

Tünel Yangını Sırasında Taşıt Blokajının Farklı Havalandırma Hızlarında Yangın Yüküne Etkisi

Proje No: 109M007

Prof.Dr. O. Cahit ERALP
Yrd.Doç.Dr. Ahmet YOZGATLIGİL
Dr. Serkan KAYILI

MART 2010
ANKARA

ÖNSÖZ

Dünyada ve ülkemizde tünellerin önemi gitgide artmaktadır. Hem toplu taşımacılıkta hem de kentler arası ulaşımında tüneller daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Tünellerin güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için yangın ihbar, yangın söndürme ve acil durum havalandırma sistemleri ile donatılmışlardır. Bu projenin amacı tünel acil durum havalandırma sistemi tasarımıda kullanılan temel parametre olan araç yangın yükünün araç kesit alanının tünel kesit alanına bölünmesiyle bulunan blokaj oranı ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu tespit etmektir. Bu araştırma deneysel bir araştırma projesidir.

ODTÜ, Makina Mühendisliği bölümünde, Türkiye’de ilk modern Metro projesinin yapılma tarihi olan 1998’den bu yana metrolarda olası acil durumlar (yangın) için gerekli havalandırma ve duman tahliyesi sistemleri üzerinde çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalarda yapılmış olan metro sistemi üzerinde doğrulamaya yönelik deneyler ve CFD simülasyonları yapılmıştır. Yeni yapılmakta olan metro sistemleri modellenerek, hem sistem simülasyonları yapılmış ve hem de bu sistemlerin acil durum havalandırma sistemi tasarımları ve nümerik yeterlilik deneyleri yapılmıştır. Bu konuda bu güne kadar tamamlanmış yedi yüksek lisans tezi, iki doktora tezi vardır (ÇORUH, 2000 - ARADAĞ,2002 - MUSLUOĞLU,2003- DÜZCE,2003 - KAYILI,2005 - KÖKTÜRK, 2005 - CEYLAN, 2008 , Ph.D ; MUSLUOĞLU,2009 - KAYILI,2009). Bu çalışmalardan çıkmış bazı yayınlar da Kaynakça’da verilmiştir.

Literatürde, taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili yeterli bilgi yoktur. Bu olayı araştırmak amacıyla 1/13 oranında küçültülmüş bir delme tünel modeli ODTÜ, Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Değişik kesit alanlarına sahip model araçlar tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılarak yangın sırasında oluşan ısı gücü değeri ve tünel boyunca oluşacak sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. Kontrollü deneylerle yanan malzemenin kesit alanının yangın yüküne etkisi araştırılmıştır.

Bu projenin yapılmasına karar veren ve bu kapsamda gerekli teçhizatın sağlanmasına katkıda bulunan TÜBİTAK, MAG Genel Sekterliği’ne teşekkürlerimizi sunarız. Deney düzeneğinin yapımı, montajı ve deneysel verilerin elde edilmesinde personel ve ekipman desteğinde bulunan ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı’na teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER	II
TABLO LİSTESİ.....	IV
ŞEKİL LİSTESİ	V
SEMBOL LİSTESİ	VIII
ÖZET	X
ABSTRACT.....	XI
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Tünel Yangınları ile Kapalı Alan Yangınlarının Özellikleri.....	1
1.3 Tünel Havalandırma Sistemleri	3
1.3.1 Doğal Havalandırma	3
1.3.2 Mekanik Havalandırma.....	4
1.3.2.1 Boylamasına havalandırma sistemi.....	5
1.3.2.2 Tam Dikine havalandırma sistemi	7
1.3.2.3 Yarı Dikine havalandırma sistemi	8
1.3.2.4. Karma Havalandırma Sistemi.....	9
1.4 Literatürde Yer Alan Çalışmalar.....	9
1.5 Projenin Amacı ve Yöntemi	22
2. TÜNEL YANGIN KÜÇÜLTME MODELİ	23
2.1 Yangın Modellemelerinde Kullanılan Boyutsuz Fiziksel Parametreler.....	23
2.2 Literatürdeki Küçültülmüş Modellerde Yapılan Testlerin Sonuçları	25
2.3 Tahta Kafes Teorisinin Kullanılması	37
2.3.1 Tahta Kafes Yapısı	37
3.GEREÇ VE YÖNTEM.....	40
3.1 Deney Düzenegi	40
3.2 Ölçüm Sistemi	42
3.2.1 Yanma Gazı Konsantrasyonu Ölçümü	42
3.2.2 Sıcaklık Ölçümü ve Veri Toplama Sistemi	43
3.2.3 Kütle Azalma Miktarının Tespiti	44
3.2.4 Havalandırma Hızı Ölçümü.....	45
3.2.5 Ölçüm Zinciri.....	46
3.3 Deney Metodolojisi.....	47
3.3.1 Deneysel Tasarım Parametreleri.....	47
3.3.2 Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı	48
3.3.3.Deney Hazırlık ve Yapım Aşamaları	52
4.BULGULAR	53
4.1 Deney Sonuçları	53

4.2 Verilerin İstatistiksel Analizi	92
4.2.1 Uygulanan Yöntem	92
4.2.2. İstatistiksel Analiz Sonuçları	94
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	107
REFERANSLAR	110
EKLER	115
EK-A	115
EK-B	116
EK-C	121
EK-D	129
EK E.....	159
EK F.....	160

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 Değişik Taşıtların Yangın Yükü Değerleri.....	11
Tablo 1.2 Demiryolu Taşıtlarının Yangın Yükü Değerleri	12
Tablo 1.3 H. Ingason Çalışmasındaki Testler ve Sonuçları	14
Tablo 1.4 Öngörülen Yangın Yükü Gelişimi	18
Tablo 3.1 Yangın Modellemesi için Kullanılan Boyutsuz Parametreler	24
Tablo 2.2 Kompartman Boyutları	26
Tablo 2.3 π Terimleri Boyutlandırma Sonuçları	26
Tablo 3.1 Ölçülen Büyüklüklerin Listesi ve Kullanılan Veri Toplama Ünitesi	46
Tablo 3.2 Deney Tasarımındaki Parametreler.....	48
Tablo 3.3 Tam Faktoriyel Deney Tablosu.....	49
Tablo 4.4 Deney Matrisi.....	50
Tablo 4.5 Deney Matrisi ($L \neq W$).....	52
Tablo 4.1 Deney Sonuçları Tablosu	56
Tablo 4.2 Tek Faktörlü Bir Deney Verisi	93
Tablo 4.3 Tek Faktörlü Sabit Etkili Bir Modelin Varyans Analiz Tablosu	94
Tablo 4.4 Veriler Arasında Korelasyon Değerlendirmesi.....	94

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yangının Evreleri	2
Şekil 1.2 Doğal Havalandırma Sonucundaki Tüneldeki Duman Katmanı (4 m ² petrol yangını)	4
Şekil 1.3 Boylamasına Havalandırma Sistemleri Çeşitleri	5
Şekil 1.4 Yangın Durumunda Boylamasına Havalandırma Sistemleri	5
Şekil 1.5 Raylı Toplu Taşıma Sistemlerinde Tünel Acil Durum Havalandırma Sistemi Çalışma Prensibi	6
Şekil 1.6 Tam Dikine Havalandırma Sistemi Çalışma Durumları	8
Şekil 1.7 Yarı Dikine Havalandırma Sistemi Çalışma Durumları	8
Şekil 1.8 Boylamasına Havalandırmada Elde Edilen Sonuçlar	13
Şekil 1.9 Çeşitli Yangın Yüklerinde Kritik Hızın Tünel Genişliği ile Değişimi	16
Şekil 1.10 S.R. Lee ve H. S. Ryou Çalışmasındaki Deneysel Sonuçları	17
Şekil 1.11 Boyutsuz Kritik Hız ve Yangın Yükü	19
Şekil 1.12 Değişik Tünel Eğiminde Kritik Hız	20
Şekil 1.13 Kritik Hız Hesabında Tünel Eğim Düzeltme Faktörlerinin Karşılaştırılması	21
Şekil 2.1 Yangın Yükü Olarak Kullanılan Tahta Kafes Yapısı	25
Şekil 2.2 Tahta Kafes Yapıları için Boyutlandırılmış Yanma Hızı	28
Şekil 2.3 1/8 Ölçekli Deneylerde Değişik Noktalardaki Gaz Sıcaklıkları	29
Şekil 2.4 ¼ Ölçekli Deneylerde Değişik Noktalardaki Gaz Sıcaklıkları	30
Şekil 2.5 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış (Scaled) Gaz Sıcaklıkları	31
Şekil 2.6 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış (Scaled) Duvar Sıcaklıkları	32
Şekil 2.7 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış Yangınlardaki Duvardaki Işınımı Isı Akısı	33
Şekil 2.8 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış Yangınlardaki Duvardaki Taşınım ve Işınımı Isı Akıları	34
Şekil 2.9 Küçük Boyutlu Yangınlar için Boyutlandırılmış Taşınım Akısı Sonuçları	35
Şekil 2.10 Sıcaklık Artışı ile Boyutsuz Taşınım Isı Transfer Katsayısı İlişkisi	36
Şekil 2.12 Tahta Kafes Yapısındaki Yanma Hızı	38
Şekil 3.1 Gerçek Tünel ile Model Tünel Gösterimi	40
Şekil 3.2 İmal edilen Model Tünel Boyutları	40
Şekil 3.3 Havalandırma Sistemi ve Ek Bağlantılar	41
Şekil 3.4 Deney Düzeneği	42
Şekil 3.5 TESTO 350S Baca Gazı Analiz Cihazı	42
Şekil 3.6 K Tipi Mineral İzoleli Termo Eleman	43
Şekil 3.7 Sıcaklık Ölçüm Noktaları	44
Şekil 3.8 Omega OMB-DAQ-3005 ve QMB-PDQ 30 Ek Modülü	44
Şekil 3.9 A&D GF20K Hassas Terazî	45
Şekil 3.10 Pitot Tüp Yerleşimi	46
Şekil 3.11 Deney Düzeneği Ölçüm Zinciri	47

Şekil 3.12 Deney Gösterimi (L=W)	51
Şekil 3.13 Deney Gösterimi (L ≠W)	51
Şekil 4.1 (-1)000 - 0000 - 1000 - 20000 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	58
Şekil 4.2 (-1)000 - 0000 - 1000 - 20000 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	59
Şekil 4.3 00002 - 1002 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	60
Şekil 4.4 00002 - 1002 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	61
Şekil 4.5 (-1)101 - 0101 – 2101 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	62
Şekil 4.6 (-1)101 - 0101 – 2101 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	63
Şekil 4.7 02000 - 1200 - 2200 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	64
Şekil 4.8 02000 - 1200 - 2200 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	65
Şekil 4.9 (-1)011 - 1011 - (-1)012 - 0012 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	66
Şekil 4.10 (-1)011 - 1011 - (-1)012 - 0012 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	67
Şekil 4.11 (-1)120 - 0110 - (-1)211 - 0211 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	68
Şekil 4.12 (-1)120 - 0110 - (-1)211 - 0211 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	69
Şekil 4.13 (-1)021 - 0021 - 1020 – 20220 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	70
Şekil 4.14 (-1)021 - 0021 - 1020 - 20220 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	71
Şekil 4.15 (-1)2200 - 22200 - (-1)2202 – 02202 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	72
Şekil 4.16 (-1)2200 - 22200 - (-1)2202 - 02202 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi ..	73
Şekil 4.17 20022 - 00020 - 20202 - 00200 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	74
Şekil 4.18 20022 - 00020 - 20202 - 00200 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	75
Şekil 4.19 0202 - 22002 - 1201 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	76
Şekil 4.20 0202 - 22002 - 1201 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	77
Şekil 4.21 (-1)221 - 2221 - 0220 - 2120 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	78
Şekil 4.22 (-1)221 - 2221 - 0220 - 2120 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	79
Şekil 4.23 (-1)122 – 1121 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	80
Şekil 4.24 (-1)122 – 1121 – 0122 - (-1)1121 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	81
Şekil 4.25 2102 – 1112 – 1100 – 2001 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	82
Şekil 4.26 2102 - 1112 - 1100 – 2001 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	83
Şekil 4. 27 1222 - 22222 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	84
Şekil 4.28 (-1)222 - 1222 - 22222 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	85
Şekil 4.29 1210 - 2010 - 2212 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	86
Şekil 4.30 1210 - 2010 - 2212 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	87
Şekil 4.31 (-1)111-2111-2022-00222 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi ..	88

Şekil 4.32 (-1)111 - 2111 – 2022 - 00222 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	89
Şekil 4.33 (-1)2020 - 02022 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi	90
Şekil 4.34 (-1)2020 – 22020 - 02022 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi	91
Şekil4.35 Isıl Gücün Ana Faktörlerle Değişimi ($L \neq W$)	95
Şekil 4.36 Kütle Azalma Hızının Ana Faktörlerle Değişimi ($L \neq W$)	96
Şekil 4.37 Kütle Azalma Hızı için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı ($L \neq W$)	96
Şekil 4.38 Kütle Azalma Hızındaki Değişimin Bileşenleri ($L \neq W$)	97
Şekil 4.39 Isıl Güç için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı ($L \neq W$).....	98
Şekil 4.40 Isıl Güçteki Değişimin Bileşenleri ($L \neq W$).....	99
Şekil 4.41 Kütle Azalma Hızının ve Isıl Gücün Ana Faktörlerle Değişimi ($L = W$).....	100
Şekil 4.42 Kütle Azalama Hızı ve Isıl Güç Değerleri için Etkileşim Grafikleri ($L = W$)	102
Şekil 4.43 Kütle Azalma Hızının ve Isıl Gücün Hız, Kalınlık ve Blokaj Oranı ile Değişimi ($L = W$)	103
Şekil 4.44 Isıl Güç için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı ($L = W$).....	104
Şekil 4.45 Isıl Güçteki Değişimin Bileşenleri ($L = W$).....	105
Şekil 4.46 Kütle Azalma Hızı için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı ($L = W$)	105
Şekil 4.47 Kütle Azalma Hızındaki Değişimin Bileşenleri ($L = W$)	106

SEMBOL LİSTESİ

\dot{Q}	: Yangın Isıl gücü (Yangın yükü)	(W)
Q	: Enerji miktarı	(GJ)
A	: Eksiltilmiş alan , Kesit alan	(m ²)
A _s	: Tahta Kafes yapısındaki toplam yüzey alanı	(cm ²)
A _v	: Tahta kafes yapısında dik kesit alanı	(cm ²)
b	: Çubuk kalınlığı	(cm)
c _p	: Sabit Basınçtaki Isı Sıhası	(J/kg.K)
C	: Katının Isı Sıhası	(J/kg.K)
D _h	: Hidrolik Tünel Yüksekliği (çapı)	(m)
g	: Yerçekimi ivmesi	(m/s ²)
h	: Taşınım ısı transfer katsayısı	(W/m ² K)
H	: Tünel Yüksekliği	(m)
K ₁	: Boyutsuz Sabit	
K _g	: Eğim düzeltme faktörü	
k	: Isı İletkenlik Katsayısı	(W/m.K)
L	: Uzunluk	(cm)
L _e	: Gazın ortalama ışın uzunluğu (Mean beam length)	
l	: Karakteristik Uzunluk (yükseklik)-Çubuk Uzunluğu	(cm)
\dot{m}	: Kütleli Debi	(kg/s)
n	: Her katmandaki Çubuk Sayısı	
V	: Hacim	(m ³)
V _c	: Kritik Hız	(m/s)
p	: Basınç	(Pa)
P	: Kafes Gözenekliliği	
s	: Tahta çubuklar arasındaki boşluk	(cm)
U,v	: Hız	(m/s)
\dot{V}	: Hacimsel Gaz Debisi	(m ³ /s)
W	: Genişlik	(cm)
t	: Zaman	(s)
T	: Sıcaklık, Kalınlık	(°K- cm)
Y	: Türlerin Kütle Oranı	
Δh_c	: Yanmada Açığa Çıkan Isı Enerjisi	(kJ/kg)
y _i	: Yanma sonucu oluşan türün kütlelerinin yanan yakıt kütlelerine oranı	

X_{xxx}^A	: Baca gazında analizör tarafından ölçülen gaz türünün mol oranı (% - ppm)	
X_{xx}^o	: Havadaki gaz türünün mol oranı	(% - ppm)
E'	: Karbonun Karbon dioksit'e dönüşmesi sırasında birim hacim oksijenin yanması sonucu açığa çıkan enerji miktarı	($E' = 17.2 \text{ MJ/m}^3$)
E''	: Karbon monoksit'in yanması sırasında birim hacim oksijenin yanması sonucu açığa çıkan enerji miktarı	($E'' = 23.1 \text{ MJ/m}^3$)

Greek Letters

Θ	: Eğim	
ϕ	: Oksijen tükenme faktörü	
ρ	: Özkütle	(kg/m^3)
π	: Pi terimleri	
δ	: Duvar kalınlığı	(m)
κ	: Emme(soğurma) katsayısı	
σ	: Stefan- Boltzman Sabiti	($5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2 \text{K}^4$)
μ	: Mutlak Viskozite	(Pa.s)
ε	: Gaz ışınlama katsayısı (emissivity)	

Kısaltmalar

FDS	: Fire Dynamics Simulator
NFPA	: National Fire Protection Association
PIARC	: World Road Association
Re	: Reynolds Sayısı
Grade	: Yüzde değerinde eğim değeri

Alt simgeler

w	: Duvar
∞	: Ortam
O_2	: Oksijen
CO	: Karbon monoksit
H_2O	: Su Buharı

ÖZET

Kara ve demiryolu tünelleri şehir içi ve şehirlerarası ulaşım zamanını kısaltmak amacıyla yapılmaktadır. Tüneller, güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için, yangın güvenlik sistemleri ile donatılır. Bu nedenle, yangın güvenlik sistemlerinin yeterli bir şekilde tasarlanması için yangın sonucu oluşan hava hızlarının, sıcaklıklarının ve duman konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Bu amaçla, küçük ölçekli tünel modelleri kullanılarak bu olgunun çözümlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, tünel yangınları ve bunların modelleme metodları üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili yeterli bilgi bulunmamaktadır. Küçük ölçekli bir tünel modeli Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısı gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde, model araçlar tabanları kare olacak şekilde tahta kafes teorisine göre oluşturulmuştur. Sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan varyans analizi methodu ile incelenmiş ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tünel içindeki hava hızının değişimi yangın yüküne çok fazla etkili olmadığı fakat model taşıtın kesit alanı ile yangın yükü doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yangın Güvenliği, Tünel Yangını, Froude numarası modellemesi, Yangın Yüğü, Acil durum havalandırması, Tıkama (Blokaj) Oranı

ABSTRACT

Road and railways tunnels are constructed for decreasing the transportation time inside city or intercity. The fire safety systems are mounted in these tunnels for safe use. Therefore, it is important to accurately predict the fire-induced air velocity, temperature and smoke concentrations in tunnel fires in order to design efficient fire protection systems. To this end, scaled tunnel models are used and experiments are carried to understand the phenomena on these tunnel models. In addition, the studies for investigating the tunnel fire phenomena and their methods of modeling techniques for fire experiments are mentioned. In the literature, there is no sufficient information about vehicles' blockage effect on heat release rate and temperature distribution inside a tunnel with different ventilation velocities. As a result, in order to investigate this subject, a scaled model tunnel is constructed in Fluid Mechanics Laboratory. Based on the Froude number scaling, wood sticks with different configuration inside the model tunnel are burned in a controlled environment. The heat release rate measurement, sampling of gases after combustion, mass loss rate of burning models and temperature distribution along the tunnels with different longitudinal ventilation velocities are measured to investigate the effect of different cross-sectional areas of the burning substances. Furthermore, the model vehicles having a square base area are built according to wood crib theory. The results are investigated with statistical techniques called "Analysis of Variance" and general results have been tried to be reached. It is determined that the variation of air velocity inside tunnel is not so effective, but the model vehicle's cross sectional area is directly proportional to heat release rate.

Keywords: Fire safety, Tunnel fire, Froude number scaling, Fire Load, Emergency Ventilation, Blockage Ratio

1.GİRİŞ

1.1 Giriş

Dünyada ve ülkemizde tünellerin önemi gitgide artmaktadır. Hem toplu taşımacılıkta hem de kentler arası ulaşımında tüneller daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Yeni yapım tekniklerinin uygulanmaya başlamasıyla karayolu ve demiryolu ile ulaşımını için daha uzun tüneller yapılabilmektedir. Ülkemizde özellikle toplu taşımacılığın önem kazandığı büyük şehirlerimizde yeraltı toplu taşıma sistemleri (metro) inşaatlarına hız verilmiştir.

Tünellerin güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için yangın ihbar, yangın söndürme ve acil durum havalandırma sistemleri ile donatılmışlardır. Bu sistemlerin özelliklerinin nasıl olması gerektiği güvenlik şartnameleriyle belirtilmiştir (NFPA 130, 2007). Tünellerde çok fazla güvenlik önlemi alınmasına rağmen tünel operasyonları sırasında yangın olayı görülmektedir. İki aracın çarpışması, elektrik kontağı veya kundaklama sonucunda tünellerde yangın çıkmaktadır. Bunun sonucunda, tüneller ve tünel içindeki ekipmanlar ciddi şekilde zarar görebilmektedir. Tünel yangınları sonucunda insanlar canları ve mallarını da kaybedebilmektedirler. Demiryolu toplu taşımacılığı için kullanılan tünellerdeki yangınlarda yol tünellerindeki yangınlara göre daha fazla insan hayatını kaybetmektedir. Bunun nedeni, daha fazla insanın demiryolu ile taşınmasıdır.

Raporun bu kısmında tünel yangınlarının özellikleri, literatürde yapılan daha önceki çalışmalar ve projenin amacı belirtilmiştir.

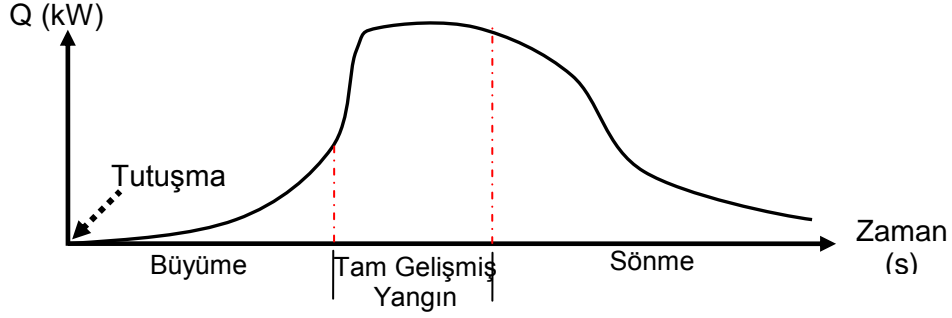
1.2 Tünel Yangınları ile Kapalı Alan Yangınlarının Özellikleri

Isı, yakıt (yanıcı madde) ve oksijenin uygun oranda bir araya gelmesi ile başlayan kimyasal reaksiyona 'yanma'; yanma olayının kontrol dışı gelişen haline "yangın" denilmektedir. Yangın sırasında alevin, yakıtın ve çevresinin birbirleriyle etkileşimi çoğunlukla doğrusal değildir. "Kapalı alan yangını" terimi yangının bir oda veya buna benzer etrafı çevrelenmiş bir alanda çıkması durumunda kullanılan bir tanımdır. Kapalı bir ortam içinde malzeme yanıyor ise yangın gücüne ve yanma hızına etkili olan başlıca iki parametre vardır (KARLSSON, QUINTIERE, 2000):

1. Sıcak gazların tavan kısmında birikmesi sonucunda, mekândaki tavanın ve duvarların ısınarak bu yüzeylerin ve sıcak gaz katmanının yakıt yüzeyine doğru ışınım yoluyla ısı transferi yaparak yanma hızını artırmasıdır.
2. Mekânda havanın giriş yapabileceği kısımların kısıtlı olması sonucunda yanma için gerekli olan oksijen miktarının elde edilebilirliğinin sınırlanmasıdır. Bu nedenle malzemelerin yanma hızı ve çevreye yaydıkları ısı gücü azalmakta ve yanmayan gazların konsantrasyonunda artış olmaktadır.

Tünelde çıkan yangınlarda kapalı alan yangını olarak sınıflandırılırlar. Ancak tünel yangınında yolcu tahliyesi için gerekli olan acil durum havalandırma sistemi yanma için gerekli olan oksijen miktarından fazlasını sağlamaktadır. Araştırmalar sonucunda tünel içindeki bir yangında, yangının ısıl gücünün (yangın yükü) aynı malzemeler kullanıldığı durumda açık havadaki değerinin dört kat fazla olduğunu tespit edilmiştir (BEARD, CARVEL, 2005).

Yangın, dört evreden oluşmaktadır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi yangın sırasıyla; tutuşma, büyüme, tam gelişmiş yangın ve sönme evrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 1.1 Yangının Evreleri (DRYSDALE, 1999)

Tutuşma, yangının başlaması için gerekli olan enerjinin verilmesi sonucunda yanma reaksiyonunun başlaması olayıdır. Tutuşma bir alev kaynağından olabileceği gibi ortamdaki sıcaklığın yükselmesiyle de olabilir. Yangının büyüme evresinde ise yanan malzemelerin özelliğine, ortamdaki oksijen miktarına, ortam konfigürasyonuna ve yanma tipine göre yangın gelişimi hızlı veya yavaş olabilir. Çevredeki malzemelerin ortamdaki ısı transferi sonucunda sıcaklıkları artarak yanmaya başlarlar. Sıcaklığın artması sonucunda öyle bir an gelir ki ortamdaki cisimlerin birçoğu tutuşma sıcaklığına ulaşarak aniden yanmaya başlar. Bu ani reaksiyon "parlama" (flashover) olarak tanımlanır. Parlama evresini takiben tam gelişmiş yangın evresinde ortamdaki tüm yanıcı maddelerin yanmaya başladığı düşünülür. Bu evrede yangının ısıl gücü en yüksek değere ulaşır ve ortamdaki oksijen miktarı azdır. Tam gelişmiş yangın evresinde, yangının büyümesi oksijen miktarı ile sınırlıdır. Sönme evresinde ise ortamdaki yanan malzeme tükenmesi sonucunda yangın ısıl gücü azalmaktadır. Bu evrede yangın, yakıt kontrollü bir yangındır. Tünel yangınları ile kompartman yangınları arasındaki farklar şunlardır (BEARD, CARVEL, 2005):

1. Maksimum yangın gücü kompartman yangınında doğal havalandırma genellikle havalandırma faktörü olan $A_o(h_o)^{1/2}$ 'e bağlıdır. Burada A_o kompartmandaki dışarı açılan alanı ve h_o ise bu açıklığın yüksekliğini ifade etmektedir. Tünellerde ise doğal havalandırma sırasındaki yangın büyüklüğü, tünel eğimine, kesit alanına, uzunluğuna, tünel duvar özelliklerine ve girişteki meteorolojik koşullara bağlıdır. Tünellerde genellikle mekanik havalandırma sistemleriyle donatıldıklarından kompartman yangınına göre daha fazla artık hava (oksijen) bulunmaktadır. Havalandırma hem yangın veriminde hem de yangın yükünde etkili olmaktadır.

2. Kompartıman yangınlarında parlama çok kısa zamanda gerekleŒmektedir. Tünel yangınlarında ise genellikle parlama olması muhtemel değildir. Yangın çevresindeki duvarlarda büyük ısı kayıpları olmaktadır. Buna rağmen, tren ve araç kabinleri içindeki parlama kolaylıkla olabilir. Tünel yangınında mekanik havalandırma etkisiyle havalandırma yönündeki araç tutuŒabilir; fakat bu durum parlama olarak nitelendirilemez.
3. Tünel yangınlarında duman katmanı oluŒumu kompartman içi yangınlara göre farklılık gösterir. Kompartman yangının baŒlangı evresinde üst kısmında sıcak hava katmanı ve alt kısmında soğuk ve dumansız bölge bulunur. Buna benzer bir duman katmanı oluŒumu boylamasına bir havalandırma olmadan tünel yangınlarının baŒlangıcında da görülür. Fakat, duman katmanı kademeli olarak tünel yüzeyine doğru yangından uzak bölgelerde alçalmaya baŒlar. Tünel çok uzunsa duman katmanı tünel tabanına kadar alçalır. Bu olgunun gerekleŒmesi yangından uzaklığa, yangının boyutuna, tünel tipine, çevresine ve yüksekliğine bağlıdır. Boylamasına havalandırma ile tünel içi hava hızı kademeli olarak artırıldığında bu katmanlaŒmıŒ kısım dağılır. Tünel havalandırma hızı belirli bir seviye ulaŒmadıđında duman havalandırma yönünün tersine hareket ederek ters katmanlaŒma meydana getirir. Yangın tünel içinde geliŒirken havalandırma ile etkileŒim halindedir ve baca etkisi nedeniyle akıŒa karŒı bir direnç yaratarak akıŒta deđiŒimlere sebep olmaktadır.
4. Tüneldeki bir yangında havalandırma, yangın bölgesinde soğutma özelliği göstererek sıcaklığın yüksek değerlere ulaŒmasına engeller.

Yanma iki farklı durumda gerekleŒmektedir. Bunlar yakıt kontrollü yanma ve hava kontrollü yanmadır. Kapalı alan yangınlarında yakıt kontrollü yanma yangının genellikle büyüme ve sönme evrelerinde azda olsa parlama evresinden sonra meydana gelir. Hava kontrollü yanma ise genellikle parlama evresinden sonra az da olsa geliŒme evresinde görülür. Yakıt kontrollü yanma yangının oksijen miktarından bağımsız Œekilde sürmesi ve yakıt yanma miktarına bağlı olması durumunu ifade etmek için kullanılır. Havalandırma kontrollü yangın ise yanma için gerekli olan oksijen miktarının olmaması durumu ve yanma hızının hem hava hızına hem de yakıt ikmal hızına bağlıdır. Tam olarak yeteri kadar oksijenle tam yanma sağlandığında ise yakıt hava karıŒımına stokiyometrik karıŒım denir.

1.3 Tünel Havalandırma Sistemleri

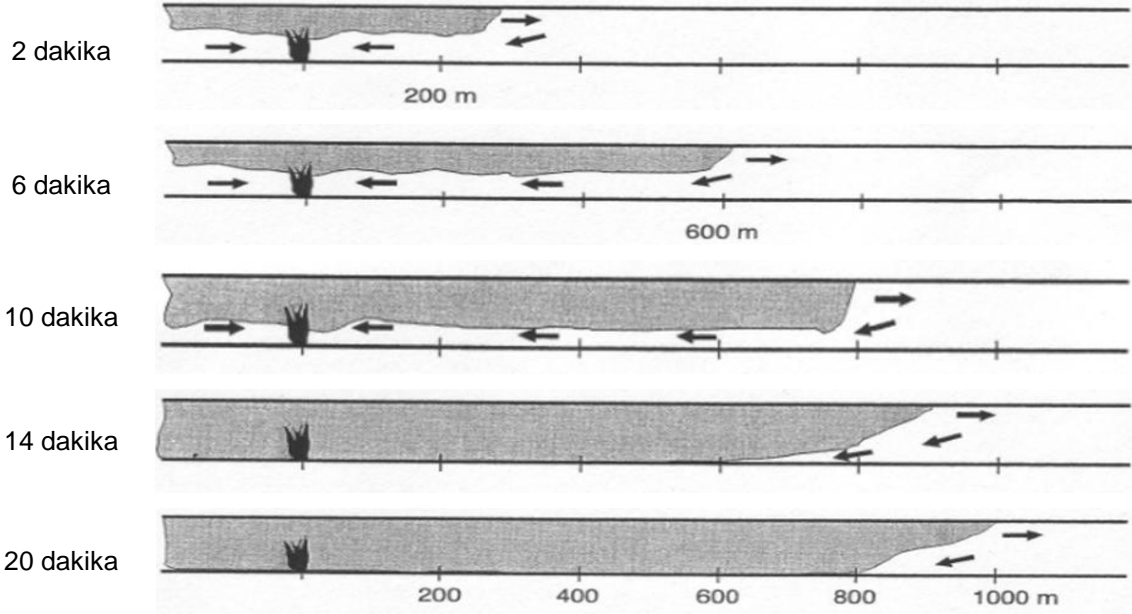
Tünellerde kullanılan havalandırma sistemleri iki kategoride incelenebilir. Birincisi doğal havalandırma sistemlerini, ikincisi ise mekanik havalandırma sistemleridir.

1.3.1 Doğal Havalandırma

Mekanik havalandırma sistemi olmadan tünel içindeki meydana gelen hava hareketi sonucunda oluŒan havalandırmaya doğal havalandırma denir. Kısa tünellerde yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Ülkelerden ülkelere mekanik havalandırmanın gerekli görülmediği tünel uzunlukları

farklılık göstermektedir. Almanya'da 350 ile 700 m uzunluğundaki tüneller için mekanik havalandırmaya gerek görülmemektedir. İngiltere'de tünel uzunluğunun üst limiti 400 m olup mekanik havalandırmanın kullanılıp kullanılmamasına ancak detaylı bir araştırma sonucunda belirlenmektedir. Amerika'da ise bu uzunluk 240 m olarak belirlenmiştir. Doğal havalandırmada normal olarak, tünel uçlarındaki sıcaklık ve yükseklik farkı sonucu oluşan statik basınç değişimleri ve araçların hareketleri sonucunda (piston etkisi) akış sağlanmaktadır. Ancak yangın durumunda araç hareketleri durdurulacağı için piston etkisi ortadan kalkmaktadır.

Tünelde yangın durumunda sıcak duman tavana doğru yükselir ve tavanda katmanlaşarak zamanla tünel boyunca yayılmaya başlar. Tünel duvarları ile ısı kaybı sonucu duman katmanı zamanla soğumaya başlar ve duman tabana doğru soğuk havayla karışarak alçalmaya başlar. Duman katmanı küçük boylu tünellerde belirli bir süre insanların kaçması için gerekli olan ortamı sağlar. Bu durum Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Yangın büyüklüğüne, gelişimine, tünel kesit alanına, eğimine, taşıtların oluşturduğu havalandırmaya ve hava şartlarına bağlı olan doğal havalandırma sistemi her zaman güvenilir bir ortam sağlamamaktadır.



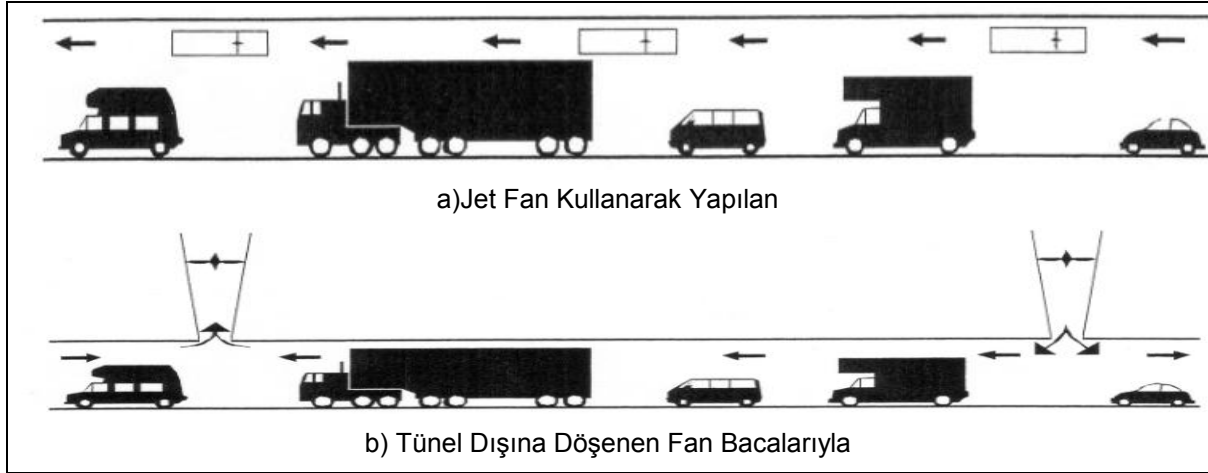
**Şekil 1.2 Doğal Havalandırma Sonucundaki Tüneldeki Duman Katmanı (4 m² petrol yangını)
(BEARD, CARVEL 2005)**

1.3.2 Mekanik Havalandırma

Mekanik havalandırma sisteminde temel amaç yangın bölgesinde oluşan dumanın fan kullanılarak uzaklaştırılmasıdır. Tünellerde kullanılan üç farklı mekanik havalandırma sistemi vardır: Bunlar boylamasına, tam dikine ve yarı dikine havalandırma sistemidir.

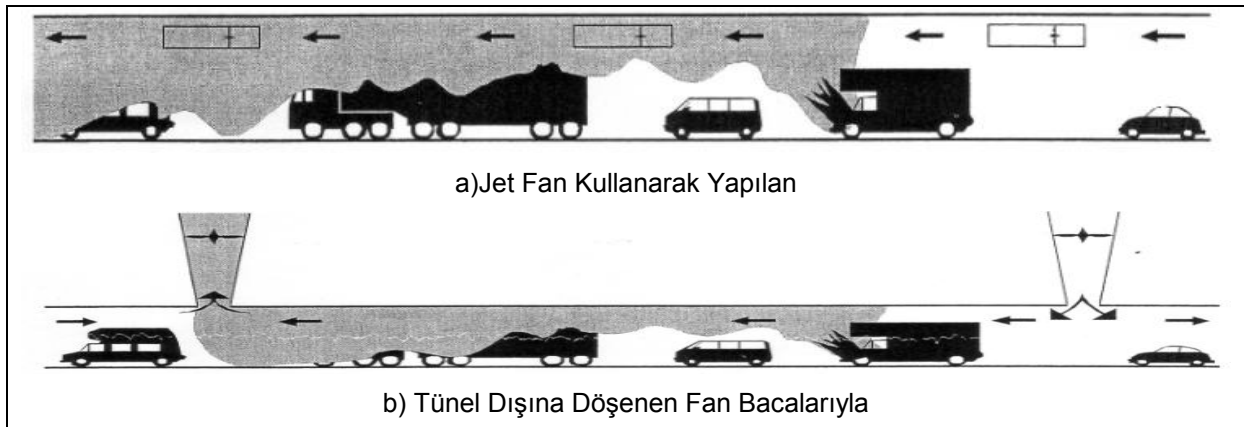
1.3.2.1 Boylamasına havalandırma sistemi

Boyuna havalandırma sisteminde tünel bir hava kanalı olarak kullanılır ve ayrıca havalandırma sistemi için ayrıca bir boşluk bırakılmaz. Havalandırmada ya tünel boyunca döşenen jet fanlar ya da tünel dışına kurulan bacalara bağlanan fanlar kullanılır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Boylamasına Havalandırma Sistemleri Çeşitleri (BEARD, CARVEL 2005)

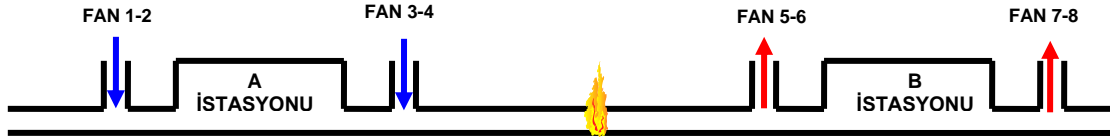
Tünel boyunca döşenen jet fanlarla etkili bir havalandırma sağlanılmak isteniyorsa portal ağızlarından en az 80 -100 m içeriye yerleştirilmelidir (PIARC,1999). Ayrıca jet fanlar arasındaki mesafelerde birbirlerinin akışını etkilemeyecek şekilde bırakılmalıdır. Tünelde yangın çıkması durumunda yangın sonucu oluşan duman bu sistemde bir yöne doğru yönlendirilerek hattın diğer tarafta dumansız bir bölge oluşturulur(Şekil 1.4). Jet fan tipi havalandırma fanlarının yerleştirilmesi için ayrı bir binanın veya yapının yapılmasına gerek yoktur. Bu sistemin montajı kolay olup diğer havalandırma sistemlerine göre daha az maliyetlidir. Fakat, jet fanların montajı için daha yüksek veya geniş tünel yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Çok sayıda fanın kullanılması bakım ve işletme maliyetleri artırmaktadır.



Şekil 1.4 Yangın Durumunda Boylamasına Havalandırma Sistemleri (BEARD, CARVEL 2005)

Jet fanların havalandırma için kullanılması tünel uzunluğu ve trafiğin tek veya çift yönlü olmasına göre değişiklik göstermektedir. Almanya’da çift yönlü trafiğin olduğu yol tünellerinde boyuna havalandırmada jet fan kullanılması ancak tünel uzunluğu maksimum 2 km olduğu zaman mümkün olmaktadır. Bu durum tek yönlü trafiğin olduğu tünellerde ise 4 km dir. Fransa’da ise kent içindeki trafikte kullanılan yol tünelleri için boylamasına havalandırma sistemlerinde bu sınır 800 m, kent dışındaki bir tünel için ise 4000m olarak tespit edilmiştir. Çift yönlü trafiğin olduğu şehiriçi tünellerinde ise boyuna havalandırma yapılmasına izin verilmemektedir.

Raylı toplu taşıma sistemlerinde tünel acil durum havalandırma sistemi genellikle basma çekme prensibi kullanılarak boylamasına havalandırma ile duman tahliyesi sağlamaktadır (Şekil 1.5). Basma çekme prensibi gereği, yangının bir tarafındaki istasyonda veya tünelde bulunan acil durum havalandırma fanları emme diğer taraftaki fanlar ise basma durumunda çalıştırılır. Tünel yangınlarında dumanı istenen yönde tahliye edebilmek ve insanlara güvenli bir kaçış yönü sağlamak amacıyla genel olarak istasyonların etrafında yer alan, acil durum havalandırma fanları kullanılmaktadır.



	A İSTASYONU		B İSTASYONU	
Fan	1-2	3-4	5-6	7-8
Çalışma Yönü:	Basma	Basma	Emme	Emme

Şekil 1.5 Raylı Toplu Taşıma Sistemlerinde Tünel Acil Durum Havalandırma Sistemi Çalışma Prensibi

Ayrıca demiryolu tünellerinde jet fanlar tünel uzunluğuna göre tek havalandırma sistemi olarak kullanılabilir. Ayrıca, uzun yer altı demiryolu hatlarında makas bölgelerinde ve büyük alan değişimleri görülen bölgelerde olabilecek bir yangında, tasarım kriteri olan kritik hıza ulaşmak çok zor olmaktadır. Bu nedenle belirtilen bölgelerde en uygun havalandırılma sistemi, varolan tünel havalandırma fanlarıyla birlikte bu bölgelerde hem hava akışını yönlendirmek hem de dumanın ters katmanlaşmasını önlemek için jet fanların kullanılmasıdır.

“Kritik Hız” terimi, ters katmanlaşmanın önlenmesi için gereken, yangın üzerinden geçecek minimum hava hızı değeridir. Kritik hız çeşitli parametrelere bağlıdır: tünel yüksekliğine, kesit alanına ve eğimine, hava sıcaklığına ve özkütlesine, yangının ısıl gücüne (yangın yüküne) Kritik hız aşağıdaki denklemlerin tekrarlanan şekilde çözülmesiyle hesaplanır (KENNEDY ve diğerleri, 1996) :

$$V_c = K \cdot K_g \left(\frac{gHQ}{\rho c_p A T_f} \right)^{1/3} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho c_p A V_c} + T \quad (2)$$

$$K_g = 1 + 0.0374(\text{eğim})^{0.8} \quad (3)$$

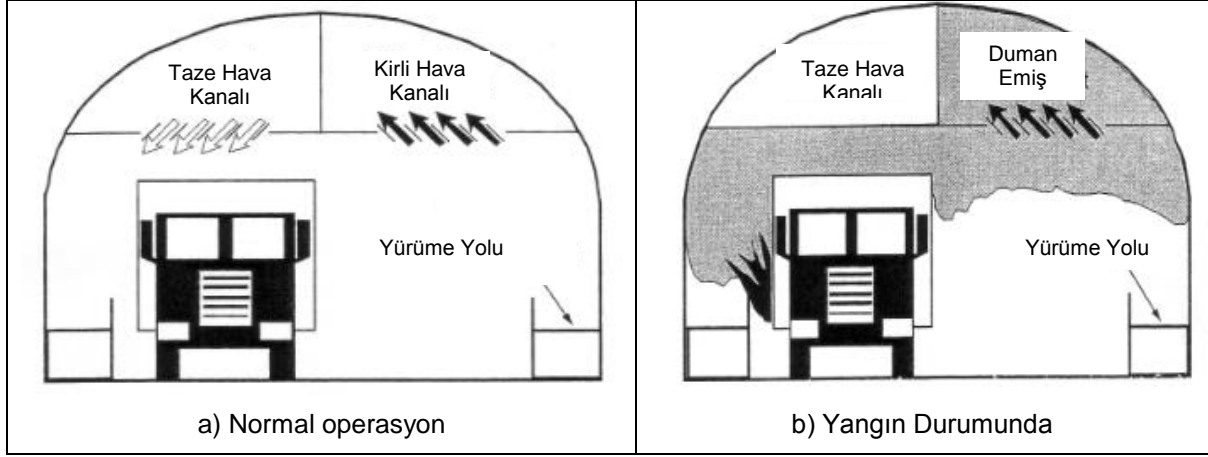
Bu denklemlerde, V_c (Kritik Hız [m/s]), H (Tünel Yüksekliği [m]), Q (Yangın Isıl Gücü [W]), g (Yerçekimi ivmesi [m/s^2]), ρ_a (Dış havanın özkütlesi [kg/m^3]), C_p (Havanın sabit basınçtaki ısı sıhası [J/kg.K]), A (Tünel kesit Alanı [m^2]), T_f (Duman Sıcaklığı [K]), K (0.61 []), K_g (Eğim doğrulama faktörü []), T_a (Dış Hava Sıcaklığı ($^{\circ}K$)) ve eğim(% Eğim değerinin mutlak değeri) olarak gösterilmiştir (KENNEDY ve diğerleri,1996).

Yangın bölgesinden geçen hava hızı daima kritik hız değerinden büyük veya eşit olmalıdır. Böylelikle duman ve sıcak gazlar akışın olduğu yöne doğru yönlendirilmiş olacak ve insanların güvenli bir şekilde dumandan etkilenmeden sistemi boşaltmaları sağlanacaktır. Eğer hava hızı kritik hız değerinden az ise ters katmanlaşma meydana gelir; duman ve sıcak gazlar havalandırma yönünün tersine hareket eder. Bu durum, kaçan yolcuların hayatını tehlikeye sokan, istenmeyen bir durumdur. "Ters katmanlaşma" duman ve sıcak gazların istenen havalandırma yönünde değil de tersi yönünde akmasını ifade etmek için kullanılır.

Tünellerdeki bir yangında havalandırma sistemlerinin tasarımda dikkat edilmesi gereken kriterler demiryolu tünelleri için NFPA 130 (NFPA ,2007) ve Subway Environmental Design Handbook (1976)'ta, karayolu tünellerinde ise PIARC yayınları (PIARC ,1999) ve NFPA 502 (NFPA,2001) standartlarında belirtilmiştir. Bunlar: (1) Havalandırma sistemi minimum havalandırma hızı olarak kritik hız değerinde, maksimum değer olarak da insanların kaçışlarını güçleştirmemek amacıyla 11 m/s hız limitini aşmamalıdır. (2) Havalandırma sistemi daima kritik hız değerinden yüksek hava hızı değeri sağlamalıdır. Böylelikle, duman akış yönüne doğru süpürülmüş olup; akış yönünün tersinde insanlar için güvenli bir kaçış yolu sağlanmış olacaktır. (3) Havalandırma sistemi, yolcuların ve personelin tahliye yolu boyunca hava sıcaklığının $50^{\circ}C$ 'den az olmasını sağlamalıdır (NFPA,2007).

1.3.2.2 Tam Dikine havalandırma sistemi

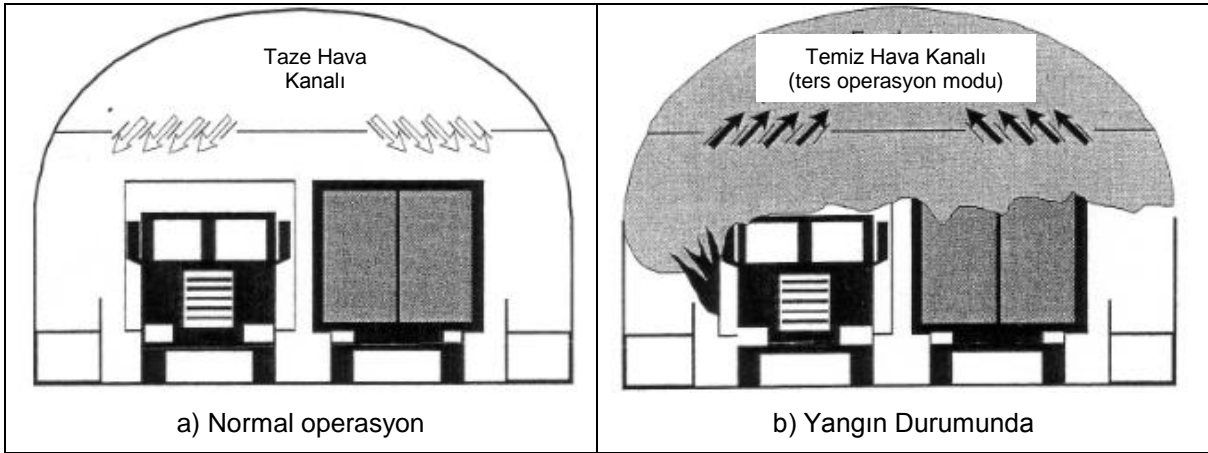
Tam enine havalandırma sisteminde tünel boyunca döşenen iki farklı havalandırma kanalları menfezlerinden birinden tünele temiz hava sağlanırken diğerinden ise tünel içindeki kirli hava emilir. Bu iki kanaldan gelen hava debileri eşittir ve iki kanaldaki akış tünel ekseninin dikine bir havalandırma sağlar. Yangın sırasında ise tünele temiz hava sağlayan kısım kapatılır ve sistemdeki duman emiş kanallarından dışarı atılır.



Şekil 1.6 Tam Dikine Havalandırma Sistemi Çalışma Durumları (BEARD, CARVEL 2005)

1.3.2.3 Yarı Dikine havalandırma sistemi

Yarı dikine havalandırma sistemi tam dikine havalandırma sistemine benzer fakat bu sistemde sadece tünel boyunca döşenen tek bir havalandırma kanalı bulunmaktadır. Normal çalışma durumunda tünele bu kanallardan verilen tünel içine temiz hava verilmekte kirli hava ise tünel giriş ve çıkışlarında atılmaktadır. Yangın durumunda ise bu kanallardan duman emişi sağlayarak duman tünelden uzaklaştırılacaktır.



Şekil 1.7 Yarı Dikine Havalandırma Sistemi Çalışma Durumları (BEARD, CARVEL 2005)

Dikine havalandırma sistemlerinde yangın bölgesinin yakınında duman emiş kanalından atılabilmektedir. Boyuna havalandırma ise yerel olarak duman tahliyesi yapılamamaktadır. Boyuna havalandırma sisteminde duman bir yöne doğru yönlendirilerek dumansız bir tahliye yolu oluşturulur. Böylelikle hem güvenli bir kaçış sağlanır hem de itfaiyenin müdahalesi kolaylaştırmış olur. Boyuna havalandırma sisteminin dezavantajı, dumanın yönlendirildiği taraftaki ekipmanların zarar görmesi

ve o kısımda kalan insanların mahsur kalma olasılığıdır. Dikine havalandırma sistemlerinde gerekli olan damperlerin açılıp duman tahliyesi yapılabilmesi için yangın bölgesinin düzgün bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Kanalların yapılması ve ek havalandırma yapısına gerek duyulması, dikine havalandırma sistemlerinde yatırım maliyetinin yükselmesine neden olmaktadır. Fakat sistemdeki bakım onarım maliyetleri daha düşük seviyelerdedir. Yarı ve tam dikine havalandırma sisteminde tünel boyunca oluşan boyuna havalandırma hızı 2 m/s nin altında kalması gerekmektedir. Eğer hız limitinde altında olmazsa duman katmanı dağılacaktır(BEARD, CARVEL 2005). Dikine havalandırma sistemleri çift yönlü trafiğin olduğu yol tünellerinde tercih edilmektedir.

1.3.2.4. Karma Havalandırma Sistemi

Boylamasına ve dikine havalandırma sistemlerinin bir birleşimi olan havalandırma sistemidir. Tünel özelliklerine göre bu havalandırma çeşidi tercih edilir.

1.4 Literatürde Yer Alan Çalışmalar

Tünel yangınlarında havalandırmanın hem yangın yüküne hem de tünel içi sıcaklığa etkisi konusunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar sonucunda tüneldeki hız ve sıcaklık değerlerinin doğru bir şekilde öngörülebilmesi yangın güvenlik sistemi tasarımı için gereklidir. Yapılan deneylerde genel olarak Froude sayısına göre küçültülme yapılmış ve çok değişik malzemeler yakıt olarak kullanılmıştır.

Literatürde tam ölçekli deneysel çalışmalar bulunmaktadır. 1965 yılında İsviçre Ofenegg' te tünel yangın deneyleri yapılmıştır (BEARD, CARVEL 2005). Üç farklı büyüklükteki (6.6 m², 47.5 m² ve 95 m²) benzin havuzlarıyla yapılan deneylerde doğal havalandırma, boylamasına havalandırma ve yarı dikine havalandırma sistemlerinin performansı araştırılmıştır. Deneyler sonucunda doğal havalandırma ve yarı-dikine havalandırma durumunda yakıt yanma hızı açık ortamdaki yanmaya göre daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, boylamasına havalandırma durumunda diğer havalandırma çeşitlerine göre en yüksek yanma hızının elde edildiği görülmüştür.

1970 yılında Birleşik Krallık West Meon'daki uzunluğu 480 m, genişliği 8 m ve yüksekliği 6 m olan eski bir demiryolu tüneline deneyler yapılmıştır. Deneylerde çeşitli arabalar rüzgar hızının yaklaşık 2 m/s olduğu doğal havalandırma koşullarında yakılmıştır. Deneylerde, duman katmanı yüksekliğinin insanların kaçması için güvenli bir ortam oluşturduğu gözlemlenmiştir (LÖNNERMARK,2005). Aynı yıl Glasgow'da uzunluğu 620 m, genişliği 7.2 m ve yüksekliği 5.2 m olan demiryolu tüneline kerosin (gaz yağı) kullanılarak beş adet deney yapılmıştır. Yangın büyüdükçe duman katmanının büyüdüğü ayrıca dumanın yangın başlangıcından sonra alçaldığı tespit edilmiştir(BEARD, CARVEL 2005).

1976 yılında Avusturya'da otuz farklı testin (29 tanesi petrol ürünlerinin, 1 tanesi tahta ve lastik tekerleklerin yakıt olarak kullanıldığı deneyler) yapıldığı deneylerde değişik havalandırma sistemlerinin etkileri gözlemlenmiştir. Tavanda sıcaklığın yüksek olduğu, boylamasına havalandırma durumunda

yüksek havalandırma hızlarında duman katmanının dağıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, dikine havalandırma koşullarında duman katmanının dağılmaması için emme durumunda çalışan fanların tam kapasite ile çalıştırılırken tünele temiz hava sağlayan fanların ise normal operasyon durumunda %70-80 kapasite ile çalıştırılması gerektiği sonucuna varılmıştır(LÖNNERMARK,2005).

Japonya'da 1980 yılında 24 adet tam ölçekli deney yapılmıştır(BEARD, CARVEL 2005). Bu deneylerin 16 tanesi 57.3 m² kesit alanı olan 700 m uzunluğundaki yangın galerisinde, 8 tanesi 58 m² kesit alanı olan 3.28 km uzunluğundaki bir yol tüneline gerçekleştirilmiştir. 12 petrol havuzu, arabalar ve otobüsler deneylerde yakıt olarak kullanılmıştır. Doğal ve boylamasına havalandırma durumunda yapılan deneyler sırasında hava hızı, yakıt kütle azalma hızı, duman konsantrasyonu (karbon monoksit veya bazı deneylerde oksijen), ışıksal yoğunluk (optical density) değerleri ölçülmüştür. Boylamasına havalandırma durumunda duman katmanı havalandırma hızına bağlı olarak kısmen veya tamamen dağıldığı ve ayrıca boylamasına havalandırma durumunda havalandırma hızı arttıkça yangın yükü arttığı belirlenmiştir(LÖNNERMARK,2005). Deneylerde yangının söndürmek için sprinkler kullanılmış ve yangının sönmediği fakat yangın yükü gelişiminin azaldığı tespit edilmiştir.

Birçok ülkedeki (Avusturya, Finlandiya, Fransa, Almanya, İtalya, Norveç, İsveç, İsviçre ve İngiltere) araştırmacıların ortak bir çalışması olan EUREKA EU-499 adlı tünel yangın deneyleri 1990 ile 1992 yılları arasında üç farklı ülkede yapılmıştır (BEARD, CARVEL 2005). Otomobiller, tren vagonları, tahta kümeleri, heptan havuzları, dolu yük kamyonu ve mobilya dolu ağır yük taşıtı Norveç'te yapılan deneylerde yakılmıştır. Almanya ve Finlandiya'da yapılan deneylerde tahta kümeleri yakıt olarak kullanılmıştır. Deneyler sonucunda ulaşılan sonuçlar şunlardır:

- Çoğu araç yangınında sıcaklığın maksimum 800 -900 C^o'ye ancak ağır yük taşıtlarının yanması durumunda maksimum 1300 C^o ulaştığı sonucuna varılmıştır.
- Tren vagonlarının 15 ile 20 MW arasında yangın yüküne sahip olduğu, ağır yük taşıtlarının ise yanması durumunda 100 MW yangın yüküne ulaştığı tespit edilmiştir. Modern tren vagonlarının tutuşmaya karşı daha dirençli olduğu da varılan tespitler arasındadır.
- Ağır yük taşıtlarının yanması durumunda boylamasına havalandırmanın akış yönündeki duman katmanını dağıttığı tespit edilmiştir.
- Yangın gelişimi ve yanma şeklinin (düzeninin) büyük ölçüde havalandırma şartlarından etkilendiği tespit edilmiştir.

1993 ile 1995 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri'nde, Memorial Tünel Yangını havalandırma programı kapsamında yapılan deneylerde dizel yakıt kullanılmış ve değişik havalandırma sistemlerinin performans testleri yapılmıştır(BEARD, CARVEL 2005). 853 m uzunluğundaki tünelde doğal havalandırma, tam ve yarı dikine havalandırma ve boylamasına havalandırma koşullarında yangın testleri yapılabilmektedir. Bu kapsamda, 98 adet petrol havuzu yangın deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda:

- Boylamasına havalandırma durumunda 10 MW'lık yangın boyuna havalandırma hızını %10 oranında, 100 MW'lık yangın ise %50-60 arasında azalttığı,
- Boylamasına havalandırma hızı çalışan fan sayısına ve itki kuvvetine bağlı olmasına rağmen fan yerleşimine bağlı olmadığı,

- Havalandırma hızı 2.5 ile 3 m/s arasında olması durumunda 100 MW petrol havuz yangınında ters katmanlaşmayı önlediği,
- Dikine havalandırma durumunda tünelden hava çekilmesi sadece tünele temiz hava sağlamasından daha gerekli olduğu ve dikine havalandırmadaki boyuna havalandırma hızı duman kontrolünde en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir.

2001 yılında Japonya'da uzunluğu 1119 m, yüksekliği 8.5 m ve kesit alanı 115 m² olan bir tünelde yangın ve duman kontrol sistemleri özelliklerini tespit etmek ve CFD simülasyonlarının doğruluğunu test etmek amacıyla 10 adet deney yapılmıştır (CARVEL, 2005-APTE, 2006).

Norveç'te 2003 yılında yapılan Runehamar tünel yangın testleri kapsamında ise ağır yük taşıtlarında yangın gelişimi, havalandırmanın yangın gücüne ve gelişimine etkisi, zehirli gaz oluşumu, yangının araçtan araca geçmesi ve tünel tavanında oluşan sıcaklık değerlerini araştırmak amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde tahta, şilte ve plastik kombinasyonları yakıt olarak kullanılmış ve maksimum yangın yükleri 203, 158, 125 ve 70 MW olarak tespit edilmiştir (CARVEL, 2005). Tam ölçekli deneyler hakkında daha ayrıntılı bilgi CARVEL (2005) ve APTE (2006) kaynaklardan elde edilebilir. Tam ölçekli yangınlar sonucunda elde edilen yangın yükü (ısı gücü) değerleri Tablo 1.1'de listelenmiştir.

Tablo 1.1 Değişik Taşıtların Yangın Yükü Değerleri (Carvel ve diğerleri, 2004)

Araç	Test Sayısı	Enerji [GJ]	Maksimum Yangın Yükü [MW]	Maksimum Değere Ulaşma Süresi [dakika]
Otomobil	15	2-8	1.5-8.5	10-38
2 otomobil	7	5-10	5.6-10	13-55
3 otomobil	1	----	8.9	33
Otobüs	2	41 ^{a)}	29-30	7-8
Ağır Yük Aracı	10	10-244	13-202	8-18

Bu çalışmalar sonucunda otomobil yangınlarında taşıtın yangın yükü ile enerjisi arasında bir korelasyon bulunmuştur. Otomobil yangınları için elde edilen korelasyon denklemi Denklem 1.4'de verilmiştir (CARVEL ve diğerleri, 2004).

$$\dot{Q}_{otomobil} = 0.868 \left[\frac{MW}{GJ} \right] Q [GJ] \quad (R = 0.840) \quad (1.4)$$

Ağır yük taşıtları için elde edilen korelasyon denklemi ise Denklem 1.5'te verilmiştir (CARVEL ve diğerleri, 2004).

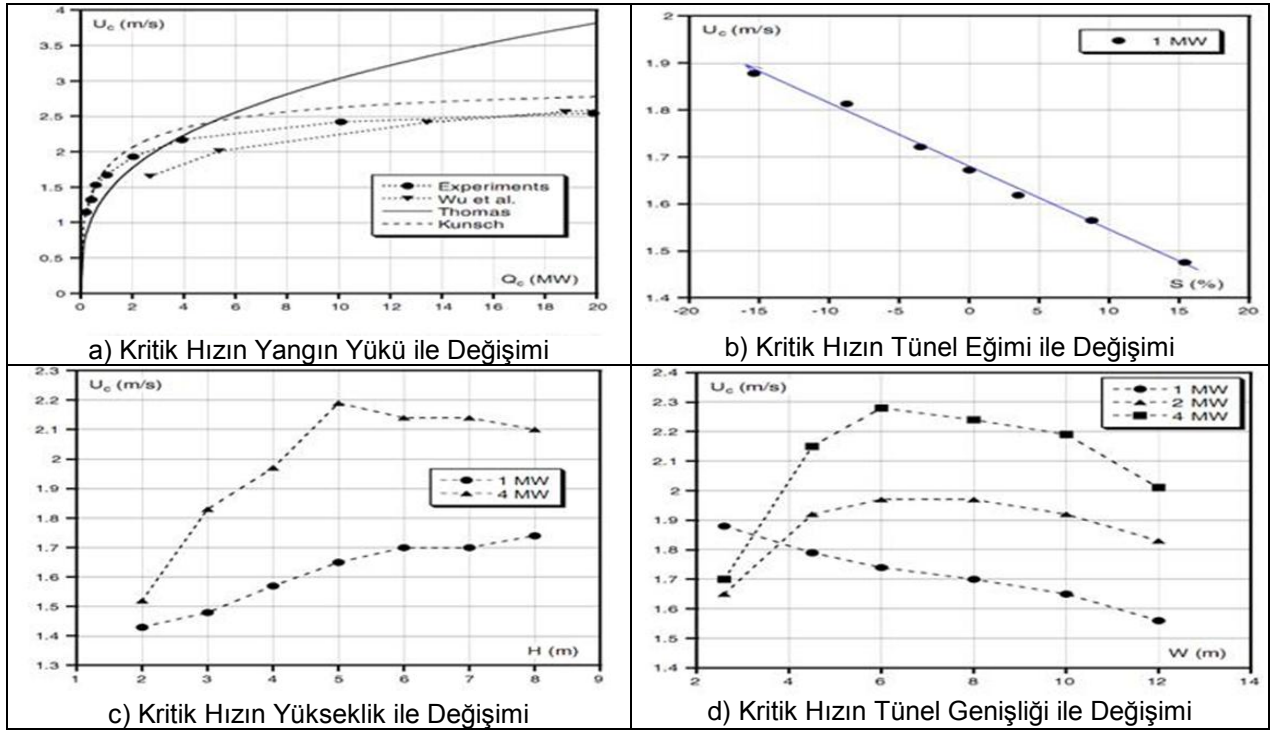
$$\dot{Q}_{HGV} = 0.866 \left[\frac{MW}{GJ} \right] Q [GJ] \quad (R = 0.910) \quad (1.5)$$

Tam ölçekli deneyler sonucunda demiryolu taşıtları için elde edilen maksimum yangın yükü verileri Tablo 1.2'de listelenmiştir. Maksimum yangın yükü ile aracın enerjisi arasındaki oran araçtaki kapı ve pencere açıklığına, malzeme özelliklerine ve tutuşma kaynağına göre 0.17 ile 0.85 arasında değişmektedir.

Tablo 1.2 Demiryolu Taşıtlarının Yangın Yükü Değerleri (Carvel ve diğerleri, 2004)

Araç Türü	Enerji [GJ]	Maksimum Yangın Yükü [MW]	Yangın yükü/ Enerji [MW/GJ]
Birleştirilmiş Tren Vagonu; iki yarım vagon, yarısı alüminyum , yarısı çelik, EUREKA 499	55	43	0.78
German Intercity-Express Tren Vagonu (ICE), EUREKA 499	63	19	0.30
German Intercity Yolcu Treni Vagonu (IC), EUREKA 499	77	13	0.17
British Rail 415, Yolcu Treni Vagonu	-	16	-
British Rail Sprinter, Yolcu Treni Vagonu	-	7	-
German Metro Treni Vagonu, EUREKA 499	41	35	0.85

Tam ölçekli deneylerin yapılabilmesi çok pahalıdır. Bu nedenle, bilim adamları yangın güvenliği olan tünellerde yangın dinamiğini daha iyi anlamak için küçük ölçekli deneyler düzenekleri kurmaktadır. O. Vauquelin (2008) boylamasına ve dikeni havalandırma sistemlerinde duman kontrolünü incelemek amacıyla olarak 1:20 oranında küçülmüş dikdörtgen kesitli bir model tünelde deneysel çalışmalar yapmıştır. Yangından kaynaklı duman, hava ve helyum karışımından elde edilmiş soğuk duman ile simgelenmiştir. Karışımdaki helyum debisi belirli yangın yükünü sembolize etmek için hesaplanmıştır. Deneyler elde edilen sonuçların gerçek boyutlarda kullanabilmesi için Froude sayısı korunmuştur. Model tünelin yüksekliği ve genişliği ayarlanabilmek ve eğimi %-20 ile %.+20 olarak değiştirilebilmektedir. Deneysel olarak tespit edilen kritik hız diğer modellerden hesaplanan kritik hız değerleri boylamasına havalandırma durumunda karşılaştırılmıştır. Daha önce kullanılan kritik hız yaklaşımı ile deneysel sonuçlardan elde edilen değerler arasında bir uyum olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.8a). Buna ek olarak, tünel eğiminin etkisi de araştırılmış ve kritik hız hesaplamalarında eğim doğrulama faktörü kullanılması gerektiği belirtilmiştir (Şekil 1.8b). Araştırmaya göre yalnızca küçük tünel yükseklikleri dışında kritik hız tünel yüksekliğinden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 1.8c). Yeterince büyük yangın yüklerinde tünel genişliği ile kritik hız ters orantılı olduğu tespit edilmiştir(Şekil 1.8d) (VAUQUELIN,2008).



Şekil 1.8 Boylamasına Havalandırmada Elde Edilen Sonuçlar (VAUQUELIN,2008)

Aynı çalışmada değişik emme debilerinde ve çeşitli yangın ısıl güç değerlerinde dikine havalandırma sistemi de araştırılmıştır. Duman atım debisi yangın yüğü ile arttığı fakat duman atım debisinin duman debisinin oranı ile karşılaştırıldığında azaldığı tespit edilmiştir(VAUQUELIN,2008). Araştırmacı ayrıca tam ölçekli geri akım uzunluğunu bazı yangın yüğüleri ve duman atım debisi için vermiş ve geri akım uzunluğunun kontrolü boyuna akımdaki değişimin hassasiyeti nedeniyle çok zor olduğu sonucuna varmıştır.

J. S. Roh, H. S. Ryou ve diğerleri (2007) boyuna havalandırma sırasında, ters katmanlaşmayla değişken yangın yüğüleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Froude sayısı modelleme metoduyla, tünel boyutları 1/20 oranında küçültülerek heptan yangın deneyleri yapılmış ve havalandırma hızının yanma hızına etkisini incelenmiştir. Deneylerde değişik ebatlarda yakıt tankları kullanılmıştır. Deney sonuçları Fire Dynamics Simulator ver.406 programı kullanılarak sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar birbirleriyle karşılaştırıldığında sıcaklık sonuçlarında bazı farklılıklar görülmekle birlikte çoğunlukla uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Yapılan alışma sonucunda tünel yangın güvenliği için kullanılan kritik hız hesaplanırken havalandırma sonucunda değişen ısıl güce göre hesaplanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca havalandırma hızı artıkça yanma için havalandırmanın soğutma etkisinin daha fazla oksijen sağlanması nedeniyle yakıtın yanma hızı arttığı tespit edilmiştir. Havalandırma hızı arttırıldığında soğutma etkisi baskın olmamıştır.

J.S. Roh, S. S. Yang, H. S. Ryou, M. O. Yoon ve Y. T. Jeong (2008) yaptıkları çalışmada Froude sayısı modelleme tekniğini kullanarak boyuna havalandırma hızının yanma hızına nasıl

etkilediğini araştırmışlardır. 1/20 oranında küçültülmüş deney düzeneğinde heptan yakıt olarak kullanmıştır. Model tünel 10 m uzunluğunda ve 0.4 m yüksekliğinde ve yanma bölümü paslanmaz çelikten diğer bölümler 0.1 mm kalınlığında şeffaf akrilikten yapılmıştır. Deneyler sırasında yanma hızı, yakıtın kütle azaltmasından yük hücresi kullanarak tespit edilmiştir. Sıcaklık dağılımı da K tipi ısı çiftler kullanılarak ölçülmüştür. Tünelde boylamasına havalandırma rüzgar tüneliyle sağlanmıştır. Yakıt havuzlarının yüksekliği 2 cm boyutları 4.5, 5.5, 6.5 ve 8.5 cm olarak ayarlanmış ve yangının ısı gücü 3.71'den 15.6 kW arasında değişiklik göstermiştir. Yangında havalandırma hızı arttıkça heptan yanma hızı arttığı tespit edilmiştir. Havalandırma yanma sırasında daha fazla oksijen sağlayarak yanma hızını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, havalandırma hızının artması beklendiği gibi yangın bölgesindeki sıcaklık değerini düşürmüştür. Ancak, yangın gücünü azaltmakta etkili olmadığı tespit edilmiştir. Yangın sonucu oluşan ısı gücün teorik hesaplardan elde edilen yangın gücünün 4.45 ile 11.3 katı arasında değiştiği tespit edilmiştir.

H. Ingason (2007) 1/10 oranında küçültülmüş İşveç'te şehirlerarası taşımacılıkta kullanılan yolcu treninde yangın deneyleri yapmıştır. Vagon yangını sırasında yangın yükünü hesaplamak amacıyla kullanılmak üzere basit bir matematiksel ifade bulmaya çalışmıştır. Yangın ısı gücü, zaman, enerji ve kütle Froude sayısı küçültme tekniği kullanılarak küçültülmüştür. Malzemelerin termal özellikleri ve yangındaki ışınım etkisi modellemede göz ardı edilmiştir. Model yanmayan levhalar, kontrplak ve kartonlar kullanılarak imal edilmiş edilmiştir. Böylelikle, modelin duvarları, tavanı ve tabanı özellikleri farklı malzemeler ile kaplanmıştır. Havalandırma, vagon içindeki kütle miktarı ve içerisindeki yüzey malzeme çeşitleri değiştirilerek çalışma yapılmıştır. Her deneyde bir kapı daima açık tutulmuş; açık durumda olan pencere sayıları değiştirilmiştir. Yangın ısı gücü oksijen tüketim tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan deneyler ve sonuçları Tablo 1.3'te listelenmiştir.

Tablo 1.3 H. Ingason Çalışmasındaki Testler ve Sonuçları (INGASON,2007)

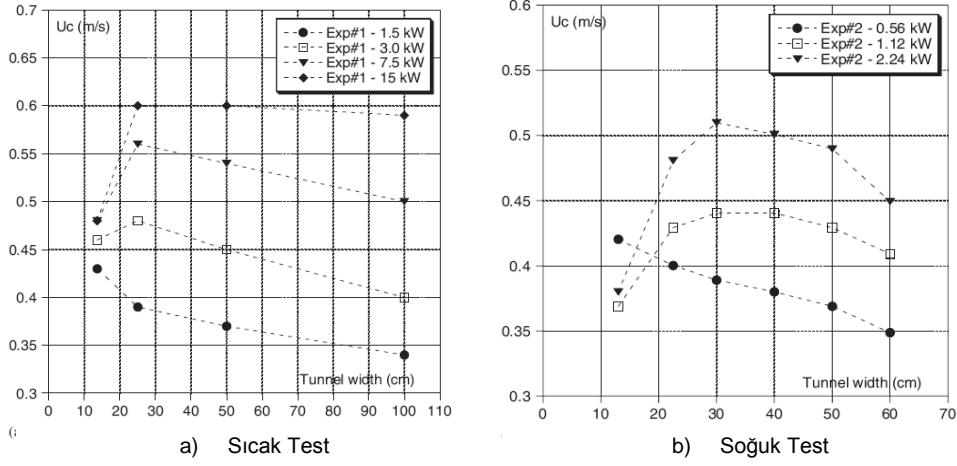
Başlangıç /Bitiş Test Koşulları	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
İç Yüzey malzemeleri	3.5 mm Kontra plak	3.5 mm Kontra plak	6.5 mm kalınlığında iki katlı karton	6.5 mm kalınlığında iki katlı karton	6.5 mm kalınlığında iki katlı karton
Duvar malzemelerin toplam kütlesi (kg)	-	5.3	-	3.44	3.08
Tahta Kafes yapısının toplam kütlesi (kg)	1.12	-	-	0.97	0.91
Otam sıcaklığı (°C)	18	19	17	19	20
Tutuşma sırasındaki pencere durumları	Hepsi Açık	Hepsi Kapalı	Hepsi Açık	Hepsi Açık	Hepsi Kapalı
Pencere açılma sırası (dakika:saniye)		5:17 →4x2 pencere açık 9:12 →5x2 pencere açık			2:06 →4x2 pencere açık 4:35 →5x2 pencere açık

Tablo 1.3 Devamı

Başlangıç /Bitiş Test Koşulları	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5
Deney Sonuçları					
Maksimum Yangın Yüğü (kW)	148	136.5	142.8	147.6	113.2
Maksimum yangın Yüğüne Ulaşma süresi (min)	6.5	11.1	3.8	3.9	6.5
Toplam salınan enerji (kJ)	97828	96735	62359	62081	57451
Toplam Yanan Kütle Miktarı (kg)	9.58	-	4.8	4.2	4.5
Maksimum Tavan Sıcaklığı (°C)	914	921	871	942	962
Maksimum Işınım (kW/m ²)	74.2	71.2	63.4	68.1	63.7

Bu çalışma sonucunda, maksimum yangın yükü tutuşma anında bütün pencerelerin açık olduğu ve değişik tren içi malzemelerin kullanıldığı durumlarda yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir. Taşıt gövdesi ve özelliği, pencere yerleşimi yangın gelişimini etkileyen en önemli parametre olduğu sonucunda varılmıştır (INGASON,2007). Ayrıca, yangın gelişimi yakıt miktarından ve malzeme tipinden etkilenmekle birlikte açık olan pencere sayısı da önemli bir etken olduğu belirlenmiştir. Yüzeylerdeki değişik malzemeler yangının ilk gelişim hızında ve yangın süresinde etkili olmuştur.

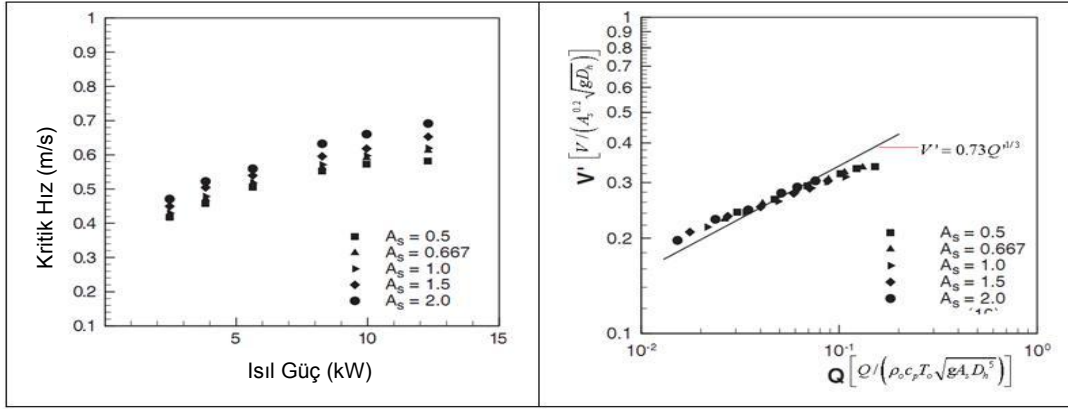
O. Vauquelin ve Y. Wu (2006) tünel genişliğinin ters katmanlaşmayı önleyici minimum hız olan kritik hıza etkisini küçültmüş modellerde test etmişlerdir. İki farklı küçültülmüş model kullanılmıştır. İlk model sıcak test için, ikinci model ise soğuk testler için kullanılmıştır. Sıcak test yapılan düzenekte yangını simüle etmek için propan yakıt olarak kullanılmıştır(1.4-2.8 kW). İkinci düzenekte ise soğuk duman kullanılmıştır (helyum ve hava karışımı). Model tüneller 1/20 oranında küçültülmüş yükseklikleri aynı (250 mm) genişlikleri (136 mm, 250 mm, 500 mm, 1000 mm).değişen bir yol tünelidir. Froude sayısı küçültülerek deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 1.9). Her iki modelden elde edilen sonuçlarda tam bir benzerlik olmadığı belirlenmiştir. İki yaklaşımda da en boy oranı birden büyük olan tünellerde kritik hızın tünel genişliği arttıkça azaldığını, fakat küçük en boy oranına sahip tünellerde ve yeteri kadar büyük yangın yüklerinde ise kritik hızın tünel genişliği arttıkça arttığını tespit edilmiştir.



Şekil 1.9 Çeşitli Yangın Yüklerinde Kritik Hızın Tünel Genişliği ile Değişimi (Vauquelin- Wu (2006))

S. R. Lee ve H. S. Ryou (2006) yaptıkları çalışmada tünelin en boy oranının tünel yangını esnasındaki duman hareketine etkisini nümerik olarak Fire Dynamics Simulator 3.0 yazılımıyla incelemişlerdir. Tünelin en boy oranının değişimiyle yapılan deneylerle bilgisayar ortamında yapılan çalışmaların birbirleriyle uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Temiz bölge yüksekliğinin yapılan analizde deneylerden ölçülen değere göre %3 fazla olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca nümerik analiz sonuçları ters katmanlaşma mesafesinin ve kritik hız değerinin tespitinde de makul sonuçlar vermiştir.

S.R. Lee and H. S. Ryou (2005) yaptıkları deneysel çalışmada tünelin en boy oranının kritik hıza etkisini araştırmışlardır. 1/20 oranında küçültülmüş tünelde Froude sayısı küçültme modeli kullanılmış ve etanol yakıt olarak kullanılmıştır. Dikdörtgen kesitli model tünellerde en boy oranı 0.5, 0.667, 1.0, 1.5 ve 2.0 olarak değiştirilmiştir. Kritik hızın en boy oranı ile değişimi Şekil 1.10'da gösterilmiştir. Araştırma sonucunda kritik hızın en boy oranına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Hidrolik çapı aynı olan tünellerde en boy oranının artması kritik hızda artışa sebep olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, orta büyüklükte yangınlar için boyutsuz bir kritik hız ifadesi hesaplanmıştır. Buna göre boyutsuz kritik hız (V^*) = $0.73 \times$ boyutsuz yangın yükünün küp köküne (Q') eşittir. Şekilde A_s en boy oranı, D_h ise hidrolik çapı ifade etmektedir (Şekil 1.10). Yangın büyümesi ve gelişimi de en boy oranı ile değiştiği araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir.



Şekil 1.10 S.R. Lee ve H. S. Ryou Çalışmasındaki Deney Sonuçları (LEE, RYOU,2005)

J.S. Choi, M.B. Kim and D.H. Choi (2005) dikine havalandırma durumunda yangın büyüklüğü ve yerine, sistemden emilen ve sisteme verilen hava debilerine bağlı olan duman yayılım özelliklerini değerlendirmek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Deneyler Memorial yangın deneyleri için kullanılan tünelin 1/20 küçültülmüş modelidir. Yangın yeri tünelin ortasında (simetrik durum) ve sağında (asimetrik durum) olmak üzere iki durum incelenmiştir. Heptanın yakıt olarak kullanıldığı ve Froude sayısı modelleme metodu kullanılarak deneyler yapılmıştır. Her iki yangın yeri için duman yayılım mesafesi, değişik yangın büyüklükleri için tünel uzunluğu başına atılan hava debisine, tünel tabanından sistem verilen hava debisinin olduğu ve olmadığı durumlar için tespit edilmiştir. Duman yayılım mesafesi yangın büyüklüğü arttıkça arttığı, sistemden emilen hava debisi arttıkça azaldığı tespit edilmiştir. Asimetrik durumda duman yayılım mesafesi simetrik duruma göre daha kısa olduğu belirlenmiştir. Önemli sonuçlardan biri de sisteme verilen hava debisi sistemden çekilen debiden küçük olması durumunda duman yayılım mesafesini sisteme verilen hava debisinden etkilenmediği tespit edilmiştir. Bu durumun tersi olduğu bir durumda; yani sistemden emilen debi değeri sisteme verilen debi değerinden küçük olması durumunda duman yayılım mesafesini sisteme verilen debiden olumsuz etkilemektedir.

B. H. Chiam (2005) yaptığı master tezinde metro treni içinde oluşan bir yangın sırasında yangın gelişiminin ve alev yayılımının nasıl olduğunu tespit etmek amacıyla Fire Dynamics Simulator (FDS) programı kullanarak sayısal analizler yapmıştır. Tünel acil durum havalandırma tasarımında kullanılması için metro treni yandığında hangi ısı güce ulaştığı tespit etmek amacıyla trenin koltuğunda (kundaklama sonucunda), tren köşesinde (kundaklama veya elektrik arızası sonucunda) ve trenin alt bölgesinde (elektrik arızası sonucunda) yangın çıktığı varsayımıyla değişik yangın senaryoları tünel etkisi ve havalandırma koşulları da dikkate alınarak yapılmıştır. Havalandırmanın olduğu durumda alev yayılımını tetiklediği tespit edilmiştir. Yangın gücü istasyonda yanan bir tren için 5 MW, tünelde yanan bir tren içinse 10 MW olduğu analizler sonucunda tespit edilmiştir.

R.O. Carvel, A.N. Beard, P.W. Jowitt and D.D. Drysdale (2004) tünel geometrisinin ve havalandırmanın yangın yükünü nasıl etkilediği araştırmışlardır. Literatürde yer alan araç, sıvı yakıt ve tahta kümeleri yangınlarında ısı gücü değerleri açık ortamdaki yanma sonucunda oluşan ısı gücü

değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yangınlarda tünel içindeki ısıl gücün açık alandaki yangından elde edilen ısıl güce oranı gelişme katsayısı olarak tanımlanmıştır. Belirli bir noktaya kadar gelişme katsayısının arttığı ve bundan sonra yangın boyutlarına bağlı olarak havalandırma kontrollü yangında gelişme katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. Gelişme katsayısının artış yönünde eğilim göstermesinin nedeni yakıt kontrollü yanmada ısının geri ışınımının baskın olması olarak açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda tünel genişliğinin yangın yükünün gelişimini etkileyen başlıca parametre olduğu tespit edilmiştir. Yapılan araç, sıvı yakıt ve tahta kümeleri yangınları sonucunda tünel genişliği arttıkça daha düşük yangın yükü değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Tüneldeki havalandırma koşulları yangın yükünün gelişimine tünel geometrisinden daha fazla katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. Tünel yangını durumunda hidrolik çap, tünel genişliği ve yüksekliği, blokaj oranı gibi geometrik faktörlerin etkisini "Bayesian yöntemi" kullanılarak belirlenmiştir. Tünel yangınındaki yangın yükü başlıca tünel genişliğinden etkilendiği gösterilmiştir. Denklem 1.1'de belirtilen ilişki bulunmuştur.

$$\text{Yangın Yükü Gelişme Katsayısı} = 24 \left[\frac{\text{Yakıtın Genişliği}}{\text{Tünelin Genişliği}} \right]^3 + 1 \quad \text{Denklem 1.1}$$

Bu ilişki dikdörtgen kesitli tünellerde doğal havalandırma durumunda otomobil, tahta kafes yapısı, kerosin ve heptan havuz yangınları için uygundur. Yangın yükünün cebri havalandırma hızı ile de arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, mekanik havalandırma ve doğal havalandırma durumunda orta - büyük yakıt havuzları ve ağır yük taşıtları için yangın gücü oranları verilmiştir. Yangın yükü tüneldeki havalandırmadan tünel geometrisine göre daha çok etkilenmektedir.

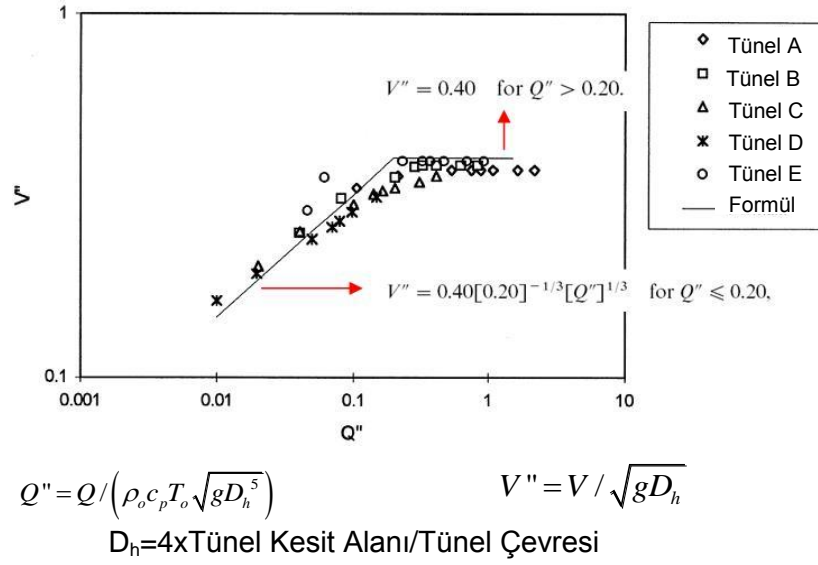
J. P. Kunsch (2002) kritik hızı hesaplayan bir denklem geliştirmiştir. Geliştirilen model yangın deneylerin elde edilen sonuçlarla karşılaştırılıp doğrulanmıştır. Bu denklem değişik havalandırma hızları ve gerçek tünel yangınlarındaki yangın yükleri için kullanılabileceği belirtilmiştir.

R. O. Carvel, A. N. Beard, P. W. Jowitt ve. D. Drysdale (2001) cebri boylamasına havalandırmanın tünel yangınında ısıl güce etkisini araştırmışlardır. Otomobil, tahta kafes ve ağır yük taşıtlarının yangını sonucunda elde edilen verilen bayesian istatistik metodu kullanılarak incelenmiştir. Araştırma sonuçları Tablo 1.4 'te verilmiştir. Buna göre, havalandırma ağır yük taşıtı yangınında yangın yükünü 10 kata kadar arttırdığı fakat araç yangınında çok fazla etkili olmadığı sonucuna varılmıştır.

Tablo 1.4 Öngörülen Yangın Yükü Gelişimi (CARVEL, BEARD ve diğerleri 2001)

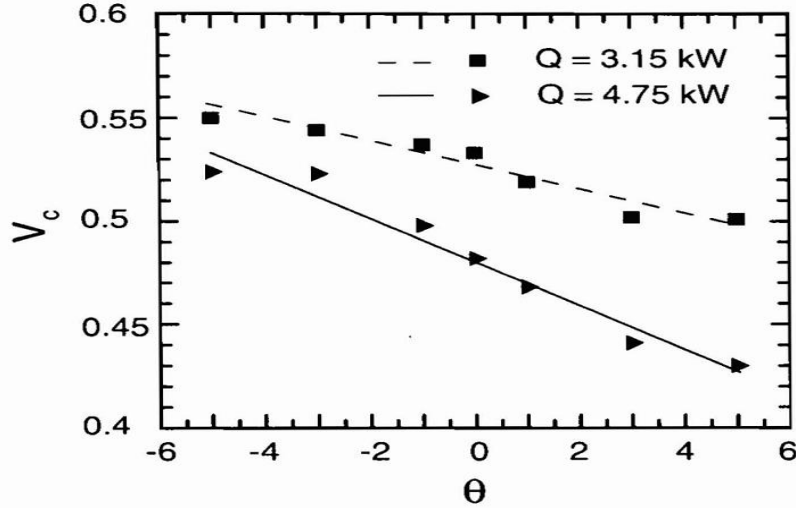
Yangın Tipi	Yangın Evreleri	Havalandırma Hızı	Yangın Büyüklüğü Artışı
Ağır Yük Taşıtı	Büyüme	3 m/s	5 kat
	Büyüme	10 m/s	10 kat
	Tam Gelişme	3 m/s	4 kat
	Tam Gelişme	10 m/s	10 kat
Otomobil Yangını	----	1.5 m/s	Önemli bir etkisi yok

Y. Wu ve M. Z. A. Bakar (2000) yangın gücü ve tünel geometrisinin kritik hız etkisini yükseklikleri aynı fakat kesit alanları farklı beş tane model tünel üzerinde yapılan deneylerle araştırmışlardır. Yakıt olarak propan kullanılmış ve 1.4 -2.8 kW (tam ölçekli durumda 2.5-50 MW) büyüklüğünde yangınlar çıkarılmıştır. Deney sonuçlarına göre, küçük ısı güçlerinde kritik hız ısı gücün 1/3'üncü kuvvetiyle değişirken, büyük ısı güçlerinde kritik hız ısı gücünden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Şekil 1.11'de boyutsuz kritik hızın boyutsuz ısı gücüyle değişimi ile elde edilen formül göstermişlerdir. Bunun ötesinde tünel içerisindeki akış davranışlarını incelemek için yapılan CFD analizi sonuçları göstermiştir ki CFD simülasyonları hız profilleri için kabul edilebilir sonuçlar verirken yangın bölgesi sıcaklık tahminlerinde başarısız olmuştur.



Şekil 1.11 Boyutsuz Kritik Hız ve Yangın Yüğü (WU, BAKAR, 2000)

H. Xue, T. C. Chew, K. L. Kay ve Y. M. Cheng (2000) [18] 1:20 oranında küçültülmüş bir tünelde deneyler yapmışlardır. Test odası, dikdörtgen kesitli 6 m uzunluğunda, 0.3 m yüksekliğinde ve 0.9 m genişliğinde olup; yakıt olarak sıvılaştırılmış petrol gazı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, iki farklı yangın yükü (3.15 kW ile 4.75 kW) için dört farklı havalandırma hızında (0.13, 0.31, 0.52 ve 0.61 m/s) araştırma yapılmıştır. Tünel eğimi -5° den $+5^{\circ}$ e kadar ayarlanabilmektedir. Deney sonucunda tünel içindeki duman ve ısı hareketi havalandırma hızından ve tünel eğiminden büyük ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Kritik hızın tünel eğimi ile nasıl değiştiği Şekil 1.12'de gösterilmiştir.

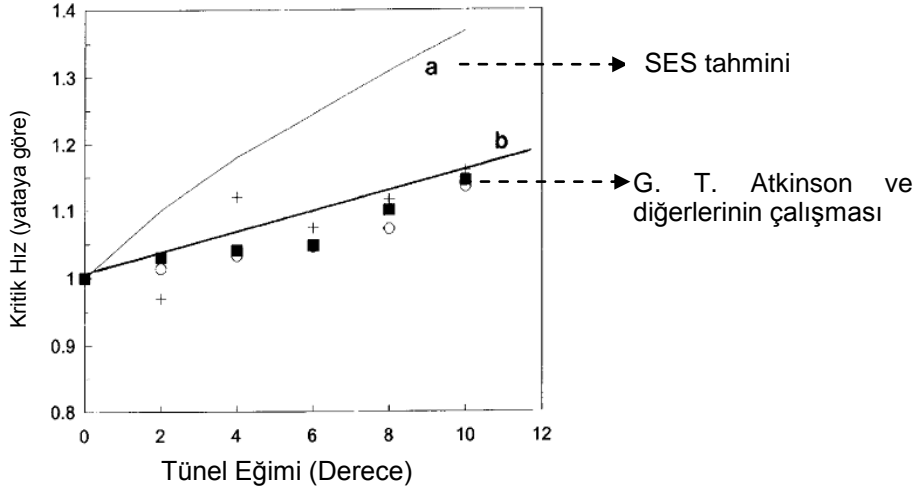


Şekil 1.12 Değişik Tünel Eğiminde Kritik Hız (XUE, CHEW, KAY, CHENG ,2000)

O. Megret ve O. Vauquelin (2000) tünel içinde heptan yangını çıkararak yangının fiziksel karakteristiğini belirleyen yarı ampirik bir model geliştirmişlerdir. Yanıcı madde olarak heptan kullanması ve yanıcı ortamda tek bir madde olması dolayısıyla yangın büyüklüğünün yanıcı maddenin yüzey alanıyla orantılı olarak hesaplanabilmesi avantajı sağlamıştır. Amaçları, verilen heptan yangın çapı için açığa çıkan ısı gücü, duman debisini ve duman sıcaklığını hesaplamak için bir model geliştirmektir. Yaptıkları analiz sonuçlarına dayanarak, geniş kapsamlı yangın büyüklükleri için korelasyon geliştirmişlerdir.

W. D. Kennedy, J. A. Gonzalez ve J. G. Sanchez (1997) Subway Environment Simulation programında kritik hızın hesaplaması için kullanılan denklemin nasıl türetildiğini açıklamışlardır. Metro yangınlarında kritik hız hesabında tünel kesit alanından tren alanının çıkarılması sonucu oluşan eksiltilmiş kesit alanının ve yakıt yayılması sonucu oluşan yangınlarda ise tünel kesit alanının hesaplamalarda kullanılması gerektiği belirtilmiştir.

G. T. Atkinson ve Y. Wu (1996), kritik hız ile tünel eğiminin nasıl bir etkileşim halinde olduğunu tespit etmek amacıyla eğimi 0°'den 10° 'e kadar değişebilen model tünelde deneyler yapmışlardır. Araştırmacılar kritik hızla tünel eğiminin ilişkisini gösteren bir denklem elde etmişlerdir. Bu çalışmaya göre, eğim aşağı havalandırma durumunda hesaplanan kritik hız değeri, düz (eğim olmayan) tünel için hesaplanan kritik hız değerinin (1+0.014 x Derece cinsinde Tünel Eğimi) katı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13 Kritik Hız Hesabında Tünel Eğim Düzeltme Faktörlerinin Karşılaştırılması (ATKINSON-WU,1996)

Y. Oka ve G.T. Atkinson (1995) boylamasına havalandırma sırasında ters katmanlaşmanın engellenebilmesi için kullanılmak üzere bir formül geliştirmişlerdir. Bu çalışmada Froude sayısı modelleme tekniği kullanılmıştır. Kritik hız düşük yangın yükleri için yangın yükünün küp kökü ile değiştiği, yüksek yangın yükleri için ise kritik hız yangın yükünden bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre, yangının tünel genişliğinin büyük bir kısmını kapladığında kritik hızın azaldığı ve yangın tünel tavanına yaklaştırıldığında ise arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, aynı çalışmada katı blokajının yangın yüküne etkisi de araştırılmıştır ve yangın yakınındaki katının blokajı kritik hızın azalmasına neden olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Y. Oka ve G. T. Atkinson (2000) tünel yangınlarında kullanılan kritik hız denklemini basitleştirip daha geniş kapsamlı durumlar için kullanılabilir hale getirmişlerdir. Froude sayısı modelleme metoduyla model tünel üzerinde yaptıkları ölçümlerin gerçek boyuttaki tüneller için kritik durumların incelenmesinde yeterli bir yol olduğunu belirtilmiş ve eğer yangın tünel genişliğinin büyük bir bölümünü kaplıyorsa kritik hızın düşeceği sonucuna varmışlardır.

A. Lönnermark (2005) Lund üniversitesinde yaptığı doktora çalışmasında, 2003 yılında Norveç'in Runehamar tüneline yapılan tam boyutlu deneylere katılmış ve buradan elde ettiği sonuçları kullanarak tünel yangınları konusunda önemli sonuçlar elde etmiştir. Sonuçlara göre tünel yangını sırasında çıkan sıcaklık değerleri ve yangın yüklerinin, çoğunlukla tasarım standartlarında belirtilen değerlerden yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Ağır yük taşıtları ve arabalar için araçlardan elde edilen maksimum yangın yükü ile enerji içeriği arasında yakın bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

R. O. Carvel (2004) yaptığı doktora çalışmasında yangın büyüklüğünün boyuna havalandırma ve tünel geometrisi ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu tespit etmeye çalışmıştır. Araştırmasında Bayes teoremi olarak adlandırılan olasılık metodunu kullanmıştır. Araştırma sonucunda ağır yük taşıtlarının yangın yükü, boylamasına havalandırmadan büyük ölçüde etkilendiği belirlenmiştir. Büyük sıvı yakıt tanklarının kullanıldığı yangınlarda havalandırma hızı arttıkça yangın yükünün arttığı, fakat küçük sıvı

tanklarının ve araba yangınlarında ise yangın yükünün havalandırma hızı ile azaldığı tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, Yangın yükünün tünel geometrisi ile nasıl bir ilişkide olduğunu tespit eden bir denklem türetilmiştir. Bu denklem sonucunda yangın yükünün temel olarak tünel genişliğine ve yanan obje genişliğine bağlı olarak değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. Tünel geometrisi nedeniyle yangın yükünün dört kata kadar artabileceği sonucuna varılmıştır.

Hu, L.H., Huo, R., Peng, W. , Chow, W.K., Yang, R.X. (2006) yaptıkları çalışmada tünel yangınında tavan kısmında oluşacak maksimum duman sıcaklığının tespiti için nümerik ve deneysel yöntemler kullanmışlardır. Deneysel, boylamasına havalandırmanın olduğu ve olmadığı iki durumda bir yol tünelinde gerçekleştirilmiştir. Belirli noktalardaki duman sıcaklığı değişik tünel havalandırma hızlarında ölçülmüştür. Bilgisayar modellemesi için Fire Dynamics Simulator 3.10 programı kullanılmış olup, bilgisayar ortamındaki sonuçların doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu çalışma sırasında bilgisayar ortamındaki sonuçlarla deneyden elde edilen sonuçların büyük bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak raporun bu kısmında şimdiye kadar yapılan deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Bunun yanında nümerik çalışmalarda yapılmıştır. E. Musluoğlu 2009 yılında tamamladığı doktora tezinde demiryolu trenlerinde yangın gelişimini ve alev yayılmasını Fire Dynamics Simulator programı kullanarak araştırmıştır. Simüle edilen yangın durumları için maksimum yangın yükü öngörülmüştür. Bundan öncesinde Orta Doğu teknik Üniversitesi'nde istasyon ve tünel yangınları durumu nümerik olarak simüle edilen çalışmalar da yapılmıştır (MUSLUOĞLU,2003-KAYILI, 2005).

1.5 Projenin Amacı ve Yöntemi

Tüneller, güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için, yangın güvenlik sistemleri ile donatılır. Bu nedenle, yangın güvenlik sistemlerinin yeterli bir şekilde tasarlanması için yangın sonucu oluşan hava hızlarının, sıcaklıklarının ve duman konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Bu amaçla, küçük ölçekli tünel modelleri kullanılarak bu olgunun çözümlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili yeterli bilgi bulunmamaktadır. Tünelleri güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için bu projenin amacı tünel acil durum havalandırma sistemi tasarımı için kullanılan temel parametre olan araç yangın yükünün araç kesit alanının tünel kesit alanına bölünmesiyle bulunan blokaj oranı ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu tespit etmektir.

Bu araştırma deneysel bir araştırma projesidir. Küçük ölçekli bir tünel modeli Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısı gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde model araçlar tabanları kare olacak şekilde tahta kafes teorisine göre oluşturulmuştur. Sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan varyans analizi methodu ile incelenmiş ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tünel içindeki hava hızının değişimi yangın yüküne çok fazla etkili olmadığı fakat model taşıtın kesit alanı ile yangın yükü doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

2. TÜNEL YANGIN KÜÇÜLTME MODELİ

Tam boyutlu deneylerin yapılması hem zahmetli hem de çok maliyetlidir. Bu nedenle, bilim adamları fiziksel olayları araştırırken boyutsuz parametreleri koruyarak küçük ölçekli deneyler yapmaktadırlar. Böylelikle, problemin detayları daha az maliyetle yapılan çalışmalarla anlaşılabilirliği sağlanmaktadır. Fiziksel olayların küçültülmüş modellerde incelenmesi amacıyla kullanılan gerekli boyutsuz pi (π) terimlerinin türetilmesi için üç farklı metot bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, incelenen olaydaki değişkenler içindeki bağımsız boyutsuz parametre sayılarının elde edilmesi için kullanılan Buckingham Pi Teoremi'dir. İkinci metot ise temel kısmi diferansiyel denklemin boyutsuz parametreler cinsinden ifade edilmesi ve gerekli olan pi (π) terimleri seçilmesidir. Son metot ise problemin fiziki ifade eden basit denklemler türetilmesi ve daha sonra bu denklemlerin boyutsuz parametreler cinsinde ifade edilerek gerekli görülen pi (π) terimleri seçilmesidir.

Raporun bu bölümde yangınlarda kullanılması gereken küçültme modelinden bahsedilecektir. Bu bölümde boyutsuz parametrelerin nasıl türetildiğine değinilmeyip sadece hangileri olduğu belirtilecektir. Pi terimlerinin nasıl türetildiği konusunda ayrıntılı bilgi, Quintiere,2006 ve Veloo,2006 numaralı kaynaklardan elde edilebilir.

2.1 Yangın Modellemelerinde Kullanılan Boyutsuz Fiziksel Parametreler

J. G. Quintiere'nin John Wiley & Sons Ltd tarafından yayınlanan Fundamentals of Fire Phenomena (Quintiere ,2006) ". adlı kitabın 12. bölümünde yangın çalışmaları yapılırken gerekli olan boyutsuz parametrelerin nasıl elde edildiğini detaylı bir biçimde anlatmış ve bu parametreleri liste halinde sunmuştur. Tablo 2.1'de yangın çıkan alanın yüksekliği karakteristik boyut olarak alındığında kısmi diferansiyel denklemlerin boyutsuz şekilde ifade edilmesi için kullanılan parametreler ve elde edilen pi (π) terimleri listelenmiştir.

Tablo 3.1 Yangın Modellemesi için Kullanılan Boyutsuz Parametreler (Quentiere, Veloo, 2006)

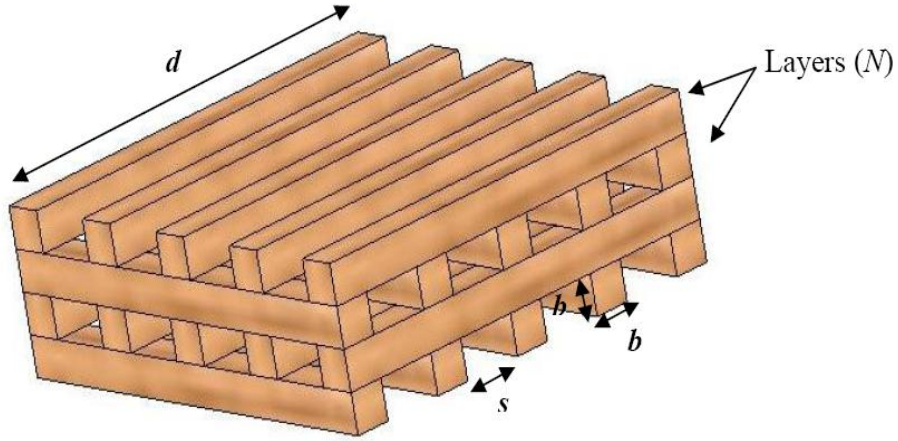
Değişkenler	Boyutsuz	Açıklama
Hız, u	$\hat{u} = \frac{u}{\sqrt{gl}}$	$u \sim l^{1/2}$
Sıcaklık, T	$\hat{T} = \frac{T}{T_\infty}$	$T \sim l^0$
Basınç, p	$\hat{p} = \frac{p}{\rho_\infty gl}$	$p \sim l$
Kütle oranı = Oluşan tür kütlelerini yanan yakıt kütlelerine oranı, y_i	$\frac{y_i}{y_{i\infty}}$	$y_i \sim l^0$
Koordinatlar x,y,z	$\frac{x_i}{l}$	$x_i \sim l$
Zaman, t	$\hat{t} = \frac{t}{\sqrt{l/g}}$	$t \sim l^{1/2}$
Pi Terimleri		
Π_1	$\frac{\mu}{\rho_\infty ul} = \frac{1}{Re}$	
Π_2	$\frac{\dot{Q}_{fire}}{\rho_\infty c_p T_\infty g^{1/2} l^{5/2}}$	Yanmada önemli $\dot{Q} \sim l^{5/2}$
Π_3	$\frac{(k\rho C)_w^{1/2}}{\rho_\infty C_p g^{1/4} l^{3/4}}$	İletimde önemli $(k\rho C)_w \sim l^{3/4}$
Π_4	$\left(\frac{\rho C}{k}\right)_w^{1/2} \left(\frac{g}{l}\right)^{1/4} \delta_w$	Duvar kalınlıkları $\delta_w / \alpha_w^{1/2} \sim l^{1/4}$
Π_5	$\frac{h_c}{\rho_\infty C_p (gl)^{1/2}}$	Taşıyım önemli ise $h_c \sim l^{1/2}$
Π_6	$\frac{\sigma T_\infty^3}{\rho_\infty C_p g^{1/2} l^{1/2}}$	Diğerleri ile uyumlu değil $T_\infty \sim l^{1/6}$
Π_7	κL_e	Işınım ile ısı transferinin siyah kütle ışınımına oranı
Π_8	$\frac{\Delta h_c}{y_i C_p T_\infty}$	Yanma sonucu oluşan gaz türevini kimyasal enerjisinin entalpisine oranı

Kapalı alan yangınlarında korunması gereken parametreler Tablo 2.1'de sunulan boyutsuz parametrelerin fonksiyonudur (Velloo,2006).

$$\left\{ \frac{T}{T_{\infty}}, \frac{T_w}{T_{\infty}}, \frac{u}{(gl)^{1/2}}, y_i \right\} \approx \text{function} \left\{ \frac{x_i}{l}, \frac{t}{\left(\frac{l}{g}\right)^{1/2}}, \pi_{1-8} \right\} \quad 2.1$$

2.2 Literatürdeki Küçültülmüş Modellerde Yapılan Testlerin Sonuçları

P. S. Velloo (2006) yaptığı master tezinde, kapalı alan yangınları sırasında taşınım ve ışınlama ısı transferindeki ısı akısının (heat flux) küçültülmüş modellerde korunabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada değişik ölçeklerde tasarlanmış modeller içinde sıralı tahta bloklar yakılarak boyutsuz parametrelerin korunup korunmadığını iki farklı boyutta küçültülmüş deneylerde test etmiştir. Sıralı tahta teorisi detaylı bir biçimde anlatılmış yapılan deneylerde boyutsuz parametrelerin korunduğu gösterilmiştir. Bu çalışmada, tahta kafes yapısı yangın yükü olarak kullanılmıştır(Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Yangın Yükü Olarak Kullanılan Tahta Kafes Yapısı (Velloo,2006)

Tam ölçekli deneylerin yapıldığı kompartmanın genişliği ve uzunluğu 3.76 m, yüksekliği ise 2.54 m'dir. Ayrıca geometrik olarak 1/8, 1/4 ve 3/4 oranlarında küçültülmüş 3 kompartmanda da deneyler yapılmıştır. Deneyde kullanılan kompartmanların boyutları Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2 Kompartman Boyutları (VELOO,2006)

Oran	Boyutlar (m) (WxLxH)
1/8	0.47 x 0.47 x 0.32
1/4	0.94 x 0.94 x 0.635
3/8	1.41 x 1.41 x 0.95
1/1	3.76 x 3.76 x 2.54

Yapılan çalışma, daha önce J.A. Perricone (2005) 'nun yaptığı çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırılarak tahta kafes yapısı yangınlarının tekrarlanabilirlik özelliği olduğu gösterilmiştir. J.A. Perricone yaptığı çalışmada tahta kafes yapısı yangınında zamana bağımlı küçültme yapılabileceğini göstermiştir.

Tablo 2.1'de belirtilen bütün pi terimlerin korunması mümkün değildir. Taşınımla ısı transferi miktarının küçültülmüş deneylerde korunabilmesi için taşınım ısı transferi katsayısının ve ışınım ısı transferinin boyutlandırılması gerekmektedir. Çelişen parametreler olduğu durumda boyutlandırma teoremi gereği araştırmada ilgili pi terimler korunmuş diğerleri dikkate alınmamıştır. Bu nedenle, π_3 ve π_4 terimleri korunmuş π_5 , π_6 ve π_7 terimleri gözden çıkarılmıştır.

Tablo 2.3 π Terimleri Boyutlandırma Sonuçları (Veloo,2006)

Parametre/Pi terimi	Boyutsuz Hali	Parametre/Pi terimi	Boyutsuz Hali
T Sıcaklık	$T \sim l^0$	π_4 Duvar kalınlığı	$\frac{\delta_w}{\alpha_w^{1/2}} \sim l^{1/4}$
π_1 Reynolds Sayısı	Tamamen korunamıyor.	π_5 Taşınım	$\dot{q}_c'' \sim l^{1/5}$ $\dot{q}_c'' \sim l^{1/2}$
π_2 Yangının Isıl Gücü (Yangın Yüğü)	$\dot{Q} \sim l^{5/2}$	π_6 Işınım	$\dot{q}_r'' \sim l^0$ $\dot{q}_r'' \sim l^{1/2}$ $\dot{q}_r'' \sim l^1$
π_3 Taşınım	$(k\rho c)_w \sim l^{3/2}$ $\dot{q}_k'' \sim l^{1/2}$	π_7 Yanma Türleri	$y_i \sim l^0$

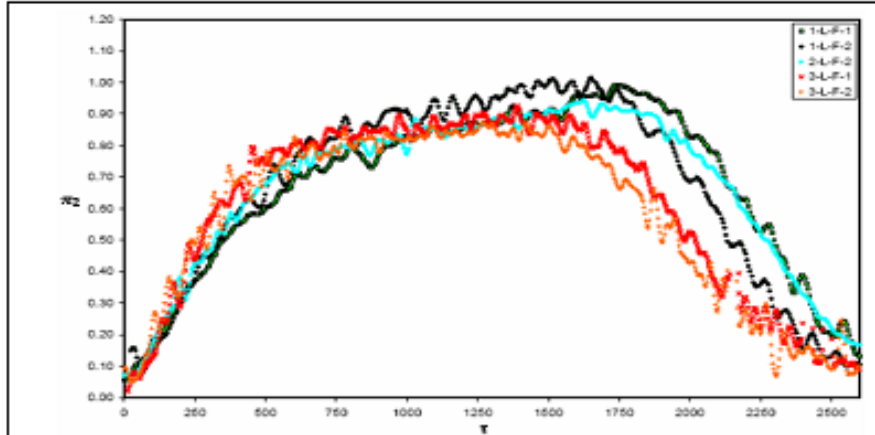
Yangının sönme evresinden önce elde edilen korelasyon denklemleri (Veloo,2006) :

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gl)^{1/2}} = \begin{cases} 2.03 \times 10^{-3} & \frac{\Delta T}{T_\infty} < 2 \\ 16 \times 10^{-3} \frac{\Delta T}{T_\infty} & \frac{\Delta T}{T_\infty} \geq 2 \end{cases} \quad 2.2$$

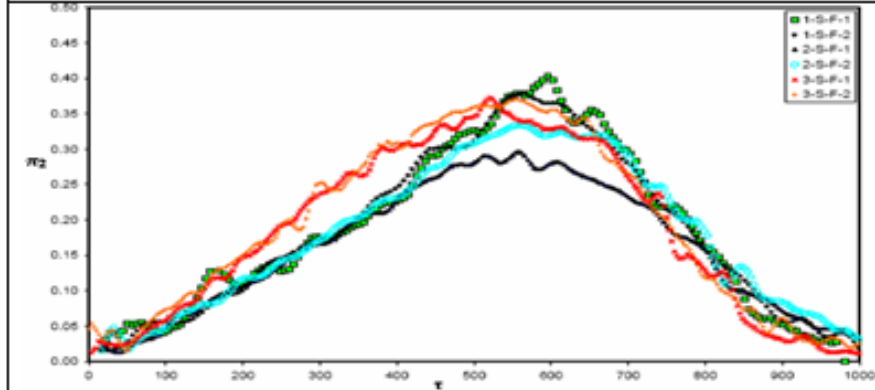
ve sönme evresinden sonra :

$$\frac{h_c}{\rho_\infty c_p (gl)^{1/2}} = 9.87 \times 10^{-3} \frac{\Delta T}{T_\infty} \quad 2.3$$

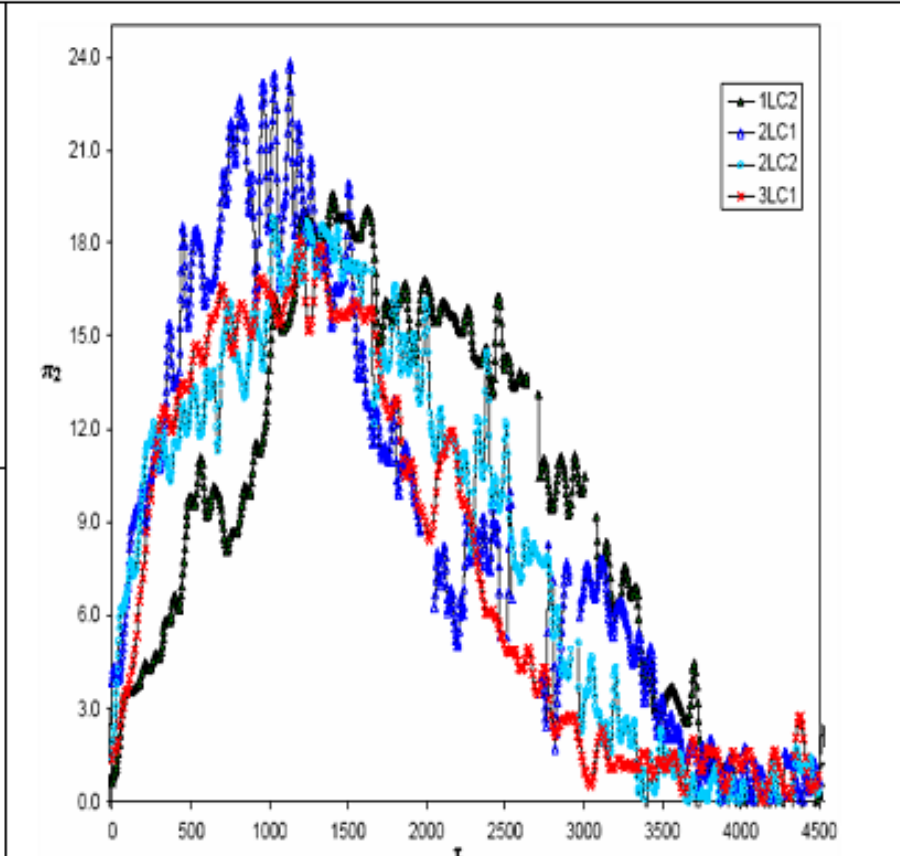
Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 2.2'den başlayıp Şekil 2.10 'a kadar verilmiştir. Şekiller incelendiğinde bütün dikkate alınan parametrelerin korunduğu görülmüştür.



Boyutsuz Serbest Yanma Hızı Sonuçları – Büyük Tahta Kafes Yapısı

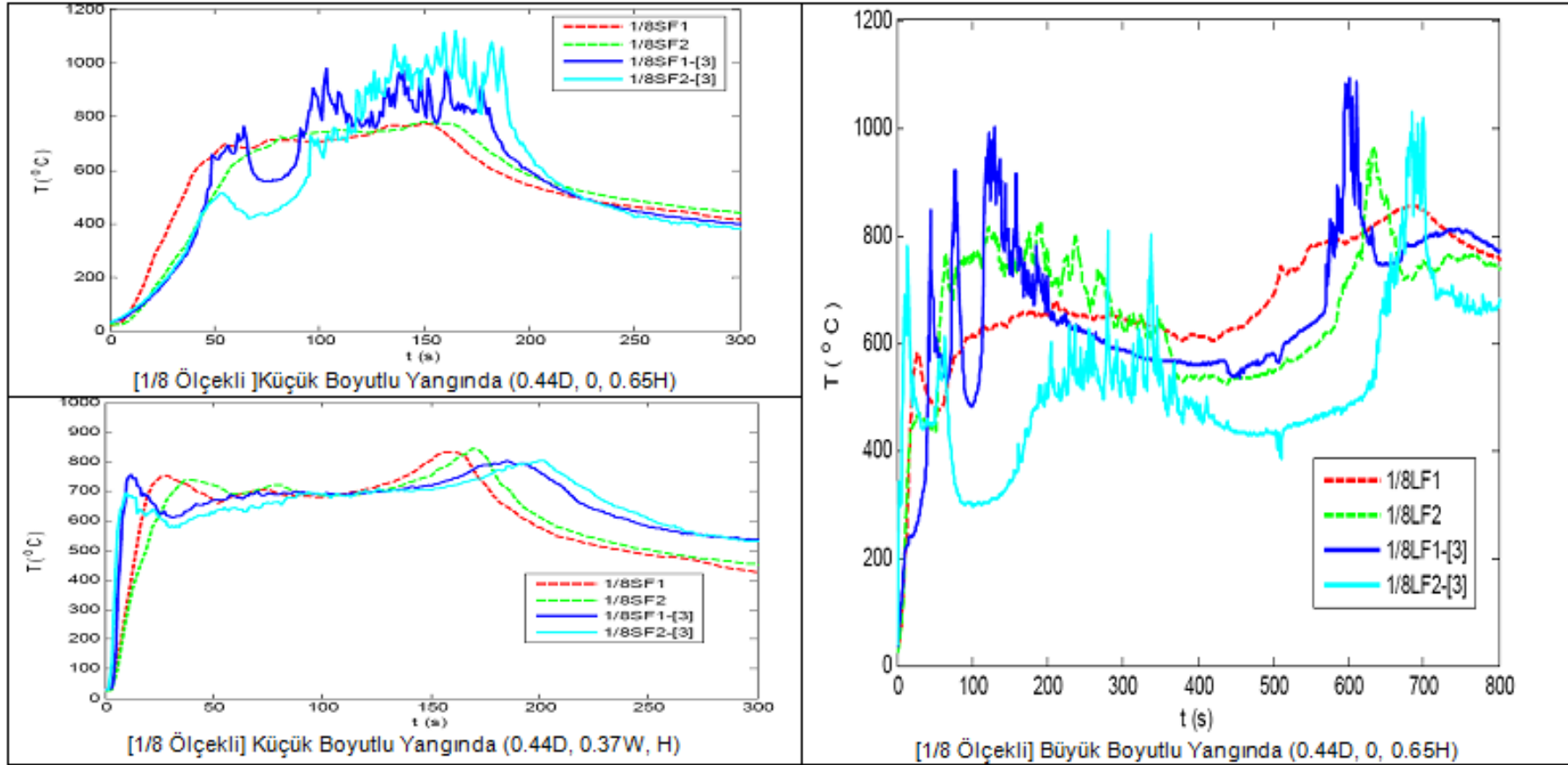


Boyutsuz Serbest Yanma Hızı Sonuçları - Küçük Tahta Kafes Yapısı

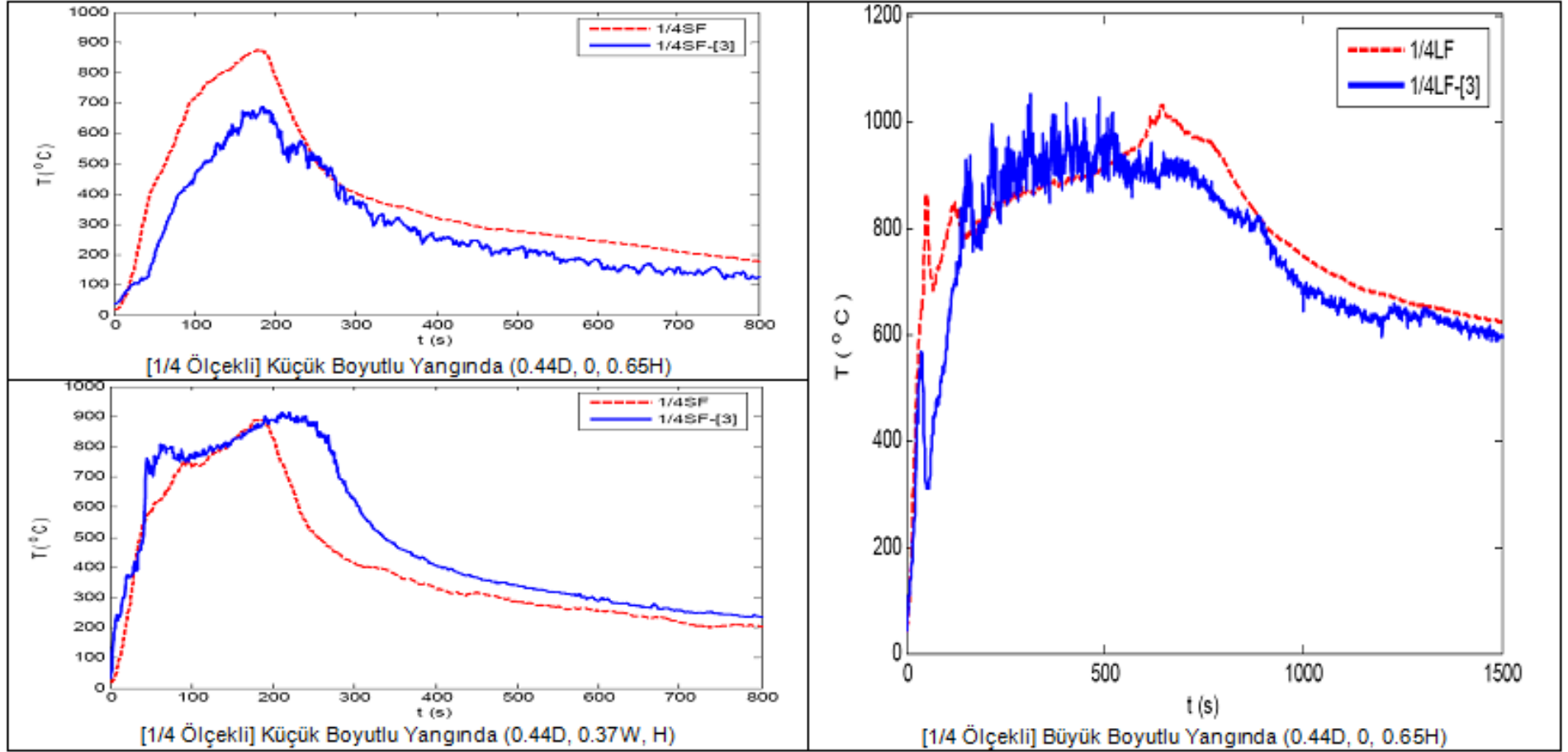


Boyutsuz Kompartman İçi Yanma Hızı Sonuçları - Büyük Tahta Kafes Yapısı

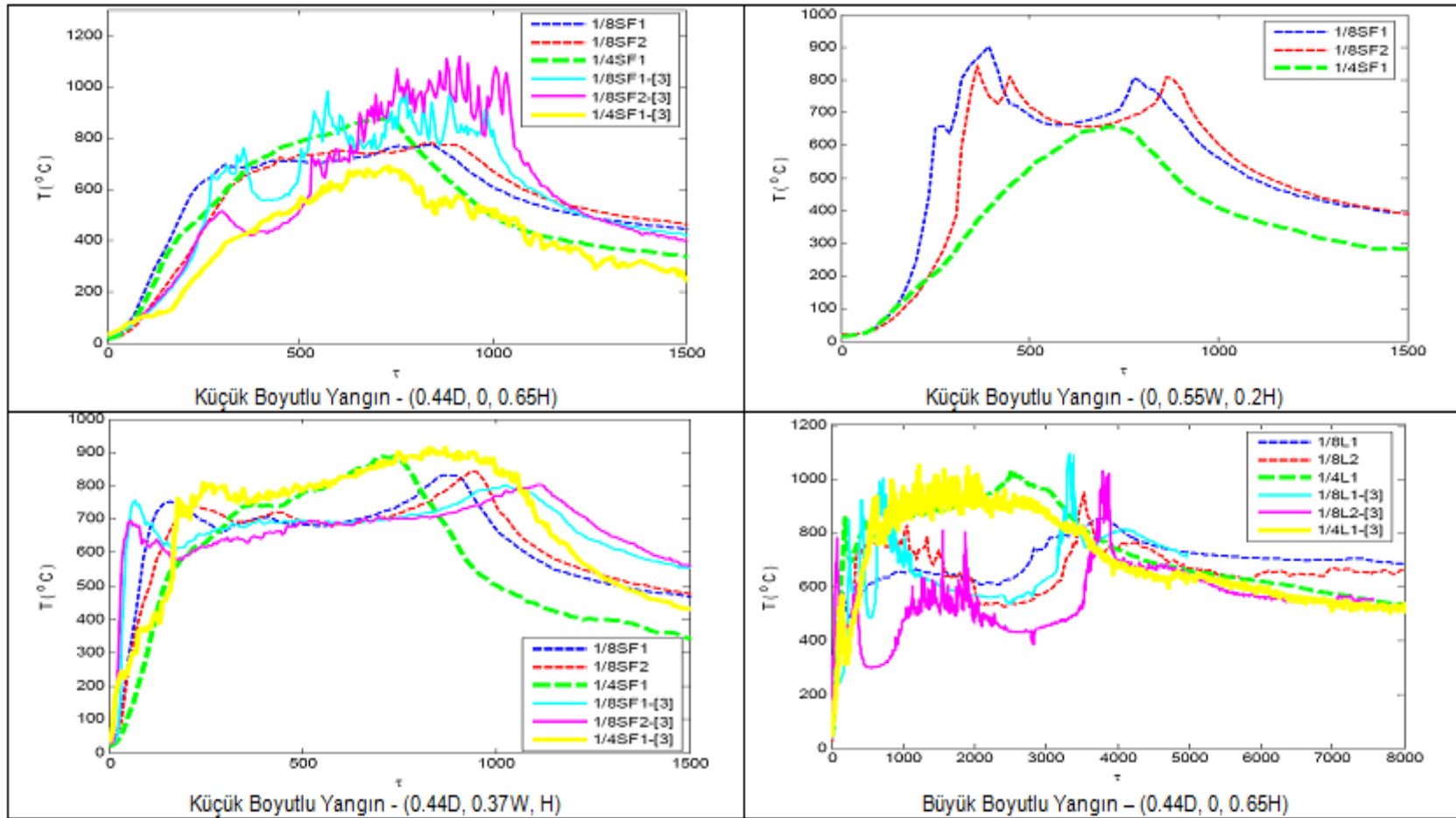
Şekil 2.2 Tahta Kafes Yapıları için Boyutlandırılmış Yanma Hızı (Veloo,2006)



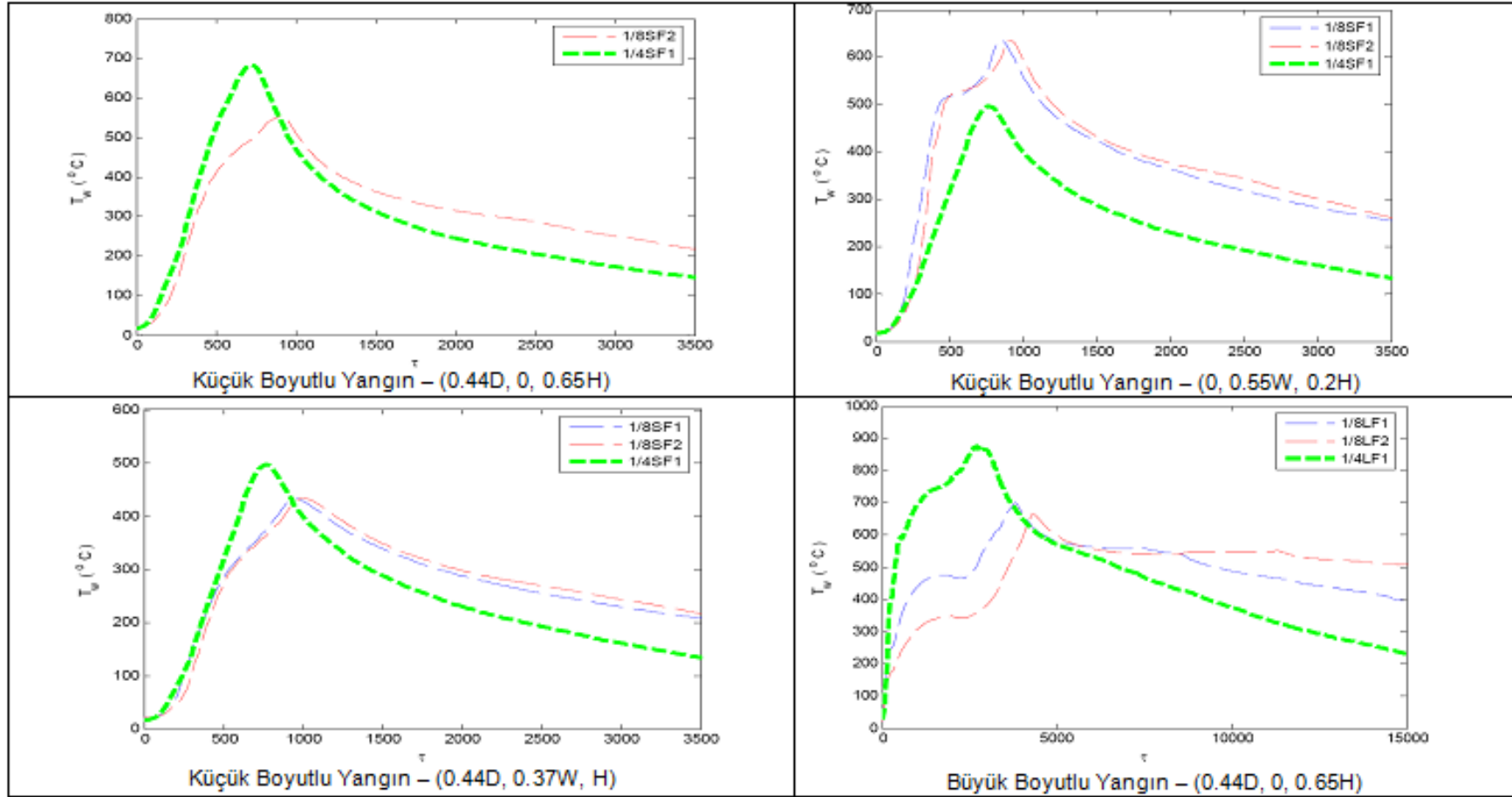
Şekil 2.3 1/8 Ölçekli Deneyslerde Değişik Noktalardaki Gaz Sıcaklıkları (VELOO,2006)



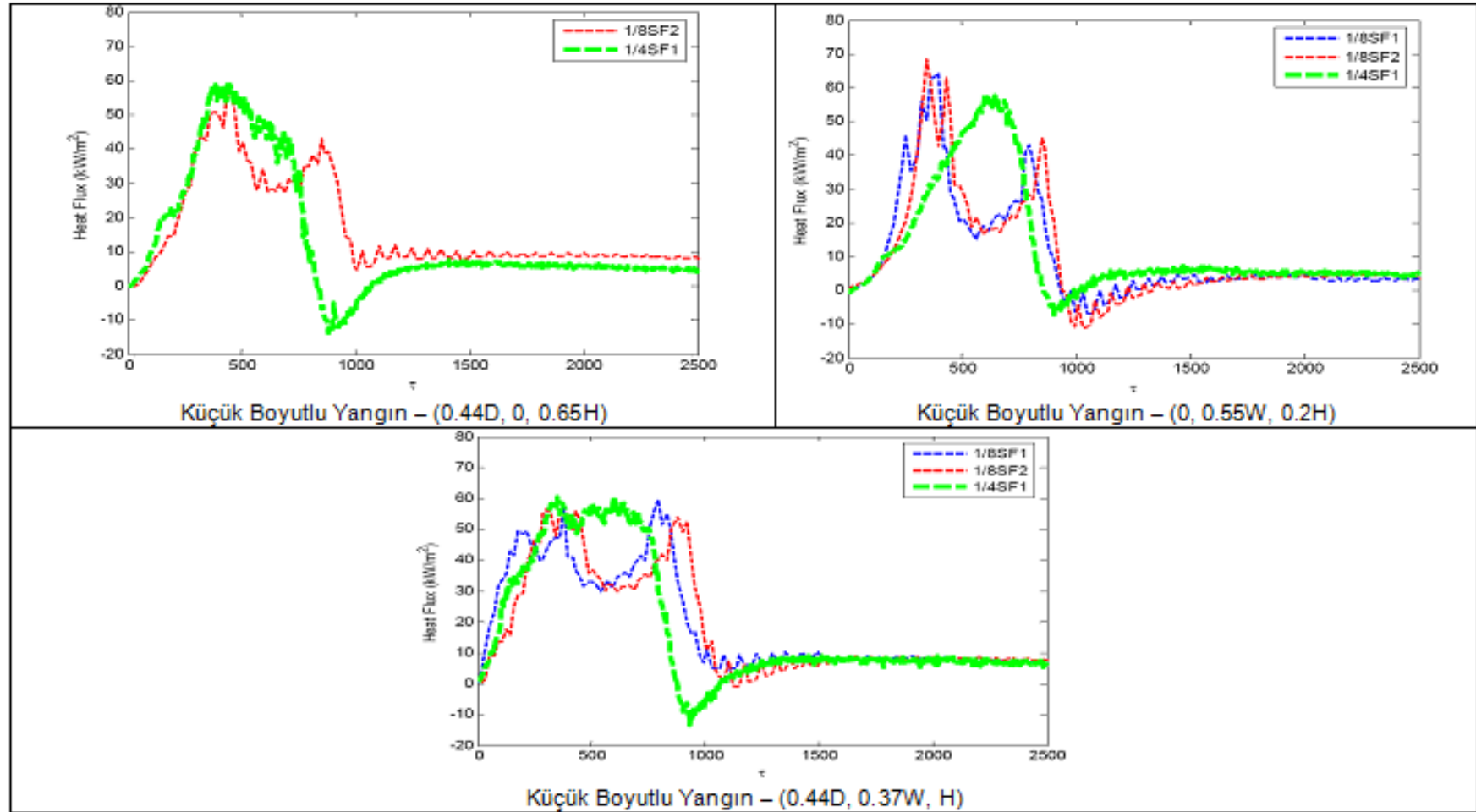
Şekil 2.4 ¼ Ölçekli Deneylerde Değişik Noktalardaki Gaz Sıcaklıkları (VELOO,2006)



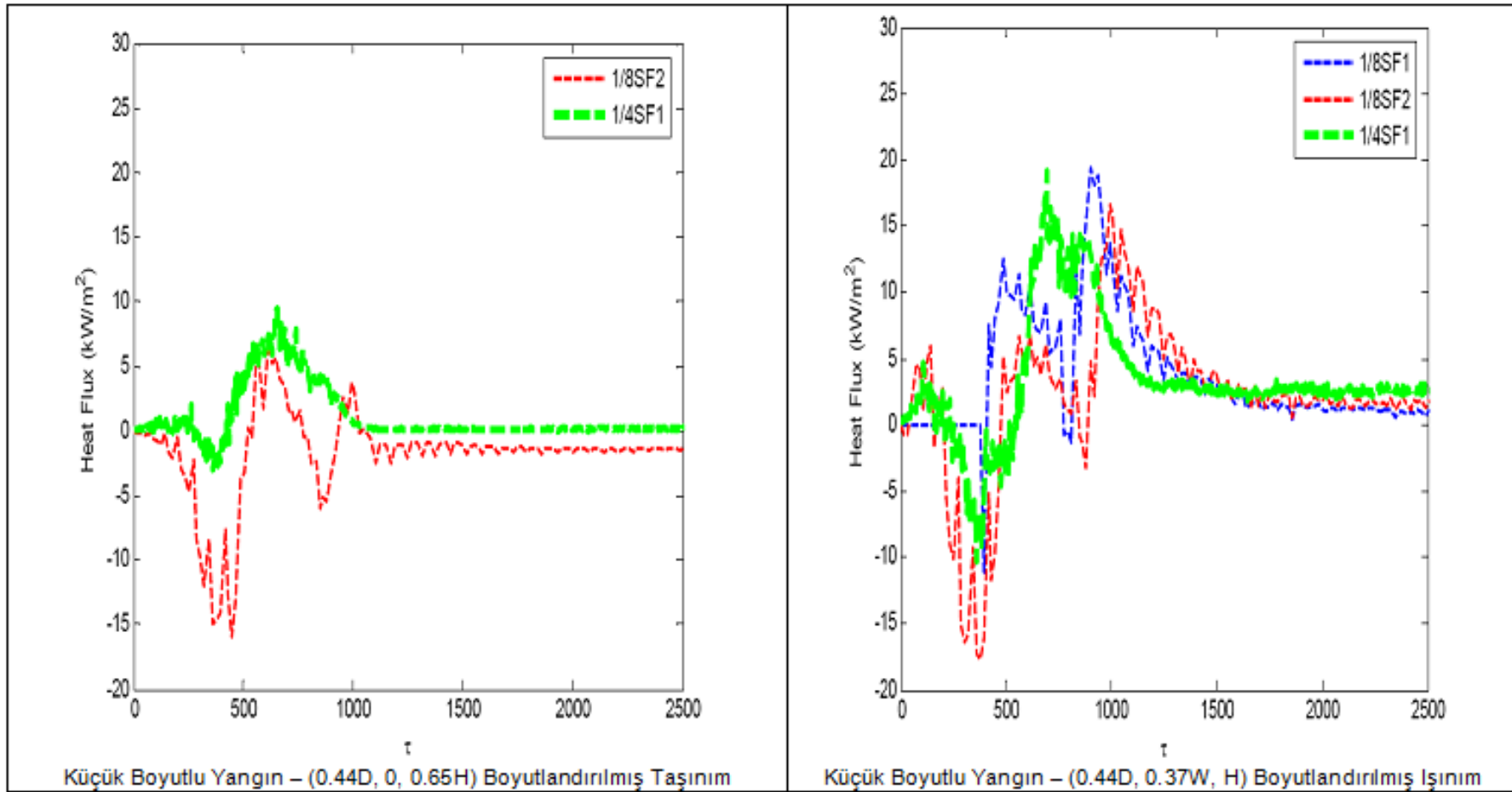
Şekil 2.5 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış (Scaled) Gaz Sıcaklıkları(VELOO,2006)



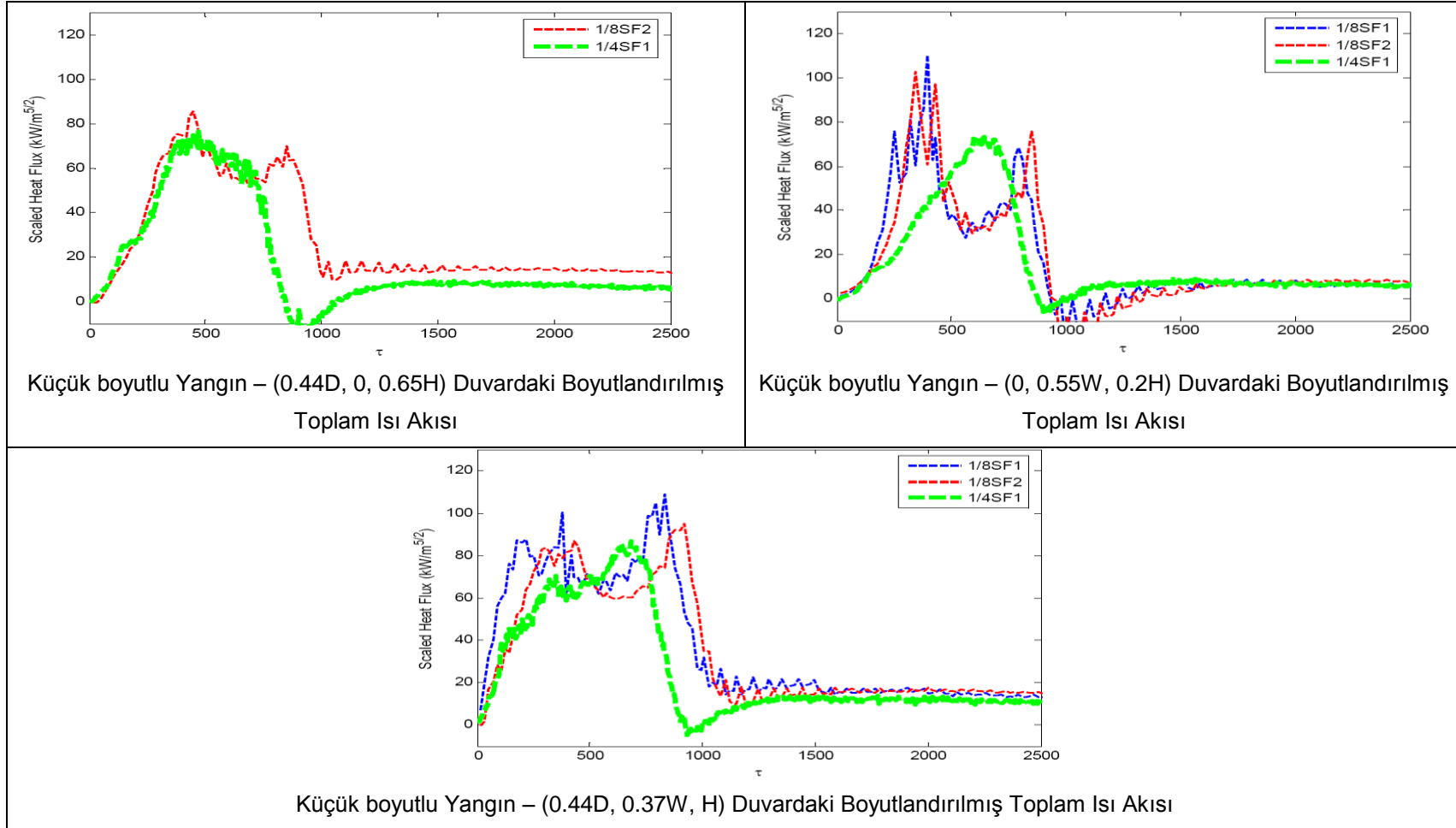
Şekil 2.6 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış (Scaled) Duvar Sıcaklıkları(VELOO,2006)



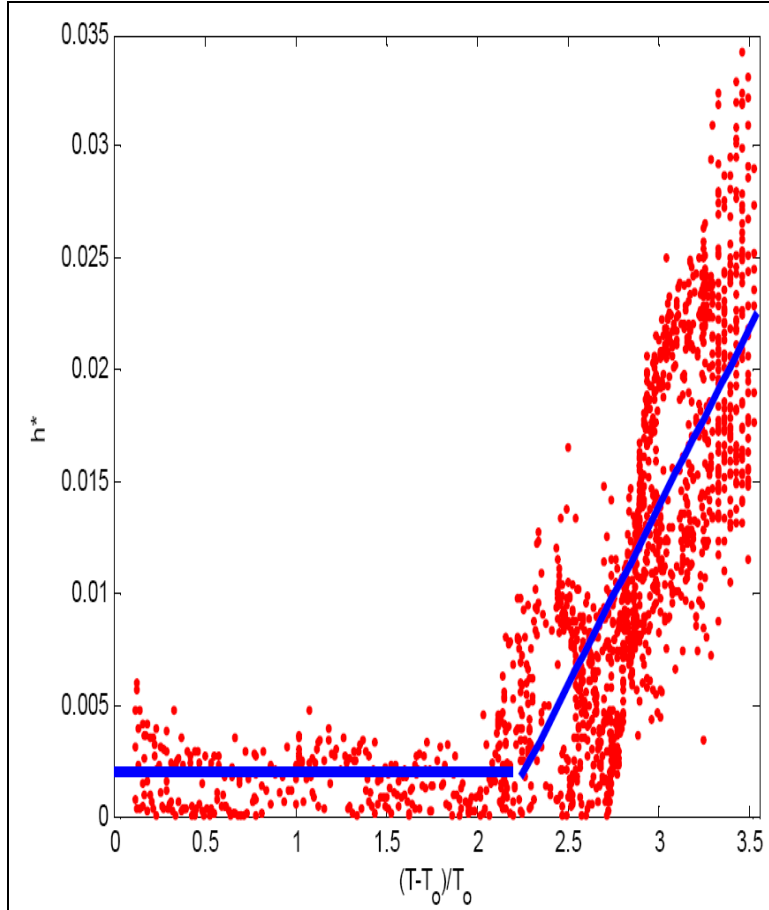
Şekil 2.7 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış Yangınlardaki Duvardaki Işınımı Isı Akısı (VELOO,2006)



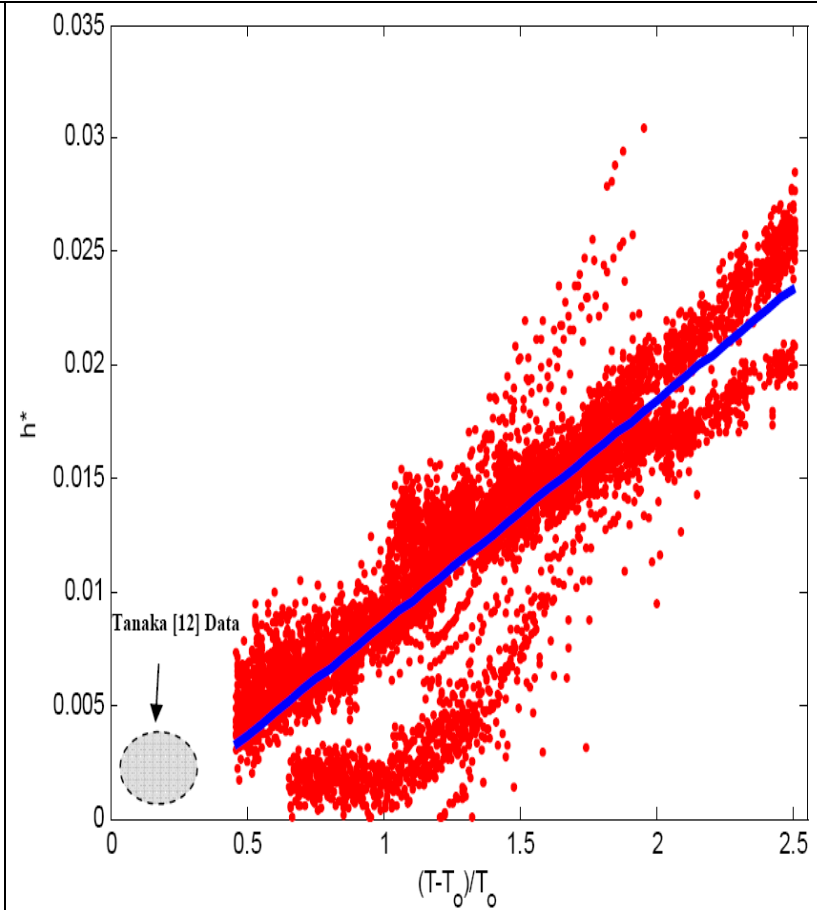
Şekil 2.8 Değişik Noktalardaki Boyutlandırılmış Yangınlardaki Duvardaki Taşınım ve Işınımı Isı Akıları (VELOO.2006)



Şekil 2.9 Küçük Boyutlu Yangınlar için Boyutlandırılmış Taşınım Akısı Sonuçları(VELOO,2006)



Sıcaklık Artışı ile Boyutsuz Taşınım Isı Transfer Katsayısı İlişkisi
– Sönme Evresinden Önce



Sıcaklık Artışı ile Boyutsuz Taşınım Isı Transfer Katsayısı İlişkisi
– Sönme Evresinden Sonra

Şekil 2.10 Sıcaklık Artışı ile Boyutsuz Taşınım Isı Transfer Katsayısı İlişkisi (VELOO,2006)

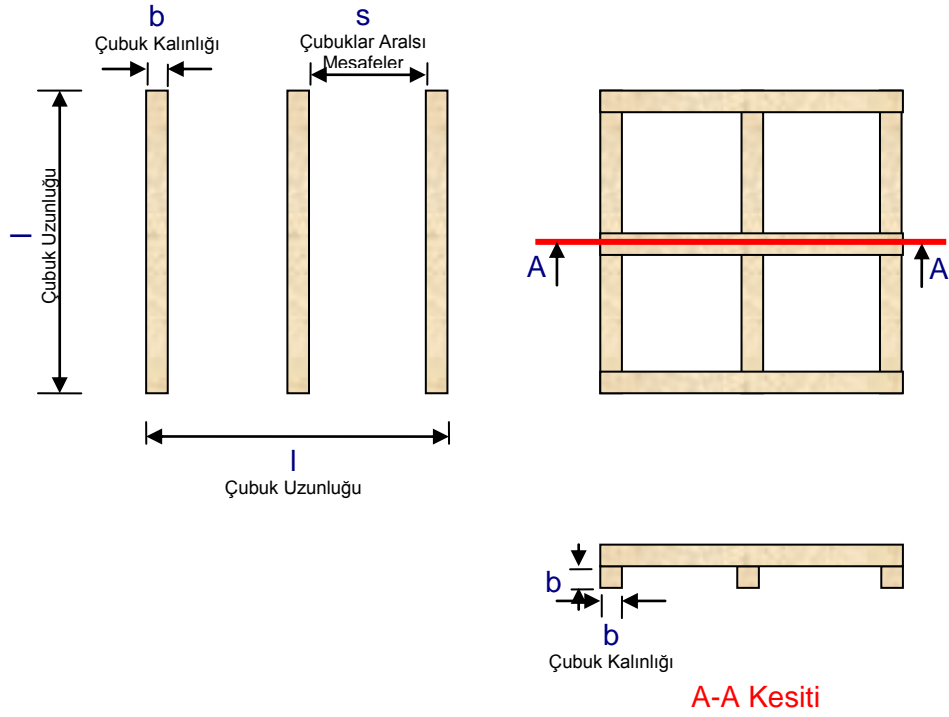
2.3 Tahta Kafes Teorisinin Kullanılması

Bu çalışmada tahta yakılmıştır. Model araçlar tahtadan yapılmıştır. Bu seçimin yapılmasında birçok sebep vardır. Bunlar:

1. Araçlar çok çeşitli malzemelerden imal edilmektedir. Bu nedenle malzemelerin özelliklerinin farklı olması nedeniyle bütün malzemelerin küçülterek kullanılabilmesi mümkün görünmemektedir. Bu çalışmada deneylerde kullanılacak modeller tek bir malzemedan imal edilmiştir.
2. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle bilinen yangın yükleri küçültülerek model tünellerde deneyler yapılmıştır. Ancak, literatürde küçültülmüş modellerde yapılan araç yangın yükünü tespit etmek için yapılan deneysel çalışmalar çok azdır.
3. Araçların geometrik yapıları (pencere, kapı boyutları) farklılık göstermektedir. Aynı geometrik yapıyı sağlamak küçültülmüş modellerde zordur. Bu nedenle model aracın imal edilmesinde kolay olan bir yapının seçilmesi uygun görülmüştür.
4. Tahta kolay bulunan bir malzemedir. Tahta kafes yapısının daha önceki çalışmalarda kullanılması ve yanma rejiminin nasıl olduğu bilinmektedir. Eğer tahta kafes yapısında gözeneklilik faktörü 0.5 den büyük ise yanma hızı kendi yapısına göre normalize edilgi durumda sabit olduğu tespit edilmiştir.
5. Tahta kafes yapısının tekrarlanabilirliği, ve kapalı alan yangınlarında küçültme parametrelerinin sağlandığını gösteren çalışmaların yapılması tahta kafes yapısının şekilmesinde etkili olmuştur.
6. Tam ölçekli deneylerde tahta kafes yapısı kullanılmıştır. Araçtaki toplam enerjisi tahata kafes yapısındaki tahta miktarı ayarlanarak simüle eden deneymiştir.

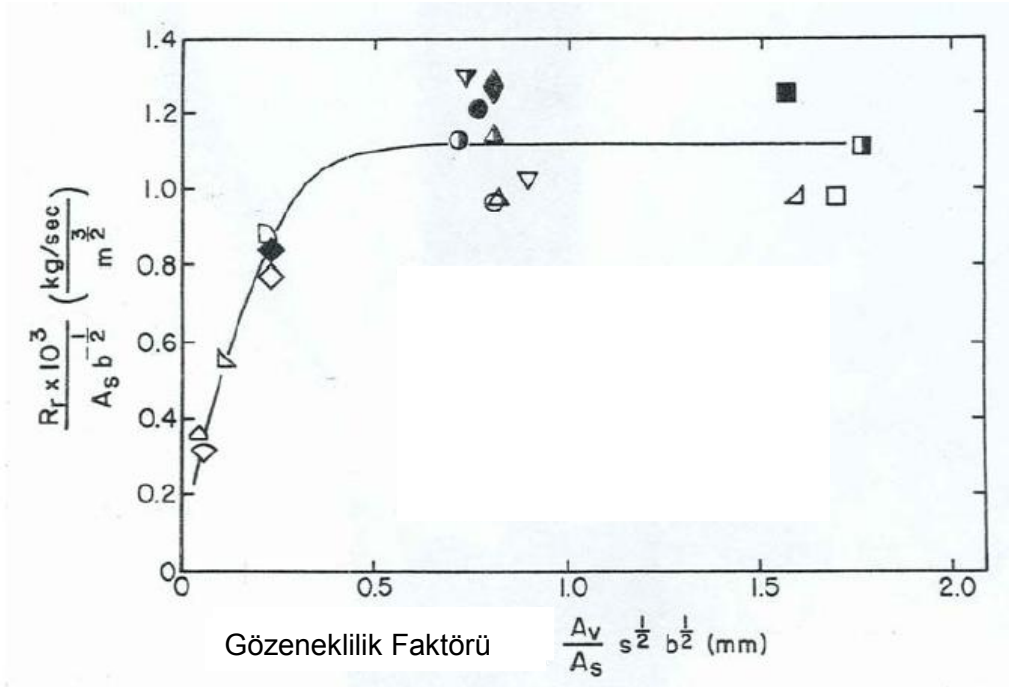
2.3.1 Tahta Kafes Yapısı

Tahta kafes yapısının tabanı karedir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi tahta çubukların dizilmesi ile oluşturulur. Burada önemli olan her katmandaki tahta sayısının (n) eşit olmasıdır.



Şekil 2.11 Tahta Kafes Yapısı

Tahta kafes yapısının yanma hızı Şekil 2.12 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Tahta Kafes Yapısındaki Yanma Hızı (VELOO,2006)

Şekil 2.12 toplam yüzey alanı A_s ile tahta kafes yapısında dik baca alanı A_v , gözeneklilik faktörü P ile gösterilmiştir. Belirtilen parametreler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$A_s = 4blNn \left(1 - \frac{b}{2l} \left(n - 1 - \frac{n}{N} \right) \right) \quad 2.40$$

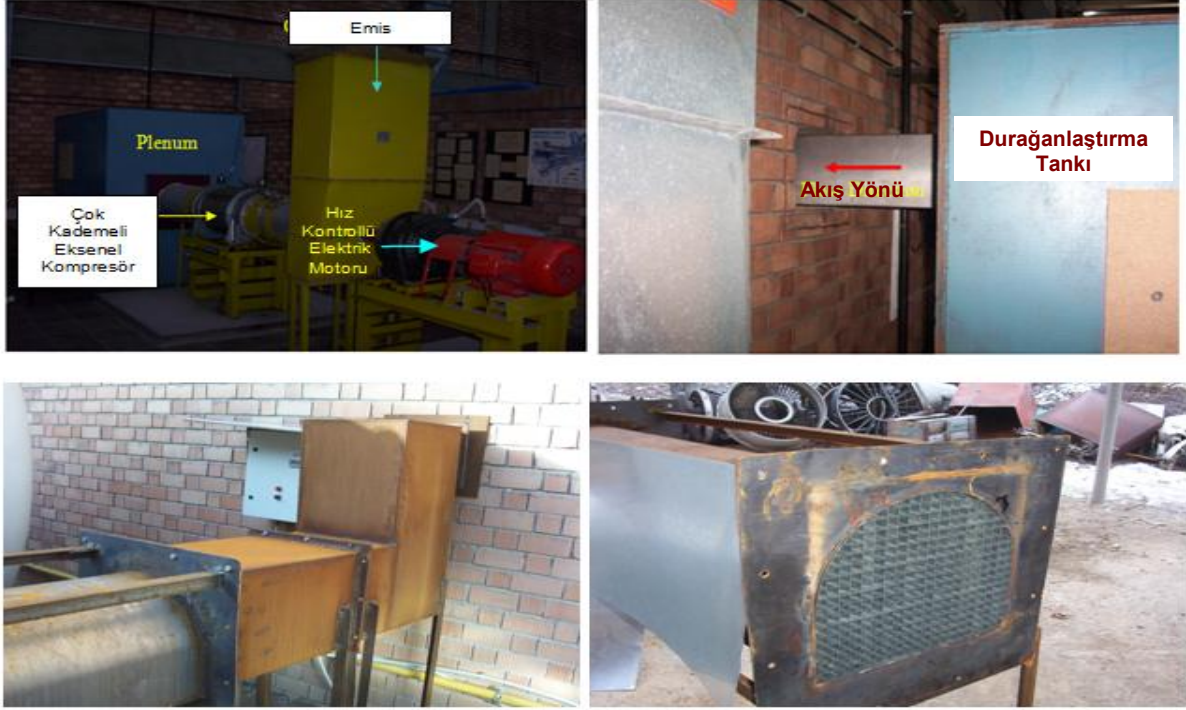
$$A_v = (l - nb)^2 \quad 2.41$$

$$P = \frac{A_v}{A_s} s^{\frac{1}{2}} b^{\frac{1}{2}} \quad 2.42$$

$$s = (l - nb) / (n - 1) \quad 2.43$$

Bu denklemlerde N katman sayısını , n ise herbir katmandaki tahta sayısını göstermektedir. Gözeneklilik faktörünün 0.5 den büyük olduğu durumlarda tahta kafes yapısı havalandırmadan etkilenmeyeceği fakat belirtilen değerden küçük olması durumunda ise havalandırma yanmada daha etken olacaktır.

havalandırma hızı kolaylıkla sağlanabilmektedir. Çok kademeli aksenal kompresör laboratuvar içerisinde emdiği havayı çıkış ağzındaki durağanlaştırma tankına (settling chamber) verir. Durağanlaştırma tankında sadece bir çıkış bulunmaktadır. Bu çıkıştaki 20 cm x 20 cm dikdörtgen bir kare kesitten laboratuvar dışında bulunan model tünele hava aktarılmaktadır. Model tünelde düzgün hava akışı sağlamak için ayrıca bir akış düzenleyici monte edilmiştir (Şekil 3.3). Sistem içerisinde yapılan ölçümlerde havalandırma hızının düzgün olduğu tespit edilmiştir. Deney düzeneğinin baca bağlantısı hariç toplam uzunluğu 650 cm dir.



Şekil 3.3 Havalandırma Sistemi ve Ek Bağlantılar

Yangın modellemesi yapılırken yalnızca Froude sayısının korunmasının daha uygun olacağına karar verilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda tünel yapısının (tünel duvar kalınlığı ve toprak yapısı) küçültülmesine imkân olmadığından genellikle model tüneller sac plakalardan imal edilmiş ve üstlerine hiçbir yalıtım malzemesiyle kaplanmadığı görülmüştür. Bu nedenle hem mevcut modelin atmosfere açık bir alanda olması hem de yanma yükünü pozitif yönde (artıracak) etkileyeceği düşünülerek model tünelin dışının taş yünü ile kaplanmasına karar verilmiştir. Böylelikle deneyler sırasında atmosferik koşullardan çok fazla etkilenmeden deney yapılmasına imkân sağlanmaktadır. İmal edilen ve montajı yapılan modelin fotoğrafları Şekil 3.4 'de verilmiştir. Yanma odası bölümü açılır kapanabilir olarak yapılmıştır. Deneyler sırasında model araçlar deney düzeneğine buradan yerleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Deney Düzeneği

3.2 Ölçüm Sistemi

3.2.1 Yanma Gazı Konsantrasyonu Ölçümü

Karbon monoksit ve oksijen konsantrasyonundaki değişimleri Testo 350S baca gazı analiz cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 3.5) . Cihazın teknik özellikleri Ek C.3 'de verilmiştir. Gaz konsantrasyonları değerleri her saniye bilgisayara (örnekleme hızı =1 örnek /sn) kayıt edilmiştir.



Şekil 3.5 TESTO 350S Baca Gazı Analiz Cihazı

Yanma sonucunda oluşan gaz konsantrasyonların ölçümünden yangın yükünün tespit etmek amacıyla oksijen tüketim miktarı ölçüm tekniği kullanılmıştır. Bu tekniğin kullanılmasının nedeni yakıt özelliğinden bağımsız olarak birim oksijen yanmasından açığa çıkan enerji miktarı (13.1 MJ/kg) yaklaşık olarak sabit kalmasıdır. Aşağıda belirtilen denklem aracılığı ile model araçlarda yangın yükü hesaplanmıştır:

$$\dot{Q} = \left[\phi - \left(\frac{E'' - E'}{E'} \right) \left(\frac{1 - \phi}{2} \right) \frac{X_{CO}^A}{X_{O_2}^A} \right] \cdot E' X_{O_2}^o \dot{V}_A \quad 3.1$$

$$\phi = \frac{X_{O_2}^o - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^o - X_{H_2O}^o) / (1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)}{X_{O_2}^o [1 - X_{O_2}^A / (1 - X_{CO_2}^A - X_{CO}^A)]} \quad 3.2$$

$$X_{O_2}^o = X_{O_2}^{A^o} (1 - X_{H_2O}^o) \quad 3.3$$

$$X_{CO_2}^o = X_{CO_2}^{A^o} (1 - X_{H_2O}^o) \quad 3.4$$

$$X_{H_2O}^o = \frac{P_{sat @ T_{ambient} of H_2O}}{P_{atmosphere}} \frac{Bağıl Nem(\%)}{100} \quad 3.5$$

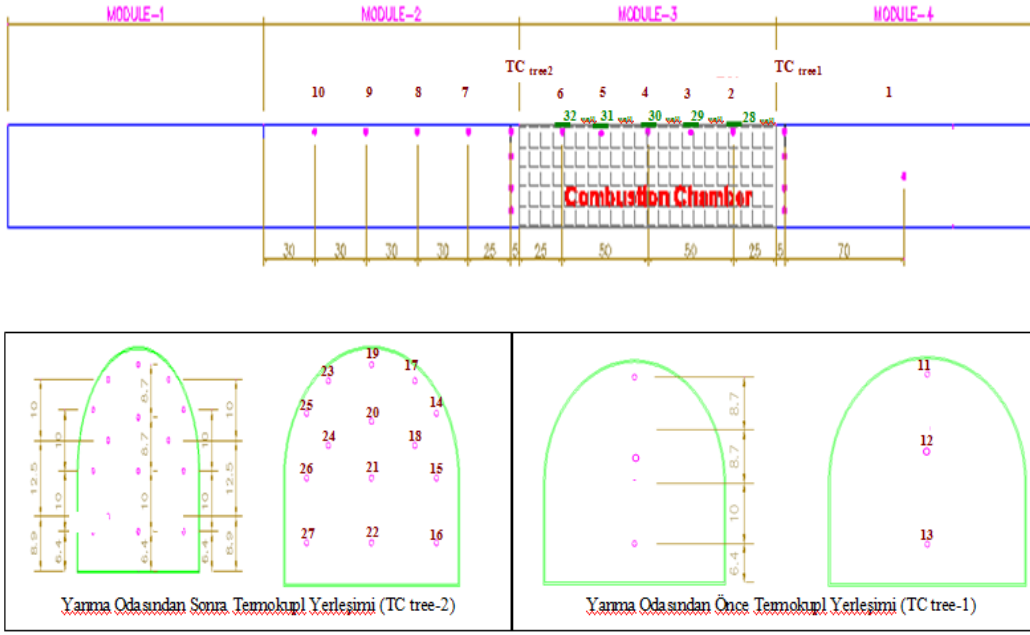
3.2.2 Sıcaklık Ölçümü ve Veri Toplama Sistemi

Sıcaklık ölçümü için “K” tipi mineral izoleli termo elemanlar tercih edilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 K Tipi Mineral İzoleli Termo Eleman

Yanma odasından sonraki kısımda sıcaklık değerini doğru olarak ölçebilmek için 16 termo eleman monte edilmiştir. Tünel eksenini boyunca sıcaklığı tespit edebilmek için tünel tavanından 2.5 cm aşağıya da termo elemanlar monte edilmiştir. Ayrıca yanma odasındaki duvar sıcaklıklarının ölçümü içinde duvarlara termo eleman telleri monte edilmiştir. Deney düzeneğindeki termo elemanlar Şekil 3.7’de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 3.7 Sıcaklık Ölçüm Noktaları

Sıcaklık verileri OMEGA OMB-DAQ 3005 ve Ek Modülü QMB-PDQ 30 veri toplama cihazı aracılığıyla bilgisayara kayıt edilmiştir. 32 adet termo eleman veri toplama sistemine bağlanmıştır. Cihazın teknik özellikleri Ek C.2 'de listelenmiştir.



Şekil 3.8 Omega OMB-DAQ-3005 ve QMB-PDQ 30 Ek Modülü

3.2.3 Kütle Azalma Miktarının Tespiti

Kütle azalma miktarı her saniyede bir alınan ağırlık ölçümlerinden hesaplanmıştır. Ağırlık ölçümü A&D GF 20 K High Precision Industrial Balance kullanılarak yapılmıştır. Bu cihaz, 20 kg'a kadar ağırlıkları 0.1 g hassasiyetle ölçme kapasitesine sahiptir. Cihazın teknik özellikleri Ek C.1 'de listelenmiştir.



Şekil 3.9 A&D GF20K Hassas Terazi

Kütle azalma miktarı ,

$$-\left[\frac{dm}{dt} \right]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \quad 3.6$$

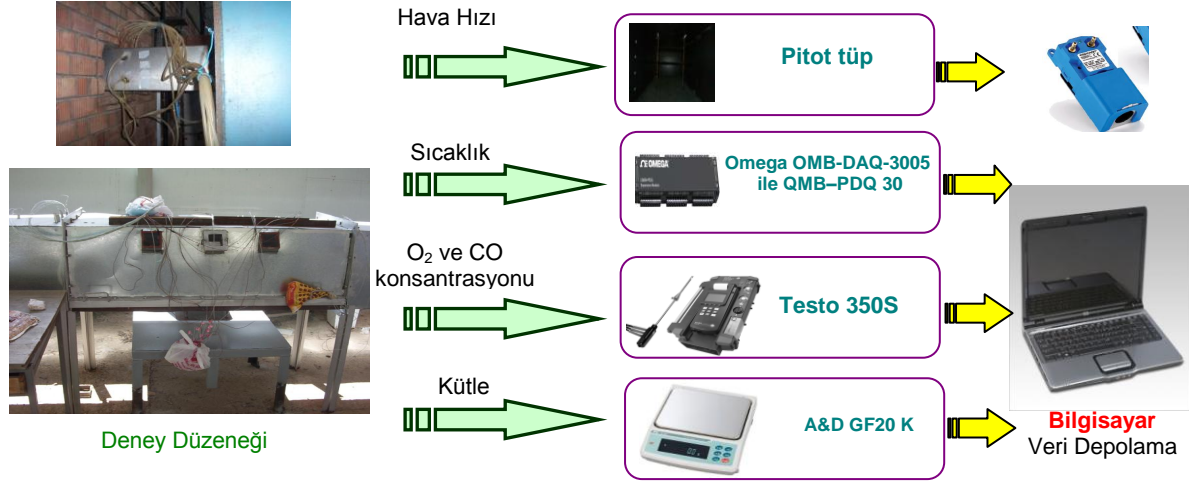
kullanılarak hesaplanmıştır (APTE,2006) . Bu denklemde m =ağırlık (g), t = zaman (s), i = alınan verinin sıra numarası.

3.2.4 Havalandırma Hızı Ölçümü

Model tüneldeki havalandırma hızı pitot tüpler vasıtasıyla ölçülmüştür. Hava hızı

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad 3.7$$

denklemleri ile hesaplanmıştır. Burada v = hava hızı (m/s), Δp = dinamik basınç (Pa), ρ = havanın özkütlesi (kg/m^3) dir. Pitot tüpler dinlendirme tankından sonra yer alan genişliği 28 cm ve yüksekliği 25 cm olan kanala Şekil 1.6 'da belirtildiği gibi yerleştirilmiştir. Pitot tüplerden alınan ortalama hız değerleri sıcak tel anemometresinden alınan değerlerle karşılaştırılmış ve doğruluğu kontrol edilmiştir. Doğrulama deneyinin sonuçları Ek A'da verilmiştir. Dinamik basınç Aschcroft CXLdp fark basınç algılayıcı kullanılarak ölçülmüştür (Ek C.4).



Şekil 3.11 Deney Düzeneği Ölçüm Zinciri

3.3 Deney Metodolojisi

3.3.1 Deneysel Tasarım Parametreleri

Bu çalışmada tüm aracın tek bir malzemeden yapıldığı ve bütün araç parçalarının yangına dahil olduğu varsayılmıştır. Literatürde araç geometrisini ve araç malzemelerini sembolize eden modeller kullanılmaktadır. Bunlardan en çok tercih edilen model ise literatürde tahta kafes (wood crib) olarak adlandırılan yapılarıdır.

Yanan model araçlar 1 cm x 1 cm – 2 cm x 2 cm -3 cm x 3 cm kesit alanına sahip tahta blokların dizilerek oluşturulmuştur. Böylelikle değişik enerji miktarına ve değişik kesit alanına sahip modeller elde edilmiştir. Bu tahta kafes teorisine göre tahta kafes yapısının tabanı kare olması gerektiği belirtilmiştir. Yapılması planlanan deneylerde genişliği ve uzunluğu aynı fakat yükseklikleri farklı olan tahtadan yapılmış araç geometrilerinin yanı sıra uzunlukları farklı olan modellerle de deneyler yapılmıştır. Tek tip malzemenin kullanılması yangındaki malzeme cinsi etkisini sabit tutarak sadece yanan malzeme geometrisinin etkisini tespit etmektir. Ayrıca büyük ölçekli deneyler sırasında da araç enerjisi ve boyutlarını tahta kafes yapısından oluşturarak deneyler yapılmaktadır. Model araçların oluşturacak tahta kafes yapısında üretimini kolaylaştırmak amacıyla yüksekliklerinin 12 cm x 18 cm ve 24 cm olacak şekilde model araçlar değiştirilmesi planlanmış buna göre de model araçlar yapılmıştır. Araç uzunlukları 10 cm , 20 cm ve 30 cm olarak değiştirilmiştir. Deneyler sırasında tünel içindeki havalandırma hızları 1, 2 ve 3 m/s olarak belirlenmiştir. Model araçlar her zaman tüneli ortasına yerleştirilmiş ve deneyler bu koşulda yapılmıştır.

Tablo 3.2 Deney Tasarımındaki Parametreler

Parametre	Değerler
Çubuk Boyutları ($b \times b$)	1 cm x 1 cm
	2 cm x 2 cm
	3 cm x 3 cm
Çubuk Uzunlukları (L) (Uzunluk=Genişlik)	10 cm
	20 cm
	30 cm
Yükseklik (H)	12 cm
	18 cm
	24 cm
Havalandırma Hızı (V)	1 m/s
	2 m/s
	3 m/s
Her katmanda yerelacak Tahta Çubuk sayısı	3

3.3.2 Kesirli Faktöriyel Deney Tasarımı

Deney tasarım parametreleri göz önüne alınırsa tam faktöriyel deney tasarımında toplam 81 adet deney yapılması gerekmektedir. Tablo 3.3' te tam faktöriyel deneyleri listesi verilmiştir. Genellikle zaman, maliyet ve kaynak sıkıntısı nedeniyle tam faktöriyel deney yapmak genellikle mümkün olmamaktadır. Çok fazla parametrelerin olduğu deneyler kesirli faktöriyel olarak yapılarak önemli parametrenin hangisi olduğu ve küçük ölçekli etkileşimlerin tespiti yapılabilmektedir. Deney yapılırken bir parametrenin değiştirilerek diğer parametrelerin sabit tutulduğu (one-factor-at-a –time) bir yöntem kullanılmamış bunun yerine istatistiksel olarak tasarlanmış deney metodolojisi kullanılmıştır (design of experiments). Bütün etkilerin yangın yüküne ve kütle azalma miktarına nasıl bir etkisi olduğunu görebilmek için kesirli faktöriyel yaklaşımı ile 27 adet deneyin yeterli olduğu deney tasarım metotlarıyla gösterilmiştir (MONTGOMERY, 2001). Bütün parametrelerde değişimin yangın yüküne ve kütle azalma miktarına etkisi minimum 27 adet deney sonucunda gözlemlenebilmektedir.

Tablo 3.3 Tam Faktoriyel Deney Tablosu

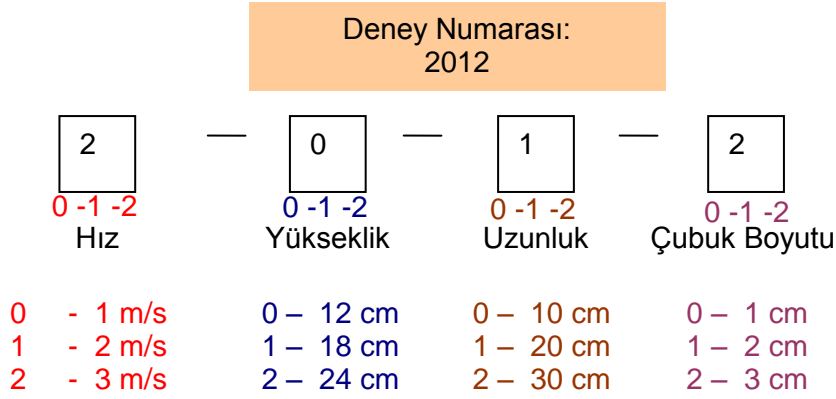
#	Hız (m/s)	Yükseklik(cm)	Uzunluk (cm)	Çubuk Boyutları (cm)
1	1	24	10	3
2	1	12	20	1
3	3	12	10	3
4	1	12	10	1
5	3	12	30	3
6	3	18	20	3
7	1	18	10	3
8	1	12	30	3
9	3	18	10	3
10	1	12	10	3
11	2	12	30	3
12	1	24	30	2
13	1	18	20	1
14	3	24	10	2
15	2	24	10	3
16	2	24	20	3
17	1	18	20	2
18	1	24	20	3
19	1	24	10	2
20	2	12	20	2
21	3	18	30	1
22	3	18	10	1
23	2	18	20	2
24	3	24	30	3
25	1	24	10	1
26	2	12	30	2
27	1	12	20	3
28	2	18	20	3
29	3	18	30	2
30	3	24	30	2
31	3	12	30	2
32	2	18	10	2
33	2	24	30	3
34	2	12	10	3
35	2	18	30	1
36	2	18	30	2
37	1	18	10	2
38	1	18	30	3
39	3	24	30	1
40	2	24	30	2
41	3	24	10	1

#	Hız (m/s)	Yükseklik(cm)	Uzunluk (cm)	Çubuk Boyutları (cm)
42	1	18	30	1
43	2	12	20	1
44	2	12	10	1
45	1	24	30	1
46	1	18	30	2
47	2	24	10	2
48	3	24	20	2
49	2	24	30	1
50	1	18	10	1
51	2	12	10	2
52	3	24	20	1
53	1	24	20	2
54	1	12	30	2
55	3	18	20	1
56	2	24	20	2
57	2	12	20	3
58	2	24	20	1
59	1	18	20	3
60	3	12	10	1
61	3	12	10	2
62	1	24	30	3
63	3	12	20	1
64	2	18	20	1
65	1	12	20	2
66	3	18	20	2
67	1	24	20	1
68	2	24	10	1
69	3	12	20	3
70	3	24	10	3
71	2	18	10	3
72	1	12	30	1
73	2	12	30	1
74	3	12	20	2
75	3	18	30	3
76	1	12	10	2
77	2	18	10	1
78	3	12	30	1
79	2	18	30	3
80	3	24	20	3
81	3	18	10	2

Tablo 4.4 Deney Matrisi

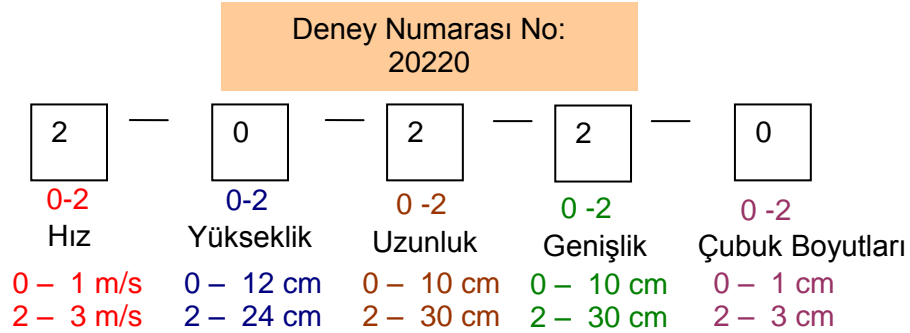
Deney Numarası:	Deney Kodu	Hız (m/s)	Yükseklik (cm)	Uzunluk (cm)	Çubuk Boyutları (cm)
1	0000	1 m/s	12	10	1 cm
2	0012	1 m/s	12	20	3 cm
3	2221	3 m/s	24	30	2 cm
4	0101	1 m/s	18	10	2 cm
5	0110	1 m/s	18	20	1 cm
6	0021	1 m/s	12	30	2 cm
7	1100	2 m/s	18	10	1 cm
8	0211	1 m/s	24	20	2 cm
9	0122	1 m/s	18	30	3 cm
10	1002	2 m/s	12	10	3 cm
11	1011	2 m/s	12	20	2 cm
12	0220	1 m/s	24	30	1 cm
13	0202	1 m/s	24	10	3 cm
14	1112	2 m/s	18	20	3 cm
15	1020	2 m/s	12	30	1 cm
16	1201	2 m/s	24	10	2 cm
17	1210	2 m/s	24	20	1 cm
18	1121	2 m/s	18	30	2 cm
19	2001	3 m/s	12	10	2 cm
20	2010	3 m/s	12	20	1 cm
21	1222	2 m/s	24	30	3 cm
22	2102	3 m/s	18	10	3 cm
23	2111	3 m/s	18	20	2 cm
24	2022	3 m/s	12	30	3 cm
25	2200	3 m/s	24	10	1 cm
26	2212	3 m/s	24	20	3 cm
27	2120	3 m/s	18	30	1 cm

Yapılan deneyleri daha rahat takip edilmesi açısından bütün deneylere birer numara atanmıştır. Deneylerde kullanılan kodlama Şekil 3.12’de belirtilmiştir. Deney kodundaki ilk numara tüneldeki havalandırma hızını ifade etmektedir. "0" sayısı 1 m/s ‘yi , "1" sayısı 2 m/s’yi, "2" sayısı ise 3 m/s olan hız değerini ifade etmektedir. Deney kodundaki ikinci sayı yanan model aracın yüksekliğini ifade etmektedir. Model araç yükseklikleri 12 cm ("0"), 18 cm ("1") ve 24 cm ("2") olarak değiştirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü sayılar ise tahta kafes yapısının oluşturulması için kullanılan çubukların uzunluğunu ve boyutlarını ifade etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.12 Deney Gösterimi (L=W)

Literatürde kullanılan tahta kafes yapısında tahta çubukların uzunlukları ve genişlikleri eşit olduğundan tahta kafes yapısının yanıl alanları birbirine eşittir. Bunun sonucunda, yangın ısıl yükünün yanan kütlelin uzunluğuna mı yoksa genişliğine mi daha çok etkili olduğunu anlayabilmek için uzunluğu ve genişliği farklı modellerde test edilmiştir. Bu testlerde tüneldeki havalandırma 1 m/s ve 3 m/s olacak şekilde, yanan kütlelin uzunluğu ve genişliği 10 cm ile 30 cm arasında ve çubuk boyutları 1 cm x 1cm ile 3 cm x 3 cm olan iki kademede değiştirerek testler yapılmıştır. Bu deneyler için kullanılan numaralama sistemi Şekil 3.13'te verilmektedir.



Şekil 3.13 Deney Gösterimi (L ≠W)

Bu deneylerde tam faktöriyel olarak yapılmamıştır. Toplam deney sayısı 32 tanedir kesirli faktöriyel olarak 16 tanesi yapılmıştır. Deney matrisi Tablo 4.5'de gösterilmiştir. Ayrıca, havalandırma hızının 0.5 m/s olduğu deneylerde yapılmıştır ve bu deneylerin numaralandırma sistemine göre (-1) ile ifade edilmiştir.

Tablo 4.5 Deney Matrisi (L ≠W)

Deney No:	Design Code	Velocity (m/s)	Height (cm)	Length (cm)	Width (cm)	Thickness (cm)
1	20220	3	12	30	30	1
2	02220	1	24	30	30	1
3	22200	3	24	30	10	1
4	02000	1	24	10	10	1
5	02022	1	24	10	30	3
6	22222	3	24	30	30	3
7	20022	3	12	10	30	3
8	00002	1	12	10	10	3
9	02202	1	24	30	10	3
10	00200	1	12	30	10	1
11	20000	3	12	10	10	1
12	22002	3	24	10	10	3
13	22020	3	24	10	30	1
14	20202	3	12	30	10	3
15	00222	1	12	30	30	3
16	00020	1	12	10	30	1

3.3.3. Deney Hazırlık ve Yapım Aşamaları

Deneyler yapılmadan önce ve deney sırasında uygulanan adımlar şunlardır:

1. Tahta çubuklar birbirlerine zımba ile birleştirilirler. Birleştirmeden önce ve sonra tahta ağırlıkları kayıt edilir. Böylelikle, tahta kafes yapısı oluşturulurken kullanılan zımba ağırlığı tespit edilir.
2. Birleştirilmiş tahta çubuklar 100 °C sıcaklığındaki fırında 10 saat süreyle bekletilir. Böylelikle tahta içindeki nemin atılması sağlanır.
3. Kurutma işleminden sonra tahta kafes yapısının ağırlığı tekrar kayıt edilir.
4. Ortam sıcaklığı, basıncı ve bağıl nemi kayıt edilir.
5. Hassas terazi ve baca gazı analiz cihazı çalıştırılır ve sıfırlanır.
6. Deneyde kullanılacak tahta kafes yapısı terazi üstündeki platforma yerleştirilir ve tünel havalandırma hızı belirtilen değere ayarlanır.
7. 100 ml etanol tahta kafes yapısının konulduğu platforma dökülür ve tutuşturulur.
8. Sıcaklık, kütle ve gaz konsantrasyonu değerleri her saniye için kayıt edilir.
9. Terazideki okunan değer değişmediğinde veri kayıtları durdurulur.
10. Gaz konsantrasyonu ve havalandırma hızı değerleri yangında oluşan ısı güç değerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Kütle azalma hızı kayıt edilen ağırlık değerleri kullanılarak hesaplanır. Elde edilen sıcaklık değerleri ise tünel boyunca oluşan sıcaklık değerlerinin tespiti için kullanılmaktadır.

4.BULGULAR

4.1 Deney Sonuçları

Her deney için kütle azalma hızı, ısıl gücün zamanla değişim grafikleri Şekil 4.1 den başlayarak Şekil 4.34'e kadar verilmiştir. Deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri de Ek-D'de sunulmuştur. Deney sonuçlarından elde edilen maksimum kütle azalama hızı ve ısıl güç değeri yanan modellerin geometrik özellikleri ile birlikte Tablo 4.1' de sunulmuştur.

Şekil 4.1 ve 4.2'de uzunluğu ve genişliği 10 cm, yüksekliği 12 cm ve tahta kalınlıkları 1 cm olan model araçlarla yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Deneyler değişik havalandırma hızlarında yapılmıştır. Yanan model araçların blokaj oranı % 9.3'tür. Her deneyde maksimum kütle azalma hızını ulaşım süresi yaklaşık olarak 60 s olmaktadır. Havalandırma hızı artırıldığında maksimum yanma hızı 2 m/s değerine kadar etkilenmemektedir, fakat, 3 m/s hız değerinde azalmaktadır. Şekil 4.2'de havalandırma hızı 0.5 m/s ile 2 m/s arasında değiştiğinde yangın yükü 16.44 kW'dan 42.2 kW'a yükselmektedir. Yangın yükü 3 m/s havalandırma hızında 41.2 kW'tır. Havalandırma hızı artığında, oksijenin yanan malzemeler ile karışma olasılığını artırmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda yanmadaki oksijen konsantrasyonu önemli ölçüde katı malzemelerin yanmasını etkili olduğu bilinmektedir. Havalandırma ile sağlanacak soğutma etkisi belirli bir hız değerinden sonra baskın olduğu söylenebilir. Bunlara ek olarak, tünel içindeki hızın artmasıyla havalandırma yönüne doğru alevin daha fazla eğildiği tespit edilmiştir. Sistemde ölçülen maksimum sıcaklık değeri havalandırmanın etkisiyle havalandırma yönüne doğru kaydığı ve hızdaki artış sonucunda sıcaklık değerlerinde azalmalar olmaktadır. Bu deneyler sistemdeki belirsizliği belirlemek amacıyla iki kez tekrarlanmıştır. Bu durumda, maksimum yangın yükü değeri ± 5 kW değiştiği, maksimum kütle azalma hızı değeri ise ± 0.5 g/s değiştiği tespit edilmiştir. Bu değişim farklı ortam koşullarında (dış etmenler) aynı yanma reaksiyonu elde edebilmenin güç olması nedeniyle kabul edilebilir seviyelerdedir.

Şekil 4.3 ve 4.4'te daha önce bahsedilen modellerle yüksekliği, genişliği ve uzunluğu aynı fakat kalınlıkları 3 cm olan tahtalardan yapılmış deneylerin sonuçları verilmiştir. Havalandırma hızı arttığında yangının maksimum ısıl güç değerine ulaşması daha kısa sürede olmaktadır. Bir başka deyişle, yangının maksimum kütle azalma hızı değerine ulaşma süresi 2 m/s havalandırma hızında 1 m/s havalandırma hızına göre daha kısa sürmektedir. Kalın tahtalardan imal edilen modellerin daha az ısı yaymaktadır. Havalandırma hızı 1 m/s'den 2 m/s çıkarıldığında yangın yükü 9.1 kW'dan 13.7 kW değerine yükselmiştir. Böylelikle, havalandırma yangın yükünde artışa sebep olduğu sonucu çıkarılabilmektedir. Bunun yanında, havalandırma hızının kütle azalma hızına nasıl bir etkisi olduğu Şekil 5.3'ten tespit edilebilir. Bunlara ek olarak, yangının tam gelişme evresinin süresi yüksek havalandırma hızlarında artmaktadır. Deney sonuçlarından yüksek yangın yükü değerine daha hızlı havalandırma yaparak ulaşılabileceği sonucu çıkarılabilir. Ayrıca, ince tahtalar kullanılarak yapılan deneylerde tünel içerisindeki sıcaklık seviyeleri daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Şekil 4.5 ve 4.6'da modellerin yüksekliği 18 cm, uzunluğu ve genişliği 10 cm ve tahta kalınlıkları 2 cm'dir. Modellerin blokaj oranı % 14'tür. Havalandırma hızı 0.5, 1 ve 3 m/s olarak

değiştğinde maksimum kütle yanma hızı sırasıyla 1.5, 1.6 and 2 g/s'dir. Bu sonuçlar ile hız artışı yanma hızını 0.5 ile 3 m/s hız değerleri arasında arttırdığı şekilde yorumlanabilir. Aynı eğilim maksimum ısı güç değerinde de görülebilmektedir. Tüneldeki maksimum sıcaklık değeri havalandırma yönü doğrultusunda kaymaktadır. (-1)1001 numaralı deneyde en yüksek sıcaklık değeri 479 °C ile 5. ısı çiftin olduğu noktada, 0101 numaralı deneyde en yüksek sıcaklık değeri 375 °C ile 18. ısı çiftin olduğu noktada , 2101 numaralı deneyde en yüksek sıcaklık değeri 283 °C ile 26. ısı çiftin olduğu noktada ölçülmüştür. Hızlı havalandırma durumunda tünel içindeki sıcaklık değerleri azalmaktadır.

Şekil 4.7 ve 4.8'de modellerin yüksekliği 24 cm, uzunluğu ve genişliği 10 cm ve tahta kalınlıkları 1 cm'dir. Modellerin blokaj oranı % 18.7'dir. Havalandırma hızındaki değişim yangın yükünde artışa neden olmaktadır. Tünel içinde ölçülen maksimum sıcaklık değeri 759 °C (Deney 02000), 583 °C (Deney 1200) ve 500 °C (Deney 2200) olarak değişiklik göstermektedir. Sıcaklık değeri havalandırma hızı arttığında düşmektedir. Deney sonuçları yüksekliği daha fazla olan uzunluğu, genişliği ve tahta kalınlığı aynı olan modellerle yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında yangın yükünün model aracın yüksekliği ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Tabanı kare bir kenarı 20 cm ve yüksekliği 12 cm fakat tahta kalınlıkları farklı olan modellerle yapılan deneylerde yangın yükünün ve kütle azalma hızının değişimi Şekil 4.9 ve 4.10'da verilmiştir. Bu modellerin blokaj oranı %18.7'dir. Bu deney sonuçlarına göre havalandırma hızının artması yangın yükünün artmasına neden olmaktadır. Tahta kalınlığının artışı alev yayılımını etkilemesi nedeniyle yangın yükü tahta kalınlığı arttığında azalmaktadır. Öte yandan, maksimum kütle azalma hızı havalandırma hızından önemli ölçüde etkilenmemektedir. Kalın tahtalarla yapılan deneylerde yangının daha uzun sürmektedir.

Tabanı kare (20 cm), yüksekliği 18 cm ve tahta kalınlığı 1 cm olan model araçlar ile yapılan deneyler sonucunda havalandırma ile yangın yükünün etkilenmediği görülmüştür (Şekil 4.11- 4.12). Havalandırma yangın yükünü ve kütle azalma miktarını azaltacak yönde bir etki yaptığı görülmüştür. Bu modellerin blokaj oranı % 28'dir. Havalandırma hızı arttığında daha iyi yanma olmaktadır. Aynı şekilde tabanı kare 24 cm yüksekliğinde ve 2 cm kalınlığındaki tahtalar ile yapılan deneylerin sonuçları da verilmiştir. Bu deneylerde havalandırma ile yangın yükü ve kütle azalma hızı doğru orantılıdır. Buna ek olarak, havalandırma hızının artmasıyla yangın daha uzun sürmektedir.

Şekil 4.13 ve 4.14'de uzunluğu (30 cm), yüksekliği (12 cm) ve genişliği (30 cm) olan modeller yakılmıştır. Burada tahta kalınlıkları farklıdır. 1020 ve 20220 numaralı deneylerin sonuçlarında yüksek havalandırma hızlarında yangın yükünün arttığı fakat kütle azalma hızının azaldığı tespit edilmiştir. Hız arttığında hızlı yanma sonucunda yangın süresi kısalmaktadır. Tahta kalınlığındaki değişim alev yayılımını etkilediği görülmektedir.

Şekil 4.15 ve 4.16'da blokaj oranı %18.7 olan modeller kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda, havalandırma kütle azalma hızını ve yangın yükünü artırmıştır. Ancak, tahta kalınlıkları yangın yükü ile ters orantılı olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.17 ve 4.18'de yükseklikleri 12 cm olan fakat uzunlukları ve genişlikleri 10 cm ile 30 cm arasında değişen modellerle yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir. Bu modellerin taban alanları kare değildir. Genişlik ve havalandırma hızındaki artış, kütle azalma hızında ve yangın yükünde artışa sebep olduğu belirlenmiştir. Ancak, kütle azalma hızı ve yangın yükü yanan modelin uzunluğu ile ters orantılıdır. Böyle olmasının nedeni, tünel duvarları ile yanan model arasında kalan mesafenin azalması

olabilir. Bu sonuç Carvel'in yaptığı çalışmadan elde ettiği sonuçlar ile benzerlik göstermektedir (CARVEL, 2003). Bu deneylerde havalandırma hızı yangın yüküne ve kütle azalma hızına pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Blokaj oranı % 18.7 olan modellerle yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre, hızın artması maksimum kütle azalma hızında ve yangın yükünde artışa sebep olmuştur.

Blokaj oranı % 56 ve % 42 olan modellerle yapılan değerler Şekil 4.21 ve 4.22'de sunulmuştur. (-1)2221 ve 2221 numaralı deneyde havalandırma hızının artışı maksimum yangın yükünde ve kütle azalma hızında azalmaya sebebiyet vermektedir. Havalandırma hızının belirli değerlere ulaştığında havanın soğutma etkisi baskın olmaktadır. Şekil 4.22'de yüksek havalandırma hızlarında yangının tam gelişme evresine ulaşması uzun vakit aldığı söylenebilir.

Blokaj oranı %42 olan model araçlar ile yapılan deneylerin sonuçları Şekil 4.23 ve 4.24'de verilmiştir. Havalandırma hızının artması yangın yükünü arttırmıştır. Ancak tahta kalınlığı yangın yükünü azalttığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.25 ve 4.26 'de blokaj oranı %14, % 28 ve % 9.3 olan modellerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar aynı konfigürasyona sahip diğer deney sonuçları ile karşılaştırıldığında yükseklik değişimi kütle azalma hızında ve yangın yükünde etkili olduğu belirlenmiştir(Deney No: 2102, 1100, 2001).

Şekil 4.27 ve 4.28 'de blokaj oranı %56.1 olan modellerden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Havalandırma hızı belirli bir limite kadar yangın yükünde ve kütle azalma hızında artışa sebep olmuştur.

Şekil 4.29 ve 4.30 'da 2010, 1210 ve 2212 numaralı olan deneylerin sonuçları verilmiştir. Sonuçlar ikili gruplar yapılarak karşılaştırıldığında uzunlukları, genişlikleri ve tahta kalınlıkları aynı fakat yükseklikleri farklı olan modellerde, yükseklik arttıkça yangın yükünde ve kütle azalma hızında artış olmaktadır. Ancak, tahta kalınlığı kütle azalma hızını olumsuz yönde etkilemektedir.

Şekil 4.31 ve 4.32 verilen deneylerde kullanılan modellerin uzunluk ve genişlikleri farklılık göstermektedir. Genişliği fazla olan modellerde daha yüksek ısı güç ve kütle azalma hızı tespit edilmiştir. Bunun nedeni yanan malzeme ile tünel duvarları arasında kalan mesafenin azalmasıdır.

Şekil 4.33 ve 4.34'de yüksekliği 24 cm, uzunluğu 10 cm ve genişliği 30 cm olan modeller yakılmıştır. Bu deneylerin sonucunda havalandırma hızı arttığında kütle azalma hızı artış göstermiştir. Buna ek olarak, alev yayılımı tahta kalınlığında etkilenmektedir.

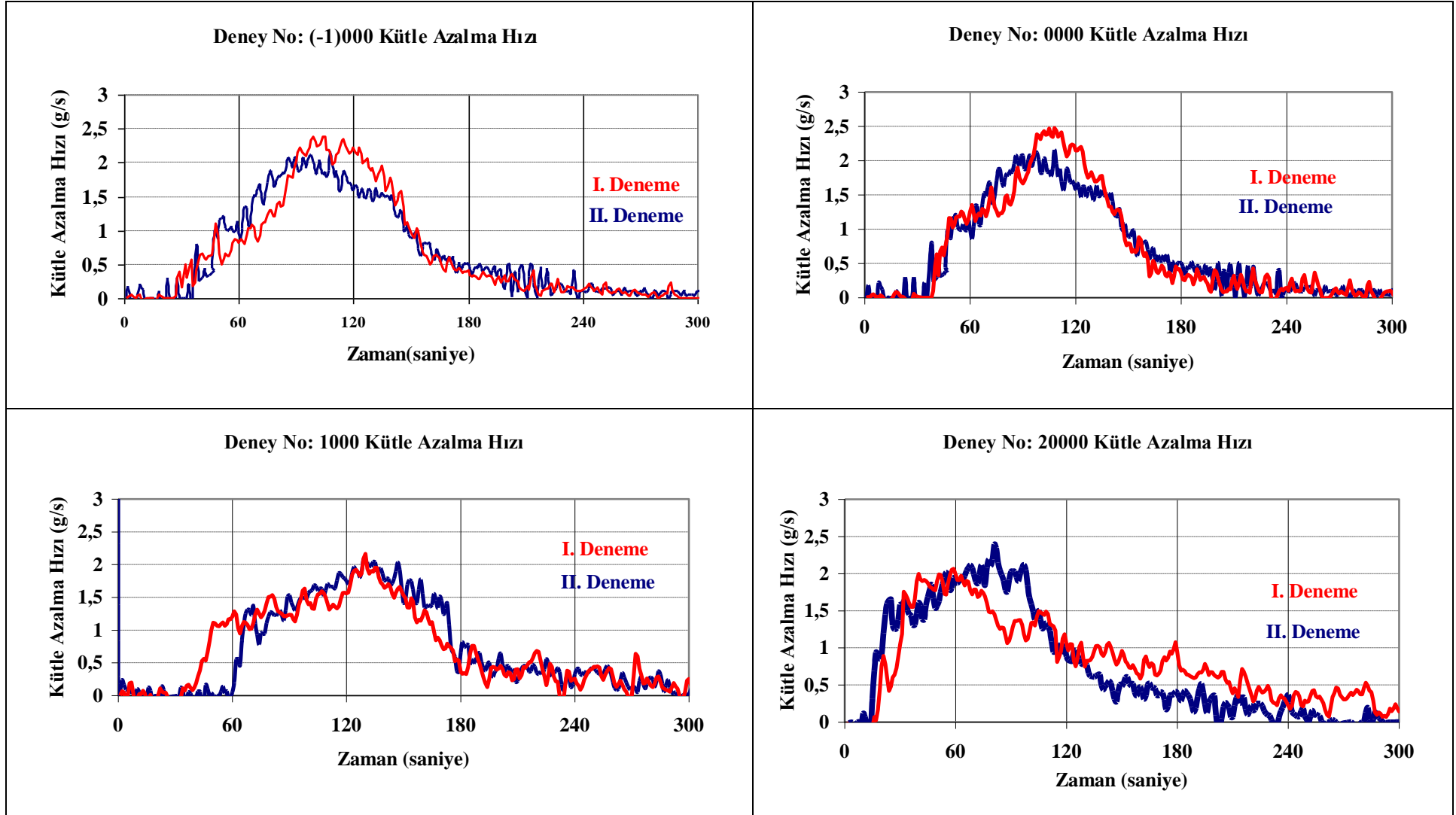
Sonuç olarak, çoğu deneyde havalandırma hızı arttığında ısı güç ve kütle azalma hızı değerinin daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Tahta kalınlıklarındaki değişim ise kütle azalma hızı ve ısı güçle ters orantılıdır. Blokaj oranında değişim ısı güçte ve kütle azalma hızında etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, havalandırma hızının büyüklüğüne göre blokaj etkisi kütle azalma hızına ve ısı güce arttırıcı veya azaltıcı yönde bir etkisi olmuştur.

Tablo 4.1 Deney Sonuçları Tablosu

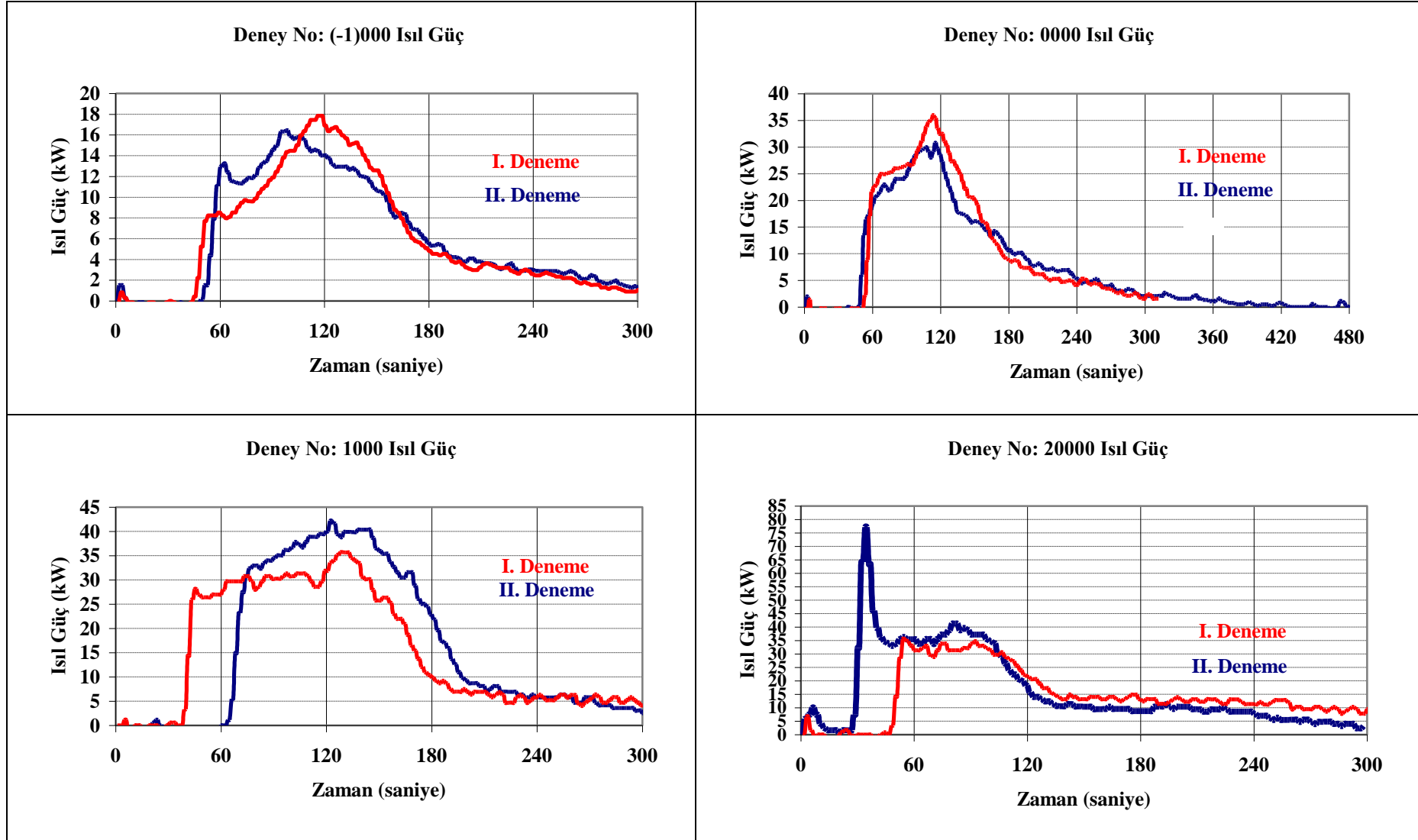
Deney No.	V (m/s)	H (cm)	L (cm)	W (cm)	T (cm)	Kütle (g)	Blokaj Oranı (%)	P _{ortam} (kPa)	T _{ortam} (°C)	Bağıl Nem (%)	\dot{M} (g/s)	\dot{Q} (kW)
(-1)000	0,5	12	10	10	1	158,2	9,3	92,8	18,4	55	2	16,44
0000	1	12	10	10	1	160,3	9,3	92,5	21,7	34,7	2,25	20,8
1000	2	12	10	10	1	159,5	9,3	91,4	24,1	31,1	2	42,2
20000	3	12	10	10	1	157,8	9,3	90,3	27,7	22,1	2,5	41,3
00002	1	12	10	10	3	452,7	9,3	91,8	20,4	53,4	0,47	9,1
1002	2	12	10	10	3	418,6	9,3	89,55	34	21,5	0,5	13,7
(-1)101	0,5	18	10	10	2	496,8	14,0	92,8	17,6	51,3	1,5	7,81
0101	1	18	10	10	2	369,2	14,0	90,9	25,6	28,9	1,6	15,7
2101	3	18	10	10	2	470,8	14,0	91,4	30,8	22,7	2	52,6
02000	1	24	10	10	1	352,6	18,7	90,7	33,3	20,7	3,8	45,5
1200	2	24	10	10	1	325,3	18,7	90,4	29,8	41,6	3,5	87,0
2200	3	24	10	10	1	332	18,7	91,4	29,7	28	3,84	98,5
0202	1	24	10	10	3	885,2	18,7	89,5	37,3	18,3	0,97	15,3
22002	3	24	10	10	3	848,1	18,7	90,8	19,3	47,8	1,4	42,8
1201	2	24	10	10	2	665,7	18,7	92	21,7	47,8	2,49	56,7
(-1)011	0,5	12	20	20	2	686,3	18,7	91,8	29,4	30,2	2,4	18,7
1011	2	12	20	20	2	643,4	18,7	91	25	46,6	2,1	39,2
(-1)012	0,5	12	20	20	3	905,5	18,7	91,3	23,1	45	1,75	15,62
0012	1	12	20	20	3	847,1	18,7	91	19,9	51,9	1,5	22,4
(-1)120	0,5	18	20	20	1	475	28,0	91,3	25,1	38,5	8,5	86,61
0110	1	18	20	20	1	486	28,0	91,4	28,9	41,2	6,55	85,4
(-1)211	0,5	24	20	20	2	1216,2	37,4	91,8	28	32	5,25	31,6
0211	1	24	20	20	2	1320,5	37,4	91,4	21,5	36,4	6	71,8
1020	2	12	30	30	1	475,5	28,0	91,4	27,5	37,8	5	105,0
20220	3	12	30	30	1	517,8	28,0	91,4	19,8	53,5	4,51	117,5
0021	1	12	30	30	2	942,7	28,0	91	19,2	51,4	3,85	69,7
(-1)021	0,5	12	30	30	2	1020,1	28,0	91,7	17,6	59,8	3	24,79
(-1)122	0,5	18	30	30	3	2045,8	42,1	91,8	24,3	41,6	4,35	39,7
0122	1	18	30	30	3	1944,8	42,0	91	26,2	39,7	-	94,2
(-1)121	0,5	18	30	30	2	1111,7	42,1	91,7	21,4	45,8	-	74,47
1121	2	18	30	30	2	1503,3	42,0	91,4	31,7	38,8	4,42	113,1
(-1)221	0,5	24	30	30	2	2011,3	56,1	91,3	26,2	37,6	9,5	105,2
2221	3	24	30	30	2	2058,3	56,1	91,4	32,6	37,8	2,0	78,9
0220	1	24	30	30	1	998,9	56,1	91,4	26,8	49,9	10	184,2
02220	1	24	30	30	1	1007,8	56,1	920	23	41,4	12,4	223,5
2120	3	18	30	30	1	742,4	42,0	91,4	33,7	34,5	5,1	136,1
(-1)222	0,5	24	30	30	3	2781	56,1	91,3	26,8	38	-	67,96
1222	2	24	30	30	3	2757,5	56,1	91	28,6	45	6,8	150,5
22222	3	24	30	30	3	2752,8	56,1	90,8	21,3	44	5,8	142,7
2102	3	18	10	10	3	676,3	14,0	92	33,6	25,2	1,2	41,7
1100	2	18	10	10	1	260,4	14,0	91,4	28,9	41,2	2,25	52,8
1112	2	18	20	20	3	1375,1	28,0	91,4	31,8	38,7	1,4	30,9

Tablo 4.1 Devamı

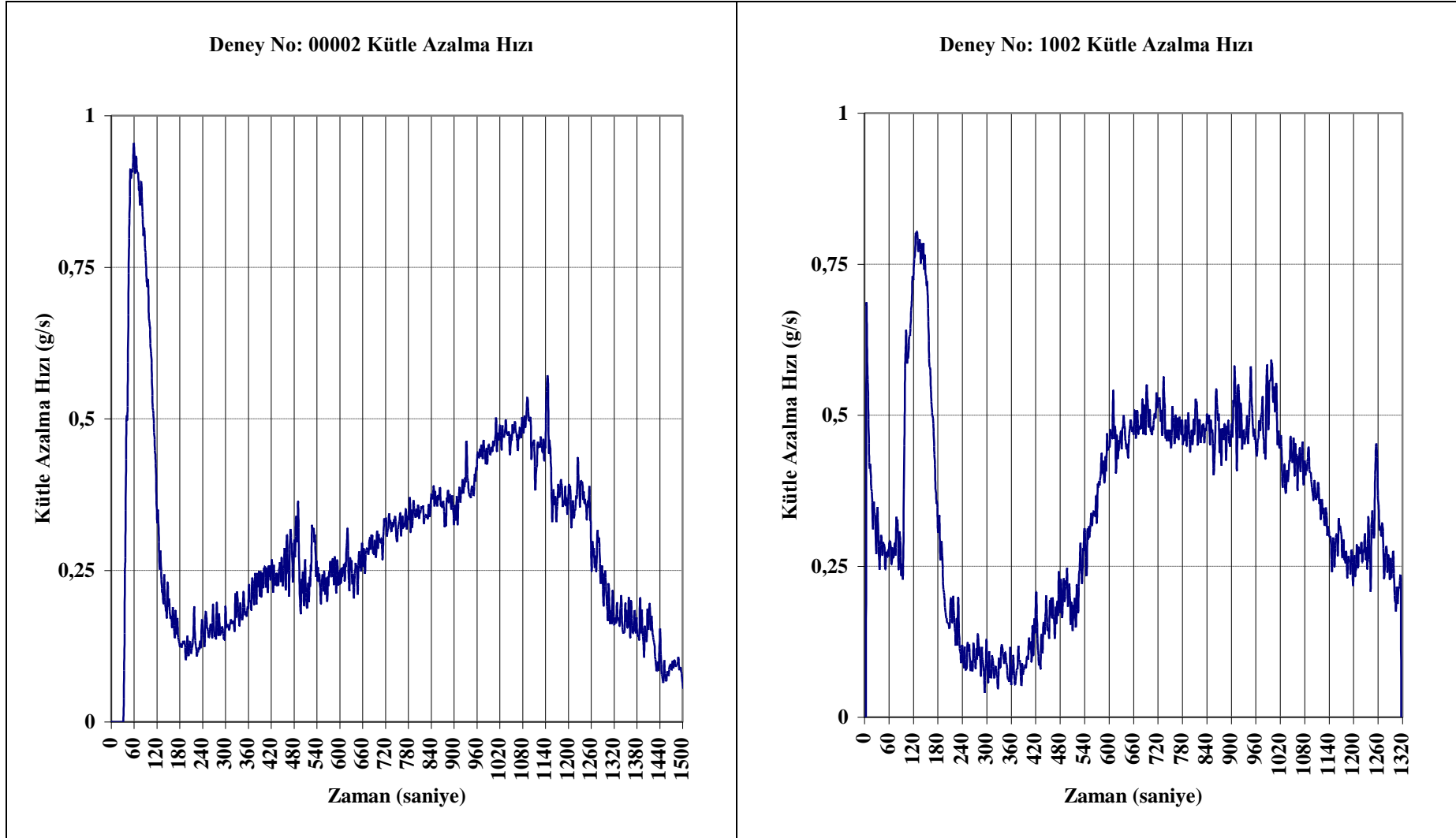
Deney No.	V (m/s)	H (cm)	L (cm)	W (cm)	T (cm)	Kütle (g)	Bloka j Oranı (%)	P _{ortam} (kPa)	T _{ortam} (°C)	Bağıl Nem (%)	\dot{M} (g/s)	\dot{Q} (kW)
2001	3	12	10	10	2	310,7	9,3	90,4	26,4	50	1,5	30,3
1210	2	24	20	20	1	677,5	37,4	91,4	27,2	45,3	7,51	148,3
2010	3	12	20	20	1	349	18,7	91,4	33,1	35,2	2,6	57,7
2212	3	24	20	20	3	1827	37,4	91,4	25	52	4,49	90,0
(-1)111	0,5	18	20	20	2	801,9	28,0	92,9	18,8	42,4	2,75	17,93
2111	3	18	20	20	2	1047,7	28,0	91	24,8	45,2	1,85	35,8
2022	3	12	30	30	3	1285,7	28,0	91,4	23,7	58	2,35	53,5
00222	1	12	30	30	3	1290,7	28,0	90,7	27,6	29,8	2,5	36,8
(-1)2200	0,5	24	30	10	1	628,4	18,7	92,8	19,8	43,6	12	43,4
22200	3	24	30	10	1	636,5	18,7	91,4	21,6	49,7	8,5	214,6
(-1)2202	0,5	24	30	10	3	638,2	18,7	92,8	23,3	35,6	2,25	10
02202	1	24	30	10	3	1799,8	18,7	92	19,6	65,6	2,31	36,1
20022	3	12	10	30	3	853,6	28,0	91,4	31,4	23,6	1,46	32,2
00020	1	12	10	30	1	309,9	28,0	90,7	20,8	50,1	4,28	68,2
20202	3	12	30	10	3	878,1	9,3	91,4	30,8	31	1,3	24,3
00200	1	12	30	10	1	318,6	9,3	90,7	25,8	32,7	3,75	50,2
(-1)2020	0,5	24	10	30	1	632,5	56,1	92,8	26,4	23,3	8	59,51
22020	3	24	10	30	1	642	56,1	91,4	25,6	35,1	-	215,1
02022	1	24	10	30	3	1674,3	56,1	92	18,9	52,7	2,77	40,0



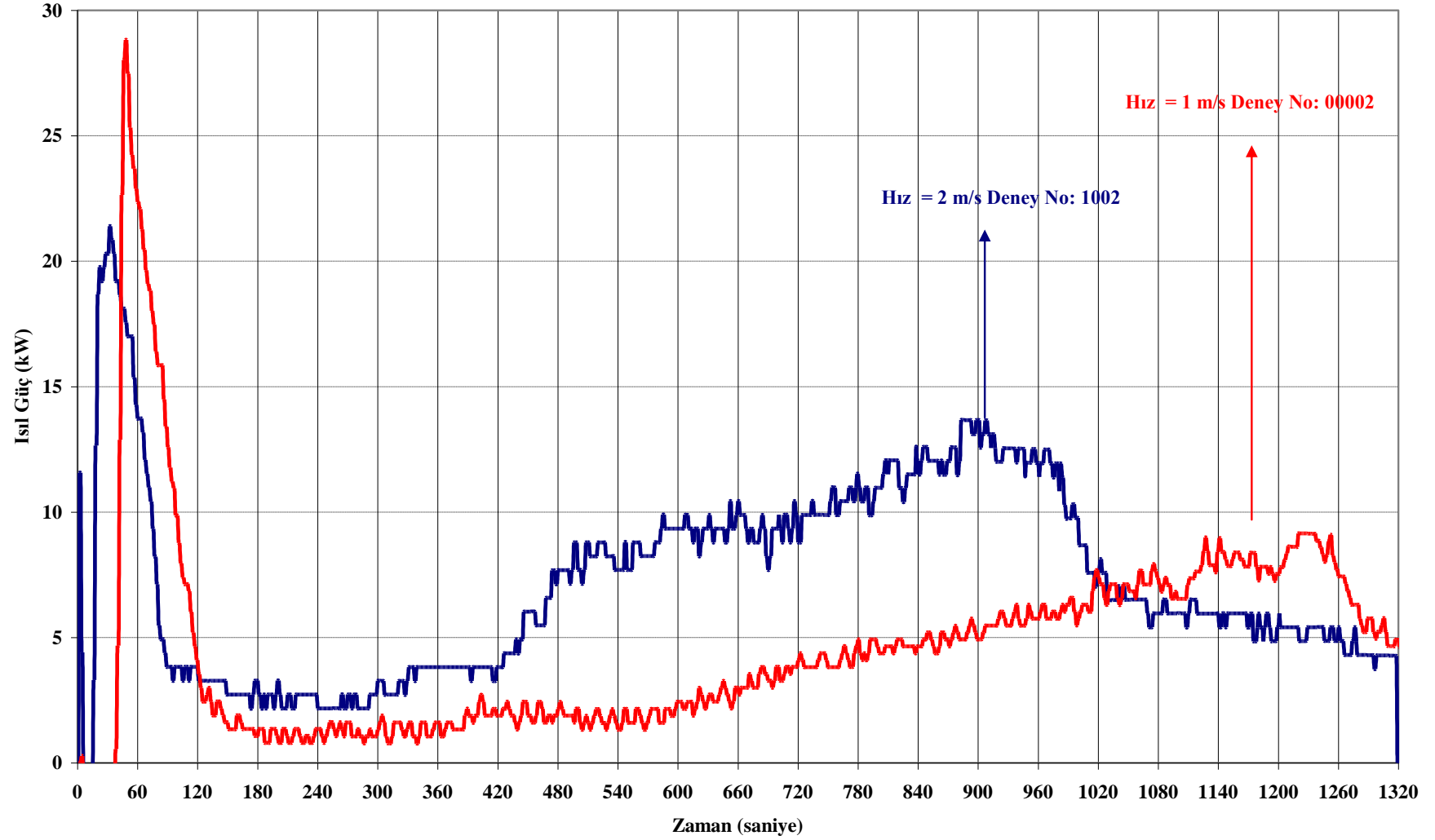
Şekil 4.1 (-1)000 - 0000 - 1000 - 20000 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



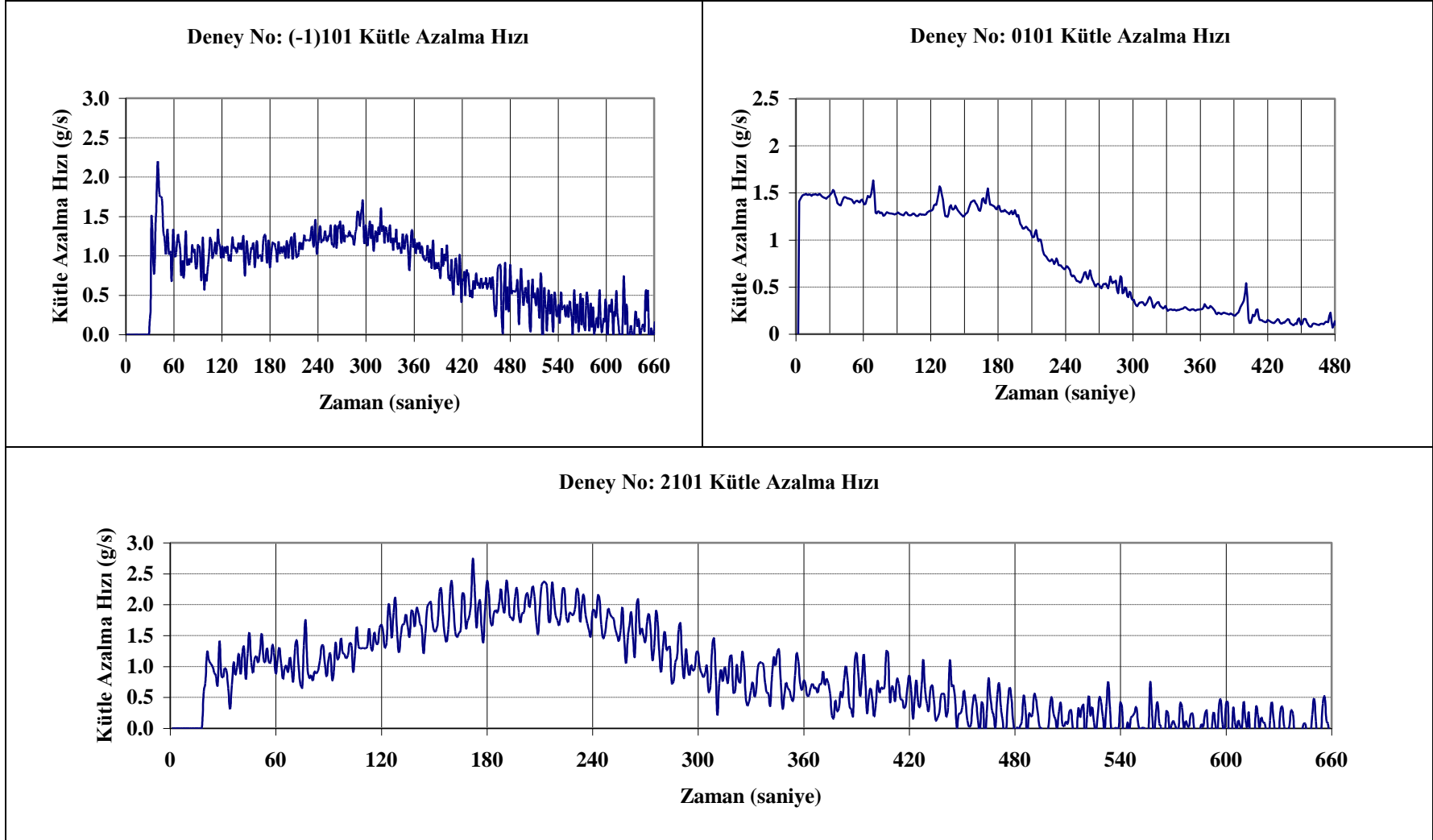
Şekil 4.2 (-1)000 - 0000 - 1000 - 20000 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



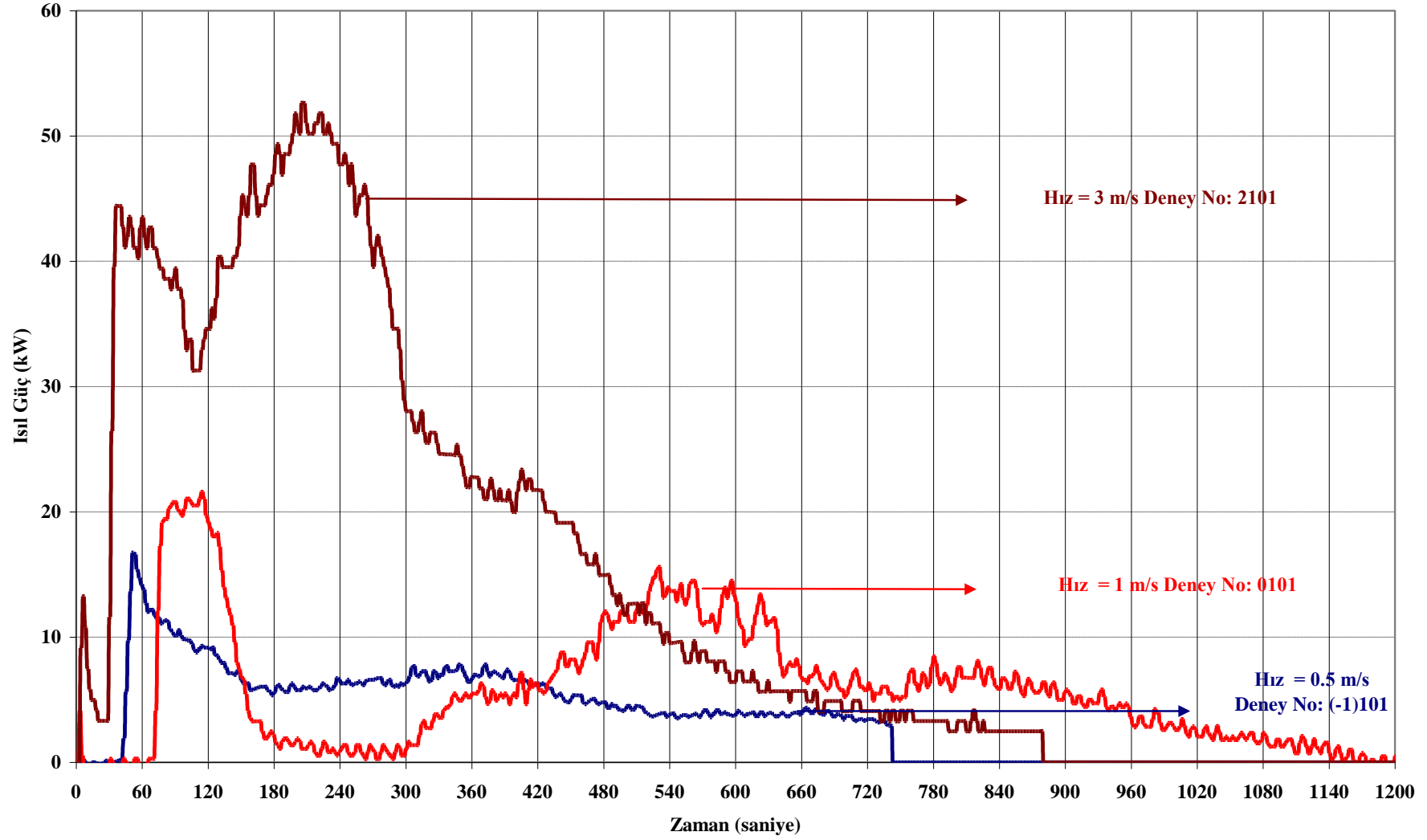
Şekil 4.3 00002 - 1002 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



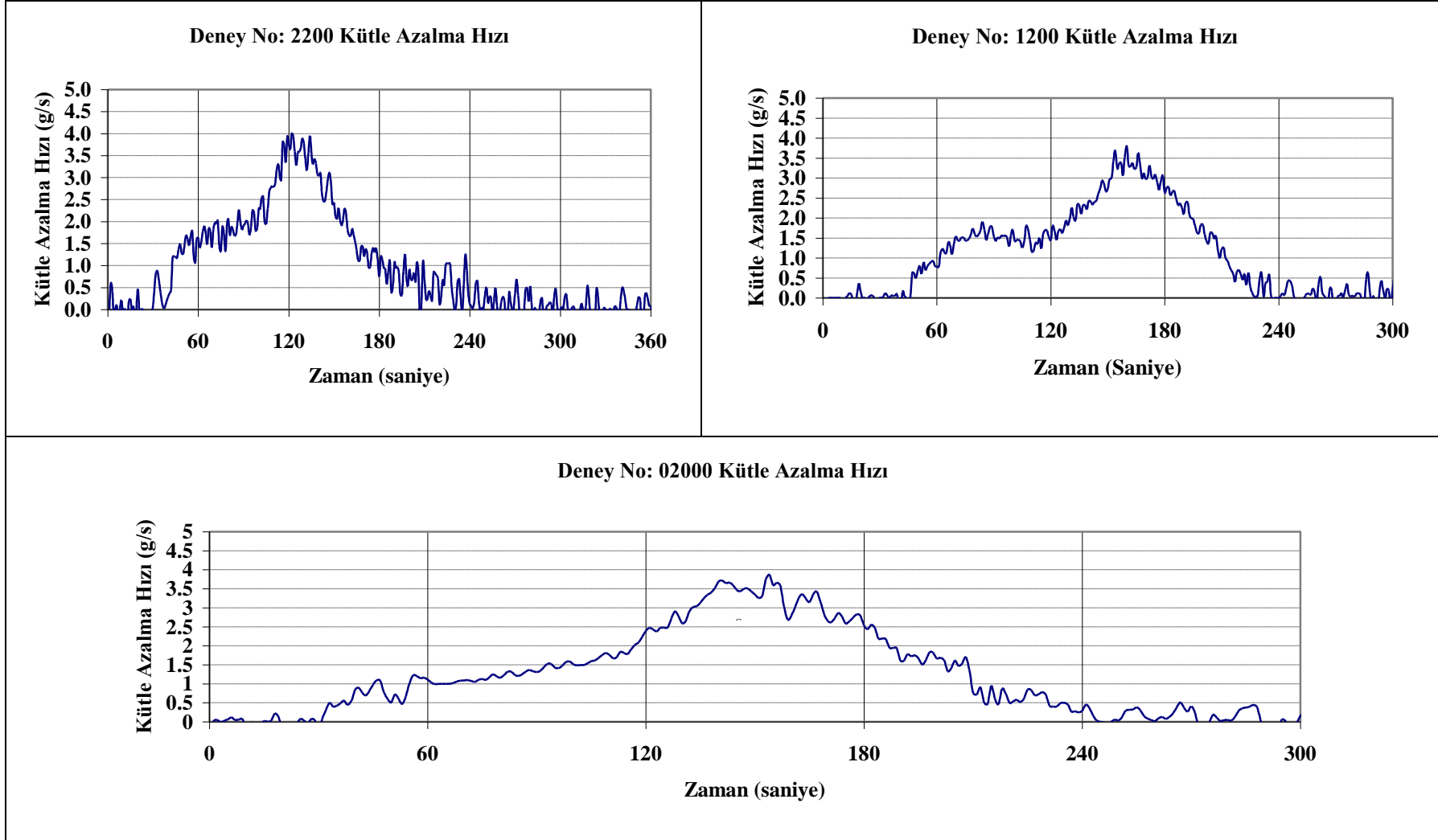
Şekil 4.4 00002 - 1002 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



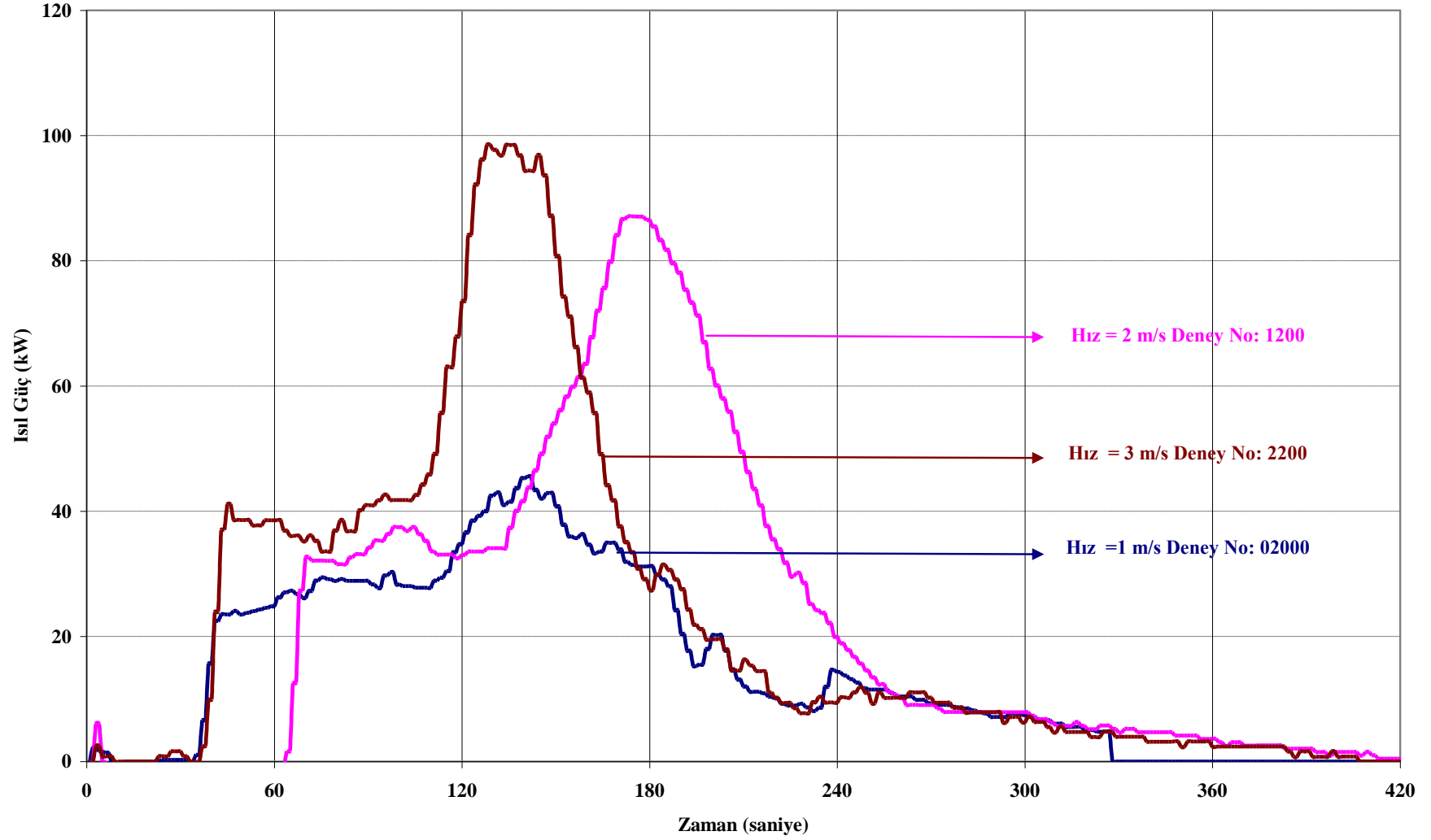
Şekil 4.5 (-1)101 - 0101 – 2101 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



Şekil 4.6 (-1)101 - 0101 – 2101 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

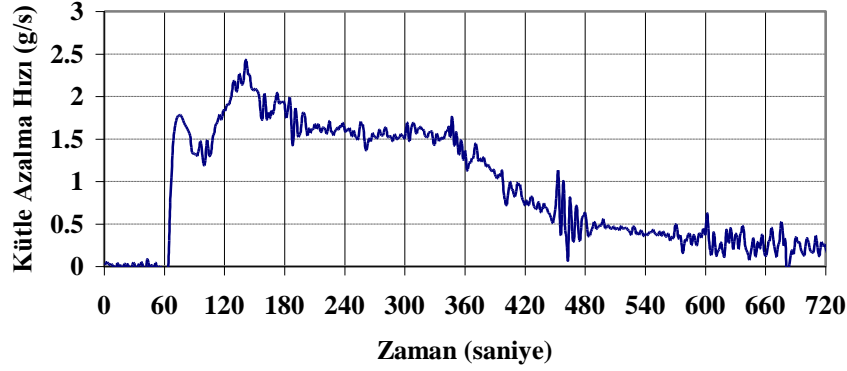


Şekil 4.7 02000 - 1200 - 2200 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

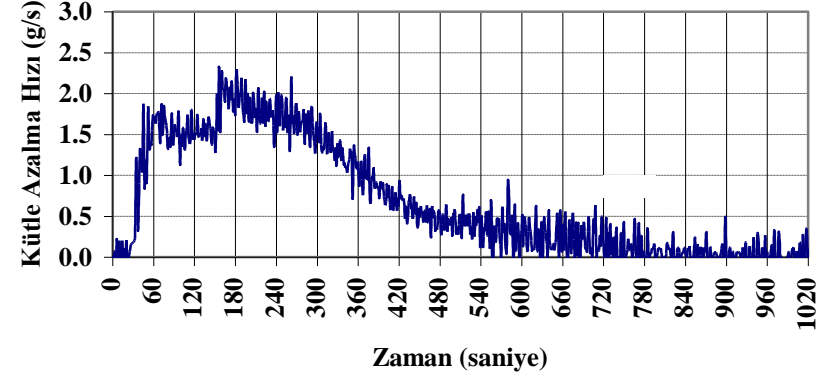


Şekil 4.8 02000 - 1200 - 2200 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

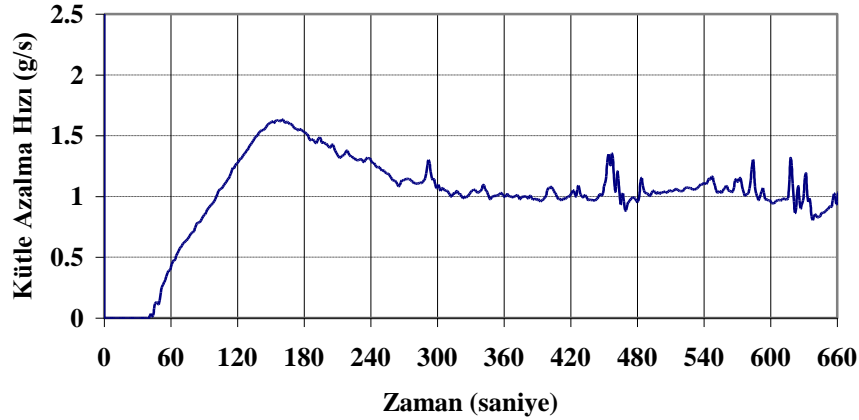
Deney No: (-1)011 Kütle Azalma Hızı



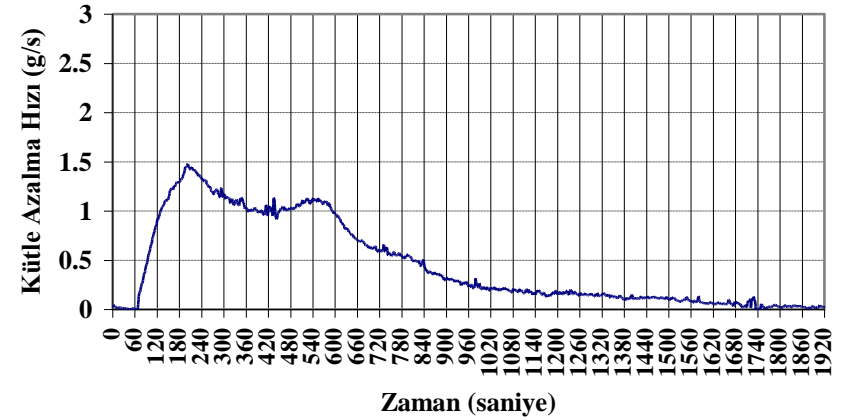
Deney No: 1011 Kütle Azalma Hızı



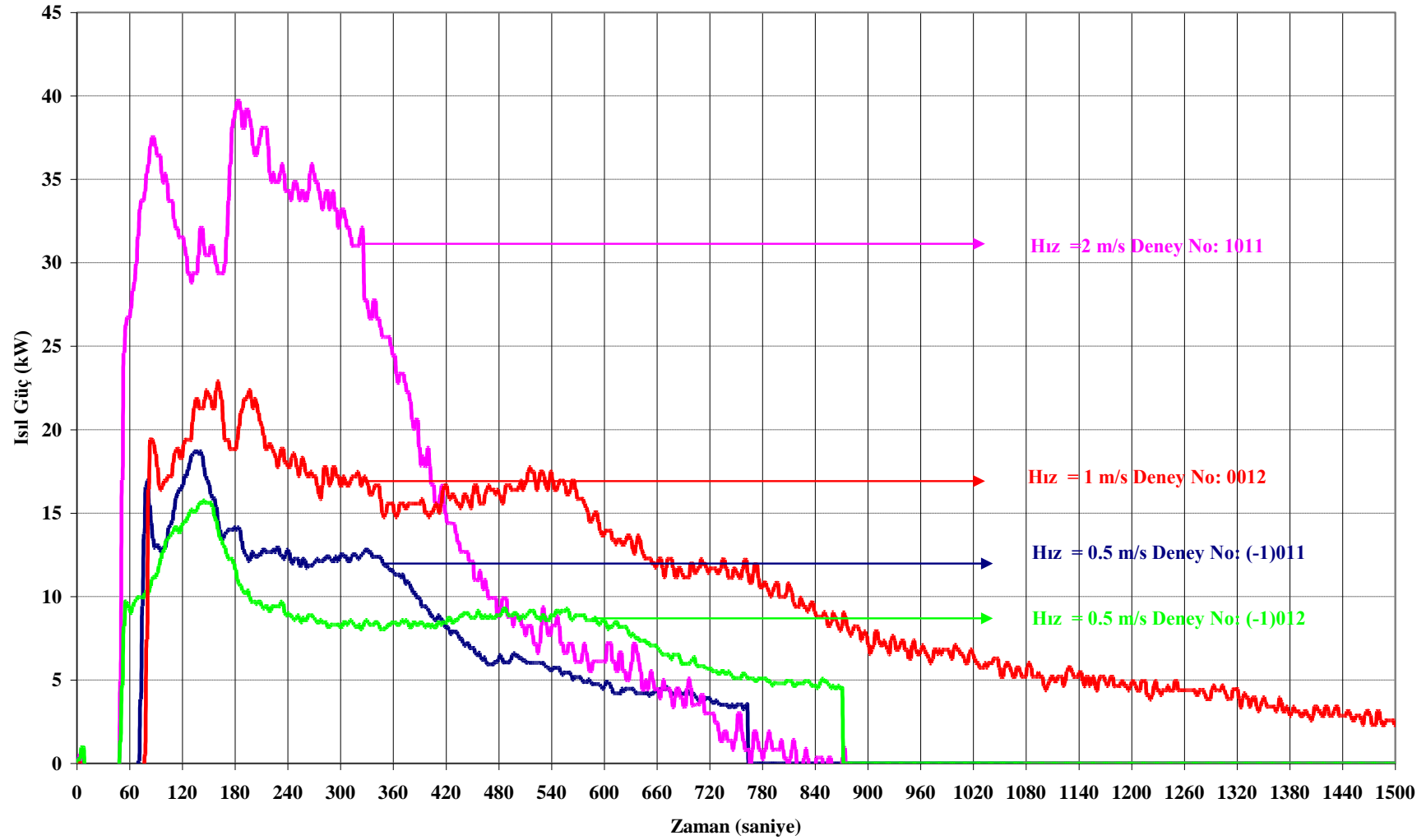
Deney No: (-1)012 Kütle Azalma Hızı



Deney No: 0012 Kütle Azalma Hızı

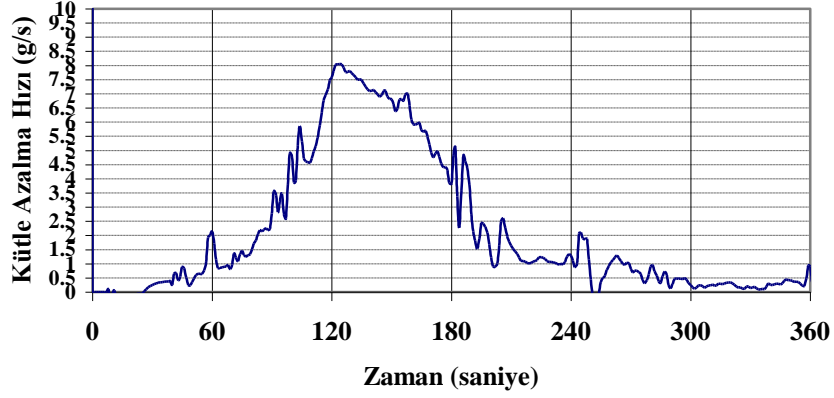


Şekil 4.9 (-1)011 - 1011 - (-1)012 - 0012 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

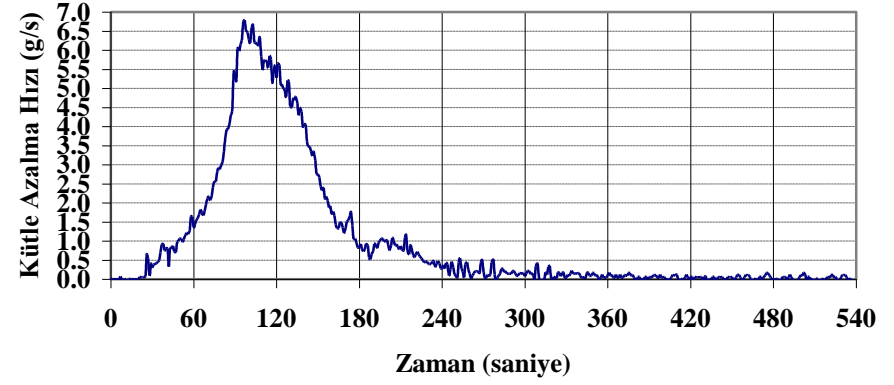


Şekil 4.10 (-1)011 - 1011 - (-1)012 - 0012 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

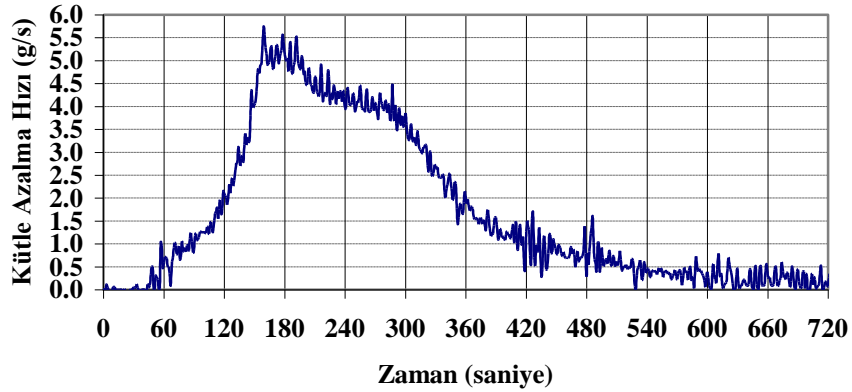
Deney No: (-1)120 Kütle Azalma Hızı



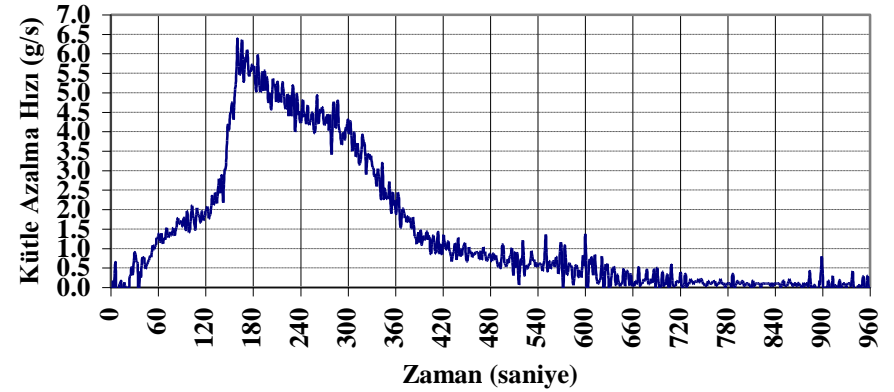
Deney No: 0110 Kütle Azalma Hızı



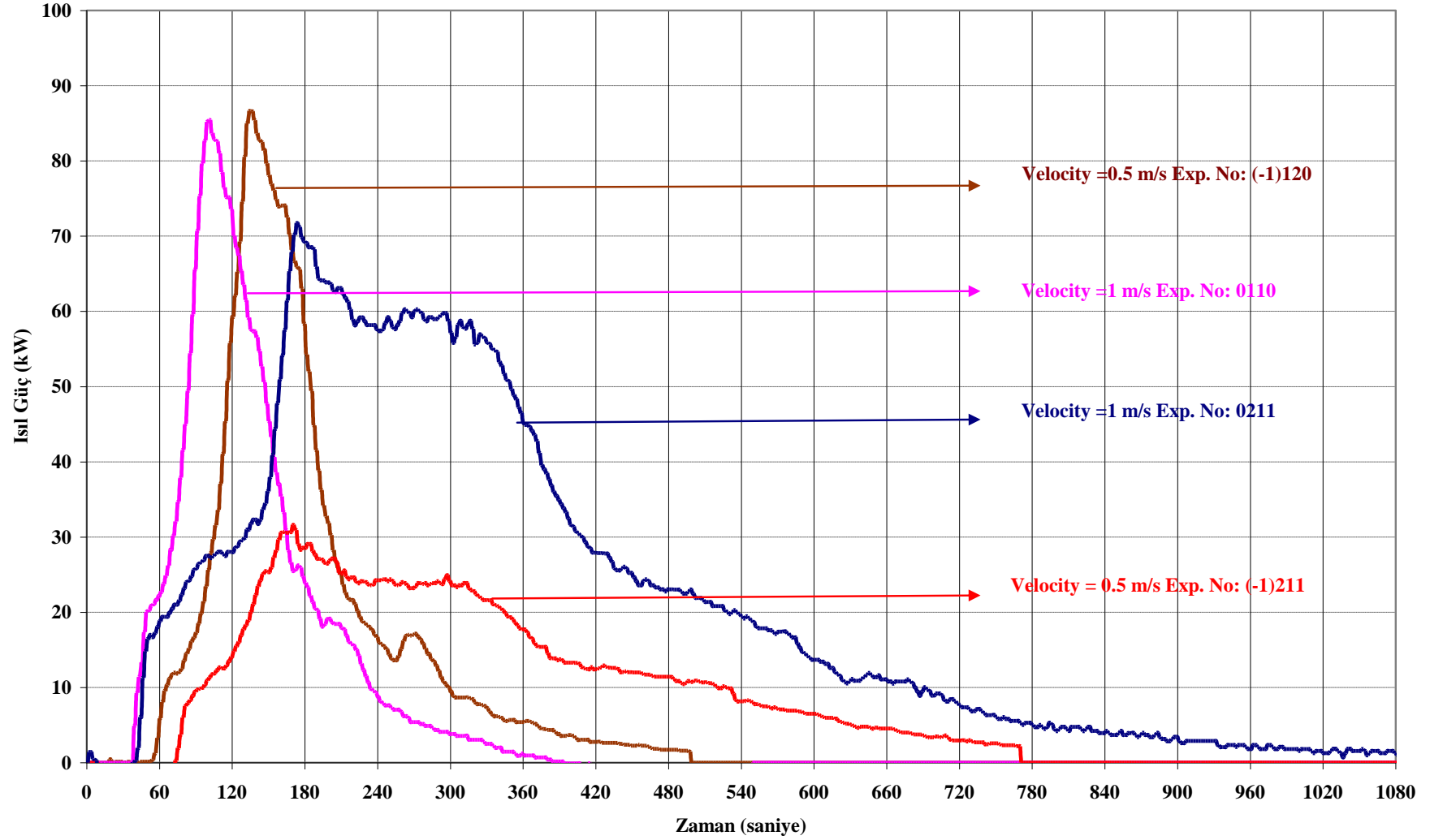
Deney No: (-1)211 Kütle Azalma Hızı



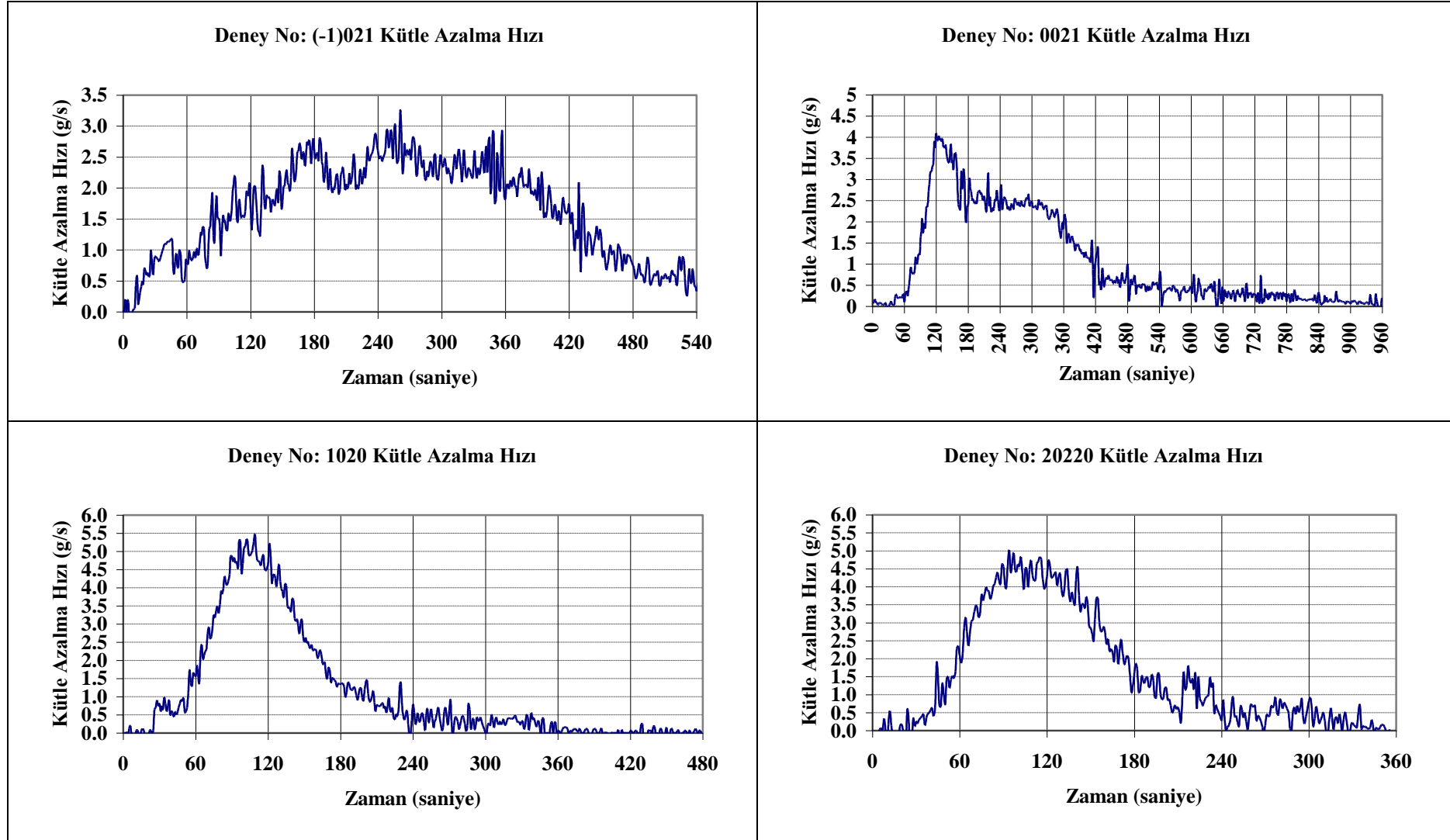
Deney No: 0211 Kütle Azalma Hızı



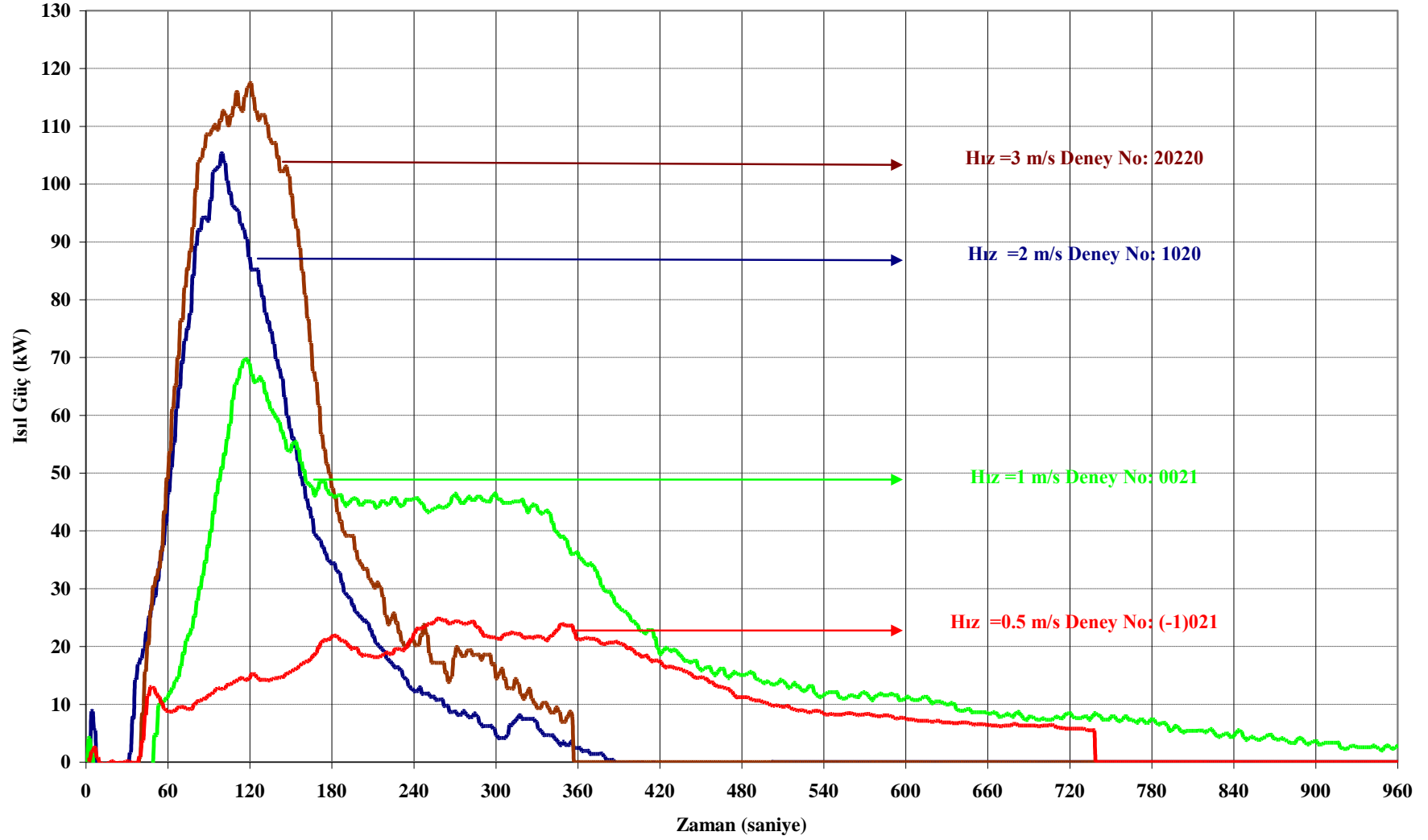
Şekil 4.11 (-1)120 - 0110 - (-1)211 - 0211 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



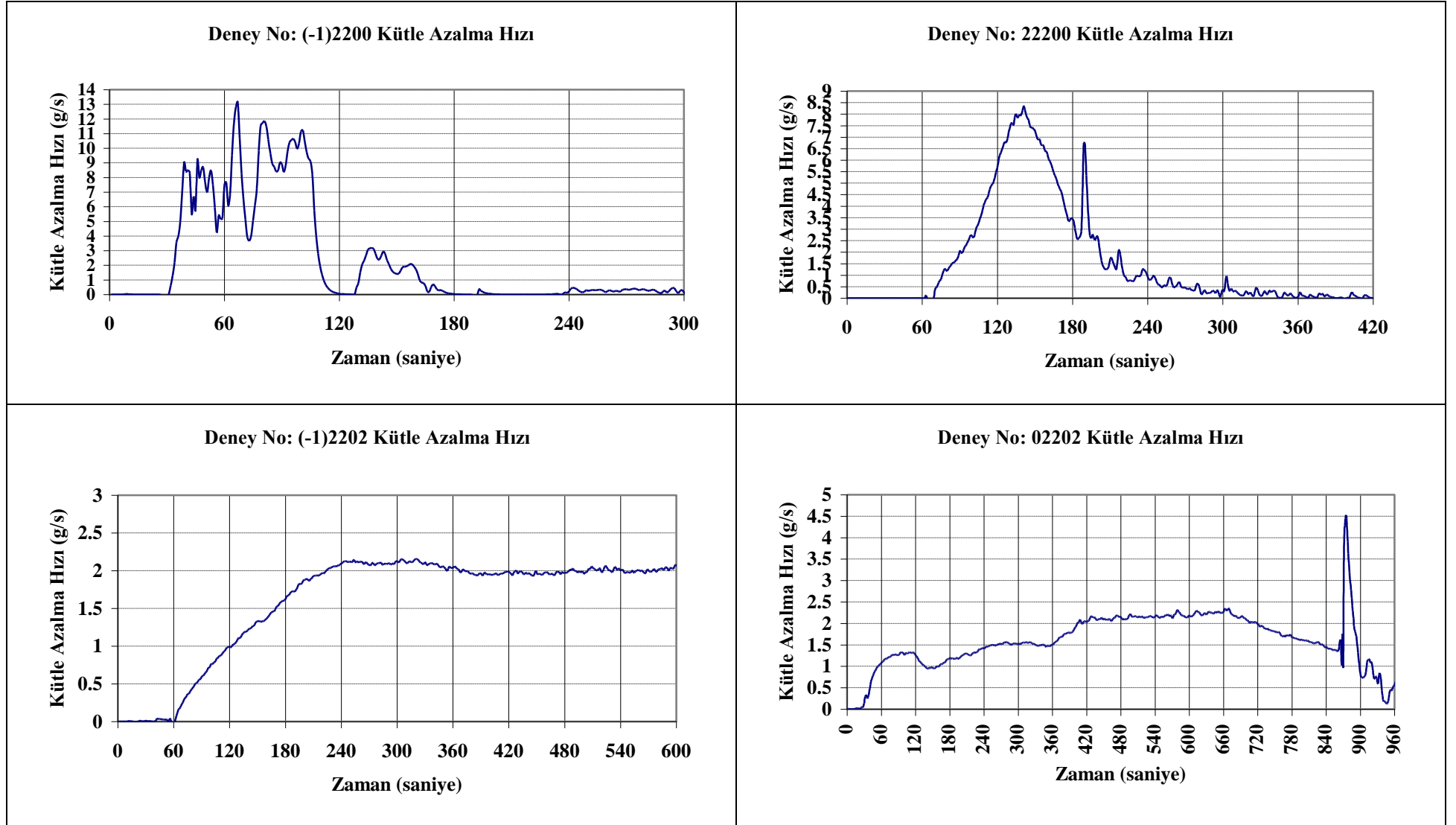
Şekil 4.12 (-1)120 - 0110 - (-1)211 - 0211 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



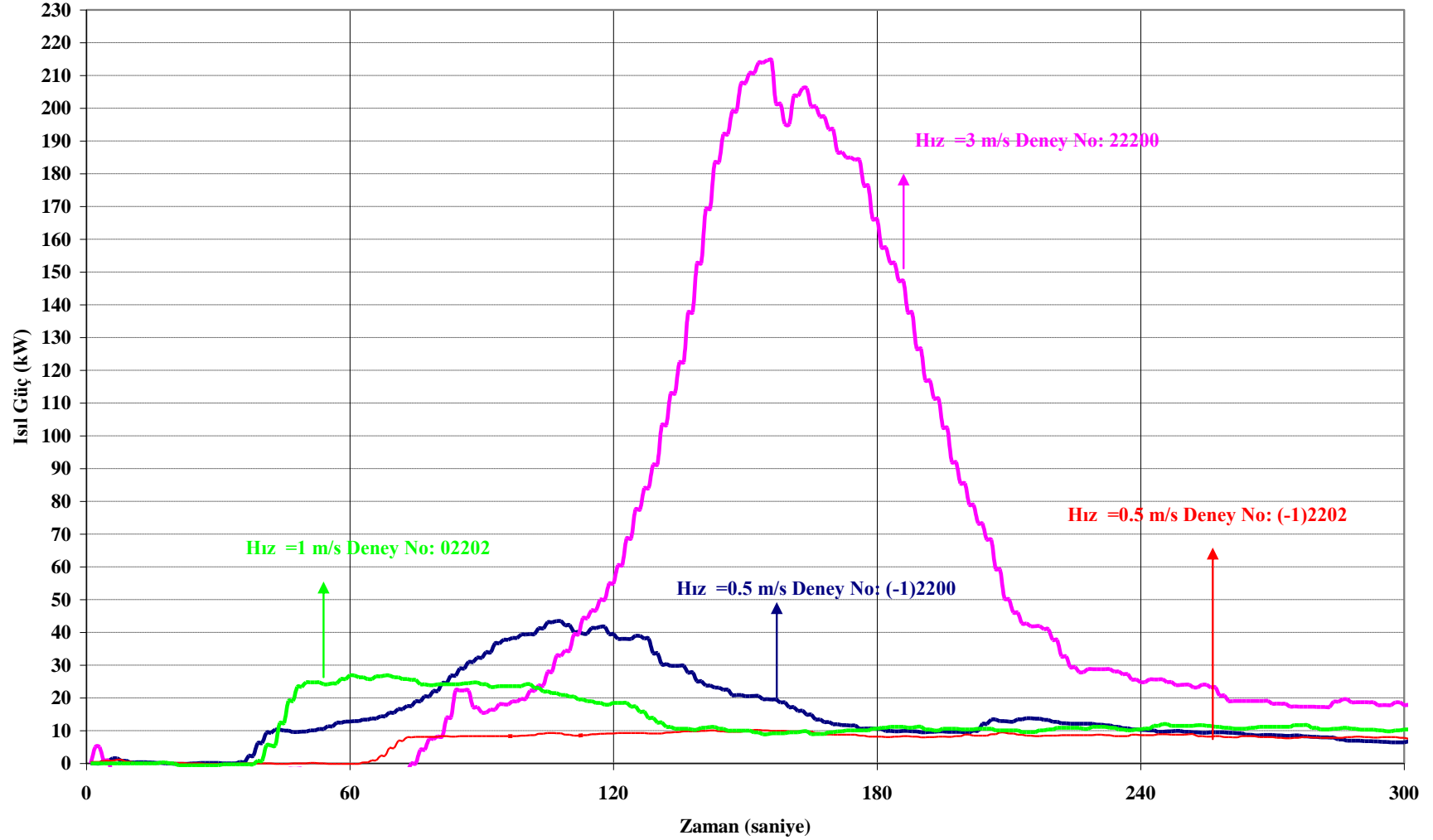
Şekil 4.13 (-1)021 - 0021 - 1020 – 20220 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



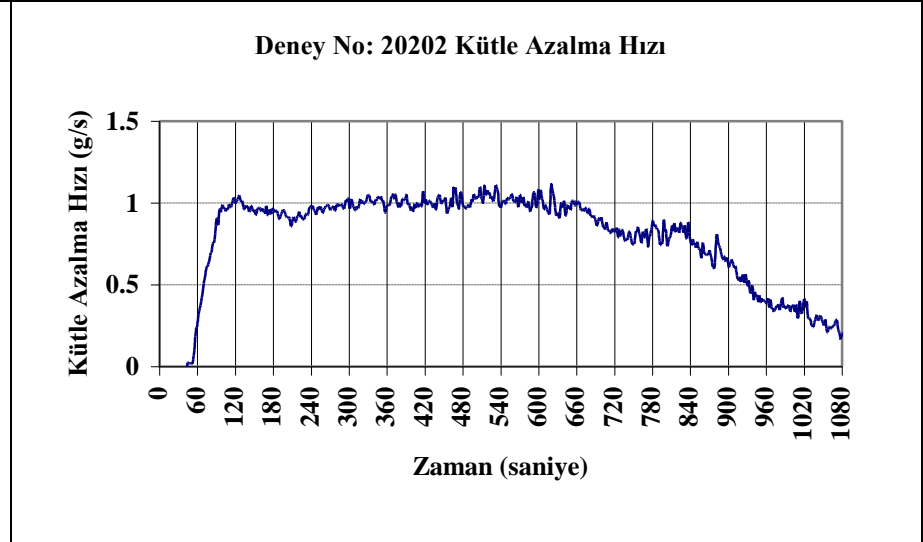
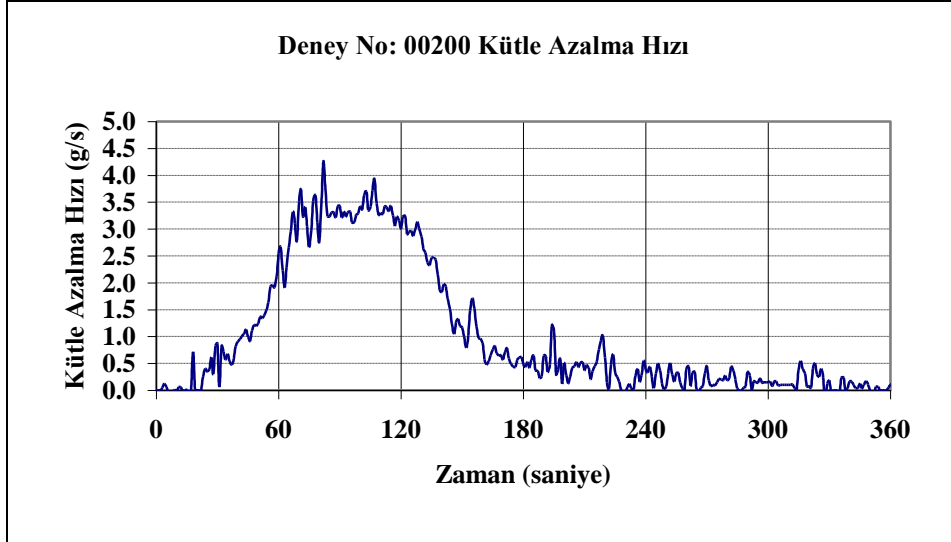
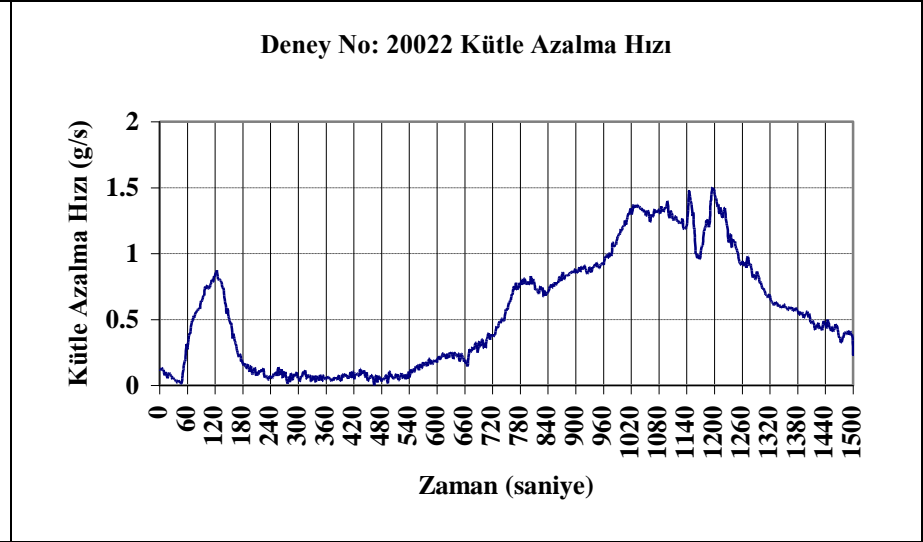
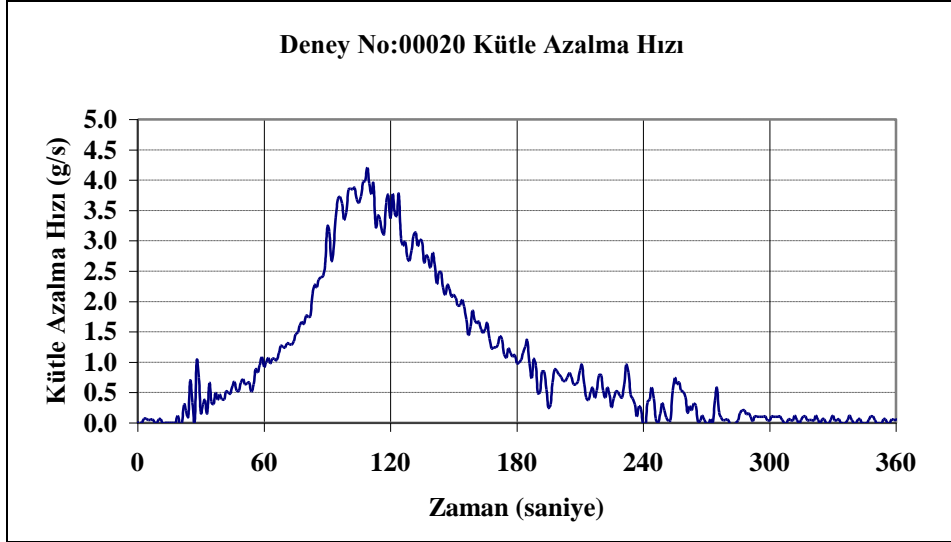
Şekil 4.14 (-1)021 - 0021 - 1020 - 20220 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



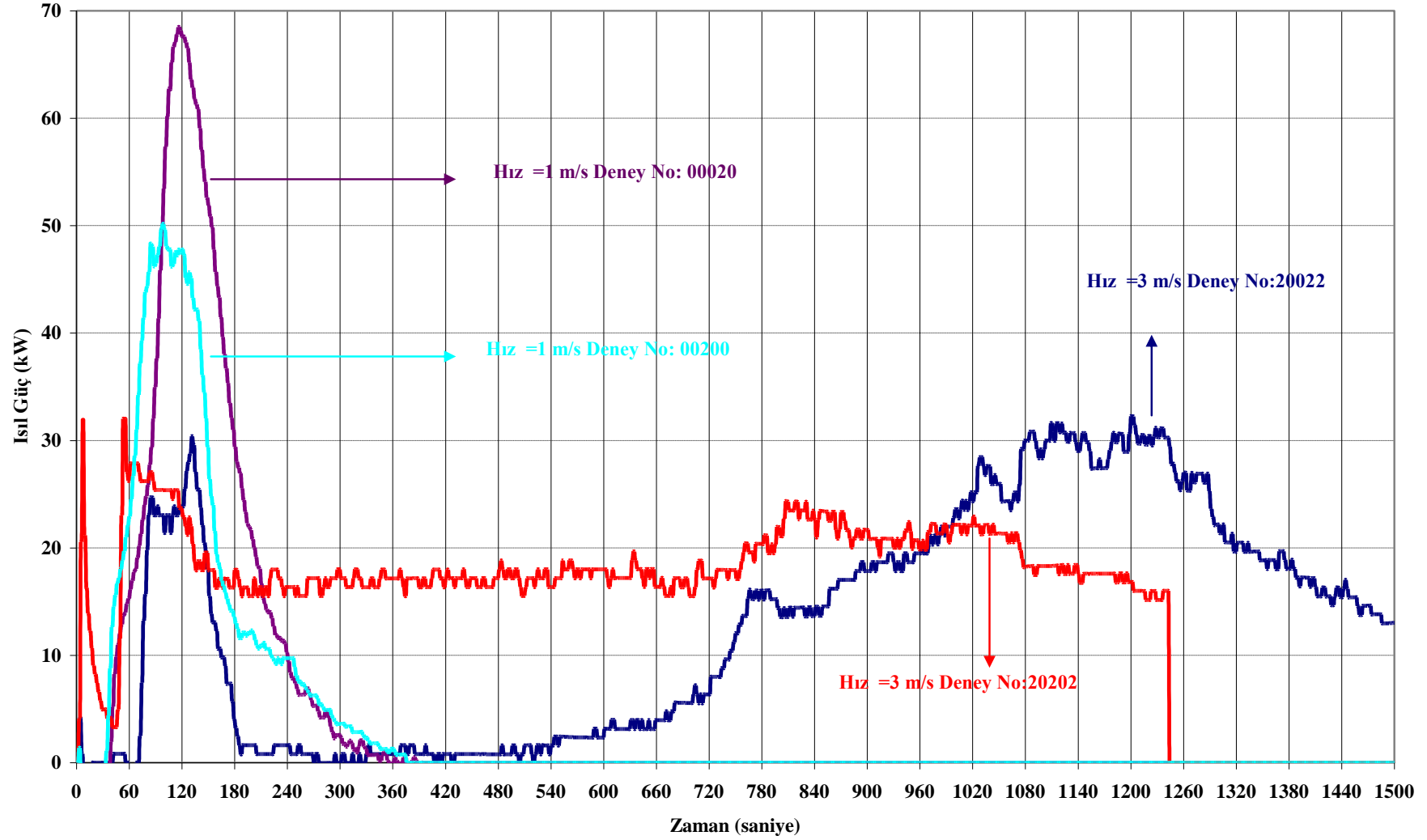
Şekil 4.15 (-1)2200 - 22200 - (-1)2202 – 02202 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



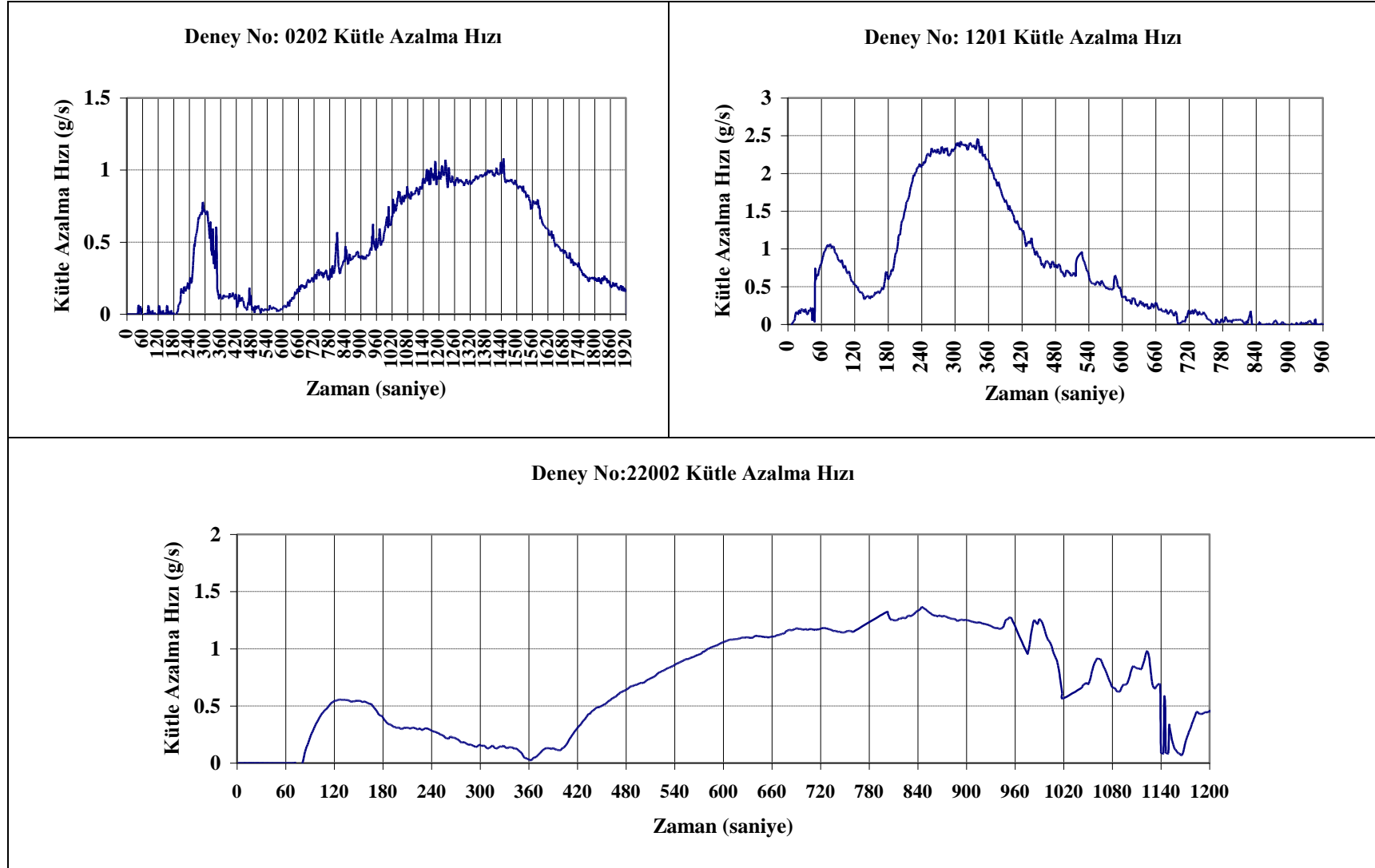
Şekil 4.16 (-1)2200 - 22200 - (-1)2202 - 02202 Numaralı Deneçlerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



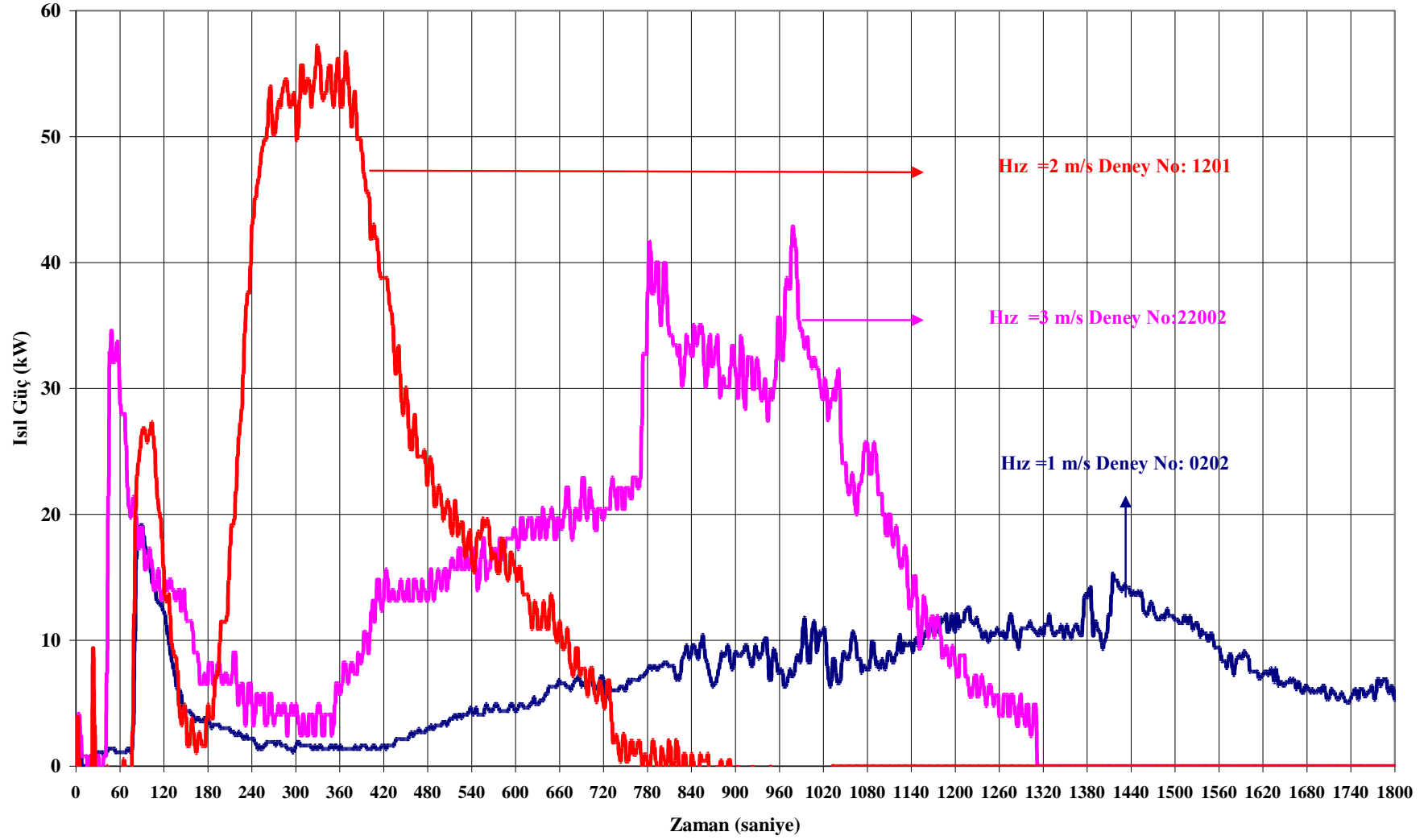
Şekil 4.17 20022 - 00020 - 20202 - 00200 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



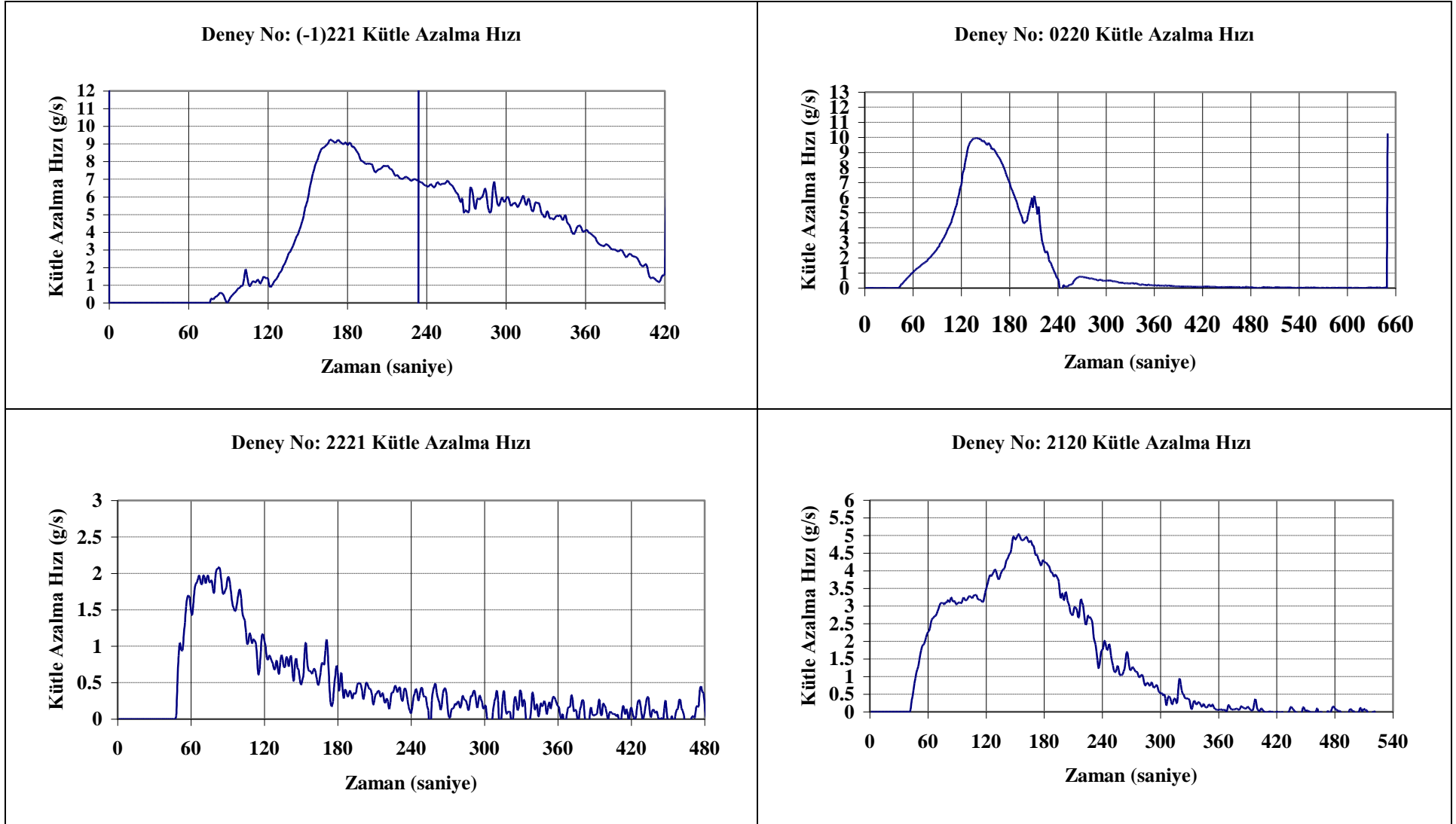
Şekil 4.18 20022 - 00020 - 20202 - 00200 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



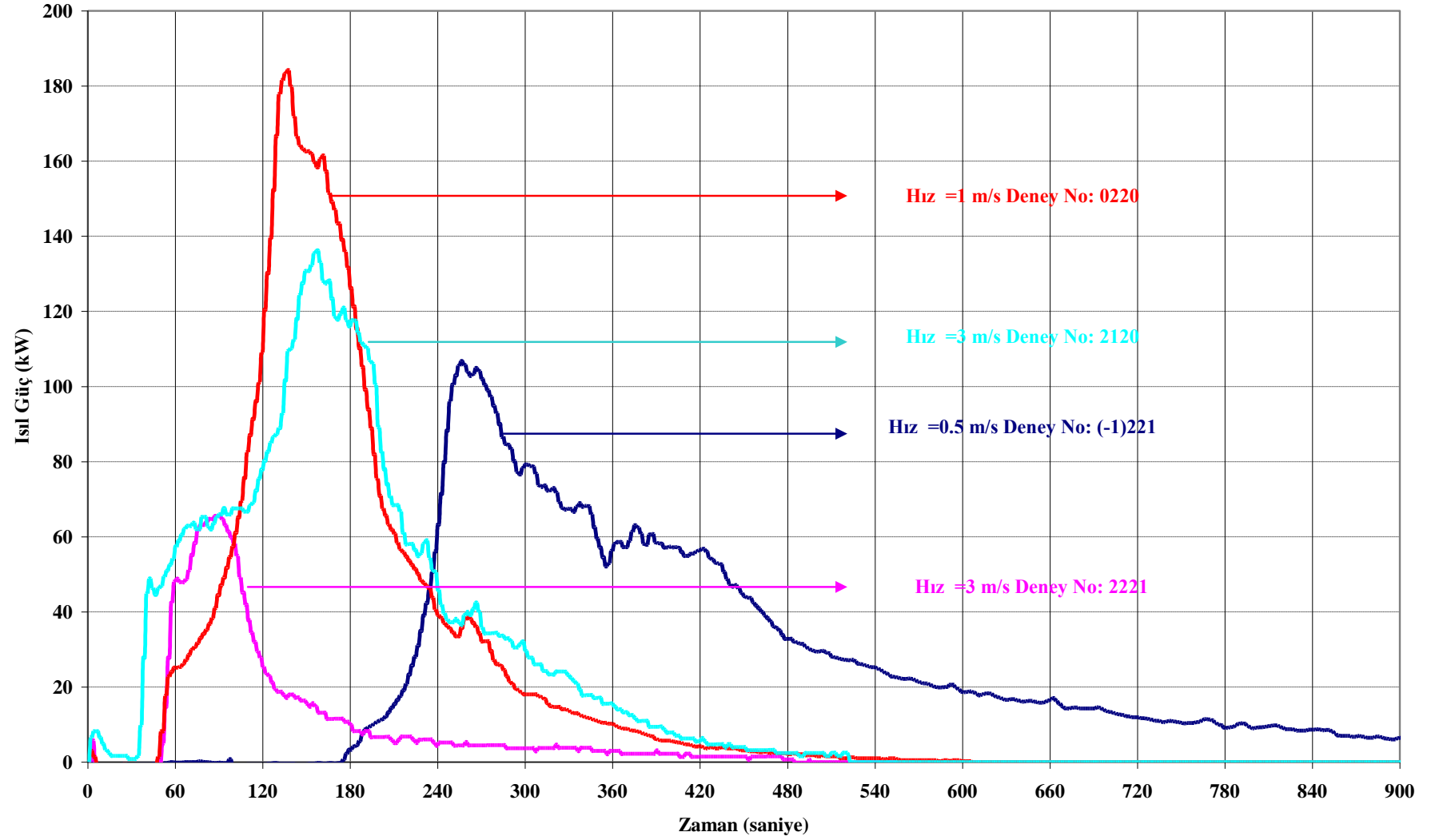
Şekil 4.19 0202 - 22002 - 1201 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



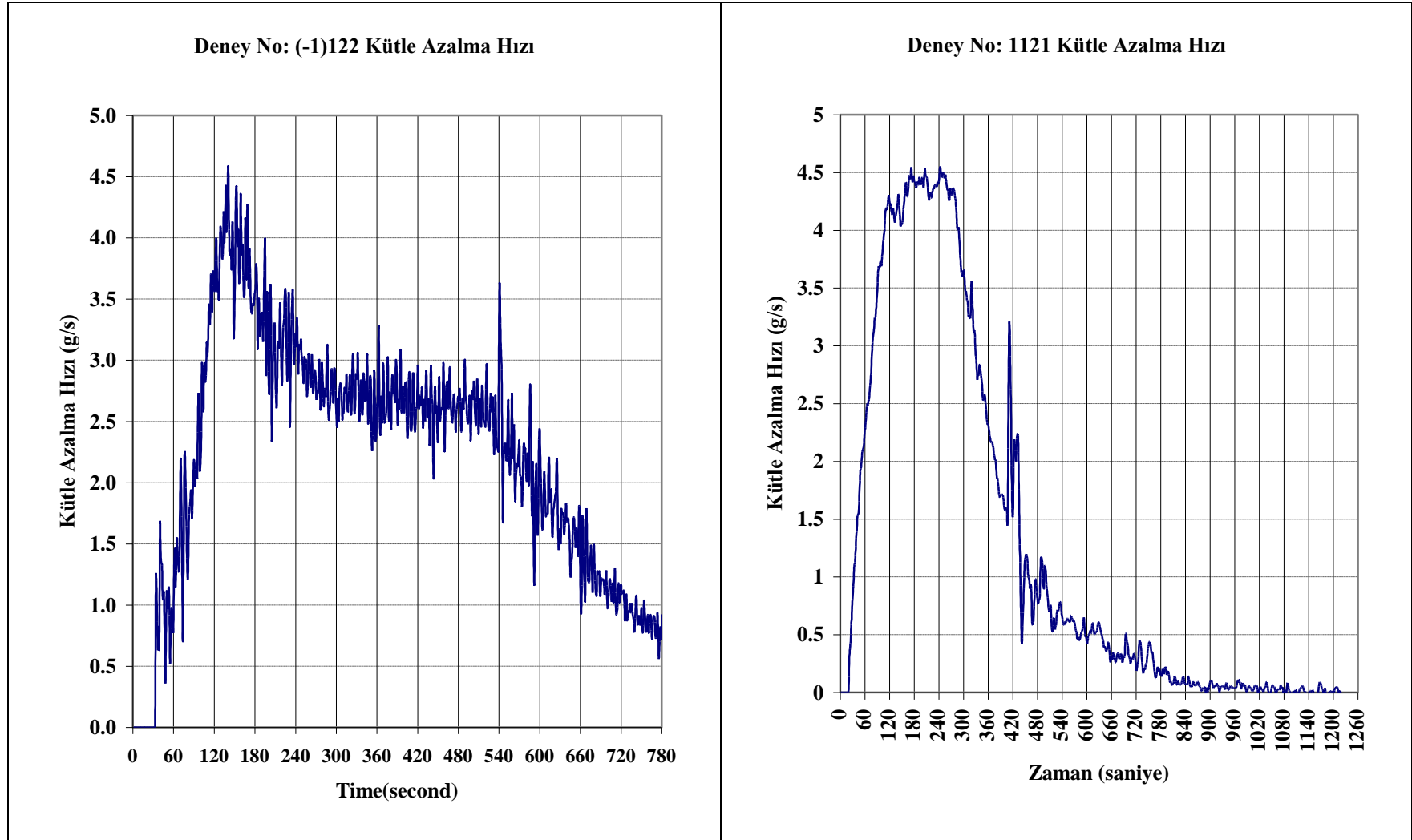
Şekil 4.20 0202 - 22002 - 1201 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



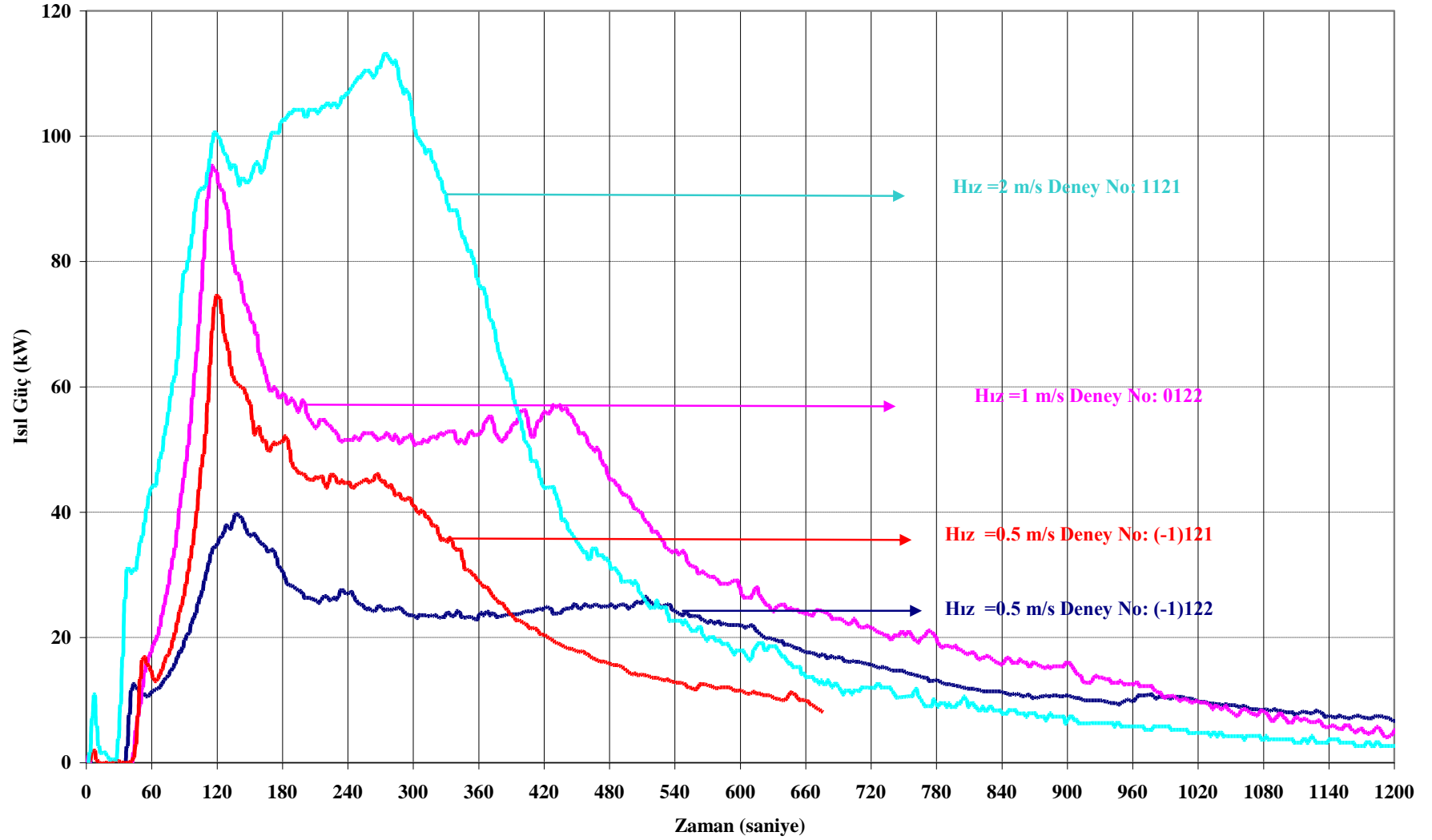
Şekil 4.21 (-1)221 - 2221 - 0220 - 2120 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



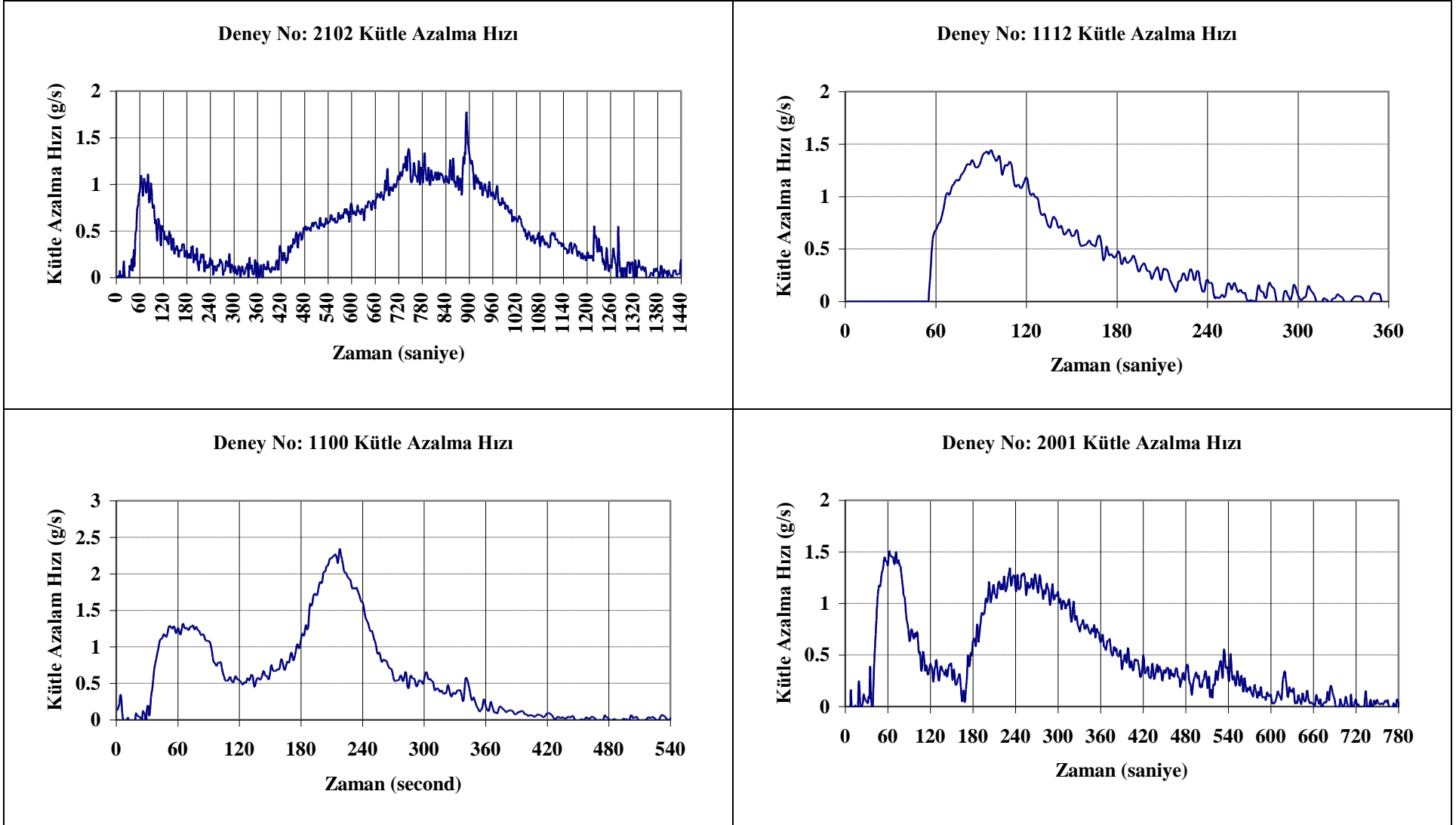
Şekil 4.22 (-1)221 - 2221 - 0220 - 2120 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



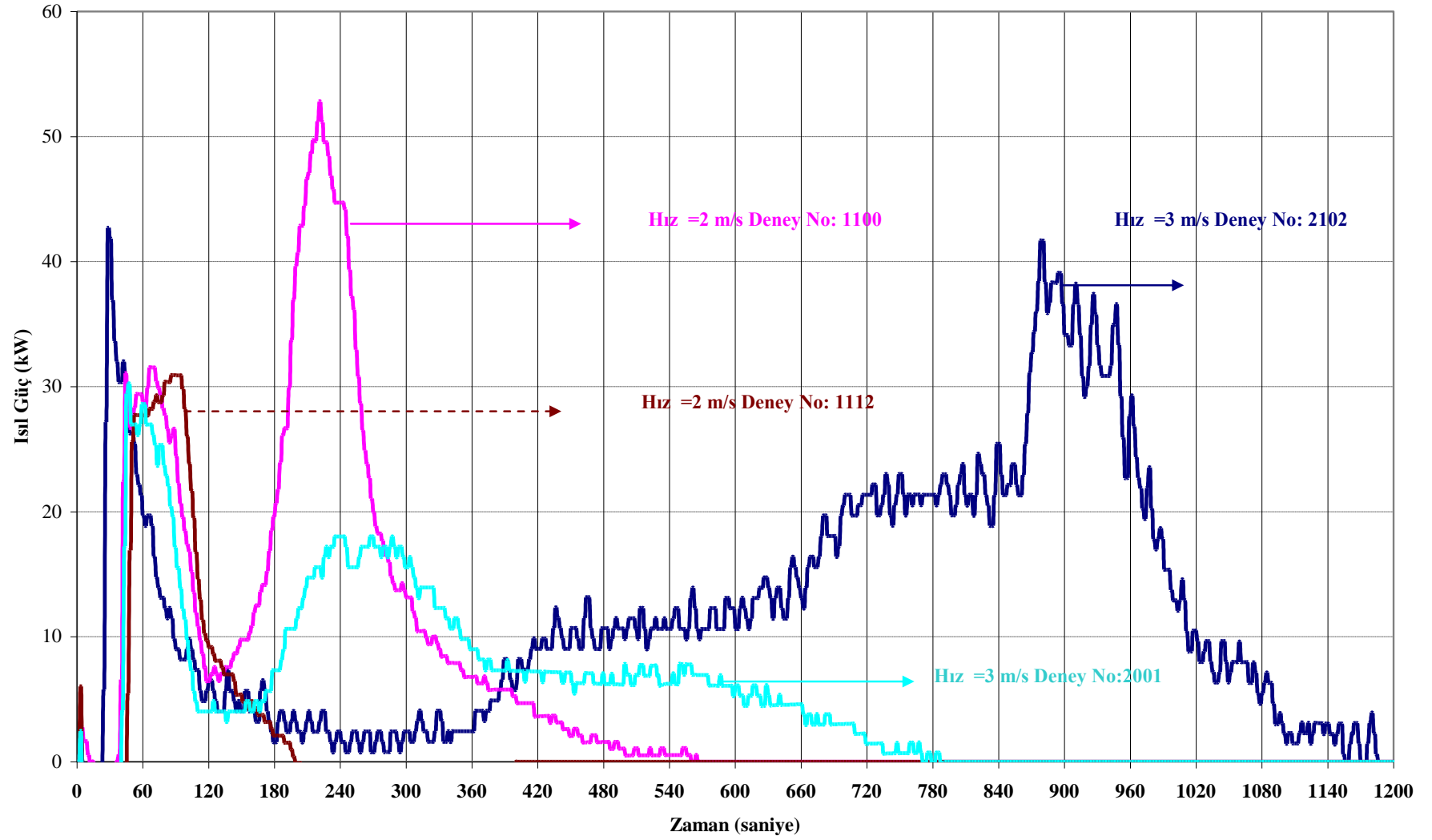
Şekil 4.23 (-1)122 – 1121 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



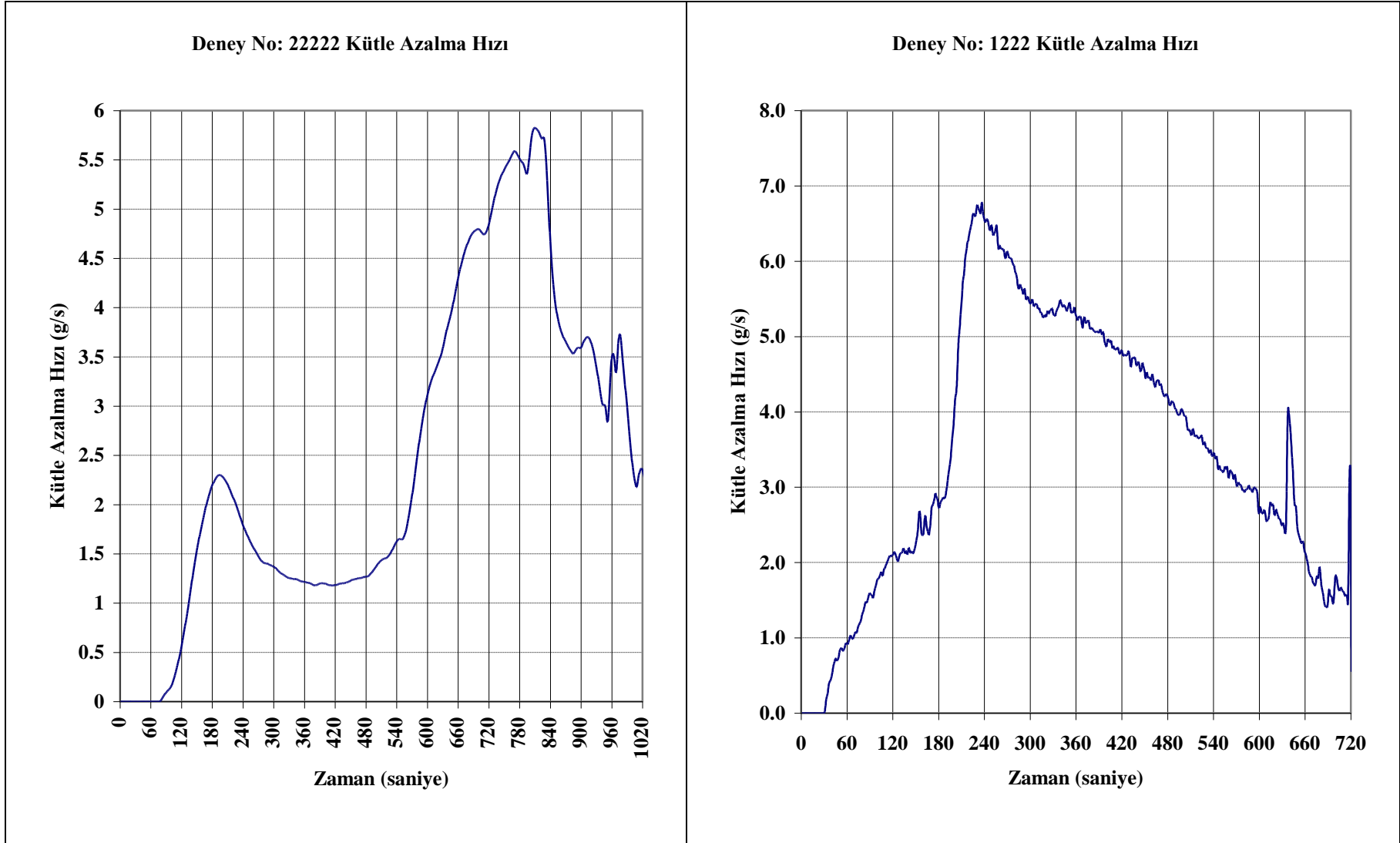
Şekil 4.24 (-1)122 – 1121 – 0122 - (-1)1121 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



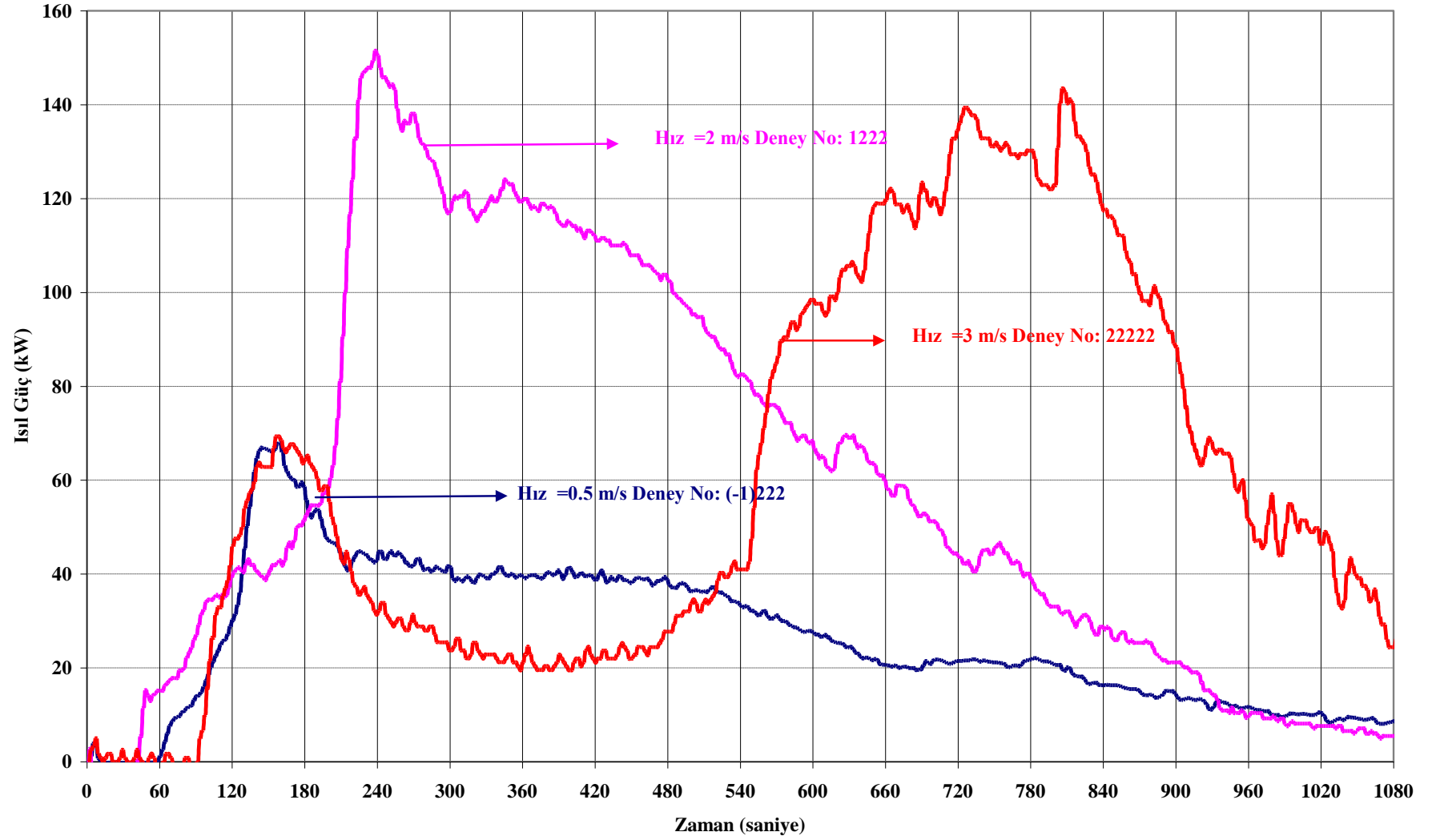
Şekil 4.25 2102 – 1112 – 1100 – 2001 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



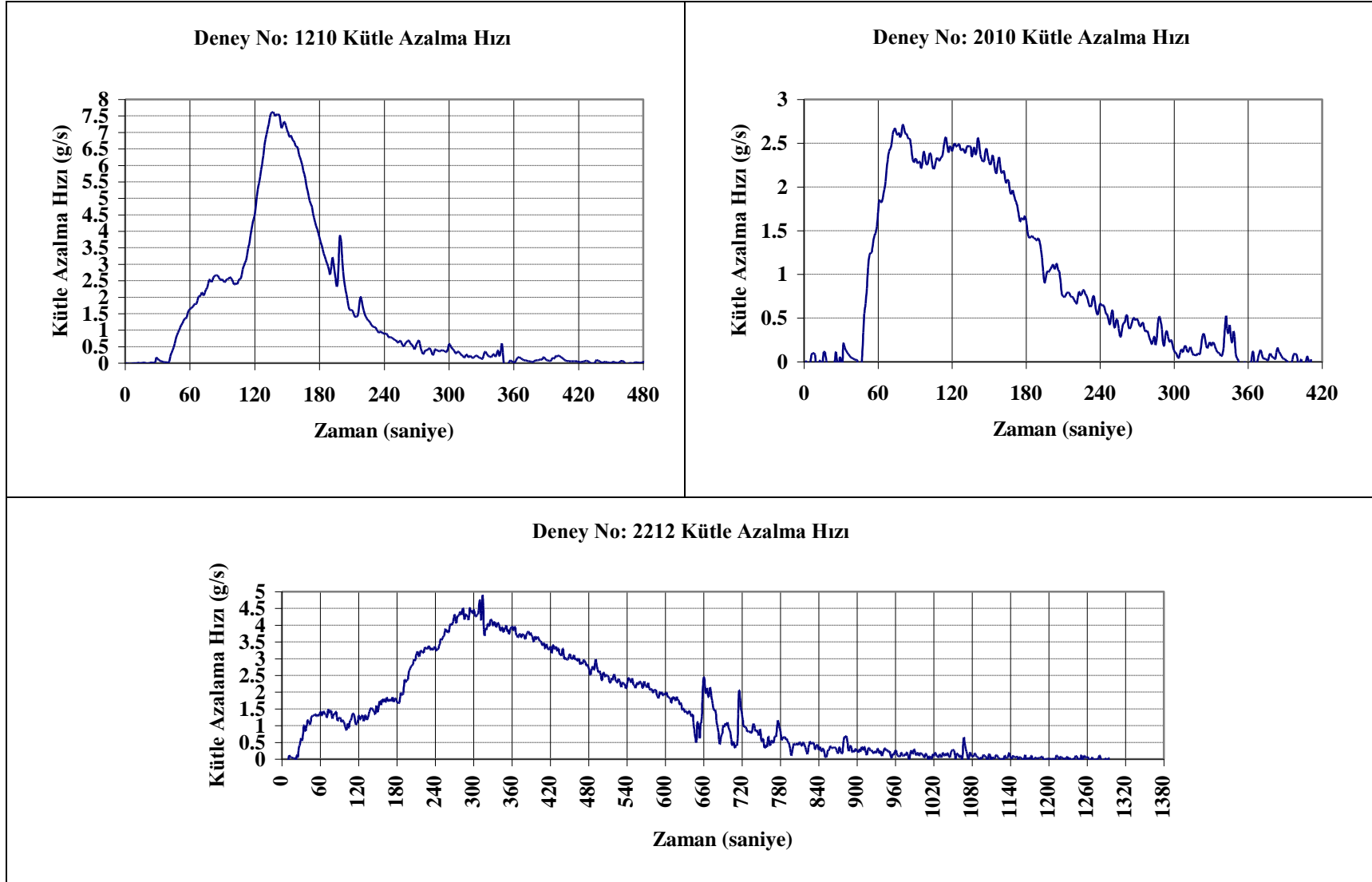
Şekil 4.26 2102 - 1112 - 1100 – 2001 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



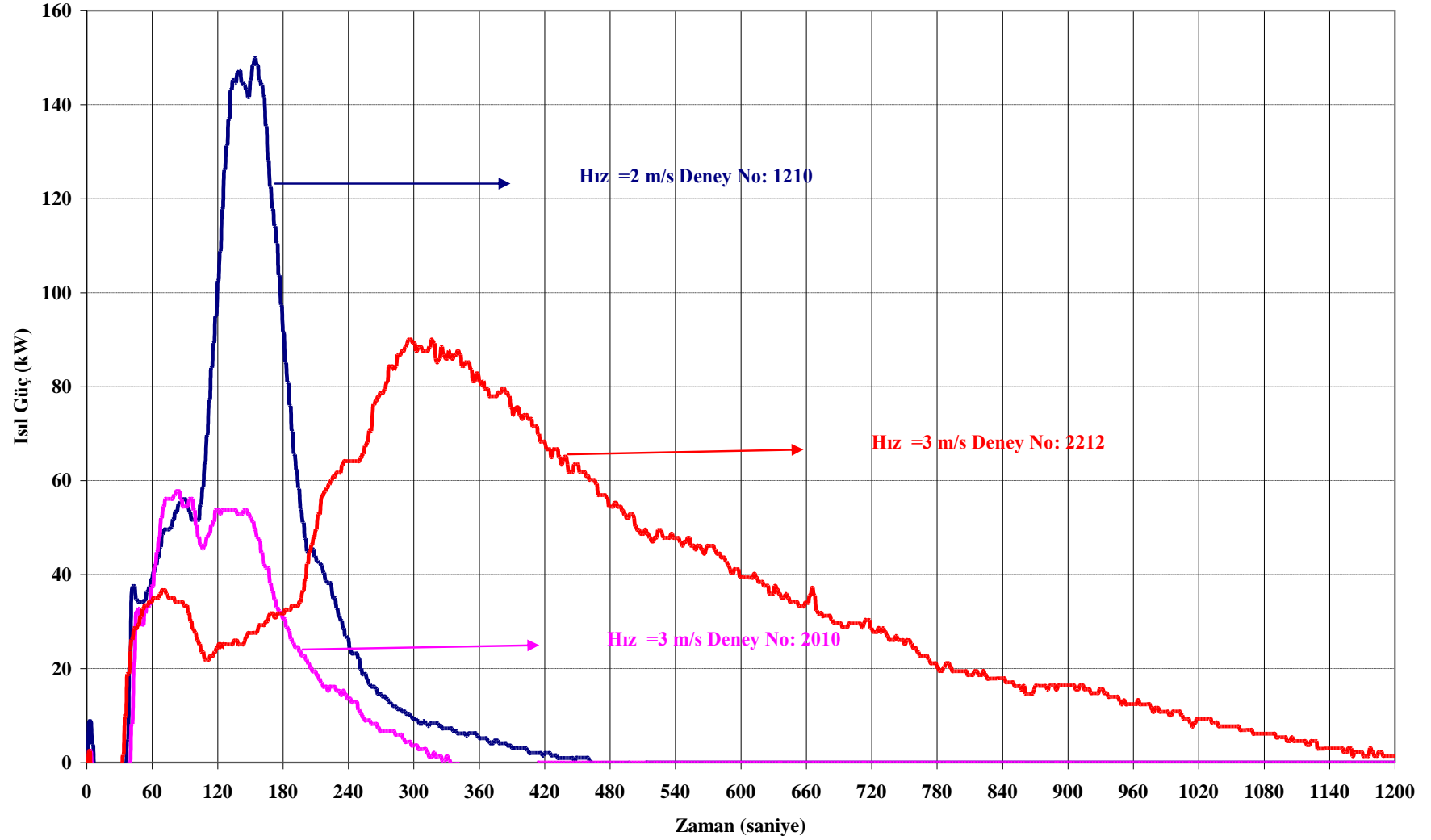
Şekil 4. 27 1222 - 22222 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



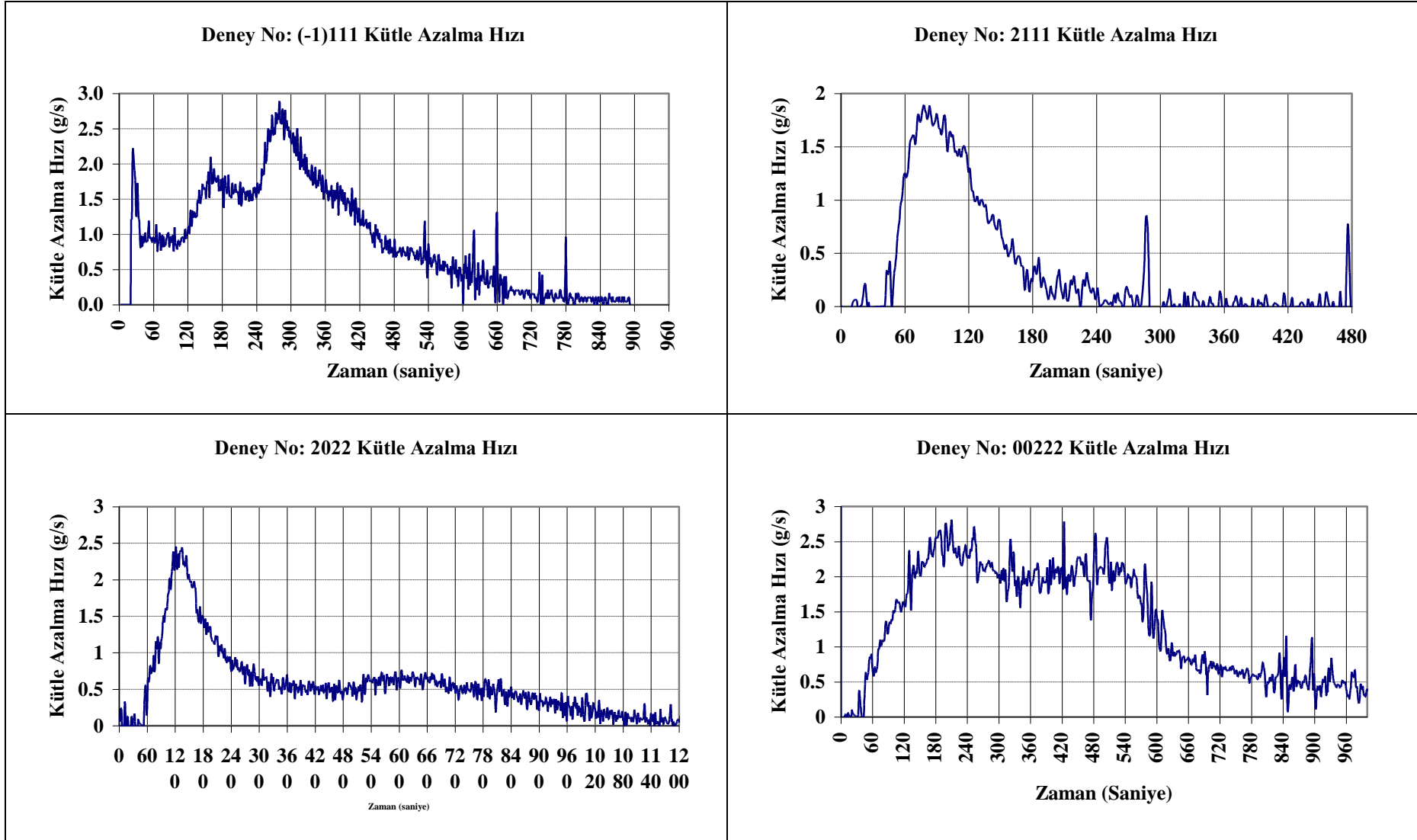
Şekil 4.28 (-1)222 - 1222 - 22222 Numaralı Deneýlerde Isıl Gücün Zamanla Deęiřimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



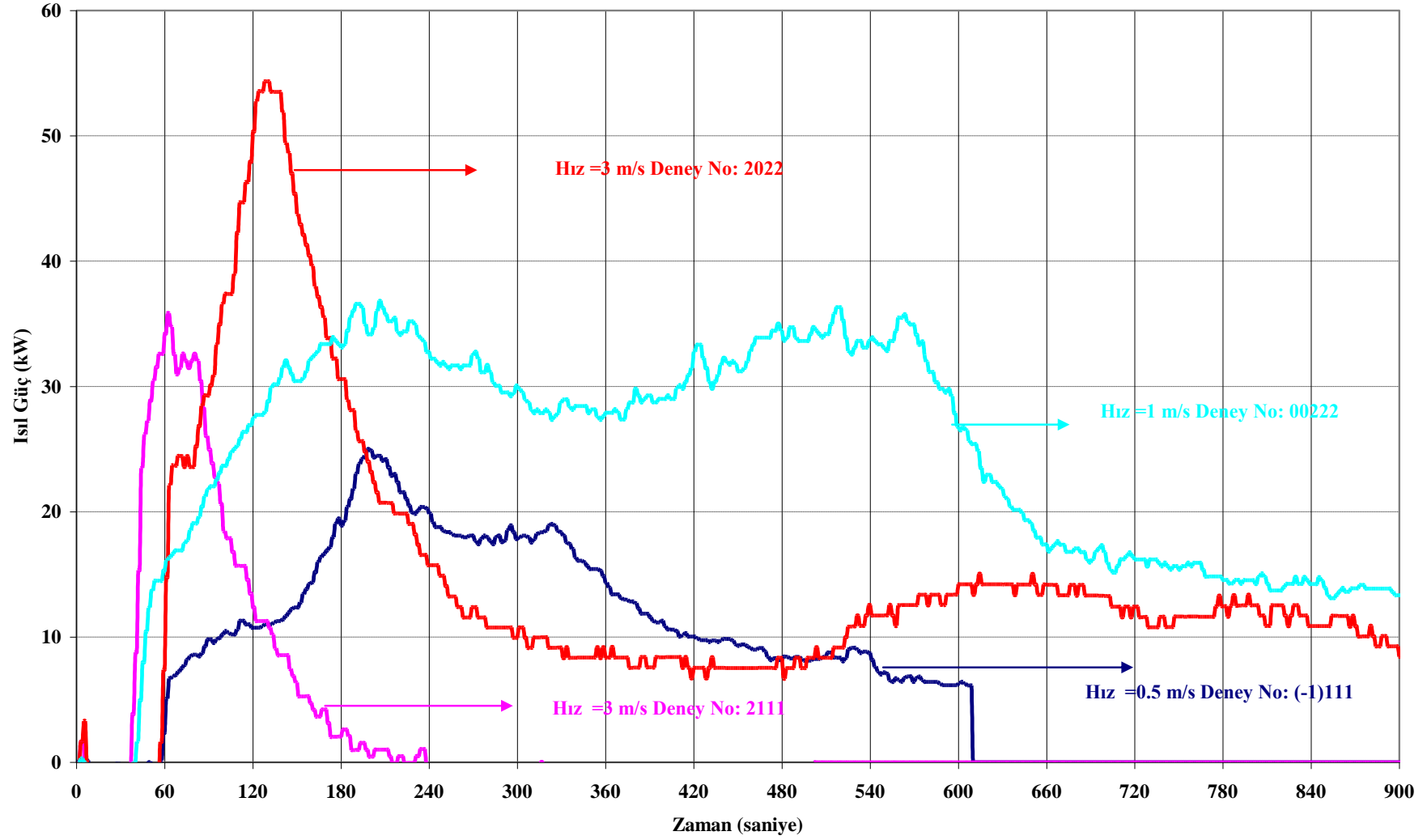
Şekil 4.29 1210 - 2010 - 2212 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



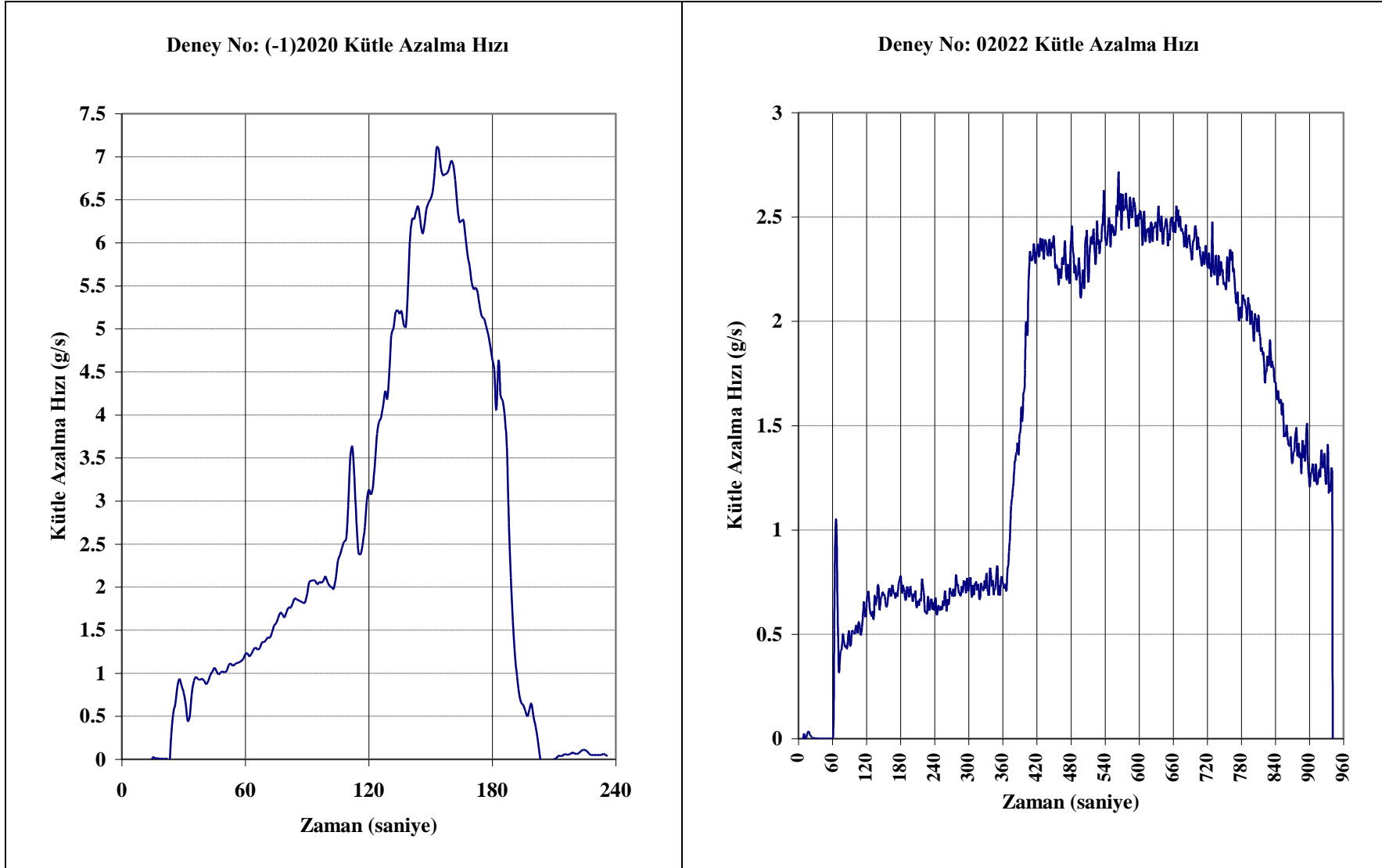
Şekil 4.30 1210 - 2010 - 2212 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



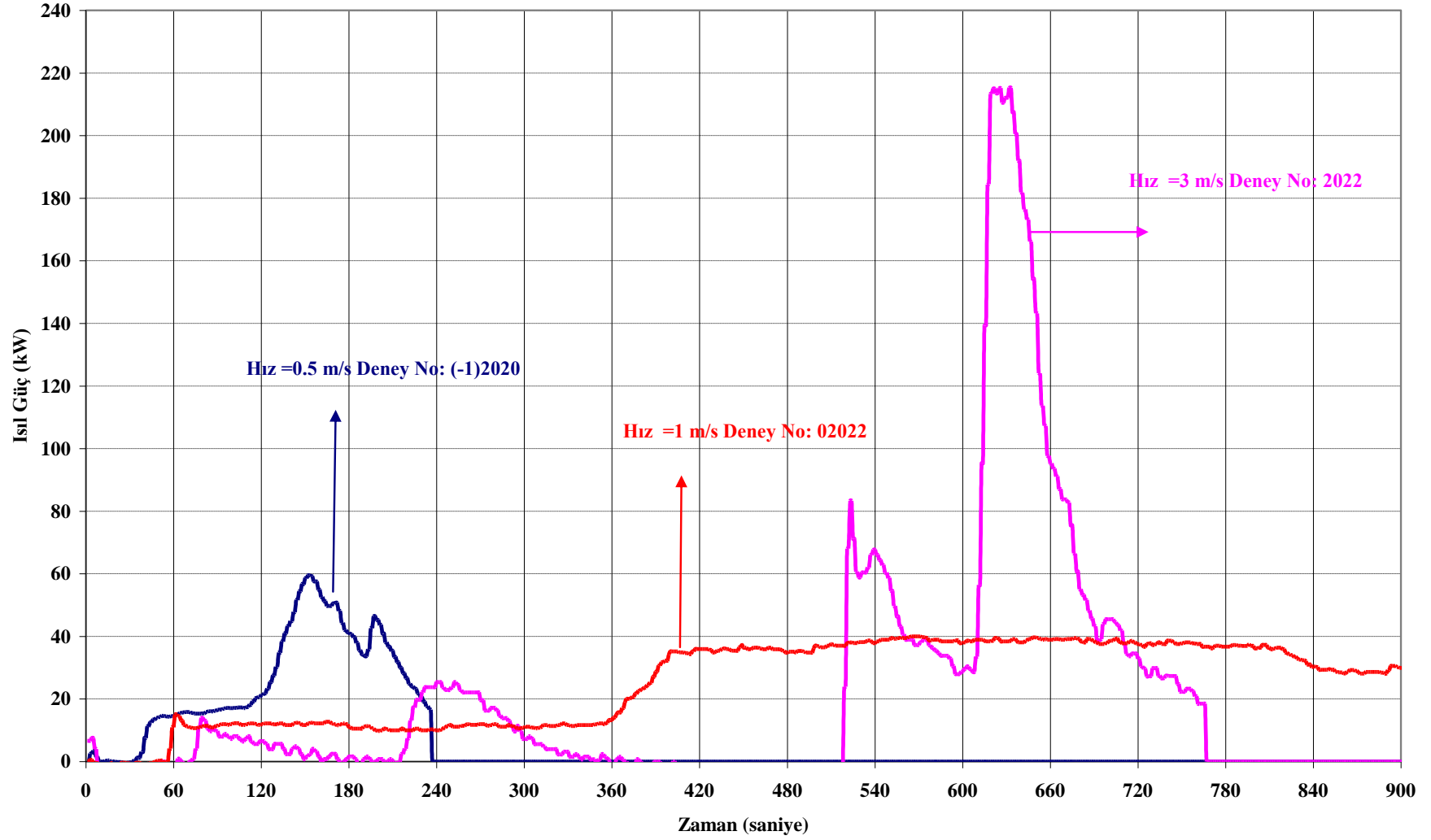
Şekil 4.31 (-1)111 - 2111 - 2022 - 00222 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



Şekil 4.32 (-1)111 - 2111 – 2022 - 00222 Numaralı Deneylerde Isıl Gücün Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



Şekil 4.33 (-1)2020 - 02022 Numaralı Deneylerde Kütle Azalma Hızının Zamanla Değişimi (Tablo 4.1 sayfa 56)



Şekil 4.34 (-1)2020 – 22020 - 02022 Numaralı Deneýlerde Isıl Gücün Zamanla Deęiřimi (Tablo 4.1 sayfa 56)

4.2 Verilerin İstatistiksel Analizi

Deney sonuçlarının sistematik bir şekilde incelenebilmesi için istatistiksel veri analiz yöntemleri kullanılmıştır. Böylelikle yapılan deneylerde model taşıt parametrelerinin ve havalandırmanın yangın yüküne ve kütle azalma hızına nasıl bir etkisi olduğu sistematik bir şekilde araştırılmıştır. İstatistiksel analizin yapılmasında ve uygunluğunun test edilmesi konusunda bu konunun uzmanlarından yardım alınmıştır.

4.2.1 Uygulanan Yöntem

Varyans analizi (ANOVA) sonucu etkileyen faktörleri analiz etmek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Bu yöntemlerle, sonuçtaki değişimin (varyansın) önceden tanımlanmış faktörlerle nasıl değiştiği tespit edilebilir. Varyans analizi sonucunda şu sonuçlar elde edilebilir:

- a) Hangi etkenin sonuca etkisinin daha fazla olduğu, ve/ veya
- b) Sonuçtaki değişiminde her bir etkenin ne kadar payı olduğu tespit edilebilmektedir.

Varyans analizi ilk olarak İngiliz istatistikçi R.A. Fischer (1890-1962) tarafından geliştirilmiştir. İlk olarak tarımsal verilerde kullanılmaya başlanan varyans analizi bugün birçok alandaki verileri analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada bahsedilen varyans analiz çeşitleri şunlardır:

1. Tek Yönlü Varyans Analizi – Çoklu gözlemlerden elde edilen sonuçlara birçok düzeyde değişen tek bir değişkenin etkisini araştırmak için kullanılır.
2. Çok Faktörlü Varyans Analizi Bir yada daha fazla bağımsız değişkenin (faktörün /etkenin) sonuç üstünde etkisini araştırmak için kullanılır. Hem ana etkenlerin hem de etkenlerin birbirleriyle etkileşimi tespit edilebilmektedir.
3. Genel Doğrusal Model- Sabit, rastgele ve karışık etkili faktörlerin bulunduğu kullanılır.

Bu çalışmada sadece tek yönlü varyans analizinin nasıl yapıldığından kısaca bahsedilecektir. Diğer yöntemler ile ilgili daha ayrıntılı bilgi almak için (MONTGOMERY, 1999 - MONTGOMERY,2002) adlı kaynaklardan elde edilebilir. İncelenen bir olaydaki sonuca bir faktörün etkisinin olup olmadığını araştırmak için her faktör düzeyi için "n" adet olmak üzere toplamda (N=an) adet deney yapıldığı varsayılmıştır. Bu deneylerden elde ettiği sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Tek Faktörlü Bir Deney Verisi

Düzeyler	Gözlemler	Toplam $y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij}$	Ortalama $\bar{y}_{i.} = y_{i.} / n$
1	y ₁₁ y ₁₂ y _{1n}	y _{1.}	$\bar{y}_{1.}$
2	y ₂₁ y ₂₂ y _{2n}	y _{2.}	$\bar{y}_{2.}$
·			
·			
·			
A	y _{a1} y _{a2} y _{an}	y _{a.}	$\bar{y}_{a.}$
		$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}$	$\bar{y}_{..} = y_{..} / N$

Verideki toplam değişim Denklem 6.1 kullanılarak hesaplanır. Bu değişime toplam kareler toplamı da denir.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad \text{Denklem 5.1}$$

Bu denklem açık şekliyle yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$SS_T = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad \text{Denklem 5.2}$$

Denklem 6.2’de ilk terim düzeyler arası kareler toplamı, ikinci terim ise düzeyler içi kareler toplamı olarak adlandırılır (ERBAŞ,2006). Toplam kareler toplamı hata kareler toplamı olarak ifade edilir.

$$SS_T = SS_{Düzyey} + SS_{Hata} \quad \text{Denklem 5.3}$$

Deneyde N gözlem bulunduğundan SS_T N-1 serbestlik derecesine sahiptir. SS_{düzyey} ise a-1 serbestlik derecesinde SS_{Hata} ise N-a serbestlik derecesindedir. Bu değerlerin kareler ortalaması ise

$$MS_{Düzyey} = \frac{SS_{Düzyey}}{a - 1} \quad \text{Denklem 5.4}$$

$$MS_{Hata} = \frac{SS_{Hata}}{N - a} \quad \text{Denklem 5.5}$$

kullanılarak hesaplanır. İstatistiksel test prosedürü Table 5.3’te gösterilmiştir. Faktör ortalamalarının sonuç üstünde bir etkisi olduğu tespit edebilmek F_o değerinin F dağılım tablosunda verilen F_{α,a-1, N-a} değerinden büyük olması gerekmektedir. Burada α önemlilik düzeyidir. Bir başka karar verme yöntemi ise p- değeri yaklaşımıdır. P- değeri veriler arası farkın önemli olduğunu kabul etmek için gereken en küçük önemlilik düzeyini belirtir. Kısaca, p değeri önemlilik düzeyinden küçük olduğunda verideki değişim önemlidir.

Tablo 4.3 Tek Faktörlü Sabit Etkili Bir Modelin Varyans Analiz Tablosu

Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F _o
Düzeyler Arasında	$SS_{Levels} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	a-1	$MS_{Level} = \frac{SS_{Level}}{a-1}$	$F_o = \frac{MS_{Level}}{MS_E}$
Hata	$SS_{Error} = SS_T - SS_{Level}$	N-a	$MS_{Error} = \frac{SS_{Error}}{N-a}$	
Toplam	$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	N-1		

4.2.2. İstatistiksel Analiz Sonuçları

Analizlerde teste tutulacak değişkenler arasında ilişkinin olup olmadığını tespit etmek için teste tabi tutulurlar. Bu test Pearson-korelasyon katsayısı ve p değerinin karşılaştırılmasıyla yapılır. Pearson korelasyon katsayısı -1 ile +1 arasında değişmektedir. Bu değer 0 olduğunda veriler arasında doğrusal bir ilişkinin olmadığını belirtir. Karşılaştırma için kullanılan p-değeri belirlenen önemlilik düzeyi değerinden (α -değeri) küçük veya eşit olması durumunda korelasyon değerinin sıfırdan farklı olduğu sonucu çıkarılabilir. Ancak, p değeri belirlenen α -değerinden büyük ise korelasyonun sıfırdan farklı olduğu sonucu çıkarılamaz. " α " değeri testi gerçekleştirilmeden önce seçilir. Bu değer için 0 ile 1 arasında bir değer seçilebilir. Genellikle 0.05 değeri kullanılmaktadır.

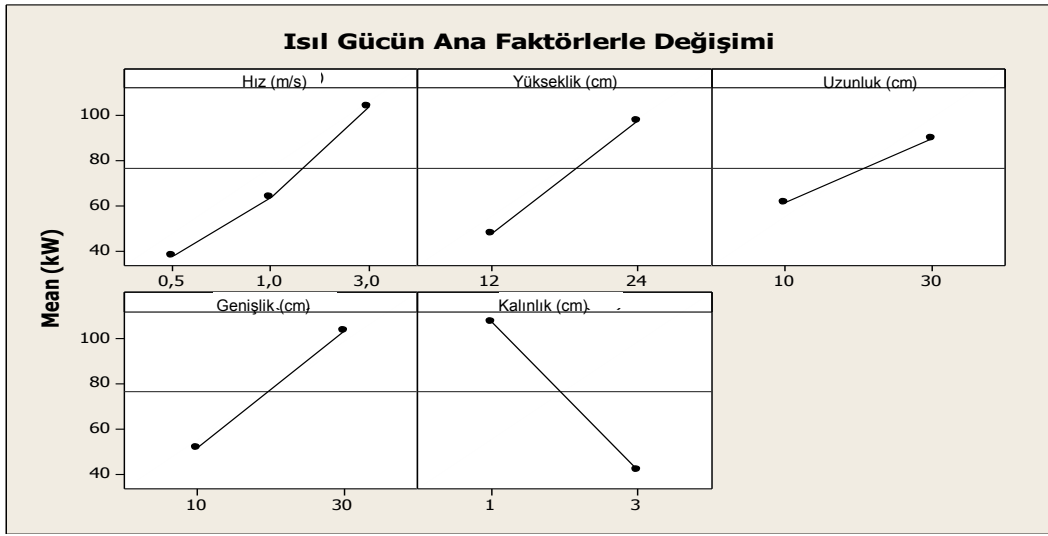
Tablo 4.4 Veriler Arasında Korelasyon Değerlendirmesi

		Yükseklik (cm)	Uzunluk (cm)	Kalınlık (cm)
Uzunluk(cm)	Pearson	-0,000		
	P-Değeri	1.000		
Kalınlık (cm)	Pearson	0.000	0,089	
	P-Değeri	1.000	0,634	
Kütle (gr)	Pearson	0,410	0,656	0,580
	P-Değeri	0,003	0,000	0,694
Blokaj Oranı	Pearson	0,515	0,827	0,074
	P-Değeri	0,003	0,000	0,694
		Blokaj Oranı	Gözeneklilik	
Gözeneklilik	Pearson	0.539		
	P-Değeri	0.002		
As	Pearson	0.879	0.520	
	P-Değeri	0.000	0.003	
Kütle	Pearson	0.799		
	P-Değeri	0.000		

Tablo 4.4 incelendiğinde kütle ve blokaj oranı, gözeneklilik ve blokaj oranı, uzunluk ve yükseklikle blokaj oranı, kütle ile uzunluk ve yükseklik aynı modelde kullanılması mümkün değildir.

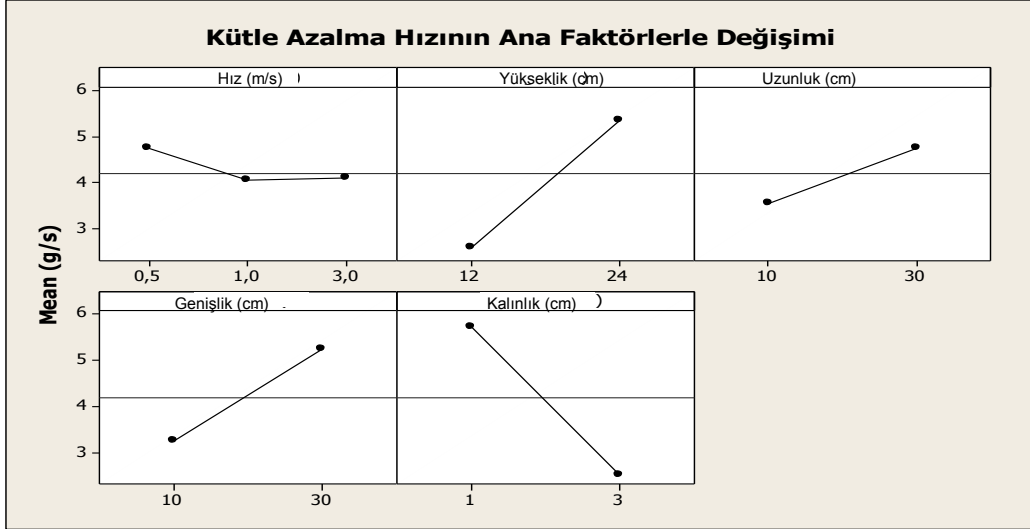
İlk varyans analizi ana faktörlerin önemini araştırmak için yapılmıştır. Havalandırma hızı, uzunluk, kalınlık, genişlik ve yükseklik ana faktörlerdir. Analizde kullanılan deneysel veriler 00222, 20000, 00002, 02000, 22002, 20220, 02220, 22222, (-1)2200, 22200, (-1)2202, 02202, 20022, 00020, 20202, 00200, (-1)2020, 22020, 02022 numaralı deneylerden alınmıştır. Varyans analizi Minitab 15.1 istatistiksel analiz yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Yangının ısı gücü ve kütle azalma hızının ana faktörlerle nasıl değiştiği Şekil 4.35 ve 4.36'da gösterilmiştir.

Şekil 4.35'e göre hız, yükseklik, uzunluk ve genişlik ısı gücü ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ancak, tahta kalınlığı arttıkça ısı gücü değerinin azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.35 Isıl Gücün Ana Faktörlerle Değişimi (L≠ W)

Şekil 4.36'a göre ise yükseklik, uzunluk ve genişlik kütle azalma hızıyla doğru orantılı şekilde değişirken havalandırma hızının kütle azalma hızına olumsuz bir etkilediği söylenebilir. Bu sonuç çok tutarlı bir sonuç olmayabilir çünkü kütle azalma hızındaki değişim sadece 0.5 g/s 'dir. Kalınlık ile kütle azalma hızı arasındaki ilişki ısı gücü ile kalınlık arasındaki ilişki ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.36 Kütle Azalma Hızının Ana Faktörlerle Değişimi (L≠ W)

Minitab yazılımı kullanılarak elde edilen varyans analizi sonuç tablosu Şekil 4.37’de verilmiştir. Analizlerde α -düzeyi 0.05 olarak alınmıştır. Bu model kütle azalma hızındaki değişimin %78.77’sini açıklayabilmektedir. Bu sonuca varyans analizi tablosundaki R-Sq(adj) değerine bakılarak ulaşılmıştır.

General Linear Model: M(gr/s) versus Velocity(m/s); Thickness(cm); ...

Factor	Type	Levels	Values
Velocity(m/s)	fixed	3	0,5; 1,0; 3,0
Thickness(cm)	fixed	2	1; 3
Length(cm)	fixed	2	10; 30
Width(cm)	fixed	2	10; 30
Height(cm)	fixed	2	12; 24

Analysis of Variance for M(gr/s), using Adjusted SS for Tests							
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Pambient(kPa)	1	71,170	18,261	18,261	10,31	0,008	
Velocity(m/s)	2	9,388	2,598	1,299	0,73	0,502	
Thickness(cm)	1	23,429	28,407	28,407	16,04	0,002	
Length(cm)	1	0,924	3,700	3,700	2,09	0,176	
Width(cm)	1	6,407	8,529	8,529	4,81	0,051	
Height(cm)	1	19,373	19,373	19,373	10,94	0,007	
Error	11	19,486	19,486	1,771			
Total	18	150,178					

S = 1,33097 R-Sq = 87,02% R-Sq(adj) = 78,77%

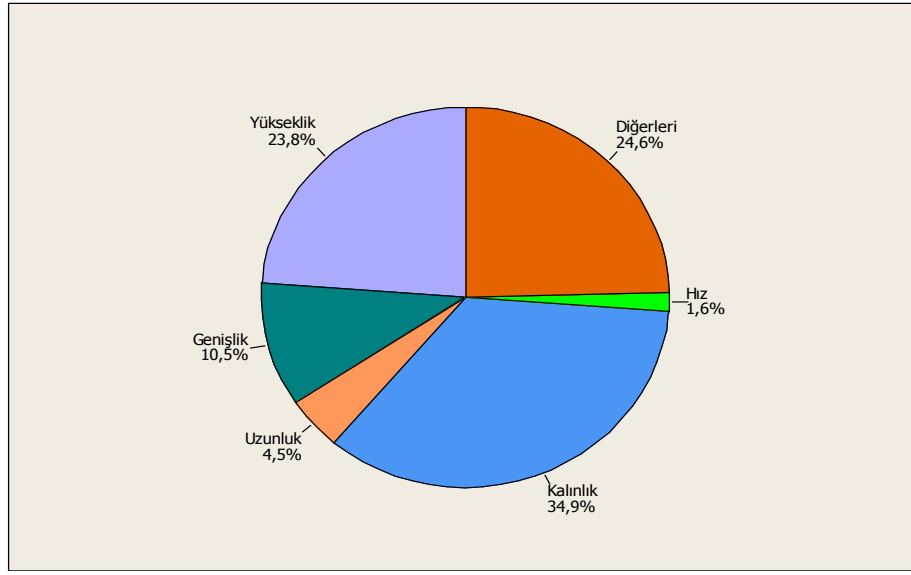
Şekil 4.37 Kütle Azalma Hızı için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı (L≠ W)

Şekil 4.34’de kütle azalma hızı verileri baz alındığında değişime neden olan bileşenlerin etkisi, yüzdelik dağılımlar şeklinde sunulmuştur. Kütle azalma hızındaki değişimin

- %23.8’sine yükseklik,

- %34.9'una kalınlık,
- %10.5'ine genişlik,
- %4.5'ine uzunluk,
- %1.6'sına hız,
- %24.6 diğer bileşenlerin

neden olduğu sonucuna varılmıştır. Yanan objenin genişliğinin değişimi uzunluğunun değişiminden daha fazla yanma hızına etkili olduğu görülmektedir. Bunlara ek olarak yanan modelin yüksekliği arttıkça tavanla yanan cisim arasındaki mesafenin azalması nedeniyle yanma hızında artış görülmektedir. Yanan objenin genişliği arttıkça duvarlarla yanan obje arasında mesafe azalması da yanma hızında artışa neden olmaktadır.



Şekil 4.38 Kütle Azalma Hızındaki Değişimin Bileşenleri ($L \neq W$)

Isıl güç verileri için Minitab yazılımı kullanılarak yapılan varyans analizi sonuç tablosu Şekil 4.39'da verilmiştir. Bu modelle ısıl güçteki değişimin % 78.01'lik kısmını açıklayabilmektedir.

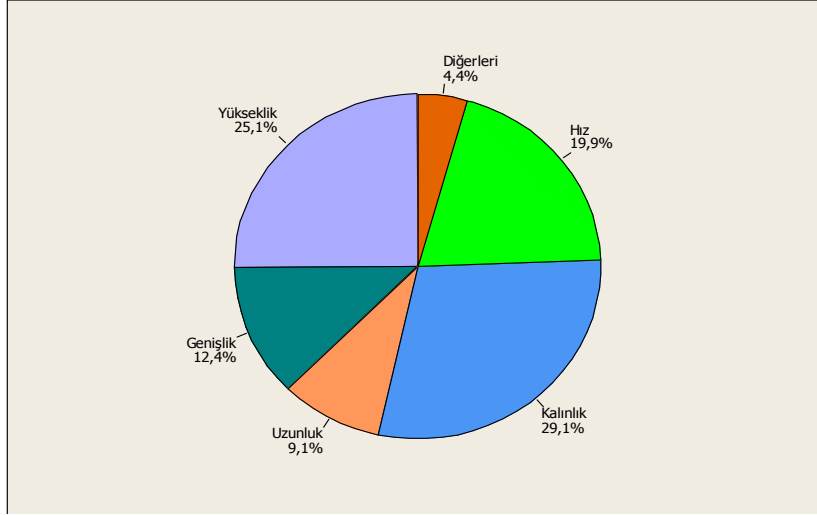
General Linear Model: Q(kW) versus Velocity(m/s); Thickness(cm); ...						
Factor	Type	Levels	Values			
Velocity (m/s)	fixed	3	0,5; 1,0; 3,0			
Thickness (cm)	fixed	2	1; 3			
Length (cm)	fixed	2	10; 30			
Width (cm)	fixed	2	10; 30			
Height (cm)	fixed	2	12; 24			
Analysis of Variance for Q(kW), using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pambient (kPa)	1	22768	2567	2567	2,34	0,154
Velocity (m/s)	2	18253	24167	12083	11,04	0,002
Thickness (cm)	1	13419	17605	17605	16,08	0,002
Length (cm)	1	2174	5489	5489	5,01	0,047
Width (cm)	1	5767	7538	7538	6,88	0,024
Height (cm)	1	15190	15190	15190	13,87	0,003
Error	11	12043	12043	1095		
Total	18	89614				
S = 33,0883 R-Sq = 86,56% R-Sq(adj) = 78,01%						

Şekil 4.39 Isıl Güç için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı (L≠ W)

Şekil 4.40'da ısı gücü verileri baz alındığında değişime neden olan bileşenlerin etkisi, yüzdelerle dağılımlar şeklinde sunulmuştur. Isıl güçteki değişimin

- %25.1'ine yükseklik,
- %29.1'ine kalınlık,
- %12.4'üne genişlik,
- %9.1'ine uzunluk,
- %19.9'una hız,
- %4.4'nün diğer bileşenlerin

neden olduğu sonucuna varılmıştır. Yanan objenin genişliğinin değişimi uzunluğunun değişiminden daha fazla yangın yüküne etkili olduğu görülmektedir. Her iki veri seti için yapılan analizlerde önemli bir farklılık havalandırma hızının yangın yüküne ve kütle azalma hızına etkisi ile elde edilen sonuçlardır. Kütle azalma hızı ölçümünün ısı gücü ölçümüne göre havalandırma hızı, yükseklik, genişlik ve uzunluk dışındaki diğer parametrelerden daha çok etkilendiği sonucu çıkarılabilir. Kütle azalma hızındaki değişimin hız değişimi ile sadece 0.5 g/s olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda kütle azalma hızına göre karar verilmesinin yanlış sonuçlar doğurabilme ihtimalinin olduğu gözden kaçırılmamalıdır.

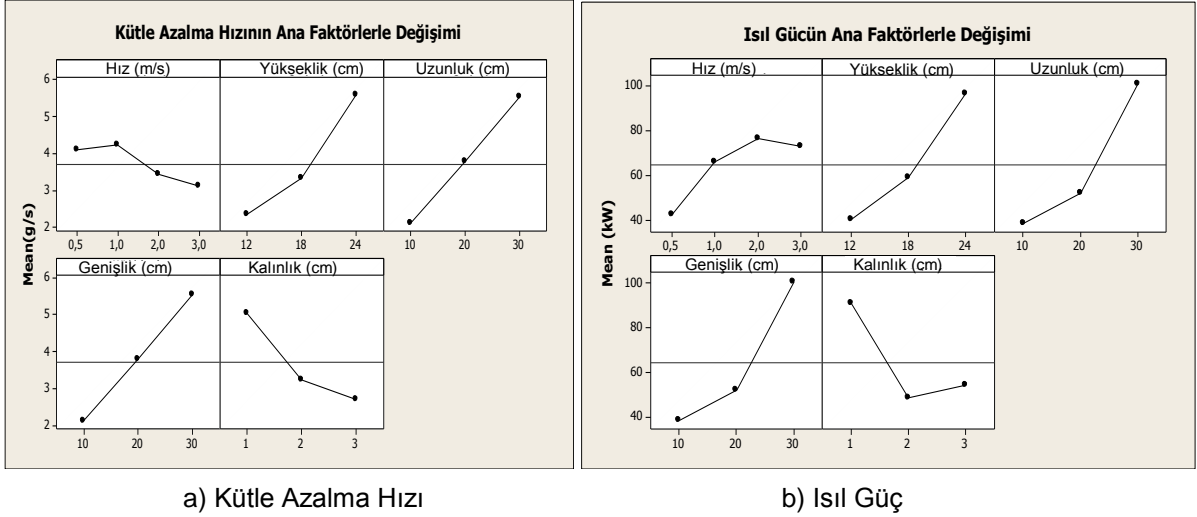


Şekil 4.40 Isıl Güçteki Değişimin Bileşenleri (L ≠ W)

Kare tabanlı tahta kafes yapısı, tekrarlanabilir karakteristiğe sahiptir. Blokaj oranının yangın yüküne ve kütle azalma hızına etkisini araştırmak için uzunluğu ve genişliği aynı olan modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. Tasarım parametrelerin ve birbirleriyle etkileşimleri Şekil 4.41 ve Şekil 4.42'de verilmiştir.

Şekil 4.41 incelendiğinde şu sonuçlara varılabilir:

1. Yanan cismin yükseklik ve genişliğindeki artış kütle azalma hızında ve yangın ısıl gücünde artışa neden olmaktadır.
2. Kalınlık değişimi kütle azalma hızında ve yangın yükünde büyük değişimlere neden olmaktadır. Ancak, tahta kalınlığının 2 cm ile 3 cm arasında değişmesi yangın ısıl gücünde önemsiz denilebilecek bir artışa kütle azalma hızında ise küçük bir azalmaya neden olduğu görülmüştür.
3. Havalandırma hızı 0.5 m/s ile 1 m/s arasında değiştiğinde kütle azalma hızında küçük bir artış görülmektedir (Şekil 4.41a). Havalandırma hızı 1 m/s değerini geçtiğinde kütle azalma hızı azalmaktadır. Ortalama kütle azalma hızlarındaki değişim sadece 1 g/s'dir. Ölçüm cihazın hassasiyeti ve çevresel etkilerden etkilenebilmesi nedeniyle böyle bir sonuç çıkmış olabilir. Isıl güç verileri baz alındığında hız artışı 2 m/s'ye kadar yangın yükünü artırmıştır (Şekil 4.41b). Ancak 2 m/s'den sonra yangın yükünü azaltacak bir etki yapacak gibi görülmektedir. Bu bölgede soğutma etkisi baskındır.



Şekil 4.41 Kütle Azalma Hızının ve Isıl Gücün Ana Faktörlerle Değişimi (L= W)

Şekil 4.42a incelendiğinde şu sonuçlara varılabilir :

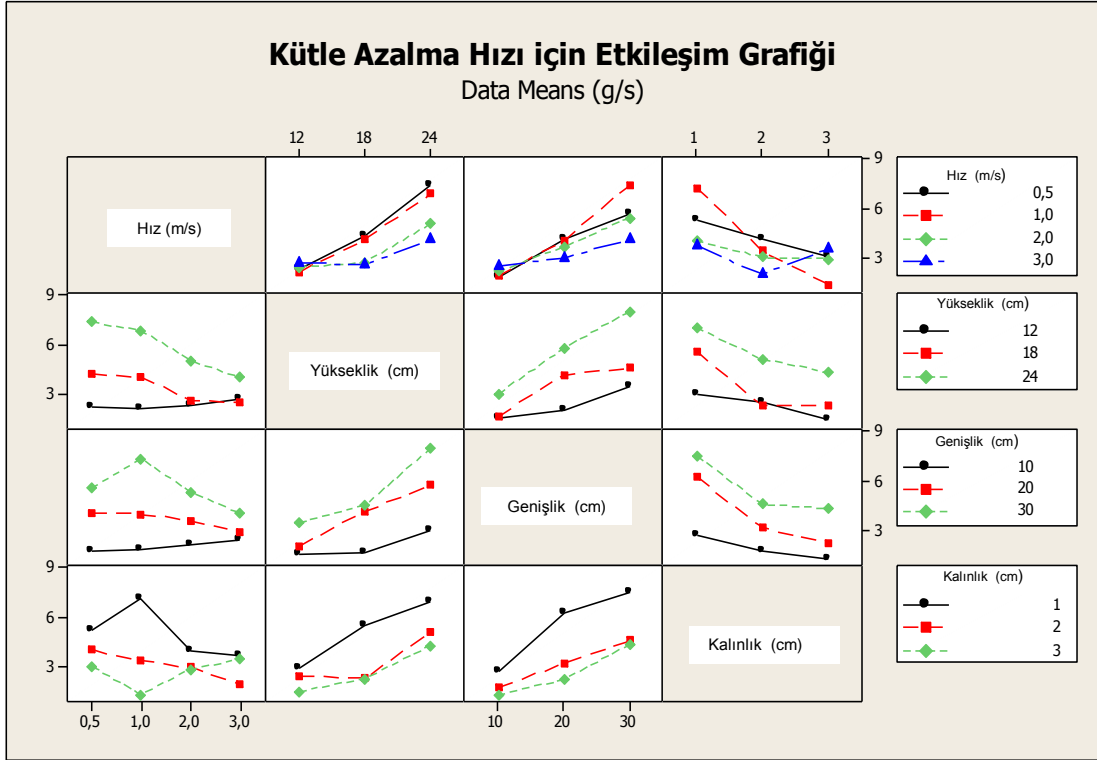
1. Hız ile yüksekliğin etkileşim grafiğinden yüksek objelerin sabit hızda daha büyük kütle azalma hızı değeri vermektedir. Hız ve yüksekliğin birlikte artması durumunda kütle azalma hızında küçük bir artış olduğu görülmektedir.
2. Genişlik ile hızı etkileşim grafiğinden sabit hızda genişlik arttıkça yanma hızı büyümektedir. Sabit genişlikte ise 0.5 m/s hız haricinde havalandırma yanma hızını azaltacak yönde bir eğilim göstermektedir.
3. Kalınlık ile hız etkileşim grafiği incelendiğinde tahta kalınlıkları sabitken hız artışı genellikle yanma hızında azalmaya neden olmuştur. Sabit hızda, ince tahtalar daha fazla yanma hızı sağlamaktadır.
4. Yükseklik ve genişlik etkileşim grafiği incelendiğinde her ikisindeki artış yanma hızında artışa sebep olmaktadır.
5. Tahta kalınlığı ile yüksekliğinin etkileşim grafiğine bakıldığında kalınlıkta azalma ve yükseklikteki artış daha büyük yanma hızları sağlamaktadır. Bu değişim, kalınlığı 2 cm ile 3 cm olan tahtalar arasında daha az gözükmemiştir.
6. Genişlik ve kalınlığın birbirlerine etkisi incelendiğinde kalınlık azaldığı ve genişliğin arttığında yüksek yanma hızına ulaşılmaktadır. Kalınlığı 2 cm ile 3 cm arasında değiştiğinde yanma hızında önemli bir değişim görülmemiştir.

Şekil 4.42b incelendiğinde şu sonuçlara varılabilir:

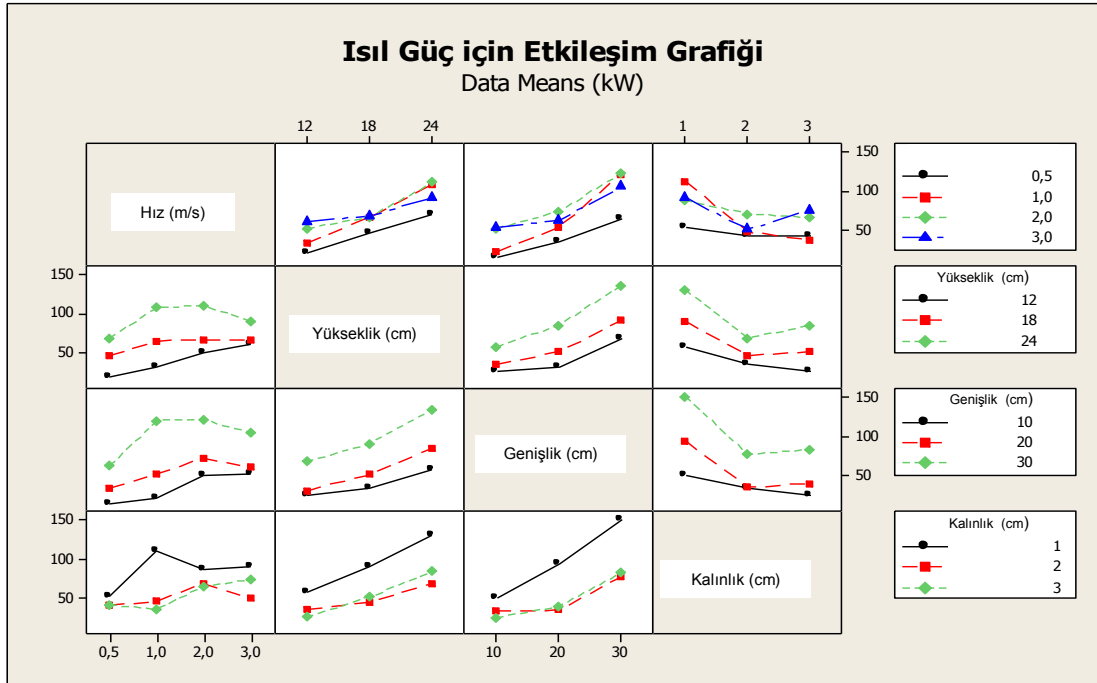
1. Hız ile yükseklik etkileşimi incelendiğinde sabit hızda yüksekliğin artışıyla daha fazla yangın yüküne ulaşılmaktadır. Hız ve yüksekliğin ikisinin birlikte artması durumunda 2 m/s hızı kadar yangın ısı gücünde artış olmaktadır. Yüksekliği 18 cm ile 24 cm olan modellerde, 2 m/s hızdan sonra ise bu değişim miktarı azalmaktadır.
2. Genişlik ile hız etkileşimine bakıldığında 2 m/s havalandırma hızına kadar sabit hızda genişlik arttıkça yangının ısı gücü artmaktadır. Sabit genişlikte ise yangının ısı gücü hız arttıkça artış

yönünde bir eğilim göstermektedir. Obje genişliği 2 m/s ile 3 m/s olduğu ve havalandırma hızının 2 m/s ile 3 m/s arasında değiştiğinde yangının ısı gücün çok az bir düşüş olmaktadır.

3. Kalınlık ile hız etkileşim grafiği incelendiğinde sabit kalınlıkta tahtaların kullanıldığı ve havalandırma hızının arttığı durumda yangın yükü genellikle artmıştır. Sabit hızda, ince tahtalar yakıldığında daha fazla ısı güce ulaşılmıştır.
4. Yükseklik ve genişlik etkileşim grafiği incelendiğinde her ikisindeki artış yangının ısı gücünde artışa sebep olmaktadır.
5. Tahta kalınlığı ile yüksekliğinin etkileşim grafiğine bakıldığında kalınlıkta azalma ve yükseklikteki artış daha büyük ısı güçlere ulaşmaktadır. Bu değişim kalınlığı 2 cm ile 3 cm olan tahtalar arasında daha az gözükmemektedir.
6. Genişlik ve kalınlığın yangın ısı gücüne etkisi incelendiğinde kalınlık azaldığı ve genişliğin arttığında yüksek değerlere ulaşıldığı tespit edilebilmektedir. Kalınlığı 2 cm ile 3 cm arasında değiştiğinde yangın yükünde önemli bir değişim görülmemiştir.

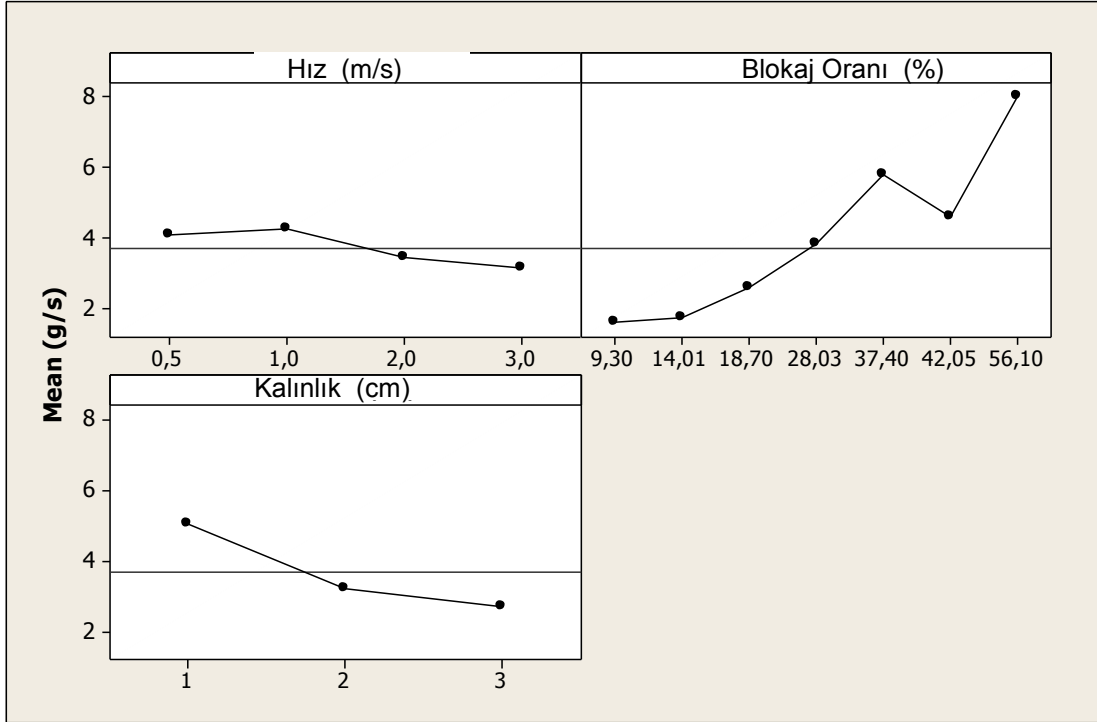


a) Kütle Azalma Hızı

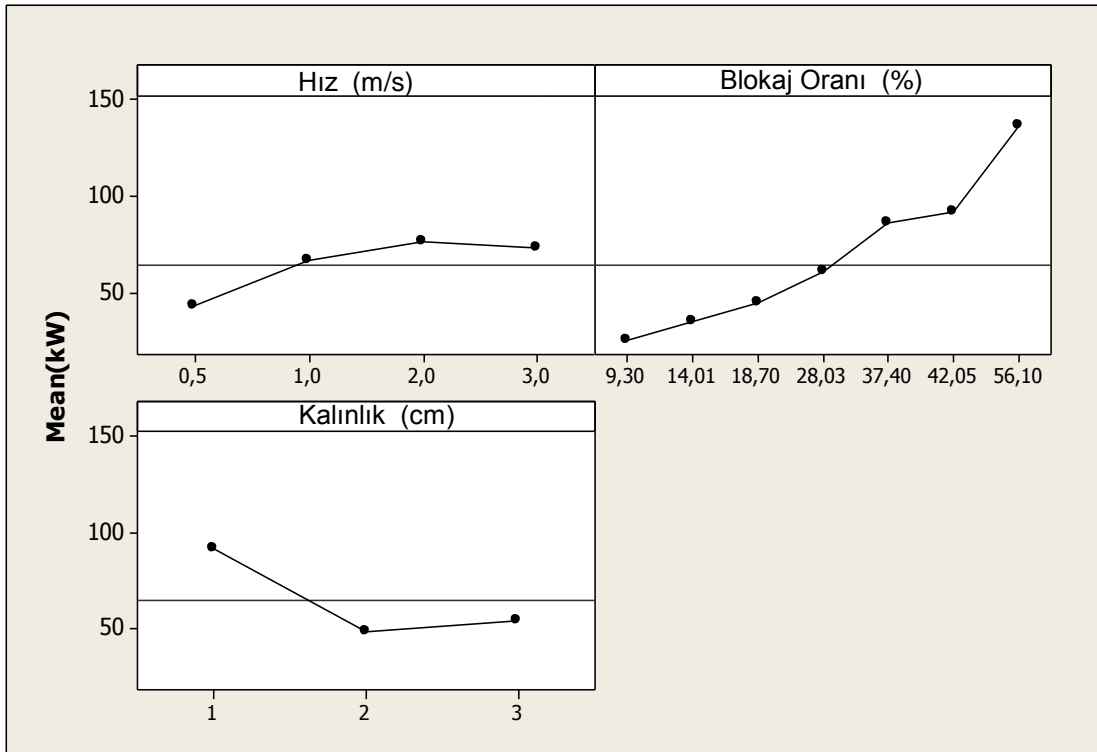


b) Isıl Güç

Şekil 4.42 Kütle Azalma Hızı ve Isıl Güç Değerleri için Etkileşim Grafikleri (L= W)



a) Kütle Azalma Hızı



b) Isıl Güç

Şekil 4.43 Kütle Azalma Hızının ve Isıl Gücün Hız, Kalınlık ve Blokaj Oranı ile Değişimi (L= W)

Yanan cismin blokaj oranının yangın yüküne ve kütle azalma hızına etkisini araştırmak için varyans analizi yapılmıştır. Blokaj oranı, havalandırma hızı, kalınlık, hava basıncı, ortam sıcaklığı ve bağıl nem oranı analizde kullanılan parametrelerdir. Minitab 15 yazılımı aracılığıyla genel doğrusal model kullanılarak istatistiksel analiz yapılmıştır. Şekil 4.44 incelendiğinde yangının ısı gücü ve kütle azalma hızının blokaj oranı ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Tam ölçekli deneylerden elde edilen sonuçlara göre daha fazla enerji miktarına sahip olan araçlarda tünel yangını sırasında daha fazla yangın ısı gücü oluşturulduğu gösterilmiştir (LÖNNERMARK,2005). Blokaj oranı artışı tam olarak olmasa da aracın enerjisindeki artışı göstermektedir. Şekil 4.44'de Minitab yazılımı kullanılarak elde edilen varyans analizi sonuç tablosu aşağıda verilmiştir. Bu model yangın ısı gücünde değişimin %85.96'sını göstermektedir.

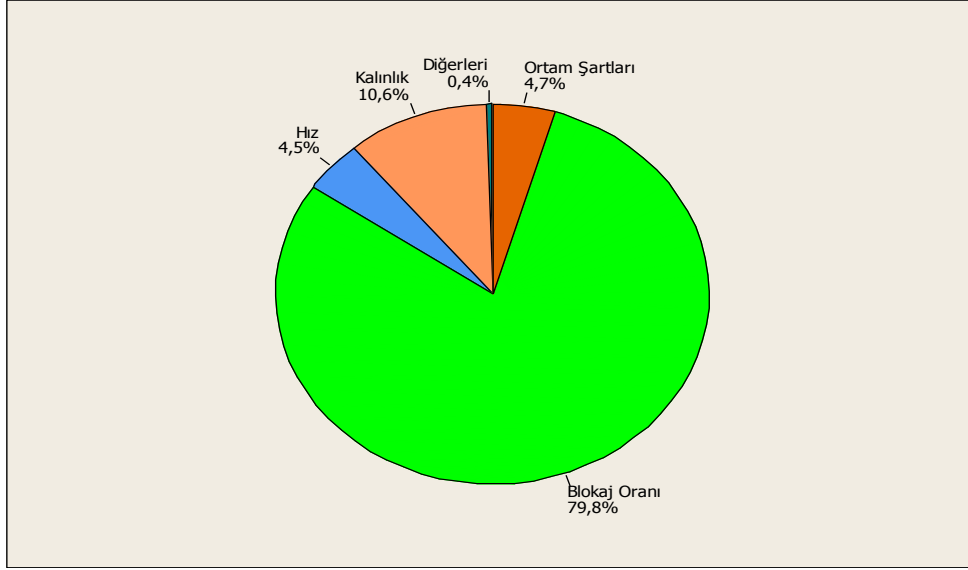
General Linear Model: Q(kW) versus Velocity(m/s); Thickness(cm)						
Factor	Type	Levels	Values			
Velocity(m/s)	fixed	4	0,5; 1,0; 2,0; 3,0			
Thickness(cm)	fixed	3	1; 2; 3			
Analysis of Variance for Q(kW), using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pambient(kPa)	1	25722	3515	3515	10,74	0,002
Blockage_Ratio(%)	1	45214	59696	59696	182,38	0,000
Velocity(m/s)	3	15713	10049	3350	10,23	0,000
Thickness(cm)	2	15862	15862	7931	24,23	0,000
Error	43	14075	14075	327		
Total	50	116584				
S = 18,0918 R-Sq = 87,93% R-Sq(adj) = 85,96%						

Şekil 4.44 Isıl Güç için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı (L=W)

Şekil 4.45'da ısı gücü verileri baz alındığında değişime neden olan bileşenlerin etkisi, yüzdelerle dağılımlar şeklinde sunulmuştur. Isıl güçteki değişimin

- %79.8'ine blokaj oranının,
- %10.6'sına tahta kalınlığının,
- %4.6'sına hızın,
- %4.7'sine ortam şartlarının,
- %0.4'üne diğer bileşenlerin

neden olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.45 Isıl Güçteki Değişimin Bileşenleri (L=W)

Kütle azalma hızı verileri baz alınarak Şekil 4.46'da Minitab yazılımı kullanılarak elde edilen varyans analizi sonuç tablosu verilmiştir. Bu model yanma hızındaki değişimin %79.24'ünü göstermektedir.

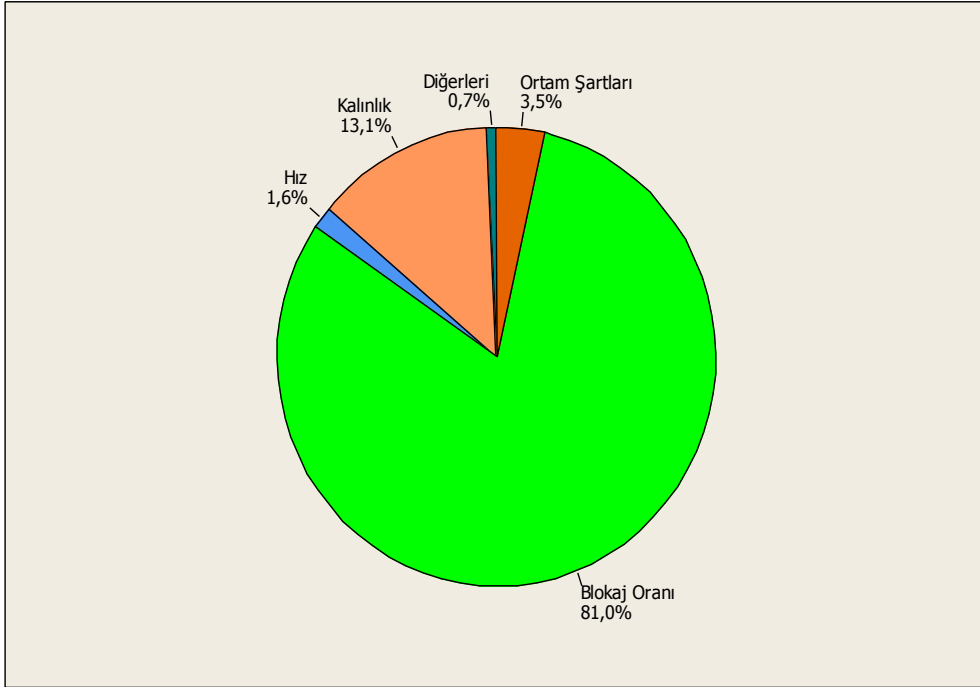
General Linear Model: M(gr/s) versus Velocity(m/s); Thickness(cm)						
Factor	Type	Levels	Values			
Velocity (m/s)	fixed	4	0,5; 1,0; 2,0; 3,0			
Thickness (cm)	fixed	3	1; 2; 3			
Analysis of Variance for M(gr/s), using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Pambient (kPa)	1	77,091	6,995	6,995	4,76	0,035
Blockage_Ratio (%)	1	138,732	159,928	159,928	108,92	0,000
Velocity (m/s)	3	5,995	9,222	3,074	2,09	0,116
Thickness (cm)	2	51,823	51,823	25,912	17,65	0,000
Error	40	58,730	58,730	1,468		
Total	47	332,372				
S = 1,21171 R-Sq = 82,33% R-Sq(adj) = 79,24%						

Şekil 4.46 Kütle Azalma Hızı için Varyans Analizi Sonuç Tablosu Minitab Çıktısı (L=W)

Yanma hızı değişimine neden olan bileşenlerin etkisi, yüzdelik dağılımlar şeklinde Şekil 4.47'da sunulmuştur. Yanma hızındaki değişimin

- %81'ine blokaj oranının,
- %13.1'ine tahta kalınlığının,
- %1.6'sına hızın,
- %3.5'sine ortam şartlarının,

- %0.7'üne diğer bileşenlerin neden olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.47 Kütle Azalma Hızındaki Değişimin Bileşenleri (L=W)

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, tünel yangını sırasında blokaj etkisinin ve hız değişiminin yangın yüküne ve kütle azalma hızına etkisi araştırılmıştır. ODTÜ Makina Mühendisliği Akışkanlar Mekaniği laboratuvarının yanında 1/13 ölçekte küçültülmüş bir model tünel yapılmıştır. Farklı havalandırma hızlarında yanan malzemenin değişik konfigürasyonları içinde çeşitli deneyler yapılmıştır.

Bu çalışmada tahta malzemeden yapılmış model araçlar kullanılmıştır. Bu seçimin yapılmasında birçok sebep vardır. Öncelikle, araçlar çok çeşitli malzemelerden imal edilmektedir. Bu nedenle malzemelerin özelliklerinin farklı olması nedeniyle bütün malzemelerin küçülterek yangın deneyinde kullanılabilmesi çok zordur. Bu çalışmada deneylerde kullanılacak modeller tek bir malzemeden imal edilmiştir. İkinci olarak, araçların geometrik yapıları (pencere, kapı boyutları) farklılık göstermektedir. Aynı geometrik yapıyı sağlamak küçültülmüş modellerde zordur. Bu nedenle model aracın imal edilmesinde kolay olan bir yapının seçilmesi uygun görülmüştür. Ayrıca, tahta kolay bulunan bir malzemedir. Tahta kafes yapısının daha önceki çalışmalarda kullanılması ve yanma rejiminin nasıl olduğu bilinmektedir. Eğer tahta kafes yapısında gözeneklilik faktörü 0.5 den büyük ise yanma hızı kendi yapısına göre normalize edilgi durumda sabit olduğu tespit edilmiştir. Yapılan küçültülmüş yangın deneylerinde tahta kafes yapısının kullanılması ve büyük yangın deneylerinde araç enerjisini tespit etmek içinde tahta kafes yapısının kullanılması bu seçimin yapılmasının bir başka nedenidir.

Yangın ısı gücünden elde edilen veriler incelendiğinde havalandırma hızı yangın ısıl gücünü pozitif yönde etkilemektedir. Yapılan deneylerde 2 m/s hıza kadar yangın ısıl gücünde bir artış vardır. Ancak, havalandırma hızının 2 m/s'den fazla olduğu durumlarda ise ısıl güce çok fazla etkili olmadığı görülmüştür. Bu sonuçlar, varyans analizi sonuçları incelendiğinde tespit edilmiştir. Yangının ısıl gücü yanan objenin yüksekliği ve genişliğinde değişim ile doğru orantılı şekilde değişmektedir. Blokaj oranı artıkça yangının ısıl gücü artmaktadır. İstatistiksel analiz sonucunda yangın yükündeki değişimin %79.8 blokaj oranındaki, % 4.5'i havalandırma hızındaki, %10.6 ise tahta kalınlığındaki değişimden kaynaklı olduğu kalan kısmın ise ana parametrelerin birbirleriyle etkileşiminden ve dış etkenlerden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

Kütle azalma hızı verilerine göre ise havalandırma kütle azalma hızında önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak, blokaj oranı arttığında kütle azalma hızı artmaktadır. İstatistiksel analiz sonucunda kütle azalma hızındaki değişimin % 81'i blokaj oranındaki, % 1.6'sı havalandırma hızındaki, %13.1 ise tahta kalınlığındaki değişimden kaynaklı olduğu kalan kısmın ise ana parametrelerin birbirleriyle etkileşiminden ve dış etkenlerden kaynaklı olduğu tespit edilmiştir.

Tünel içindeki sıcaklık değerleri havalandırma hızı arttığında azaldığı tespit edilmiştir. Havalandırma hızı arttığında ve aynı modellerin değişik havalandırma şartlarında yakıldığında, havalandırmanın soğutma etkisi gözlemlenmiştir. E. Musluoğlu'nun (Musluoğlu, 2009) yaptığı sayısal analizler sonucunda araç içi yangın durumunda havalandırma hızının 2.5 m/s olduğu durumda yangın yükünün havalandırma etkisiyle azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan sayısal analiz sonuçları elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırmak tren vagonunda bulunan bütün malzemelerin analize dahil edilmesi

nedeniyle çok güçlüdür. Ancak, bu deneysel çalışmada sadece bir malzeme kullanılmıştır. Yangının tren vagonu içindeki gelişimi malzemelerin dizilişten ve yanma karakteristiklerinde etkilenmektedir. Yapılan deneylerde kullanılan modelin içine hava çok rahat giriş yapabilmektedir. Buna rağmen, havalandırma yanma yüküne pozitif etki yaptığı bu çalışmada tespit edilmiştir. Tam ölçekli yapılan deneylerde de yangının ısı gücü havalandırma ile artış göstermektedir.

Literatürde yapılan çalışmalarda sıcak hava katmanı yangının gelişimine yanan cisme ışıma ısı transferleri yaparak etkili olmaktadır. Yanan malzemenin genişliği arttıkça daha fazla ısı gücü yaymaktadır. Bunun nedeni, tünel duvarı ile yanan malzeme arasında mesafenin azalmasıdır. Böylelikle, yanan cisme olan ışıma ile ısı transferi artmaktadır. Yangının daha alçak tavanı olan bir mekânda çıkması durumunda da yangın gücü artmaktadır. Tünel tavanı ile yanan model arasındaki mesafe azaldıkça yani yanan kütlelerin yüksekliği arttıkça tavan ile yanan cisim arasındaki mesafe azalır. Bunun sonucunda da yanan cisme tavadan ışıma ile ısı transferi artırarak yangın yükü artmaktadır.

Deneyden elde edilen sonuçlar sadece blokaj oranı farklı olan araçlar tünellerde yer aldığına nasıl bir yangın yükü değişimi olacağı tespit etmek için kullanılabilir. Fakat, elde edilen ısı gücü değerlerinin Froude sayısı modelleme tekniği kullanılarak tam ölçekli deneylerdeki değeri $\dot{Q}_{protatip} \rightarrow \dot{Q}_{model} / (\text{küçültme oranı})^{5/2}$ denklemi ile bulunabilir. Tam ölçekli, deneylerde ise havalandırma debisi $q_{protatip} \rightarrow q_{model} / (\text{küçültme oranı})^{5/2}$ kullanılarak bulunabilir. Ancak, bu sonuçlar original araçların yangın yükünün tespiti için direk olarak kullanılamaz. Bu çalışma sonucunda aracın blokaj oranı ile tünel yangını sırasında nasıl bir ilişki olduğu konusunda önemli sonuçlar elde edilmiştir. Araç blokaj oranı arttıkça yangın yükü belirli havalandırma hızına kadar artış göstermektedir. Bu eğilim yanmayı başlatmak için kullanılan tutuşturmak için kullanılan kaynağı türüne ve miktarına göre değişmektedir. Bu çalışmanın bazı limitasyonları vardır. Öncelikle, model araçlar her deneyde kütlelerin altından tutuşturulmuştur ve sadece tünel duvarlarıyla çevrelenmiştir. Ancak, yangın aracın içinde de yangın çıkmakta bu durumda yangın araç duvarları ile çevrelenmektedir. Buna ek olarak, tünel duvarları da yangın gelişimini etkilemektedir. Tünel duvarlarının termal özellikleri tünelden kaçan ısı miktarını ve dolayısıyla tünel içindeki sıcaklık değerlerini etkilemektedir.

Bu çalışmayı takip edecek araştırmalarda

1. Tünel havalandırma fanlarının değişik zamanlarda çalıştırmasının yangın gelişimini nasıl etkilediği araştırılmalıdır.
2. Deneylerde tek bir malzeme kullanmak yerine değişik malzemelerin kullanılarak deneyler yapılabilir.
3. Tünel duvarlarında kullanılan malzemenin değiştirilerek tünel duvar yapısının nasıl bir etkisi olduğu araştırılmalıdır.
4. En boy oranı değişik olan cisimlerin deneylerde kullanılması neticesinde etkilerinin tespiti gerekmektedir.
5. Değişik tünel geometrilerinde ve tünel eğimlerinde yangının ısı gücünün blokaj oranıyla nasıl değiştiği tespit edilmelidir.
6. Değişik tutuşturucular kullanılarak deneyler yapılmalıdır.

TÜBİTAK **109M007** projesi paralelinde yapılan çalışmalar sonucunda , bir doktora çalışması yürütülerek tamamlanmıştır.

REFERANSLAR

- [1] ARADAĞ, S., *Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Tren Piston Etkisiyle Havalandırılması* , (Master Tezi), ODTÜ, (2002)
- [2] ANTHONY, J. *Design of Deneys for Engineers and Scientists*, Elsevier Butterworth-Heinemann, (2005)
- [3] ATKINSON, G. T.; Wu, Y.; *Smoke Control in Sloping Tunnels*, Fire Safety Journal, 27, 335-341, (1996)
- [4] APTE, V. B., *Flammability Testing Of Materials Used In Construction, Transport And Mining*, Woodhead Publishing Limited, (2006)
- [5] BARRENTINE, L. B., *An Introduction to Design of Deneys: A Simplified Approach*, ASQ Quality Press, (1999)
- [6] BEARD, A., Carvel, R., *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, Thomas Telford Publishing , (2005)
- [7] CARVEL, R.O. , Beard, A.N., Jowitt, P.W. , Drysdale, D.D. , *The Influence of Tunnel Geometry and Ventilation on The Heat Release Rate of Fire* , Fire Technology, 40, 5 - 26 , (2004)
- [8] CARVEL, R. O.; Beard, A. N.; Jowitt, P. W.; Drysdale, D. D.; *Variation of Heat Release Rate with Forced Longitudinal Ventilation for Vehicle Fires in Tunnels*, Fire Safety Journal, v 36, 569-596, (2001)
- [9] CARVEL, R. O. *Fire Size in Tunnels*, (Doktora Tezi), Heriot-Watt University School of Built Environment Division of Civil Engineering , (2003)
- [10] CEYLAN, Ö. C., *Yer Altı Toplu Taşıma Sistemlerinde Piston Etkisinin Üzerinde Deneysel ve Numerik Bir Çalışma*, (Master Tezi) , ODTÜ, (2008)
- [11] CHIAM, B. H., “ Numerical Simulation of a Metro Train Fire, (Master Tezi), University of Canterbury Department of Fire Engineering, (2005)

- [12] ÇORUH, M. Murat, *Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Havalandırma Simülasyonu* , (Master Tezi), ODTÜ, (2000)
- [13] DRYSDALE, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd ed., John Wiley & Sons, (1999)
- [14] DÜZCE, A., *Yeraltı Taşıma Sistemleri İstasyonlarında Havalandırma Simülasyonu*”, (Master Tezi) , ODTÜ, (2003)
- [10] ERALP, O. C., Çoruh, M. M., Arsava, M., *Yeraltı Toplu Taşıma Tünellerinde Yangın ve Acil Durum Havalandırması*, Yangın ve Güvenlik, 49 ,92-104, (2000)
- [11] ERALP, O. C., Musluoğlu, E., *Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Acil Durum Havalandırması*, VI. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, (2003).
- [12] ERALP, O. C., Köktürk, T., *Tersinir Eksenel Fan ve Kanat Profilleri Üzerine Bir Çalışma V. Pompa-Vana Kongresi Bildiri Kitabı*, (2004).
- [13] ERALP, O. C., Musluoğlu, E., *Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Acil Durum Havalandırması*, Dizayn Konstrüksiyon, 226, 83-86, (2004)
- [14] ERALP, O. C., Kayılı S., Basesme E., Musluoglu E., *A CFD Analysis of Station Fire Incidents and Determination of Passenger Evacuation Scenarios*, Safety Innovation Criteria Inside Tunnels Gijon-Spain, (2005)
- [15] ERALP, O., C Kayılı S., Kayhan,C., Koç, G., *Yeraltı Toplu Taşıma Tünellerinde Acil Durum Havalandırmasında Jet Fan Uygulaması*, TTMD VII.Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu, (2006)
- [15] GX-K Series & GF-K Series High Resolution Industrial Balance, A&D Company Limited, 2004
- [16] INGASON, H., *Model Scale Railcar Fire Tests*, Fire Safety Journal, 42 , 271-282, (2007)
- [17] KARLSSON, B.; Quintiere, J.G., *Enclosure Fire Dynamics*, CRC Press, (2000)
- [16] KAYILI, S., Eralp, O.C., *Yeraltı Taşıma Sistemleri İstasyonlarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemiyle Yangın ve Havalandırma Simülasyonu*, VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, (2007)
- [17] KAYILI, S., Köktürk,T., Eralp, O.C., *Yeraltı Raylı Toplu Taşıma Sistemleri Acil Durum ve Konfor Havalandırmasında Tasarım Kriterleri ve Teknik Yaklaşımlar;Türkiye'deki Uygulamalar*, VIII. Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi Sempozyumu, (2008)

- [18] KAYILI, S., *Effect of Vehicles' Blockage on Heat Release Rate In Case of Tunnel Fire*, (Doktora Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, (2009)
- [19] KAYILI, S., *CFD Kullanarak Metro İstasyonlarında Yangın ve Havalandırma Simülasyonu*, (Master Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, (2005)
- [20] KENNEDY, W. D.; Gonzales, J. A.; Sanchez, J. G.; "Derivation and Application of the SES Critical Velocity Equations", *ASHRAE Transactions*, 3983
- [21] KÖKTÜRK, T., *Çift Yönlü Eksenel Fan Tasarımı ve Performans Analizi*, (Master Tezi), ODTÜ, (2005)
- [22] KUNSCH, J. P., *Simple Model for Control of Fire Gases in a Ventilated Tunnel*, *Fire Safety Journal*, 37, 67-81, (2002)
- [23] LEE, S. R., Ryou, H. S., *An Deneyal Study of the Effect of the Aspect Ratio on the Critical Velocity in Longitudinal Ventilation Tunnel Fire*, *Journal of Fire Sciences*, 23, 119- 138 , (2005)
- [24] LEE S. R., Ryou, H. S., "Numerical study on smoke movement in longitudinal ventilation tunnel fires for different aspect ratio" *Building and Environment*, Volume 41, Issue 6, June 2006, sayfa 719-725
- [25] LI, J.S.M. , Chow, W.K., *Numerical Studies on Performance Evaluation of Tunnel Ventilation Safety System*, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 435-452, (2003)
- [26] LÖNNERMARK, A., *On the Characteristics of Fires in Tunnels*, (Doktora Tezi), Lund Üniversitesi, (2005)
- [27] MEGRET, O.; Vauquelin, O.; *A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics*, *Fire Safety Journal*, 34, 393-401, (2000)
- [28] Meet Minitab 15 for Windows, Minitab Inc., January 2007
- [29] MONTGOMERY, D.C., *Design and Analysis of Deneys*, John Wiley & Sons Inc. , (2001)
- [30] MUSLUOĞLU, E.; *A Theoretical Analysis of Fire Development and Flame Spread in Underground Trains*, (Doktora Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, (2009)

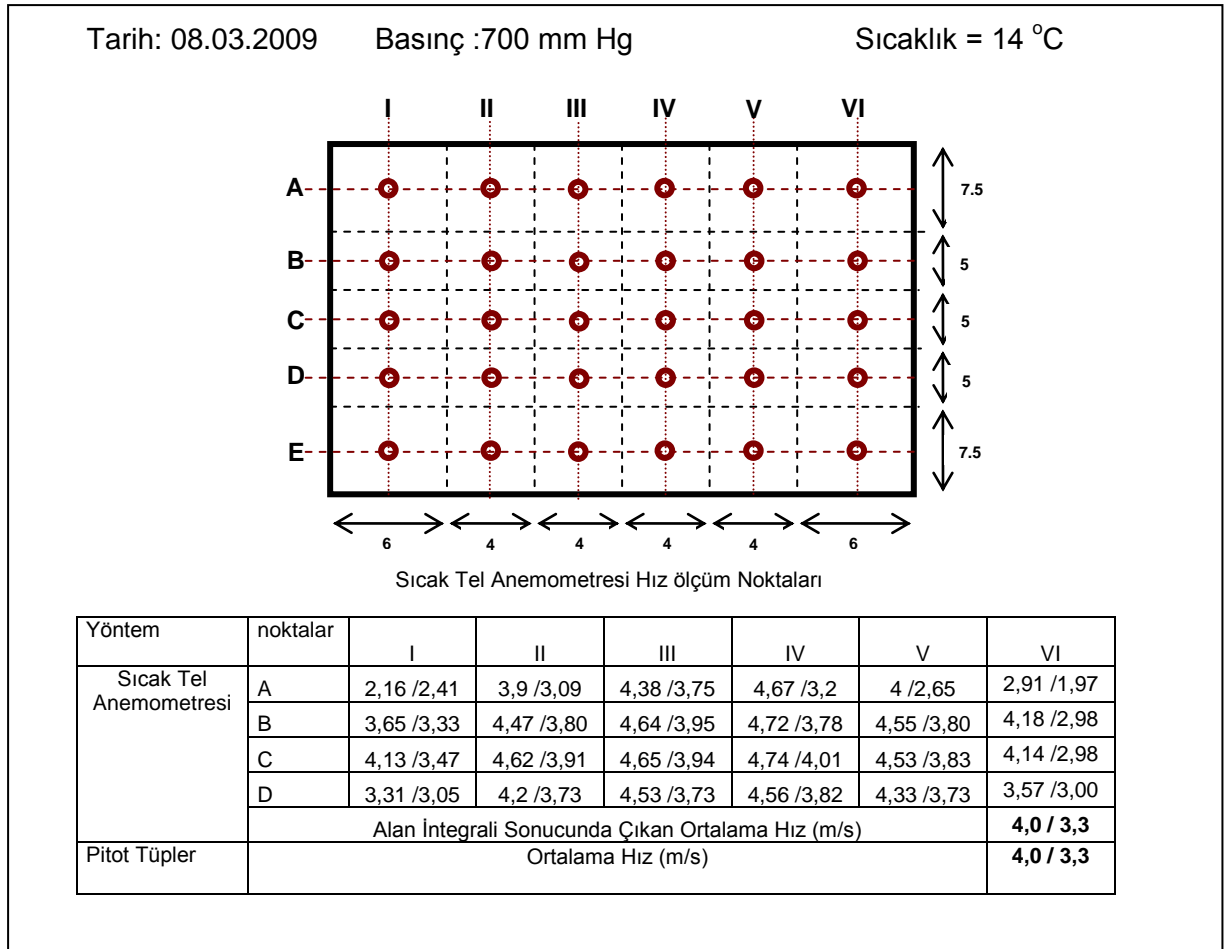
- [31] MUSLUOĞLU, E.; Yeraltı Toplu Taşıma Sistemlerinde Yangın Simülasyonu, (Master Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, (2003)
- [32] NFPA, NFPA 130-Standard for Fixed Guideway Transit System, National Fire Protection Association, 2007
- [33] NFPA, "Fire Protection Handbook", Seventh Edition , 1991
- [34] NFPA, NFPA 502 Standard for Road Tunnels, Bridges and other Limited Access highways, National Fire Protection Association, 2000
- [35] OKA, Y.; Atkinson, G. T.; *Control of Smoke Flow in Tunnel Fires*, Fire Safety Journal, 25, 305-322, (1995)
- [36] OMB-DAQ-3000 Series 1 Mhz, 16 Bit USB Data Acquisition Modules User's Manual (OMB-1136-0901 rev 1.1), Omega Engineering
- [37] PARKER, W. J., *Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications*, Journal of Fire Sciences, 2, 5, 380-395, (1984).
- [38] PIARC Committee on Road Tunnels, "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", ref. 05.05.B, 1995
- [39] PERRICONE, J. A., Scale Modeling Of The Transient Behavior Of Wood Crib Fires in Enclosures, (Master Tezi),, University of Maryland, (2005)
- [40] QUINTIERE, J. G., *Fundamentals of Fire Phenomena*, Wiley, (2006)
- [41] ROH, J. S., Yang, S. S., Ryou, H.S., Yoon, M.O., Jeong, Y. T., *An Deneyal Study on the Ventilation Velocity on Burning Rate in Tunnel Fires-Heptane Pool Fire Case*, Building and Environment, 43, 7, 1225-1231, (2008)
- [42] ROH, J. S., Ryou, D.H. , Kim, D.H. , Jung, W. S. , Jang, Y. J., *Critical Velocity and Burning Rate In Pool Fire During Longitudinal Ventilation*, Tunnelling and Underground Space Technology, 22, 3, 262-271, (2007)
- [43] SFPE, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd Edition, Chapter 15"
- [44] Subway Environmental Design Handbook, V.1, Principles and Applications, 2nd ed., U.S. Department of Transportation, 1976

- [45] Testo 350-S Control Unit in combination with Testo 350-S/ -XL Flue Gas Analyzer Instruction Manual, Testo AG
- [46] VAUQUELIN, O., *Deneyal Simulations of Fire-Induced Smoke Control in Tunnels Using an “air-helium reduced scale mode”*: Principle, Limitations, Results and Future, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 171-178, (2008)
- [47] VAUQUELIN, O. , Wu, Y., *Influence of Tunnel Width on Longitudinal Smoke Control”, Fire Safety Journal*, 41 , 420-426, (2006)
- [48] VELOO, P. S., *Scale Modeling Of The Transient Behavior Of Heat Flux In Enclosure Fires*, (Master Tezi), University of Maryland, (2006)
- [49] WU, Y., Bakar, M. Z. A., *Control of Smoke Flow in Tunnel Fires Using Longitudinal Ventilation Systems – A Study of the Critical Velocity*, *Fire Safety Journal*, 35, 363-390, (2000)
- [50] XUE,H.,. Chew, T. C, Kay K. L., Cheng Y. M, *Control of Ventilation Airflow for Tunnel Fire Safety*, *Combustion Science Technology*, 152, 179-96, (2000)

EKLER

EK-A

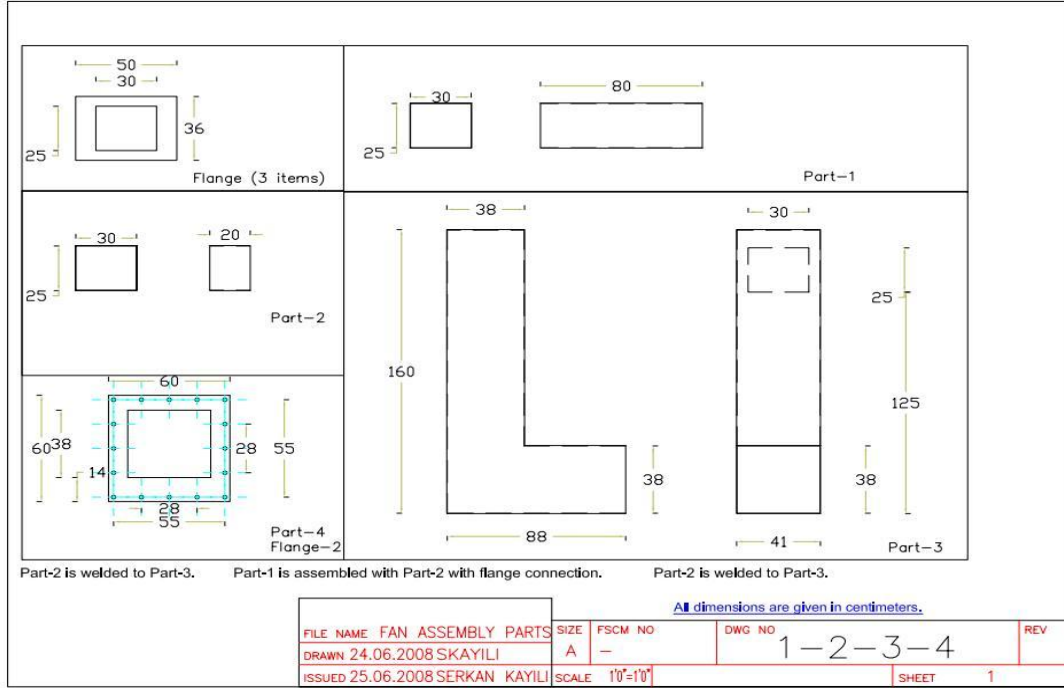
PİTOT TÜP ÖLÇÜMLERİNİN SICAK TEL ANEMOMETRESİ İLE DOĞRULANMASI



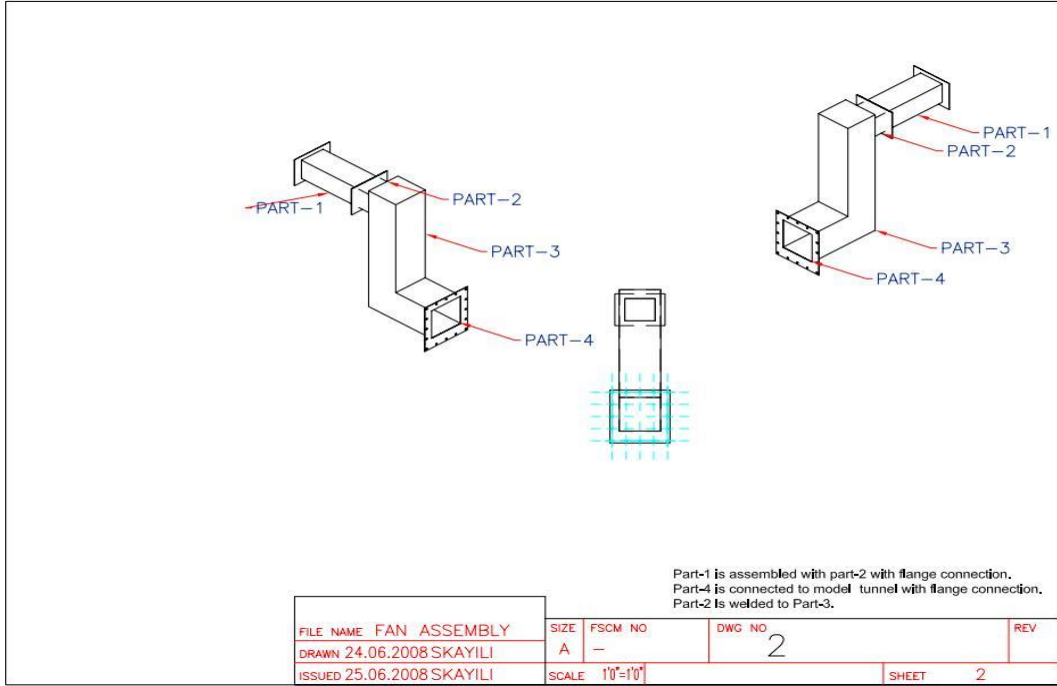
Şekil 1.7 Pitot tüp Ölçümü Doğrulama Deneyi Sonuçları

EK-B

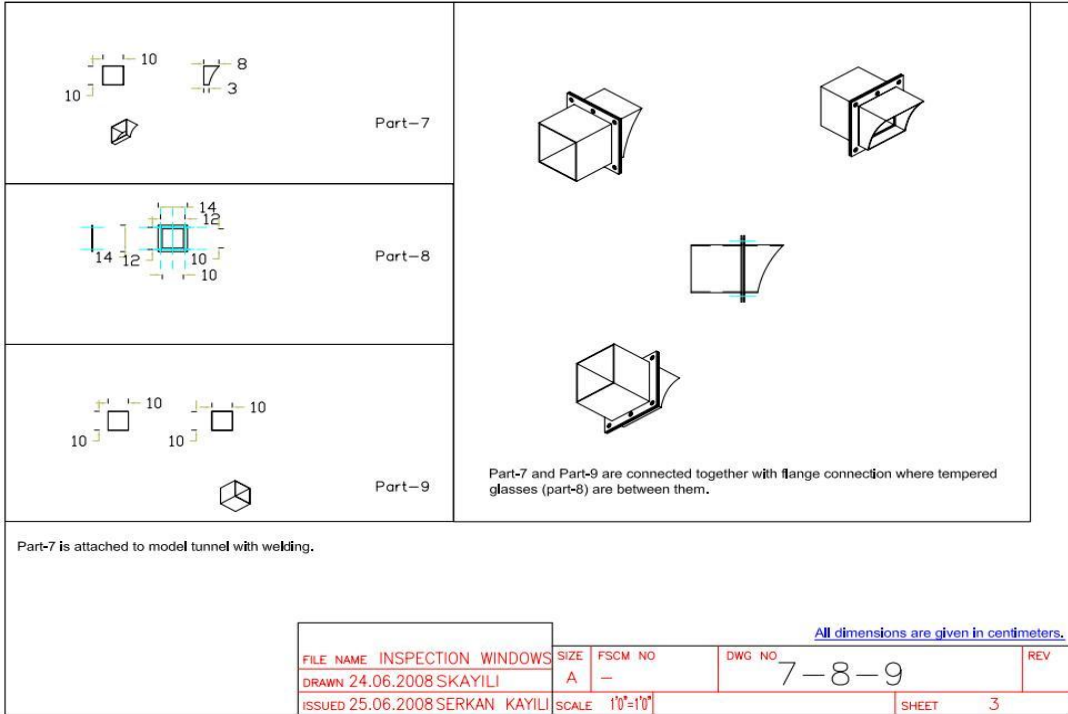
DENEY DÜZENEĞİNİN TEKNİK ÇİZİMLER VE FOTOĞRAFLARI



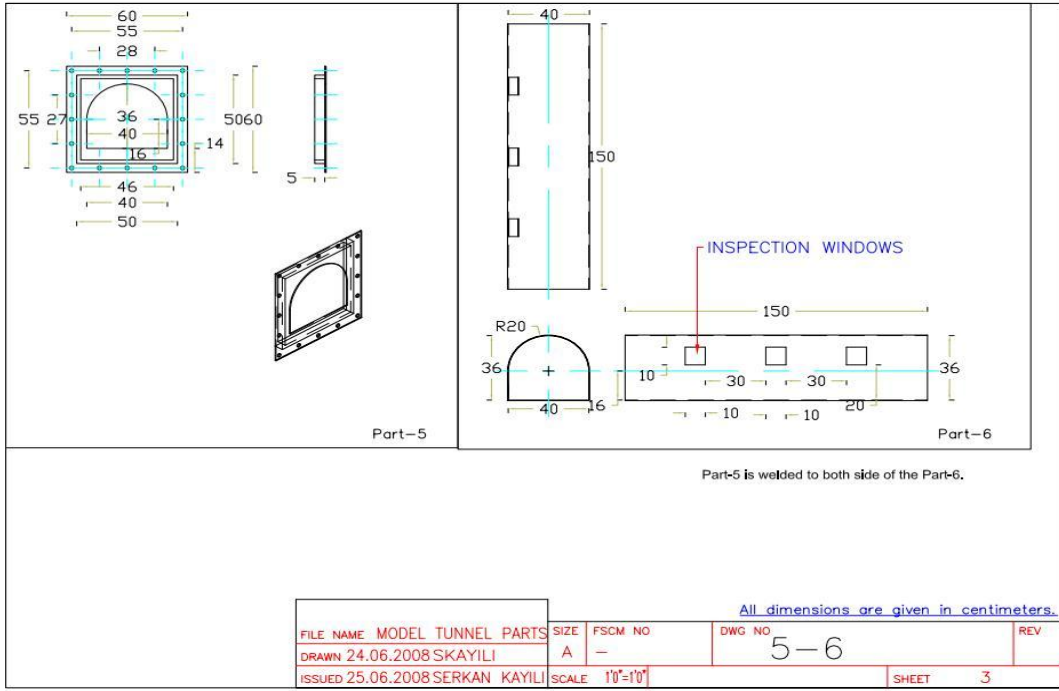
Şekil B.1 Deney Düzeneğinin Teknik Çizimleri



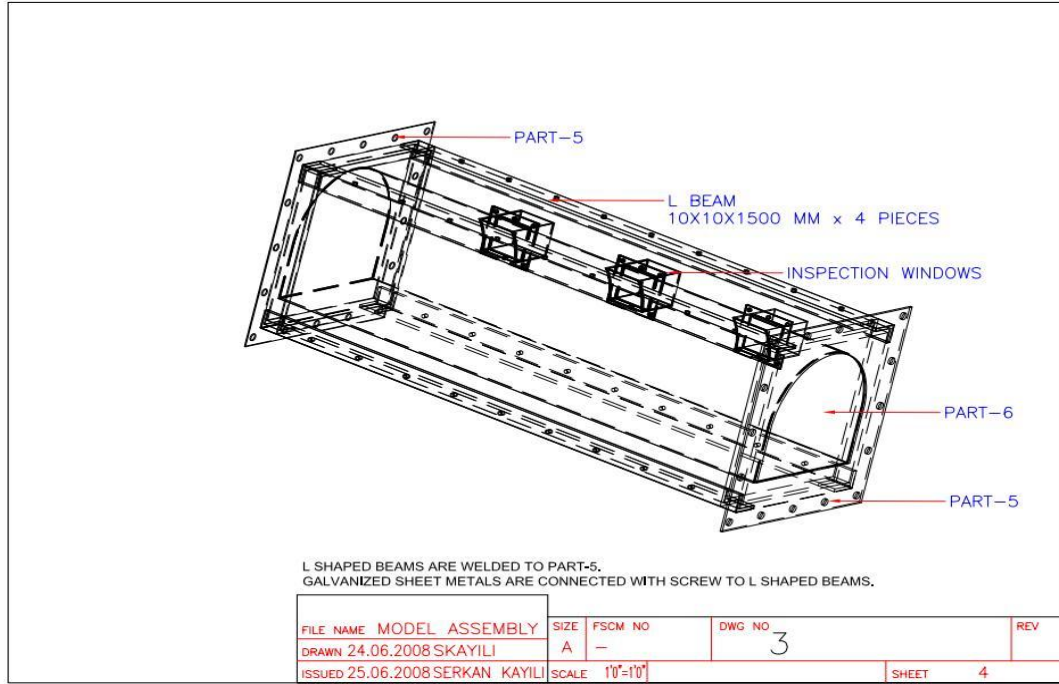
Şekil B.1 Devamı



Şekil B.1 Devamı



Şekil B.1 Devamı



Şekil B.1 Devamı



Şekil B.2 Deney Düzenekinin Yapım Aşamaları



Şekil B.2 Devamı

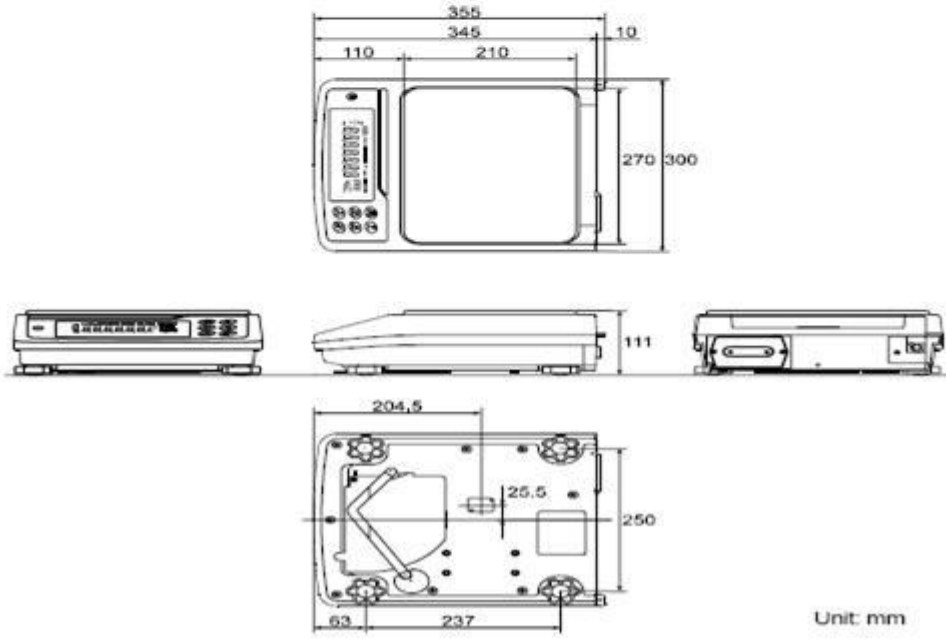
EK-C

CİHAZLARIN TEKNİK ÖZELLİKLERİ

C.1 A&D GF 20 K Yüksek Hassasiyetli Endüstriyel Terazi

Tablo C.1 Endüstriyel Terazinin Teknik Özellikleri

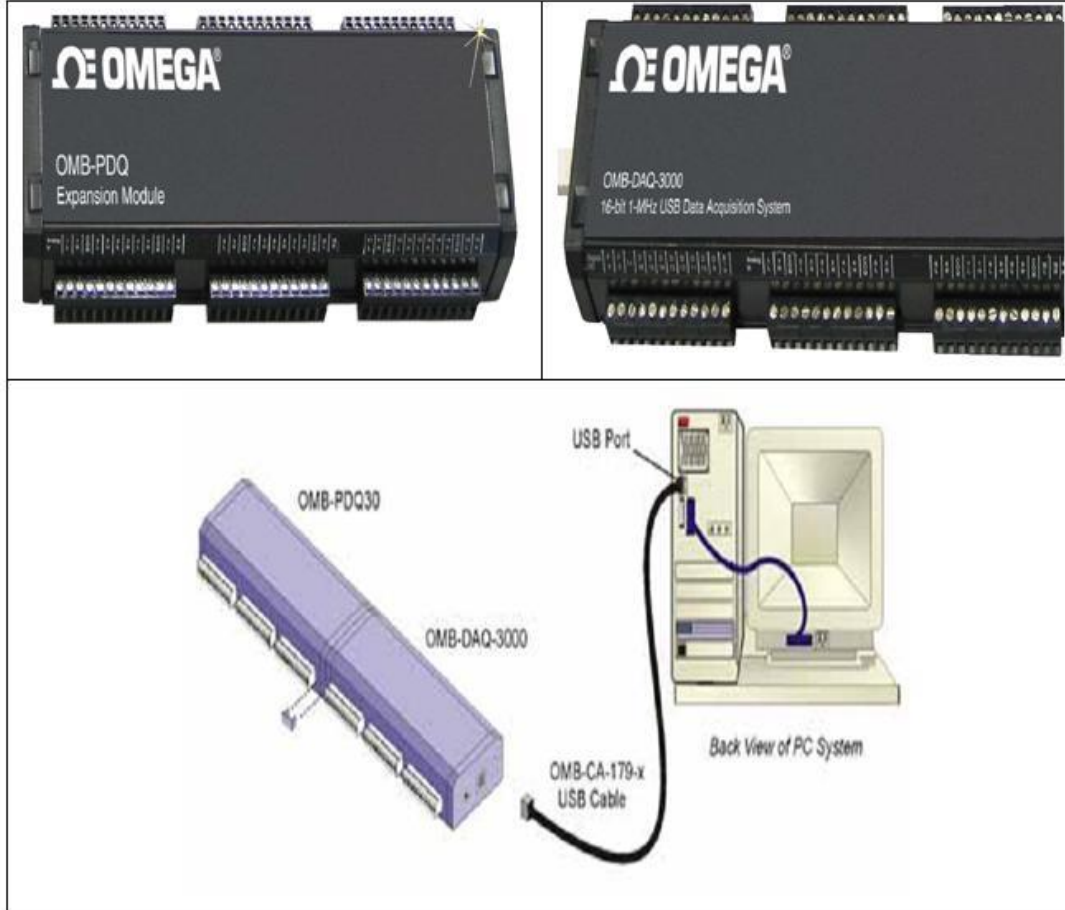
Manufactures	A&D Company, Limited /Japan	
Model	GF 20 K	
Weighing capacity	21 kg	
Minimum weighing value (1 digit)	0.1 g	
Repeatability(Standard deviation)	0.1 g	
Linearity	±0.2 g	
Stabilization time (Typical at FAST)	Approx. 1.5 seconds	
Sensitivity drift, (10°C ~ 30°C / 50°F ~ 86°F)	±3 ppm/°C	
Operating environment	5°C to 40°C, 85%RH or less (No condensation)	
Display refresh rate	5 times/second or 10 times/second	
Counting mode	Minimum unit mass	0.1 g
	Number of samples	10, 25, 50 or 100 pieces
Percent mode	Minimum 100% reference mass	10 g
	Minimum 100% display	0.01 %, 0.1 %, 1 % (Depends on the reference mass stored.)
Interface (Provided as standard)	RS-232C with Windows Communication Tools Software WinCT	
Weighing pan	270 x 210mm	
External dimensions	300(W) x 355(D) x 111(H) mm	
Power supply &AC adapter type	Power consumption: Approx. 11VA (supplied to the AC adapter) Confirm that the adapter type is correct for the local voltage and power receptacle type.	
Weight	Approx. 8.3kg	



Unit: mm

Şekil C.1 GF20K Model Terazinin Fotoğrafı ve Boyutları [15]

C.2 OMEGA Veri Toplama Modülleri



Şekil C.2 OMB-DAQ-3005 ve QMB –PDQ 30 Fotoğrafları ve Bağlantı Şeması

Tablo C.2 OMB-DAQ-3005 ve QMB –PDQ 30 Modülünün Teknik Özellikleri

ENVIROMENT:
Operating Temperature: -30 to 70°C Storage Temperature: -40 to 80°C Relative Humidity: 0 to 95% non-condensing Communications: USB 2.0 high-speed mode (480 Mbps), USB1.1 full-speed mode (12 Mbps) Acquisition Data Buffer: 1 MSample Signal I/O Connector: Removable screw-terminal blocks
EXTERNAL POWER
Weight: 431 g (0.95 lb) Connector: Switchcraft# RAPC-712 Power Range: 6 to 16 VDC (used when USB port supplies insufficient power) Over Voltage: 20 V for 10 seconds, max Expansion Connector: 25-pin DSUB, female Dimensions: 269 W x 92 D x 45 mm H (10.6 x 3.6 x 1.6")
ANALOG INPUTS
Channels: 16 single-ended or 8 differential OMB-DAQ-3005 Expansion: An additional 48 analog inputs per board (OMB-PDQ30 module) expansion channels have identical features as the main board channels Expansion Connector: 25-pin, DSUB, female Over-Voltage Protection: ± 30 V without damage Voltage Measurement Speed: 1 μ s per channel Ranges: Software or sequencer selectable on a per-channel basis, ± 10 V, ± 5 V, ± 2 V, ± 1 V, ± 0.5 V, ± 0.2 V, ± 0.1 V [J,K,T, E,R,S,N Types thermocouples] Temperature Measurement Speed: Programmable from 100 μ s to 20 ms per channel Input Impedance: 10M Ω single-ended; 20 M .differential Total Harmonic Distortion: -80 dB typical for ± 10 V range, 1 kHz fundamental Signal-to-Noise and Distortion: 72 dB typ for ± 10 V range, 1 kHz fundamental Bias Current: 40 pA typical (0 to 35°C) Crosstalk: -75 dB typical DC to 60 Hz; -65 dB typical @10 kHz Common Mode Rejection: -70 dB typical DC to 1 kHz
A/D SPECIFICATIONS
Type: Successive approximation Resolution: 16-bit Maximum Sample Rate: 1 MHz Nonlinearity (Integral): ± 2 LSB maximum Nonlinearity (Differential): ± 1 LSB maximum
EXTERNAL ACQUISITION SCAN CLOCK INPUT
Maximum Rate: 1.0 MHz Clock Signal Range: Logical zero 0 V to 0.8 V; logical one 2.4 V to 5.0 V Minimum Pulse Width: 50 ns high, 50 ns low
INPUT SEQUENCER
Analog, digital and frequency inputs can be scanned synchronously Scan Clock Sources: 2 [1. Internal, programmable 2. External, TTL level input] Programmable Parameters per Scan: Channel (random order), gain Depth: 512 locations On-Board Channel-to-Channel Scan Rate: Analog - 1 MHz maximum Digital - 4 MHz if no analog channels are enabled, 1 MHz with analog channels enabled

Tablo C.2 Devami

DIGITAL I/O

Channels: 24 Ports: 3 x 8 bit, each port is programmable as input or output
Input Scanning Modes: 2 programmable
Input Characteristics: 220 Ω series resistor, 20 pF to common
Input Protection: ± 15 kV ESD clamp diodes
Input Levels: Low: 0 to 0.8 V; High: 2.0 V to 5.0 V
Output Levels: Low: <0.8 V; High: >2.0 V
Output Characteristics: Output 1.0 mA per pin
Sampling/Update Rate: 4 MHz max

PATTERN GENERATION OUTPUT

Two of the 8-bit ports can be conŞekild for 16-bit pattern generation. The pattern can also be updated synchronously with an acquisition at up to 1 MHz.

COUNTER

Channels: 4 x 32 bit
Input Frequency: 20 MHz max
Input Signal Range: -15 V to 15 V
Input Characteristics: 10K Ω pull up, ± 15 kV ESD protection
Trigger Level: TTL
Minimum Pulse Width: 25 ns high, 25 ns low
Debounce Times: 16 selections from 500 ns to 25.5 ms; positive or negative edge sensitive; glitch detect mode or debounce mode
Time Base Accuracy: 50 ppm (0° to 50°C)
Five Programmable Modes: counter, period, pulsewidth, timing, Encoder
Multi-Axis Quadrature Encoder Inputs: 1 channel with A (phase), B (phase) and Z (index); 2 channel with A (phase) and B (phase); x1, x2 and x4 count modes; single-ended TTL

FREQUENCY/PULSE GENERATORS

Channels: 2 x 16-bit
Output Waveform: Square wave
Output Rate: 1 MHz base rate divided by 1 to 65,535 (programmable)
High-Level Output Voltage: 2.0 V min @ -1.0 mA; 2.9 V min @ -400 μ A
Low-Level Output Voltage: 0.4 V max @ 400 μ A

C.3 TESTO 350S Baca Gazı Analiz Cihazı




Şekil C.3 TESTO 350S Baca Gazı Analiz Cihazı

Tablo-C.3 TESTO 350S Baca Gazı Analiz Cihazının Teknik Özellikleri

Dimensions:	16" x 11" x 4"	Dewpoint calculation:	0 to 99 °C td
Weight:	4.08 kg	Maximum positive pressure/Flue gas:	20" H ₂ O
Storage temperature:	-4 to +49 °C	Maximum negative pressure:	80" H ₂ O
Operating temperature:	-5 to +45 °C	Pump flow:	0.5 - 1.2 l/min
Housing material:	ABS	Max. dust load:	20 g/m ³ dust in flue gas
Memory:	250,000 readings	Max. humidity load:	+70 °C Dewpoint temperature at sample gas inlet of analyzer box
Power supply:	Via built-in power supply (90 V to 260 V, 47 to 63 Hz) or exchangeable rechargeable batteries or external 12 V cables	Trigger input:	Voltage 5 to 12 Volt (rising or falling edge)
Electrical power consumption:	0.5 A (110 V AC), 0.3 A (230 V AC)	Pulse width:	> 1 s
Load:	5 V/max, 5 mA, 12 V/max. 40 mA	Communication with PC:	RS 232
Sensor Properties			
	O₂	CO	CO₂ (calculated)
Range	0 to 25% vol.	l. 0 to 10,000 ppm H ₂ comp.	0 - CO ₂ max vol. %
Accuracy	< 0.2% of m.v.	< 5 ppm 0 to 99 ppm < 5% of m.v. 100 to 2,000 ppm < 10% of m.v. 2,001 to 10,000 ppm	Calculated from O ₂
Resolution	0.1 vol. %	1 ppm	0.01 vol. %
Response Time	20 s (t95)	40 s (t90)	-
Type:	Electrochemical	Electrochemical	Electrochemical

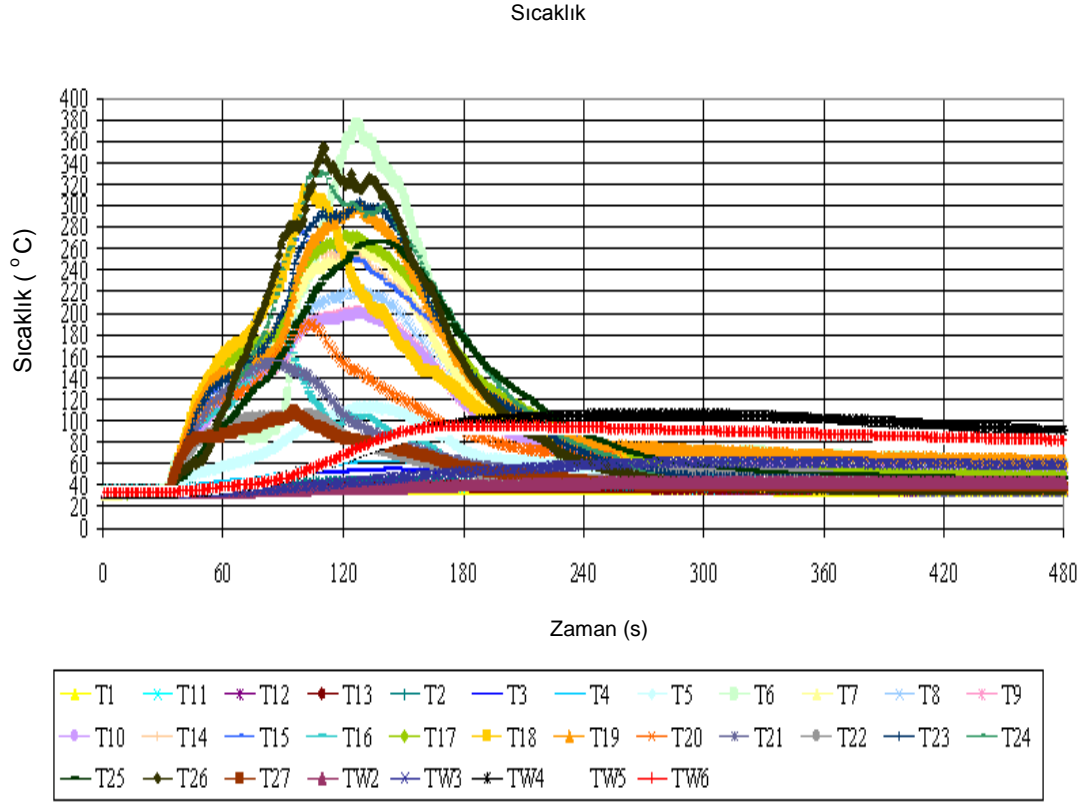
C.4 ASHCROFT CXLdp Fark Basınç Algılayıcı

Tablo C.4 ASHCROFT CXLdp Fark Basınç Algılayıcının Teknik Özellikleri

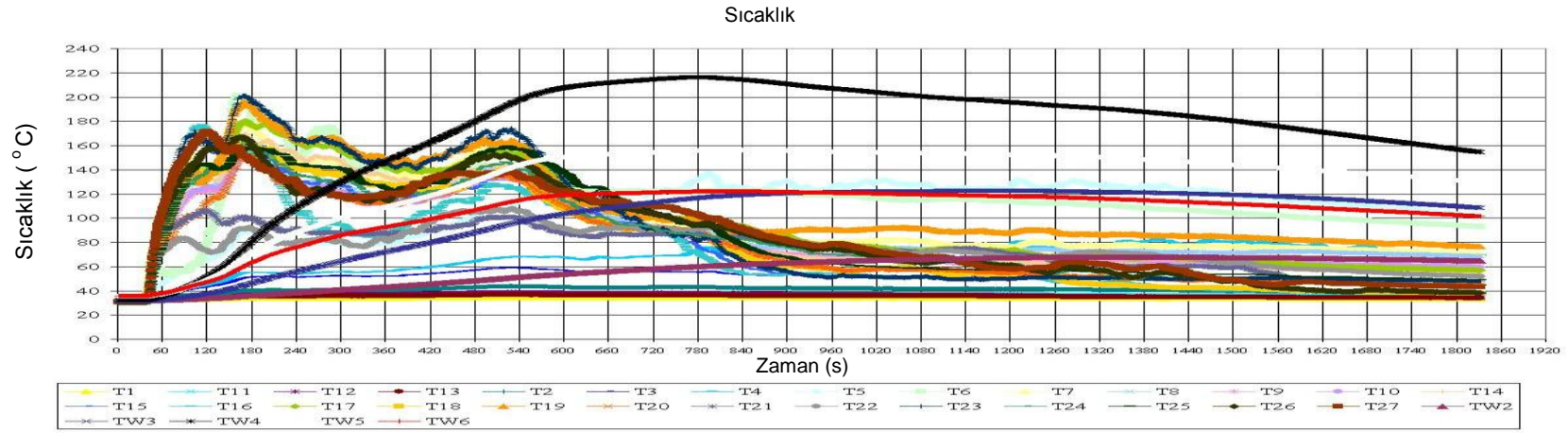
	Reference Temperature	21 °C
	Accuracy Class	± 0.4 %
	Pressure Range	0 - 0.10" Water Column
	Response Time	250 msec
	Warm-up Time	15 sec
	Storage Temperature Limit	-40 to 82 °C
	Operating Temperature Limit	-18 to 71 °C
	Compensated Temperature Range	2 to 54 °C
	Power supply	12 -36 VDC
	Output signal	4-20 mA
	Weight:	Approximately 71 g

EK-D

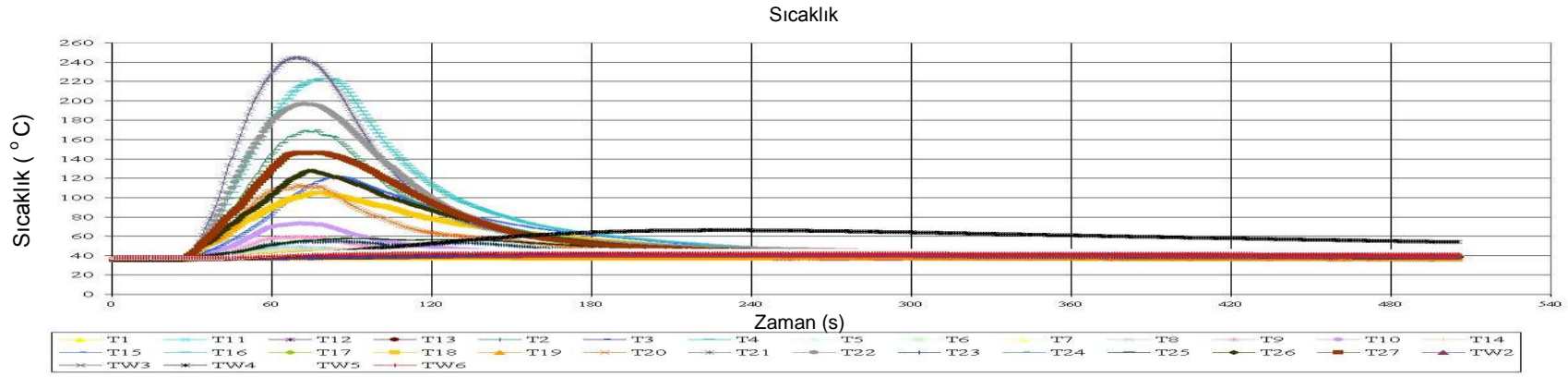
EK DENEY SONUÇLARI



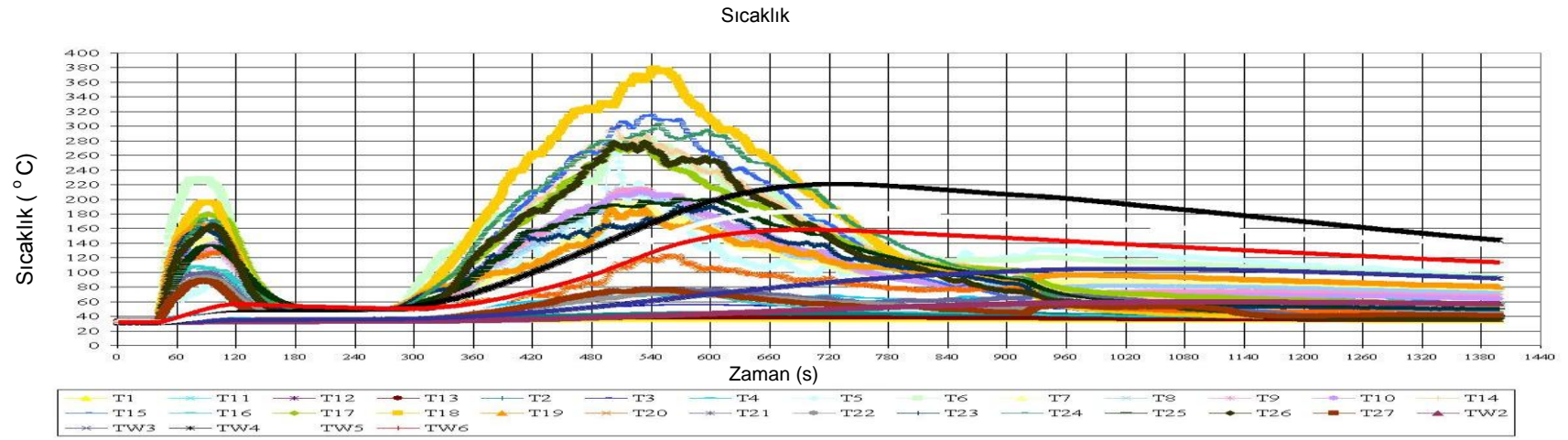
Şekil D.1 Deney No: 0000



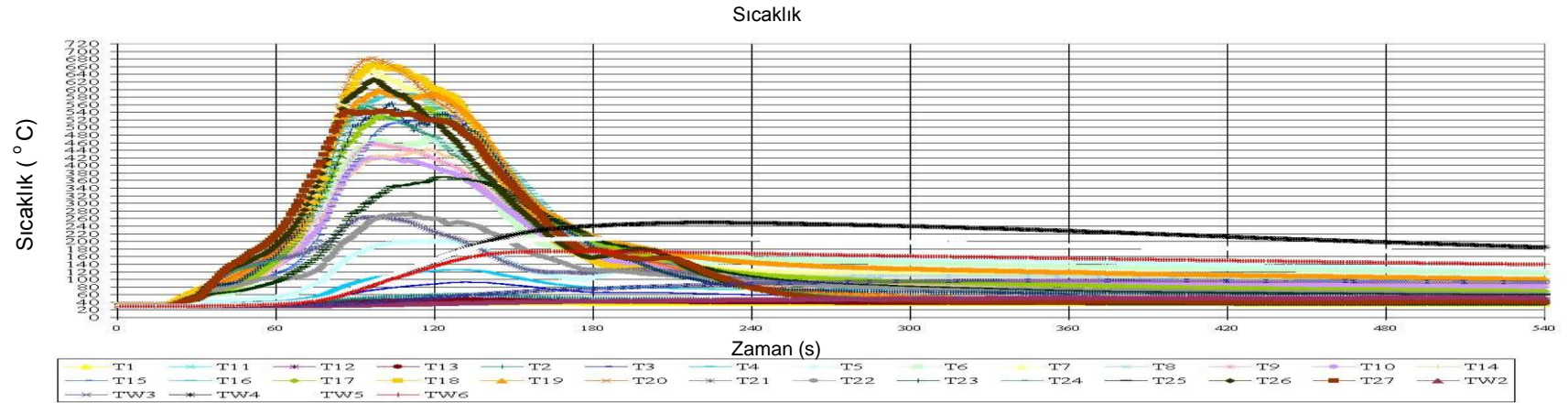
Şekil D.2 Deney No: 0012



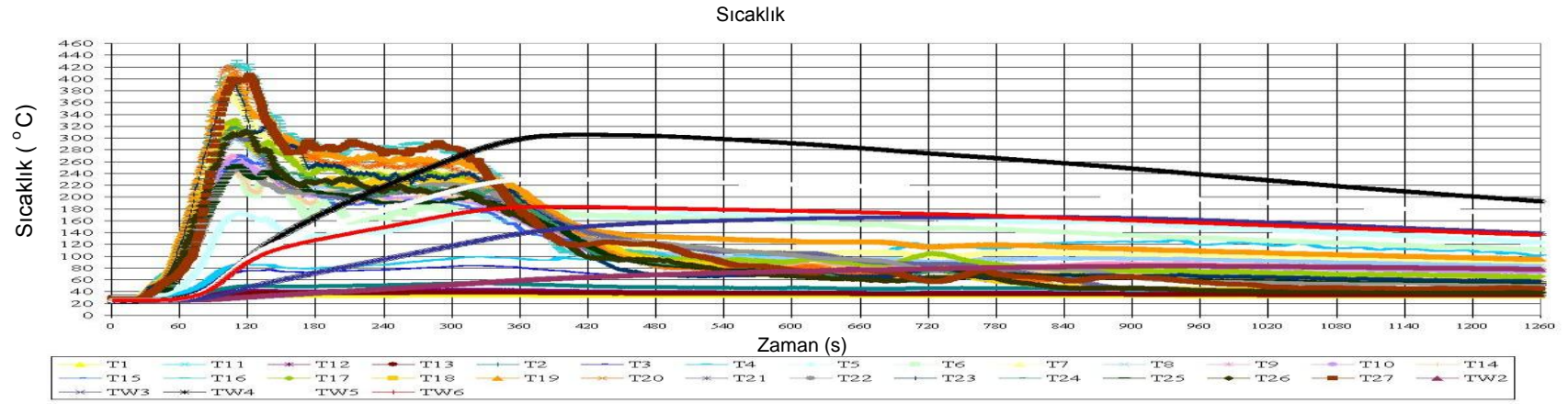
Şekil D.3 Deney No: 2221



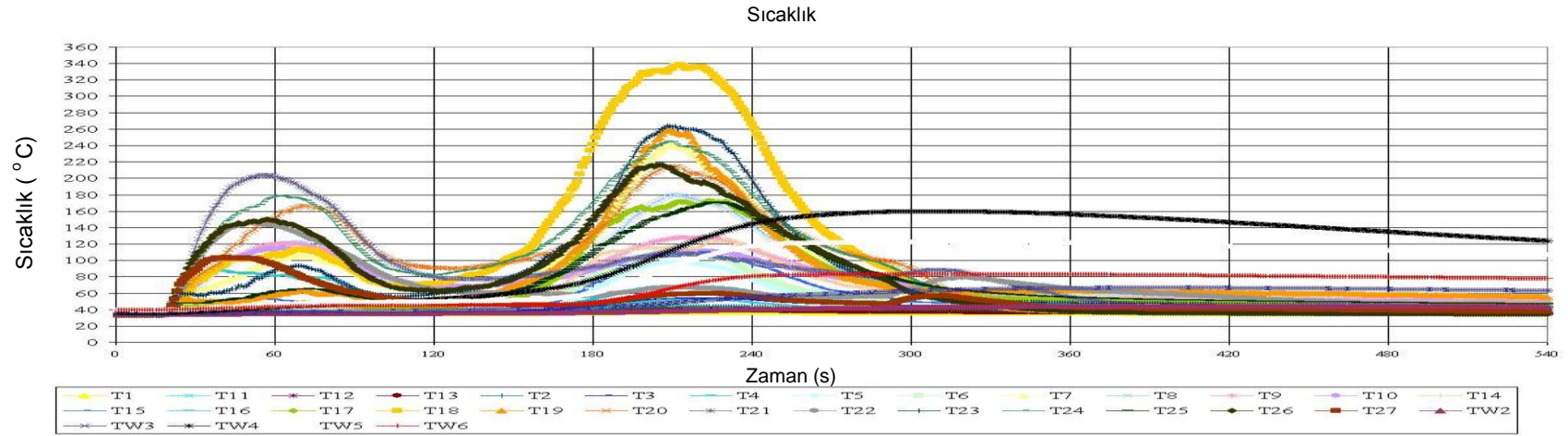
Şekil D.4 Deney No: 0101



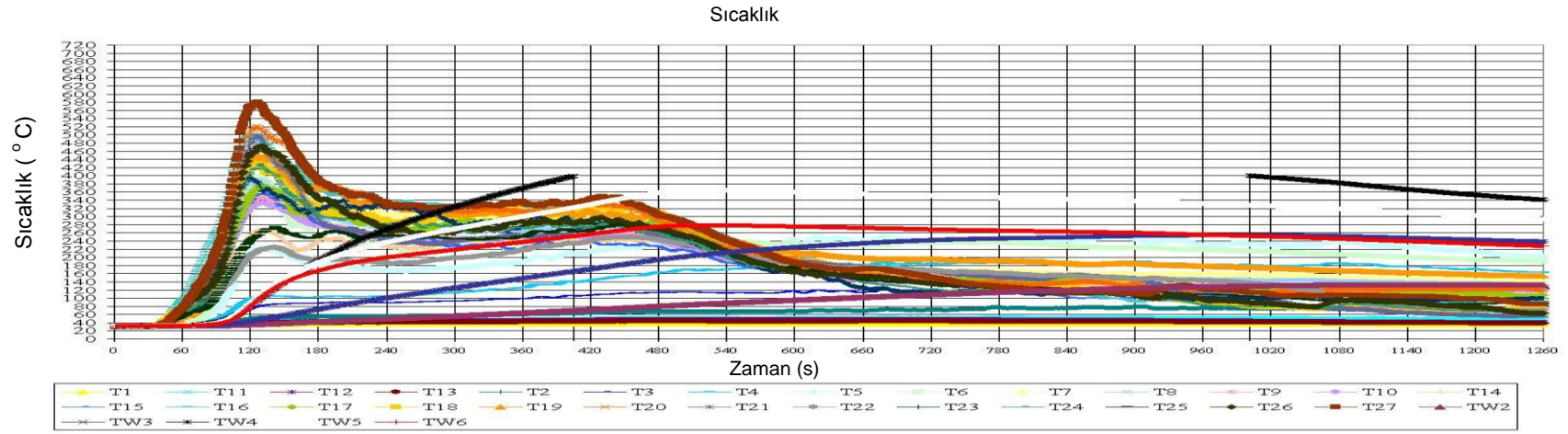
Şekil D.5 Deney No: 0110



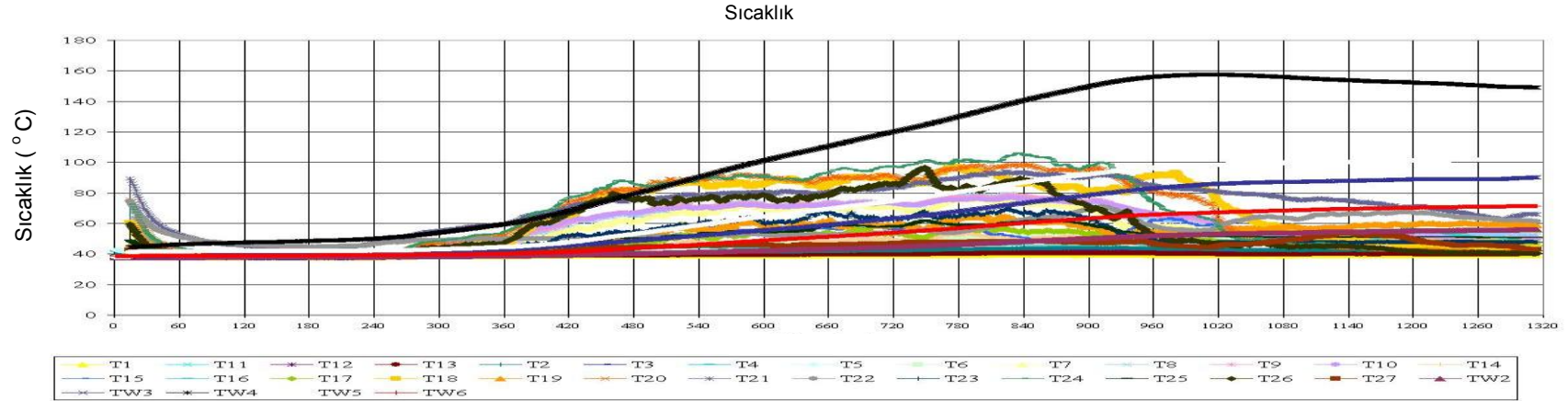
Şekil D.6 Deney No: 0021



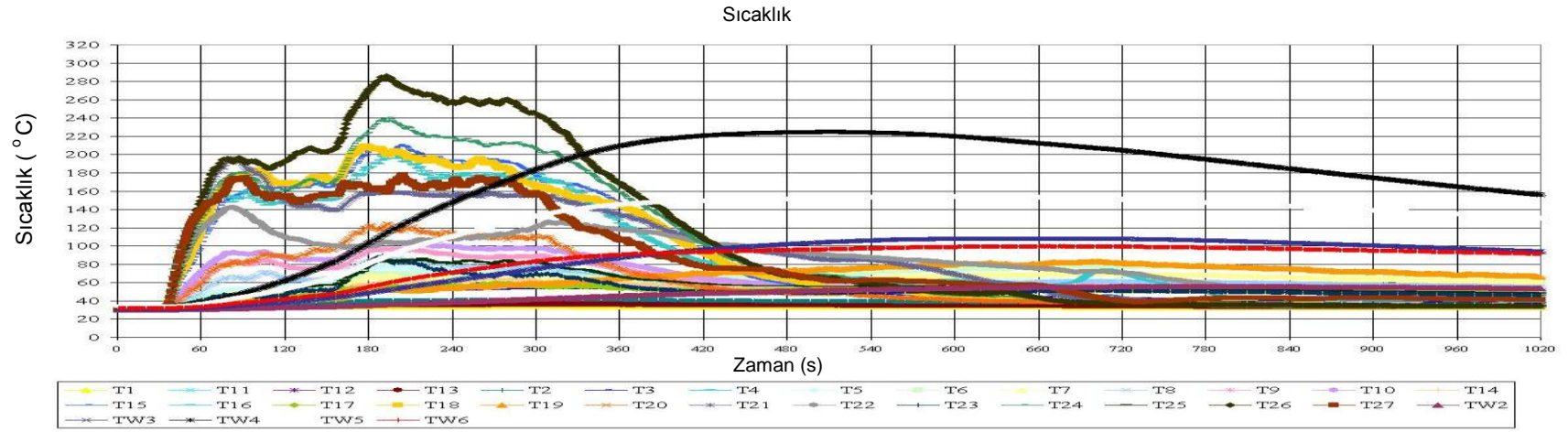
Şekil D.7 Deney No: 1100



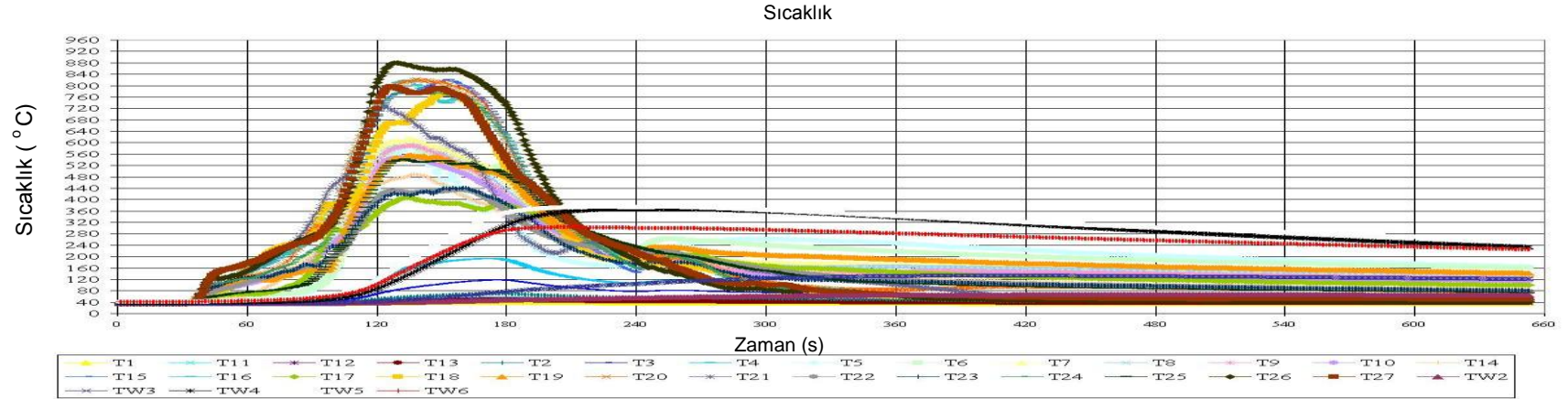
Şekil D.8 Deney No: 0122



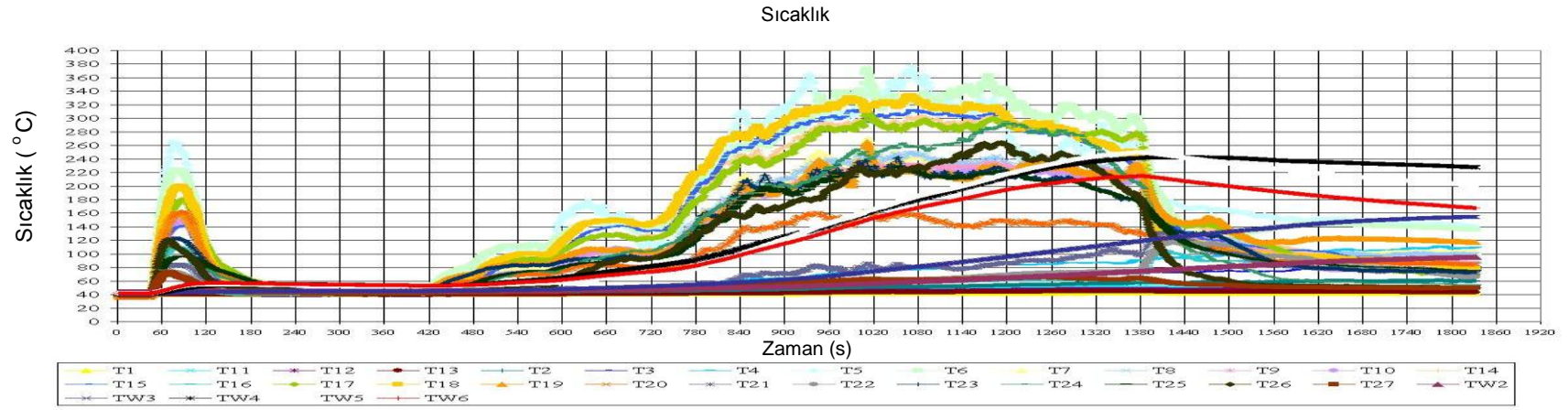
Şekil D.9 Deney No: 1002



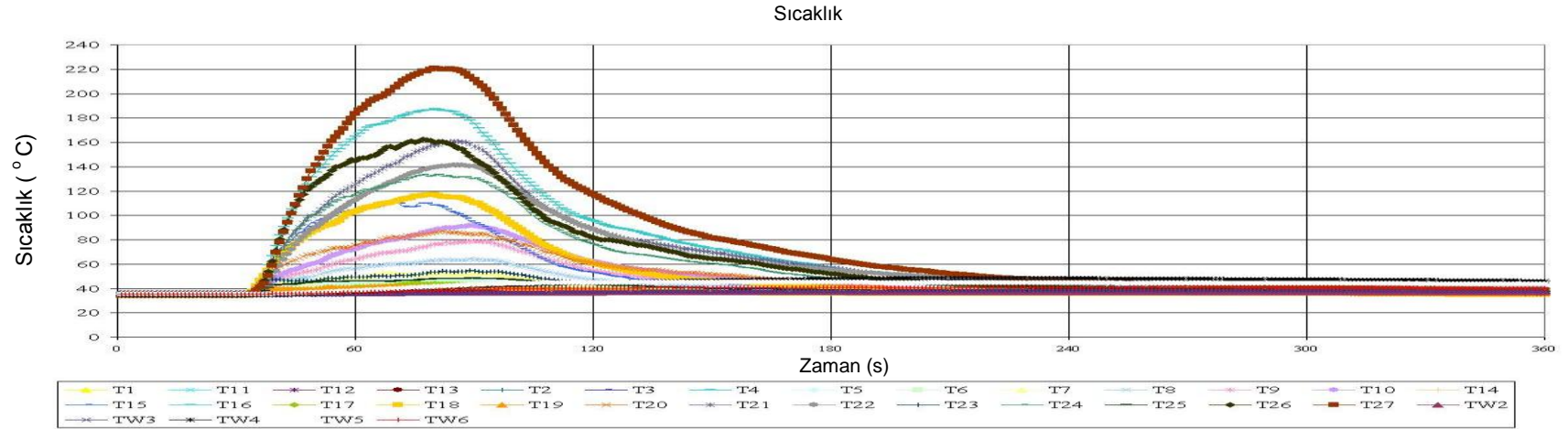
Şekil D.10 Deney No: 1011



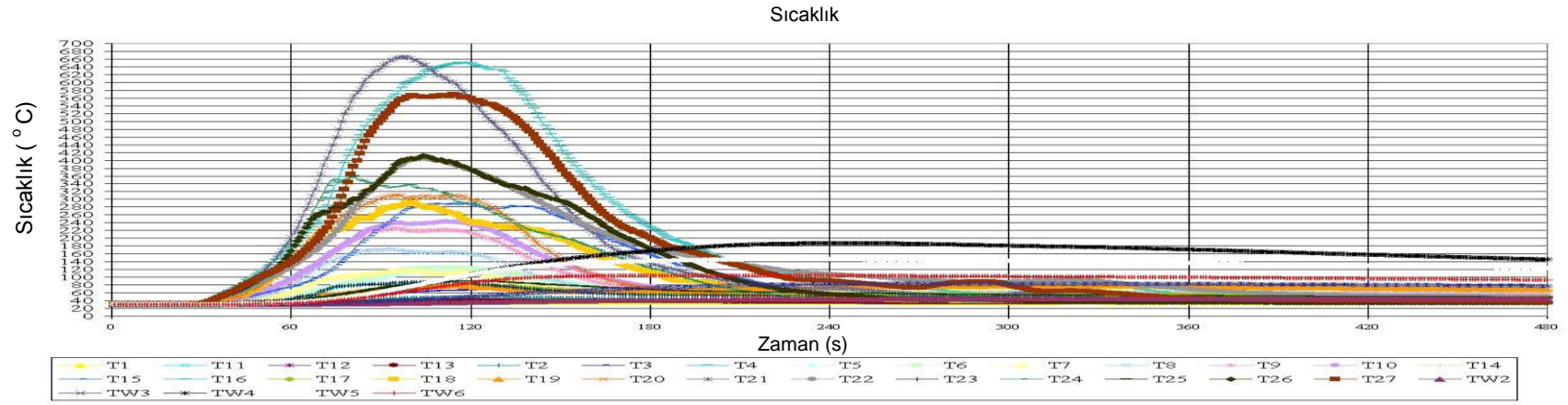
Şekil D.11 Deney No: 0220



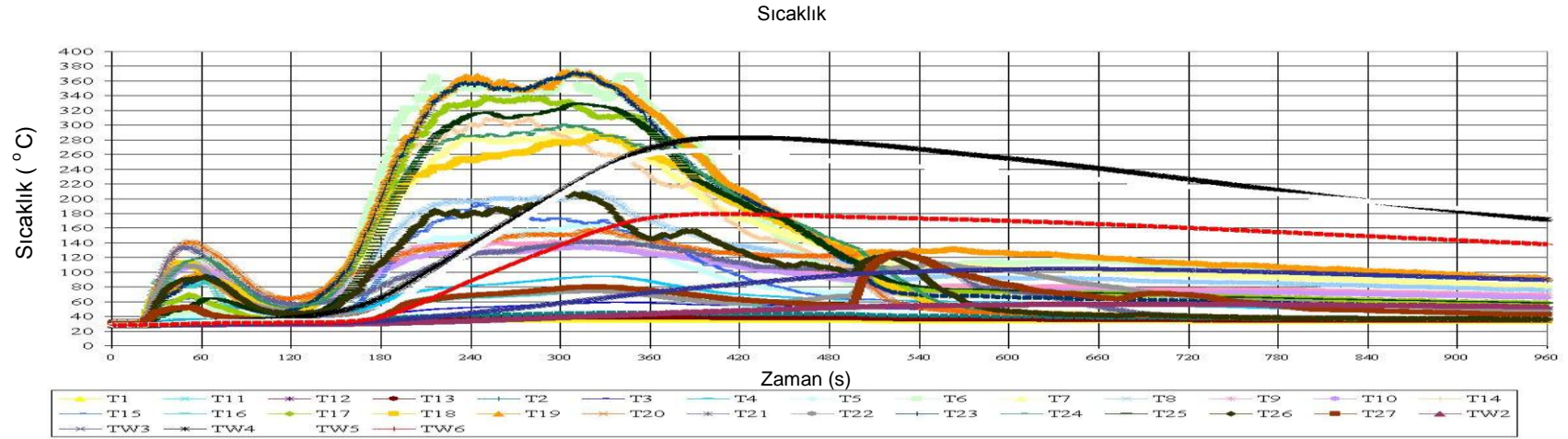
Şekil D.12 Deney No: 0202



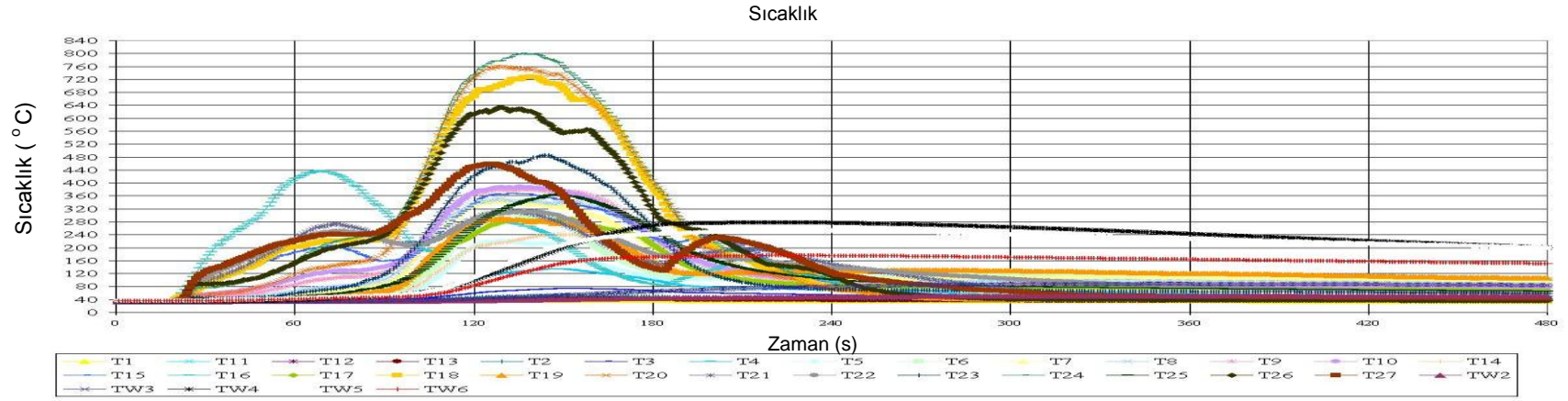
Şekil D.13 Deney No: 1112



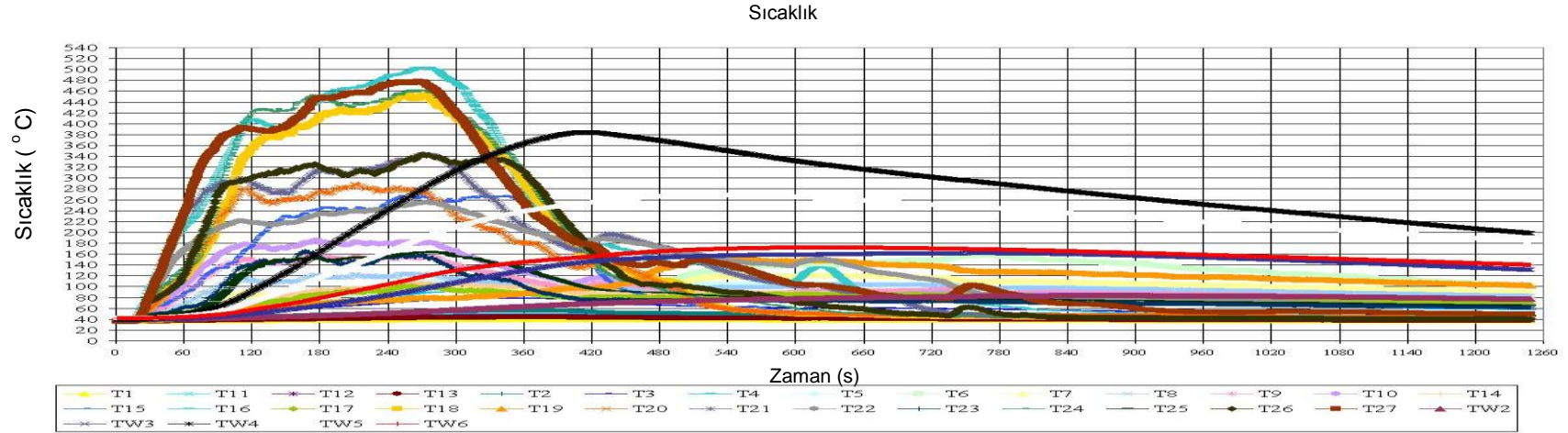
Şekil D.14 Deney No: 1020



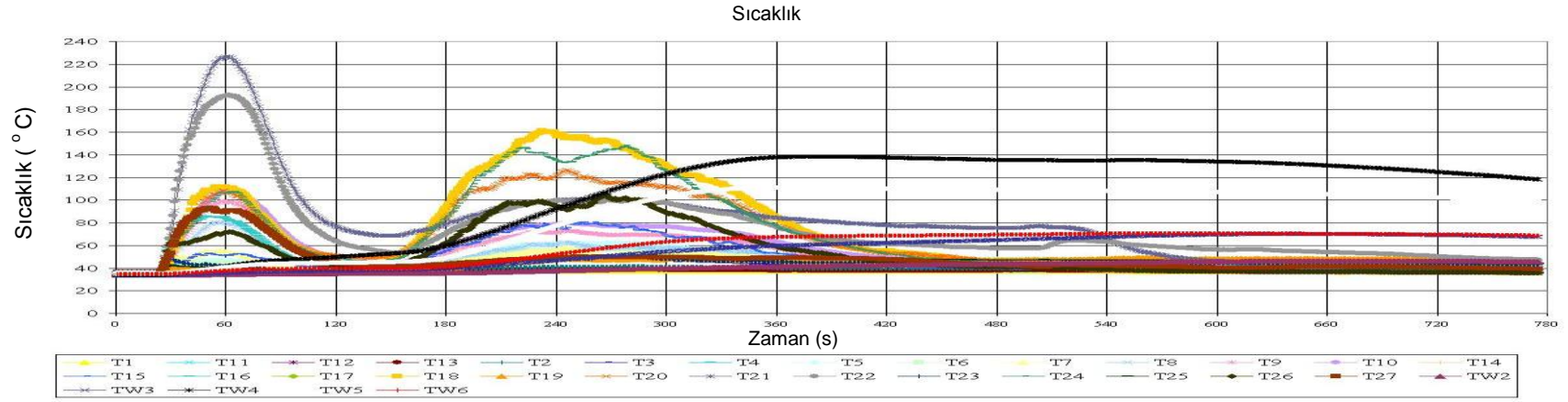
Şekil D.15 Deney No: 1201



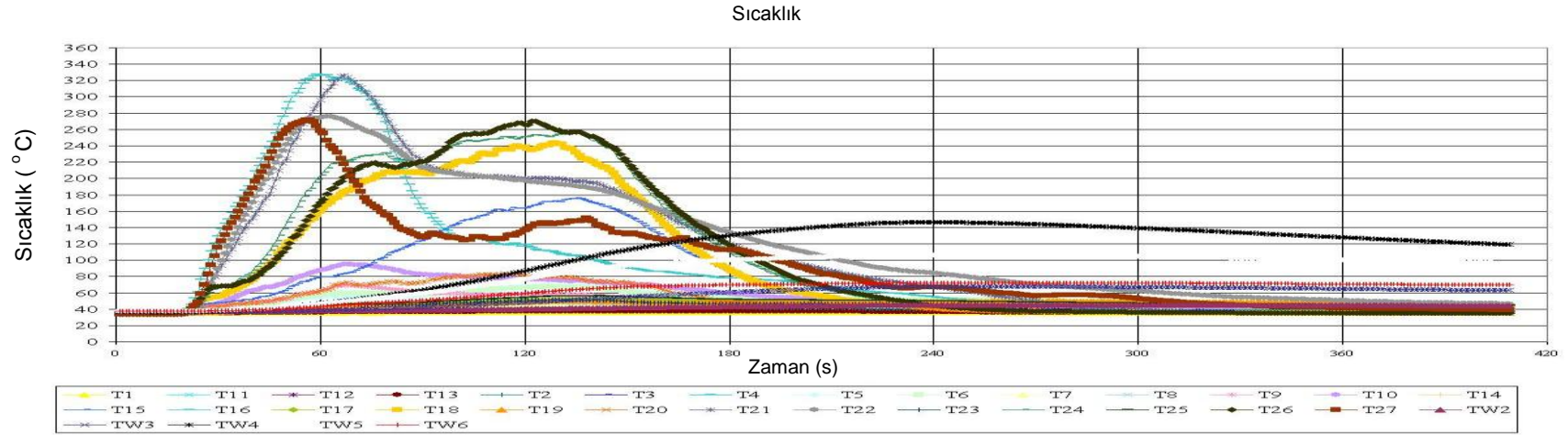
Şekil D.16 Deney No: 1210



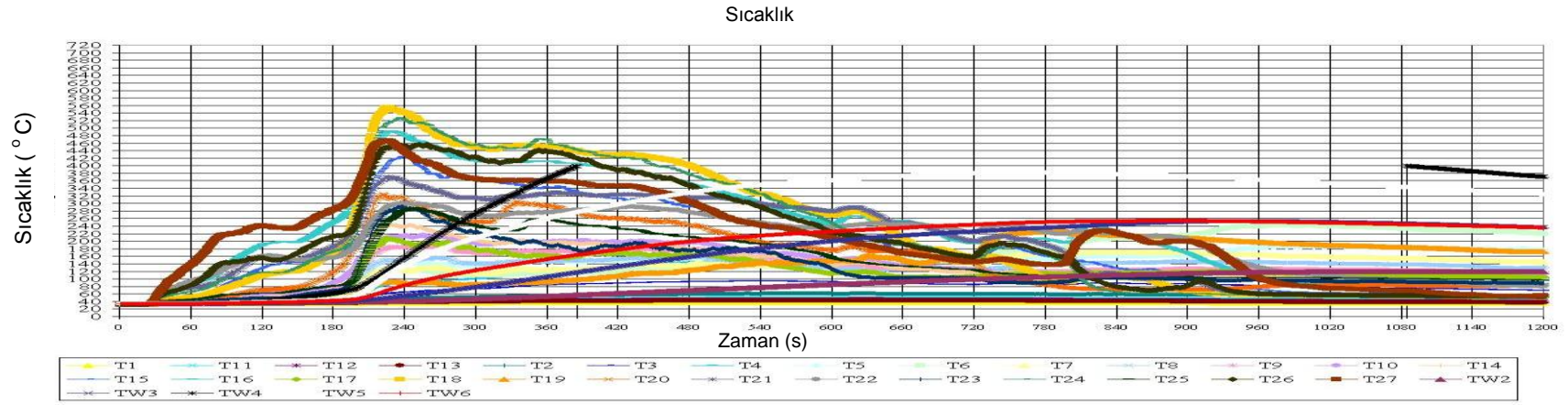
Şekil D.17 Deney No: 1121



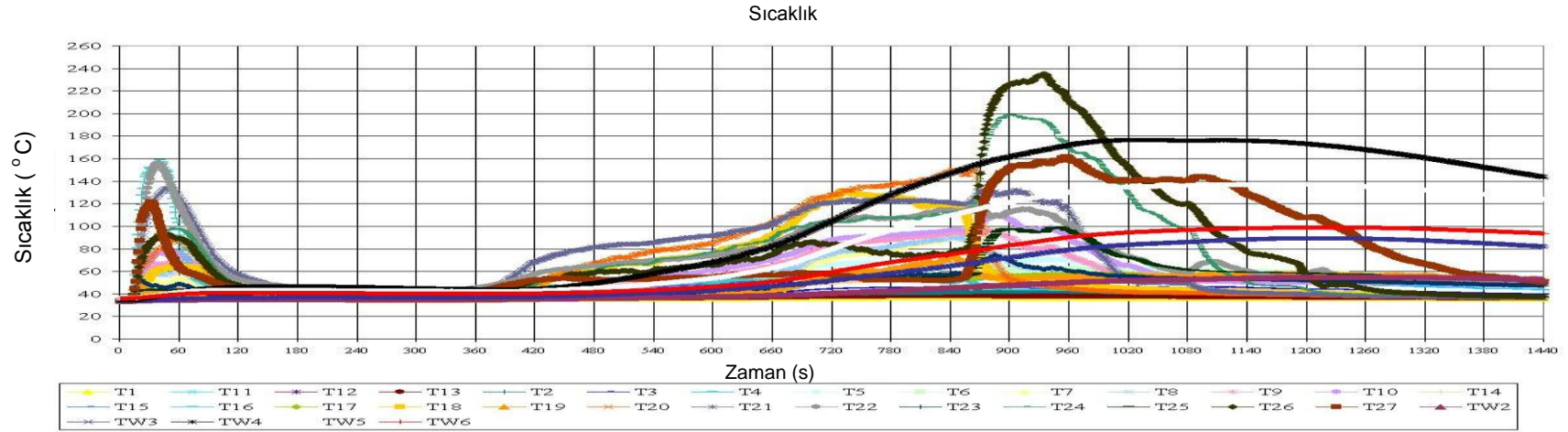
Şekil D.18 Deney No: 2001



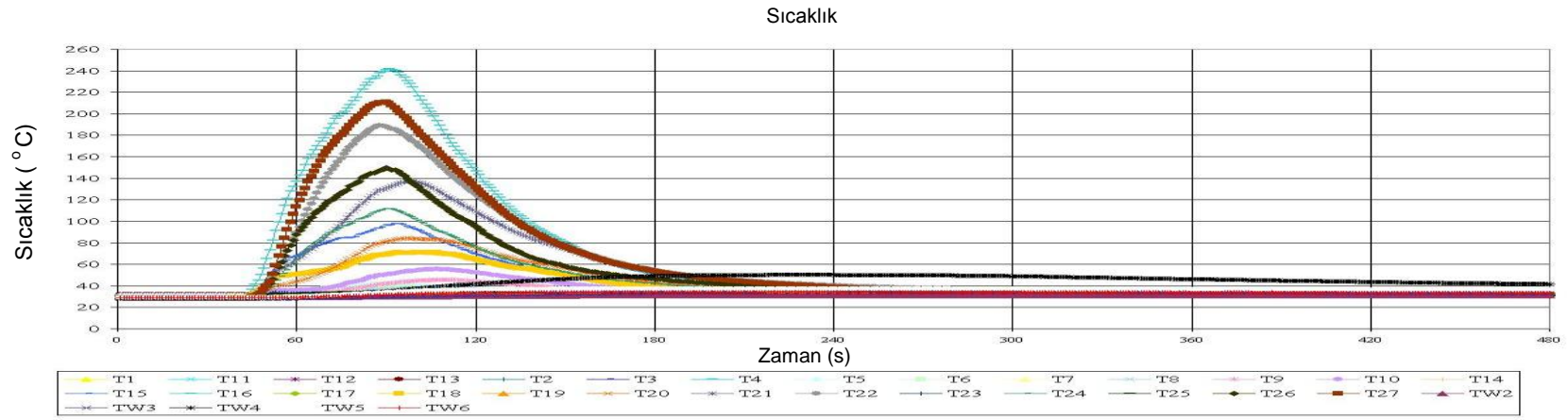
Şekil D.19 Deney No: 2010



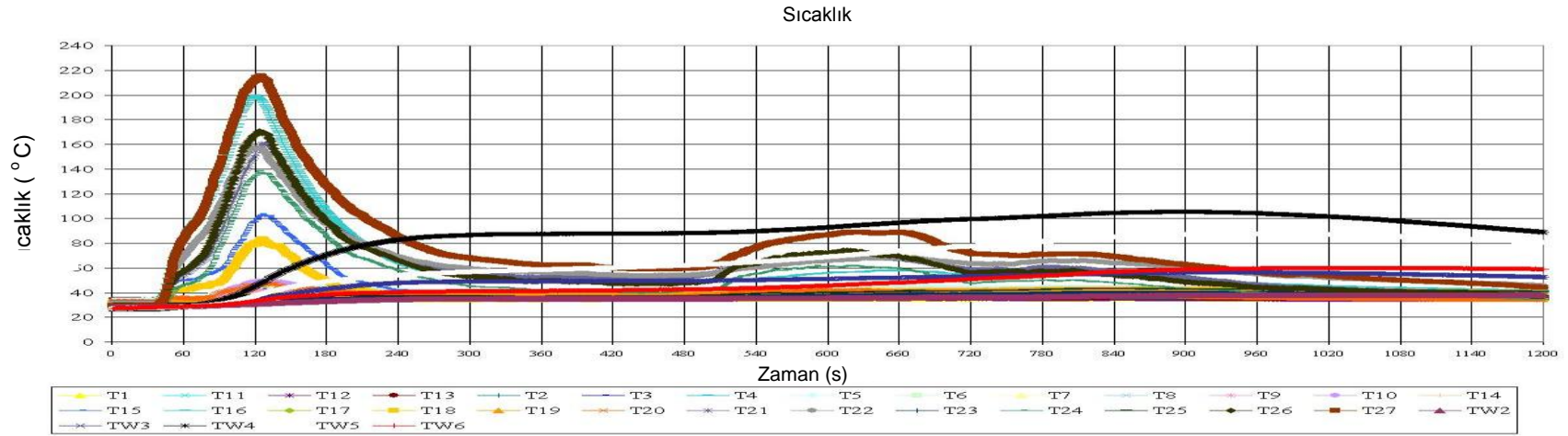
Şekil D.20 Deney No: 1222



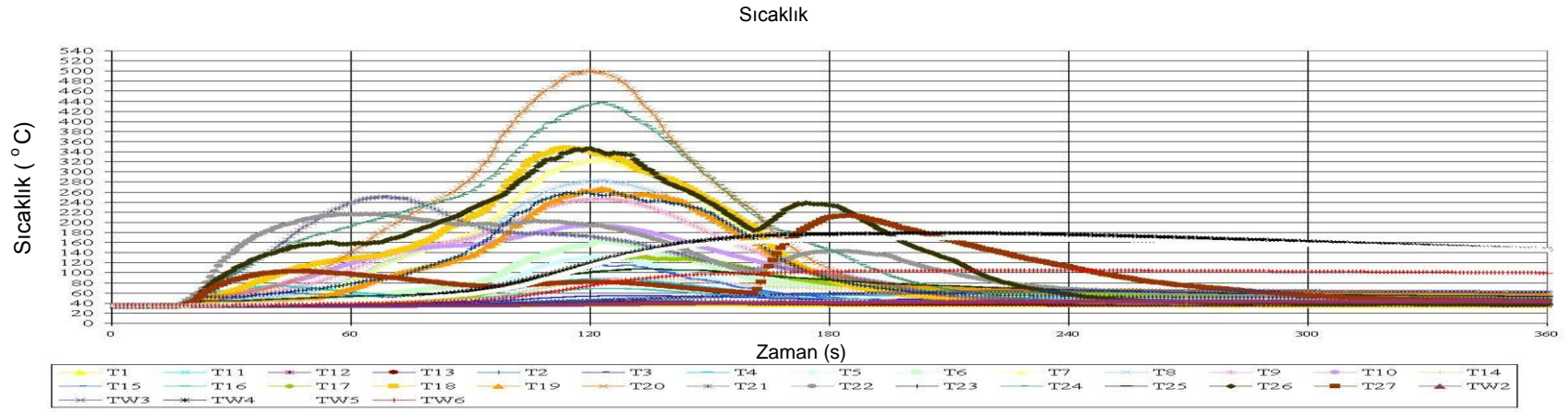
Şekil D.21 Deney No: 21002



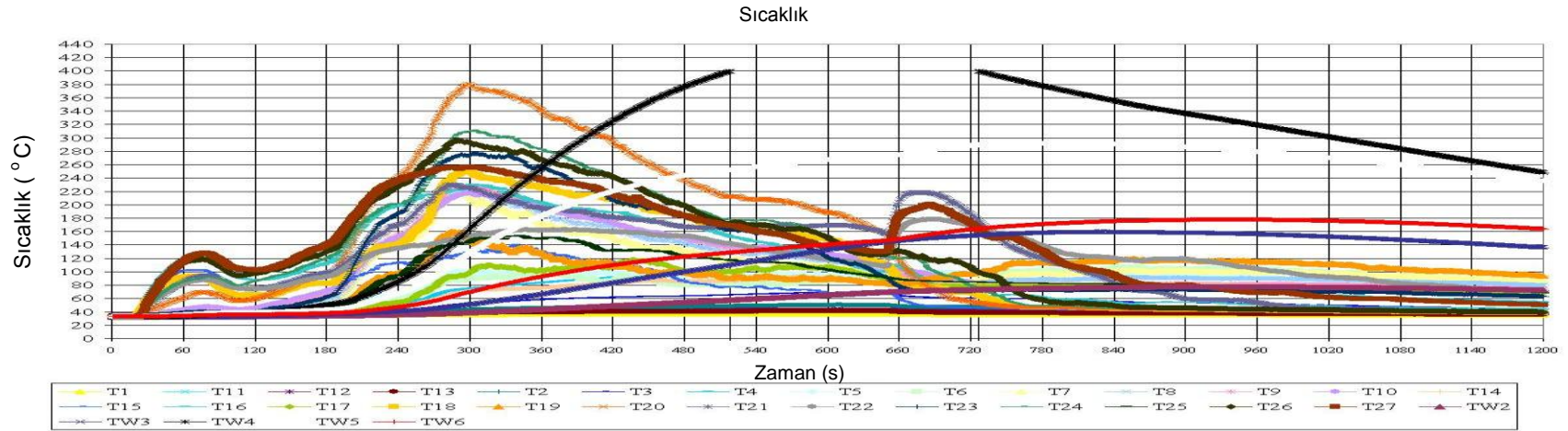
Şekil D.22 Deney No: 2111



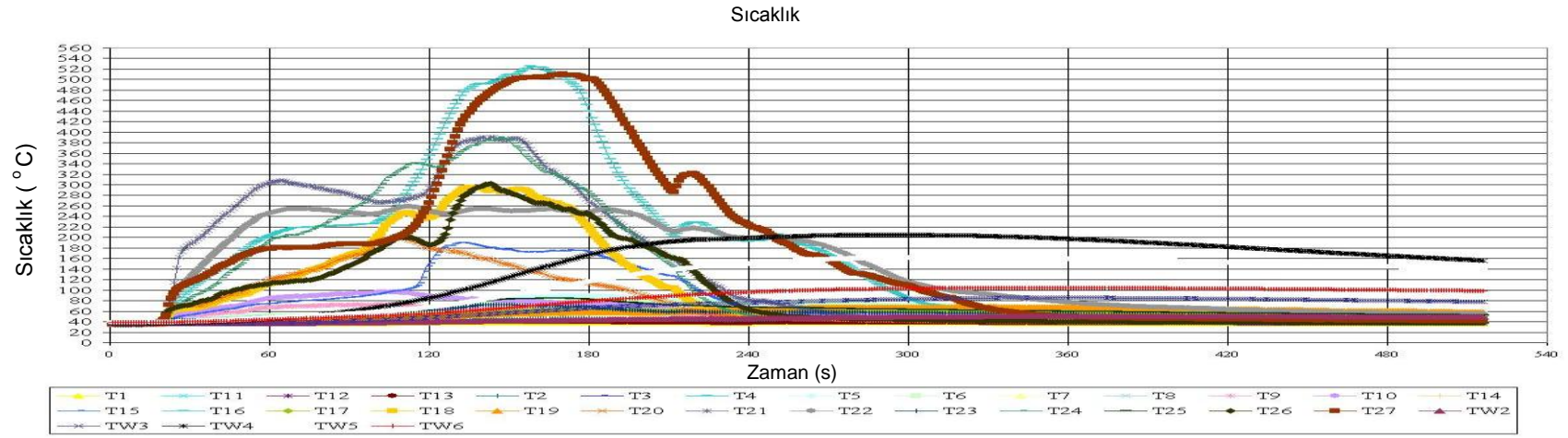
Şekil D.23 Deney No: 2022



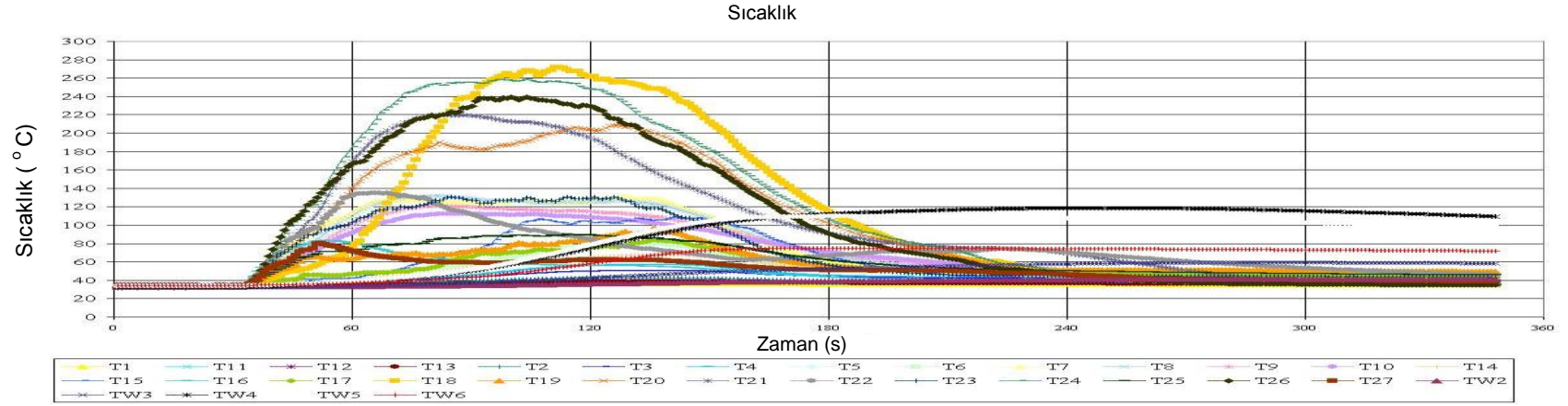
Şekil D.24 Deney No: 2200



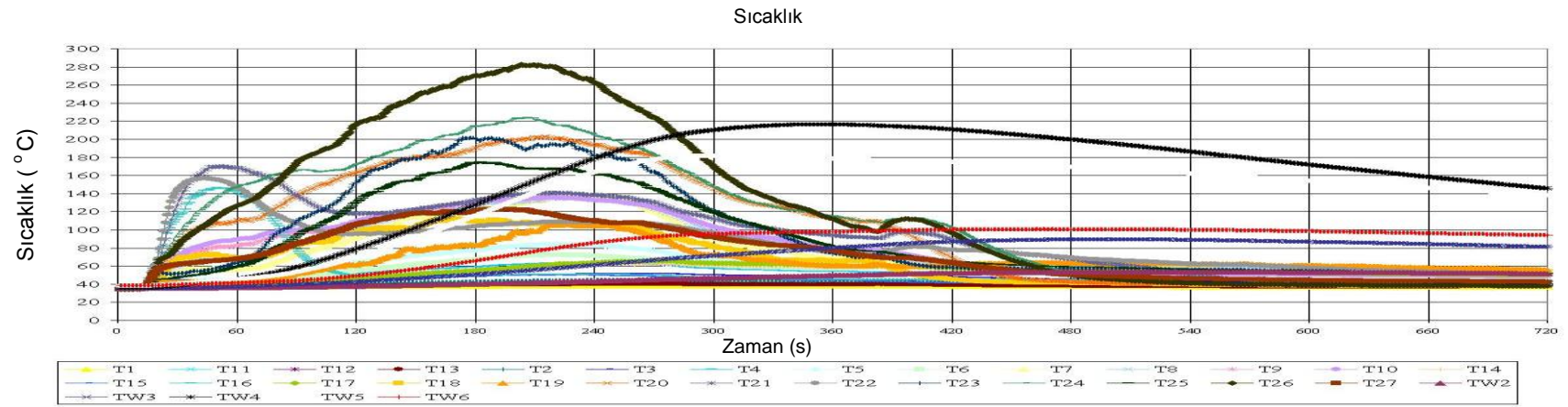
Şekil D.25 Deney No: 2212



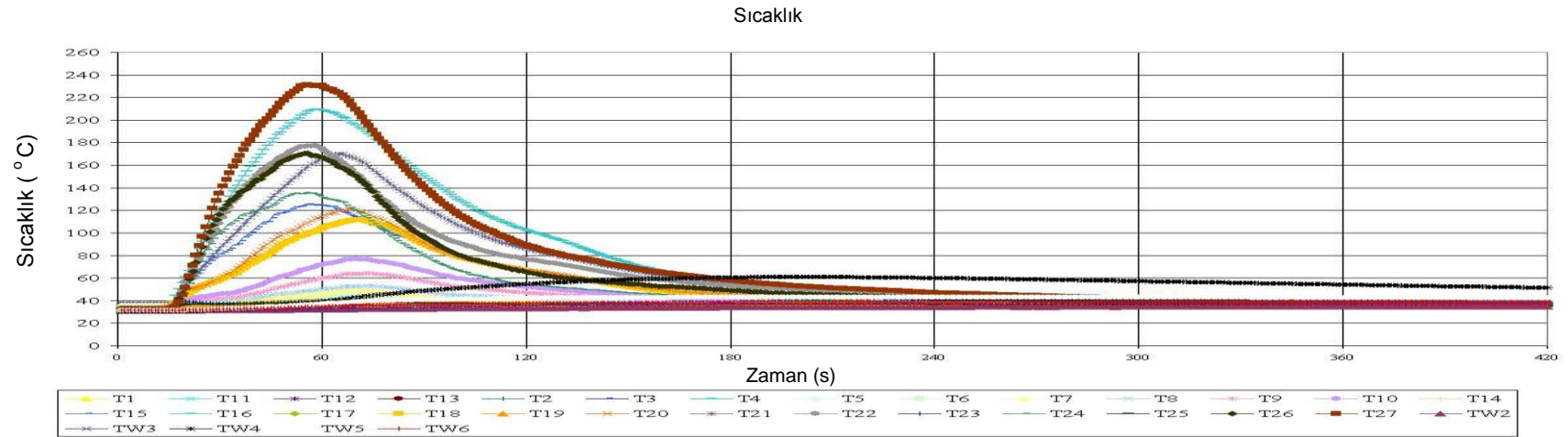
Şekil D.26 Deney No: 2120



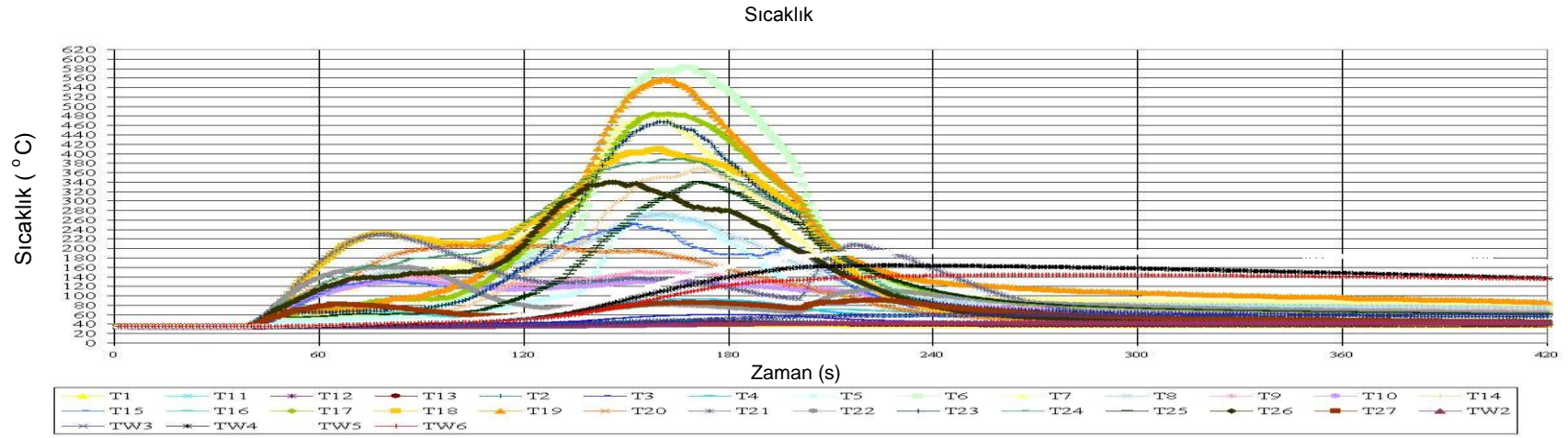
Şekil D.27 Deney No: 1000



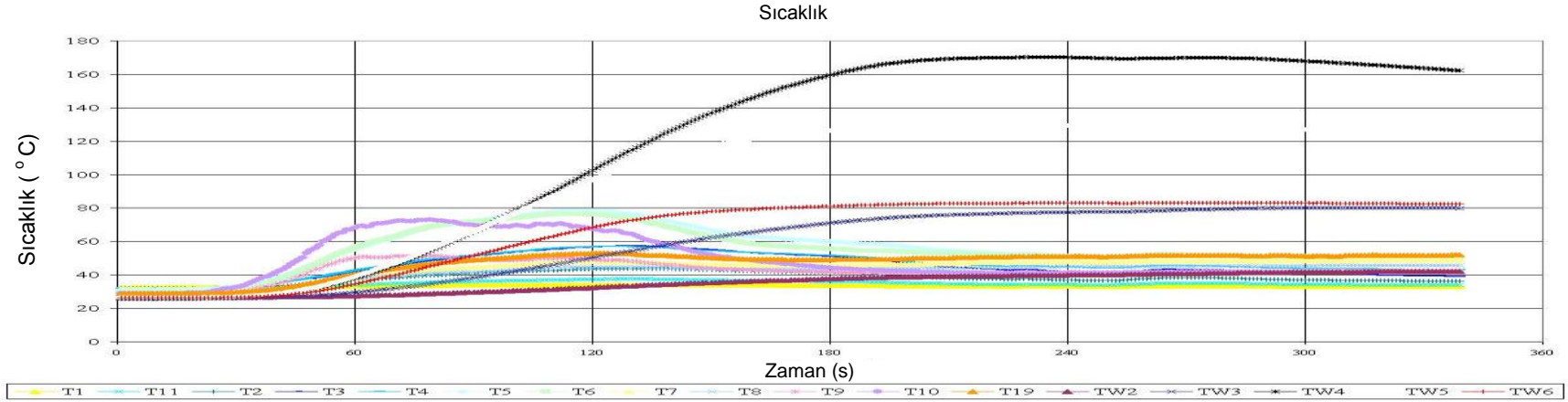
Şekil D.28 Deney No: 2101



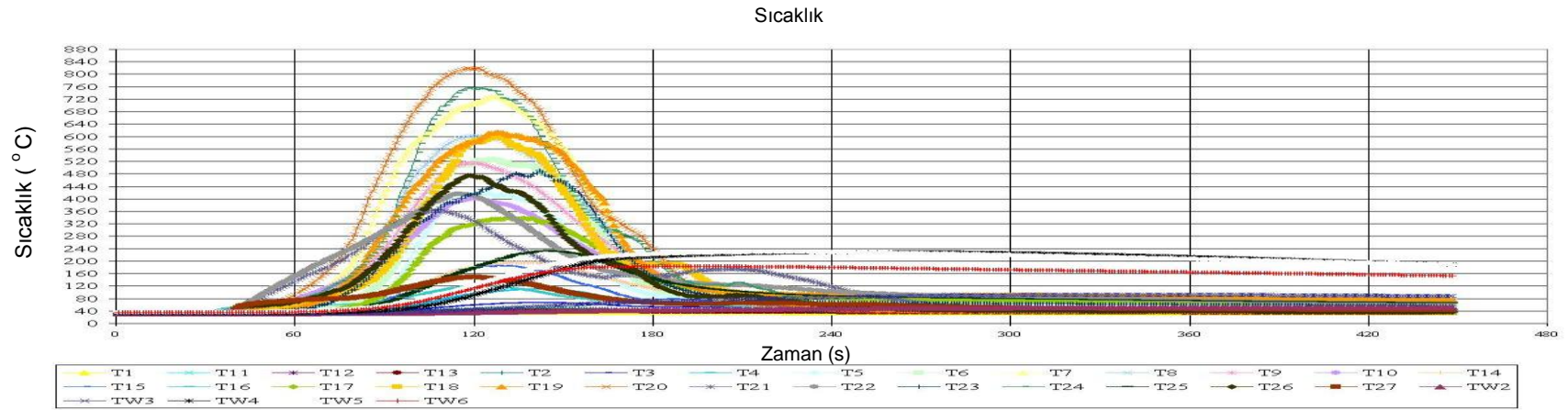
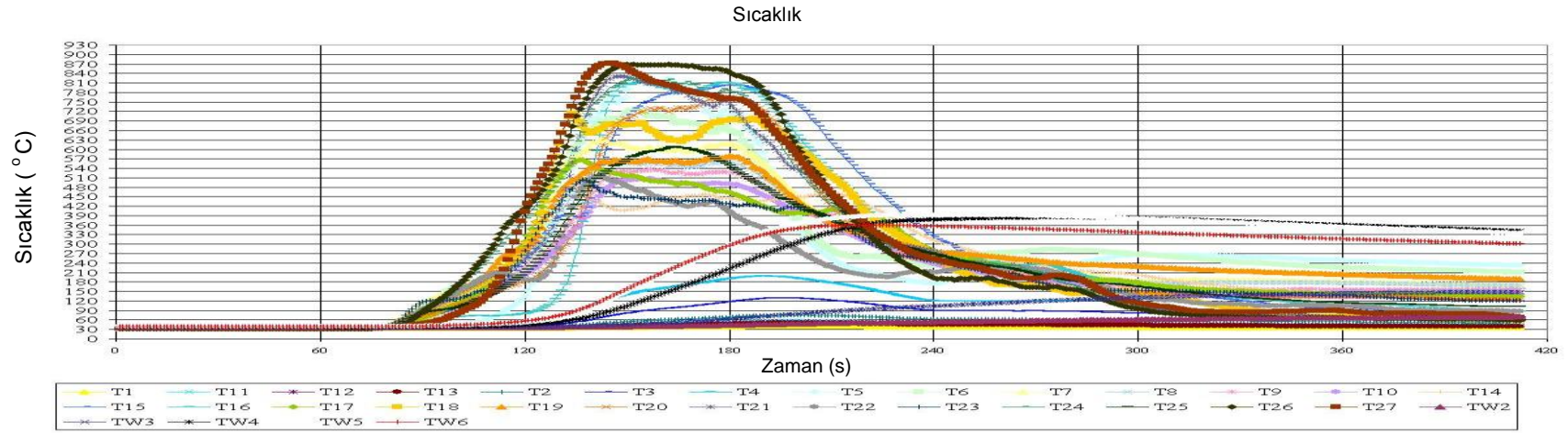
Şekil D.29 Deney No: 2111

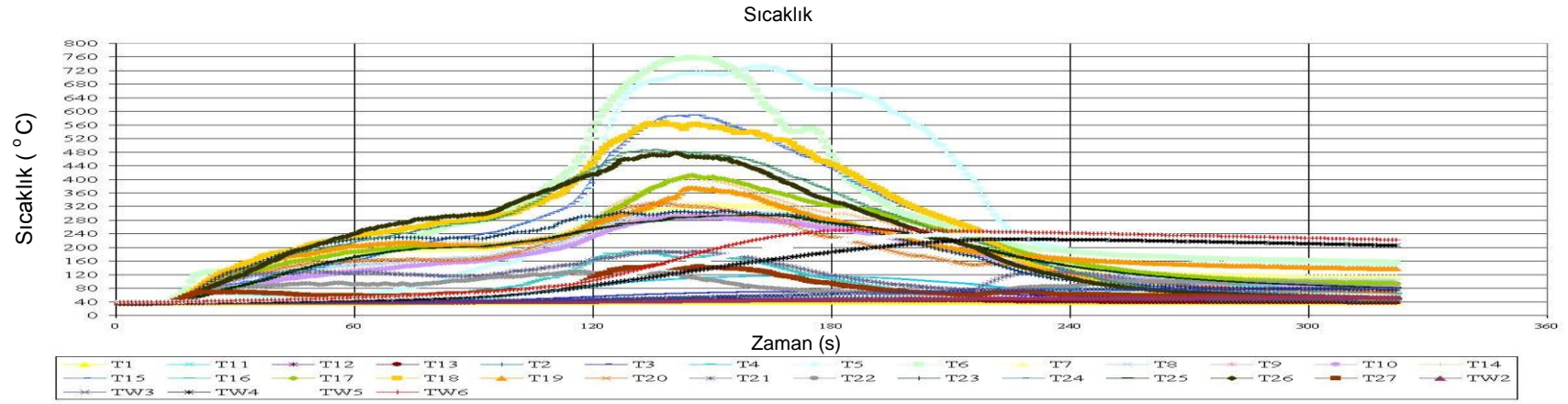


Şekil D.30 Deney No: 1200

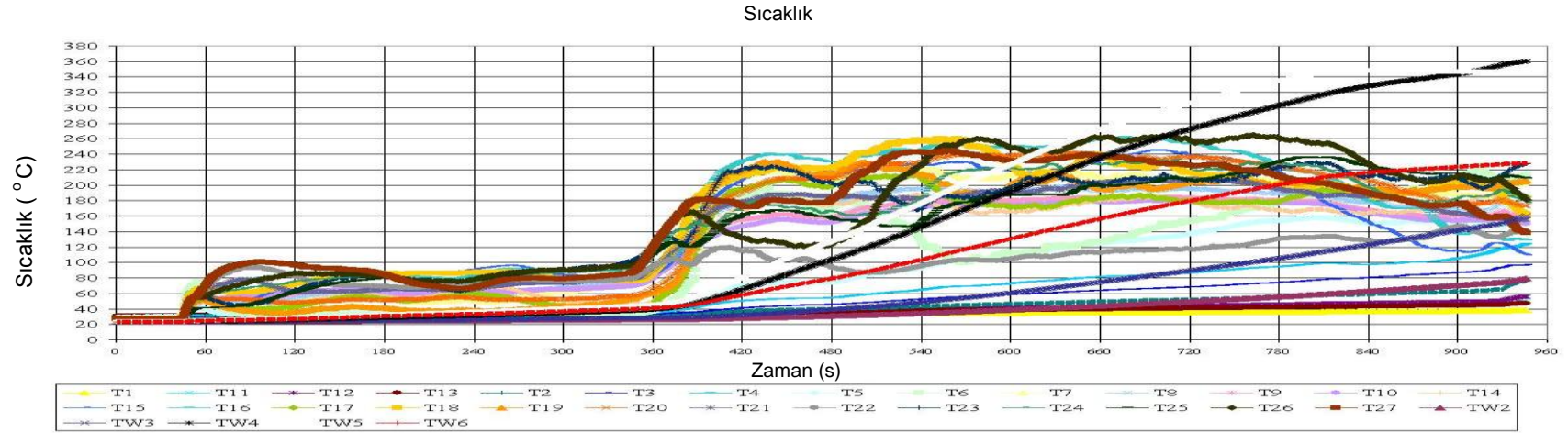


Şekil D.31 Deney No: 20220

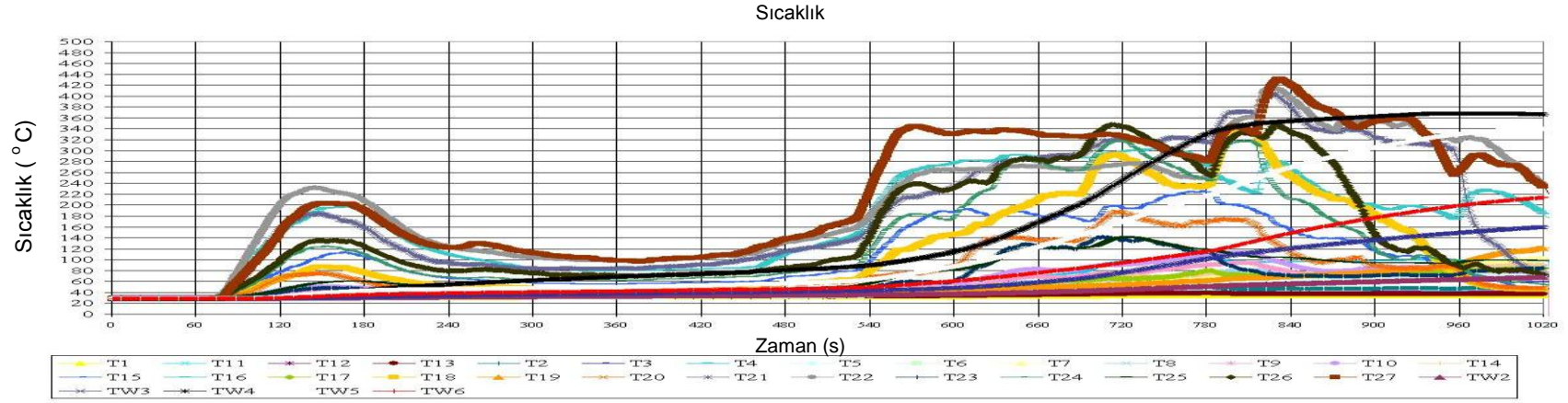




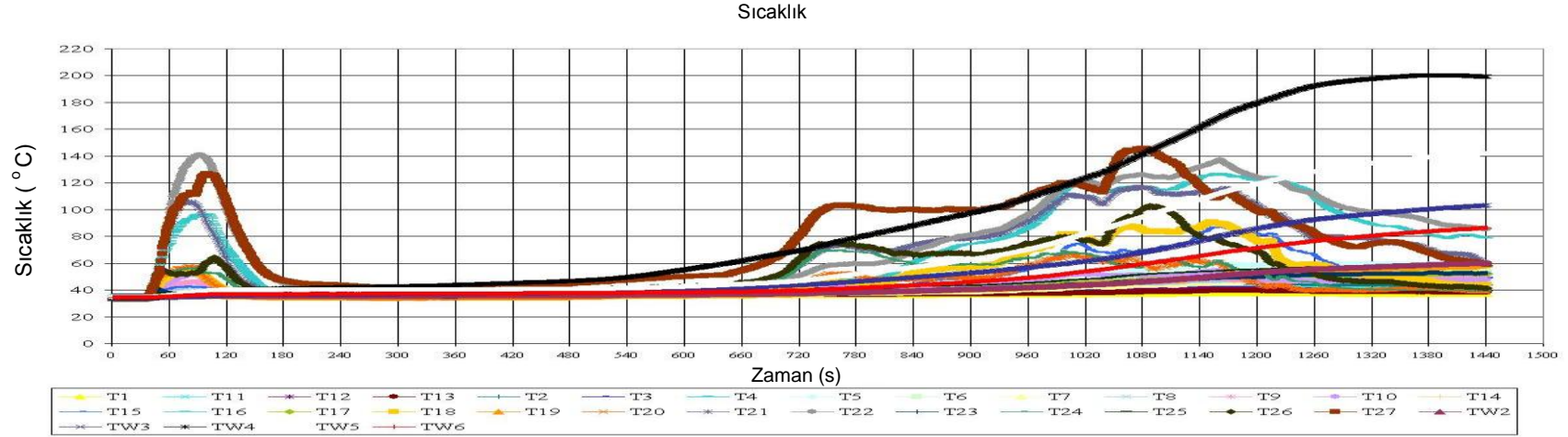
Şekil D.34 Deney No: 02000



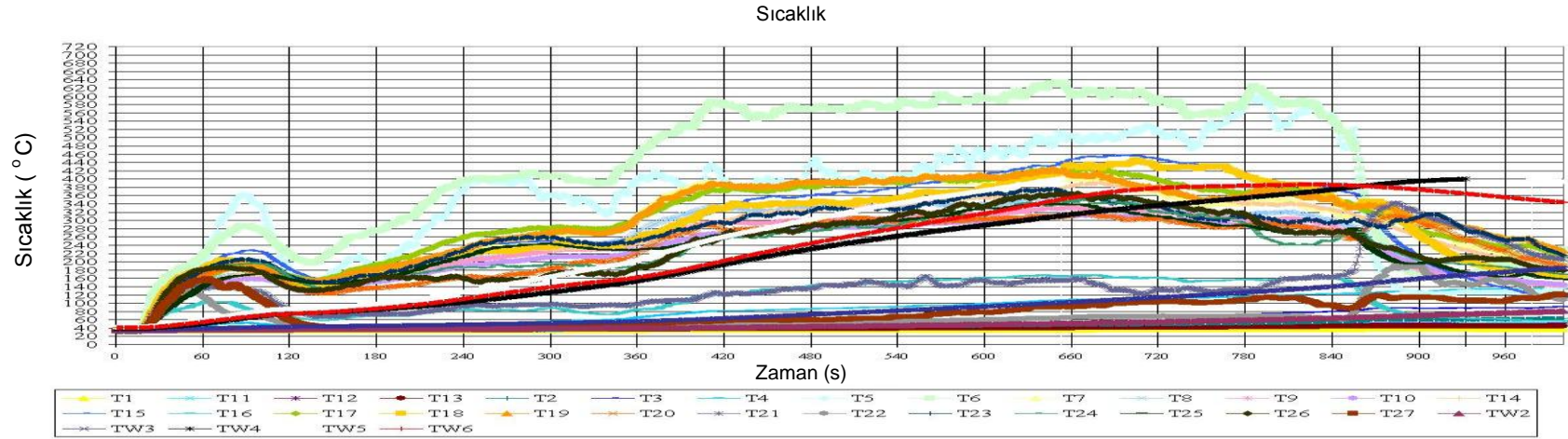
Şekil D.35 Deney No: 02022



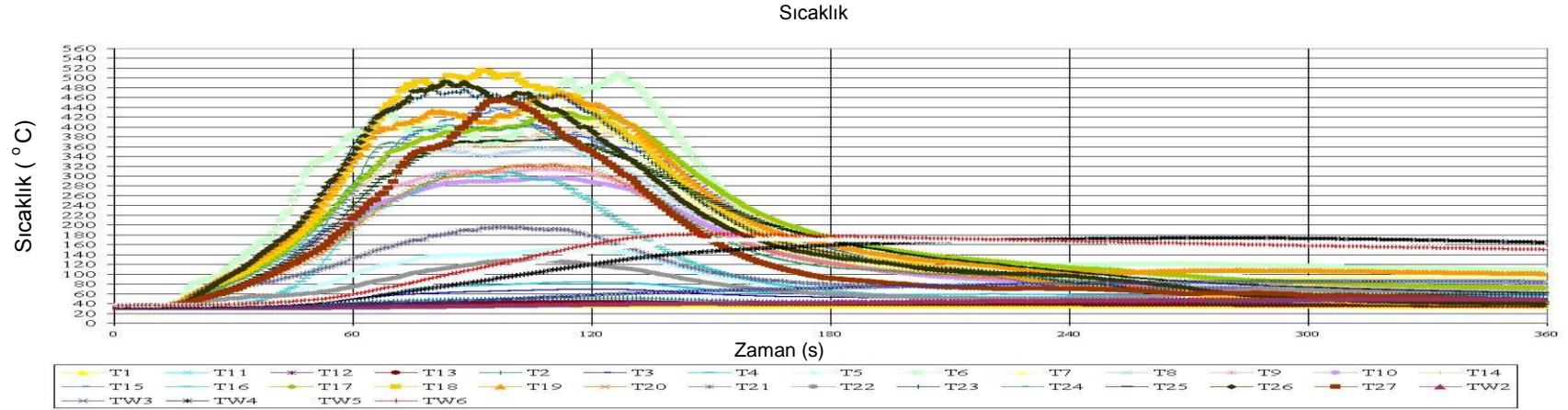
Şekil D.36 Deney No: 22222



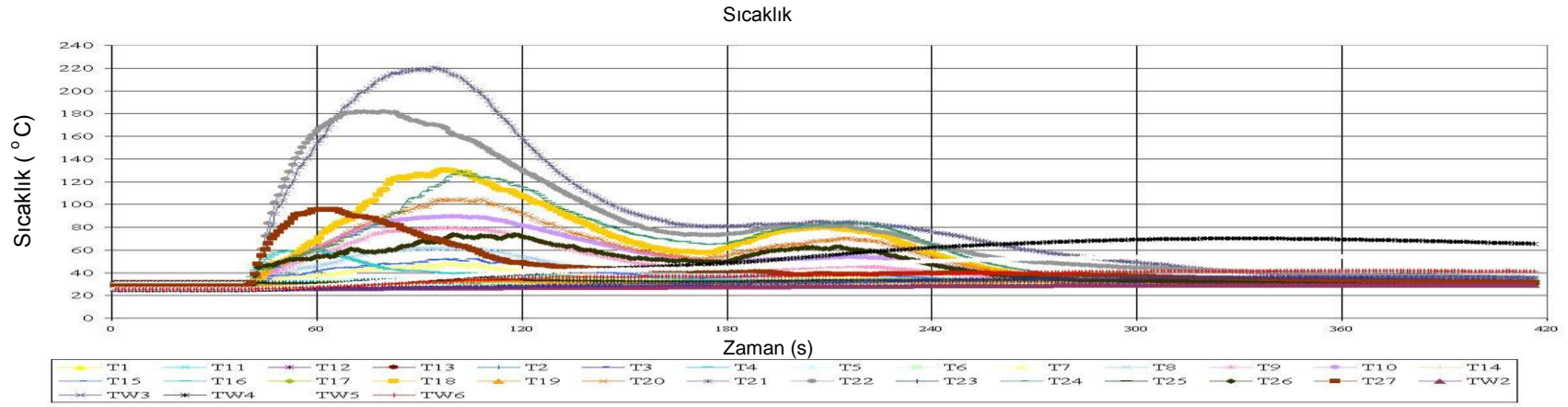
Şekil D.37 Deney No: 20022



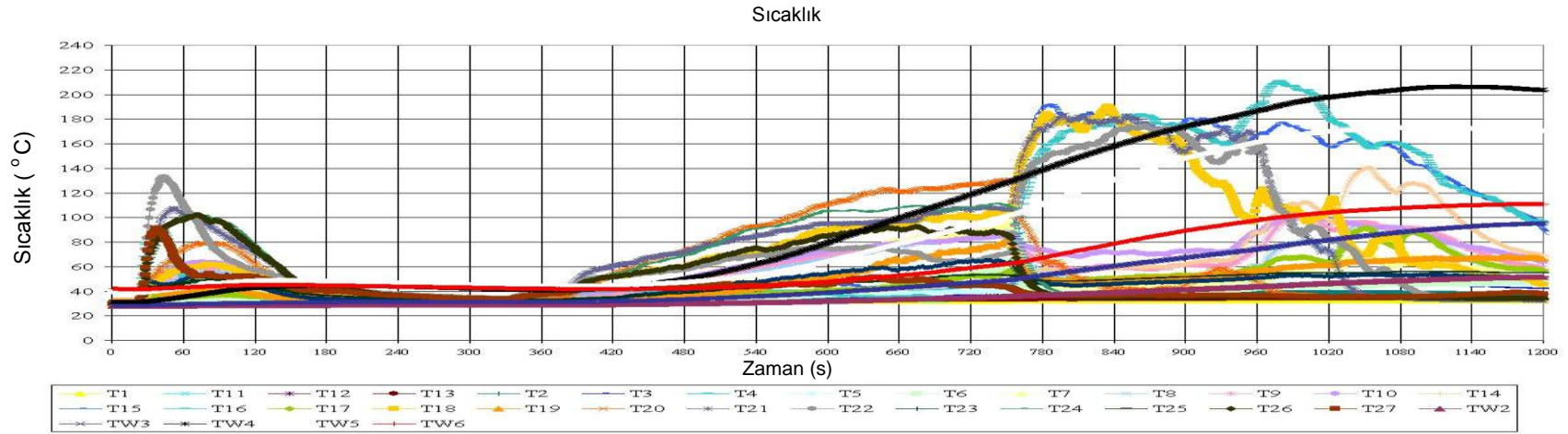
Şekil D.38 Deney No: 02202



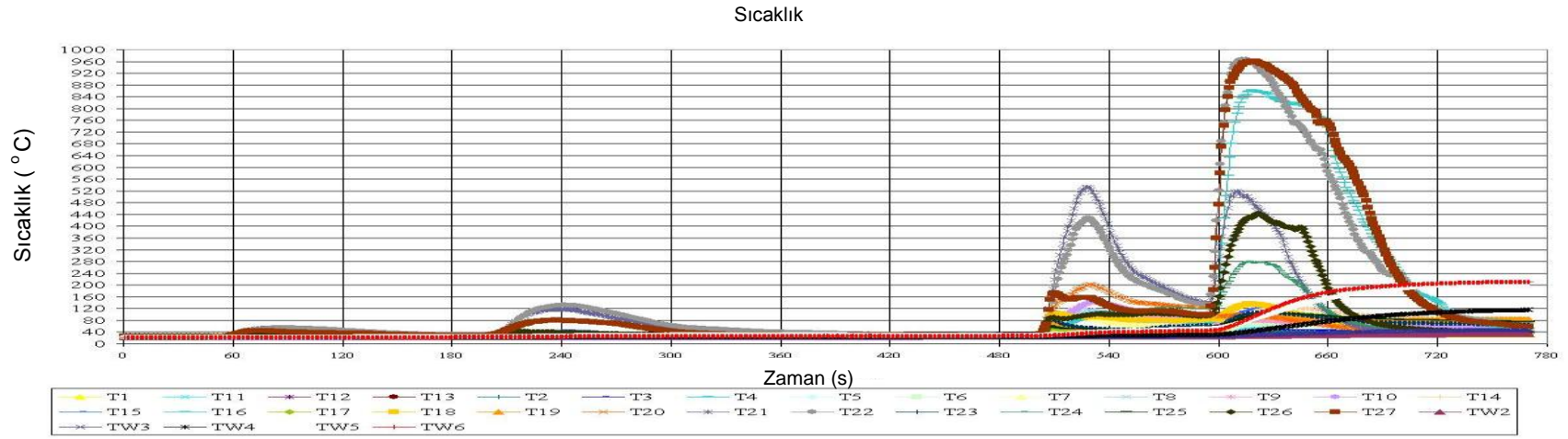
Şekil D.39 Deney No: 00200



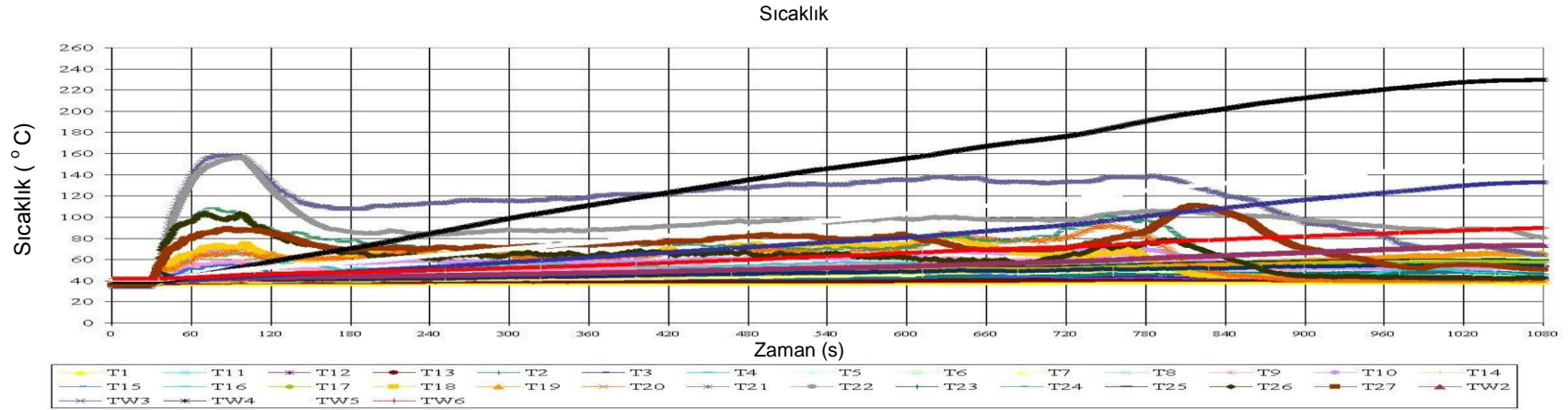
Şekil D.40 Deney No: 20000



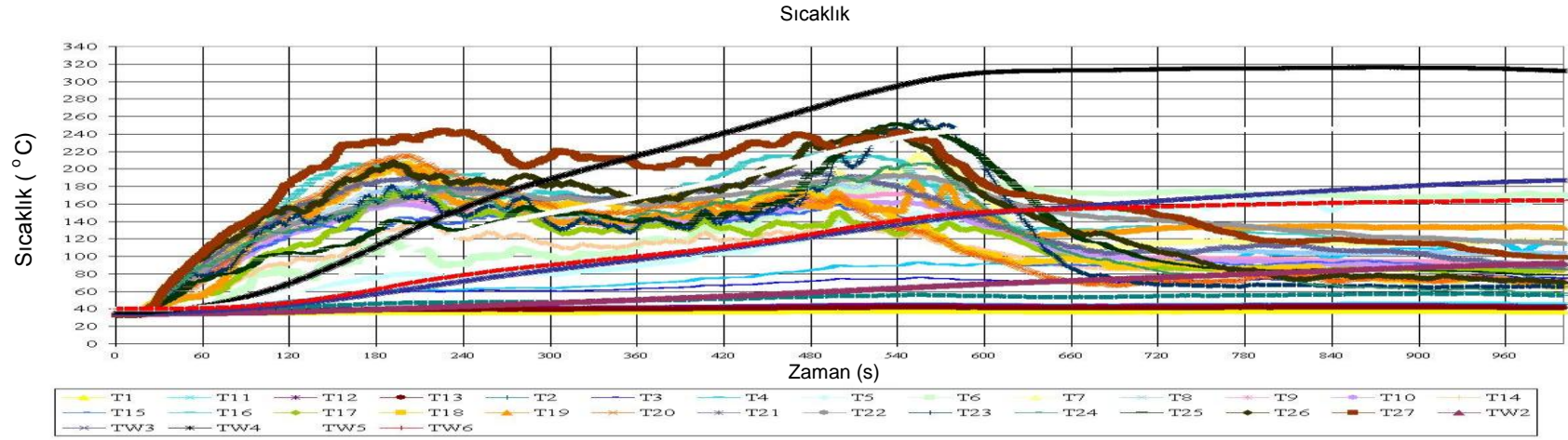
Şekil D.41 Deney No: 22002



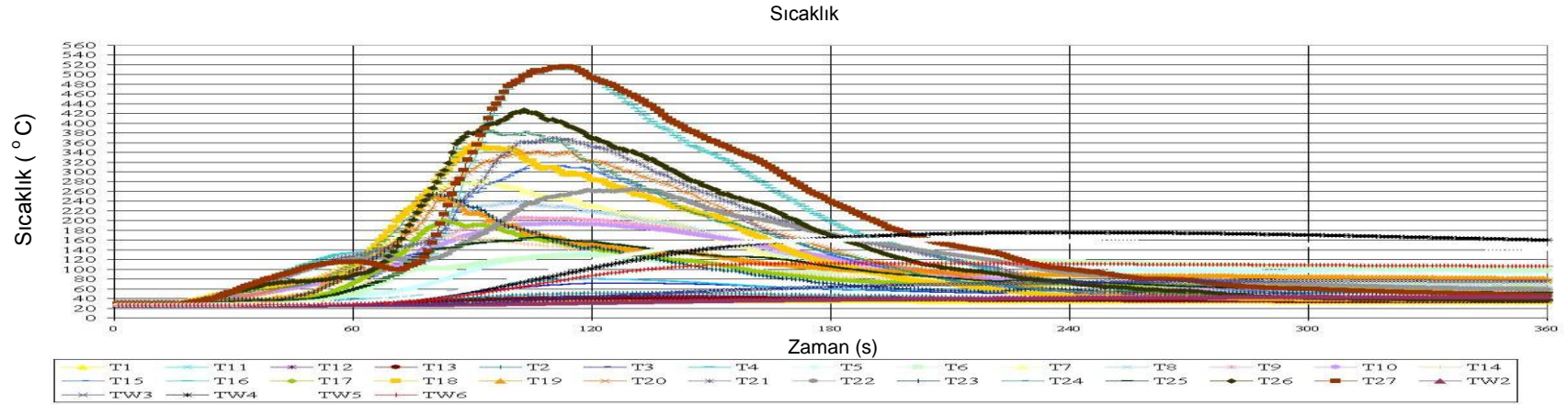
Şekil D.42 Deney No: 22020



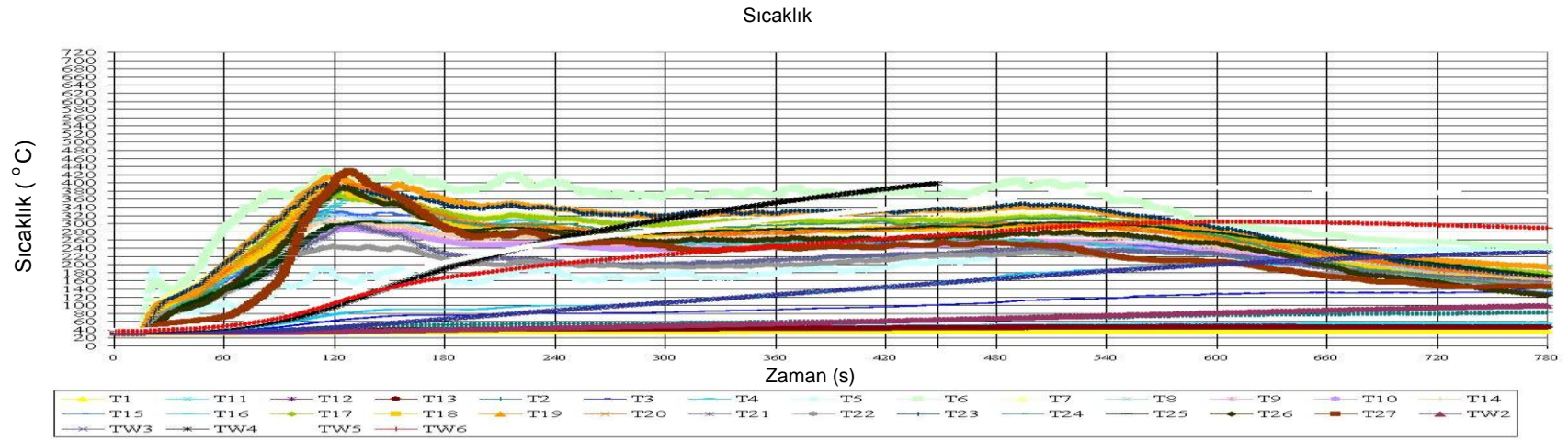
Şekil D.43 Deney No: 20202



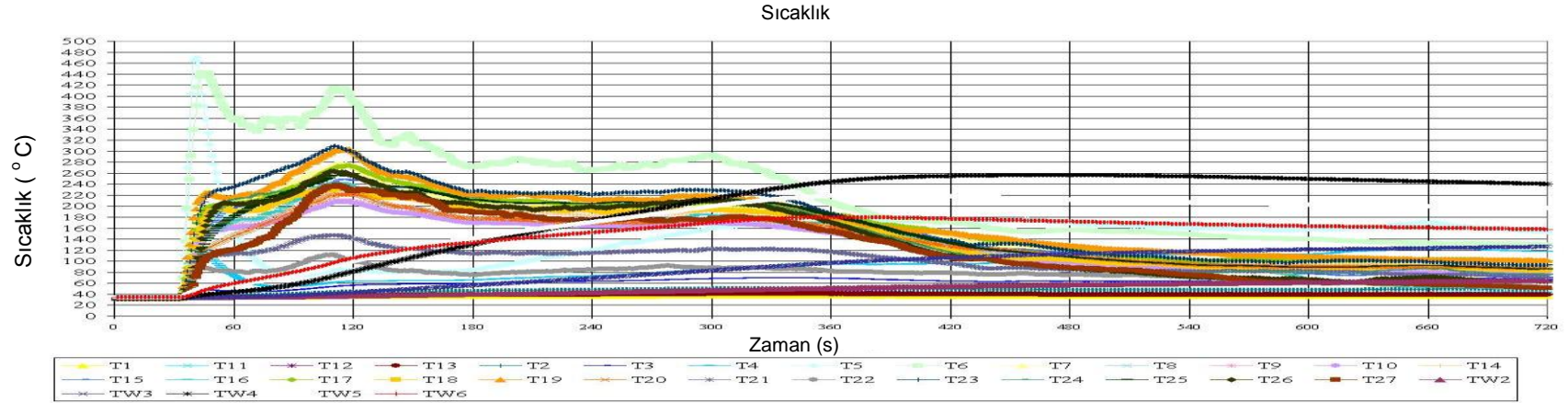
Şekil D.44 Deney No: 00222



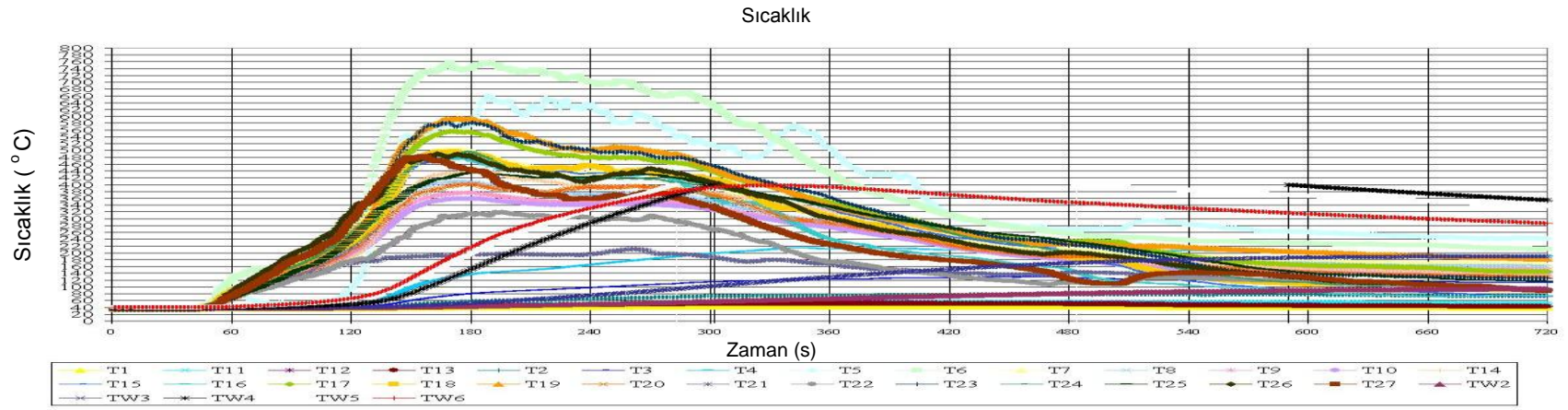
Şekil D.45 Deney No: 0020



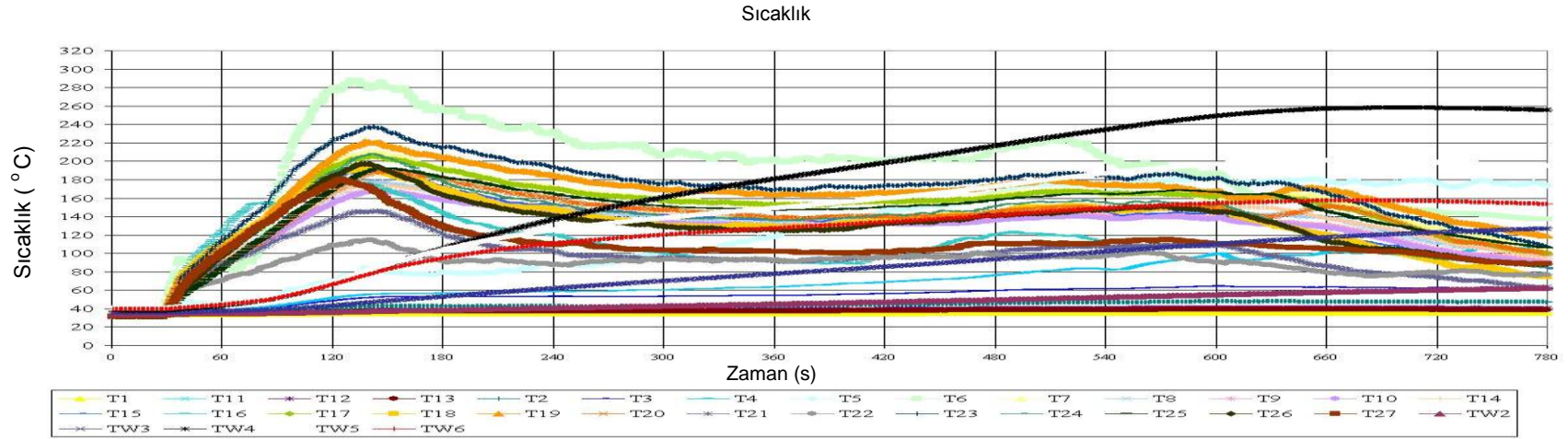
Şekil D.46 Deney No: (-1)122



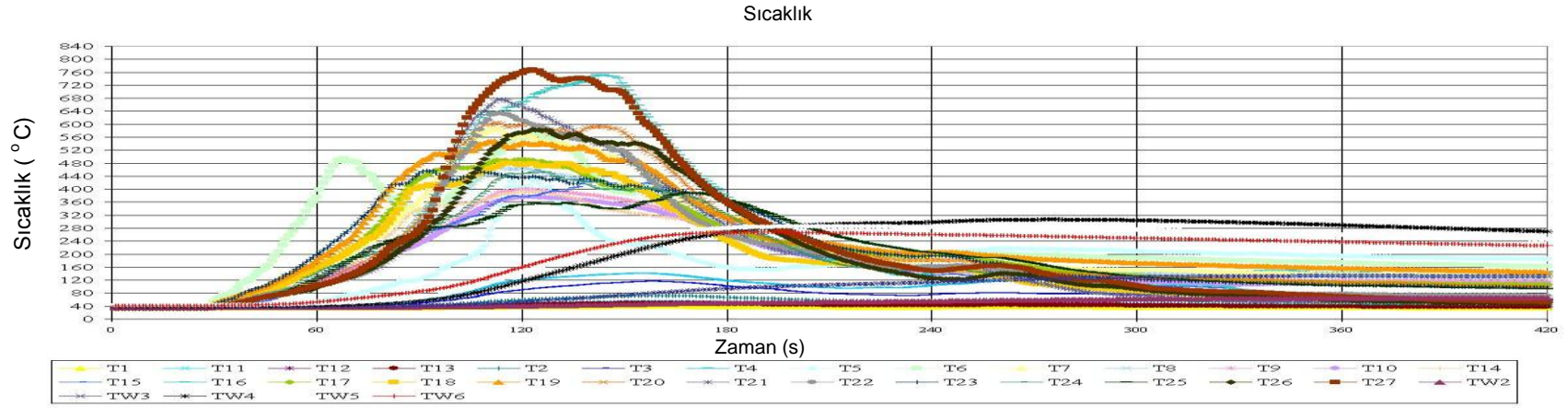
Şekil D.47 Deney No: (-1)011



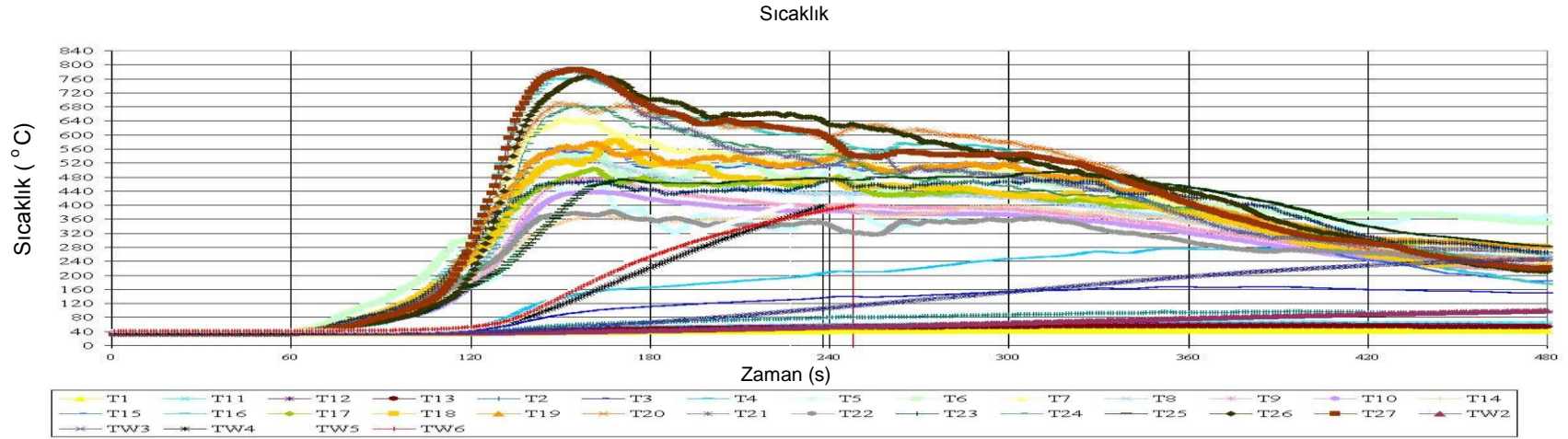
Şekil D.48 Deney No: (-1)211



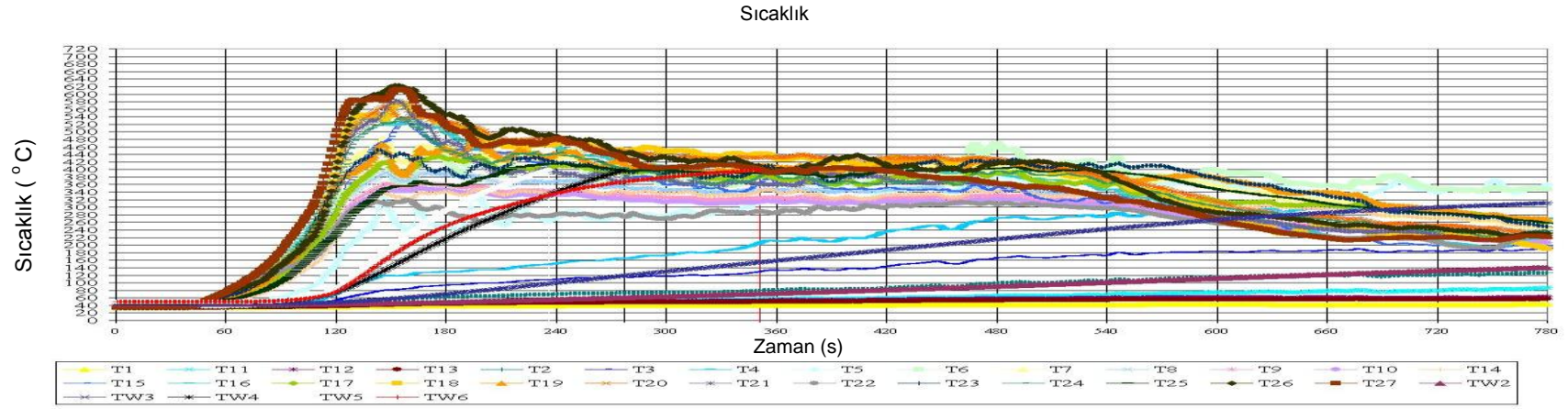
Şekil D.49 Deney No: (-1)012



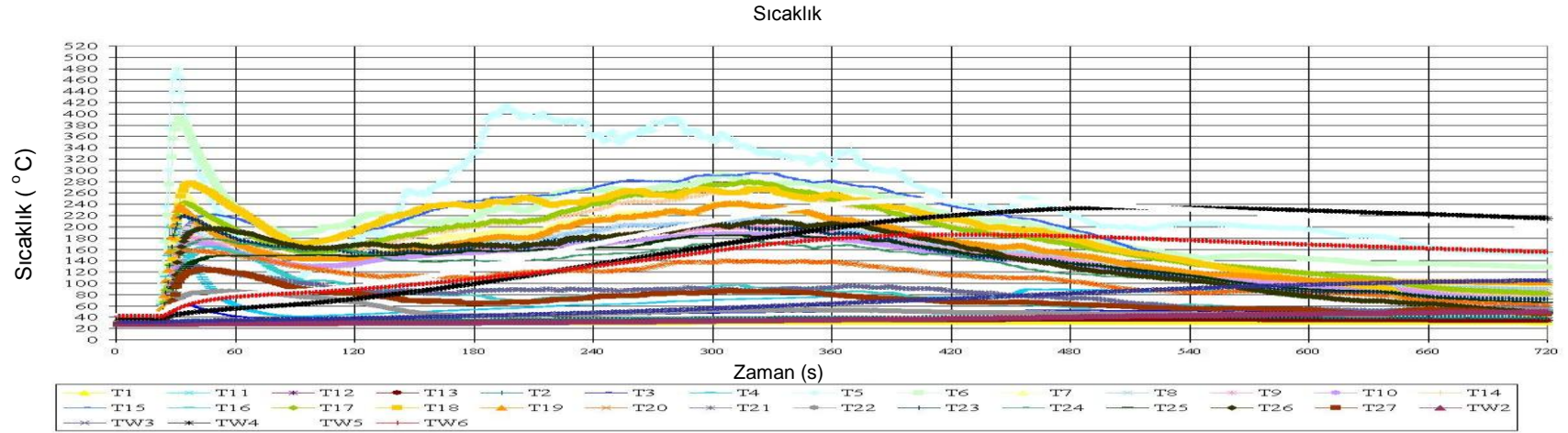
Şekil D.50 Deney No: (-1)120



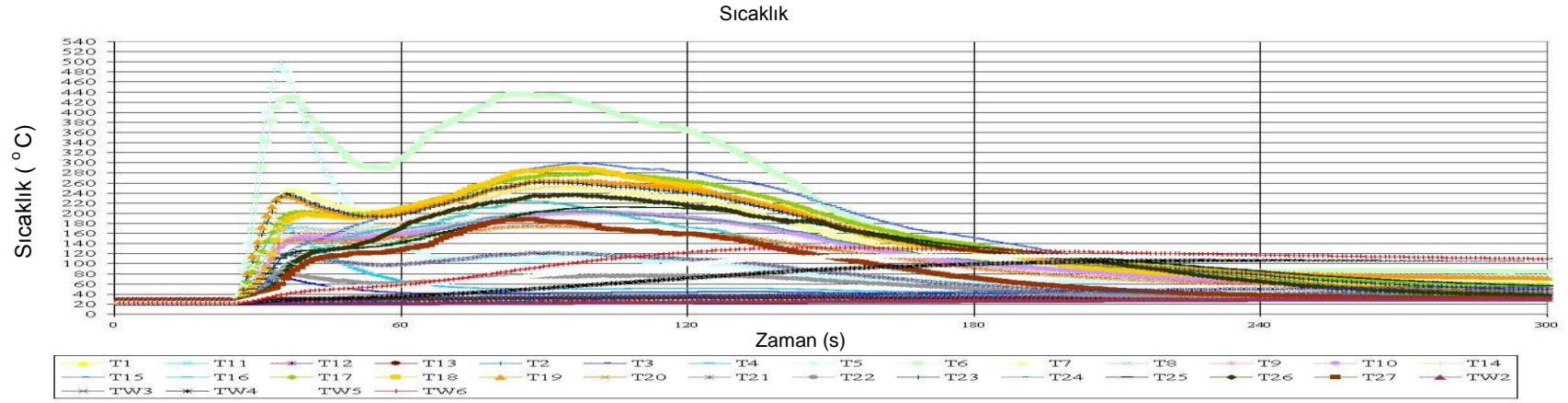
Şekil D.51 Deney No: (-1)120



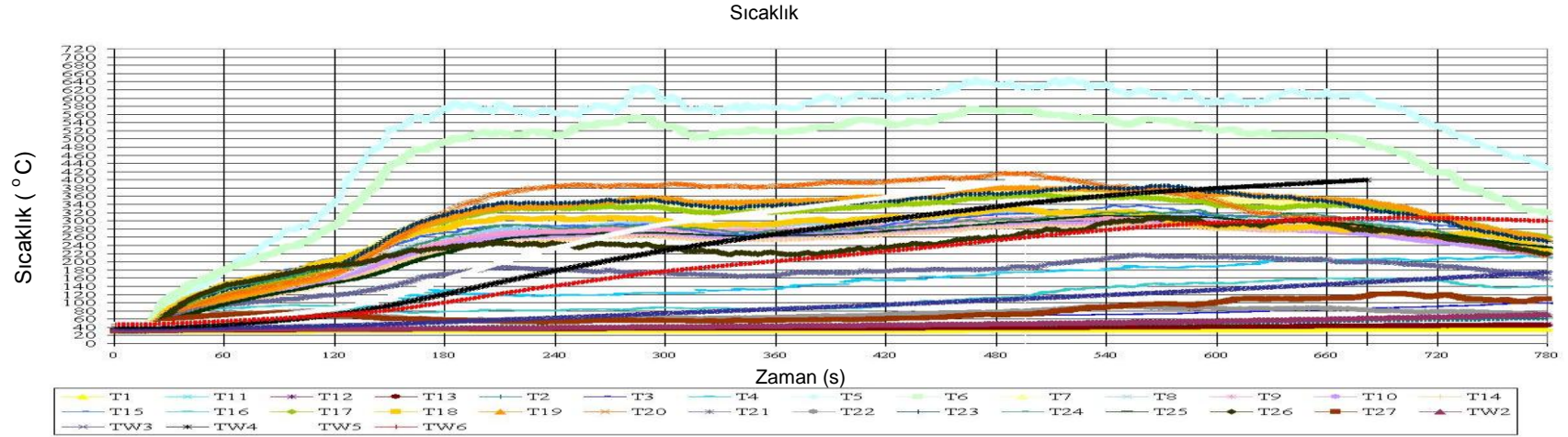
Şekil D.52 Deney No: (-1)222



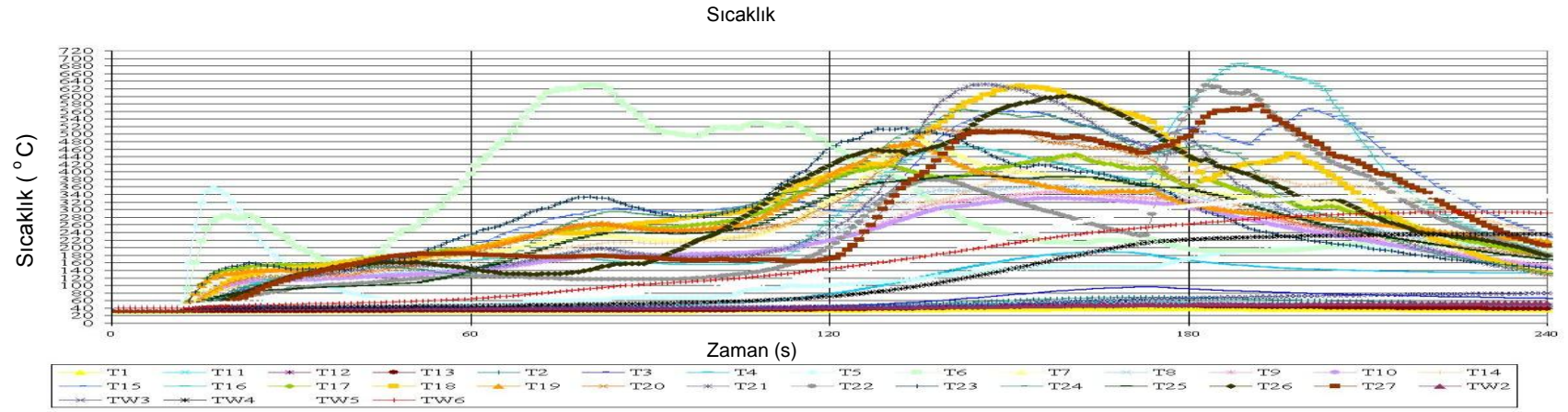
Şekil D.53 Deney No: (-1)101



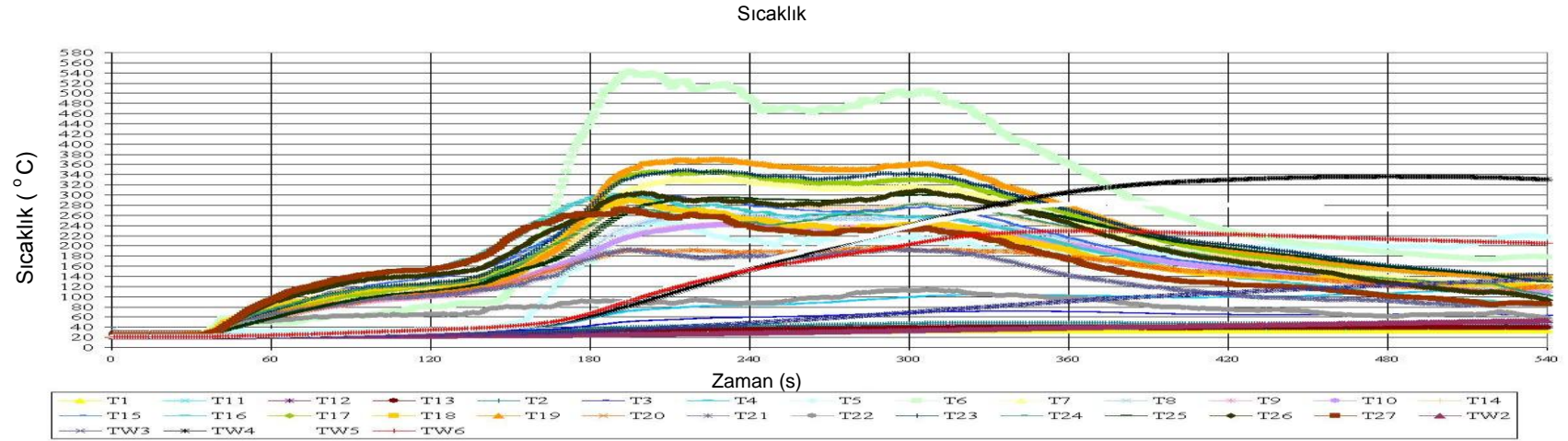
Şekil D.54 Deney No: (-1)000



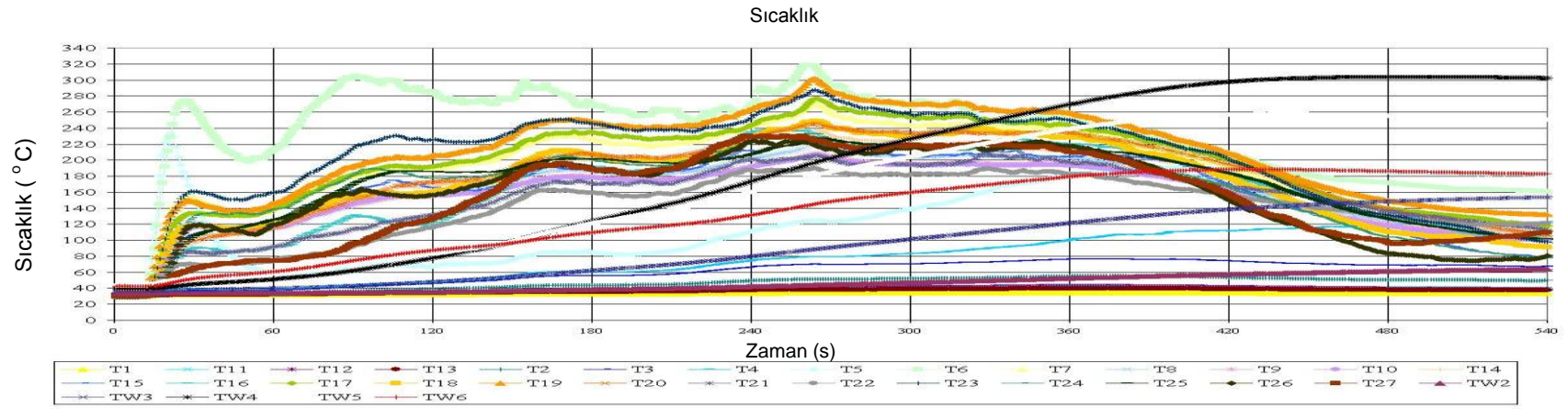
Şekil D.55 Deney No: (-1)2202



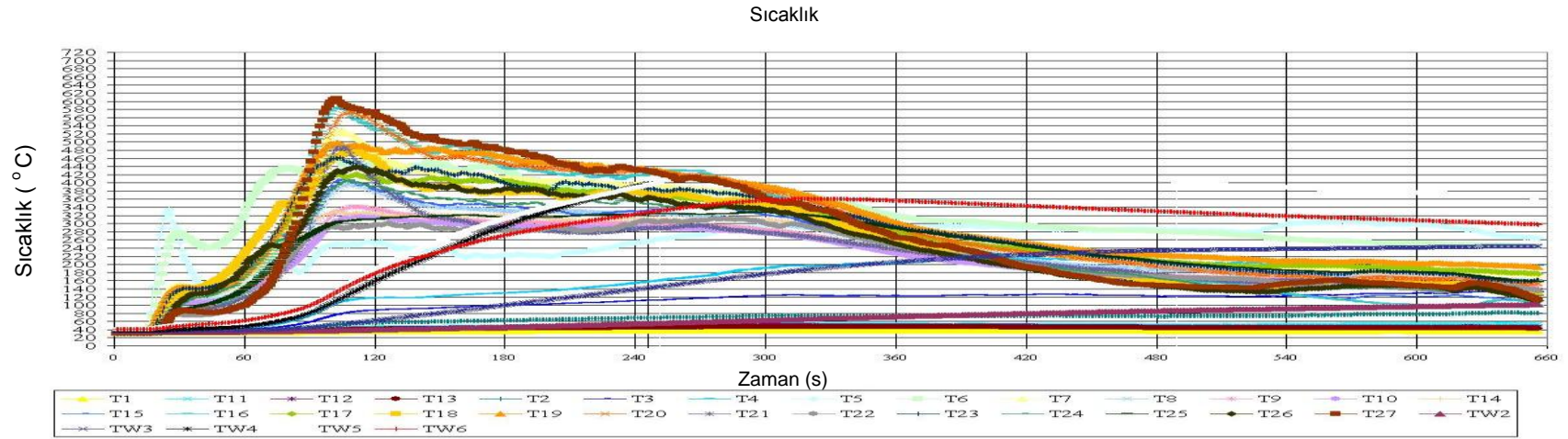
Şekil D.56 Deney No: (-1)2020



Şekil D.57 Deney No: (-1)111



Şekil D.58 Deney No: (-1)021



Şekil D.59 Deney No: (-1)121

EK E

BU ARAŞTIRMA İLE İLGİLİ OLARAK YAPILMIŞ OLAN TEZ ÇALIŞMALARININ ÖZETLERİ

KAYILI, S., Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire, Ph.D Thesis, Dept of Mech. Eng., Middle East Tech. Univ., Ankara, Turkey, Dec. 2009.

ÖZ

TÜNEL YANGINI SIRASINDA TAŞIT BLOKAJININ YANGIN YÜKÜNE ETKİSİ

Kayılı, Serkan

Doktora, Makina Mühendisliği Bölümü
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. O. Cahit Eralp

Aralık 2009, 200 sayfa

Kara ve demiryolu tünelleri şehiriçi ve şehirlerarası ulaşım zamanını kısaltmak amacıyla yapılmaktadır. Tüneller, güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için, yangın güvenlik sistemleri ile donatılır. Bu nedenle, yangın güvenlik sistemlerinin yeterli bir şekilde tasarlanması için yangın sonucu oluşan hava hızlarının, sıcaklıklarının ve duman konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Bu amaçla, küçük ölçekli tünel modelleri kullanılarak bu olgunun çözümlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda, tünel yangınları ve bunların modelleme metodları üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili yeterli bilgi bulunmamaktadır. Küçük ölçekli bir tünel modeli Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısı gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde model araçlar tabanları kare olacak şekilde tahta kafes teorisine göre oluşturulmuştur. Sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan varyans analizi methodu ile incelenmiş ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tünel içindeki hava hızının değişimi yangın yüküne çok fazla etkili olmadığı fakat model taşıtın kesit alanı ile yangın yükü doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yangın Güvenliği, Tünel Yangını, Froude numarası modellemesi, Yangın Yüğü, Acil durum havalandırması, Tıkama (Blokaj) Oranı

EK F

BU ARAŞTIRMA İLE İLGİLİ OLARAK HAZIRLANMIŐ VE YAYINA SUNULMUŐ OLAN OLAN MAKALELER

1. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., “Effect Of Vehicles’ Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire”, (Yayınlanmak üzere sunuldu, Mart 2010, Journal of Fire Sciences).

2. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., “Effect Of Vehicles’ Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire”, The 10th International Conference on Combustion and Energy Utilization (10th ICCEU) , 4-8 May 2010, Turkey (Yayınlanmak üzere yollanmıştır.)

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109M007
Proje Başlığı: Tünel Yangını Sırasında Taşıt Blokajının Farklı Havalandırma Hızlarında Yangın Yüküne Etkisi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof. Dr. O. Cahit Eralp, Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yozgatlıgil Dr. Serkan KAYILI
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 06561 ANKARA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Projeyi destekleyen diğer bir kuruluş yoktur.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/03/2009- 01/03/2010
Öz (en çok 70 kelime) Yangın güvenlik sistemlerinin yeterli bir şekilde tasarlanması için yangın sonucu oluşan hava hızlarının, sıcaklıklarının ve duman konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Bu amaçla, küçük ölçekli tünel modelleri kullanılarak bu olgunun çözümlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Küçük ölçekli bir tünel modeli Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısı gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde, model araçlar tabanları kare olacak şekilde tahta kafes teorisine göre oluşturulmuştur. Sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan varyans analizi methodu ile incelenmiş ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tünel içindeki hava hızının değişimi yangın yüküne çok fazla etkili olmadığı fakat model taşıtın kesit alanı ile yangın yükü doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Proje paralelinde yapılacak çalışmalarda bir doktora çalışması yürütülerek tamamlanmıştır.
Anahtar Kelimeler: Yangın Güvenliği, Tünel Yangını, Froude numarası modellemesi, Yangın Yükü, Acil durum havalandırması, Tıkama (Blokaj) Oranı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

Projeden Yapılan Yayınlar:

Tezler

1. KAYILI, S., Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire, Ph.D Thesis, Dept of Mech. Eng., Middle East Tech. Univ., Ankara, Turkey, Dec. 2009.

Makaleler

1. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., "Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire", (Yayınlanmak üzere sunuldu, Mart 2010, Journal of Fire Sciences).

2. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., "Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire", The 10th International Conference on Combustion and Energy Utilization (10th ICCEU) , 4-8 May 2010, Turkey (Yayınlanmak üzere yollanmıştır.)

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje No: 109M007
Proje Başlığı: Tünel Yangını Sırasında Taşıtların Blokajının Farklı Havalandırma Hızlarında Yangın Yüküne Etkisi
Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar: Prof. Dr. O. Cahit Eralp, Yrd. Doç. Dr. Ahmet Yozgatlıgil Dr. Serkan KAYILI
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, 06561 ANKARA
Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: Projeyi destekleyen diğer bir kuruluş yoktur.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 01/03/2009- 01/03/2010
Öz (en çok 70 kelime) Yangın güvenlik sistemlerinin yeterli bir şekilde tasarlanması için yangın sonucu oluşan hava hızlarının, sıcaklıklarının ve duman konsantrasyonunun doğru bir şekilde tahmin edilmesi önemlidir. Bu amaçla, küçük ölçekli tünel modelleri kullanılarak bu olgunun çözümlenmesi için deneyler yapılmaktadır. Taşıtların blokaj etkisinin farklı havalandırma hızlarında yangın ısı gücüne ve sıcaklık dağılımına etkisi ile ilgili literatürde yeterli bilgi bulunmamaktadır. Küçük ölçekli bir tünel modeli Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarında yapılmıştır. Froude sayısı temel alınarak yapılan ölçeklendirme ile değişik şekillerde dizilmiş tahta malzemeler model tünel içinde kontrollü bir ortamda yakılmıştır. Değişik havalandırma hızlarında yangının ısı gücü, gaz konsantrasyonu, kütle azalma hızı ve tünel boyunca oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değişik kesit alanlarına sahip yanan parçaların etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneylerde, model araçlar tabanları kare olacak şekilde tahta kafes teorisine göre oluşturulmuştur. Sonuçlar istatistiksel bir yöntem olan varyans analizi methodu ile incelenmiş ve genel sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Tünel içindeki hava hızının değişimi yangın yüküne çok fazla etkili olmadığı fakat model taşıtların kesit alanı ile yangın yükü doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Proje paralelinde yapılacak çalışmalarda bir doktora çalışması yürütülerek tamamlanmıştır.
Anahtar Kelimeler: Yangın Güvenliği, Tünel Yangını, Froude numarası modellemesi, Yangın Yükü, Acil durum havalandırması, Tıkama (Blokaj) Oranı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu mu? Evet <input type="checkbox"/> Gerekli Değil <input checked="" type="checkbox"/> Fikri Ürün Bildirim Formu'nun tesliminden sonra 3 ay içerisinde patent başvurusu yapılmalıdır.

Projeden Yapılan Yayınlar:

Tezler

1. KAYILI, S., **Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire**, Ph.D Thesis, Dept of Mech. Eng., Middle East Tech. Univ., Ankara, Turkey, Dec. 2009.

Makaleler

1. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., **"Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire"**, (Yayınlanmak üzere sunuldu, Mart 2010, Journal of Fire Sciences).

2. KAYILI, S., YOZGATLIGİL, A., ERALP, O. C., **"Effect Of Vehicles' Blockage On Heat Release Rate in Case of Tunnel Fire"**, The 10th International Conference on Combustion and Energy Utilization (10th ICCEU) , 4-8 May 2010, Turkey (Yayınlanmak üzere yollanmıştır.)