusal (limitter), eşik (hardlimitter) ve sigmamsı (sigmoid) fonksiyonlar YSA'nda kullanılan başlıca aktarım fonksiyonlarıdır.

Sigmamsı aktarım fonksiyonlarının iki türü vardır. Şekil 3.4'te grafikleri verilen tek yönlü sigmamsı ve çift yönlü sigmamsı (hiperbolik tanjant) fonksiyonları, türevi alınabilir, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olması nedeniyle doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan YSA'nda tercih edilir. Sigmamsı aktarım fonksiyonları değişmez etkenli yada uyarlanabilir etkenli seçilebilir. Tek yönlü ve çift yönlü sigmamsı fonksiyonların matematiksel ifadesi ise sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir:

$$f(net_n) = \frac{1}{1 + \exp(-a * net_n)} \quad (3.2)$$

$$f(\text{net}_n) = \tanh(\text{net}_n) = \frac{\exp(\text{net}_n) - \exp(-\text{net}_n)}{\exp(\text{net}_n) + \exp(-\text{net}_n)} \quad (3.3)$$

(3.3)'te a katsayısı sigmamsı fonksiyonun eğimini belirler ve genellikle değişmez seçilir. Şekil 3.4.a incelendiğinde a katsayısı azaldıkça eğrinin eğimi artmaktadır. Bu demektir ki, a katsayısı yeterince büyük bir katsayı seçildiğinde sigmamsı fonksiyon, eşik aktarım fonksiyonu halini alacaktır. Bu katsayının YSA'nın eğitiminde öğrenme oranını hızlandırıcı etkisinin olduğu bilinmektedir. Ayrıca, a katsayısının YSA'nın eğitim sürecinde uyarlanmasıyla değişmez katsayılı fonksiyona göre daha iyi bir başarımlar (performans) elde edildiği söylenmektedir (Haykin, 1999).



Şekil 3.4: Aktarım fonksiyonları: (a) sigmamsı, (b) çift yönlü sigmamsı

YSA, yapay sinir hücrelerinin (işlem birimi) birbirleri ile; genellikle katmanlar şeklinde bağlanmasından oluşur. Şekil 3.5'te yapısı görülen ÇKA YSA modeli; girişlerin bağlandığı giriş katmanı, bir ya da daha fazla saklı katman ve bir de çıkış katmanından oluşur. Şekil 3.5'te görülen modelin tüm katmanlardaki işlem birimleri birbirine tam bağlıdır. Ağın y_k (burada $k=1$ ya da 2) çıkışları; ikinci katmanın y_j çıkışlarının bağlı olduğu W_{kj} ağırlıklarıyla, aşağıdaki gibi bir ilişkisi vardır:

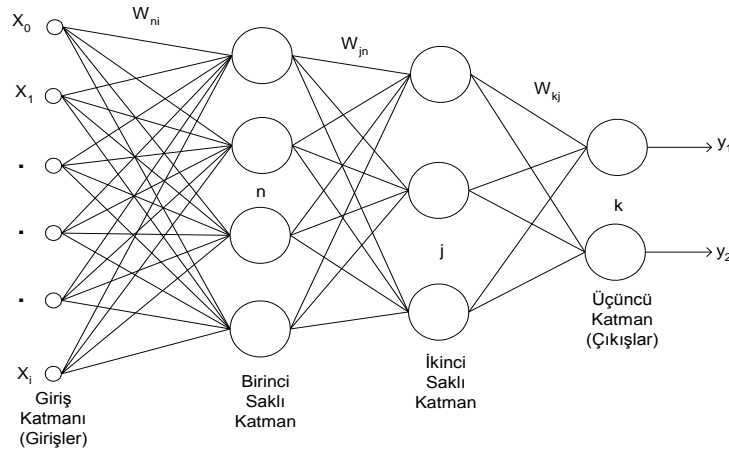
$$y_k = f^3(\text{net}_k) = f^3\left(\sum_{j=0}^J W_{kj} y_j\right) \quad (3.4)$$

Burada $f^3(\text{net}_k)$; çıkış katmanının çıkışını belirleyen aktarım fonksiyonudur.

Aynı şekilde ikinci saklı katmanın y_j çıkışlarının bulunması için girişlere kadar olan ilişkisinin elde edilmesi sonucunda ağı y_k çıkışları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y_k = f^3(net_k) = f^3 \left\{ \sum_{j=0}^J W_{kj} f^2 \left[\sum_{n=0}^N W_{jn} f^1 \left(\sum_{i=0}^I W_{ni} X_i \right) \right] \right\} \quad (3.5)$$

burada W_{ni} ; ağı X_i girişlerinin birinci saklı katmana bağlı olan ağırlıkları, W_{jn} ; birinci ve ikinci saklı katman arasındaki ağırlıkları, W_{kj} ; ikinci saklı katman ile çıkış katmanı arasındaki ağırlıkları ve f^1, f^2, f^3 sırasıyla birinci saklı katman, ikinci saklı katman ve çıkış katmanına ait aktarım fonksiyonlarını göstermektedir.



Şekil 3.5: Çok katmanlı almaç YSA modeli

Aktarım fonksiyonlarının farklı simgelerle belirtilmesi; her katmana ait aktarım fonksiyonunun farklı seçilebileceğini gösterir. Genellikle çıkış katmanında doğrusal (pureline) aktarım fonksiyonu kullanılır. Eşitlik 3.5'te aktarım fonksiyonları doğrusal seçildiğinde, ağı bir çapraz listeler çarpımı dönüşümünü sağladığı anlaşılmaktadır. Oysa ki, doğrusal olmayan aktarım fonksiyonlarıyla ağ, giriş ve çıkış arasında doğrusal olmayan bir dönüşüm sağlamaktadır. Bu dönüşümün enuygun biçimi, giriş takımına göre istenen çıkışların belirlemesi sürecinde, ağırlıkların yenilenmesi ile gerçekleşir. Bu sürece ağı öğrenmesi ya da eğitilmesi denir. Öğrenme süresince, ağı ağırlıkları; istenen çıkışlar ile ağı o anki çıkışları arasındaki farkı azaltacak şekilde ayarlanır. Elbette bu işlem hesaplama yükü açısından oldukça zahmetlidir. Ancak hatanın geriye yansıtılması temeline dayalı etkin bir öğrenme çözüm yolunun geliştirilmesi, ÇKA YSA'nın kullanılmasını yaygınlaştırmıştır (İnal ve Aras, 2005).

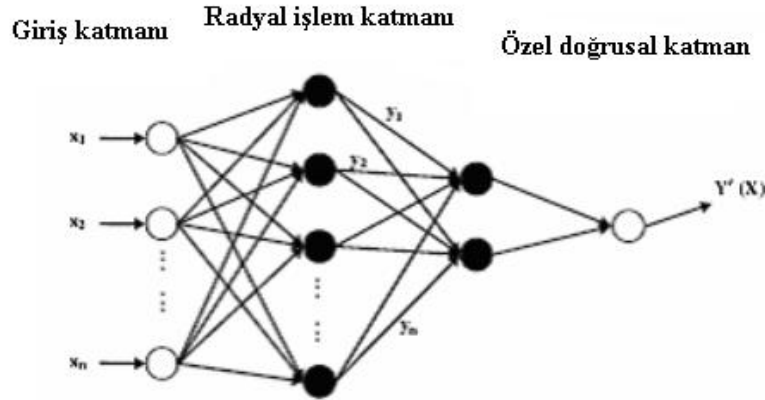
YSA eğitim takımına göre eğitildikten sonra, eğitimde kullanılmayan test vektörleri ile eğitim verisinde oluşabilecek gürültü ve diğer bozucu etkilere karşı, ağ test edilir. Bunun sonucunda ağın belli girişlere göre doğru bir genelleme yapıp yapmadığı, bir başka deyişle istenenleri öğrenip öğrenmediği belirlenmiş olur.

3.6. Genelleştirilmiş Bağlanım YSA

Genelleştirilmiş Bağlanım YSA (Generalized Regression Neural Networks, GRNN), Radyal Temelli YSA (Radial Basis Networks) grubunda yer alan bir ağ tipidir. Şematik olarak Şekil 3.6'da gösterilen bu tip YSA, yapısal olarak ileri beslemeli YSA'lara benzerler (Çelikoğlu ve Cigizoğlu, 2007). Tek bir gizli katmanları vardır ve bu gizli katmanda doğrusal olmayan özel bir aktarım fonksiyonuna sahiptirler. Bu aktarım fonksiyonu (3.6)'da verilmiştir (Demuth ve diğ., 2005).

$$radbas(n) = e^{-n^2} \quad (3.6)$$

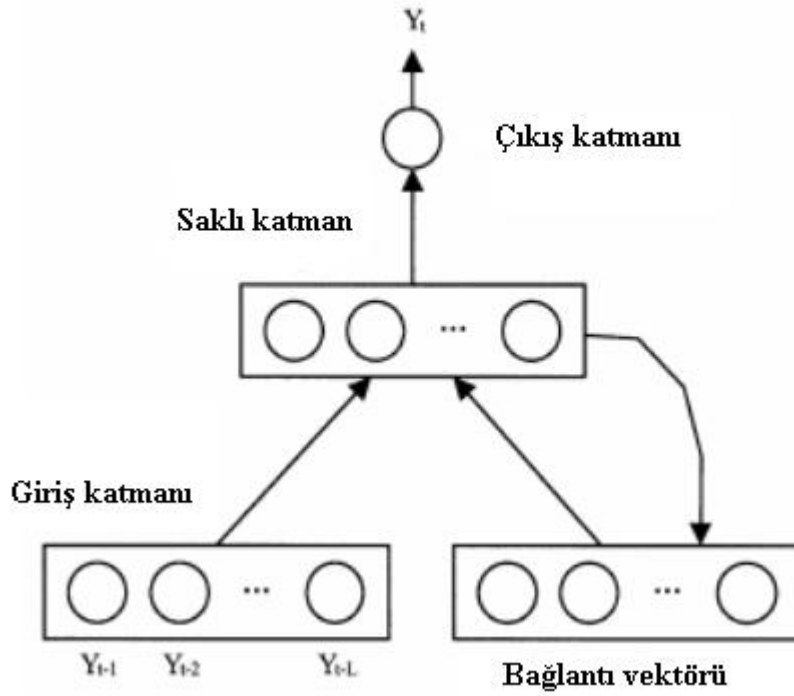
Genelleştirilmiş Bağlanım YSA, genellikle fonksiyon yaklaşımı problemlerinde kullanılan bir ağ tipidir. Bu tip ağlarda ileri beslemeli ağlardaki gibi yinelemeli bir eğitim sözkonusu değildir. Ağ ile birlikte tanımlanan yayılma (spread) etkeni ile ortalama karesel hatayı enküçük yapacak bağlanımın gerçekleştirilmesi esastır. En önemli üstünlüğü ise eğitimin tek seferde olması nedeni ile diğer geri beslemeli öğrenme çözüm yollarına göre yakınsamasının hızlı olmasıdır (Parojcic ve diğ., 2007).



Şekil 3.6: GRNN mimarisinin şematik gösterimi

3.7. Elman YSA

Elman ağı, bir giriş, tek bir saklı katman ve bir çıkış katmanından oluşan YSA'dır. Diğer ağ tiplerinden en önemli farkı, saklı katmandaki işlem birimlerinin çıkışlarının aynı işlem birimlerinin girişlerine de beslenmesidir. Böylelikle geri beslemeli bir ağ yapısı söz konusudur. Geri besleme nedeni ile eğitim süresi, aynı işlem birimlerinde oluşan ileri beslemeli ağların iki katına yakındır. İşlem birimlerinin aktarım fonksiyonları genellikle hiperbolik tanjant olarak seçilir (Demuth ve diğ., 2005). Şekil 3.7'de Temel Elman YSA yapısı verilmiştir (Cho, 2003).



Şekil 3.7: Temel Elman YSA yapısı

3.8. Kauçuk ve Lastikte YSA Çalışmaları

Kauçuk ve lastik alanında YSA'nın kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmaların büyük bölümü lastik tasarımı, lastik pişirme ekipmanlarının tasarımı ve süreç (proses) denetimi konularında yoğunlaşmaktadır (Nakajima ve diğ., 2009, Pietruschka ve Brause, 1999, Ren ve Yao, 2004). Lastik karışımlarının reolojik özelliklerinin YSA ile incelendiği bir çalışma da literatürde mevcuttur (Schwartz, 2001). Bu çalışmada lastik karışımlarının reolojik özelliklerinden ML, MH ve t50

değerleri, karışım bileşimine göre modellenmeye çalışılmıştır. Tek saklı katman içeren, 6 giriş ve 3 çıkış içeren bir ağ kullanılmıştır. 24 farklı karışım hazırlanmış ve bu karışımların bileşimindeki doğal kauçuk, karbon karası, yağ, kükürt, hızlandırıcı ve diğer işlem yardımcıları (processing aids) miktarları giriş değişkenleri olarak alınmıştır.

4. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (FINITE ELEMENT METHOD)

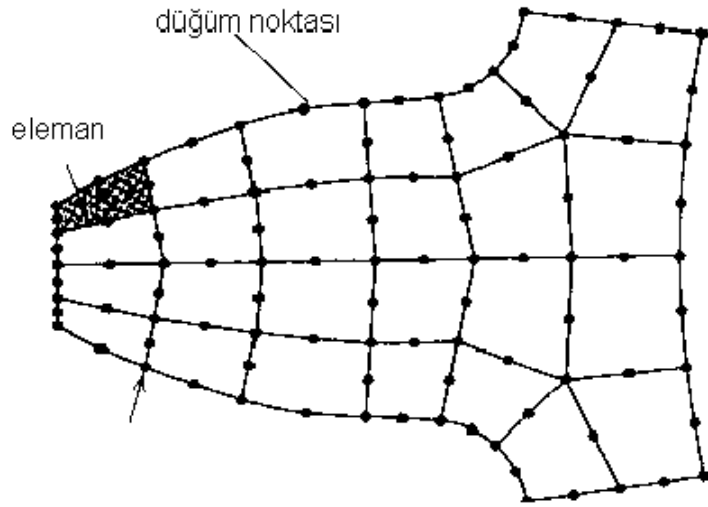
Türdeş (homojen) bir yapıya sahip bir malzemenin ısıtılması veya soğutulması sırasında malzeme bünyesinde meydana gelen sıcaklık dağılımları ve ısı gerilmelerin çözülmesi, genellikle belirli sınır ve başlangıç koşulları için enerji denklemlerinin analitik çözümü ile olanaklı olabilmektedir. Ancak değişen çevre koşullarında, karmaşık geometriye ve özellikle farklı mekanik ve ısı özelliklere sahip malzemelerin, farklı ortamlarda ısı aktarımına maruz kalmaları durumunda malzemelerin her birinde meydana gelen sıcaklık dağılımları analitik yollarla belirlenemez. Bu durumda, gelişmiş sayısal yöntemlerin kullanıldığı kapsamlı çözümler gereklidir (Duranay, 2005).

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte karşılaşılan karmaşık ve zor problemlerin kabul edilebilir bir yaklaşımla çözülmesini sağlayan, fizik ve mühendislikte kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Yöntem ilk olarak 1940'lı yıllarda Hrennikoff ve Mc Henry tarafından yapı çözümlemesi problemlerine uygulanmıştır. Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları ise 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen veya fonksiyonel enküçükleme (minimizasyon) şeklinde formüle edilebilen problemleri çözmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Bu yöntem katı mekaniği, sıvı mekaniği, akustik, elektromanyetizma ve ısı aktarımı gibi alanlarda karşılaşılan; karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, kararlı hal veya zamanla değişken koşullara sahip sistemlere, doğrusal veya doğrusal olmayan sistemlere uygulanabilir.

Bu yöntemde, incelenen geometrik yapı, davranışı önceden belirlenmiş olan sonlu sayıda küçük elemana bölünerek incelendiği için yöntem, "Sonlu Elemanlar Yöntemi" olarak adlandırılır. Çözüm sırasında bu küçük elemanlar, düğüm (nod)

noktalarında tekrar birleştirilirler (Şekil 4.1). Bunun amacı, geometrik yapısını bildiğimiz küçük elemanlar üzerinde inceleme ve çözüm yapılmasının kolay oluşudur. Bu şekilde incelenen probleme bağlı olarak binlerce denklem elde edilir. Birim eleman boyunun küçülmesi, daha hassas çözüm yapılabilmesini sağlarken, işlem süresini de uzatır. Elde edilen denklem takımlarının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır (Durmaz, 2004).



Şekil 4.1: Bir sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanlar

Sonlu elemanlar yönteminin mühendislik problemlerinde kullanımının önemli üstünlükleri vardır. Sonlu elemanlar, boyutları ve şekillerinin esnekliği sayesinde, ilgilenilen cismi oldukça iyi temsil edebilir. Çok bağlantılı ve delikli gibi karmaşık yapıların da kolayca çözümlenmesi olanaklıdır. Değişik malzeme özellikleri taşıyan çok sayıda malzemenin katmanlar halinde bulunduğu karmaşık şekillerin incelenmesini sağlar. Uygulanan yüklerin zamanla değişmesi durumu da incelenebilir.

Sonlu elemanlar yönteminin temel ilkesi öncelikle bir elemana ait sistemin özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp daha sonra tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait doğrusal denklem takımının elde edilmesidir.

Sonlu eleman probleminin çözümünde ilk adım eleman tipinin belirlenmesi ve çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasıdır. Çözüm bölgesinin geometrik yapısı belirlenerek, bu geometrik yapıya en uygun elemanlar seçilmelidir. Elde edilecek sonuçlar, seçilen elemanların çözüm bölgesini temsil etmeleri oranında gerçeğe yaklaşmış olacaktır.

4.1. Sonlu Eleman Tipleri

Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan eleman tipleri boyutlarına göre dört bölüme ayrılabilir (Özcan, 2008). Bunlardan birincisi tek boyutlu elemanlardır. Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilen problemlerin çözümünde kullanılırlar.

İki boyutlu elemanlar, iki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz veya daha fazla düğüm içeren tipleri de vardır. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman, problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir.

Eksenel simetrik (dönel) elemanlar, eksenal simetriklik özelliği gösteren problemlerin çözümünde kullanılır. Bunlar, bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında tam bir dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenal simetri problemlerini iki boyutlu problem gibi çözüme olanağı sağladığı için çok kullanışlıdır.

Üç boyutlu elemanlar arasında en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir.

Dördüncü eleman tipi ise eşetkenli (izoparametrik) sonlu elemanlardır. Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması olanaklı değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken duyarlılıkla tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla sayılarını arttırmak gereklidir. Bu durum, çözülmesi gereken denklem

sayısını artırır ve dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesi ve çözüm zamanının artmasına neden olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara gereksim duyulmaktadır. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta, hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. Eşetkenli sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı dereceden ve aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır.

4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Isıl Çözümleme

Sonlu elemanlar yöntemi ile sürekli ortamlar üzerinde tanımlanmış diferansiyel denklemleri sayısal olarak çözmek olanaklıdır. Bu yöntemle karmaşık bir yapı üzerinde ısı denkleminin çözümü ile, yapı içindeki sıcaklık dağılımı bulunabilir. Genel ısı denkliği (4.1) ve (4.2) eşitliklerindeki gibi gösterilir (Han ve diğ., 1999, Aras ve Oysu, 2007).

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (4.1)$$

$$Q = \rho(-\Delta H) \frac{dX}{dt} \quad (4.2)$$

Burada, malzeme içindeki sıcaklık dağılımını zaman ve yere göre elde edebilmek için, malzemeye ait yoğunluk(ρ), ısı sığası(C_p) ve ısı iletkenlik(k) gibi fiziksel büyüklüklerin, çaprazbağlanma ısısının(ΔH) ve $\frac{dX}{dt}$ terimi ile ifade edilen tepkime kinetiğinin zamana ve sıcaklığa göre çözümlenmiş olması gerekmektedir.

4.3. ANSYS İle Modelleme

ANSYS, günümüzde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar paket programlarından biridir. Bu program mühendislerin dayanım, titreşim, akışkanlar

mekaniği, ısı aktarımı ve elektromanyetizma alanlarında kullanabildikleri genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Sözü geçen uygulamalarda testlerin ya da çalışma koşullarının benzetiminin yapılmasına olanak tanıyan ANSYS, ürünlerin henüz öntipleri (prototip) üretilmeden sanal ortamda test edilmelerini sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki üç boyutlu benzetimler sonucunda yapıların zayıf noktalarının belirlenmesi ve bu noktaların iyileştirilmesi, kullanım ömrü hesaplamaları ve olası problemlerin öngörülmesi de olanaklı olmaktadır.

ANSYS, hem dışarıdan CAD (bilgisayar destekli çizim) programları ile hazırlanmış geometrik verileri kullanmaya olanak tanır, hem de kendi bünyesinde göreceli olarak basit çizimler yapılabilir. Yine kendi bünyesinde, benzer benzetim yazılımlarında olmayan sonlu elemanlar modeli hazırlama (mesh atma) işlemi de yapılabilir. Yüklerin tanımlanması ve çözüm adımı sonrasında çözümlenme sonuçları sayısal olarak ve çeşitli grafikler aracılığı ile görsel olarak elde edilebilir.

Genel olarak, ANSYS kullanılarak sonlu elemanlar çözümlenmeleri üç kademe gerçekleştirilir:

Birinci kademe, problemin tanımlanmasıdır (Preprocessing). Bu kademenin ana adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Anahtar nokta/çizgi/alan ve hacimlerin tanımlanması
- Eleman tipi, geometrisi ve malzeme özelliklerinin tanımlanması
- Çizgi/alan ve hacimlerin sonlu elemanlara bölünmesi (meshing)

İkinci kademe, yüklerin tanımlanması ve çözümdür (Solution). Bu kademe yükler belirlenir, sınır koşulları tanımlanır ve sonuçta çözüme gidilir.

Üçüncü kademe, sonuçların değerlendirilmesidir (Postprocessing). Isıl çözümlenme için bu kademe şunlar yapılabilir:

- Model üzerindeki sıcaklık dağılımının elde edilmesi

- Model üzerindeki sıcaklık vektörlerinin elde edilmesi
- Belirlenen bölgelerdeki ısı akısının ölçülmesi

Herhangi bir işleme başlamadan önce çözümlemenin planlanması çok önemlidir ve benzetimin başarımına doğrudan etkisi vardır. Bir sonlu elemanlar çözümlemesinin amacı, bilinen yükler altında sistem davranışının modellenmesidir. Yukarıda sözü geçen her kademedeki yapılan işlemler, detaylı olarak aşağıdaki gibi anlatılabilir:

4.3.1. Problemin tanımlanması

4.3.1.1. Başlığın belirlenmesi

Problemin sonraki dönemde rahat erişilebilir olması amacıyla yaptığımız işe bir isim verilmesi olarak düşünülebilir. Bu seçenek özellikle aynı temel model üzerinde farklı yükleme seçenekli çözümler gerçekleştirilmesi durumunda oldukça faydalıdır.

4.3.1.2. Modelin oluşturulması

Model genellikle 2D veya 3D uzayında uygun birimler (m, mm, inç, vb.) kullanılarak çizilir. Model, ANSYS önışlemcisi kullanılarak oluşturulabileceği gibi başka bir CAD paketinde hazırlanmış bir dosyanın (IGES, SAT, PARASOLID gibi) ANSYS önışlemcisi tarafından okunması ile de sağlanabilir. Modelin oluşturulması sırasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri çizimde kullanılan birim ile malzeme özellikleri ile uygulanan birimlerin uyumlu olmasıdır. Örneğin; model mm türünden çizildi ise, malzeme özellikleri ve yükler SI birim sisteminde verilmelidir.

4.3.1.3. Eleman tipinin belirlenmesi

Eleman seçimi modelin geometrisine bağlı olarak 1D, 2D veya 3D olabileceği gibi, yapılması düşünülen çözümleme tipine de çok bağlıdır. Örneğin; ısıl çözümlemede kullanılacak eleman tipleri sınırlandırılmıştır.

4.3.1.4. Malzeme özelliklerinin girilmesi

Bu adımda yapılacak çözümlene tipine göre, gerekli malzeme özellikleri doğrusal veya istendiğinde sıcaklığa bağlı olarak değişken şekilde girilebilir. Örneğin; ısı çözümlene için yoğunluk, ısı iletkenlik, ısı sığası gibi malzeme özelliklerinin uygun birim sisteminde tanımlanmış olması gereklidir.

4.3.2. Modelin elemanlara bölünmesi

Modelin elemanlara bölünmesi işlemi, model sürekliliğinin gerekli sayıdaki ayrı parçalara, bir başka deyişle sonlu elemanlara bölünmesidir. Daha çok sayıda eleman genellikle daha doğru sonuçlar verir, fakat daha uzun çözümlene zamanı demektir. Modelin elemanlara bölünmesi, kullanıcı tarafından geometri üzerinde çeşitli seçimlerle yapılabilmekle birlikte, ANSYS tarafından verilen uygun seçenekler kullanılarak otomatik olarak da yapılabilir. Kullanıcı tarafından tek tek tanımlayarak elemanlara bölme işlemi uzun ve zor bir işlemken, otomatik olarak elemanlara bölme işleminde gerekli tek şey model kenarları boyunca eleman yoğunluğunun veya eleman büyüklüğünün belirlenmesidir. Fakat çok karmaşık ve özellikle karma malzemeler içeren geometriler için otomatik olarak sonlu elemanlara ayırmak çoğu zaman olanaklı değildir. Bu bölümde ayrıca eleman tipinin de belirlenmesi gereklidir.

4.3.3. Yüklerin tanımlanması ve çözüm

4.3.3.1. Çözümlene tipinin belirlenmesi

Çözümde kullanılmak üzere durgun (statik) ve geçişken (transient) çözümlene tiplerinden biri seçilmelidir.

4.3.3.2. Yüklerin uygulanması

Yükler, gerilme çözümlenelerinde noktasal bir basınç veya yer değiştirme, ısı çözümlenelerde ise sıcaklık, akışkan çözümlenelerinde hız şeklinde olabilir. Yükler

bir noktaya, bir kenara, bir yüzeye ve hatta toplam cisme uygulanabilir. Yükler model geometrisinde ve malzeme özelliklerinde verilen birimlerde tanımlanmalıdır.

4.3.3.3. Çözüm

Bu kısım tamamıyla otomatiktir. Genel olarak bir sonlu elemanlar çözücüsü üçe ayrılır. Bunlar ön-çözücü, matematik motoru ve son-çözücüdür. Ön-çözücü modeli okur ve matematiksel olarak formüllendirir. Problemin tanımlanması kısmında tanımlanan bütün etkenler, ön-çözücü tarafından denetlenir ve herhangi bir şeyin eksik bırakıldığını bulursa matematik motorunun devreye girmesini engeller. Model doğruysa, çözücü devreye girerek eleman direngenlik çapraz listesini oluşturur ve yer değiştirme, basınç gibi sonuçları oluşturan matematik motorunu çalıştırır. Matematik motoru tarafından üretilen sonuçlar, son-çözücü kullanılarak düğüm noktaları için deformasyon miktarı, gerilme, hız, sıcaklık gibi değişkenlerin değerleri üretilir.

4.3.4. Sonuçların değerlendirilmesi

Bu bölüm sonuçların okunduğu ve yorumlandığı bölümdür. Sonuçlar tablolar şeklinde, çevresel çizimler şeklinde veya deforme olmuş şekil biçiminde sunulabilir. Ayrıca canlandırma (animasyon) yardımı ile modelin zaman içindeki davranışı da gözlenebilir. Yapısal tipteki problem çözümlerinin sunulmasında çevresel çizilmiş grafikler genellikle en etkin araçlardır. Sonuçların değerlendirilmesi bölümü, x,y,z koordinatlarında ve hatta koordinat ekseninde belli bir açıdaki gerilme ve birim şekil değiştirmelerin hesaplanmasında kullanılır. Etkin gerilme ve şekil değiştirme sonuçları ile akma gerilmesi ve şekil değiştirme sonuçlarını da görmek olanaklıdır. Bunların dışında birim şekil değiştirme enerjisi, plastik şekil değiştirme miktarı da görsel olarak kolaylıkla elde edilebilir.

Sonuçlar görsel olarak oldukça etkili bir şekilde sunulabilmesine rağmen, sonuçların kalitesi modelin fiziksel problemi ne kadar iyi yansıttığı ile çok ilgilidir. Başarılı bir çözümleme için dikkatli bir planlamanın yapılması zorunludur.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu amaçla, bölgemizde faaliyet gösteren bir lastik fabrikası bünyesinde üretim miktarı oldukça yüksek olan bir ölçü, model lastik olarak seçilmiştir. Bu lastik, 13 tip lastik karışımı, 2 tip tekstil kord ve 2 tip çelik kord olmak üzere 17 farklı malzemedan yapılmıştır. Tekstil ve metalik kuşaklar, bir tip lastik karışımı ve sırasıyla bir tip tekstil kord ve bir tip metalik kordtan oluşmaktadır. Lastik karışımları, lastik sektöründe yaygın olarak kullanılan ticari kauçuk tipleri ve katkı maddelerinden üretilmektedir. Tekstil kuşaklarda lastik karışımı dışında polimerik ortam (matriks) olarak naylon 6.6 ve polyester bulunmaktadır. Metalik kuşaklar ise AISI 1074 ve AISI 4000 serisi çeliklerden yapılmıştır.

Öncelikle lastik karışımlarının, 151-196 °C aralığında ve eşit artımlı 10 farklı sıcaklıkta; en az pişme (curing) ve düzlük (plato) ve bazılarında geri dönme davranışlarının da gözleendiği sürelerde reometre eğrileri çekilmiştir. Bu çekimler, Alpha marka MDR 2000 reometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra lastiği oluşturan tüm bileşenlerin yoğunlukları, ısı iletkenlikleri, çaprazbağlanma ısıları ve ısı sığaları ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümleri Arşimed yasasına göre hassas terazi yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bileşenlerin ısı iletkenlikleri Motorize ve Komputerize R-Matic ısı iletkenlik ölçüm cihazında, ISO 8301'e göre yapılmıştır. Tepkime ısılarını ölçmek için Mettler Toledo marka DSC 1 model diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) kullanılmıştır. Ölçümler 25-250 °C aralığında 5 °C/dk ısıtma hızı ile yapılmıştır. Isı sığası ölçümleri de aynı cihazda, 25-250 °C aralığında 10 °C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir.

Pişme sürecinde, çeşitli durumlar ve çeşitli çaprazbağlanma kinetik modelleri uyarınca ve lastik içerisindeki sıcaklık dağılımını elde etmek için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır.

5.1. YSA Kullanılarak Reometre Eğrilerinin Modellenmesi

Oluşturulan YSA'nın eğitim ve test verilerini oluşturmak için, 151-196 °C aralığında eşit artımlı olacak şekilde 10 farklı sıcaklıkta çekilen toplam 100 reometre eğrisi koordinat sistemine yerleştirilerek eğriyi oluşturan (x,y) noktaları belirlenmiştir. Bu amaçla TechDig grafik işleme programı kullanılmıştır. Herbir reometre eğrisi için pişme bölgesinde (ML-MH aralığında) yaklaşık 100 nokta belirlenmiş ve bu noktaların %90'ı eğitim, %10'u ise test verilerini oluşturmak üzere kullanılmıştır. Öncelikle seçilen tek bir karışım üzerinde çalışılmış, bu karışımın reometre eğrilerinden elde edilen veriler farklı ağ mimarileri oluşturularak denenmiştir.

5.2. Eşdeğer Pişme Süresi Hesabı

Bu bölümde modellenmesi planlanan lastiğin yapımında kullanılan karışımlar için analitik yolla eşdeğer enuygun pişme süreleri hesaplanmış ve YSA kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tepkimelerin hız değişmezlerini hesaplamak için, 10 farklı sıcaklıkta çekilen reometre eğrilerinden elde edilen t_{10} , t_{30} , t_{60} , t_{80} , t_{90} ve t_{95} noktaları kullanılmış ve 1. dereceden tepkime kabulü yapılmıştır. En küçük kareler yöntemi ile elde edilen doğrunun eğimi tepkime hız değişmezi olarak belirlenmiştir. Böylece her karışım için 10 farklı sıcaklıktaki tepkime hız değişmezi hesaplanmıştır.

Karışımların etkinleşme enerjilerini hesaplamak için ise 151 °C karşılaştırma (referans) sıcaklığı olarak alınmıştır. Eşdeğer pişme sürelerini hesaplamak için ise 151-196 °C aralığındaki ortalama etkinleşme enerjisi değeri kullanılmıştır.

5.3. Çeşitli Düzeylerde Pişirilmiş Olan Lastik Karışımlarının Yoğunluklarının Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde ilgilenilen lastik karışımlarının, ısı denklemindeki değişkenlerden biri olan yoğunluklarının pişme düzeyi ile değişimi $[\rho(X)]$ belirlenmiştir. Bu amaçla, pişme süreci modellenen lastiğin karışımlarının tamamı olan 13 farklı lastik karışımı 0-1 arasında eşit aralıklı olmak üzere 21 farklı pişme

düzeyine kadar pişirilmiştir. Duyarlı bir pişirme sağlayabilmek için örnekler reometre cihazında, 176 °C’de, uygun pişme düzeyini elde edebilmek için daha önceden belirlenen sürelerde pişirilmiştir. Belirli düzeylere kadar pişirilen her örneğe, 176 °C’den oda sıcaklığına soğuyana kadar geçen sürede tepkimenin devam etmesini engellemek için katı CO₂ ile ani soğutma uygulanmıştır. Örneklerin yoğunlukları Arşimed yasası uyarınca çalışan bir duyarlı terazi kullanılarak ölçülmüştür.

5.4. Lastik Karışımlarının Isıl İletkenliklerinin Ölçülmesi

Isı denkleğinde yer alan ve karışım türünün değişmesi ile değişen etkenlerden biri de ısı iletkenlik değerleridir. Karışımların ısı iletkenlik ölçümleri, İzocam Tic. ve San. A.Ş.’de Motorize ve Komputeze R-Matic ısı iletkenlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle ortalama yoğunlukları bilinen 13 farklı karışımdan ayrı ayrı olmak üzere, 600x600x30 mm ebatlarındaki bir kalıbı %2,5 şekillenme fazlası ile birlikte dolduracak miktarda yerleştirilmiştir. Kalın bir dilim olması dolayısı ile, dilimin her bölgesinde türdeş bir pişme elde edebilmek amacıyla düşük bir pişirme sıcaklığı olan 150 °C’de ve 1,7 MPa basınçta çalışan hidrolik preste uygun sürelerde pişirilmiştir. Uygun pişme süreleri 150 °C’de çekilen reometre eğrileri yardımıyla belirlenmiştir.

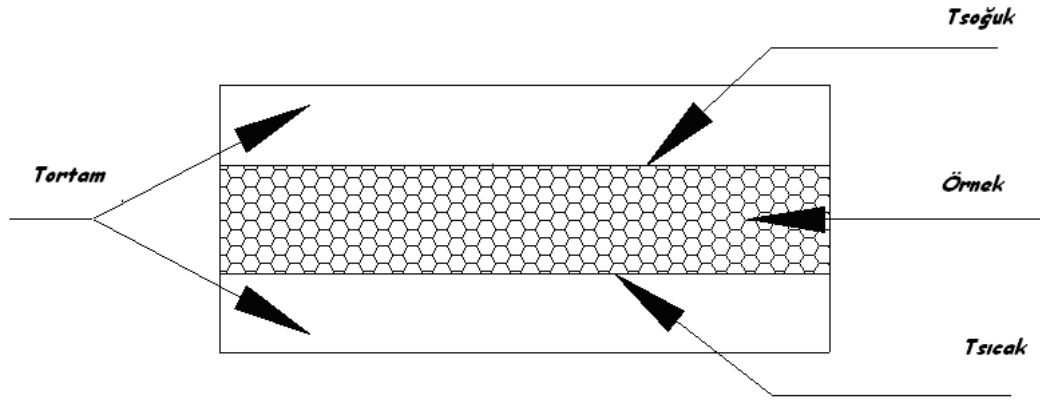
Kullanılan ısı iletkenlik ölçüm cihazı tamamen bilgisayar denetimlidir. Ölçümle ilgili etkenlerin değişimi bilgisayar ekranından izlenebilmektedir. Cihaz, 20 ile 200 mm kalınlıklar arasındaki örneklerin ısı iletkenliklerini ölçebilecek şekilde tasarlanmıştır. 10°C’de ölçüm yapabilmektedir. Cihazın örnek haznesinin tüm yüzeyleri, kenar ısı kayıplarına engel olacak şekilde tasarlanmıştır. Doğru ölçüm alınabilmesi için ölçüm öncesinde ısı akısının, plaka sıcaklıklarının ve deney haznesinin sıcaklıklarının kararlı hale gelmesi gerekmektedir.

Deney yöntemi ISO 8301, TS EN 12667 ve TS 415 EN 12939 standartlarına uygun “Sıcak-soğuk Plaka Yöntemi” olarak anılmaktadır. Plakalar arasında oluşan sıcaklık farkı nedeniyle, sıcak ve soğuk plakalar arasında bulunan örnek üzerinden soğuk plakaya doğru ısı geçişi meydana gelmektedir. Meydana gelen ısı geçişi her iki

plakadaki ısı akısına duyarlı alıcılar tarafından algılanmakta ve mV cinsinden gerilime dönüştürülmektedir. Oluşan gerilimin değeri ayar (kalibrasyon) değışımeziyle çarpılarak W/m² cinsinden ısı akısı hesaplanmaktadır. Isıl elemanlar yardımıyla ölçülen sıcaklık farkından yola çıkılarak da W/mK cinsinden ısı iletim katsayısı cihaz tarafından otomatik olarak hesaplanmaktadır. Örnek haznesinin şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

$$k = \frac{q \times X}{T_{sıcak} - T_{soğuk}} \quad (5.1)$$

- k (W/m K) : Örneğin ısıl iletkenliği
q (W/m²) : Örnek üzerinde meydana gelen ısı akısı
x (m) : Örneğin kalınlığı
T_{sıcak} (K) : Sıcak plakanın sıcaklığı
T_{soğuk} (K) : Soğuk plakanın sıcaklığı



Şekil 5.1: Isıl iletkenlik ölçümü cihazı örnek haznesinin şematik gösterimi

5.5. Model Lastik Bileşenlerinin Çaprazbağlanma Isılarının Belirlenmesi

Lastiğin pişirilmesi sırasında sıcaklık dağılımını etkileyen etkenlerden biri de çaprazbağlanma tepkimesi sırasında ortama verdiği ısıdır. Bu çalışmada kullanılan 13 farklı lastik karışımının farklı bileşimde olduğu, özellikle de farklı pişirici sistemlerden oluştuğu göz önünde bulundurulduğunda, tepkime ısılarının da çok farklı olacağı açıktır. İlgilenilen diğer bileşenler ise farklı yapılarda 2 tip çelik ve 2

tip tekstil kord malzemelerdir. Çeliklerin pişirme sıcaklığı aralığında herhangi bir ısı geçiş göstermediği bilinmektedir (Onaran, 1999). Tepkime ısılarını ölçmek için METTLER TOLEDO marka DSC 1 model diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılmıştır. Literatürde, lastik karışımlarının tepkime ısılarını ölçmek için en az 100 µl hacminde alüminyum krozellerle çalışılmasının uygun olduğundan söz edilmektedir (Armand ve Vergnaud, 1987, Kaisersberg ve Opfermann, 1991, Danes ve Garnier, 2005, Immelman ve Sanderson, 2005). Ölçüm doğruluğunu arttırmak için, 100 µl'lik alüminyum krozeller kullanılmış ve karışımların farklı 3 noktasından örnek alınarak tepkime ısıları ölçülmüştür. İlgili karışımın tepkime ısısı olarak da bu 3 ölçüm sonucunun ortalaması alınmıştır. Ölçümler, 25-250 °C aralığında 5 °C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir.

5.6. Model Lastik Bileşenlerinin Isı Sığalarının Belirlenmesi

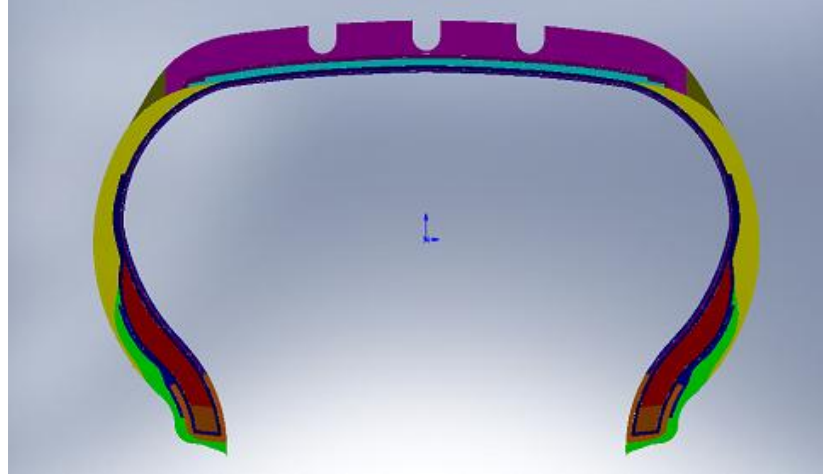
Bu bölümde, model lastik bileşenlerinin ısı sığalarını ölçmek için Metler Toledo marka DSC 1 model DSC cihazı kullanılmıştır. Çiğ karışım ısı sığalarını belirlemek için ölçümler 25-250 °C aralığında 10 °C/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Çaprazbağlanmış örneklerin ısı sığalarını belirlemek için ise, tamamen çaprazbağlanmış örneklerin aynı ısıtma hızında DSC termogramları elde edilmiştir. Isı sığası değerleri, Metler Toledo ısı çözümüleme cihazlarına ait STAR^e yazılımı ile direkt yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yazılım sayesinde, tek bir termogramdan elde edilen 10 farklı sıcaklıktaki ısı sığası değerleri kullanılarak polinomik bağlanım ile her bir bileşen için ısı sığalarının sıcaklık ile ilişkisi elde edilmiştir. Ölçümler, yine 3 kez tekrarlanmış ve bu 3 ölçümün ortalaması alınmıştır.

5.7. Pişmesi Sürecinde Model Lastiğin İçindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilmesi

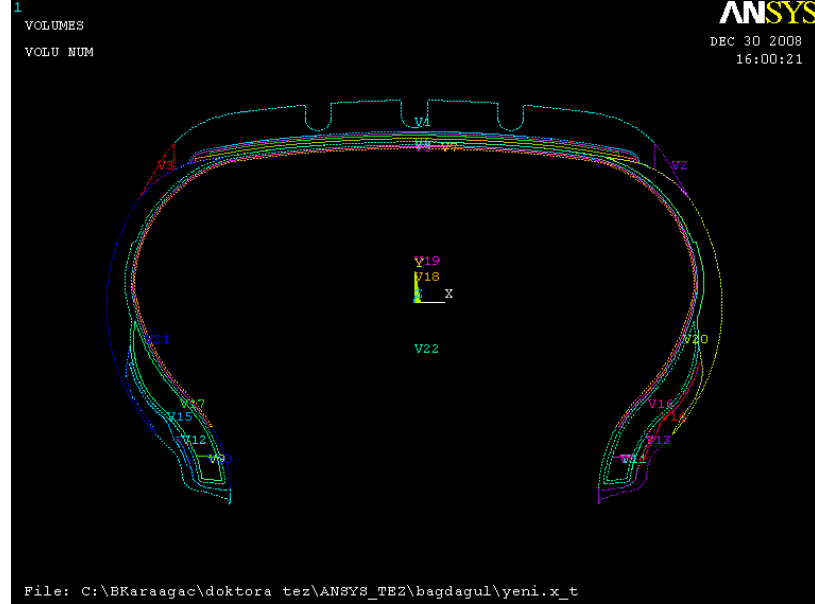
Seçilen model, bölgemizde faaliyet gösteren bir lastik fabrikası bünyesinde üretim miktarı yüksek ve uzun vadede üretilmeye devam edilmesi planlanan bir lastiktir. Bu lastiğin yapımında lastiğin çeşitli bölümlerinde bulunmak üzere 17 farklı malzeme kullanılmaktadır.

5.7.1. Modelin oluşturulması

Şekil 5.2’de modelin CAD resmi görülmektedir. Çizim, ANSYS tarafından tanınabilmesi için PARASOLID formatına dönüştürülmüştür. Modelin ANSYS ekranında görülen formatı ise Şekil 5.3’te verilmiştir.



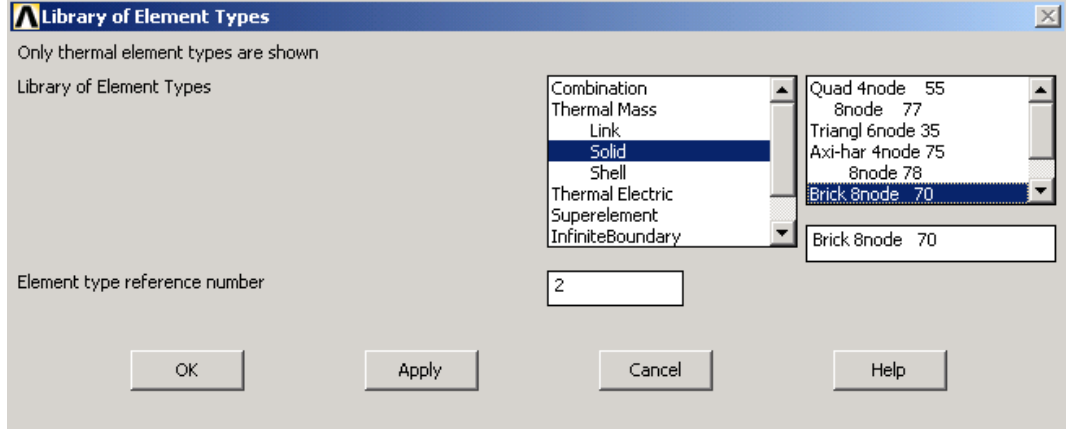
Şekil 5.2: Lastik modelinin CAD resmi



Şekil 5.3: Modelin ANSYS ekranındaki görüntüsü

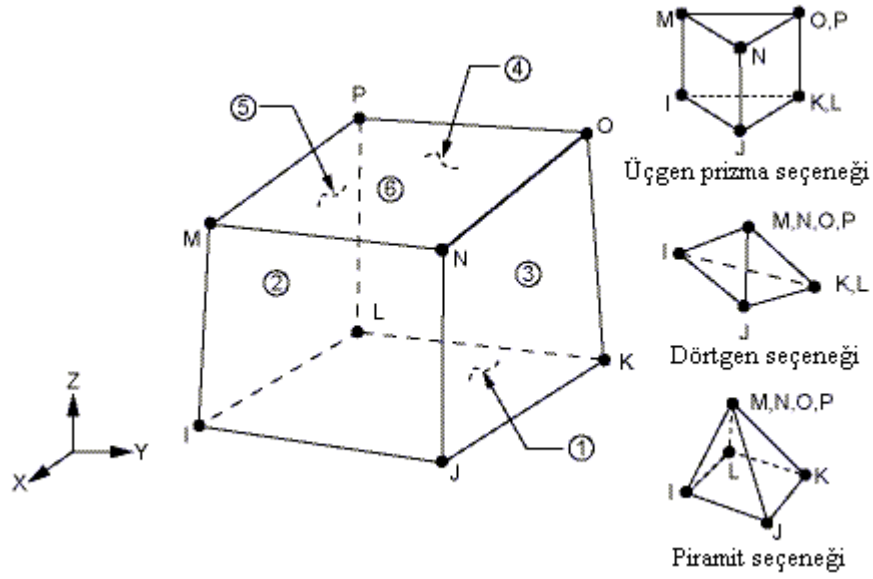
5.7.2. Eleman tipinin belirlenmesi

Bu çalışmada ısıl çözümlemede karmaşık geometrideki modeller için uygun bir eleman tipi olan SOLID 70 seçilmiştir. Seçim ekranı görüntüsü Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.4: ANSYS'te eleman tipinin belirlenmesi

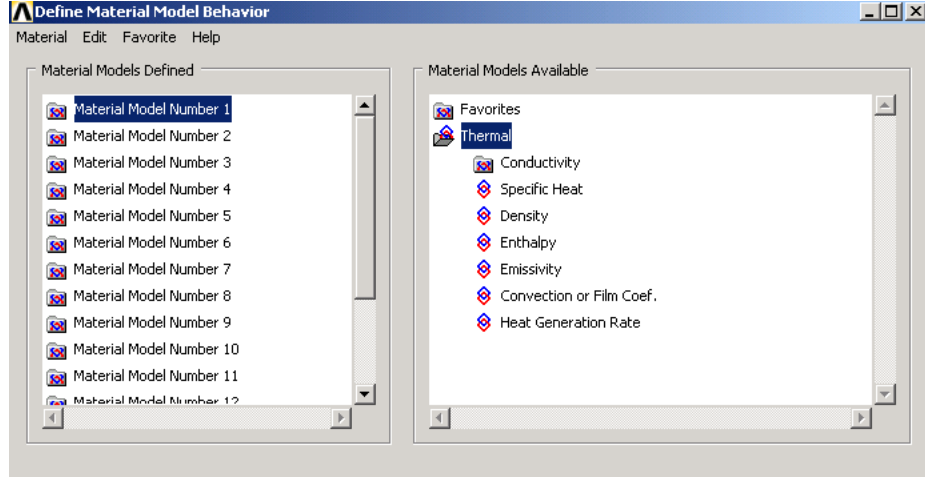
SOLID 70, hem yataşkın hal, hem de zamana bağılı değişimlerin olduğu 3D ısı iletimi problemlerinde başarılı olan bir eleman tipidir. Bu elemanın geometrisi Şekil 5.5'te görüldüğü gibidir. 8 adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Modelin elemanlara bölünmesi adımımda, gerektiğinde model geometrisine uyum göstererek çözüm başarımını arttırabilecek, Şekil 5.5'te görülen farklı geometrik yapıda bir eleman tipine dönüşebilme yeteneğine sahiptir.



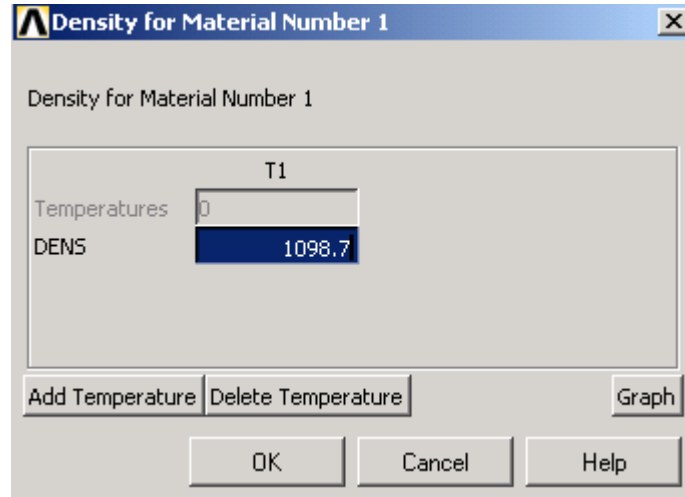
Şekil 5.5: SOLID 70 elemanın geometrisi

5.7.3. Malzeme özelliklerinin girilmesi

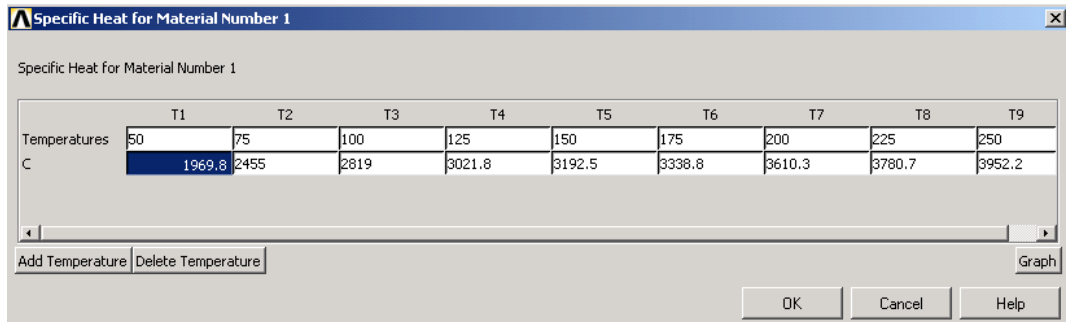
Model olarak seçilen lastik, 13 tip lastik karışımı, 2 tip tekstil kord ve 2 tip çelik kord olmak üzere 17 farklı malzemeden yapılmıştır. Tekstil ve metalik kuşaklar, bir tip lastik karışımı ve sırasıyla bir tip tekstil kord ve bir tip metalik kordtan oluşmaktadır. Modelde, her bir kuşağın tek bir hacim olarak tanımlandığı gözönüne alınırsa, bunların malzeme özelliklerinin de ANSYS'te tek bir malzeme şeklinde tanımlanması gereklidir. Bu nedenle kordların malzeme özellikleri ve çaprazbağlanma ısıları, kendini oluşturan malzemelerin ağırlıkça % bileşimlerine göre belirlenmiştir. Malzeme özellikleri giriş ekranları Şekil 5.6-5.9'da verilmiştir. Burada yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri değişmez, ısı sığası değerleri ise sıcaklıkla değişken alınmıştır.



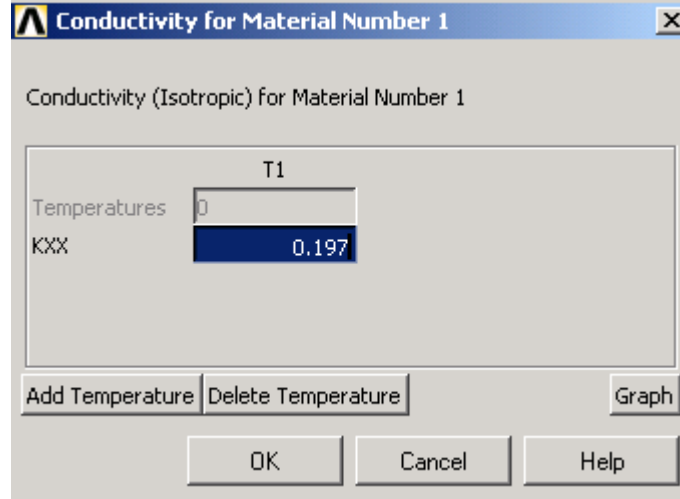
Şekil 5.6: Malzeme özellikleri giriş ekranı-1



Şekil 5.7: Malzeme özellikleri giriş ekranı-2



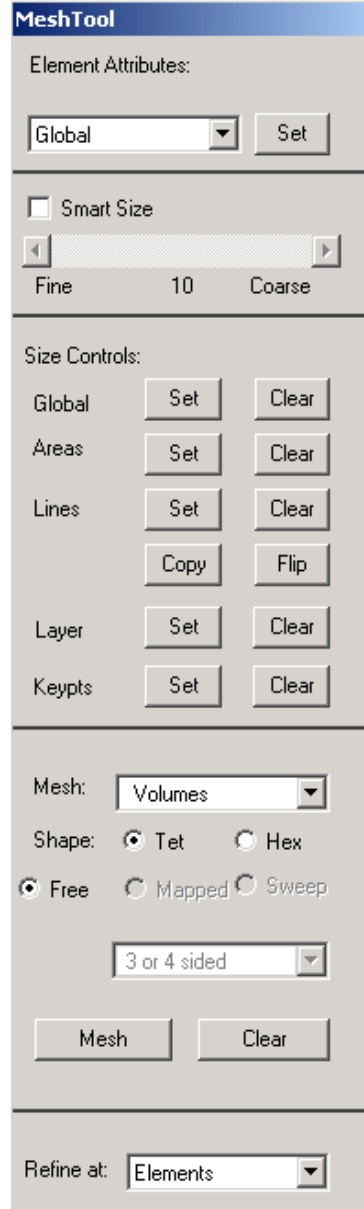
Şekil 5.8: Malzeme özellikleri giriş ekranı-3



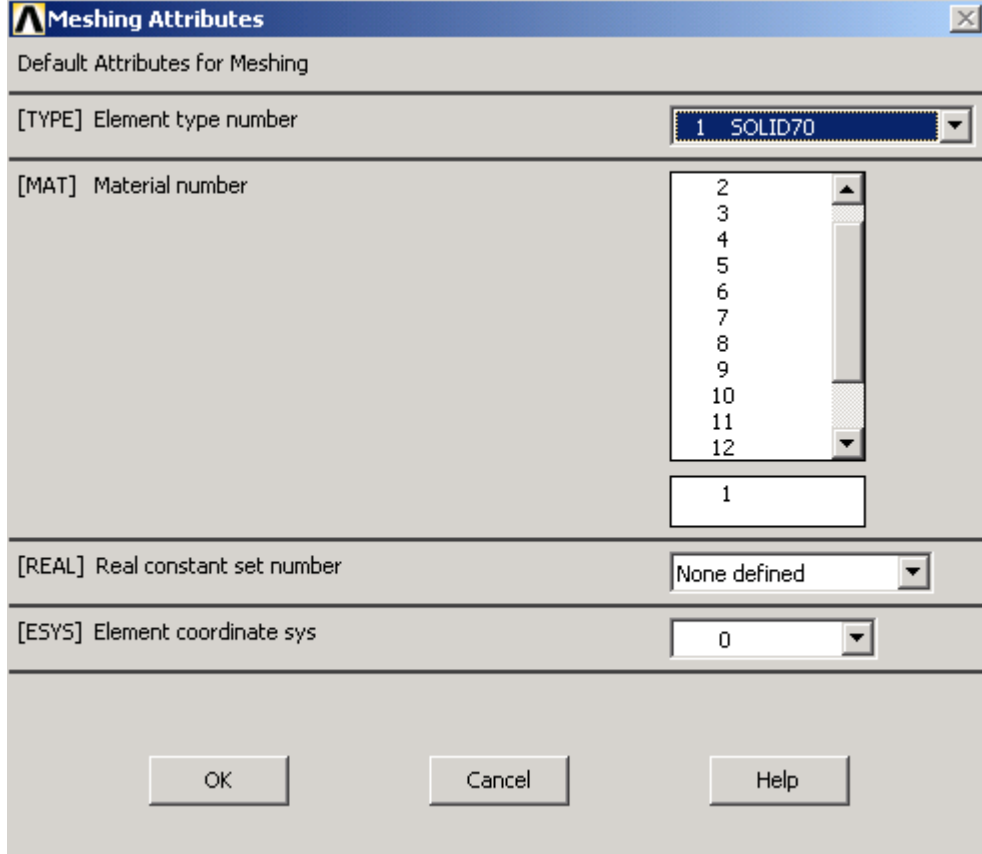
Şekil 5.9: Malzeme özellikleri giriş ekranı-4

5.7.4. Modelin elemanlara bölünmesi (Meshing)

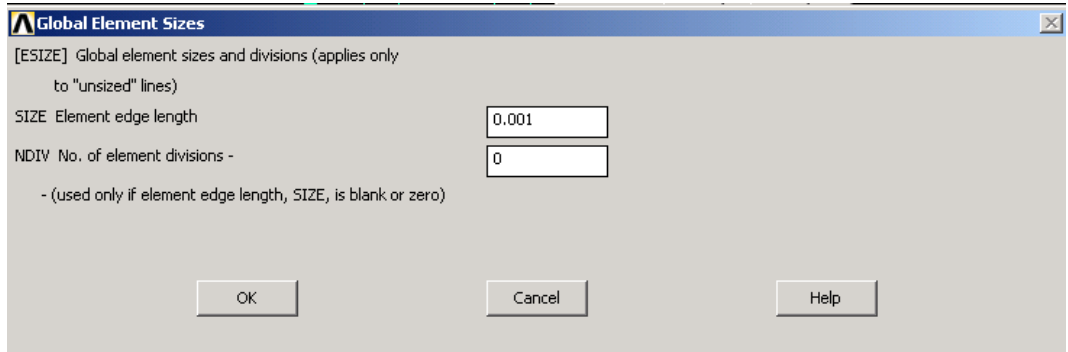
Sonlu elemanlar çalışmalarında, modelin uygun şekilde elemanlara bölünmesi, başarımı doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, modelin karmaşık bir geometriye sahip olması nedeni ile elemanlara bölme işlemi, her bölünmüş hacim için farklı büyüklükte elemanlar oluşturularak yapılmıştır. Bu işlem sırasında bölünmüş hacmi oluşturan eleman tipi ve malzeme de belirtilmektedir. Oluşturulan modelde toplam 35753 adet eleman kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan ANSYS işlem pencereleri Şekil 5.10-5.14'te gösterilmektedir.



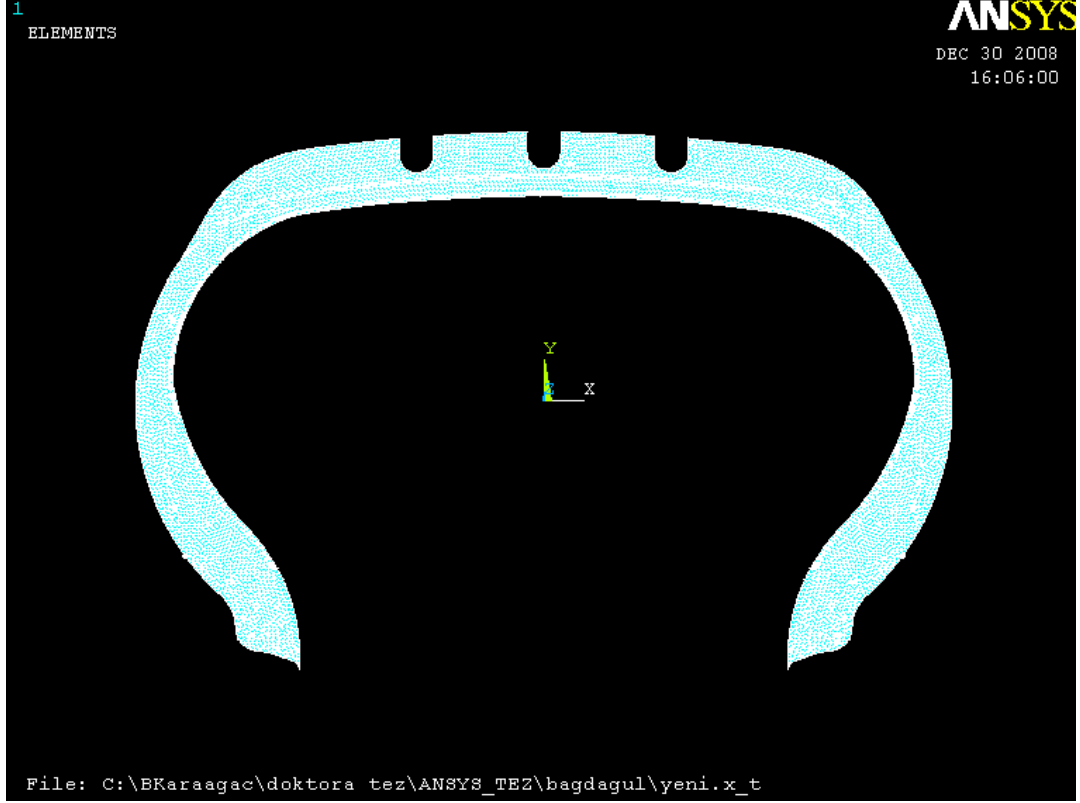
Şekil 5.10: Temel eleman boyutu tanımlama ekranı



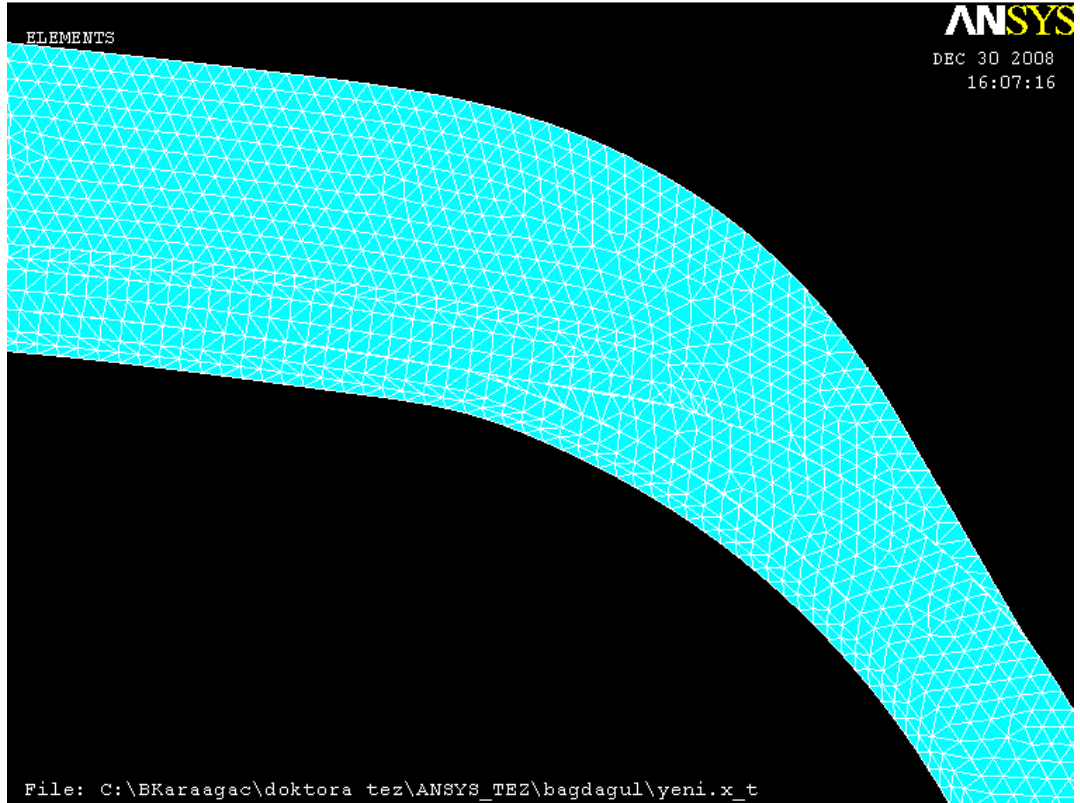
Şekil 5.11: Bölünmüş hacim için eleman ve malzeme tipi atama ekranı



Şekil 5.12: Eleman boyutu belirleme ekranı



Şekil 5.13: Modelin elemanlara bölünmüş görüntüsü

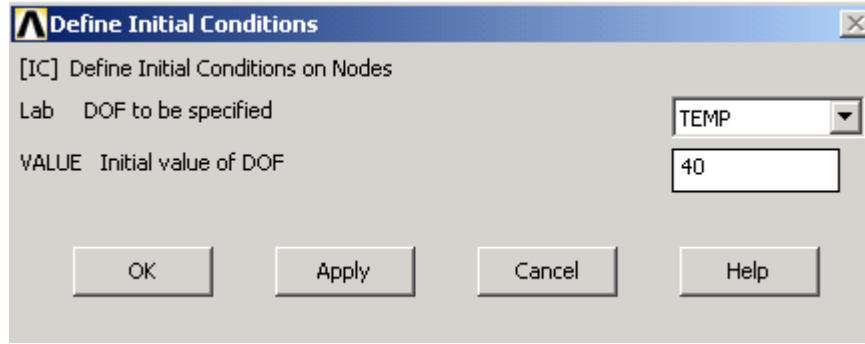


Şekil 5.14: Modelin bir kısmının elemanlara bölünmüş görüntüsü

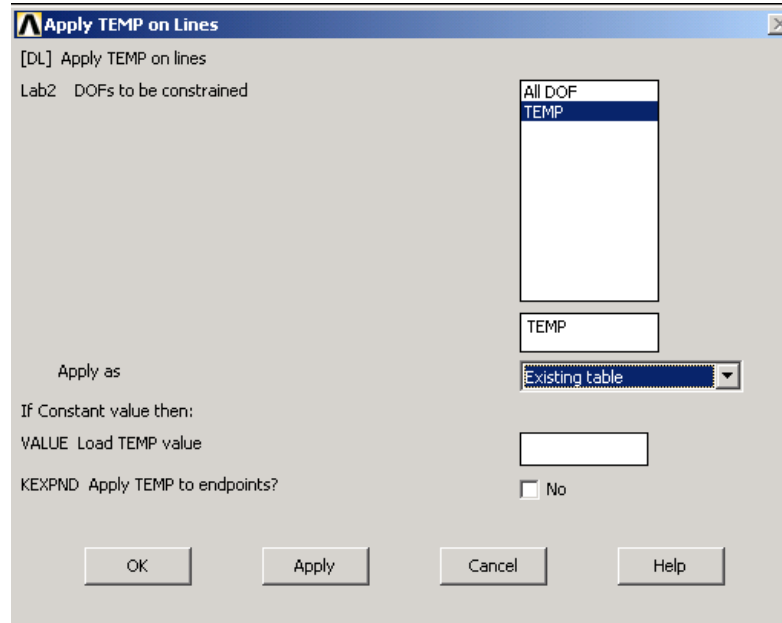
5.7.5. Yüklere tanımlanması

Bu çalışmada, ısı çözümleri için tanımlanan yükler ısıtma bölgeleri için zamanla değişen sıcaklık ve bölünmüş hacimler için ısı üretimidir. Isı üretimi, (4.2) eşitliği ile tanımlanmaktadır. Yük değerleri, her bir malzemenin yoğunluk, çaprazbağlanma ısı ve zaman ve sıcaklık ile değişen çaprazbağlanma derecesi değerlerinin çarpımından elde edilmiştir. Bu büyüklük, seçilen farklı çaprazbağlanma kinetik modelleri uyarınca, fonksiyon olarak ANSYS'te tanımlanmıştır.

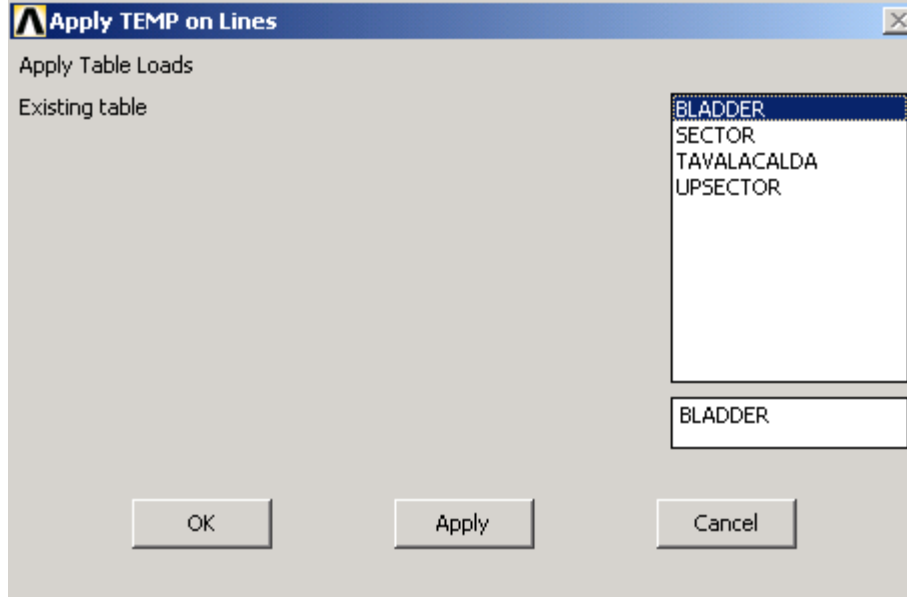
Sınır sıcaklık yüklerinin girildiği ANSYS ekranları Şekil 5.15- 5.18'de görüldüğü gibidir.



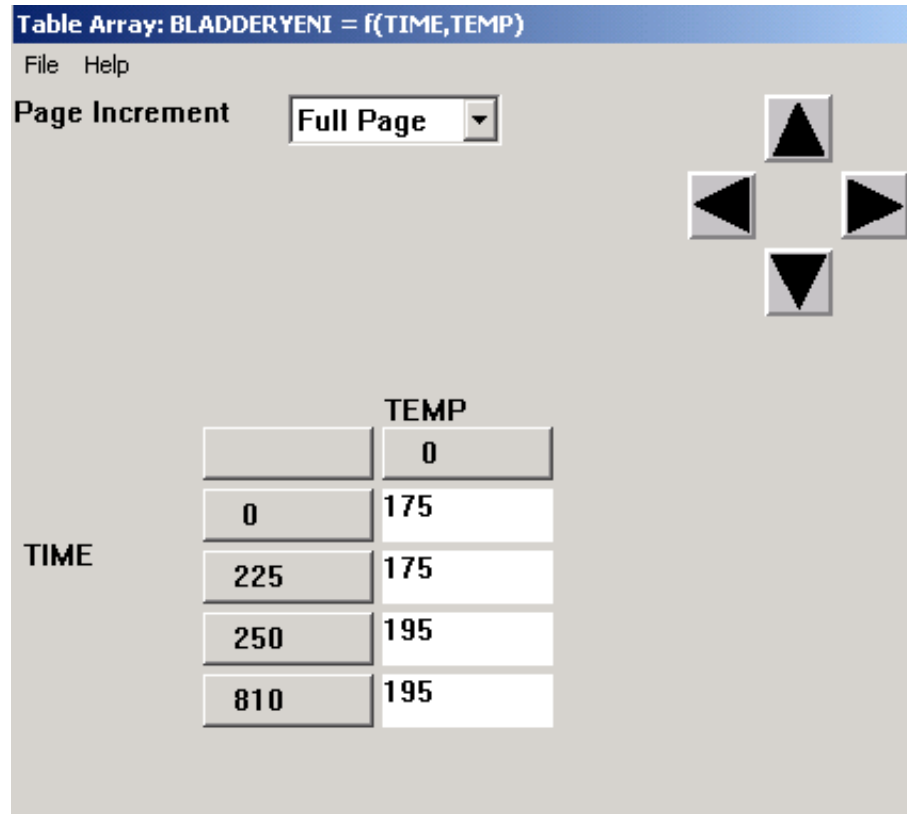
Şekil 5.15: Başlangıç sınır sıcaklık yükü tanımlama ekranı



Şekil 5.16: Sınır sıcaklık yükleri giriş ekranı

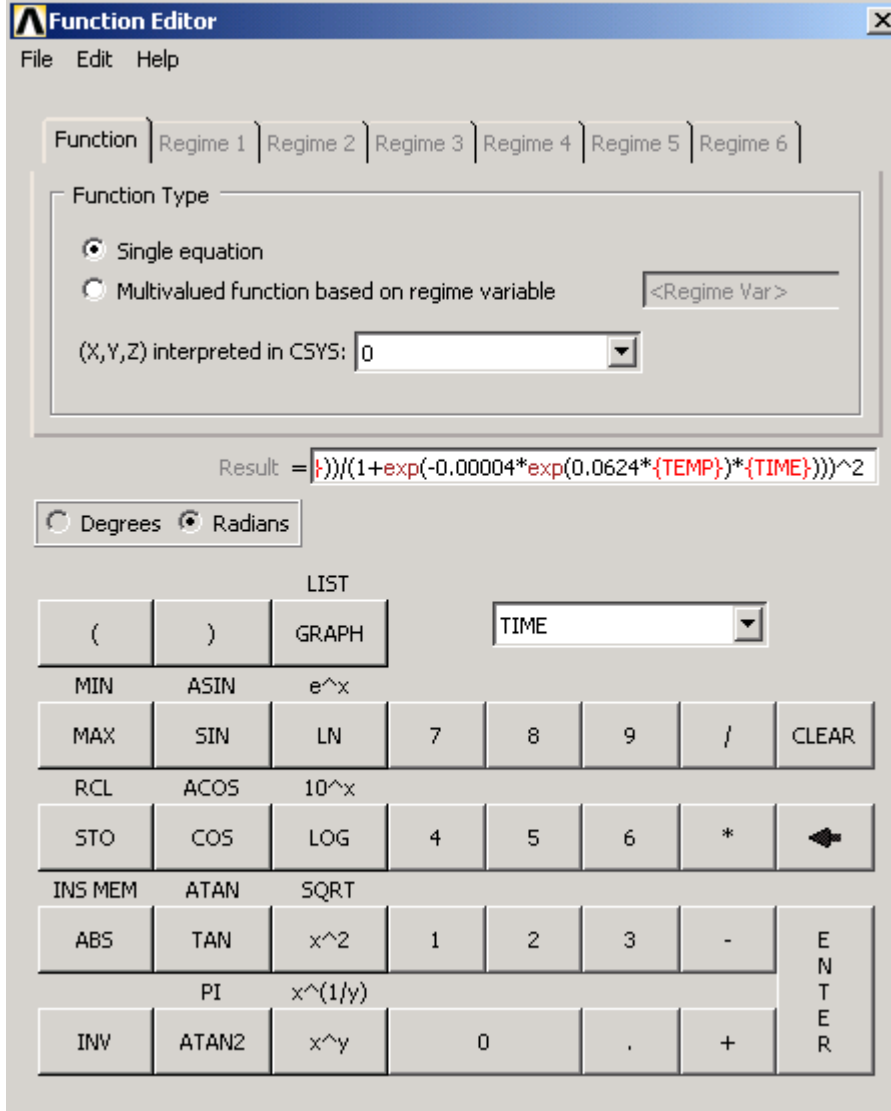


Şekil 5.17: Sınır sıcaklık yükleri tablo seçim ekranı

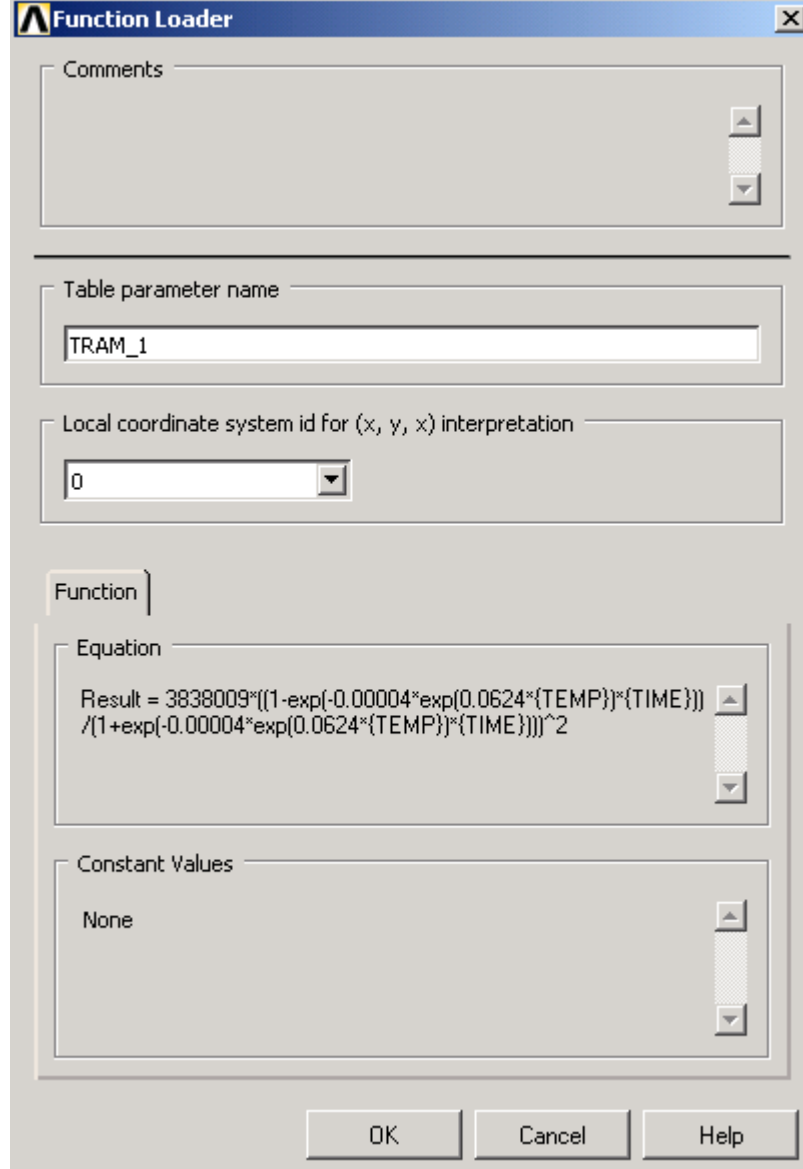


Şekil 5.18: Sınır sıcaklık yükleri için örnek tablo içeriği

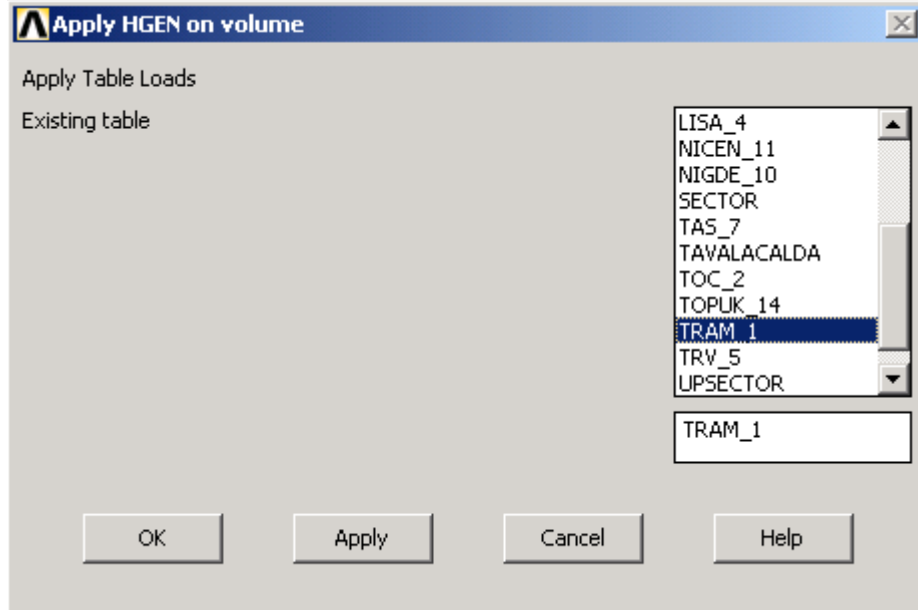
Isı üretimi yüklerinin tanımlandığı ANSYS ekranları da Şekil 5.19-5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.19: Isı üretimi yüklerinin hesaplandığı ANSYS fonksiyon ekranı



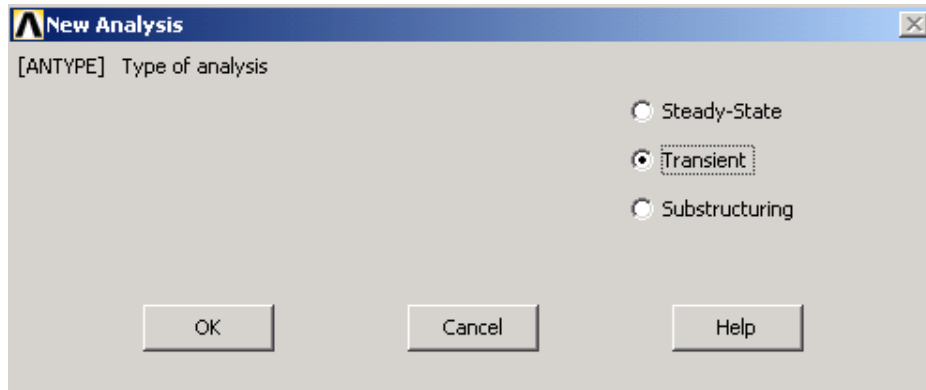
Şekil 5.20: Isı üretimi yüklerinin hesaplandığı fonksiyonların yük tablosu haline dönüştürüldüğü ANSYS ekranı



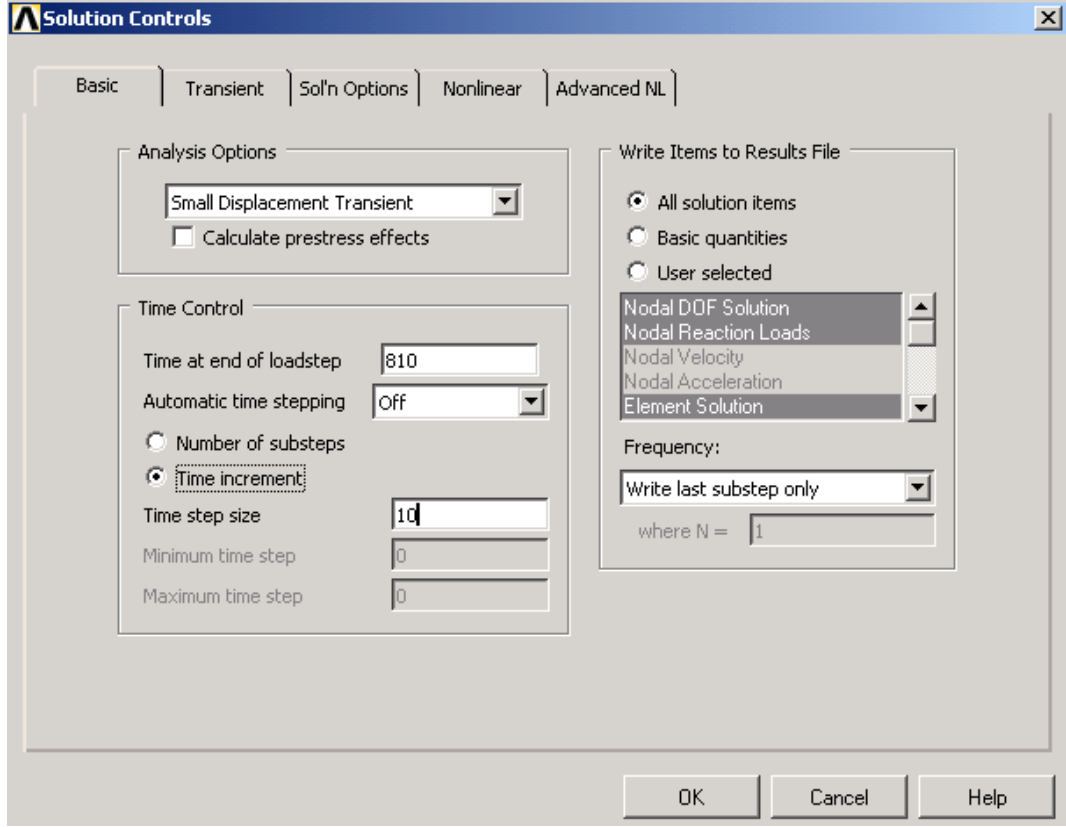
Şekil 5.21: Isı üretimi yüklerinin yük tablolarından tanımlandığı ANSYS ekranı

5.7.6. Çözüm

Oluşturulan model, zamanla ve dolayısıyla ısıtma sürecinde artan sıcaklıkla yüklerin ve malzeme özelliklerinin değişmesi göz önüne alınarak geçişken olarak çözülmüştür. Pişirme süreci toplam 810 s olarak alınmış ve 10 s'lik zaman artımları ile çözümlenmiştir. Çözüm tanımlamasının yapıldığı temel ekranlar Şekil 5.22 ve 23'te görülmektedir.



Şekil 5.22: ANSYS temel çözüm tipi tanımlama ekranı



Şekil 5.23: ANSYS temel çözüm etkenleri tanımlama ekranı

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. YSA Kullanılarak Reometre Eğrilerinin Modellenmesi

YSA ile modelleme adımında, öncelikle seçilen tek bir karışım üzerinde çalışılmış, bu karışımın reometre eğrilerinden elde edilen veriler farklı ağ mimarileri oluşturularak denenmiştir. Tablo 6.1’de denenilen farklı ağ mimarileri ve bu mimarilerde elde edilen, eğitim ve test için ortalama mutlak hata (OMH) değerleri ve genelleştirme OMH değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1: Model lastik karışımı için farklı YSA mimarileri uygulanarak hesaplanan hata değerleri

YSA mimarisi	YSA no	Saklı katman ve işlem birimi sayısı	İşlem birimlerinin aktarım fonksiyonları	Eğitim hatası (OMH) (%)	Test hatası (OMH) (%)	Ortalama OMH	Genelleştirme hatası (%)		
ÇKA YSA	A	1	1_5	tansig	0,0331	0,261	0,1471	9,80	
		2	1_10	tansig	0,0288	0,2233	0,1261	10,12	
		3	1_20	tansig	0,0243	0,1806	0,1025	7,29	
		4	1_5*(1)	logsig	0,3861	3,5618	1,9740	17,06	
		5	1_10*(2)	logsig	0,0805	0,0828	0,0817	20,20	
		6	1_20*(3)	logsig	0,0397	0,336	0,1879	9,33	
	B	7	2_10_10	tansig_tansig	0,0032	0,0333	0,0183	8,35	
		8	2_10_10*(7)	logsig_logsig	0,0202	0,1828	0,1015	7,50	
		9	2_10_10	tansig_logsig	0,0076	0,0615	0,0346	8,83	
		10	2_10_10*(9)	logsig_tansig	0,0174	0,1447	0,0811	5,37	
		C	11	2_20_10	tansig_logsig	0,0066	0,0784	0,0425	8,17
			12	2_10_20*(11)	tansig_logsig	0,0043	0,0291	0,0167	6,61
			13	2_20_10	logsig_tansig	0,0406	0,3374	0,1890	18,18
			14	2_10_20*(13)	logsig_tansig	0,0464	0,4829	0,2647	15,42
Elman YSA	D	15	1_20	tansig	0,1393	1,1865	0,6629	38,97	
		16	1_20*(15)	logsig	0,3597	3,179	1,7694	-	
	E	17	2_10_10	tansig_tansig	0,3861	3,5618	1,9740	-	
		18	2_10_10*(17)	logsig_logsig	0,3861	3,5623	1,9742	-	
	F	19	2_20_10	tansig_logsig	0,3767	3,445	1,9109	-	
		20	2_10_20*(19)	tansig_logsig	0,4398	4,2028	2,3213	-	
GRNN	G	21	1_20	Radyal temelli fonksiyon	0,0014	0,0485	0,02495	-	

*Eşdeğer ağırlık ataması yoluyla çalıştırılan ağlardır.

Bu problemde, modellenmesi istenen verilerin doğrusal olmaması nedeniyle, saklı katmanlardaki işlem birimlerinin aktarım fonksiyonları, farklı birleşimlerde (kombinasyon) olmak üzere “hiperbolik tanjant sigmamsı (tansig)” ve “logaritmik sigmamsı (logsig)” olarak seçilmiştir. Çıkış katmanının aktarım fonksiyonu ise bütün ağlarda “doğrusal” olarak seçilmiştir. Herbir reometre eğrisi için pişme bölgesinde (ML-MH aralığında) yaklaşık 100 nokta belirlenmiş ve bu noktaların %90’ı eğitim, %10’u ise test verilerini oluşturmak üzere kullanılmıştır. Test verileri, tüm veriler içerisinden eşit aralıklarla seçilmiştir. Ayrıca YSA’nın genelleme yapabilme yeteneğini test etmek üzere ise hem eğitim hem de test verilerinde yer almayan kritik bir sıcaklıkta pişmesi sırasında eşit aralıklı 5 farklı tork değerini elde edebilmek için gerekli süre ağa sorgulanmıştır. Ağın benzetim sonucu ile bu tork değerlerine karşı gelen gerçek süre değerleri karşılaştırılarak, aradaki fark genelleştirme hatası olarak belirlenmiştir. Eğitim için yineleme sayısı, bütün ağlarda 5000 olarak, ya da ortalama karesel hata 0.001’in altında olacak şekilde seçilmiştir. Ağların tasarımı, istenen pişirme sıcaklığında gerekli enuygun pişme süresini kullanıcıya verecek şekilde yapılmıştır. Bu amaçla, ağın iki giriş ve bir çıkışı vardır. Girişler sıcaklık ve tork değeri, çıkış ise herhangi bir sıcaklıkta, verilen tork değerine ulaşılması için gerekli süredir.

İlk olarak ileri beslemeli çok katmanlı almaç ağ mimarisi uygulanmıştır. A grubundaki 1, 2 ve 3 nolu ağlarda tek saklı katman ve bütün işlem birimlerinde aktarım fonksiyonu olarak hiperbolik tanjant kullanılmıştır. Bu koşullarda işlem birimi sayısının etkisi incelenmiştir. 4, 5 ve 6 nolu ağlarda ise diğer ağ özellikleri değişmez tutularak logaritmik sigmamsı aktarım fonksiyonu kullanılmıştır. Burada amaç aktarım fonksiyonunun ağ başarımına etkisinin incelenmesidir. Ağ ağırlıkları başlangıçta rastgele (random) atandığından, bu rastgele atamanın etkisini ortadan kaldırmak yoluyla daha iyi bir karşılaştırma yapılması amaçlanmış ve bu nedenle 4, 5 ve 6 nolu ağlarda tabloda parantez içinde verilen ağların ilk ağırlık değerleri kullanılarak eğitime başlanmıştır. Tabloda “*” işareti taşıyan bütün ağlarda bu şekilde bir eşdeğer ağırlık ataması yapılmış ve ilk ağırlıkların hangi ağların ilk ağırlıkları olarak alındığı da parantez içinde belirtilmiştir. Buna göre, A grubundaki ağlara bakıldığında 3 nolu ağın eğitim ve test verilerine ait OMH değerlerinin diğerlerinden düşük olduğu görülmektedir.

A grubu ağılardan elde edilen sonuca göre toplam 20 işlem birimini kullanmanın uygun olduğu gözönünde bulundurularak, B grubu ağlarda da toplam 20 işlem birimi olacak şekilde 2 saklı katmanda 10'ar işlem birimi oluşturulmuştur. Bu grupta da benzer şekilde 7 numaralı ağ, en düşük eğitim ve test hatasını vermiştir.

C grubunda iki saklı katmanda kullanılan işlem birimi sayıları farklı olarak seçilmiştir. 11 ve 12 nolu ağlarda aynı aktarım fonksiyonunun farklı işlem birimi sayılarıyla kullanılması, 13 ve 14 nolu ağlarda ise aynı ağ içinde aktarım fonksiyonunun önceki ve sonraki saklı katmanda yer alması durumları incelenmiştir. En düşük eğitim ve test hatası 12 nolu ağda elde edilmiştir.

İleri beslemeli ağların A, B ve C olmak üzere 3 farklı grubundaki ağlardan en iyi modelleri veren mimariler, Elman ağlarına da uygulanarak D, E ve F grubu ağlar oluşturulmuştur. Bu tip ağların OMH değerlerinin çok yüksek olması nedeniyle, mevcut problem için uygun bir model olmayacağı düşünülmüştür.

Genelleştirilmiş bağlanım temeline dayalı 21 nolu ağ oluşturulurken, ağ etkenlerinden biri olan yayılma değeri, öncelikle program içinde oluşturulan bir döngü ile, hatayı en az yapacak değer olarak belirlenmiş ve bu değer, ağ etkeni olarak kullanılmıştır. Bu ağın ise, eğitim ve test hatalarının oldukça düşük olmasına rağmen eğitim verisine aşırı bağılıktan dolayı genelleştirme yapamaması nedeni ile bu problem için uygun olmadığı görülmüştür.

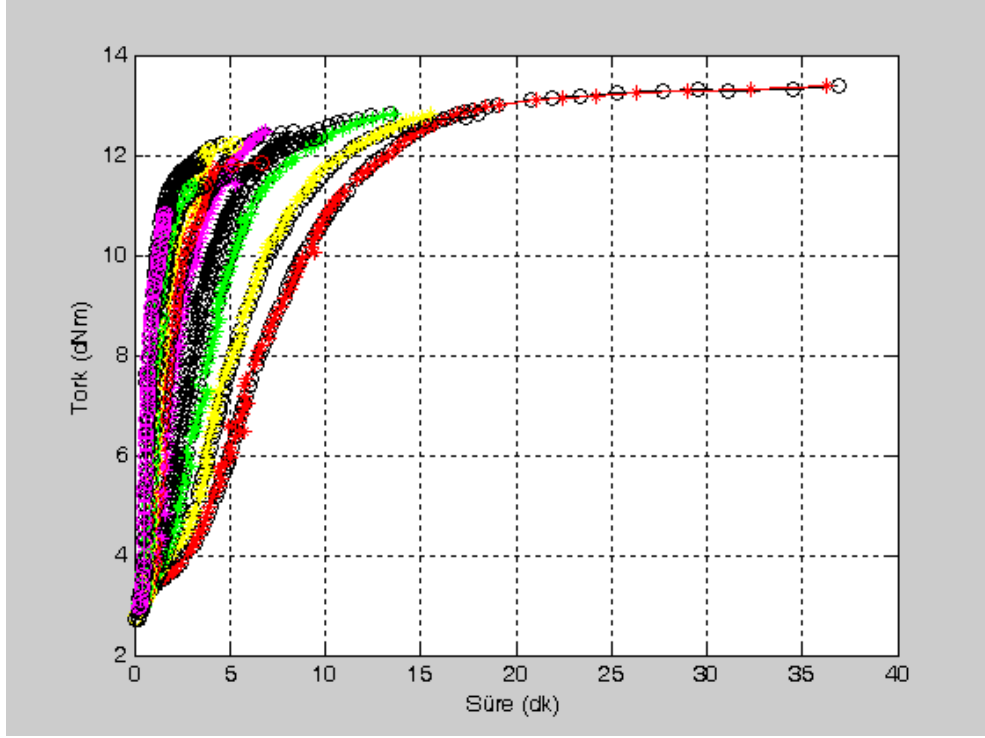
Genelleştirme, 178 °C'de elde edilen reometre eğrisinin pişme bölgesindeki birbirine yaklaşık eşit uzaklıkta 5 farklı noktası için yapılmıştır. Tablodaki genelleştirme hatası değerleri, bu 5 genelleştirme için hata yüzdelerinin ortalaması olarak verilmiştir.

Çalışılan ağların eğitim, test ve genelleştirme hataları birlikte incelendiğinde; 7, 10 ve 12 nolu ağların problemin çözümüne uygun olabileceği görülmektedir. Bundan sonraki adımda ise bu 3 ağ yapısı, aynı karışımın farklı sıcaklıklarda “enuygun pişme sürelerini” tahmin etmek üzere uygulanmıştır. Öncelikle karışımların 151-156°C, 156-161°C , 161-166°C ,166-171°C, 171-176°C, 176-181°C, 181-186°C, 186-

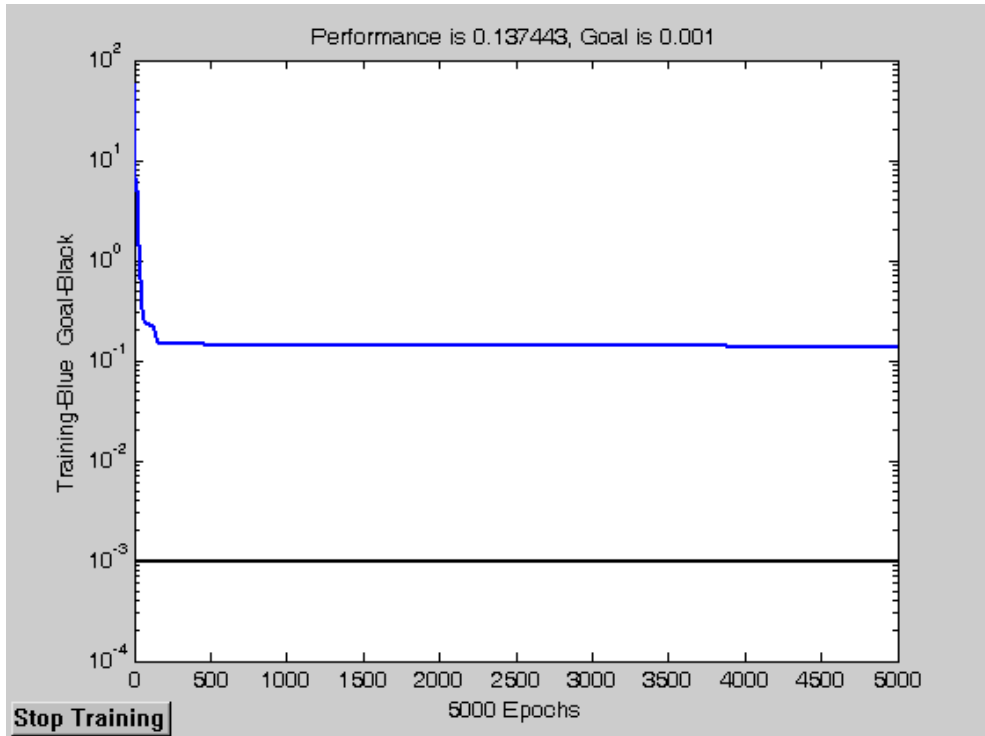
191°C, 191-196°C olmak üzere 9 sıcaklık aralığı için enuygun pişme düzeylerine karşı gelen ortalama tork değerleri bulunmuştur ve bunlar “kıyaslama (referans) tork değeri” olarak belirlenmiştir. Girişler olarak da ağa, kullanıcı tarafından enuygun pişme süresinin hesaplanması istenen sıcaklığa göre bu değerler arasından uygun olanı ve ilgili sıcaklık değeri aldırılmıştır. Tablo 6.2’de model karışım için yapılmış enuygun pişme süresi benzetimi verilmiştir. Şekil 6.1-6.6’da ise 7,10 ve 12 numaralı ağların eğitim başarımı ve benzetim grafikleri görülmektedir.

Tablo 6.2: Model karışım için 7,10 ve 12 nolu YSA ile yapılan enuygun pişme süresi benzetimleri

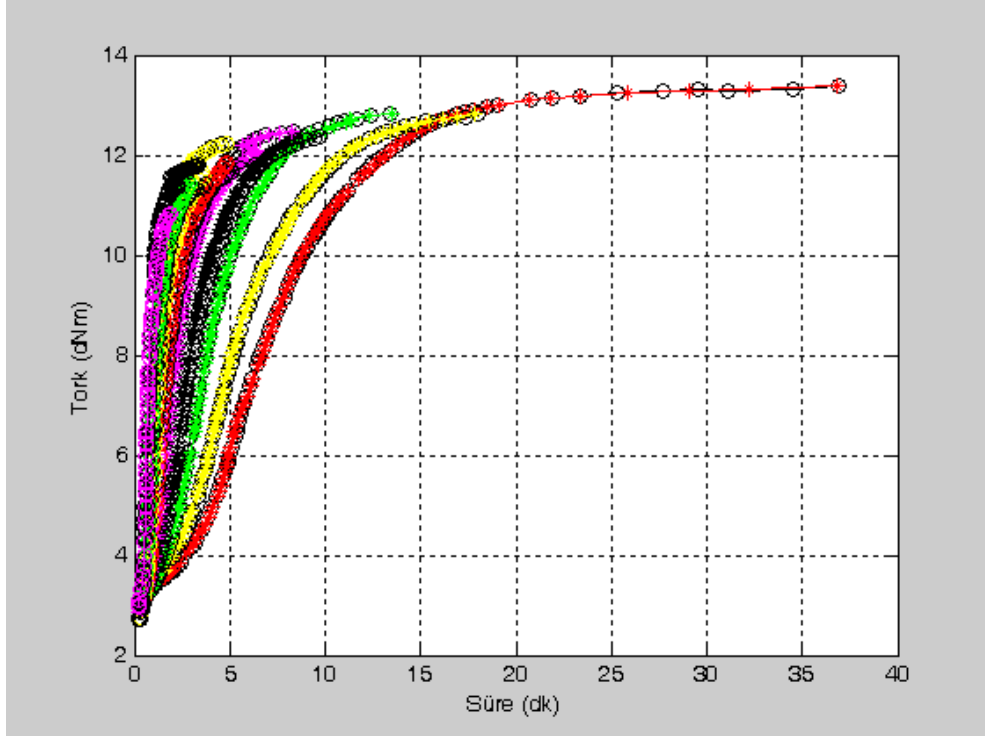
Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	YSA-7		YSA-10		YSA-12	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	12,34	14,30	14,35	0,30	14,27	0,22	14,27	0,22
156	11,95	10,82	10,70	9,49	10,71	1,01	10,79	0,23
161	11,91	7,54	8,31	4,45	7,60	0,83	7,59	0,66
166	11,52	6,03	5,69	1,09	5,83	3,33	6,12	1,42
171	11,52	4,31	4,79	1,99	4,89	13,47	4,41	2,32
176	11,25	3,50	3,60	0,79	3,67	4,96	3,98	13,71
181	11,14	2,50	3,07	0,46	2,95	18,15	2,48	0,69
186	10,55	2,08	1,84	4,20	1,97	5,36	1,84	11,55
191	10,83	1,49	1,70	8,62	1,39	6,77	1,66	11,15
196	10,16	1,29	1,35	4,74	1,30	0,43	1,32	2,66
Ortalama benzetim hatası (%)			3,61		5,45		4,46	



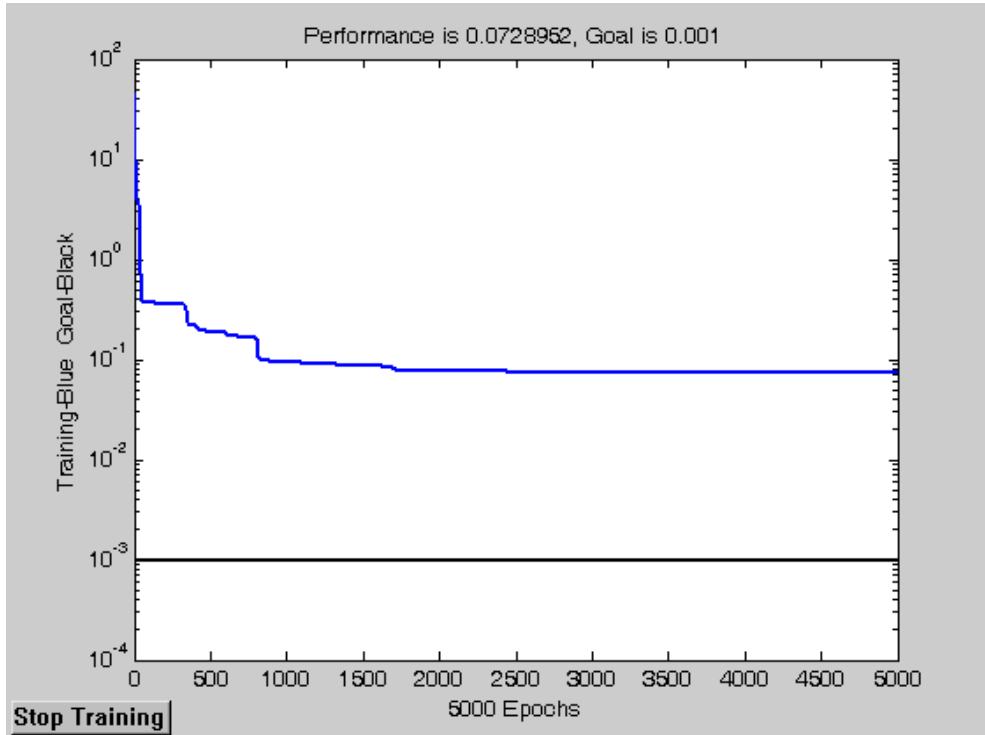
Şekil 6.1: 7 nolu ağın benzetim grafiği (Siyah düz çizgiler: Eğitim verileri, Desen işaretleri: YSA benzetim verileri)



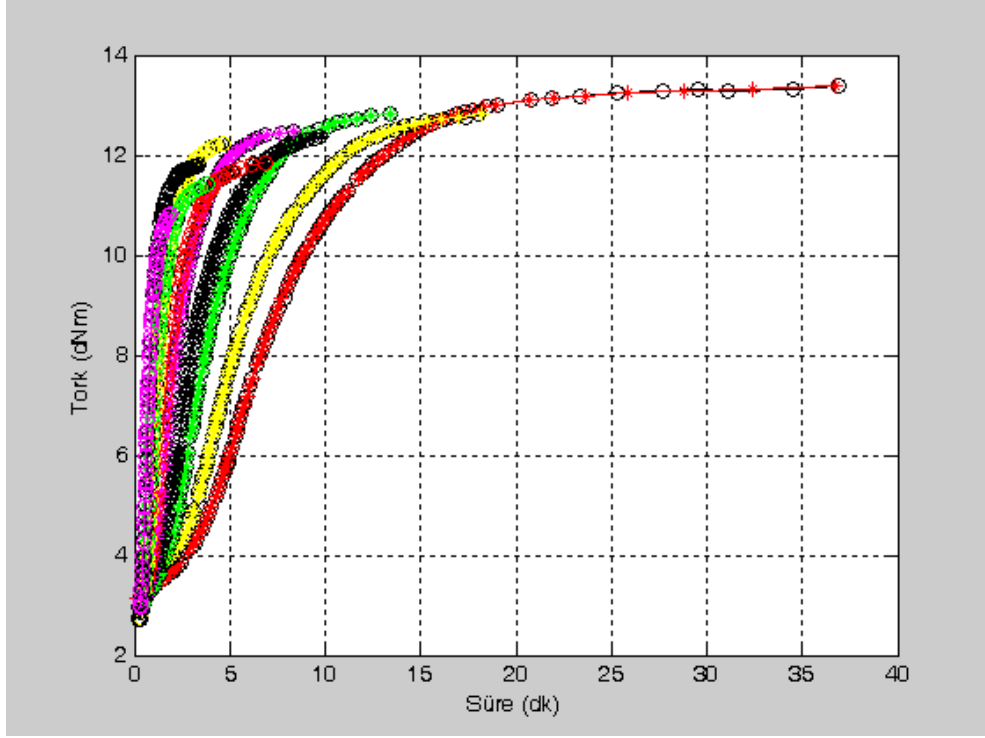
Şekil 6.2: 7 nolu ağın eğitim başarımı



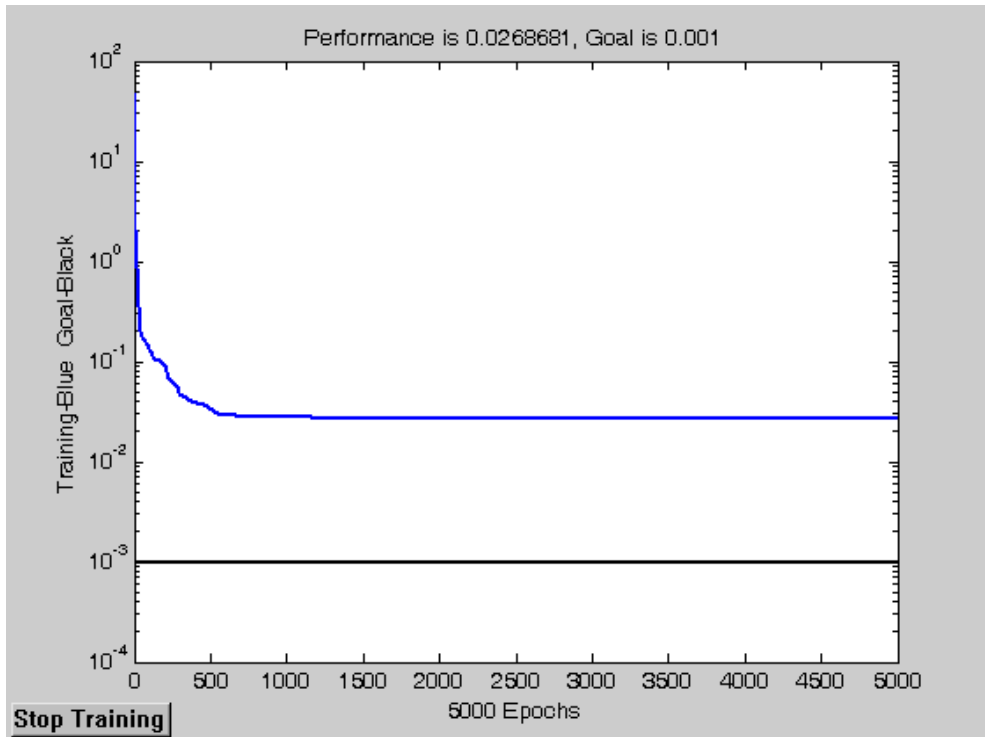
Şekil 6.3: 10 nolu ağın benzetim grafiği (Siyah düz çizgiler: Eğitim verileri, Renkli işaretler: YSA benzetim verileri)



Şekil 6.4: 10 nolu ağın eğitim başarımı



Şekil 6.5: 12 nolu ağın benzetim grafiği (Siyah düz çizgiler: Eğitim verileri, Renkli işaretler: YSA benzetim verileri)



Şekil 6.6: 12 nolu ağın eğitim başarımı

Ortalama benzetim hataları kıyaslandığında en yüksek benzetim başarımını karşılayan ağ, 7 numaralı ağdır. Ayrıca Şekil 6.1-6.6 incelendiğinde, 7 numaralı ağın,

benzetimi en iyi ağ olduğu görülmektedir. Bu ağ mimarisi, model alınan lastiği oluşturan 10 karışım için de oluşturularak, benzer başarımlar elde edilmiştir. Bu değerler bir sonraki bölümde verilmiştir.

6.2. Eşdeğer Pişme Süresi Hesabı

Tepkimelerin hız değişimlerini hesaplamak için, 10 farklı sıcaklıkta çekilen reometre eğrilerinden elde edilen t_{10} , t_{30} , t_{60} , t_{80} , t_{90} ve t_{95} noktaları kullanılmış ve 1. dereceden tepkime kabulü yapılmıştır. Karışımların etkinleşme enerjilerini hesaplamak için ise 151 °C karşılaştırma sıcaklığı olarak alınmıştır. Eşdeğer pişme sürelerini hesaplamak için ise 151-196 °C aralığındaki 10 farklı sıcaklıktaki tepkime hız değişimleri değerlendirilerek hesaplanan ortalama etkinleşme enerjisi değeri kullanılmıştır. Tablo 6.3'te karışımlara ait tepkime hız değişimi k , etkinleşme enerjisi (E_a) değerleri verilmiştir. Hesaplanan etkinleşme enerjileri literatürde benzer özelliklerdeki lastik karışımlarının etkinleşme enerjileri ile (10-50 kcal/mol) benzeşiktir (Toth ve diğ., 1991).

Tablo 6.3: Lastik karışımlarının tepkime hız değişimi ve etkinleşme enerjileri

Karışım												
Tepkime hız değişimi (dk^{-1})	Sıcaklık (°C)	Model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	151	6,51	11,63	6,78	2,50	5,85	1,48	3,13	7,46	10,38	3,19	10,89
	156	9,11	17,95	9,25	3,69	8,20	2,06	5,68	10,82	13,23	3,56	14,81
	161	12,56	22,88	12,48	5,49	10,92	3,54	8,64	14,99	17,01	5,37	19,96
	166	16,39	30,03	16,98	7,91	15,11	5,04	13,21	20,28	24,21	6,80	26,67
	171	22,08	40,98	21,65	11,45	25,00	8,04	19,80	27,86	30,58	10,36	36,10
	176	28,17	54,35	30,30	16,21	27,62	10,49	30,03	38,02	39,68	13,76	48,54
	181	39,06	73,53	40,98	23,15	38,61	15,04	44,05	51,28	51,28	22,47	70,42
	186	49,26	102,04	56,82	32,79	53,48	19,96	64,52	67,11	75,19	29,94	92,59
	191	69,44	142,86	78,13	44,64	70,42	28,90	97,09	88,50	107,53	40,49	120,48
	196	85,47	196,08	108,70	59,88	101,01	37,74	133,33	125,00	142,86	65,36	161,29
Ortalama etkinleşme enerjisi (kcal/mol)	22,61	24,91	24,41	20,77	25,08	28,35	33,21	24,81	23,21	26,86	23,76	

Tablo 6.3'te verilen ortalama etkinleşme enerjisi değerleri kullanılarak hesaplanan eşdeğer enuygun pişme süreleri ve gerçek pişme süreleri, 10 farklı karışım için de bir sonraki bölümde Tablo 6.4-6.14'te verilmiştir.

6.3. YSA ile Analitik Hesaplamaların Karşılaştırılması

Tablo 6.1'de belirtilen YSA mimarilerinden en uygunu olduğu bulunan ileri beslemeli; herbirinde 10 hiperbolik tanjant fonksiyonlu işlem birimi olmak üzere 2 saklı katmandan oluşan 7 nolu ağ yapısı, model karışım ve diğer 10 lastik karışımı için de enuygun pişme süresini tahmin etmek üzere uygulanmıştır. Eşdeğer pişme süresi hesabı (analitik yöntem) yoluyla hesaplanan enuygun pişme süreleri ile hata yüzdeleri açısından kıyaslanmıştır. Sonuçlar Tablo 6.4-6.14'te verilmiştir.

Tablo 6.4: Model karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	12,34	14,30	Hesaplanamıyor		14,35	0,30
156	11,95	10,82	10,52	2,77	10,70	9,49
161	11,91	7,54	7,74	2,65	8,31	4,45
166	11,52	6,03	5,76	4,48	5,69	1,09
171	11,52	4,31	4,28	0,7	4,79	1,99
176	11,25	3,50	3,22	8	3,60	0,79
181	11,14	2,50	2,45	2	3,07	0,46
186	10,55	2,08	1,87	10,1	1,84	4,20
191	10,83	1,49	1,42	4,7	1,70	8,62
196	10,16	1,29	1,09	15,6	1,35	4,74
Ortalama hata (%)			5,67		3,61	

Tablo 6.5: 1 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	14,98	11,60	Hesaplanamıyor		11,82	1,93
156	14,90	8,10	8,27	2,09	7,96	1,72
161	14,55	6,06	5,90	2,72	5,92	2,33
166	14,21	4,47	4,26	4,79	4,34	2,96
171	13,82	3,26	3,07	5,77	3,13	4,06
176	11,62	2,39	2,25	6,03	1,93	19,04
181	11,29	1,72	1,66	3,37	1,89	9,85
186	12,74	1,29	1,23	4,65	1,25	3,04
191	12,28	0,97	0,91	6,08	0,95	2,49
196	12,28	0,77	0,68	11,30	0,80	4,23
Ortalama hata (%)			5,20		5,17	

Tablo 6.6: 2 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	15,46	20,75	Hesaplanamıyor		20,17	2,81
156	15,14	14,72	14,89	1,18	14,48	1,60
161	14,91	10,56	10,69	1,22	10,37	1,78
166	14,45	7,57	7,77	2,60	7,24	4,37
171	13,98	5,44	5,64	3,73	5,36	1,48
176	13,56	3,91	4,15	6,16	3,76	3,81
181	13,09	2,85	3,09	8,46	2,78	2,50
186	12,72	2,07	2,30	11,21	2,00	3,62
191	12,26	1,53	1,71	12,03	1,45	5,48
196	12,26	1,14	1,29	13,33	1,22	6,59
Ortalama hata (%)			6,66		3,40	

Tablo 6.7: 3 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	5,98	35,22	Hesaplanamıyor		34,16	3,00
156	5,90	24,22	24,10	0,13	23,90	1,31
161	5,89	16,56	16,50	0,36	16,60	0,24
166	5,80	11,58	11,46	1,04	11,11	4,08
171	5,69	8,11	7,96	1,85	8,08	0,31
176	5,61	5,80	5,60	3,45	5,71	1,55
181	5,54	4,19	4,00	4,53	4,12	1,61
186	5,50	3,05	2,86	6,23	3,05	0,12
191	5,44	2,30	2,04	11,30	2,25	2,12
196	5,44	1,77	1,48	16,38	1,80	1,54
Ortalama hata (%)			5,03		1,59	

Tablo 6.8: 4 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	15,50	18,56	Hesaplanamıyor		17,81	4,05
156	15,12	13,29	13,2	0,68	12,81	3,58
161	14,70	9,65	9,39	2,69	9,22	4,49
166	14,36	7,02	6,76	3,70	6,83	2,69
171	14,02	5,15	4,87	5,44	4,90	4,78
176	13,62	3,75	3,55	5,33	3,67	2,19
181	13,26	2,75	2,62	4,73	2,64	3,96
186	12,74	2,02	1,94	3,96	1,91	5,51
191	12,29	1,51	1,43	5,30	1,43	5,22
196	12,29	1,15	1,07	6,96	1,21	4,99
Ortalama hata (%)			4,31		4,15	

Tablo 6.9: 5 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	20,77	52,16	Hesaplanamıyor		51,07	2,08
156	20,52	36,57	35,49	2,95	35,87	1,90
161	20,41	22,23	24,14	8,59	23,16	4,18
166	20,55	15,49	16,66	7,55	15,16	2,14
171	19,09	10,15	11,50	13,30	7,98	21,37
176	17,59	7,75	8,05	3,87	7,94	2,48
181	17,45	5,49	5,71	4,01	5,49	0,05
186	17,29	4,16	4,06	2,40	4,18	0,41
191	17,21	2,96	2,88	2,70	3,74	26,43
196	17,21	2,27	2,08	8,37	2,59	14,03
Ortalama hata (%)			5,97		7,51	

Tablo 6.10: 6 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	61,20	24,72	Hesaplanamıyor		26,90	8,81
156	61,35	13,89	15,74	2,77	13,02	6,30
161	60,22	9,25	10,03	2,65	9,23	0,20
166	59,21	6,19	6,49	4,48	5,83	5,87
171	57,14	4,21	4,21	0,70	3,97	5,72
176	55,46	2,88	2,77	8,00	2,76	4,24
181	53,67	2,04	1,85	2,00	1,88	7,74
186	53,43	1,49	1,24	10,10	1,54	3,09
191	53,23	1,07	0,83	4,70	1,05	1,60
196	53,23	0,84	0,57	15,60	0,84	0,02
Ortalama hata (%)			5,67		4,36	

Tablo 6.11: 7 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	12,15	17,71	Hesaplanamıyor		17,75	0,20
156	11,99	11,55	12,64	9,44	11,17	3,30
161	11,67	8,22	9,03	9,85	8,02	2,47
166	11,41	6,04	6,52	7,95	5,91	2,10
171	10,01	4,39	4,72	7,52	3,65	16,76
176	9,71	3,19	3,45	8,15	3,52	10,48
181	10,50	2,38	2,56	7,56	2,28	4,40
186	10,18	1,80	1,90	5,56	1,76	2,22
191	9,95	1,37	1,41	2,92	1,35	1,55
196	9,95	1,07	1,05	1,87	1,15	7,33
Ortalama hata (%)			6,76		5,08	

Tablo 6.12: 8 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	61,20	15,09	Hesaplanamıyor		15,08	0,04
156	24,63	10,81	11,01	1,85	10,80	0,06
161	24,53	8,02	8,03	0,12	7,91	1,32
166	23,89	5,63	5,93	5,33	5,37	4,56
171	23,21	4,21	4,37	3,80	4,13	1,82
176	22,75	3,13	3,27	4,47	3,06	2,29
181	22,21	2,28	2,47	8,33	2,22	2,71
186	21,66	1,62	1,86	14,81	1,58	2,77
191	21,04	1,21	1,41	16,53	1,18	2,71
196	21,04	0,93	1,08	16,13	0,96	3,66
Ortalama hata (%)			7,93		2,19	

Tablo 6.13: 9 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	20,03	28,77	Hesaplanamıyor		29,26	1,72
156	19,59	24,38	19,97	18,08	21,62	11,31
161	19,17	16,62	13,87	16,58	16,96	2,06
166	19,11	12,71	9,76	23,23	12,14	4,49
171	18,88	8,36	6,87	17,87	8,21	1,82
176	18,46	6,17	4,90	20,63	5,63	8,72
181	18,25	4,09	3,54	13,42	4,25	3,97
186	18,44	3,11	2,56	17,68	3,16	1,75
191	18,21	2,35	1,85	21,23	2,23	5,00
196	18,21	1,64	1,36	17,32	1,73	5,59
Ortalama hata (%)			18,45		4,64	

Tablo 6.14: 10 nolu karışım için analitik yöntem ve YSA

Sıcaklık (°C)	Kıyaslama tork değeri (dNm)	Ölçülen t90 (dk)	Analitik Yöntem		YSA-7	
			t90 (dk)	hata (%)	t90 (dk)	hata (%)
151	15,81	11,81	Hesaplanamıyor		12,94	9,53
156	15,96	8,54	8,55	0,13	8,17	4,34
161	15,50	6,38	6,19	2,95	6,06	4,99
166	15,19	4,76	4,54	4,68	4,64	2,43
171	14,97	3,58	3,33	7,12	3,51	1,89
176	14,52	2,69	2,47	8,33	2,51	6,87
181	14,13	1,98	1,85	6,57	1,90	3,80
186	13,96	1,53	1,39	9,22	1,55	1,04
191	13,57	1,15	1,04	9,39	1,08	5,90
196	13,57	0,93	0,79	14,84	1,00	7,06
Ortalama hata (%)			7,02		4,79	

Tablo 6.4-6.14'te yer alan veriler, Tablo 6.15'te özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 6.15: YSA ve analitik yöntemin enuygun pişme süresi tahmininde ortalama yaklaşım hataları

Karışım	Analitik yöntem ile ortalama hata (%)	YSA ile ortalama hata (%)
Model	5,67	3,61
1	5,2	5,17
2	6,66	3,4
3	5,03	1,59
4	4,31	4,15
5	5,97	7,51
6	5,67	4,36
7	6,76	5,08
8	7,93	2,19
9	18,45	4,64
10	7,02	4,79
Ortalama	7,15	4,23

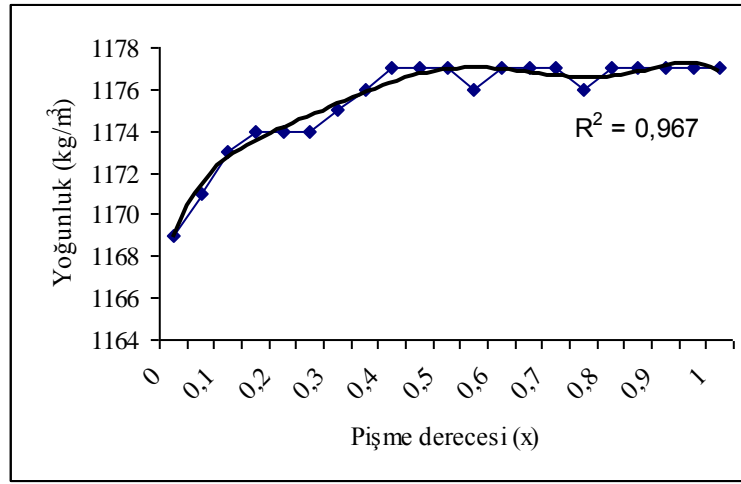
Tablo 6.4-6.14'te 151 °C'deki enuygun pişme sürelerinin analitik yöntemle hesaplanmadığı görülmektedir. Bunun nedeni, eşdeğer pişme süresi hesaplamalarında 151 °C'nin karşılaştırma sıcaklığı olarak kullanılmış olmasıdır. Analitik yöntemde sıcaklığın artmasıyla birlikte, hesaplanan eşdeğer pişme sürelerindeki %hata da artmaktadır. Bunun nedeni de çalışma sıcaklığının, karşılaştırma sıcaklığı olarak seçilen 151 °C'den uzaklaşmasıdır. Tablo 6.15'ten görüldüğü gibi 11 karışımdan 10'u için enuygun pişme süresi tahmininde YSA, analitik yöntemden daha iyi sonuç vermektedir. 11 karışım için analitik yöntemle ortalama hata %7,15 iken, YSA ile %4,23 olarak bulunmuştur. Buradan, YSA'nın, lastik sanayinde alışılmış eşdeğer pişme süresi tahmini yöntemine kıyasla daha kullanışlı, başarımı daha yüksek ve pratik bir yöntem olduğu söylenebilir.

6.4. Lastik Karışımlarının Yoğunlukları

Çalışmanın bu bölümünde ilgilenilen lastik karışımlarının, ısı denklemindeki değişkenlerden biri olan yoğunluklarının pişme düzeyi ile değişimi $[\rho(X)]$ belirlenmiştir. Bu amaçla, pişme süreci modellenen lastiğin karışımlarının tamamı olan 13 farklı lastik karışımı 0-1 arasında eşit aralıklı olmak üzere 21 farklı pişme düzeyine kadar pişirilmiştir. Tablo 6.16 ve 6.17'de sırasıyla her karışım için

belirlenen pişirme süreleri ve bu pişirme düzeyindeki yoğunluk değerleri yer almaktadır.

Her karışım için yoğunluğun pişirme düzeyi ile değişimi 6. dereceden bir polinom ile ifade edildiğinde uygun bağlanım katsayıları (0,9'dan büyük) elde edilebilmektedir. Şekil 6.7'de örnek bir karışım (3 nolu karışım) için bu ilişki görülmektedir. Karışımların tamamı için elde edilen 6. dereceden polinom katsayıları ise Tablo 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6.7: Örnek bir karışımın (3 nolu) yoğunluğunun pişirme düzeyi ile değişimi

Tablo 6.16: Lastik karışımlarının 176 °C’de belirli pişme düzeylerine ulaşabilmeleri için gerekli pişirme süreleri

Pişme düzeyi (x)	Pişme süresi (dk)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	0,65	0,64	0,64	0,54	0,51	0,35	0,64	0,69	0,73	0,78	0,71	0,45	0,33
0,10	0,95	1,20	0,93	1,00	0,79	0,48	1,11	1,15	1,25	1,22	1,41	0,89	0,65
0,15	1,07	1,46	1,29	1,17	1,06	0,54	1,27	1,32	1,45	1,28	1,55	1,00	0,77
0,20	1,19	1,73	1,64	1,34	1,33	0,60	1,44	1,48	1,65	1,35	1,69	1,11	0,88
0,25	1,31	1,99	2,00	1,51	1,59	0,66	1,60	1,65	1,85	1,41	1,82	1,21	1,00
0,30	1,43	2,25	2,35	1,68	1,86	0,72	1,76	1,81	2,05	1,47	1,96	1,32	1,11
0,35	1,48	2,35	2,59	1,79	2,16	0,82	1,84	1,87	2,17	1,52	2,05	1,39	1,26
0,40	1,53	2,46	2,84	1,90	2,46	0,92	1,92	1,93	2,28	1,57	2,14	1,46	1,40
0,45	1,58	2,56	3,08	2,01	2,76	1,03	2,00	2,00	2,40	1,62	2,24	1,53	1,55
0,50	1,63	2,67	3,32	2,12	3,05	1,13	2,08	2,06	2,52	1,67	2,33	1,60	1,69
0,55	1,68	2,76	3,57	2,23	3,35	1,23	2,16	2,12	2,63	1,71	2,42	1,67	1,84
0,60	1,73	2,86	3,81	2,34	3,65	1,33	2,24	2,18	2,75	1,76	2,51	1,74	1,98
0,65	1,81	3,00	4,08	2,52	4,18	1,53	2,36	2,30	3,07	1,87	2,70	1,87	2,25
0,70	1,89	3,14	4,35	2,70	4,71	1,74	2,48	2,45	3,38	1,97	2,89	2,01	2,52
0,75	1,97	3,27	4,62	2,88	5,24	1,94	2,60	2,61	3,70	2,08	3,07	2,14	2,79
0,80	2,05	3,41	4,89	3,06	5,77	2,14	2,72	2,64	4,01	2,18	3,26	2,27	3,06
0,85	2,22	3,66	5,35	3,41	6,76	2,51	2,96	2,89	5,09	2,44	3,63	2,51	3,54
0,90	2,39	3,91	5,80	3,75	7,75	2,88	3,19	3,13	6,17	2,69	4,00	2,75	4,01
0,95	2,74	4,35	6,59	4,41	9,60	3,50	3,60	3,62	8,85	3,24	4,68	3,15	4,80
1,00	4,14	5,80	9,61	7,49	19,85	5,49	5,18	5,39	19,99	5,60	6,87	4,55	7,48

Tablo 6.17: Karışımların ve diğer lastik bileşenlerinin belirli pişme düzeylerindeki yoğunlukları

Pişme düzeyi (x)	Yoğunluk (kg/m ³)																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
0,00	1097	1155	1169	1164	1245	1186	1112	1171	1192	1154	1128	1142	1161	1350	1140	7840	7850
0,05	1097	1156	1171	1164	1245	1187	1113	1171	1192	1155	1128	1143	1161	1350	1140	7840	7850
0,10	1098	1157	1173	1164	1245	1188	1113	1172	1192	1156	1129	1144	1162	1350	1140	7840	7850
0,15	1098	1157	1174	1165	1246	1188	1113	1172	1195	1157	1129	1144	1163	1350	1140	7840	7850
0,20	1098	1158	1174	1165	1247	1189	1113	1172	1194	1157	1129	1143	1165	1350	1140	7840	7850
0,25	1098	1158	1174	1165	1246	1189	1113	1172	1196	1157	1130	1145	1165	1350	1140	7840	7850
0,30	1098	1158	1175	1165	1247	1190	1114	1173	1196	1158	1130	1145	1167	1350	1140	7840	7850
0,35	1098	1159	1176	1166	1246	1189	1114	1173	1196	1158	1132	1145	1166	1350	1140	7840	7850
0,40	1098	1158	1177	1165	1247	1189	1114	1174	1196	1158	1133	1146	1167	1350	1140	7840	7850
0,45	1098	1159	1177	1165	1246	1190	1113	1173	1196	1157	1133	1145	1168	1350	1140	7840	7850
0,50	1098	1159	1177	1166	1247	1190	1114	1172	1196	1156	1134	1147	1168	1350	1140	7840	7850
0,55	1100	1159	1176	1165	1248	1189	1113	1173	1195	1157	1135	1148	1169	1350	1140	7840	7850
0,60	1099	1160	1177	1166	1248	1190	1113	1173	1196	1156	1135	1148	1169	1350	1140	7840	7850
0,65	1100	1159	1177	1166	1248	1191	1114	1173	1196	1158	1137	1147	1169	1350	1140	7840	7850
0,70	1099	1159	1177	1167	1248	1191	1113	1173	1196	1157	1138	1149	1170	1350	1140	7840	7850
0,75	1099	1161	1176	1166	1249	1191	1113	1174	1196	1157	1138	1150	1169	1350	1140	7840	7850
0,80	1099	1160	1177	1167	1249	1191	1113	1173	1197	1157	1139	1152	1170	1350	1140	7840	7850
0,85	1100	1160	1177	1167	1249	1192	1114	1174	1197	1157	1139	1152	1170	1350	1140	7840	7850
0,90	1100	1160	1177	1167	1250	1192	1114	1175	1198	1158	1139	1152	1170	1350	1140	7840	7850
0,95	1100	1160	1177	1168	1250	1193	1114	1175	1198	1158	1139	1153	1170	1350	1140	7840	7850
1,00	1100	1161	1177	1168	1251	1193	1114	1176	1198	1158	1140	1154	1172	1350	1140	7840	7850
Ortalama	1099	1159	1175	1166	1247	1190	1113	1173	1196	1157	1134	1147	1167	1350	1140	7840	7850

Tablo 6.18: Karışımların yoğunluklarının pişme düzeyi ile değişimini ifade eden 6. derece polinomların katsayıları

Bileşen	Polinom Katsayıları						
	x^6	x^5	x^4	x^3	x^2	x^1	x^0
1	-0,000000001	0,00000001	-0,0000004	0,000006	-0,0005	0,0017	1095,5
2	0,000000004	-0,00000002	0,0000005	-0,000005	0,0001	0,0008	1154,1
3	-0,00000001	0,00000007	-0,000002	0,0002	-0,0015	0,0056	1164,6
4	0,000000005	-0,00000003	0,0000008	-0,0001	0,0005	-0,001	1164,5
5	0,000000007	-0,00000007	0,000001	-0,0001	0,0006	-0,0009	1245,3
6	0,000000009	-0,00000001	0,0000003	-0,000003	0,00001	0,0011	1184,9
7	-0,000000005	0,00000003	-0,0000008	0,000008	-0,0005	0,0015	1111,1
8	-0,000000002	0,00000001	-0,0000003	0,000002	-0,00005	0,0004	1170,7
9	0,000000006	-0,00000005	0,000001	-0,0002	0,0013	-0,0026	1193,5
10	-4E-11	0,000000001	-0,0000001	0,000003	-0,0004	0,0023	1151,9
11	4,00E-09	-2,00E-07	5,00E-06	-5,00E-05	0,0003	-0,0006	1128,4
12	-2,00E-09	1,00E-07	-4,00E-06	6,00E-05	-0,0004	0,0018	1140,6
13	1,00E-08	-7,00E-07	2,00E-05	-0,0002	0,0014	-0,0026	1162,4

6.5. Lastik Karışımlarının Isıl İletkenlikleri

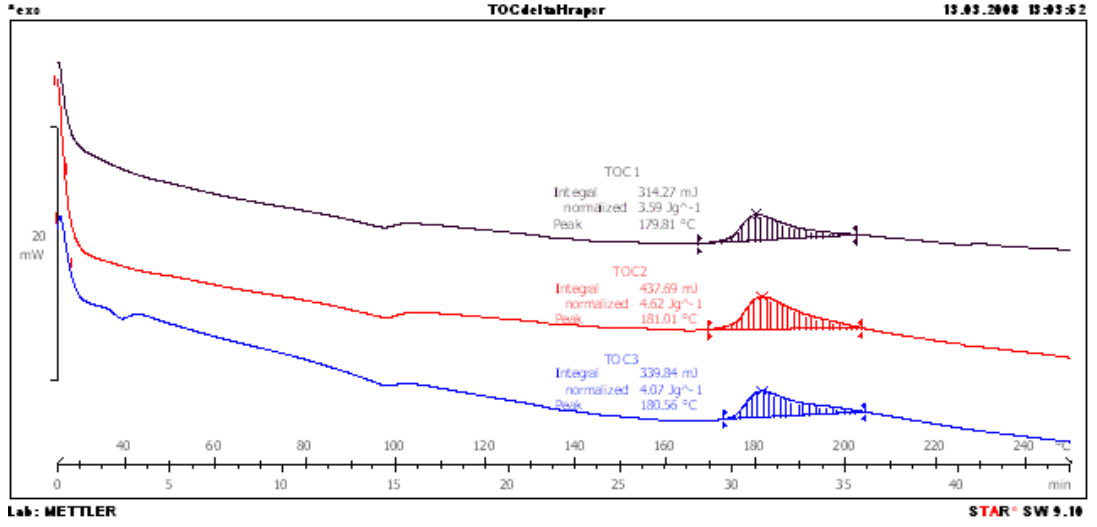
Modellenmesi planlanan lastiği oluşturan 13 farklı karışımın 10 °C'deki ısı iletkenlikleri Tablo 6.19'da verilmiştir. Bu değerler, literatürde farklı lastik tiplerinde kullanılan lastik karışımlarının ısı iletkenlik değerleri ile (0,1-0,4 W/m.K aralığında) benzerlik göstermektedir (Han ve diğ., 1999, Toth ve diğ., 1991). Farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik ölçmek olanağı bulunamadığından karışımların ısı iletkenlikleri sıcaklığa bağlı olarak $k = a + bT$ şeklinde modellenememiştir.

Tablo 6.19: Bileşenlerin ısı iletkenlikleri

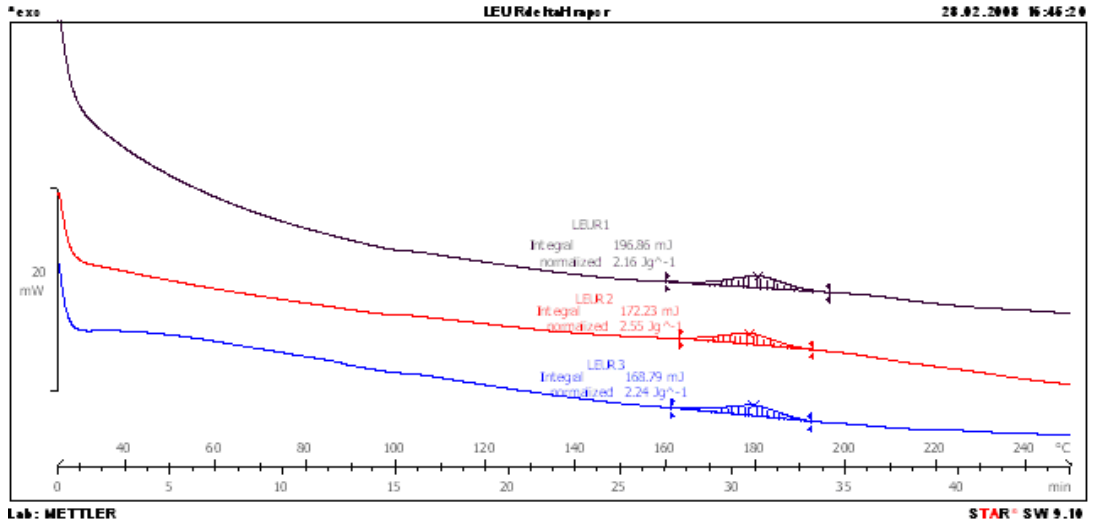
Bileşen	Isıl iletkenlik (W/m.K)
1	0,197
2	0,230
3	0,209
4	0,225
5	0,235
6	0,185
7	0,227
8	0,246
9	0,197
10	0,229
11	0,410
12	0,292
13	0,354
14	0,288
15	0,250
16	45,350
17	47,620

6.6. Lastik Bileşenlerinin Çaprazbağlanma Isıları

Şekil 6.8 ve 6.9’da örnek olarak birbirinden farklı özellikteki iki lastik karışımının DSC termogramları yer almaktadır. Ortalama çaprazbağlanma ısıları ise Tablo 6.20’de toplu halde verilmiştir. Bulunan çaprazbağlanma ısıları, literatürde benzer malzemeler için verilen örnek çaprazbağlanma ısıları değerleri (1-20 kJ/kg aralığında) ile uyumlu görünmektedir (Han ve diğ., 1999, Toth ve diğ., 1991).



Şekil 6.8: 2 numaralı bileşene (lastik karışımı) ait DSC termogramı



Şekil 6.9: 3 numaralı bileşene (lastik karışımı) ait DSC termogramı

Tablo 6.20: Lastik bileşenlerinin çaprazbağlanma ısıları

Bileşen	Çaprazbağlanma Isısı (kJ/kg)			
	1. ölçüm	2.ölçüm	3.ölçüm	Ortalama
1 (Lastik karışımı)	3,21	3,30	3,97	3,49
2 (")	3,59	4,62	4,07	4,09
3 (")	2,16	2,55	2,24	2,32
4 (")	2,79	2,93	3,83	3,18
5 (")	7,54	8,30	8,26	8,03
6 (")	16,77	17,43	17,14	17,11
7 (")	2,97	3,08	3,08	3,04
8 (")	6,66	4,28	5,18	5,37
9 (")	2,88	2,19	2,67	2,58
10 (")	3,59	3,70	3,91	3,73
11 (")	5,31	5,63	5,33	5,42
12 (")	12,98	11,76	13,05	12,60
13 (")	10,11	11,20	12,64	11,32
14 (Tekstil kord)	0,00	0,00	0,00	0,00
15 (Tekstil kord)	0,00	0,00	0,00	0,00
16 (Metalik kord)	0,00	0,00	0,00	0,00
17 (Metalik kord)	0,00	0,00	0,00	0,00

6.7. Lastik Bileşenlerinin Isı Sığaları

Lastik bileşenlerinin ısı sığalarının sıcaklıkla değişimi polinomik olarak incelenmiştir ve bu ilişkiler Tablo 6.21 ve 6.22’de verilmiştir. Ortalama ısı sığası değerleri ise Tablo 6.23’te gösterilmektedir. Elde edilen ısı sığası değerleri, literatürde, benzer özelliklerdeki lastik karışımları için elde edilen ısı sığası değerleri (oda sıcaklığında 1-2 kJ/kg°C) ile benzerlik göstermektedir (Juma ve Bafnec, 2006, Likozar ve Krajnc, 2007).

Tablo 6.21: Model lastik bileşenlerinin pişme öncesi ısı sığaları

Bileşen	Çiğ bileşenler için $C_{p_u} = a_u + b_u T + c_u T^2 + d_u T^3$ (kJ/kg.°C)				
	a_u	b_u	c_u	d_u	r^2
1 (Lastik karışımı)	1,8326	0,1979	0,0000	0,0000	0,9592
2 (")	1,0283	0,5469	- 0,0907	0,0053	0,9955
3 (")	1,8326	0,1979	0,0000	0,0000	0,9592
4 (")	0,7635	0,9970	- 0,1711	0,0107	0,9567
5 (")	0,6849	0,6983	- 0,1192	0,0071	0,9744
6 (")	1,0658	0,8262	- 0,1614	0,0106	0,9056
7 (")	1,2419	0,6629	- 0,1072	0,0065	0,9655
8 (")	0,9505	0,5719	- 0,1118	0,0073	0,845
9 (")	1,3820	0,3900	- 0,0267	0,0002	0,9898
10 (")	1,2532	0,5774	- 0,0889	0,0056	0,9882
11 (")	0,9537	0,7126	- 0,1266	0,0078	0,9587
12 (")	1,2841	0,6945	- 0,1136	0,0070	0,936
13 (")	0,8915	0,5245	- 0,1098	0,0074	0,8665
14 (Tekstil kord)	1,7474	0,2712	0,0000	0,0000	0,9315
15 (Tekstil kord)	2,0774	0,1311	0,0000	0,0000	0,8846
16 (Metalik kord)*	0,4310	0,0460	0,0000	0,0000	1,0000
17 (Metalik kord)*	0,4297	0,0118	0,0000	0,0000	0,9880

*Literatürden alınmıştır.

Tablo 6.22: Model lastik bileşenlerinin pişme sonrası ısı sığaları

Bileşen	Pişmiş bileşenler için $C_{p_c} = a_c + b_c T + c_c T^2 + d_c T^3$ (kJ/kg.°C)				
	a_u	b_u	c_u	d_u	r^2
1 (Lastik karışımı)	1,4115	0,4948	- 0,0481	0,0019	0,9986
2 (")	1,3618	0,1845	- 0,0124	0,0003	0,9991
3 (")	1,5147	0,3211	- 0,0184	0,0007	1,0000
4 (")	1,1032	0,1067	- 0,0018	-0,0001	0,9995
5 (")	1,0990	0,3294	- 0,0250	0,0009	1,0000
6 (")	1,4845	0,2914	- 0,0133	-3E-05	0,9999
7 (")	1,2386	0,4140	- 0,0253	0,0005	0,9994
8 (")	1,0885	0,0528	0,0032	-0,0003	0,9991
9 (")	1,4937	0,2147	- 0,0154	0,0006	0,9863
10 (")	1,0055	0,3331	- 0,0252	0,0007	0,9994
11 (")	1,3451	0,1856	- 0,0078	8E-05	0,9997
12 (")	1,5367	0,4329	- 0,0477	0,0022	0,9948
13 (")	1,3032	0,3290	- 0,0261	0,0008	0,9984
14 (Tekstil kord)	0,8590	0,8937	- 0,1063	0,0051	0,9985
15 (Tekstil kord)	1,3589	0,7652	- 0,1407	0,0089	0,9950
16 (Metalik kord)*	0,4310	0,0460	0,0000	0,0000	1,0000
17 (Metalik kord)*	0,4164	0,0195	- 0,0009	3E-05	1,0000

*Literatürden alınmıştır.

Tablo 6.23: Model lastik bileşenlerinin ortalama ısı sığaları

Bileşen No	Sıcaklık (°C)								
	Isı sığası (kJ/kg.°C)								
	50	75	100	125	150	175	200	225	250
1 (Lastik karışımı)	1,97	2,46	2,82	3,02	3,19	3,34	3,61	3,78	3,95
2 (")	1,52	1,72	1,91	2,02	2,09	2,14	2,17	2,26	2,35
3 (")	1,82	2,16	2,44	2,65	2,85	2,94	3,16	3,34	3,49
4 (")	1,40	1,73	1,97	2,10	2,13	2,24	2,43	2,59	2,71
5 (")	1,35	1,65	2,89	2,05	2,19	2,26	2,28	2,49	2,61
6 (")	1,75	2,08	2,30	2,47	2,58	2,60	2,61	2,99	3,04
7 (")	1,73	2,04	2,38	2,56	2,76	2,77	3,00	3,15	3,28
8 (")	1,29	1,44	1,57	1,64	1,72	1,77	1,78	1,88	1,95
9 (")	1,71	1,98	2,17	2,30	2,49	2,59	2,62	2,71	2,72
10 (")	1,52	1,85	2,06	2,25	2,39	2,43	2,62	2,77	2,88
11 (")	1,54	1,80	2,02	2,12	2,25	2,30	2,36	2,51	2,60
12 (")	1,91	2,23	2,48	2,70	2,77	2,86	2,95	3,19	3,26
13 (")	1,47	1,70	1,86	1,99	2,09	2,09	2,11	2,30	2,40
14 (Tekstil kord)	1,67	2,24	2,70	3,07	3,33	3,52	3,64	3,75	4,022
15 (Tekstil kord)	1,97	2,46	2,61	2,72	2,78	2,79	2,89	3,05	3,33
16 (Metalik kord)	427,5	431	434,2	444	453,5	457,5	462,3	468	472,6
17 (Metalik kord)	448	467	478	494	502	516	521	536	550

6.8. Lastik Karışımlarının Pişme Düzeylerinin Sıcaklık ve Zamana Göre Modellenmesi

Lastik karışımlarının pişme düzeylerini modellerken elde edilecek fonksiyonlarda dikkat edilecek en önemli nokta, sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme esnasında, ısı denkliğinde yer alan pişme düzeyi değişkeninin hem sıcaklığın hem de zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi gerektiğidir.

Bu bölümde, literatürde lastik karışımlarının pişme kinetiğini tanımlayan modeller incelenmiş ve ilgilenilen model lastik karışımlarına uygunlukları değerlendirilmiştir. Bu modellerin başarımlarının, bileşimleri ve pişme karakteristikleri geniş bir aralıkta değişen lastik karışımları için bazı yönlerden eksik kaldığı fark edilmiştir. Modeller üzerinde yapılan bazı değişikliklerle bu eksiklikleri giderilmeye çalışılmıştır.

6.8.1. Klasik model ve Yeni model 1

Bu bölümde 13 lastik karışımı için, 151-196 °C aralığındaki 10 farklı sıcaklıkta çekilen reometre eğrileri (2.5) eşitliğine göre değerlendirilmiştir. Klasik modelin,

bu karışımların seçilen pişme derecelerinin tahminindeki başarımı Tablo 6.24-6.36'da vermiştir.

Tablo 6.24: 1 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,29	2,00	0,29	2,00	
	0,60	0,60	0,83	0,60	0,83	
	0,90	0,91	0,78	0,91	0,78	
156	0,30	0,28	6,00	0,29	2,89	
	0,60	0,59	2,33	0,61	0,90	
	0,90	0,89	0,89	0,92	2,39	
161	0,30	0,29	4,33	0,31	2,00	
	0,60	0,59	1,17	0,63	5,38	
	0,90	0,90	0,11	0,94	4,22	
166	0,30	0,29	3,00	0,32	6,33	
	0,60	0,58	3,00	0,62	3,00	
	0,90	0,88	2,78	0,94	4,56	
171	0,30	0,28	7,00	0,32	5,00	
	0,60	0,56	6,17	0,64	6,17	
	0,90	0,85	5,11	0,97	7,44	
176	0,30	0,29	4,33	0,34	11,67	
	0,60	0,55	8,00	0,64	7,17	
	0,90	0,80	11,00	0,93	3,67	
181	0,30	0,27	10,33	0,32	7,33	
	0,60	0,53	11,00	0,64	6,67	
	0,90	0,80	11,00	0,99	9,56	
186	0,30	0,26	14,33	0,32	5,33	
	0,60	0,52	13,50	0,64	6,50	
	0,90	0,79	12,56	0,94	4,33	
191	0,30	0,25	16,33	0,32	5,67	
	0,60	0,50	16,67	0,63	5,33	
	0,90	0,76	15,67	0,96	6,67	
196	0,30	0,24	21,67	0,31	1,67	
	0,60	0,47	21,00	0,62	2,50	
	0,90	0,72	19,56	0,94	4,33	
				2,05		2,38
				6,89		6,55
				16,81		4,70

Tablo 6.25: 2 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,14	52,93	25,23	0,14	52,93
	0,60	0,51	14,76		0,51	14,76
	0,90	0,88	2,46		0,88	2,46
156	0,30	0,13	55,47		0,14	54,00
	0,60	0,50	16,67		0,52	13,91
	0,90	0,86	4,58		0,89	1,42
161	0,30	0,13	55,47		0,14	52,52
	0,60	0,49	18,48		0,52	13,08
	0,90	0,84	6,28		0,90	0,07
166	0,30	0,12	59,03	31,93	0,14	54,96
	0,60	0,48	20,29		0,53	12,37
	0,90	0,82	8,40		0,91	0,70
171	0,30	0,14	52,93		0,16	46,69
	0,60	0,48	20,48		0,54	9,95
	0,90	0,81	10,43		0,91	1,43
176	0,30	0,12	60,56		0,14	54,03
	0,60	0,45	25,00		0,52	12,58
	0,90	0,77	14,33		0,90	0,15
181	0,30	0,11	64,38	0,13	57,30	
	0,60	0,43	28,75	0,51	14,60	
	0,90	0,73	18,58	0,88	2,40	
186	0,30	0,10	65,65	44,26	0,13	57,69
	0,60	0,41	31,93		0,50	16,16
	0,90	0,71	20,70		0,88	2,31
191	0,30	0,09	69,47		0,12	61,38
	0,60	0,39	35,75		0,49	18,73
	0,90	0,68	24,51		0,86	4,52
196	0,30	0,06	78,37		0,08	71,93
	0,60	0,35	42,11		0,45	24,86
	0,90	0,63	29,88		0,82	8,98

Tablo 6.26: 3 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)		X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,09	71,19	35,11	0,09	71,19	33,30
	0,60	0,40	34,16		0,40	34,16	
	0,90	0,85	5,35		0,85	5,35	
156	0,30	0,10	67,08		0,10	65,99	
	0,60	0,41	32,10		0,42	29,85	
	0,90	0,85	5,35		0,88	2,22	
161	0,30	0,11	64,73		0,11	62,39	
	0,60	0,41	31,41		0,44	26,87	
	0,90	0,86	4,63		0,92	1,68	
166	0,30	0,11	64,73	28,68	0,12	61,22	26,28
	0,60	0,44	27,49		0,48	20,29	
	0,90	0,87	3,85		0,95	5,70	
171	0,30	0,13	56,89		0,15	51,18	
	0,60	0,44	27,49		0,49	17,89	
	0,90	0,88	2,02		1,00	10,96	
176	0,30	0,13	56,89		0,15	49,75	
	0,60	0,43	27,52		0,51	15,52	
	0,90	0,88	2,02		1,03	14,20	
181	0,30	0,15	49,05	0,18	38,93		
	0,60	0,45	25,56	0,54	10,77		
	0,90	0,89	0,71	1,07	19,01		
186	0,30	0,15	48,84	26,64	0,19	36,98	22,72
	0,60	0,45	25,23		0,55	7,89	
	0,90	0,89	1,60		1,09	21,21	
191	0,30	0,14	52,77		0,18	40,26	
	0,60	0,44	26,02		0,56	6,42	
	0,90	0,87	2,93		1,11	22,79	
196	0,30	0,14	54,48		0,18	40,92	
	0,60	0,45	24,72		0,59	2,29	
	0,90	0,87	3,13		1,13	25,74	

Tablo 6.27: 4 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)		
151	0,30	0,11	62,09	27,89	0,11	62,09	25,58
	0,60	0,49	17,65		0,49	17,65	
	0,90	0,87	2,83		0,87	2,83	
156	0,30	0,11	62,09		0,12	60,84	
	0,60	0,49	18,95		0,50	16,27	
	0,90	0,85	5,01		0,88	1,87	
161	0,30	0,13	58,17		0,13	55,40	
	0,60	0,49	18,30		0,52	12,89	
	0,90	0,85	5,88		0,90	0,35	
166	0,30	0,11	63,40	37,25	0,12	59,76	27,97
	0,60	0,46	23,53		0,50	15,93	
	0,90	0,82	9,37		0,90	0,36	
171	0,30	0,07	77,50		0,08	74,52	
	0,60	0,41	31,38		0,47	22,29	
	0,90	0,76	15,47		0,86	4,27	
176	0,30	0,11	64,71		0,12	58,86	
	0,60	0,44	26,80		0,51	14,68	
	0,90	0,77	14,60		0,90	0,46	
181	0,30	0,09	71,24	0,10	65,53		
	0,60	0,41	31,37	0,49	17,74		
	0,90	0,74	17,65	0,89	1,29		
186	0,30	0,08	72,55	44,59	0,10	66,19	30,01
	0,60	0,40	33,99		0,49	18,69	
	0,90	0,71	20,70		0,88	2,32	
191	0,30	0,10	66,01		0,13	57,01	
	0,60	0,40	32,68		0,51	14,85	
	0,90	0,70	22,00		0,89	1,34	
196	0,30	0,05	83,01		0,07	77,94	
	0,60	0,35	41,83		0,45	24,49	
	0,90	0,64	28,54		0,83	7,24	

Tablo 6.28: 5 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,11	62,96	27,85	0,11	62,96
	0,60	0,49	18,12		0,49	18,12
	0,90	0,87	3,83		0,87	3,83
156	0,30	0,12	60,57		0,12	59,27
	0,60	0,50	16,22		0,52	13,44
	0,90	0,88	2,09		0,91	1,15
161	0,30	0,12	60,89		0,13	58,30
	0,60	0,48	19,63		0,51	14,31
	0,90	0,84	6,32		0,90	0,11
166	0,30	0,14	53,63	24,26	0,15	49,02
	0,60	0,53	12,30		0,58	3,59
	0,90	0,91	1,47		1,00	11,55
171	0,30	0,13	56,32		0,15	50,54
	0,60	0,53	11,55		0,60	0,16
	0,90	0,92	2,68		1,05	16,27
176	0,30	0,13	56,08		0,15	48,81
	0,60	0,51	15,82		0,59	1,88
	0,90	0,88	2,45		1,02	13,70
181	0,30	0,12	59,07	0,15	50,93	
	0,60	0,50	16,63	0,60	0,06	
	0,90	0,87	3,12	1,05	16,13	
186	0,30	0,14	52,41	23,44	0,18	41,37
	0,60	0,51	15,50		0,62	4,09
	0,90	0,88	2,56		1,08	20,03
191	0,30	0,14	53,05		0,18	40,61
	0,60	0,51	15,75		0,64	6,57
	0,90	0,88	2,77		1,11	22,99
196	0,30	0,14	52,36		0,19	38,16
	0,60	0,51	14,60		0,67	10,85
	0,90	0,88	2,01		1,14	27,19

Tablo 6.29: 6 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)		X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,24	18,85	9,43	0,24	18,85	7,06
	0,60	0,54	9,48		0,54	9,48	
	0,90	0,84	6,71		0,84	6,71	
156	0,30	0,26	14,25		0,26	11,41	
	0,60	0,57	5,24		0,57	2,11	
	0,90	0,89	1,54		0,89	1,72	
161	0,30	0,25	16,36		0,25	10,83	
	0,60	0,56	7,36		0,56	1,23	
	0,90	0,85	5,07		0,85	1,21	
166	0,30	0,24	18,48	15,06	0,24	10,38	4,71
	0,60	0,55	8,95		0,55	0,10	
	0,90	0,85	5,43		0,85	3,97	
171	0,30	0,24	21,45		0,24	11,04	
	0,60	0,53	12,19		0,53	0,56	
	0,90	0,82	8,95		0,82	3,10	
176	0,30	0,24	21,34		0,24	8,32	
	0,60	0,51	15,16		0,51	1,11	
	0,90	0,80	11,42		0,80	3,24	
181	0,30	0,22	25,89	0,22	11,17		
	0,60	0,50	17,19	0,50	0,74		
	0,90	0,77	14,25	0,77	2,79		
186	0,30	0,21	28,54	18,67	0,21	11,98	5,54
	0,60	0,51	15,48		0,51	4,11	
	0,90	0,77	14,25		0,77	5,62	
191	0,30	0,25	18,11		0,25	3,58	
	0,60	0,50	17,06		0,50	4,91	
	0,90	0,74	17,39		0,74	4,50	
196	0,30	0,24	21,13		0,24	2,38	
	0,60	0,49	17,82		0,49	6,68	
	0,90	0,74	18,23		0,74	6,14	

Tablo 6.30: 7 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 2)	
151	0,30	0,17	44,84	20,00	0,17	44,84
	0,60	0,52	13,48		0,52	13,48
	0,90	0,88	1,99		0,88	1,99
156	0,30	0,17	43,42		0,18	41,55
	0,60	0,53	11,99		0,55	9,08
	0,90	0,89	1,51		0,92	1,75
161	0,30	0,16	45,06		0,18	41,42
	0,60	0,52	13,26		0,55	7,52
	0,90	0,86	4,46		0,92	1,87
166	0,30	0,17	44,99	25,56	0,18	39,53
	0,60	0,51	15,31		0,56	6,89
	0,90	0,84	6,75		0,92	2,51
171	0,30	0,16	47,62		0,18	40,68
	0,60	0,49	18,80		0,55	8,05
	0,90	0,82	8,68		0,93	3,42
176	0,30	0,15	48,59		0,18	40,08
	0,60	0,48	19,29		0,56	5,93
	0,90	0,82	9,00		0,95	6,07
181	0,30	0,15	50,92	0,18	41,17	
	0,60	0,46	22,81	0,56	7,48	
	0,90	0,77	13,97	0,93	3,13	
186	0,30	0,15	50,34	34,03	0,18	38,83
	0,60	0,44	27,39		0,54	10,56
	0,90	0,75	16,71		0,92	2,60
191	0,30	0,14	54,82		0,17	42,85
	0,60	0,43	28,89		0,54	10,05
	0,90	0,73	19,33		0,92	2,05
196	0,30	0,13	57,06		0,17	44,27
	0,60	0,42	30,13		0,54	9,30
	0,90	0,71	21,57		0,92	1,81

Tablo 6.31: 8 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)		X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,17	44,33	19,50	0,17	44,33	17,39
	0,60	0,53	12,14		0,53	12,14	
	0,90	0,88	2,42		0,88	2,42	
156	0,30	0,18	40,72		0,18	38,76	
	0,60	0,51	15,22		0,53	12,41	
	0,90	0,88	1,69		0,91	1,56	
161	0,30	0,18	39,13		0,19	35,10	
	0,60	0,51	14,49		0,55	8,83	
	0,90	0,85	5,31		0,91	0,96	
166	0,30	0,19	37,83	0,21	31,65	14,92	
	0,60	0,52	13,84	0,57	5,28		
	0,90	0,85	5,39	0,94	4,01		
171	0,30	0,17	42,03	0,20	34,35		
	0,60	0,49	18,12	0,56	7,27		
	0,90	0,81	10,15	0,92	1,76		
176	0,30	0,16	47,83	0,18	39,19		
	0,60	0,47	22,46	0,54	9,63		
	0,90	0,78	13,04	0,91	1,35		
181	0,30	0,16	46,38	0,19	35,72		
	0,60	0,47	22,37	0,56	6,95		
	0,90	0,77	14,98	0,92	1,92		
186	0,30	0,16	45,11	0,20	32,39	16,46	
	0,60	0,47	22,46	0,57	4,49		
	0,90	0,76	15,46	0,94	4,14		
191	0,30	0,14	53,62	0,18	41,34		
	0,60	0,43	28,26	0,54	9,26		
	0,90	0,72	19,81	0,91	1,44		
196	0,30	0,13	56,52	0,17	43,56		
	0,60	0,41	31,16	0,54	10,64		
	0,90	0,69	23,67	0,89	0,92		

Tablo 6.32: 9 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)		X Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,22	28,32	13,85	0,22	28,32	11,74
	0,60	0,55	7,71		0,55	7,71	
	0,90	0,89	1,43		0,89	1,43	
156	0,30	0,22	26,52		0,23	24,09	
	0,60	0,56	5,91		0,58	2,80	
	0,90	0,90	0,24		0,93	3,06	
161	0,30	0,20	33,69		0,21	29,30	
	0,60	0,52	13,98		0,55	8,28	
	0,90	0,84	6,81		0,89	0,64	
166	0,30	0,21	30,11		0,23	23,16	
	0,60	0,53	11,29		0,59	2,48	
	0,90	0,85	5,02		0,94	4,42	
171	0,30	0,20	32,08		0,23	23,08	
	0,60	0,52	13,26	0,59	1,77		
	0,90	0,84	6,81	0,95	5,53		
176	0,30	0,20	31,90	0,24	20,62		
	0,60	0,52	13,08	0,61	1,31		
	0,90	0,83	7,41	0,97	7,92		
181	0,30	0,19	36,00	0,23	23,29		
	0,60	0,50	17,06	0,60	0,59		
	0,90	0,80	10,96	0,96	6,73		
186	0,30	0,20	31,90	0,25	16,11		
	0,60	0,52	13,98	0,64	5,96		
	0,90	0,82	8,60	1,01	12,58		
191	0,30	0,20	33,69	0,25	16,13		
	0,60	0,51	14,92	0,65	7,62		
	0,90	0,82	8,60	1,04	15,61		
196	0,30	0,19	36,38	0,25	17,42		
	0,60	0,49	17,56	0,64	7,01		
	0,90	0,80	11,29	1,04	15,15		

Tablo 6.33: 10 nolu lastik karışımı için klasik ve Yeni model 1'in başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)		X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)			
151	0,30	0,12	59,71	21,58	0,12	59,71	21,11		
	0,60	0,49	17,58		0,49	17,58			
	0,90	0,87	2,93		0,87	2,93			
156	0,30	0,17	43,19		0,18	41,30			
	0,60	0,57	4,87		0,59	1,72			
	0,90	0,96	7,02		1,00	10,57			
161	0,30	0,16	46,18		0,17	42,62			
	0,60	0,55	9,10		0,58	3,08			
	0,90	0,93	3,64		0,99	10,50			
166	0,30	0,16	46,67		20,89	0,18		41,37	17,93
	0,60	0,54	9,76			0,60		0,79	
	0,90	0,92	1,88			1,01		12,00	
171	0,30	0,16	45,99	0,18		38,83			
	0,60	0,53	11,08	0,60		0,70			
	0,90	0,90	0,12	1,02		13,38			
176	0,30	0,16	47,11	0,18		38,35			
	0,60	0,52	13,71	0,60		0,58			
	0,90	0,89	1,63	1,03		14,65			
181	0,30	0,15	50,80	0,18		41,02			
	0,60	0,50	16,33	0,60		0,30			
	0,90	0,85	5,59	1,02		13,17			
186	0,30	0,14	53,30	27,46	0,17	42,47	18,64		
	0,60	0,49	18,20		0,60	0,76			
	0,90	0,83	8,22		1,02	13,05			
191	0,30	0,14	52,73		0,18	40,21			
	0,60	0,49	19,05		0,61	2,40			
	0,90	0,83	8,22		1,04	16,09			
196	0,30	0,14	52,57		0,18	38,44			
	0,60	0,46	22,70		0,60	0,33			
	0,90	0,79	12,17		1,03	14,00			

Tablo 6.34: 11 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)		
151	0,30	0,20	33,01	16,10	0,20	33,01	
	0,60	0,55	8,76		0,55	8,76	
	0,90	0,88	1,82		0,88	1,82	
156	0,30	0,19	35,34		0,20	33,20	
	0,60	0,53	11,64		0,55	8,71	
	0,90	0,88	2,70		0,90	0,53	
161	0,30	0,19	36,90		0,20	32,72	
	0,60	0,53	11,49		0,57	5,63	
	0,90	0,87	3,26		0,93	3,15	
166	0,30	0,20	33,91		20,72	0,22	27,34
	0,60	0,53	12,05			0,58	3,31
	0,90	0,85	5,65			0,93	3,72
171	0,30	0,19	38,11	0,21		29,91	
	0,60	0,51	14,63	0,58		3,32	
	0,90	0,83	7,57	0,94		4,68	
176	0,30	0,18	39,13	0,21		29,05	
	0,60	0,50	17,26	0,58		3,57	
	0,90	0,80	10,92	0,93		3,83	
181	0,30	0,18	41,09	0,21		29,39	
	0,60	0,50	17,38	0,59		0,97	
	0,90	0,80	10,92	0,96		6,78	
186	0,30	0,16	45,73	30,78	0,20	33,15	
	0,60	0,47	22,16		0,58	4,11	
	0,90	0,76	15,01		0,94	4,69	
191	0,30	0,15	51,15		0,19	38,21	
	0,60	0,44	26,36		0,56	6,86	
	0,90	0,73	19,06		0,92	2,38	
196	0,30	0,15	49,71		0,20	34,73	
	0,60	0,44	27,08		0,57	5,35	
	0,90	0,71	20,74		0,93	2,88	

Tablo 6.35: 12 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,23	23,72	15,73	0,23	23,72
	0,60	0,56	7,01		0,56	7,01
	0,90	0,89	1,42		0,89	1,42
156	0,30	0,20	32,93		0,21	30,71
	0,60	0,52	12,60		0,54	9,71
	0,90	0,85	5,83		0,88	2,71
161	0,30	0,20	32,83		0,21	28,38
	0,60	0,51	15,65		0,54	10,06
	0,90	0,81	9,55		0,87	3,56
166	0,30	0,20	34,96	0,21	28,50	
	0,60	0,49	18,19	0,54	10,06	
	0,90	0,78	13,28	0,86	4,66	
171	0,30	0,21	31,37	0,23	22,28	
	0,60	0,51	15,65	0,57	4,48	
	0,90	0,81	9,55	0,92	2,43	
176	0,30	0,19	37,64	0,22	27,32	
	0,60	0,46	22,58	0,54	9,76	
	0,90	0,75	16,87	0,87	3,11	
181	0,30	0,17	42,40	0,21	30,96	
	0,60	0,45	24,68	0,54	9,71	
	0,90	0,72	19,59	0,87	3,61	
186	0,30	0,17	44,85	0,20	32,07	
	0,60	0,43	27,63	0,53	10,86	
	0,90	0,70	22,30	0,86	4,29	
191	0,30	0,17	44,41	0,21	29,69	
	0,60	0,43	27,99	0,55	8,91	
	0,90	0,69	23,48	0,87	3,21	
196	0,30	0,15	49,57	0,20	34,54	
	0,60	0,40	33,17	0,52	13,25	
	0,90	0,65	28,28	0,84	6,91	

Tablo 6.36: 13 nolu lastik karışımı için klasik model ve Yeni model 1'in başarımları

T	X(Ölçülen)	X(Klasik)	% Hata (Klasik)	X (Yeni model 1)	% Hata (Yeni model 1)	
151	0,30	0,22	26,12	0,22	26,12	
	0,60	0,55	7,89		0,55	7,89
	0,90	0,89	1,32		0,89	1,32
156	0,30	0,22	27,05	0,23	24,63	
	0,60	0,54	10,20		0,56	7,23
	0,90	0,86	4,61		0,89	1,45
161	0,30	0,21	31,01	0,22	26,45	
	0,60	0,53	12,00		0,56	6,17
	0,90	0,85	5,41		0,91	0,85
166	0,30	0,19	36,31	0,21	29,98	
	0,60	0,51	15,77		0,56	7,40
	0,90	0,82	8,85		0,90	0,21
171	0,30	0,20	34,44	0,22	25,76	
	0,60	0,51	15,77		0,57	4,61
	0,90	0,81	9,63		0,92	2,34
176	0,30	0,18	39,18	0,21	29,11	
	0,60	0,48	19,70		0,56	6,41
	0,90	0,78	13,05		0,91	1,35
181	0,30	0,19	35,51	0,23	22,70	
	0,60	0,49	17,85		0,59	1,53
	0,90	0,79	12,36		0,95	5,05
186	0,30	0,19	35,36	0,24	20,38	
	0,60	0,46	23,67		0,56	5,98
	0,90	0,75	16,17		0,93	3,26
191	0,30	0,16	45,34	0,21	30,86	
	0,60	0,38	35,88		0,49	18,89
	0,90	0,69	23,86		0,87	3,69
196	0,30	0,14	52,57	0,18	38,44	
	0,60	0,38	36,06		0,50	17,01
	0,90	0,68	24,11		0,89	1,50

Tablo 6.24-6.36'dan da görüldüğü gibi, pişirme sıcaklığı arttıkça ve özellikle de tam pişmeye yakın kritik bölgelerde klasik modelin başarımları azalmaktadır. (2.5) eşitliğinde dayanak (referans) alınan endüyük sıcaklık, bu çalışma için 151 °C olduğuna göre, pişirme sıcaklığı 151 °C'den uzaklaştıkça bu durumun gözlenmesi beklenen bir sonuçtur. Bu da pişirme düzeyi değerinde sıcaklık etkisini arttıracak bir düzeltme katsayısının (faktörünün) modeli iyileştirebileceğini düşündürmüştür. Bu düşünceden hareketle karışımın herhangi bir andaki pişirme düzeyi (6.1) eşitliği ile tanımlanmış ve aynı örnek karışım için 10 farklı sıcaklıkta pişirme düzeyi hesaplamaları tekrar yapılmıştır. “Yeni model 1” olarak adlandırılan bu yaklaşımın

başarımı da yine 13 lastik karışımı için Tablo 6.24-6.36'da görülmektedir. Modelin en önemli katkısı, özellikle yüksek sıcaklıklarda ve yüksek pişme düzeylerinde, klasik yaklaşıma göre daha iyi sonuç vermesidir.

$$X(t) = \frac{\Gamma_r(T) - \Gamma_0(T)}{\Gamma_{\max}(\min T) - \Gamma_0(\min T)} \frac{T}{\min T} \quad (6.1)$$

Bu model ile, bir lastik karışımı için klasik yaklaşıma göre yüksek bir başarımla herhangi bir andaki pişme düzeyi hesaplanabilmesine karşın model, pişme hızının sıcaklık bağımlılığını tek bir fonksiyon olarak tanımlayamaması nedeniyle, sonlu elemanlar modelinde kullanılabilecek bir model değildir.

6.8.2. Kamal modeli ve Yeni model 2

13 farklı lastik karışımı için yapılan incelemede, çalışılan sıcaklık bölgesinden seçilen birbirine uzak 3 farklı sıcaklık için Kamal modelinin başarımla değerlendirilmiştir. Bu çalışmada lastik karışımlarının özellikle tam pişme bölgesindeki pişme düzeylerinin doğru tahmin edilmesi önemli olduğundan, Kamal modelinin uygun bir model olduğu düşünülmüştür. Karışımların farklı sıcaklıklarda ve artan pişme sürelerinde pişme düzeyleri Kamal modeli uyarınca hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.37-6.49'da verilmiştir.

Kamal modelinde, zaman-pişme düzeyi ilişkisinin sıcaklıkla değişiminin (2.11) eşitliğinde görüldüğü gibi Arrhenius tipi bir değişim olduğu söylenmektedir. Oysa çalışılan 13 karışım için 10 farklı sıcaklıkta yapılan değerlendirmeler sonucunda, K_2 değerlerinin Arrhenius tipi bir bağımlılıktan çok üstel olarak oldukça iyi bir bağlanım katsayısı ile Şekil 6.10'daki gibi modellenebileceği görülmüştür. Bu model, (2.16) eşitliğinde verilen Esson modeline uymaktadır. Lastik karışımlarının çaprazbağlanma tepkimesinin katı fazda gerçekleşen ve henüz aydınlatılmamış birçok alt adımdan oluşan bir tepkime olduğu düşünülürse bu, beklenen bir sonuçtur.

Tablo 6.37: 1 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,81	171,27
	0,60	0,89	48,63
	0,80	0,95	18,50
	0,90	0,98	8,78
	0,95	0,99	4,45
Ortalama % hata			50,33
171	0,30	0,85	182,30
	0,60	0,92	52,68
	0,80	0,96	19,79
	0,90	0,98	9,01
	0,95	0,99	4,37
Ortalama % hata			53,63
196	0,30	0,92	208,27
	0,60	0,97	61,77
	0,80	0,98	23,06
	0,90	0,99	10,20
	0,95	1,00	4,77
Ortalama % hata			61,61

Tablo 6.38: 2 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,87	191,33
	0,60	0,93	55,45
	0,80	0,97	21,19
	0,90	0,99	9,56
	0,95	0,99	4,53
Ortalama % hata			56,41
171	0,30	0,79	163,10
	0,60	0,89	48,55
	0,80	0,94	18,00
	0,90	0,97	7,77
	0,95	0,98	3,43
Ortalama % hata			48,17
196	0,30	0,81	169,10
	0,60	0,92	52,80
	0,80	0,96	19,60
	0,90	0,98	8,53
	0,95	0,99	3,89
Ortalama % hata			50,79

Tablo 6.39: 3 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,31	2,83
	0,60	0,64	6,37
	0,80	0,81	1,38
	0,90	0,90	0,29
	0,95	0,94	0,98
Ortalama % hata			2,37
171	0,30	0,41	35,17
	0,60	0,72	20,30
	0,80	0,86	6,91
	0,90	0,92	1,96
	0,95	0,95	0,06
Ortalama % hata			12,88
196	0,30	0,77	155,20
	0,60	0,90	50,55
	0,80	0,95	19,21
	0,90	0,97	8,30
	0,95	0,99	3,71
Ortalama % hata			47,39

Tablo 6.40: 4 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,55	84,97
	0,60	0,75	24,80
	0,80	0,88	10,21
	0,90	0,95	5,21
	0,95	0,98	2,76
Ortalama % hata			25,59
171	0,30	0,56	87,83
	0,60	0,76	26,70
	0,80	0,89	10,75
	0,90	0,95	5,18
	0,95	0,97	2,55
Ortalama % hata			26,60
196	0,30	0,69	129,33
	0,60	0,85	41,37
	0,80	0,93	15,90
	0,90	0,96	7,16
	0,95	0,98	3,38
Ortalama % hata			39,43

Tablo 6.41: 5 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,06	81,47
	0,60	0,26	55,87
	0,80	0,61	23,61
	0,90	0,82	8,73
	0,95	0,91	3,98
Ortalama % hata			34,73
171	0,30	0,13	55,27
	0,60	0,41	31,45
	0,80	0,70	12,70
	0,90	0,85	5,07
	0,95	0,93	2,44
Ortalama % hata			21,39
196	0,30	0,37	22,13
	0,60	0,64	6,88
	0,80	0,84	4,46
	0,90	0,92	2,71
	0,95	0,96	1,34
Ortalama % hata			7,51

Tablo 6.42: 6 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,05	83,47
	0,60	0,26	56,07
	0,80	0,61	23,48
	0,90	0,82	8,62
	0,95	0,91	3,89
Ortalama % hata			35,11
171	0,30	0,12	60,77
	0,60	0,37	37,68
	0,80	0,69	13,80
	0,90	0,86	4,52
	0,95	0,93	2,04
Ortalama % hata			23,76
196	0,30	0,57	90,07
	0,60	0,78	29,60
	0,80	0,90	12,93
	0,90	0,96	6,14
	0,95	0,98	2,88
Ortalama % hata			28,32

Tablo 6.43: 7 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,83	178,30
	0,60	0,91	51,93
	0,80	0,96	19,84
	0,90	0,98	8,96
	0,95	0,99	4,24
Ortalama % hata			52,65
171	0,30	0,77	156,30
	0,60	0,88	46,73
	0,80	0,94	17,84
	0,90	0,97	8,04
	0,95	0,99	3,73
Ortalama % hata			46,53
196	0,30	0,85	184,17
	0,60	0,94	55,88
	0,80	0,97	20,99
	0,90	0,98	9,26
	0,95	0,99	4,31
Ortalama % hata			54,92

Tablo 6.44: 8 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,91	204,73
	0,60	0,95	58,38
	0,80	0,98	22,21
	0,90	0,99	10,11
	0,95	1,00	4,89
Ortalama % hata			60,07
171	0,30	0,83	176,87
	0,60	0,90	50,18
	0,80	0,95	18,85
	0,90	0,98	8,62
	0,95	0,99	4,17
Ortalama % hata			51,74
196	0,30	0,87	189,47
	0,60	0,94	56,05
	0,80	0,97	21,00
	0,90	0,98	9,23
	0,95	0,99	4,33
Ortalama % hata			56,02

Tablo 6.45: 9 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,27	9,37
	0,60	0,41	32,07
	0,80	0,69	13,61
	0,90	0,89	1,63
	0,95	0,96	0,76
Ortalama % hata			11,49
171	0,30	0,24	21,50
	0,60	0,37	37,72
	0,80	0,61	23,16
	0,90	0,86	4,76
	0,95	0,96	0,68
Ortalama % hata			17,56
196	0,30	0,55	83,93
	0,60	0,71	18,93
	0,80	0,86	6,87
	0,90	0,94	4,54
	0,95	0,98	2,67
Ortalama % hata			23,39

Tablo 6.46: 10 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,75	148,67
	0,60	0,85	41,25
	0,80	0,93	16,09
	0,90	0,97	8,01
	0,95	0,99	4,23
Ortalama % hata			43,65
171	0,30	0,76	151,93
	0,60	0,85	41,30
	0,80	0,93	15,98
	0,90	0,97	8,04
	0,95	0,99	4,24
Ortalama % hata			44,30
196	0,30	0,91	204,67
	0,60	0,95	58,97
	0,80	0,98	22,30
	0,90	0,99	10,00
	0,95	1,00	4,80
Ortalama % hata			60,15

Tablo 6.47: 11 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,65	117,90
	0,60	0,80	32,97
	0,80	0,91	14,05
	0,90	0,96	7,10
	0,95	0,98	3,59
Ortalama % hata			35,12
171	0,30	0,65	117,20
	0,60	0,80	32,57
	0,80	0,91	13,61
	0,90	0,96	6,73
	0,95	0,98	3,35
Ortalama % hata			34,69
196	0,30	0,58	93,03
	0,60	0,74	23,40
	0,80	0,88	9,40
	0,90	0,95	5,46
	0,95	0,98	2,99
Ortalama % hata			26,86

Tablo 6.48: 12 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,59	95,27
	0,60	0,77	27,53
	0,80	0,90	12,53
	0,90	0,96	6,30
	0,95	0,98	3,04
Ortalama % hata			28,93
171	0,30	0,61	102,90
	0,60	0,78	30,53
	0,80	0,91	13,15
	0,90	0,96	6,31
	0,95	0,98	2,97
Ortalama % hata			31,17
196	0,30	0,77	155,47
	0,60	0,88	47,47
	0,80	0,95	18,85
	0,90	0,98	8,41
	0,95	0,99	3,94
Ortalama % hata			46,83

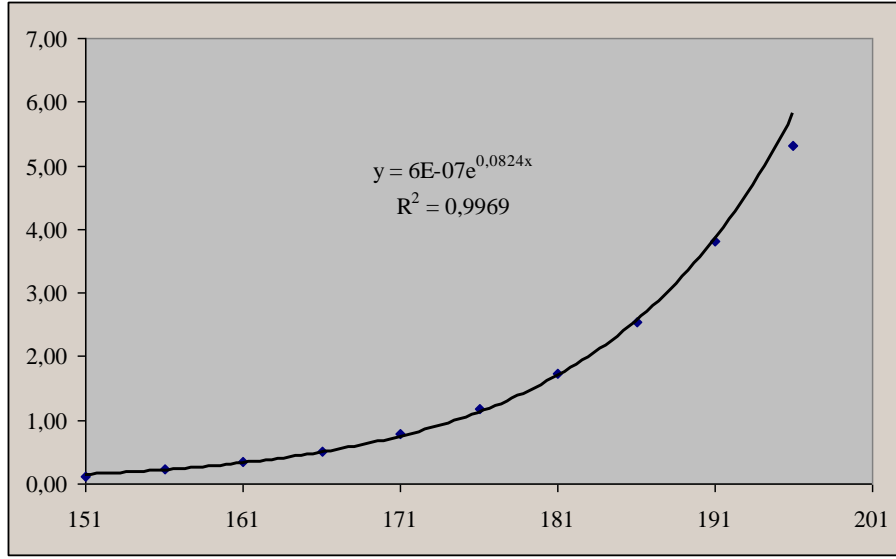
Tablo 6.49: 13 nolu lastik karışımı için Kamal modelinin başarımı

T	X(Ölçülen)	X(Kamal)	%Hata
151	0,30	0,18	40,83
	0,60	0,43	28,67
	0,80	0,70	12,93
	0,90	0,86	4,04
	0,95	0,94	0,85
Ortalama % hata			17,47
171	0,30	0,19	36,53
	0,60	0,47	22,22
	0,80	0,74	7,55
	0,90	0,88	2,42
	0,95	0,94	1,14
Ortalama % hata			13,97
196	0,30	0,53	75,27
	0,60	0,77	28,43
	0,80	0,90	12,93
	0,90	0,95	5,73
	0,95	0,97	2,12
Ortalama % hata			24,90

Bu çalışmada Kamal modelini geliştirmek amacıyla önerilen yeni kinetik model (6.2) eşitliğinde verilmiş ve “Yeni model 2” olarak adlandırılmıştır. Kamal modelinde, lastiğin pişirilmesi sırasında değişken sıcaklık koşullarında karışımların pişme düzeylerinin doğru tahmin edilmesini sağlayan en önemli etken K_2 değişmezidir. Bu değişmez sıcaklık bağımlılığını daha doğru tanımlayabilmek, modelin başarımını doğrudan etkileyen bir katkıdır.

$$X(t) = \left[\frac{1 - \exp(-K_2 t)}{1 + \exp(-K_2 t)} \right]^2 \quad K_2 = A \exp(BT) \quad (6.2)$$

Buna göre, 13 karışım için sıcaklığın pişme hızına etkisini tanımlayan K_2 değişmezlerine ait A ve B katsayıları Tablo 6.50’de verilmiştir. Yeni model 2’nin, bu hali ile sonlu elemanlar yöntemi ile çözümünde kinetik çözümlemede kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.10: Örnek karışım için Kamal modeli hız değişmezlerinin (K_2) pişirme sıcaklığı ile ilişkisi

Tablo 6.50: Model lastik karışımlarının Yeni model 2'deki K_2 değişmezlerinin sıcaklıkla değişimi

Karışım No	$K_2=Aexp(BT)$		
	A	B	r^2
1	4E-05	0,0624	0,9984
2	2E-05	0,0619	0,9995
3	2E-06	0,0711	0,9982
4	2E-05	0,0632	0,9997
5	1E-06	0,073	0,9928
6	6E-07	0,0824	0,9969
7	3E-05	0,0619	0,9989
8	5E-05	0,0597	0,9967
9	3E-06	0,0691	0,9922
10	4E-05	0,0613	0,9993
11	3E-05	0,0588	0,9967
12	2E-05	0,0646	0,9987
13	3E-06	0,0714	0,9954

6.8.3. Yeni model 2'nin literatürdeki örnek çalışmalara uyarlanması

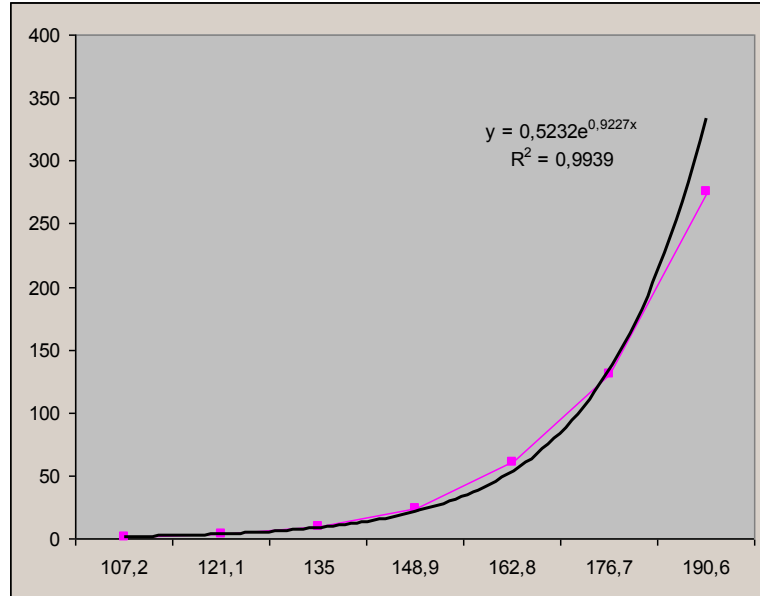
Bu bölümde, ilgilenilen 13 lastik karışımı için uygun başarımlar gösteren Yeni model 2, literatürde farklı karışımlar için elde edilmiş reometre eğrilerine de uyarlanmış ve başarımlarını değerlendirilmiştir.

Toth ve diğ. (1991), stiren-bütadien kauçuğu (SBR) karışımı için 7 farklı sıcaklıkta reometre eğrisi çekmiş ve sıcaklık bağımlılığını Arrhenius eşitliği ile açıklamaya çalışmıştır. Tablo 6.51'de çalışma sıcaklıkları ve bu sıcaklıklardaki hız değişimleri verilmiştir.

Tablo 6.51: Örnek bir SBR karışımı için sıcaklık-hız değişimi ilişkisi (Toth ve diğ., 1991)

T(°C)	107,2	121,1	135	148,9	162,8	176,7	190,6
K ₂	1,058	3,35	9,6	24,3	60,2	130	275

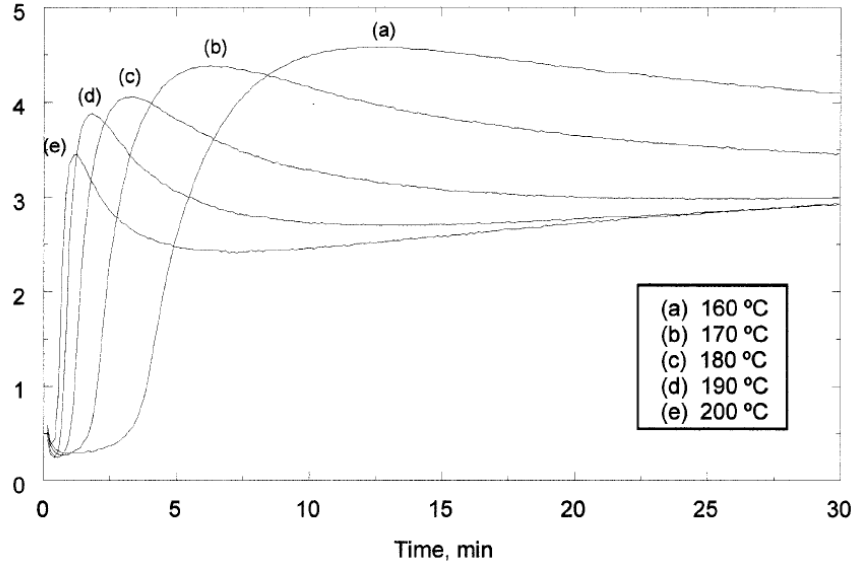
Yukarıdaki veriler, bu çalışmada önerilen ve (6.2) eşitliğinde verilen Yeni model 2 ile değerlendirildiğinde, mükemmel bir uyum gösterdiği bulunmuştur (Şekil 6.11).



Şekil 6.11: Örnek bir SBR karışımı için sıcaklık-hız değişimi ilişkisi

Lopez-Manchado ve diğ. (2003), bir doğal kauçuk (NR) karışımının pişme davranışını farklı yöntemlerle incelemek üzere bir çalışma yapmış ve bu çalışmada

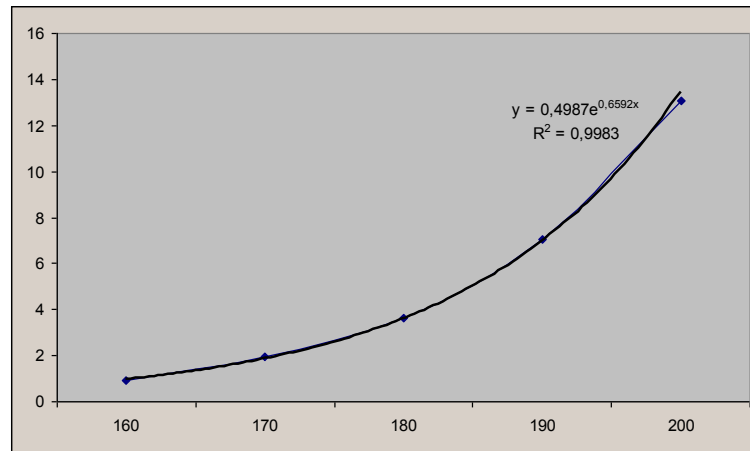
karışımın 5 farklı sıcaklıkta reometre eğrilerini çekmiştir. Grafik üzerinden (Şekil 6.12) eğriler TechDig grafik işleme programı yardımı ile okunmuş ve Yeni model 2’de verilen sıcaklık-hız değişmezi ilişkisini incelemek üzere kullanılmıştır. Eğrilerden elde edilen sıcaklık ile hız değişmezlerinin ilişkisi Tablo 6.52’de, bu verilerin üstel olarak modellenmesi ile elde edilen ilişki de Şekil 6.13’te verilmiştir.



Şekil 6.12: Örnek bir NR karışımı için farklı sıcaklıklardaki reometre eğrileri (Lopez-Manchado ve diğ., 2003)

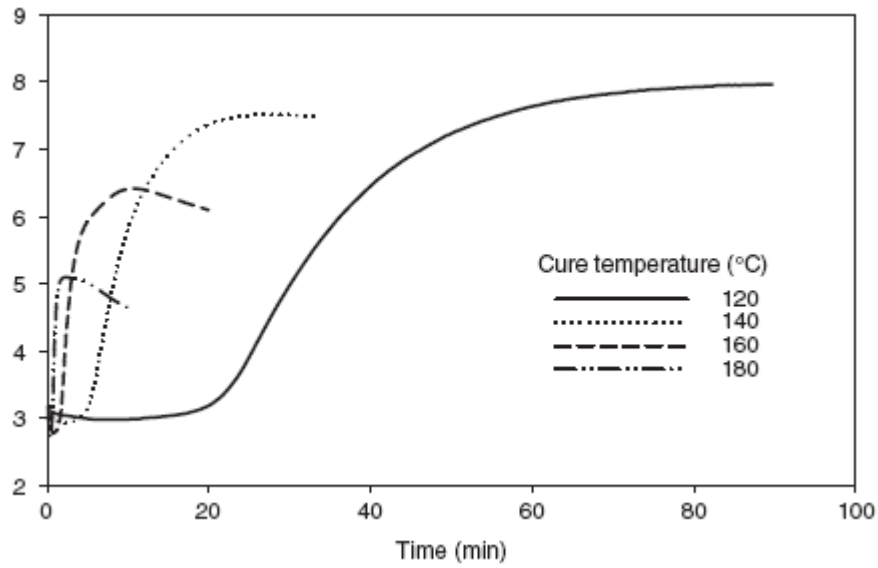
Tablo 6.52: Örnek bir NR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi

T(°C)	160	170	180	190	200
K₂	0,9146	1,9795	3,6386	7,0389	13,0979



Şekil 6.13: Örnek bir NR karışımı için sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi

Isayev ve Sujan (2006), öğütülmüş lastik atıklarının ultrasonik yöntemle devulkanize etmiş ve tekrar pişirilmesi sırasındaki davranışını belirlemek üzere 4 farklı sıcaklıkta reometre eğrisini çekmiştir (Şekil 6.14). Bu eğriler de TechDig grafik işleme programı yardımı ile okunmuş ve elde edilen veriler için Yeni model 2’de verilen sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi incelenmiştir. Sıcaklık ile hız değişmezlerinin ilişkisi Tablo 6.53’te, bu verilerin üstel fonksiyon olarak modellenmesi ile elde edilen ilişki de Şekil 6.15’te verilmiştir.

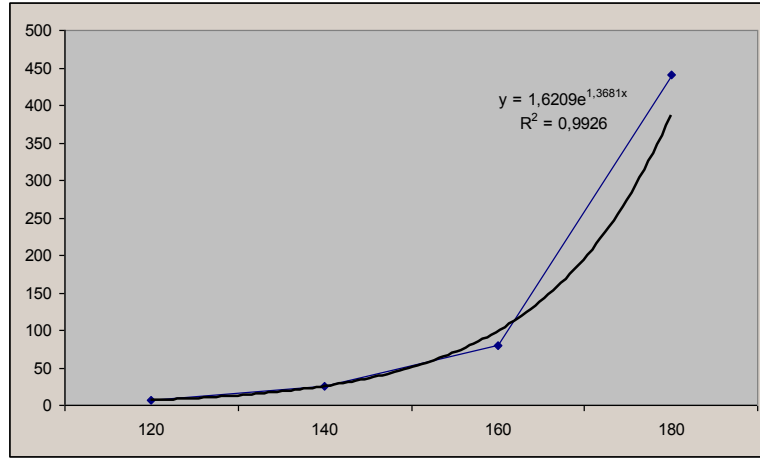


Şekil 6.14: Devulkanize lastik atıklarının tekrar pişirilmesi sırasında elde edilen reometre eğrileri (Isayev ve Sujan, 2006)

Tablo 6.53: Devulkanize lastik atıklarının tekrar pişirilmesine ait sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi

T(°C)	120	140	160	180
K₂	6,6809	25,9562	78,8815	440,9760

Şekil 6.11, 6.13 ve 6.15'ten görüldüğü gibi, literatürde incelenmiş farklı tiplerdeki lastik karışımları için de Yeni model 2, sıcaklık-hız değişmezi ilişkisini başarılı bir şekilde tanımlamaktadır.



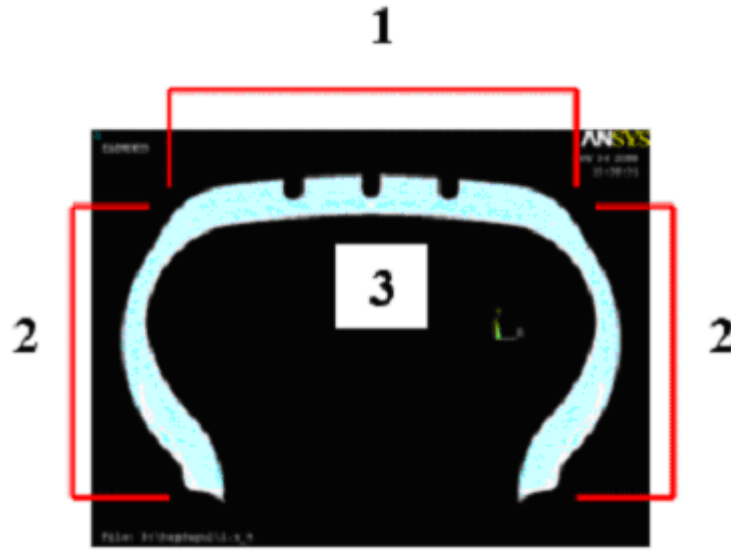
Şekil 6.15: Devulkanize lastik atıklarının tekrar pişirilmesine ait sıcaklık-hız değişmezi ilişkisi

6.9. Pişmesi Sürecinde Model Lastiğin İçindeki Sıcaklık Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elde Edilmesi

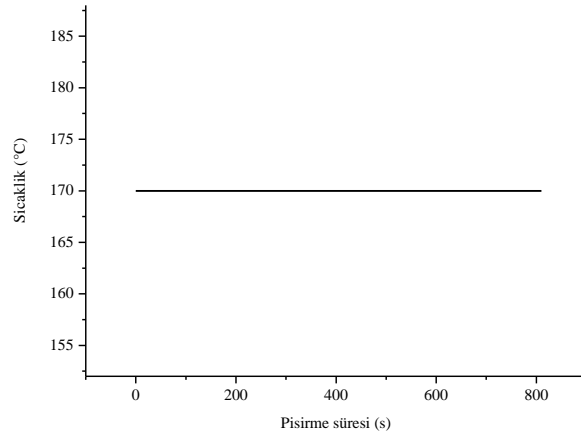
Pişirme süreci modellenen lastiğin, ANSYS ekranındaki kesit görüntüsü Şekil 5.3'te verilmişti. Bu model üzerinde çözüm için öncelikle, modelin bölünmüş parçalarını oluşturan 15 farklı malzemenin yoğunluk, ısıl iletkenlik ve ısı sığası özellikleri tanımlanmıştır. Yoğunluk ve ısıl iletkenlik değerleri değişmez, ısı sığaları ise 10 farklı sıcaklık için sıcaklıkla değişken verilmiştir. Yoğunluk değerleri Tablo 6.17'de verilen ortalama değerlerdir. Isıl iletkenlikler Tablo 6.19'dan doğrudan alınmıştır. Isı sığaları ise, Tablo 6.23'ten, 25-250 °C aralığında eşit artımlı 10 farklı sıcaklıkta, çiğ ve pişmiş bileşenlere ait değerlerin ortalaması olarak alınmıştır. Eleman tipi olarak, esnek geometrik geçişlere sahip olması sayesinde karmaşık geometrilerin elemanlara bölünmesi için uygun olan SOLID 70 ısıl eleman tipi seçilmiştir. Olanaklı olan en az sayıda eleman kullanarak, 35753 elemandan oluşan bir sonlu eleman modeli elde edilmiştir.

Başlangıç sınır koşulu olarak, lastik pişirme ortamının ortalama sıcaklığı olan 40 °C alınmıştır. Pişirme sırasında lastiğe ısı aktarımı Şekil 6.15'da gösterilen üç farklı bölgeden gerçekleşir. Mevcut pişirme koşullarında bu bölgeler için sıcaklığın zamanla değişimi Şekil 6.17-6.19'da verilmiştir. Ayrıca, pişme sırasında gerçekleşen çaprazbağlanma tepkimesinde açığa çıkan ısı da lastiğin ısınmasına neden olur. Isı üretim hızı, lastiğin her bileşeni için yoğunluk, tepkime ısısı ve pişme sırasında her

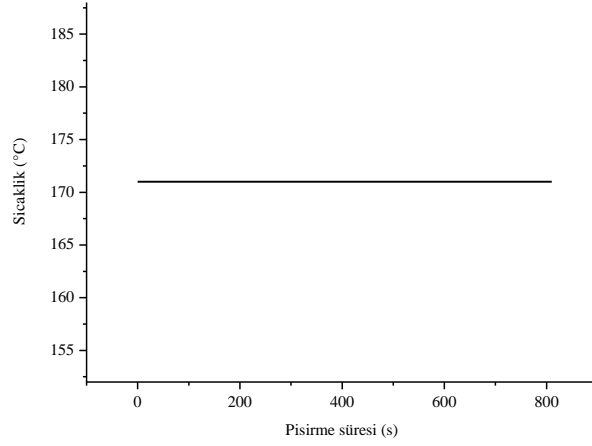
zaman dilimi için erişilen sıcaklıktaki tepkime ilerleme düzeyinin çarpımı ile elde edilir. Fonksiyon yazımında kullanılan büyüklükler; Tablo 6.17'deki ortalama yoğunluk değerleri ve Tablo 6.20'deki çaprazbağlanma ısılarıdır. Tepkime ilerleme düzeyleri ise Kamal modeli ve Yeni model 2 uyarınca tanımlanmıştır.



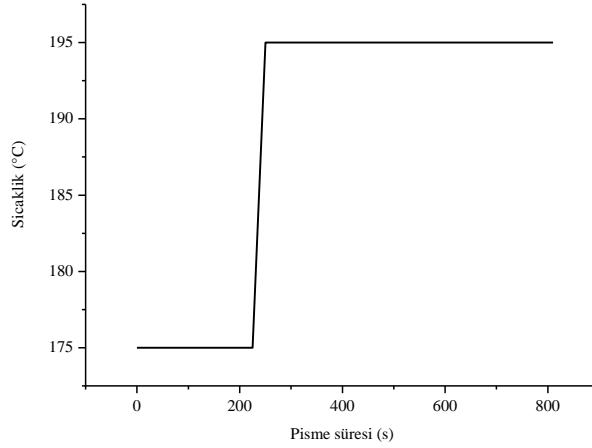
şekil 6.16: Lastik pişirme sürecindeki sınır ısıtma yükleri



şekil 6.17: 1. bölge sınır sıcaklığı



Şekil 6.18: 2. bölge sınır sıcaklığı



Şekil 6.19: 3. bölge sınır sıcaklığı

Temel alınan çaprazbağlanma düzeyi, çalışmanın önceki bölümlerinde Yeni model 2 olarak tanımlanan ve (6.3) eşitliği uyarınca hesaplanacak şekilde ANSYS’de fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Fonksiyonların tanımlanması sırasında, bu eşitlikteki A ve B değişmezleri, yine çalışmanın önceki bölümlerinde hesaplandığı şekli ile kullanılmıştır. Toplam pişirme süresi 810 s’dir.

$$Q = \rho \Delta H \left[\frac{1 - \exp(-K_2 t)}{1 + \exp(-K_2 t)} \right]^2 \quad K_2 = A \exp(BT) \quad (6.3)$$

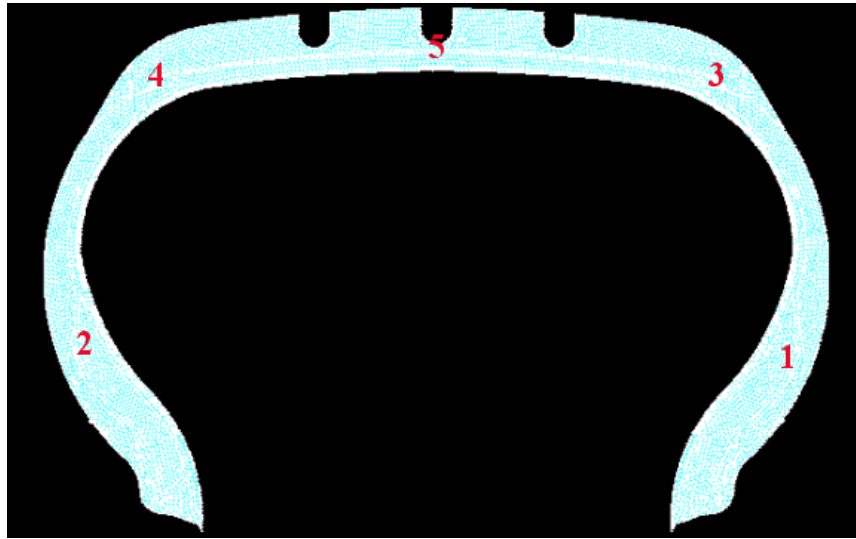
Yeni model 2 uyarınca yapılan çözümlerde, ya pişirme makinasının zaman göstergesinde oluşabilecek bir hatadan dolayı ya da teknolojilerin yanlış pişirme

zamanı öngörmeleri gibi olası durumlarda lastiğin kalıptan 150 s erken ve 150 s geç çıkarılması durumları da incelenerek, lastiğin kritik bölgelerindeki bileşenlerin pişme düzeylerinin ne olacağı tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Çaprazbağlanma ısısının dikkate alınmadığı ve zamanla değişmez çaprazbağlanma ısısı kabul edildiği durumlar için de sonlu elemanlar çözümü yapılmıştır. Ayrıca çaprazbağlanma tepkimesi hız değişiminin sıcaklık bağımlılığını Arrhenius yasası ile tanımlayan Kamal modeli uyarınca da sonlu elemanlar modeli çözülmüştür. Bu çözümde de her bileşenin ısı üretimi büyüklükleri, hesaplanan Arrhenius değişimleri kullanılarak fonksiyon olarak tanımlanmıştır.

Bu bölümde ayrıca, pişirme ünitesine giren ve ısıtma amaçlı kullanılan kızgın buharın basınç göstergesinde meydana gelen bir arıza sonucu beklenenden daha düşük basınçta buhar ile ısıtmanın, lastiğin pişmesini nasıl etkileyeceği öngörülme çalışılmıştır. Son olarak da lastik içinde kritik bir bölgede farklı bir lastik karışımının kullanılması durumunda, modelin sağlayabileceği yararlar değerlendirilmiştir.

İncelenen her durum için, pişirme sırasında lastik üzerinde sıcaklığı ölçülen kritik kontrol noktaları Şekil 6.20’de gösterilmektedir. Deneme üretimleri sırasında kontrol noktalarına ısı çiftlerinin yerleştirilmesi sırasında çekilen fotoğraflar da Şekil 6.21-6.2’te verilmiştir.



Şekil 6.20: Lastik üzerindeki sıcaklık kontrol noktaları



Şekil 6.21: 1.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi



Şekil 6.22: 2.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi



Şekil 6.23: 3.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi



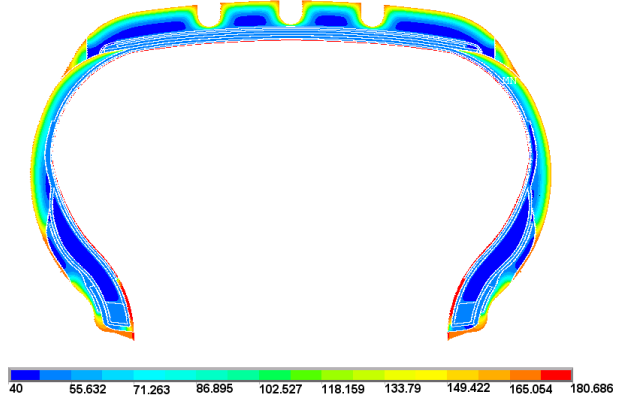
Şekil 6.24: 4.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi



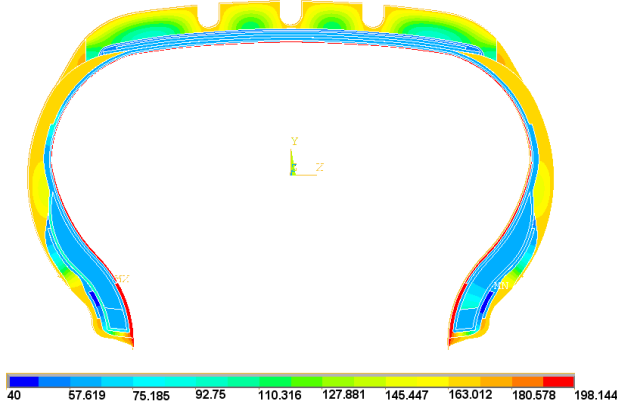
Şekil 6.25: 5.kontrol noktasına ısıçift yerleştirilmesi

6.9.1. Lastik karışımlarında ısı üretimi olmadığı kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi

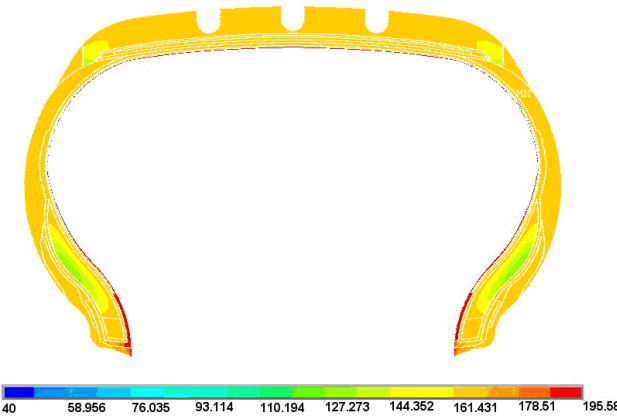
Pişme sürecinde gerçekleşen, lastik karışımlarının çaprazbağlanma tepkimesi gerçekte ısıveren bir tepkimedir. Fakat pratikte zaman zaman tepkime sırasında açığa çıkan ısı enerjisi ihmal edilmektedir. Bu durum için yapılan benzetim sonucu elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 6.26'da verilmiştir.



(a)



(b)

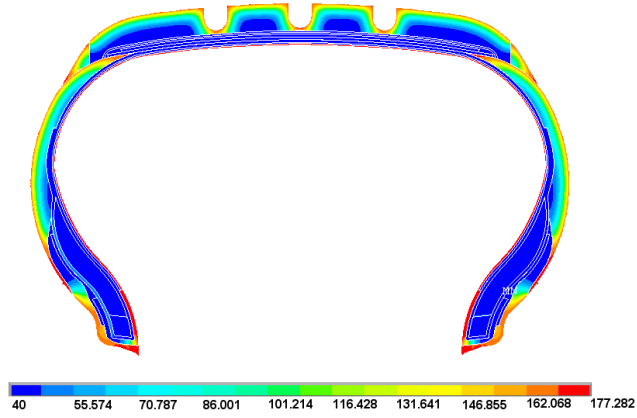


(c)

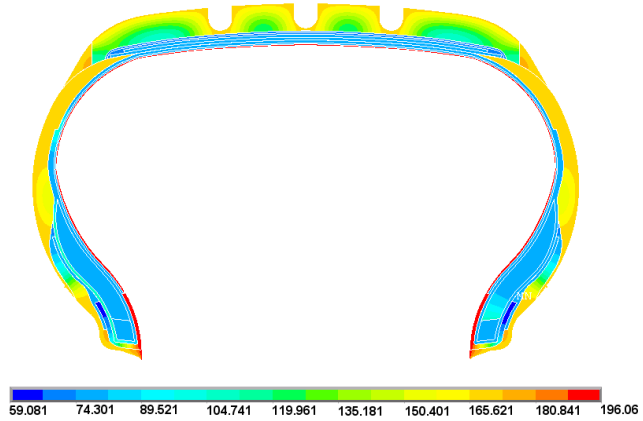
Şekil 6.26: Isı üretimi olmadığı durumda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b) Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c) Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

6.9.2. Lastik karışımlarında sabit ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi

Sonlu elemanlar benzetimlerinde yapılan alışılmış basitleştirmelerden biri de pişme sırasında çaprazbağlanma düzeyinin zamanla değişmediği, dolayısıyla ısı üretim hızının zamanla değişmez olduğu kabulüdür. Bu durum için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin benzetim sonuçları Şekil 6.27’de verilmiştir.

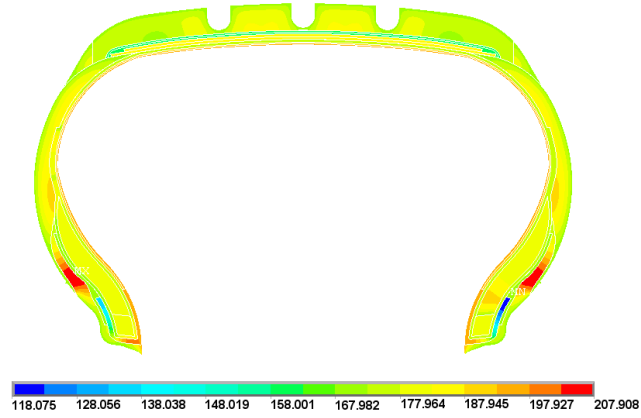


(a)



(b)

Şekil 6.27: Sabit ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b) Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c) Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

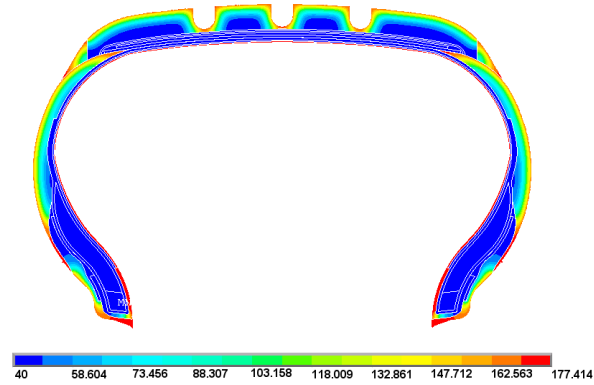


(c)

Şekil 6.27 (devam): Sabit ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

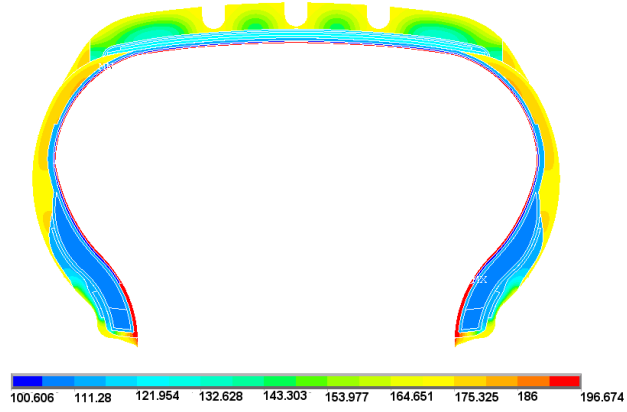
6.9.3. Lastik karışımlarında Kamal modeli uyarınca ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi

Sonlu elemanlar modelinde, ısı üretim hızının Kamal modeli uyarınca tanımlandığı durum için benzetim sonuçları Şekil 6.28’de verilmiştir.

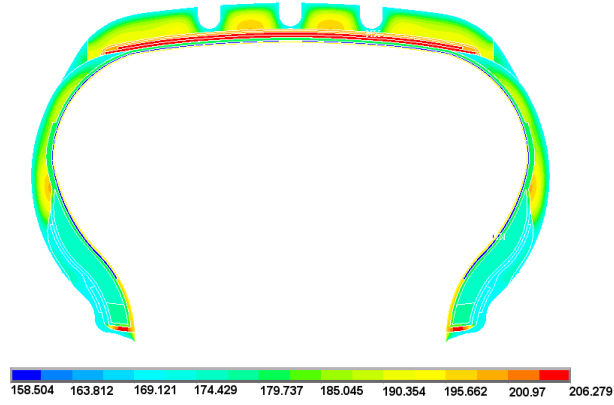


(a)

Şekil 6.28: Kamal modeline göre ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b)Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c)Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı



(b)

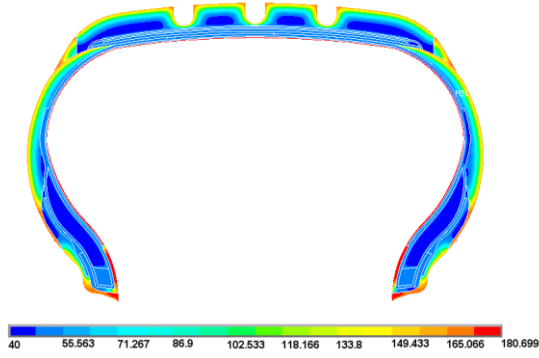


(c)

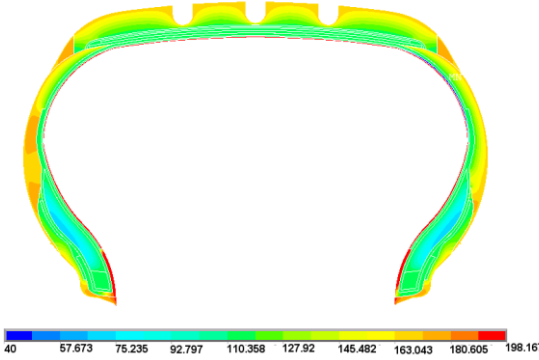
Şekil 6.28 (devam): Kamal modeline göre ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b) Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c) Pişirme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

6.9.4. Lastik karışımlarında Yeni model 2 uyarınca ısı üretimi olduğu kabul edilerek yapılan pişirme benzetimi

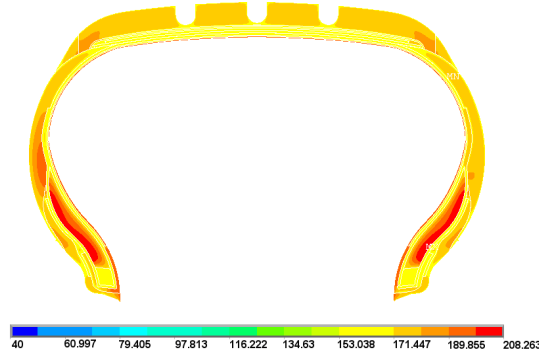
Sonlu elemanlar ile çözümlenmede, ısı üretim hızının bu çalışmada önerilen Yeni model 2 uyarınca tanımlandığı durum için benzetim sonuçları Şekil 6.29'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.29: Yeni model 2'ye göre ısı üretimi durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b) Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c) Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

Gerçekleştirilen tüm benzetimlerin sayısal sonuçları Tablo 6.54-6.58'de verilmiştir. Burada, normal pişirme süresinde pişirilen lastikten ölçülen sıcaklık değerleri “Ö-1” sütununda, normalden 150 s kısa ve 150 s uzun sürede pişirilen lastiklerden ölçülen sıcaklık değerleri ise sırasıyla “Ö-2” ve “Ö-3” sütunlarında verilmiştir. Tabloların

devamında, “A” ile gösterilen durum; çaprazbağlanma sırasındaki ısı üretiminin dikkate alınmadığı durumu, “B” ; değişmez ısı üretim hızı durumunu, “C”; ısı üretim hızının Kamal modeli ile tanımlandığı durumu ve “D” ise Yeni model 2 ile hesaplanan ısı üretim hızının tanımlandığı durumu göstermektedir. A,B,C ve D modellerinin başarımlarını kıyaslamak için normal sürede pişirilen lastik üzerinden ölçülen sıcaklıklar kullanılmıştır. Ö-1, Ö-2 ve Ö-3 durumlarına ait sıcaklık verileri ise, aynı zamanda, ölçümlerin tekrarlanabilirliğini kanıtlamak için önemlidir.

Tablo 6.54: Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 1. kontrol noktasının sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	1.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)						
	Ö-1	Ö-2	Ö-3	A	B	C	D
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	76,8	78,6	64,8	58,6	78,2	75,1	78,4
120	99,1	92,3	97,2	98,4	108,2	119,1	98,9
180	116,2	117,8	116,6	112,9	121,8	143,8	118,8
240	128,9	131,4	130,7	126,2	145,1	158,2	132,0
300	138,4	142,1	141,5	133,4	154,2	167,3	143,0
360	146,9	150,6	150,1	137,8	156,6	172,6	149,5
420	154,1	158,1	157,9	149,1	167,6	177,3	153,1
480	160,4	163,9	164,1	152,6	169,1	179,8	158,1
540	166,0	168,8	169,4	157,0	173,4	181,6	167,1
600	171,0	173,1	174,4	161,9	175,7	182,9	170,8
660	175,0	175,4	178,1	162,6	177,1	185,3	173,9
720	178,2		180,6	166,0	179,2	186,9	177,0
780	180,5		181,7	168,2	180,8	187,2	179,3
810	180,2		184,1	169,0	181,6	187,5	179,9
950			184,9				184,5

Tablo 6.55: Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 2. kontrol noktasının sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	2.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)						
	Ö-1	Ö-2	Ö-3	A	B	C	D
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	84,1	81,4	76,4	66,1	74,4	79,5	78,1
120	108,4	99,9	106,0	97,9	103,4	119,1	107,6
180	124,9	117,2	124,5	111,2	134,7	142,0	127,9
240	136,3	131,3	137,5	136,5	144,6	155,8	146,4
300	144,9	143,2	147,8	146,3	152,4	164,6	154,7
360	152,3	151,4	156,0	155,9	156,6	173,3	160,6
420	158,2	158,5	161,1	157,3	167,6	177,6	164,7
480	163,3	164,7	164,1	160,6	170,2	179,0	173,1
540	167,6	170,2	170,0	164,4	173,5	182,5	176,9
600	171,0	174,5	172,9	166,8	174,6	182,8	177,5
660	173,7	176,9	174,6	167,6	177,1	185,6	176,2
720	175,7		179,1	168,2	176,9	186,6	179,6
780	177,1		179,4	168,7	180,4	187,1	179,9
810	177,1		180,2	169,4	181,6	187,5	180,2
950			185,2				183,4

Tablo 6.56: Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 3. kontrol noktasının sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	3.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)						
	Ö-1	Ö-2	Ö-3	A	B	C	D
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	54,0	54,2	56,9	51,6	69,9	55,1	55,3
120	73,1	75,4	78,3	69,6	80,3	84,9	76,4
180	90,6	92,5	98,5	73,7	92,4	97,7	92,3
240	105,4	112,3	111,0	86,1	109,5	114,8	105,7
300	117,7	122,7	120,8	101,9	130,3	125,8	118,2
360	128,1	131,7	137,7	110,6	129,5	137,9	129,7
420	136,7	142,6	144,6	121,2	131,5	148,4	137,5
480	144,5	147,8	147,5	127,5	142,3	157,6	144,7
540	153,7	159,2	160,1	130,7	154,5	165,5	154,6
600	160,3	164,9	163,4	138,0	156,2	172,4	161,4
660	165,0	168,0	169,3	141,8	165,0	178,4	167,1
720	169,2		171,2	146,0	169,7	183,0	174,8
780	172,6		173,6	149,8	174,5	187,4	179,9
810	176,6		177,0	151,5	175,9	190,0	182,9
950			179,6				191,3

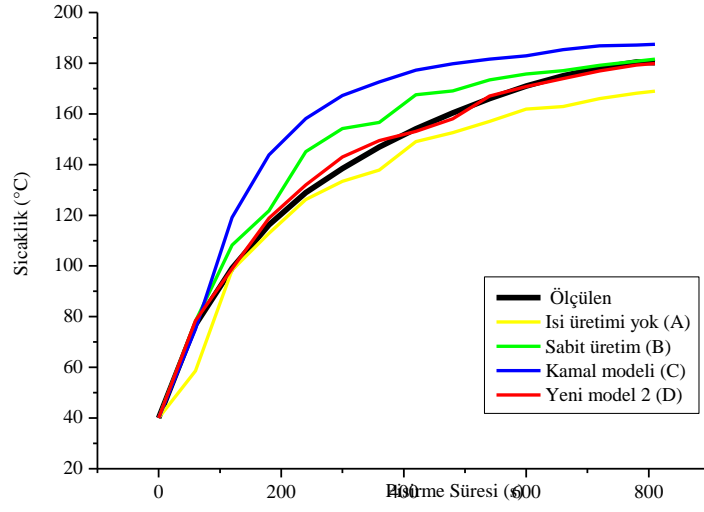
Tablo 6.57: Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 4. kontrol noktasının sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	4.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)						
	Ö-1	Ö-2	Ö-3	A	B	C	D
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	62,6	57,6	63,2,2	52,5	69,7	51,1	56,0
120	79,1	82,0	81,6	65,0	86,8	85,3	76,7
180	101,4	105,7	105,7	80,2	95,7	98,9	96,2
240	116,1	118,4	119,9	92,8	113,5	115,7	105,4
300	129,9	131,3	133,4	103,3	126,8	124,9	117,8
360	140,8	146,8	143,1	112,1	127,5	137,9	129,3
420	147,6	153,0	152,3	119,7	132,1	148,4	138,1
480	156,2	157,9	157,8	126,3	142,0	157,6	147,6
540	163,2	161,8	166,0	133,4	155,3	165,8	155,8
600	167,8	166,7	172,8	137,5	158,1	172,4	163,5
660	171,7	167,2	175,0	141,9	164,0	178,8	168,6
720	174,7		175,8	146,0	169,4	183,6	174,8
780	178,2		177,0	149,8	174,2	187,9	180,2
810	178,3		177,7	151,6	176,6	190,1	182,7
950			179,0				191,2

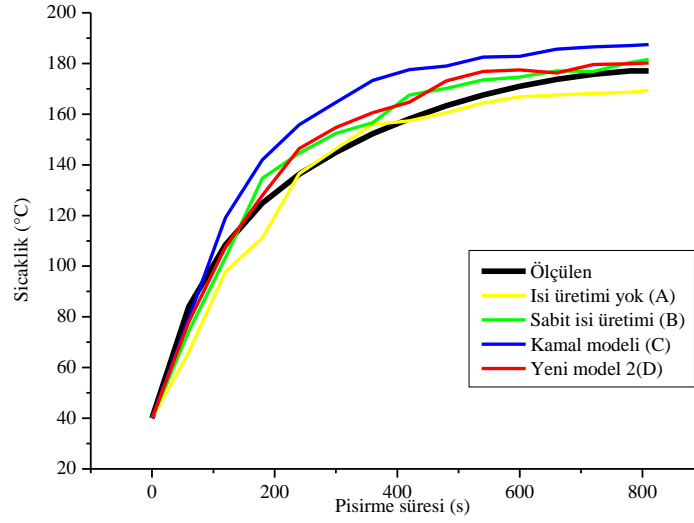
Tablo 6.58: Isı üretimi için farklı kabuller durumunda 5. kontrol noktasının sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	5.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)						
	Ö-1	Ö-2	Ö-3	A	B	C	D
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	154,5	153,4	151,6	120,3	135,7	137,6	135,7
120	159,4	154,3	159,6	128,7	150,4	153,4	149,3
180	161,1	158,9	162,3	133,9	156,3	160,0	149,6
240	162,3	161,2	164,1	138,2	160,0	161,5	150,5
300	162,4	163,0	165,7	142,3	162,5	166,9	160,9
360	163,7	164,6	166,7	146,1	165,0	169,1	163,6
420	165,6	165,6	167,9	149,6	166,8	169,7	164,7
480	167,3	166,7	168,7	153,4	168,1	171,9	166,4
540	168,7	167,7	169,4	157,0	169,5	173,3	167,8
600	169,9	168,7	170,4	160,0	170,8	174,5	169,2
660	170,1	170,0	170,8	164,1	172,0	176,0	171,2
720	172,0		171,5	165,9	173,3	179,7	171,9
780	176,6		172,1	168,8	174,1	180,8	175,1
810	179,5		172,6	169,5	174,5	181,3	177,8
950			174,9				179,4

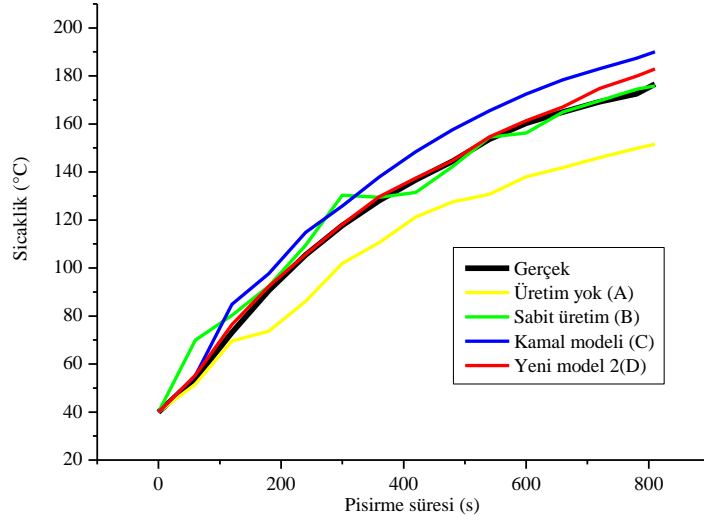
810 s'lik pişirme sürecinde, 5 kontrol noktası için ölçülen ve sözü geçen 4 durum için benzetim sonucu elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 6.30-6.34'te görülmektedir.



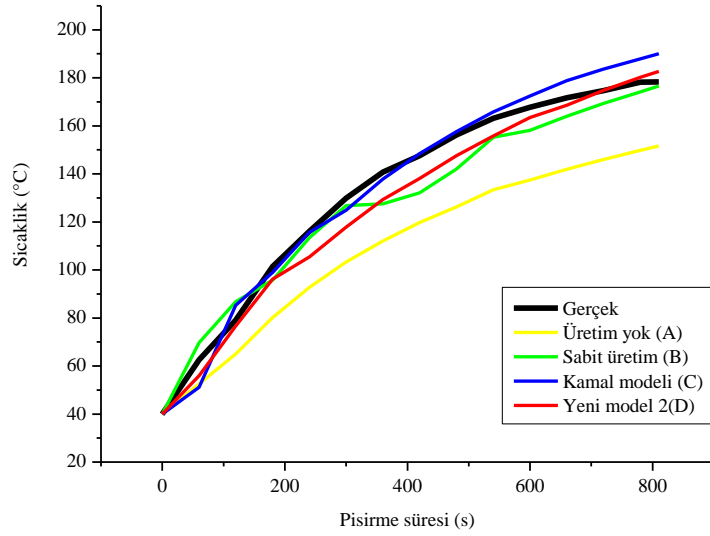
Şekil 6.30: Çeşitli benzetimler için 1. kontrol noktası sıcaklıkları



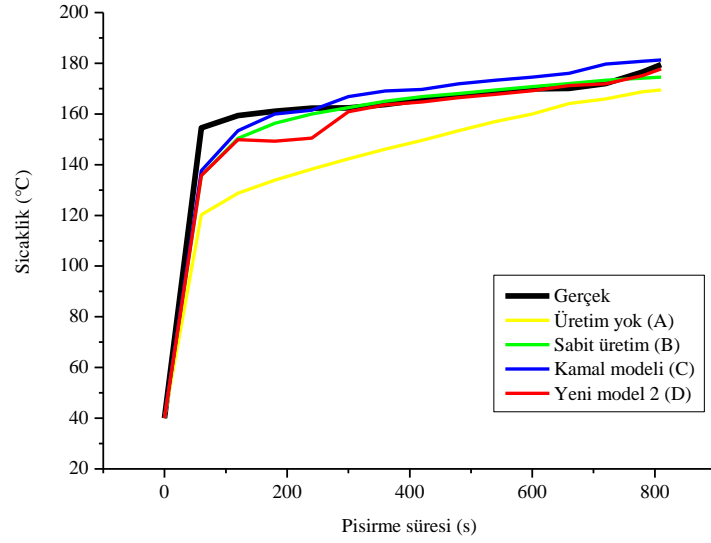
Şekil 6.31: Çeşitli benzetimler için 2. kontrol noktası sıcaklıkları



Şekil 6.32: Çeşitli benzetimler için 3. kontrol noktası sıcaklıkları



Şekil 6.33: Çeşitli benzetimler için 4. kontrol noktası sıcaklıkları



Şekil 6.34: Çeşitli benzetimler için 5. kontrol noktası sıcaklıkları

Tüm modellerin benzetim hataları, 5 kontrol noktası için ayrı ayrı olmak üzere Tablo 6.59’da verilmiştir.

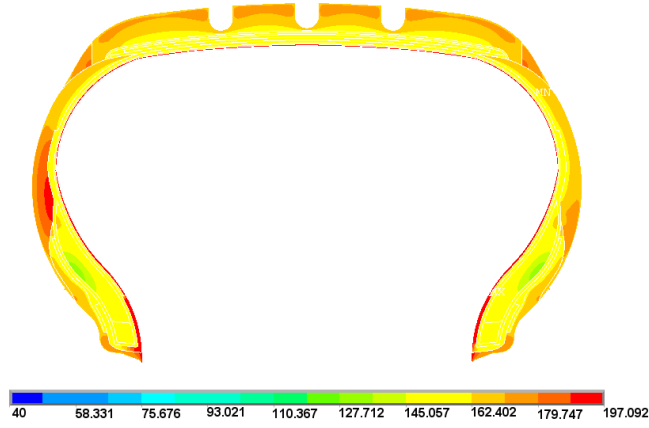
Tablo 6.59: Modellerin benzetim hataları

Kontrol noktası	Ortalama mutlak hata (%)			
	A	B	C	D
1	5,66	4,70	11,29	1,13
2	4,60	4,06	8,86	3,76
3	12,03	4,48	7,65	1,68
4	16,99	5,45	4,13	4,66
5	9,60	2,09	2,93	2,56
Ortalama	9,78	4,16	6,97	2,76

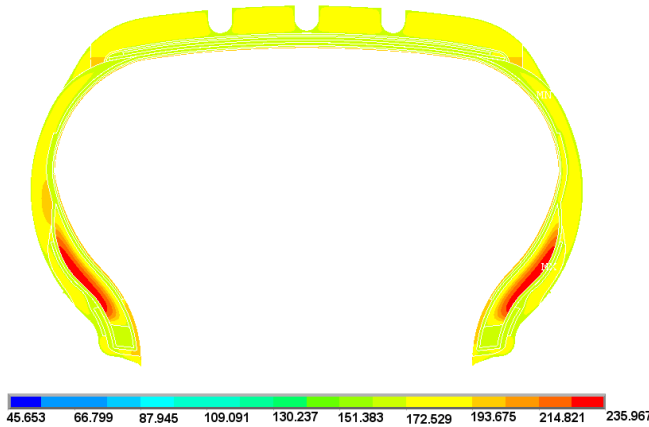
Tablo ve grafiklerden görüldüğü gibi, oluşturulan sonlu elemanlar modelleri ile, pişme sürecinde model lastik içerisindeki sıcaklık dağılımını iyi bir yaklaşıklıkla tahmin etmek olanaklıdır. Özellikle pişmenin ilerleyen aşamalarında, çaprazbağlanma sırasındaki ısı üretiminin Yeni model 2 uyarınca tanımlandığı modelin, diğer modellere kıyasla, genel olarak gerçek durumu daha yüksek bir başarımla temsil ettiği söylenebilir.

6.9.5. Pişirme sürecinin 150 s kısa ve 150 s uzun sürmesi sonucu lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı benzetimi

Bu bölümde, ısı üretim hızının Yeni model 2 uyarınca tanımlandığı sonlu elemanlar modeli temel alınarak, model lastiğin normal pişirme süresinden 150 s kısa ve 150 s uzun pişirildiği durum için yapılan benzetimlerde kontrol noktaları için belirlenen sıcaklıklar Tablo 6.54-6.58’de verilmişti. Söz konusu benzetimlerin grafiksel sonuçları ise sırasıyla Şekil 6.35 ve 6.36’da verilmiştir.



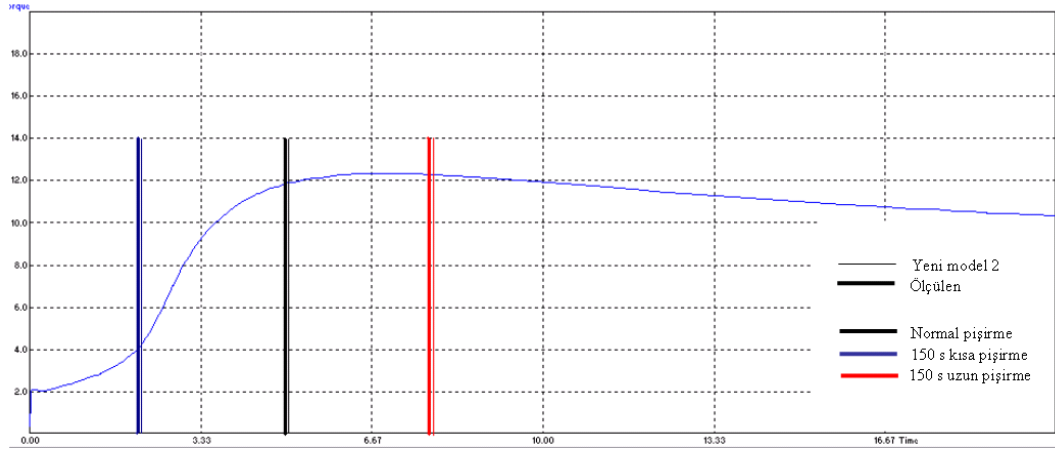
Şekil 6.35: Pişirme sürecinin 150 s kısa sürmesi durumunda pişirme süreci sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı



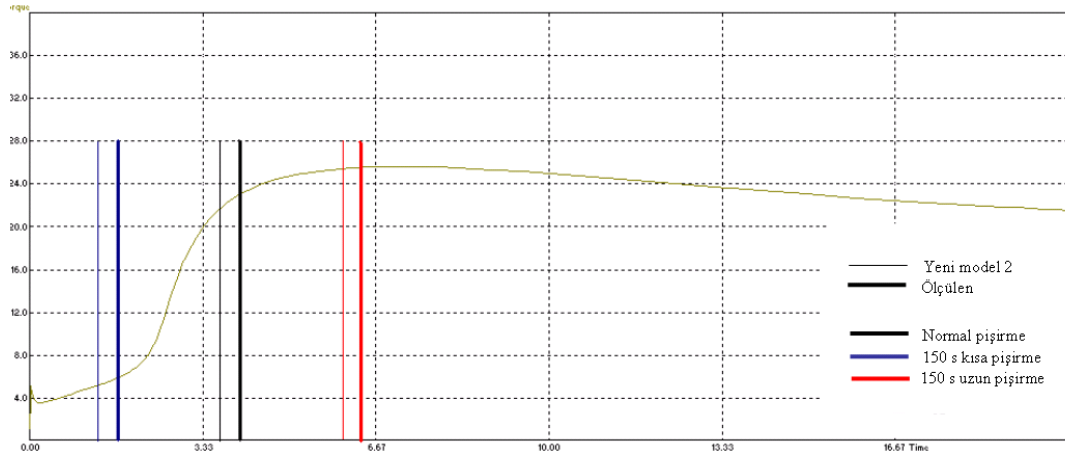
Şekil 6.36: Pişirme sürecinin 150 s uzun sürmesi durumunda pişirme süreci sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

Elde edilen benzetim sonuçları, kontrol noktalarında yer alan lastik karışımlarının bulunduğu en yakın sıcaklıktaki reometre eğrilerinin üzerinde, bu karışımların pişme

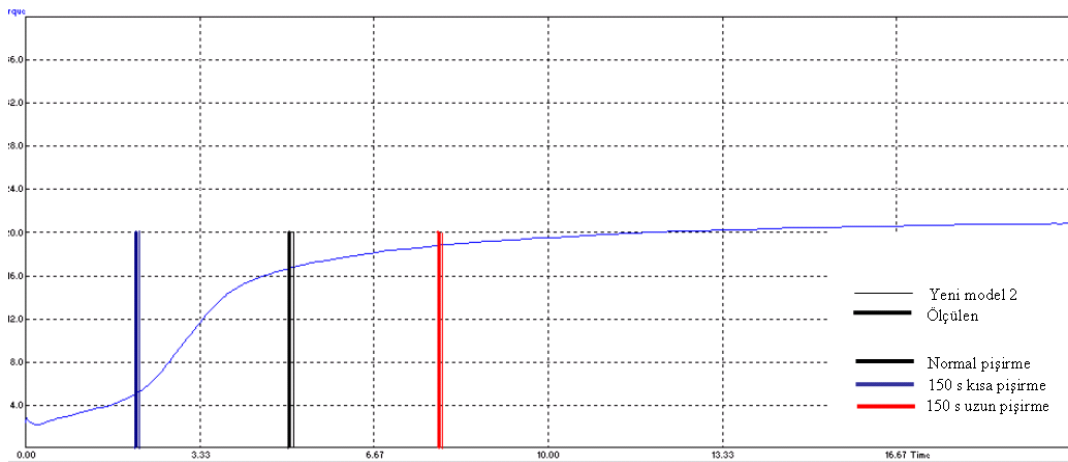
düzeylerinin belirlenmesi için değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonuçları Şekil 6.37-6.39'da verilmiştir.



Şekil 6.37: 1. ve 2. kontrol noktalarındaki lastik karışımlarının 171 °C'deki reometre eğrisi



Şekil 6.38: 3. ve 4. kontrol noktalarındaki lastik karışımlarının 171 °C'deki reometre eğrisi



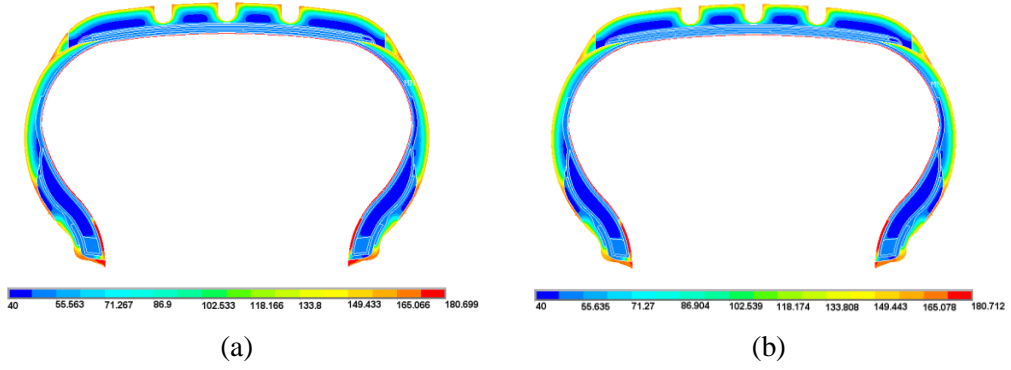
Şekil 6.39: 5. kontrol noktalarındaki lastik karışımının 171 °C'deki reometre eğrisi

Oluşturulan sonlu elemanlar modeli sayesinde model lastiğin normal pişirme süresinden farklı bir süre boyunca pişirilmesi durumunda, lastik içerisinde beklenenden farklı düzeyde pişecek bölgelerin önceden tahmin edilmesinin olanaklı olduğu görülmektedir.

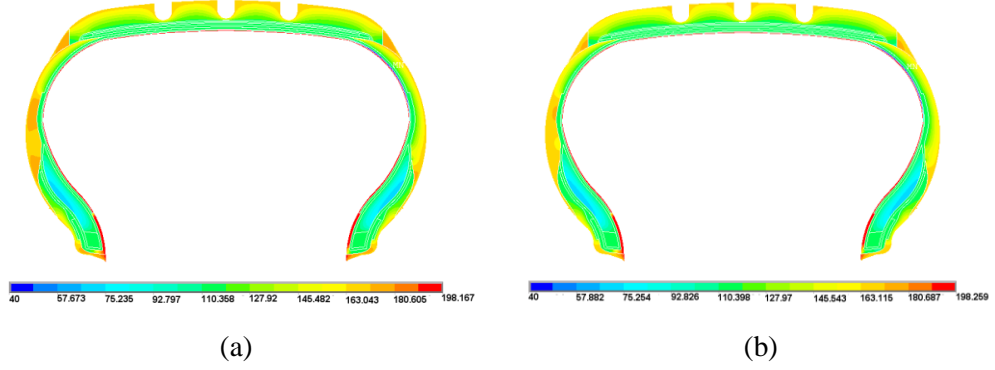
Modelin verdiği sonucu fiziksel anlamda doğrulamak için, normal pişirme süresinde pişirilen lastikten alınan kesitte, kritik 2 farklı kontrol noktasının Shore D sertlikleri ölçülmüştür. Normal pişirme süresinden 150 s kısa ve 150 s uzun süre pişirilen lastiklerin aynı bölgelerinin sertlikleri, normal pişirme durumundaki sertlik değerleri ile karşılaştırılmıştır. 150 s kısa pişirilen lastiğin 1. ve 2. kontrol noktalarının sertlikleri, ilk ölçülen sertlik değerlerinden sırasıyla %15 ve %6 düşük olarak ölçülmüştür. 150 s uzun pişirilen lastikte ise aynı değerler sırasıyla %6 ve %2 daha yüksektir. Buna göre, modelin tahmin ettiği pişme düzeyleri ile, sözkonusu koşullarda pişirilen lastikler için ölçülen sertlik değerlerinin de birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

6.9.6. Isıtma buharı basınç göstergesinin arızalı olduğu durumda pişen lastik içindeki sıcaklık dağılımı

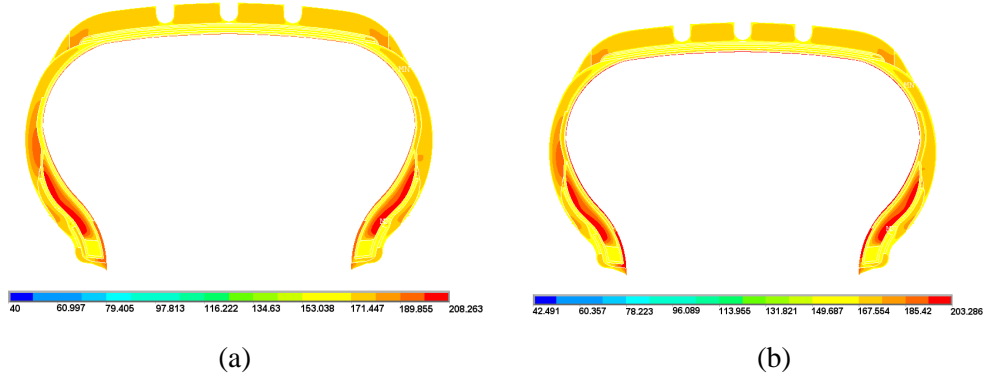
Bu bölümde, lastiği dış kısımdan ısıtmak amacıyla kullanılan kızgın buharın basıncını gösteren basınç göstergesinde oluşabilecek bir arıza sonucu, mevcut basıncı 1 bar yüksek göstermesi (yani gerçekte basıncın 1 bar düşük olması) durumu dikkate alınmıştır. Bu durumda ısıtma buharının sıcaklığı 170 °C'den 165 °C'ye düşmektedir. Bu durum için pişen lastik içerisindeki sıcaklık dağılımının benzetimi yapılmıştır. Pişirmenin üç farklı aşamasında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı benzetiminin sonuçları Şekil 6.40-6.42'de ve Tablo 6.60'ta verilmiştir. Şekildeki benzetim sonuçları, ısıtma buharının normal sıcaklıkta olduğu durum ile yanyana olacak şekilde verilmiştir. Tabloda "Ö-1" indisi ile gösterilen sütundaki sıcaklıklar, kontrol noktalarında ölçülen gerçek sıcaklıklardır. "D" indisi, Tablo 6.54-6.58'de olduğu gibi Yeni model 2 uyarınca ısı üretimi olduğu durum için yapılan benzetim sonuçlarını temsil etmektedir. "P" indisi ise, ısıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durum için yapılan pişirme benzetim sonuçlarını ifade etmektedir.



Şekil 6.40: a) Pişirme başladıktan 60 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme başladıktan 60 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 6.41: a) Pişirme başladıktan 420 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme başladıktan 420 s sonra lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

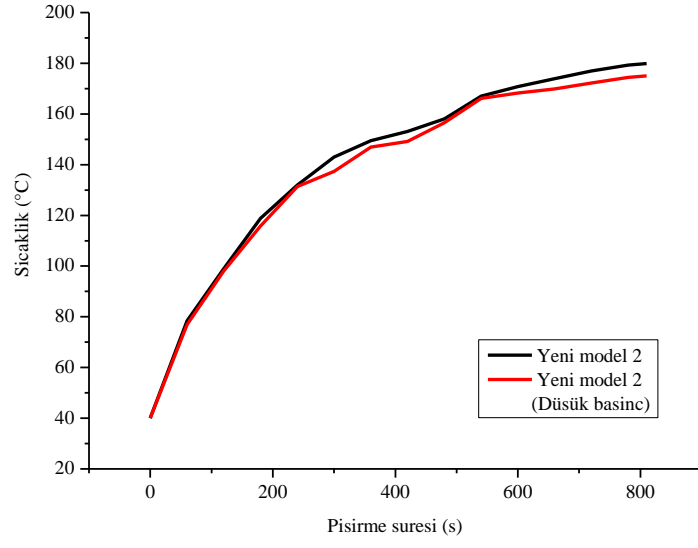


Şekil 6.42: a) Pişirme sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı b) Isıtma buharının 1 bar düşük basınçta olduğu durumda, pişirme sonunda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

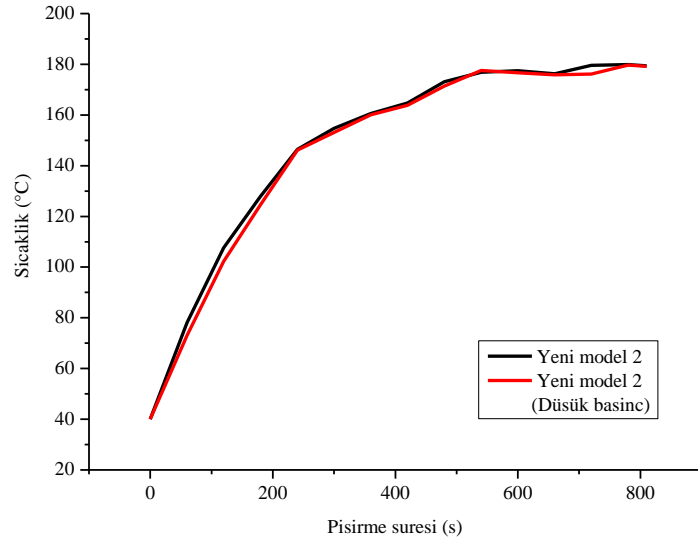
Tablo 6.60: Isıtma buharının 1 bar düşük olduğu durumda kontrol noktası sıcaklıkları

Pişme Süresi (sn)	1.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)			2.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)			3.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)			4.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)			5.Kontrol noktası sıcaklığı (°C)		
	Ö-1	D	P	Ö-1	D	P	Ö-1	D	P	Ö-1	D	P	Ö-1	D	P
0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	76,8	78,4	76,9	84,1	78,1	73,1	54,0	55,3	54,7	62,6	56,0	55,5	154,5	135,7	135,3
120	99,1	98,9	98,0	108,4	107,6	102,3	73,1	76,4	74,9	79,1	76,7	75,3	159,4	149,3	148,1
180	116,2	118,8	115,8	124,9	127,9	124,6	90,6	92,3	90,1	101,4	96,2	94,0	161,1	149,9	149,3
240	128,9	132,0	131,4	136,3	146,4	146,1	105,4	105,7	102,9	116,1	105,4	102,7	162,3	150,5	150,3
300	138,4	143,0	137,3	144,9	154,7	153,1	117,7	118,2	114,9	129,9	117,8	114,5	162,4	160,9	159,3
360	146,9	149,5	146,9	152,3	160,6	160,1	128,1	129,7	126,0	140,8	129,3	125,5	163,7	163,6	160,6
420	154,1	153,1	149,2	158,2	164,7	163,8	136,7	137,5	136,0	147,6	138,1	135,5	165,6	164,7	162,3
480	160,4	158,1	156,5	163,3	173,1	171,4	144,5	144,7	144,1	156,2	147,6	144,4	167,3	166,4	163,4
540	166,0	167,1	166,1	167,6	176,9	177,6	153,7	154,6	152,6	163,2	155,8	151,7	168,7	167,8	165,0
600	171,0	170,8	168,3	171,0	177,5	176,7	160,3	161,4	158,6	167,8	163,5	159,2	169,9	169,2	164,4
660	175,0	173,9	169,9	173,7	176,2	175,8	165,0	167,1	164,2	171,7	168,6	164,2	170,1	171,2	165,7
720	178,2	177,0	172,2	175,7	179,6	176,1	169,2	174,8	170,6	174,7	174,8	170,7	172,0	171,9	166,9
780	180,5	179,3	174,4	177,1	179,9	179,7	172,6	179,9	175,7	178,2	180,2	175,7	176,6	175,1	168,0
810	180,2	179,9	175,0	177,1	179,4	179,2	176,6	182,9	178,1	178,3	182,7	178,1	179,5	177,8	170,8

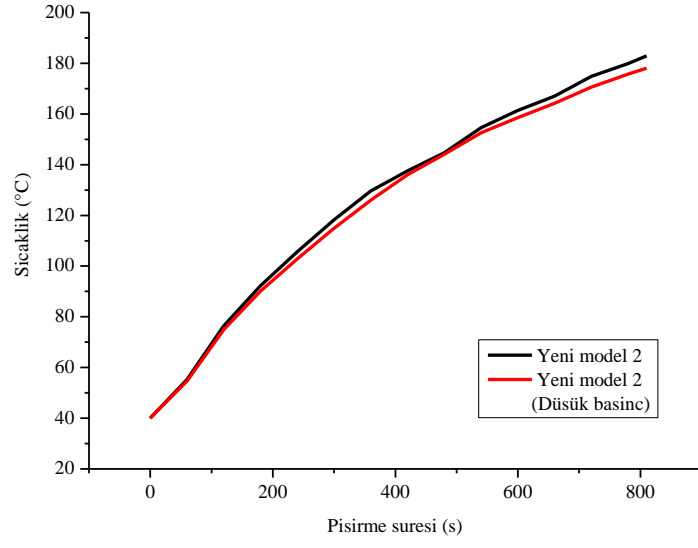
Tablo 6.60'ta verilen benzetim sonuçları aynı zamanda Şekil 6.43-6.47'de daha görsel bir biçimde ifade edilmiştir.



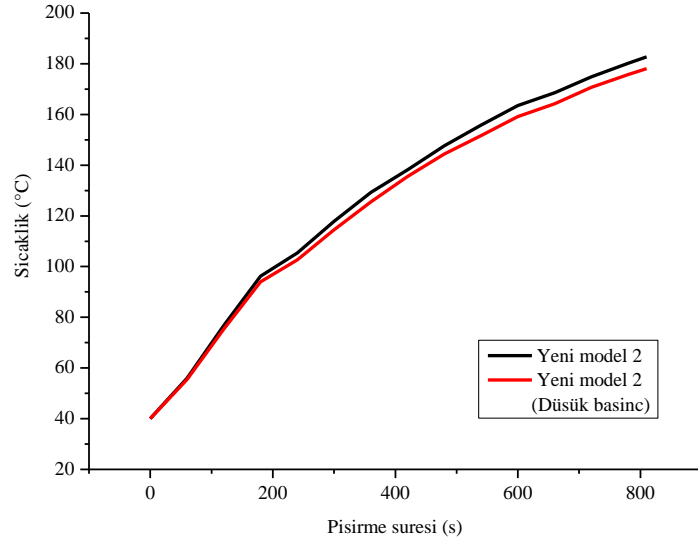
Şekil 6.43: Basınç göstergesi arızası durumunda 1.kontrol noktası için sıcaklıklar



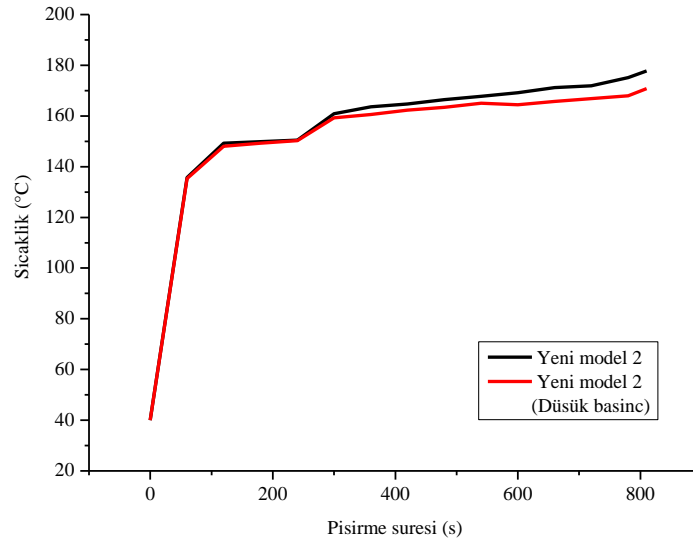
Şekil 6.44: Basınç göstergesi arızası durumunda 2.kontrol noktası için sıcaklıklar



Şekil 6.45: Basınç göstergesi arızası durumunda 3.kontrol noktası için sıcaklıklar



Şekil 6.46: Basınç göstergesi arızası durumunda 4.kontrol noktası için sıcaklıklar

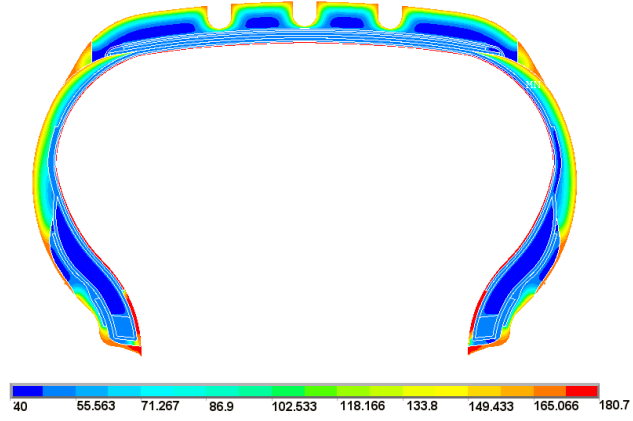


Şekil 6.47: Basınç göstergesi arızası durumunda 5.kontrol noktası için sıcaklıklar

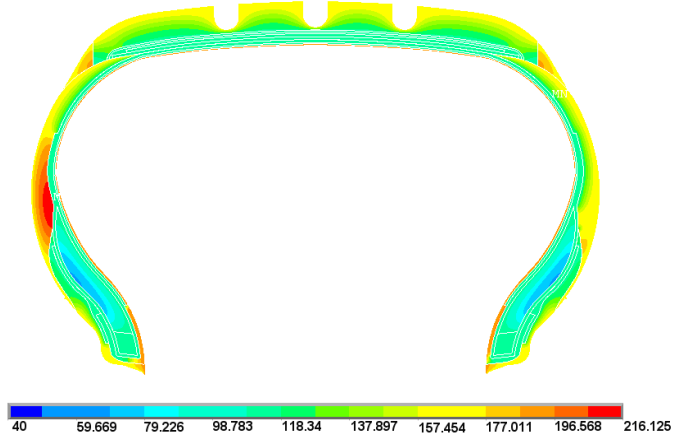
Tablo ve grafiklerden görüldüğü gibi, lastiği ısıtmada kullanılan kızgın buharının basıncının beklenenden 1 bar düşük olduğu durumda lastik içerisindeki sıcaklık dağılımının önemli miktarda etkilenmemektedir. Böyle bir arıza durumu söz konusu olduğunda, üretilen lastiklerin kalitesinde önemli bir değişiklik olmayacağı açıkça görülmektedir. Bu bilginin sonlu elemanlar benzetimi ile elde edilebilmesi, arıza fark edilmeden önce düşük basınçlı buhar ile üretilen lastiklerin hurdaya ayrılmasını önleyeceğinden dolayı, pratikte oldukça önemli olabilir.

6.9.7. Lastiğin seçilen bir bölgesinde farklı bir karışım kullanıldığı durumda pişen lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

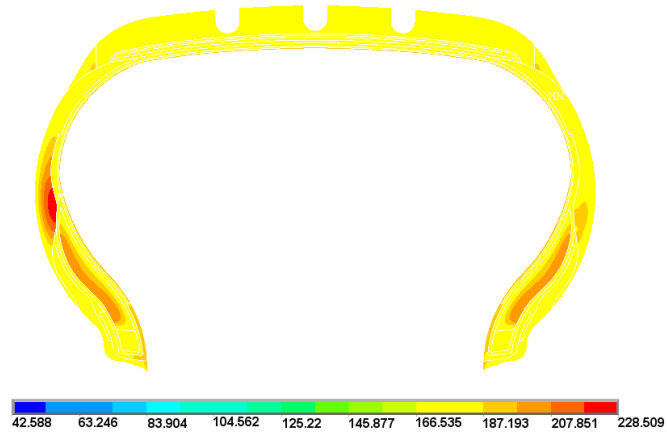
Bu bölümde, karışımlardaki ısı üretiminin hesaplanmasında Yeni model 2 kullanıldığı durum için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, değişen malzeme özelliklerine karşı duyarlılığı sınanmıştır. Bu amaçla, lastik içinde seçilen bir noktada kullanılan karışım değiştirilerek, model lastik, aynı pişirme koşullarında tekrar pişirilmiştir. Seçilen yeni karışım, aynı bölgede kullanılan eski karışıma göre çaprazbağlanma ısısı %76,7; ısı iletkenliği %8,4; yoğunluğu %5,4 daha yüksek, ısı sığası ise %17,8 daha düşük olan bir karışımdır. Ayrıca seçilen yeni karışım, daha hızlı pişmektedir. Bu koşullarda yapılan benzetim sonuçları Şekil 6.48’de verilmiştir.



(a)



(b)



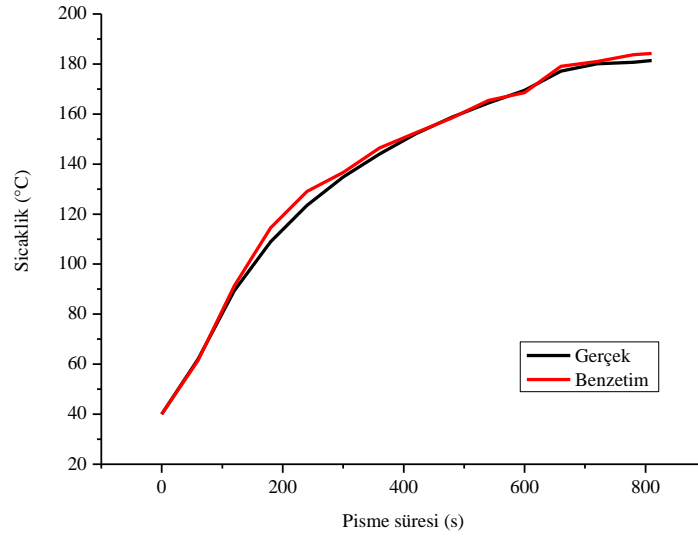
(c)

Şekil 6.48: Karışım değişikliği durumunda a) Isıtma başlangıcından 60 s sonra, b) Isıtma başlangıcından 420 s sonra, c) Pişme tamamlandığında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımı

Değiştirilen karışım içinde belirlenen bir kontrol noktası için, pişirme süresince ölçülen gerçek sıcaklık değerleri ile benzetim sonucu tahmin edilen sıcaklık değerleri Tablo 6.61’de verilmiştir. Tabloda, model lastiğin seçilen bölgesinde eski karışım kullanıldığı durumda ölçülen sıcaklıklar ve ısı üretiminde Yeni model 2’yi temel olarak yapılan benzetim ile tahmin edilen sıcaklıklar da verilmiştir.

Tablo 6.61: Lastikte seçilen bir bölgede farklı karışım kullanıldığı durumda kontrol noktası sıcaklıkları

Pişme Süresi (s)	Kontrol noktası sıcaklığı (°C)			
	Ölçülen	Ölçülen (Farklı karışım)	Benzetim	Benzetim (Farklı karışım)
0	40,0	40,0	40,0	40,0
60	76,8	62,0	78,4	61,5
120	99,1	89,3	98,9	91,3
180	116,2	108,9	118,8	114,5
240	128,9	123,5	132,0	129,1
300	138,4	134,8	143,0	136,6
360	146,9	144,0	149,5	146,4
420	154,1	152,1	153,1	152,5
480	160,4	158,8	158,1	158,5
540	166,0	164,4	167,1	165,4
600	171,0	169,5	170,8	168,6
660	175,0	177,2	173,9	179,1
720	178,2	180,1	177,0	181,0
780	180,5	180,7	179,3	183,7
810	180,2	181,4	179,9	184,2



Şekil 6.49: Lastikte seçilen bir bölgede farklı karışım kullanıldığı durumda kontrol noktası sıcaklıkları

Şekil 6.49'da da Tablo 6.61'de değişik karışım kullanıldığı durum için kontrol noktasında ölçülen ve oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile tahmin edilen sıcaklık değerleri görülmektedir. Buradan; modelin, lastik bileşiminde yapılacak bir değişikliğe de duyarlı olduğu açıkça söylenebilir.

Şekil 6.49'da görüldüğü gibi, yanak bölümünde farklı karışım kullanılan lastiğin, aynı bölgesinin normal durumdan daha yüksek sıcaklıklara çıktığı görülmektedir. Daha uzun süre yüksek sıcaklıkta kalması ise, bu bölgenin enuygun pişme düzeyinin üzerinde pişmesi anlamına gelmektedir. Bu durumu fiziksel olarak doğrulamak için, normal bileşimde ve sözkonusu değişikliğin yapıldığı yeni bileşimdeki lastikler, normal pişirme süreleri boyunca pişirildikten sonra, bölüm 6.9.5'tekine benzer şekilde sertlik değerleri açısından karşılaştırılmıştır. Buna göre, yanak bölgesini temsil eden 1. kontrol noktasının sertliği kıyaslanan durumdan %43 yüksek olarak ölçülmüştür. Yanakta kullanılan yeni lastik karışımının, kıyaslama lastiğinde kullanılan karışıma göre %20 daha sert olduğu bilinmektedir. Geri kalan %23'lük sertlik artışının ise aşırı pişmeden ileri geldiği düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı pişme özellikleri gösteren çok sayıda karışımın aynı anda pişirildiği lastik pişirme sürecinin modellenmesi için YSA ve sonlu elemanlar yöntemleri kullanılmıştır. Bu amaçla, bölgemizde faaliyet gösteren bir lastik fabrikası bünyesinde üretim miktarı oldukça yüksek olan bir ölçü, model lastik olarak seçilmiştir.

Model lastikte yer alan lastik karışımları için çaprazbağlanma tepkimesinin ilerleyişi YSA ile, farklı ağ mimarileri kullanılarak modellenmiştir. YSA ile lastik karışımlarının enuygun pişme sürelerinin tahmin edilmesinde, ileri beslemeli çok katmanlı almaç, Elman ve genelleştirilmiş bağlanım tipi ağ mimarileri denenmiştir. İleri beslemeli ağlardan, 2 saklı katmandan oluşan ve her iki saklı katmanda da hiperbolik tanjant sigmamsı aktarım fonksiyonu kullanan 10'ar işlem birimi olan 7 nolu ağ, hem düşük OMH değerleri vermesi, hem de genelleştirme başarımının yüksek olması nedenleri ile, bu amaçla kullanılacak en uygun ağ tipi olarak belirlenmiştir. Elman tipi YSA'nda çok yüksek OMH değerleri elde edilmesi, genelleştirilmiş bağlanım tipi YSA'nın ise veri grubuna aşırı bağlı kalması ve genelleştirme yeteneğinin düşük olması nedenleri ile, bu ağ mimarilerinin lastik karışımlarının enuygun pişme sürelerinin belirlenmesinde uygun olmadığı görülmüştür.

Aynı lastik karışımları için, lastik sanayinde yaygın olarak kullanılan eşdeğer pişme süresi yöntemi yardımı ile de enuygun pişme süreleri hesaplanarak, YSA'ndan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İlgilenilen 11 karışımdan 10'u için enuygun pişme süresi tahmininde YSA, sözkonusu analitik yöntemden daha iyi sonuç vermektedir. 11 karışım için analitik yöntemle ortalama hata %7,15 iken, YSA ile %4,23 olarak bulunmuştur. Buradan, YSA'nın, lastik sanayinde alışılmış eşdeğer pişme süresi tahmini yöntemine kıyasla daha kullanışlı, başarımı daha yüksek ve pratik bir yöntem olduğu söylenebilir.

Çaprazbağlanma tepkimesinin pişme sürecinde ve değişen sıcaklık koşullarında ilerleyişinin bilinmesi, pişirme sürecinin iyi anlaşılabilmesi için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, literatürde lastik karışımlarının pişme kinetiğini tanımlayan modeller incelenmiş ve ilgilenilen model lastik karışımlarına uygunlukları değerlendirilmiştir. Bu modellerin başarımlarının, bileşimleri ve pişme karakteristikleri geniş bir aralıkta değişen lastik karışımları için bazı yönlerden eksik kaldığı gözlenmiştir. Modeller üzerinde yapılan değişikliklerle bu eksiklikler giderilmeye çalışılmış, başarımları daha yüksek iki yeni model geliştirilmiştir.

İncelenen birinci kinetik model, literatürde bu amaçla oldukça yaygın kullanılmış olan klasik modeldir. Model lastik karışımları için değerlendirildiğinde, klasik modelin, yüksek pişme sıcaklıklarında ve tam pişmeye yakın kritik bölgelerde başarımının azaldığı görülmüştür. Modelin bu yönünün, sıcaklığın pişme düzeyi üzerindeki etkisini arttıracak bir düzeltme katsayısı kullanılarak arttırılabileceği düşünülmüştür. Bu düşünceden hareketle, Yeni model 1 geliştirilmiş ve model karışımlar için farklı sıcaklıklarda, değişik pişirme sürelerinde pişme düzeylerinin tahmin edilmesinde uygulanmıştır. Yeni model 1'in, klasik modele kıyasla, özellikle yüksek sıcaklıklarda ve yüksek pişme düzeylerinde oldukça yüksek başarımlı bir model olduğu görülmüştür.

Lastik karışımlarının pişme kinetiğinin açıklanmasında yaygın olarak kullanılan ikinci bir model de Kamal modelidir. Kamal modelinde, zaman-pişme düzeyi ilişkisinin sıcaklıkla değişiminin Arrhenius tipi bir değişim olduğu söylenmektedir. Oysa, model lastik karışımları için farklı sıcaklıklarda yapılan değerlendirmeler sonucunda, zaman-pişme düzeyi ilişkisinin sıcaklıkla değişimi Arrhenius tipi bir değişim yerine, bu çalışmada önerilen Yeni model 2'de olduğu gibi üstel bir değişimle ifade edildiğinde, Kamal modeline göre başarımlı daha yüksek bir model elde edilebildiği görülmüştür. Sözü geçen üstel değişimin, literatürde katı fazda gerçekleşen bazı karmaşık tepkimelere uygulanan fakat henüz lastik karışımlarının çaprazbağlanmasını açıklamakta kullanılmamış kinetik yaklaşımlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, model lastik karışımları için uygun başarımlı gösteren Yeni model 2, literatürde farklı karışımlar için elde edilmiş reometre eğrilerine de uyarlanmış ve başarımlı değerlendirilmiştir. Bu modelin, farklı özelliklerdeki

karışımlar için de sıcaklık-hız değişmezi ilişkisini başarılı bir şekilde tanımladığı görülmüştür.

Bu çalışmada, pişirilmesi esnasında model lastik içindeki sıcaklık dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir. Bu amaçla, model lastik içinde yer alan tüm bileşenlerin (lastik karışımları, çelik ve tekstil kord) fiziksel ve ısıl özellikleri belirlenmiştir. Sonlu elemanlar ile çözümlemede, lastik içerisindeki ısı üretimi miktarını artan sıcaklık ve pişme süresine bağlı olarak tanımlamak üzere, bu çalışmada sözü geçen kinetik modellerden Kamal modeli ve Yeni model 2 kullanılmıştır. Tanımları gereği, pişme hızının sıcaklık bağımlılığını tek bir fonksiyon olarak ifade edememeleri nedeniyle klasik model ve Yeni model 1'in sonlu elemanlar modelindeki başarımları değerlendirilememiştir. Oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin başarımları, lastik içerisinde belirlenen kritik noktalar için ve belirli zaman aralıklarında, gerçekte ölçülen sıcaklıklar ile modelin tahmin ettiği sıcaklıklar karşılaştırılarak belirlenmiştir.

Lastik pişirme sürecinin ısıl analizinde literatürde söz edilen bazı durumlar için de sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. İlk olarak çaprazbağlanma ısısının dikkate alınmadığı basitleştirilmiş durum için, ikinci olarak zamanla değişmez çaprazbağlanma ısısı kabul edildiği durum için sonlu elemanlar çözümleri yapılmıştır. Üçüncü ve dördüncü çözümler ise sırasıyla Kamal modeli ve Yeni model 2 uyarınca ısı üretimi olduğu durumlar için yapılmıştır. Oluşturulan modeller ile, pişme sürecinde model lastik içerisindeki sıcaklık dağılımını iyi bir yaklaşıklıkla tahmin etmenin olanaklı olduğu görülmüştür. Özellikle pişmenin ilerleyen aşamalarında, çaprazbağlanma sırasındaki ısı üretiminin Yeni model 2 uyarınca tanımlandığı modelin, diğer modellere kıyasla, genel olarak gerçek durumu daha yüksek bir başarımla temsil ettiği sonucuna varılmıştır.

Yeni model 2 kullanılarak yapılan çözümlemede, pişirme makinasının zaman göstergesinde oluşabilecek bir hatadan dolayı, lastiğin kalıptan 150 s erken ve 150 s geç çıkarılması durumları da incelenerek, lastiğin kritik bölgelerindeki bileşenlerin pişme düzeylerinin ne olacağı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu şekilde, model lastiğin normal pişme süresinden farklı bir süre boyunca pişirilmesi durumunda,

lastik içerisinde beklenenden farklı düzeyde pişecek bölgelerin önceden tahmin edilmesinin olanaklı olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar, sözkonusu koşullarda pişirilen lastiklerin kritik bölgelerinin sertlikleri ölçülerek de doğrulanmıştır.

Piştirme ünitesine giren ve ısıtma amaçlı kullanılan kızgın buharın, basınç göstergesinde meydana gelen bir arıza sonucu olması gerekenden 1 bar düşük basınçta olması durumunda, üretilecek lastiklerin kalitesinde önemli bir değişiklik olmayacağı, oluşturulan sonlu elemanlar modeli sayesinde tahmin edimiştir. Bu bilginin, model sayesinde önceden edinilebilmesi, arıza fark edilmeden önce üretilen lastiklerin hurdaya ayrılmasını önleyeceğinden dolayı, pratikte oldukça önemli olduğu düşünülmüştür.

Bu çalışmada son olarak, lastik içinde kritik bir bölgede (yanak) farklı bir lastik karışımının kullanılması durumu için oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, lastik bileşiminde yapılacak bir değişikliğe duyarlı olduğu görülmüştür. Yeni bileşimde hazırlanan lastik pişirilerek, karşılaştırma lastiği ile yanak bölgesi sertlik değerleri açısından kıyaslanmıştır. Benzetim sonucu görülen aşırı pişen bölgelerin sertliklerinin daha yüksek olması da ayrıca modelin başarısını doğrulamıştır.

Sonuç olarak bu çalışmada, literatürde oldukça sınırlı sayıda bulunan lastik ve kauçuk konulu YSA uygulamalarına önemli bir katkı sağlanmıştır. Lastik karışımlarının enuygun pişme süresi tahmininde YSA, ilk olarak bu çalışmada kullanılmıştır. Lastik karışımlarının değişen sıcaklıklarda zamanla çaprazbağlanma düzeyinin belirlenmesinde literatürde yaygın olarak kullanılan kinetik modellerin eksik kaldığı noktalar belirlenmiş, başarımları daha yüksek iki yeni kinetik model önerilmiştir. Önerilen kinetik modellerden Yeni model 2, pişme sırasında lastik içerisindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesi için oluşturulan sonlu elemanlar modelinde kullanılmıştır. Yeni model 2 kullanılarak yapılan sonlu elemanlar çözümlemesi, literatürdeki diğer kinetik modellere göre yapılan çözümlemelere kıyasla, piştirme sırasında lastik üzerinden ölçülen gerçek sıcaklık değerlerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Pratikte piştirme sırasında gerçekleşebilecek olası arıza durumları için, teknologların lastikte meydana gelen hasarları önceden tahmin ederek, bu lastiğin geleceği hakkında kolayca karar vermelerine yardımcı olabilecek

benzetimler yapılmıştır. Ayrıca, model lastiğin seçilen bir bölgesinde farklı bir lastik karışımı kullanılması planlandığında, mevcut pişirme koşullarında, aynı pişme düzeyine sahip bir lastik elde etmenin olanaklı olup olmadığını belirlemek üzere yapılan sonlu elemanlar benzetimi de pratikte oldukça kullanışlı bir çalışmadır.

Çalışmanın devamında, model lastik karışımlarının enuygun pişme sürelerinin belirlenmesinde günümüzde yeni yeni yaygınlaşmaya başlayan ANFIS (Adaptive Neural Fuzzy Inference Systems) kullanılması planlanmaktadır. Ayrıca, pişme düzeyinin sıcaklık ve zamanla değişimini ifade eden yeni kinetik modellerin, oluşturulacak alt kodlarla sonlu elemanlar modeli içerisine tanımlanmasıyla, lastikteki çaprazbağlanma düzeyi dağılımının elde edilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Alliger, G. and Sjothun, I.D. (eds), "Vulcanization of elastomers", *Reinhold Publishing Company*, 214-250, (1965).

Akima, M., Hashim, A.S., "Vulcanization and crosslinking in elastomers", *Progress in Polymer Science*, vol:22, 475-521, (1997).

Aras, F., Oysu, C., "154 kV XLPE yeraltı güç kablo ekinin sonlu elemanlar yöntemi ile ısı analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol:22, no:3, 281-286, (2007).

Armand, J.Y. and Vergnaud, J.M., "Comparative study of a reaction of low enthalpy(rubber cure) by DC and DSC", *Thermochimica Acta*, vol:116, 111-124, (1987).

Arrilaga, A., Zaldua, A.M., Atxurra, R.M., Farid, A.S., "Techniques used for determining cure cinetics of rubber compound", *European Polymer Journal*, vol:43, 4783-4799, (2007).

Blake, J.T., "Kinetics of vulcanization of rubber with sulfur and selenium", *Indian Engineering and Chemistry*, vol:22, no:7, 744-747, (1930).

Buhr, J., Reisen, R., Widmann, J., Jörimann, U., "Measuring specific heat capacity", *Mettler Toledo User Com Series*, vol:7, 1-20, (1998).

Celikoglu, H.B., Cigizoglu, H.K., "Public transportation trip modelling with generalized regression neural networks", *Advances in Engineering Software*, vol:38, 71-79, (2007).

Chan, T.W., Shyu, G.D., Isayev, A.I., "Reduced time approach to curing kinetics, Part I: Dynamic rate and master curve from isothermal data", *Rubber Chemistry and Technology*, vol:66, no:2, 849-864, (1994).

Cho, V., "A Comparison of three different approaches to tourist arrival forecasting", *Tourism Management*, vol:24, 323-330, (2003).

Chough, S.H., Chang, D.H., "Kinetic of sulfur vulcanization NR, BR, SBR, and their blends using a rheometer and DSC", *Journal of Applied Polymer Science*, vol:61, 449-454, (1996).

Danes, F. And Garnier, B., "Improved differential scanning calorimetric measurement method fort he small reaction heat capacities", *Rubber Chemistry and Technology*, vol:78, no:1, 114-129, (2005).

Demuth, H., Beale, M., Hogan, M., “Neural network toolbox user’s guide”, The Mathworks, Inc., USA, (2005).

Ding, R., Leonov, A.I., “A Kinetic model for sulfur accelerated vulcanization of a natural rubber compound”, *Journal of Applied Polymed Science*, vol:61, 455-463, (1996).

Dollimore, D., Lerdkanchanaporn, S., Alexander, K.S., “The use of Harcourt and Esson relationship in interprating the kinetics of rising temperature solid state decompositions and its application to pharmaceutical formulations”, *Thermochimica Acta*, vol:290, 73-83, (1996).

Dollimore, D., Tong, P., Alexander, K.S., “The kinetic interpratation of the decomposition of calcium carbonate by use of relationships other than the Arrhenius equation”, *Thermochimica Acta*, vol:282/283, 13-27, (1996).

Duranay, M., “Kompozit bir plakanın farklı ortamlarda soğutulmasında sıcaklık dağılımının sayısal analizi”, *Firat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol:17, no:4, 709-720, (2005).

Durmaz, S., “A Numerical Study ofn the effective thermal thermal conductivity of composite materials” Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi, Doğal ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü*, İzmir, 61-70, 2004.

Efe, Ö., Kaynak, O., “Yapay sinir ağları ve uygulamaları”, Boğaziçi Üniversitesi Yayınları, *İstanbul*, 6-23, (2000).

Elmas, Ç. “Yapay sinir ağları”, Seçkin Yayıncılık, *Ankara*, 21-29, (2003).

Flynn, J.H., “The ‘temperature integral’-its use and abuse”, *Thermochimica Acta*, vol:300, 83-92, (1997).

Ghoreisy, M.H.R., Naderi, G., “Three-dimensional finite element modeling of rubber curing process”, *Journal of Elastomers and Plastics*, vol:37, 37-53, (2005).

Ghoreisy, M.H.R., “Development of a finite element code for the 3D”, *Tire Technology International*, 84-87, (2006).

Han, I.S., Chung, C.B., Jeong, H.G., Kang, S.J., Kim, H.G.J., “Optimal cure steps for product quality in a tire curing process”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol:74, 2063-2071, (1999).

Han, I.S., Chung, C.B., Kim, J.H., Chung, H.C., Cho, C.T., Oh, S.C., “Dynamic simulation of the tire curing process”, *Tire Science and Technology*, vol:24, no:1, 50-76, (1996).

Han, I.S., Chung, C.B., Lee, J., “Optimal curing of rubber compounds with reversion type cure behaviour”, *Rubber Chemistry and Technology*, vol:73, no:1, 101-113, (2000).

Haykin, S., "Neural Networks: A Comprehensive foundation", Prentice Hall, Second edition, *New York, USA*, 178-227, (1999).

Immelman, E. and Sanderson, R.D., "Thermal analysis of controlled-release elastomeric formulations. Part 2. A DSC study of the effect of sodium lauryl sulphate loading on vulcanization", *Thermochimica Acta*, **vol:207**, 177-192, (1992).

Isayev, A.I., Deng, J.S., "Nonisothermal vulcanization of rubber compounds", *Rubber Chemistry and Technology*, **vol:61, no:2**, 340-361, (1988).

Isayev, A.I. and Sujun, B., "Nonisothermal vulcanization of devulcanized GRT with reversion type behavior", *Journal of Elastomers and Plastics*, **vol:38**, 291-318, (2006).

İnal, M., Aras, F., "Yalıtkan malzemelerin dielektrik özelliklerinin yapay sinir ağlarıyla belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **cilt:20, no:4**, 455-462, (2005).

Juma, M., Barfnec, M., "Heat transfer properties of cord-reinforced rubber composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **vol:25, no:18**, 1967-1975, (2006).

Kaisersberg, E. and Opfermann, J., "Kinetic evaluations of exothermal reactions measured by DSC", *Thermochimica Acta*, **vol:187**, 151-158, (1991).

Kamal, M.R., "Thermoset characterization for moldability analysis", *Polymer Engineering and Science*, **vol:14, no:3**, 231-240, (1974).

Koenig, J.L., "The Chemical Reactions in Network Structures in Elastomers", *Accounts in Chemical Research*, **vol:32, no:1**, 1-8, (1999).

Kolek, E., Simon, P., Simko, P., "Nonisothermal kinetics of acrylamide elimination and its acceleration by table salt", *Journal of Food Engineering*, **vol:72, no:6**, 341-344, (2007).

Kong, D., White, J.L., Weisser, F.C., Nakajima, N., "An Experimental and theoretical study of heat conduction and vulcanization of rubber compounds in molds", *Rubber Chemistry and Technology*, **vol:60, no:1**, 140-158, (1986).

Kostin, M.D., 2008, *Research interests* [online], Princeton University, <http://www.princeton.edu/che/people/faculty/kostin> (Ziyaret tarihi: 25 Mayıs 2008).

Laidler, K.J., "Unconventional applications of the Arrhenius law", *Journal of Chemistry Education*, **vol:49, no:5**, 343-344, (1972).

Leenson, I.A., "The Arrhenius law and storage of food in a freezer", *Journal of Chemistry Education*, **vol:76**, 504-505, (1999).

Levenspiel, O. "Chemical reaction Engineering", Second Edition, *John Wiley & Sons, Inc.*, 8-21, (1972).

Likozar, B., Krajnc, M., "Modeling the vulcanization of rubber blend", *Macromol. Symp.*, vol:243, 104-113, (2006).

Likozar, B., Krajnc, M., "Kinetic and heat transfer modeling of rubber blends 'Sulfur vulcanization with *N-t*-butylbenzothiazole-sulfenamide and *N-t*-Di-*t*-butylbenzothiazole-sulfenamide", *Journal of Applied Polymer Science*, vol:103, 293-307, (2007).

Lopez-Manchado, M.A., Arroyo, M., Herrero, B., Biagiotti, J., "Vulcanization kinetics of natural rubber-organoclay nanocomposites", *Journal of Applied Polymer Science*, vol:89, 1-15, (2003).

Maitra, S., Bandyopadhyay, N., "Application of non-Arrhenius method for analyzing the decomposition kinetics of SrCO₃ and BaCO₃", *Journal of American Ceramic Society*, vol:91, no:1, 337-341, (2008).

Mandal, T., Roy, B.K., Chandra, A.K., Mohamed, P.K., "Judgement of state of cure by differential scanning calorimetry", *Tire Technoogy International*, 118-121, (2005).

Mark, J.E., Erman, B., Eirich, F.R., "Science and Technology of Rubber", Second edition, *Academic Press*, 339, (1994).

Nakajima, Y., Kadowaki, H., Kamegawa, T., Ueno, K., "Application of neural network for the optimization of tire design", *Tire Science and Technology*, vol:27, no:2, 62-83, (1999).

Nordlander, B.W., "The Kinetics of vulcanization of rubber", *76th Meeting of the American Chemical Society*, American Chemical Society, Swampscott, Massacusetts, 1873-1902, (1928).

Onaran, K., Malzeme bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, *İstanbul*, 308-311, (1999).

Özcan, A., *Kompozit malzemeler* [online], Maltepe Üniversitesi, <http://akademik.maltepe.edu.tr/~aliozcan/kompozit%20malzemeler.pdf> (Ziyaret tarihi: 26 Ağustos 2008).

Parojcic, J., Ibric, S., Djuric, Z., Jovanovic, M., Corrigan, O.I., "An investigation into the usefulness generalized regression neural network analysis in the development of level-A in vitro-in vivo correlation", *European Journal of Pharmaceutical Science*, vol:30, 264-272, (2007).

Petrou, A.L., Roulia, M., Tampouris, K., "The Use of Arrhenius equation in the study of deterioration and of cooking of foods-Some scientific and pedagogic aspects", *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, vol:3, no:1, 87-97, (2002).

Pietruschka, U., Brause, R.W., "Using growing RBF-nets in rubber industry process control", *Neural Computing Applications*, vol:8, 95-105, (1999).

Prentice, G.A., Williams, M.C., "Numerical evaluation of the state of cure in a vulcanizing rubber article" *Rubber Chemistry and Technology*, vol:53, no:5, 1023-1031, (1980).

Redding, R.B., Smith, D.D., "Overall kinetics of natural rubber vulkanization at high temperatures", *Rubber Chemistry and Technology*, vol:44, no:5, 1316-1325, (1971).

Ren, X.C., Yao, Z.H., "Structure optimization of pneumatic tire using an artificial neural network", (Eds.): F. Yin, J. Wang, C. Guo. pp: 841-847, Springer-Verlag, *Berlin Heidelberg*, (2004).

Reisen, R., Widmann, J., Jöriman, U., "Measuring specific heat capacity", *Information for Users of Mettler Toledo Thermal Analysis Systems*, 1-20, (1998).

Rimondi, G., Toth, W.J., Kounavis, J., "Predictive model for reversion-type cures", *Tire Science and Technology*, vol:24, no:1, 77-91, (1996).

Rodante, F., Vecchio, S., Catalani, G., Guidotti, M., "Thermal analysis and non-isothermal kinetic study of some pesticides", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:60, 605-622, (2000).

Schlanger, H.P., "A One dimensional numerical model of heat transfer in the press of tire vulcanization", *Rubber Chemistry and Technology*, vol:56, no:2, 304-321, (1983).

Schwartz, G.A., "Prediction of rheometric properties of compounds by using artificial neural networks", *Rubber Chemistry and Technology*, vol:74, no:1, 116-123, (2001).

Shih, Y.F., "A Study of the fiber obtained from the water bamboo husks", *Bioresources Technology*, vol:98, 819-828, (2007).

Simon, P., "Induction periods, theory and applications", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:84, 263-270, (2006).

Simon, P., "Isoconversional methods", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:76, 123-132, (2004).

Simon, P., "Single-step kinetics approximation employing non-Arrhenius temperature functions", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:79, 703-708, (2005).

Simon, P., "Considerations on the single-step kinetics approximation", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol: 82, 651-657, (2005).

Simon, P., Kolman, L., “DSC study of oxidation periods”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:64, 813-820, (2001).

Tong, J., and Yan, X., “Finite element analysis of tire curing process”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol:22, no:11, 983-1002, (2003).

Toth, W.J., Chang, J.P., Zanichelli, C., “Finite element evaluation of the state of cure in a tire”, *Tire Science and Technology*, vol:19, no:4, 178-212, (1991).

Veltman, B., Hastenberg, C., “From vulcanization model to process control”, *Rubber Chemistry and Technology*, vol:61, no:1, 64-77, (1988).

Wagner, M.P., Sellers, J.W., “Kinetics of filler-polymer interaction between fine particle silica and SBR or butyl rubber”, *Indian Engineering and Chemistry*, vol:51, no:8, 961-966, (1959).

Wang, P., Qian, H., Yu, H., Chen, J., “Study on kinetic of natural rubber vulcanization by using vulcameter”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol:88, 680-684, (2003).

Wang, P.Y., Qinn, H.L., Yu, H.P., “Kinetics of natural rubber vulcanization in the end stage of curing period”, *Journal of Applied Polymer Science*, vol:101, 580-583, (2006).

Wanjuan, T., Yuwen, L., Hen, Z., Zhiyong, W., Cunxin, W., “New temperature integral approximate formula for non-isothermal kinetic analysis”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol:74, no:2, 309-315, (2003).

Yurtoğlu, H., “Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellemesi”, DPT Uzmanlık Tezi, *DPT Ekonomik Modeller ve Stratejik Araştırmalar Müdürlüğü*, Ankara, 1-34, (2005).

EKLER

EK. A.

TEKNİK TERİMLER DİZİNİ

İngilizce – Türkçe

Accelerating rate, Initial rate	:Kalkış hızı
Activation energy	:Etkinleşme enerjisi
Analysis	:Çözümleme
Animation	:Canlandırma
Artificial neural networks	:Yapay sinir ağları
Back-propagation	:Geriye yayılım
Belt	:Kuşak
Bladder	:Pişirme torbası
Calibration	:Ayar
Carcass	:Gövde
Composite	:Karma
Curing	:Pişirme
Dome	:Buhar cepli
Endothermic	:Isıalan
Energetic	:Enerji açısından yüklü
Epoch number	:Yineleme sayısı
Exothermic	:Isıveren
Feed-forward	:İleri beslemeli
Finite difference method	:Sonlu farklar yöntemi
Finite element method	:Sonlu elemanlar yöntemi
Fully-connected	:Tam bağlı
Generalized regression networks	:Genelleştirilmiş bağlantım YSA
Hardlimiter	:Eşik
Heat capacity	:Isı sığası
Homogen	:Türdeş
Hyperbolic tangent	:Çift yönlü sigmamsı
Induction	:Ön ısıtma
Isoparametric	:Eşetkenli
Isothermal	:Eşsıcaklıklı
Iteration	:Yineleme
Limiter	:Doyumlu-doğrusal
Marching cure	:Aşırı pişme
Matrix	:Çapraz liste
Meshing	:Modelin elemanlara bölünmesi
Minimization	:Enküçükleme
Modulus	:Zorlanım katsayısı
Multi layer perceptron	:Çok katmanlı almaç

Node	:Düğüm
Optimum	:Enuygun
Parameter, Factor	:Etken
Pendant	:Asılı
Performance	:Başarım
Plateu, Equilibrium	:Düzlük
Process	:Süreç
Processing aids	:İşlem yardımcıları
Profile	:Dağılım ve değişim
Pureline	:Doğrusal
Radial basis networks	:Radyal temelli YSA
Re-current	:Geri beslemeli
Reference	:Kıyaslama
Regression coefficient	:Bağlanım katsayısı
Reversion	:Geri dönme
Sigmoid	:Sigmamsı
Simulation	:Benzetim
Spread	:Yayılma
Transfer function	:Aktarım fonksiyonu
Transient	:Geçişken
Vulcanizate	:Pişik
Vulcanization	:Pişirme

Türkçe – İngilizce

Aktarım fonksiyonu	:Transfer function
Asılı	:Pendant
Aşırı pişme	:Marching cure
Ayar	:Calibration
Bağlanım katsayısı	:Regression coefficient
Başarım	:Performance
Benzetim	:Simulation
Buhar cepli	:Dome
Canlandırma	:Animation
Çapraz liste	:Matrix
Çift yönlü sigmamsı	:Hyperbolic tangent
Çok katmanlı almaç	:Multi layer perceptron
Çözümleme	:Analysis
Dağılım ve değişim	:Profile
Doğrusal	:Pureline
Doyumlu-doğrusal	:Limiter
Düğüm	:Node
Düzlük	:Plateu, Equilibrium
Enerji açısından yüklü	:Energetic
Enküçükleme	:Minimization
Enuygun	:Optimum
Eşetkenli	:Isoparametric
Eşik	:Hardlimitter
Eşsıcaklıklı	:Isothermal
Etken	:Parameter, Factor
Etkinleşme enerjisi	:Activation energy
Geçişken	:Transient
Genelleştirilmiş bağlanım YSA	:Generalized regression networks
Geri beslemeli	:Re-current
Geri dönme	:Reversion
Geriye yayılım	:Back-propagation
Gövde	:Carcass
Isısalan	:Endothermic
Isı sığası	:Heat capacity
Isıveren	:Exothermic
İleri beslemeli	:Feed-forward
İşlem yardımcıları	:Processing aids
Kalkış hızı	:Accelerating rate, Initial rate
Karma	:Composite
Kıyaslama	:Reference
Kuşak	:Belt
Modelin elemanlara bölünmesi	:Meshing
Ön ısıtma	:Induction
Pişik	:Vulcanizate
Pişirme	:Vulcanization, Curing
Pişirme torbası	:Bladder
Radyal temelli YSA	:Radial basis networks

Sigmamsı	:Sigmoid
Sonlu elemanlar yöntemi	:Finite element method
Sonlu farklar yöntemi	:Finite difference method
Süreç	:Process
Tam bağlı	:Fully-connected
Türdeş	:Homogen
Yapay sinir ağları	:Artificial neural networks
Yayılma	:Spread
Yineleme	:Iteration
Yineleme sayısı	:Epoch number
Zorlanım katsayısı	:Modulus

ÖZGEÇMİŞ

Bağdagül KARAAĞAÇ, 1978 yılında İzmit'te doğdu. Lise öğrenimini STFA Anadolu Teknik Lisesi'nde tamamladıktan sonra, 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2001-2003 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimini tamamlamış, 2003 yılında aynı bölümde başladığı doktora öğrenimine de halen devam etmektedir.

Lisans mezuniyeti sonrası 3 yıl boyunca Kimya Mühendisi olarak çalıştıktan sonra, 2003 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Uluslararası dergilerde yayınlanmış 3 makalesi, ulusal dergilerde yayınlanmış 6 makalesi, ulusal ve uluslararası kongrelerde yayınlanmış 7 bildirisi bulunmaktadır. 3 proje çalışmasında görev almıştır. Evli ve bir erkek çocuk annesidir.