

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KONİK KALORİMETRE ANALİZLERİ İLE POLİÜRETAN,
POLİPROPİLEN, POLİETİLEN VE AKRİLONİTRİL
BÜTADİEN STİREN ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN
YANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLAL DEMİRYUĞURAN

DENİZLİ, MAYIS - 2022

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KONİK KALORİMETRE ANALİZLERİ İLE POLİÜRETAN,
POLİPROPİLEN, POLİETİLEN VE AKRİLONİTRİL
BÜTADİEN STİREN ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN
YANMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLAL DEMİRYUĞURAN

DENİZLİ, MAYIS - 2022

**Bu tez çalışması PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ tarafından
2021FEBE008 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Bilal DEMİRYUĞURAN

ÖZET

**KONİK KALORİMETRE ANALİZLERİ İLE POLİÜRETAN,
POLİPROPİLEN, POLİETİLEN VE AKRİLONİTRİL BÜTADİEN
STİREN ESASLI KOMPOZİT MALZEMELERİN YANMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLAL DEMİRYUĞURAN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:PROF. DR. NAZIM USTA)**

DENİZLİ, MAYIS - 2022

Polimerler, hafiflik, iyi seviyede kimyasal direnç, kolay üretim ve iyi mekanik dayanım gibi üstün özelliklerinden dolayı birçok uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bunlar kolayca tutuşabilen yanıcı maddelerdir. Bundan dolayı, polimerlerin yanma davranışlarının incelenmesi önemli bir konudur. Genel olarak, ısıl bozunma ve yanma direncinin iyileştirilmesi için polimerlere alev geciktiriciler ilave edilmektedir. Son zamanlarda bu alev geciktiriciler arasında kabaran alev geciktiriciler, halojen içermeyen etkili alev geciktiriciler olarak tercih edilmektedir.

Bu tezde, rijit poliüretan köpük (PUR), polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemelerin yanma davranışları farklı ısı akıları (25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2) altında gerçekleştirilen konik kalorimetre testleri ile araştırılmıştır. Farklı ısı akıları, farklı gerçek yangın senaryolarını temsil etmek için kullanılmıştır. Ayrıca, amonyum polifosfat ve pentaeritritolden oluşan bir kabaran alev geciktiricinin PP ve HDPE malzemelerinin yanma davranışlarına etkileri de 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akıları altında incelemeye alınmıştır. Bunlara ek olarak, malzemelerin ısıl bozunma davranışları termogravimetrik analizler ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmaların yanında, PP, HDPE ve ABS malzemelerin farklı ısı akıları altında yanma modelleri bir hesaplama akışkanlar dinamiği programı olan “Fire Dynamics Simulator (FDS)” kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Polimer, yanma davranışı, konik kalorimetre, alev geciktirici, yanma modellemesi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FIRE BEHAVIOURS OF POLYURETHANE, POLYPROPYLENE, POLYETHYLENE AND ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE BASED COMPOSITE MATERIALS BY USING CONE CALORIMETER ANALYSIS

MSC THESIS

BİLAL DEMİRYUĞURAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. NAZIM USTA)

DENİZLİ, MAY 2022

Polymers are widely used in many applications due to their superior properties such as lightness, good chemical resistance, easy of production and good mechanical strength. However, they are flammable materials and can burn easily. Therefore, investigation of fire behaviours of the polymers is an important subject. In general, flame retardants are incorporated into the polymers to enhance the thermal degradation and the fire resistance. Among them, intumescent flame retardants have been preferred as the effective halogen-free flame retardants in the recent years.

In this thesis, fire behaviours of rigid polyurethane foam (PUR), polypropylene (PP), high density polyethylene (HDPE) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) were investigated under different heat fluxes (25 kW/m², 35 kW/m² and 45 kW/m²) by using cone calorimeter tests. Different heat fluxes were used to represent different real fire scenarios. Moreover, effects of an intumescent flame retardant composed of ammonium polyphosphate and pentaerythritol on the fire resistance of PP and HDPE were investigated under 25 kW/m², 35 kW/m² and 45 kW/m² heat fluxes. Furthermore, thermal degradation of the materials was examined by using thermogravimetric analysis. Besides the experimental studies, Fire Dynamics Simulator (FDS) which is a computational fluid dynamics program was used to model the burning of PP, HDPE, and ABS under the different heat fluxes.

KEYWORDS: Polymer, fire behaviour, cone calorimeter, flame retardant, fire modelling

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. POLİMER MALZEMELER, ISIL BOZUNMA, YANMA VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1 Polimer Malzemeler	4
2.1.1 Poliüretan	4
2.1.2 Polipropilen.....	7
2.1.3 Polietilen	8
2.1.4 Akrilonitril bütadien stiren.....	9
2.2 Alev Geciktiriciler ve Kompozit Malzemeler	10
2.3 Isıl Bozunma ve Yanma	11
2.4 Literatür Çalışması	13
3. POLİMER MALZEMELERİN YANMA MODELLEMESİ.....	25
3.1 FDS (Fire Dynamics Simulator) Programı.....	25
3.1.1 Hidrodinamik model	25
3.1.2 Yanma modeli	26
3.1.3 Piroliz modeli.....	27
3.2 FDS Girdi Dosyasındaki Genel Tanımlamalar	28
3.2.1 HEAD isim listesi grubu	28
3.2.2 TIME isim listesi grubu	29
3.2.3 MISC isim listesi grubu	29
3.2.4 REAC grubu	29
3.2.5 RADİ isim listesi grubu	30
3.2.6 MESH isim listesi grubu.....	30
3.2.7 INIT isim listesi grubu	30
3.2.8 MATL isim listesi grubu.....	31
3.2.9 SPEC isim listesi grubu	31
3.2.10 PART isim listesi grubu.....	32
3.2.11 SURF isim listesi grubu	32
3.2.12 OBST isim listesi grubu.....	33
3.2.13 VENT isim listesi grubu	33
3.2.14 HOLE isim listesi grubu	34
3.2.15 DEVC isim listesi grubu	34
3.2.16 PROP isim listesi grubu	34
3.2.17 DUMP isim listesi grubu	34

3.2.18	PROF isim listesi grubu	35
3.2.19	SLCF isim listesi grubu	35
3.2.20	BNDF isim listesi grubu	35
3.2.21	ISOF isim listesi grubu	36
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
4.1	Kullanılan Hammaddeler	37
4.2	Numune Üretimleri.....	38
4.2.1	PUR numune üretimleri	38
4.2.2	PP ve HDPE granüllere IFR ilave edilmesi	39
4.2.3	Plastik enjeksiyon makinesinde numune üretimleri	40
4.3	Fiziksel, Termal ve Yanma Deneyleri.....	43
4.3.1	Yoğunluk hesabı	44
4.3.2	Isı iletim katsayısı ölçümü	44
4.3.3	Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TG/DTA)	45
4.3.4	Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC).....	46
4.3.5	Konik kalorimetre	47
5.	DENEYSEL VE MODELLEME SONUÇLARI	50
5.1	Termogravimetrik Analiz Sonuçları.....	50
5.1.1	PUR malzemenin termogravimetrik analizi	50
5.1.2	PP malzemenin termogravimetrik analizi	52
5.1.3	HDPE malzemenin termogravimetrik analizi	53
5.1.4	ABS malzemenin termogravimetrik analizi	53
5.1.5	APP ve PER malzemelerin termogravimetrik analizleri	56
5.1.6	PP25IFR malzemenin termogravimetrik analizi.....	59
5.1.7	HDPE25IFR malzemenin termogravimetrik analizi.....	60
5.2	Malzemelerin Kinetik Parametreleri	61
5.3	Malzemelerin Reaksiyon Isı Değerleri.....	66
5.4	Malzemelerin Yoğunlukları.....	68
5.5	Malzemelerin Isı İletim Katsayıları.....	68
5.6	Malzemelerin Özgül Isı Değerleri	69
5.7	Malzemelerin Konik Kalorimetre Test Sonuçları	71
5.7.1	PUR malzemenin konik kalorimetre testleri.....	71
5.7.2	PP malzemenin konik kalorimetre testleri	79
5.7.3	HDPE malzemenin konik kalorimetre testleri	86
5.7.4	ABS malzemenin konik kalorimetre testleri.....	92
5.7.5	IFR ilaveli PP malzemenin konik kalorimetre testleri.....	99
5.7.6	IFR ilaveli HDPE malzemenin konik kalorimetre testleri.....	111
5.8	Konik Kalorimetre Deney ve FDS Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	122
5.8.1	PP'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması	125
5.8.2	HDPE'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması.....	129
5.8.3	ABS'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması.....	132
6.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	136
7.	KAYNAKLAR.....	142
8.	ÖZGEÇMİŞ	151

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Poliüretan reaksiyonu (Pinto ve diğ. 2018).	4
Şekil 2.2: Esnek poliüretan köpük uygulamaları (Url-1, Url-2).	5
Şekil 2.3: Yarı sert poliüretan köpük uygulamaları (Url-3).	5
Şekil 2.4: Sert poliüretan köpük uygulamaları (Url-4, Url-5).	6
Şekil 2.5: RIM poliüretan köpük uygulamaları (Url-6).	6
Şekil 2.6: Poliüretan elastomer uygulamaları (Url-7, Url-8).	6
Şekil 2.7: Polipropilenin kimyasal yapısı (Chanda 2000).	7
Şekil 2.8: Polipropilenin kullanım alanlarına örnekler (Url-10, Url-11).	7
Şekil 2.9: Polietilenin kimyasal yapısı (Chanda 2000).	8
Şekil 2.10: Polietilenin kullanım alanlarına örnekler (Url-12).	8
Şekil 2.11: ABS'yi oluşturan monomerlerin kimyasal yapısı (McKeen 2010). .	9
Şekil 2.12: Kabaran alev geciktiricilerin işleyişi (Maqsood ve Seide 2020). ...	11
Şekil 2.13: Yanma prensibi (Yangın üçgeni), (Laoutid ve diğ. 2009).	12
Şekil 2.14: Polimerin yanma çevrimi (Goda ve diğ. 2018).	13
Şekil 4.1: Çift vidalı ekstruder cihazı.	39
Şekil 4.2: (a) Ham HDPE granülleri, (b) IFR ilaveli HDPE granülleri	40
Şekil 4.3: (a) Ham PP granülleri, (b) IFR ilaveli PP granülleri	40
Şekil 4.4: Fanlı kurutma fırını.	41
Şekil 4.5: Plastik enjeksiyon makinesi.	41
Şekil 4.6: Ham ABS numuneleri.	42
Şekil 4.7: (a) Ham HDPE numuneleri, (b) HDPE25IFR numuneleri.	42
Şekil 4.8: (a) Ham PP numuneleri, (b) PP25IFR numuneleri.	43
Şekil 4.9: Şartlandırma ünitesi.	43
Şekil 4.10: Hassas terazi.	44
Şekil 4.11: Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı	45
Şekil 4.12: Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TG/DTA) cihazı.46	
Şekil 4.13: Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz cihazı.	46
Şekil 4.14: Konik kalorimetre test cihazı.	47
Şekil 4.15: Konik ısıtıcı ve numunenin kesit görünüşü.	48
Şekil 5.1: PUR'un (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	51
Şekil 5.2: PP'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	52
Şekil 5.3: HDPE'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	54
Şekil 5.4: ABS'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı	55
Şekil 5.5: APP'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	57
Şekil 5.6: PER'in (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	58
Şekil 5.7: PP25IFR'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	59
Şekil 5.8: HDPE25IFR'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.	61
Şekil 5.9: PUR'un farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.	62
Şekil 5.10: PP'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.	63
Şekil 5.11: HDPE'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.	64
Şekil 5.12: ABS'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.	65

Şekil 5.13: PP için reaksiyon ısısı tespiti.	66
Şekil 5.14: HDPE için reaksiyon ısısı tespiti.	67
Şekil 5.15: ABS için reaksiyon ısısı tespiti.	67
Şekil 5.16: PUR'un sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.	69
Şekil 5.17: PP'nin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.	70
Şekil 5.18: HDPE'nin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.	70
Şekil 5.19: ABS'in sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.	71
Şekil 5.20: PUR numunesi.	72
Şekil 5.21: PUR'un yanma anındaki görüntüsü.	72
Şekil 5.22: PUR'un (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.	73
Şekil 5.23: PUR'un farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.	74
Şekil 5.24: PUR'un farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.	74
Şekil 5.25: PUR'un farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.	76
Şekil 5.26: PUR'un farklı ısı akılarındaki is değişimleri.	76
Şekil 5.27: PUR'un farklı ısı akılarındaki CO ₂ değişimleri.	77
Şekil 5.28: PUR'un farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.	78
Şekil 5.29: PUR'un farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.	78
Şekil 5.30: PUR'un farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.	79
Şekil 5.31: (a) PP numunesi, (b) 25 kW/m ² , (c) 35 kW/m ² ve (d) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.	79
Şekil 5.32: PP'nin yanma anındaki görüntüsü.	80
Şekil 5.33: PP'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.	80
Şekil 5.34: PP'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.	81
Şekil 5.35: PP'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.	82
Şekil 5.36: PP'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.	83
Şekil 5.37: PP'nin farklı ısı akılarındaki CO ₂ değişimleri.	84
Şekil 5.38: PP'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.	84
Şekil 5.39: PP'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.	85
Şekil 5.40: PP'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.	85
Şekil 5.41: (a) HDPE numunesi, (b) 25 kW/m ² , (c) 35 kW/m ² ve (d) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.	86
Şekil 5.42: HDPE'nin yanma anındaki görüntüsü.	86
Şekil 5.43: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.	87
Şekil 5.44: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.	87
Şekil 5.45: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.	89
Şekil 5.46: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.	89
Şekil 5.47: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki CO ₂ değişimleri.	90
Şekil 5.48: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.	91
Şekil 5.49: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.	91
Şekil 5.50: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.	92
Şekil 5.51: (a) ABS numunesi, (b) 25 kW/m ² , (c) 35 kW/m ² ve (d) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.	92
Şekil 5.52: ABS'nin yanma anındaki görüntüsü.	93
Şekil 5.53: ABS'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.	93
Şekil 5.54: ABS'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.	94
Şekil 5.55: ABS'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.	95
Şekil 5.56: ABS'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.	96
Şekil 5.57: ABS'nin farklı ısı akılarındaki CO ₂ değişimleri.	97
Şekil 5.58: ABS'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.	97

Şekil 5.59: ABS'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.....	98
Şekil 5.60: ABS'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.	98
Şekil 5.61: (a) PP25IFR numunesi, (b) 25 kW/m ² , (c) 35 kW/m ² ve (d) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.	99
Şekil 5.62: PP25IFR'nin yanma anındaki görüntüsü.	100
Şekil 5.63: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında HRR değişimleri.	101
Şekil 5.64: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında THR değişimleri.....	102
Şekil 5.65: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında CO değişimleri.	104
Şekil 5.66: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında is değişimleri.	105
Şekil 5.67: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında CO ₂ değişimleri.....	107
Şekil 5.68: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında NO değişimleri.....	108
Şekil 5.69: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında kütle değişimleri.....	109
Şekil 5.70: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında MLR değişimleri.....	110
Şekil 5.71: (a) HDPE25IFR numunesi, (b) 25 kW/m ² , (c) 35 kW/m ² ve (d) 45 kW/m ² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler. ...	111
Şekil 5.72: HDPE25IFR'nin yanma anındaki görüntüsü.	111
Şekil 5.73: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında HRR değişimleri.	112
Şekil 5.74: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında THR değişimleri.....	113
Şekil 5.75: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında CO değişimleri.	116
Şekil 5.76: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında is değişimleri.	117
Şekil 5.77: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında CO ₂ değişimleri.....	118
Şekil 5.78: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında NO değişimleri.....	119
Şekil 5.79: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında kütle değişimleri.....	120
Şekil 5.80: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m ² , (b) 35 kW/m ² ve (c) 45 kW/m ² ısı akıları altında MLR değişimleri.....	121
Şekil 5.81: Malzemenin; (a) modelleme için oluşturulan geometrisi, (b) yanma esnasındaki görüntüsü.	122
Şekil 5.82: PP'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.	126
Şekil 5.83: PP'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	126
Şekil 5.84: PP'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	127
Şekil 5.85: PP'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	127

Şekil 5.86: PP'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	128
Şekil 5.87: PP'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	128
Şekil 5.88: HDPE'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	129
Şekil 5.89: HDPE'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	130
Şekil 5.90: HDPE'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	130
Şekil 5.91: HDPE'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	131
Şekil 5.92: HDPE'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	131
Şekil 5.93: HDPE'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	132
Şekil 5.94: ABS'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	133
Şekil 5.95: ABS'nin 25 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	133
Şekil 5.96: ABS'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	134
Şekil 5.97: ABS'nin 35 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	134
Şekil 5.98: ABS'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.....	135
Şekil 5.99: ABS'nin 45 kW/m ² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.....	135

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Malzeme özelliklerini belirten değişkenler.	32
Tablo 4.1: HDPE ve PP malzemelerinin teknik özellikleri (Url-9).	37
Tablo 4.2: ABS malzemenin teknik özellikleri (Url-13)	38
Tablo 4.3: Poliöl ve izosiyanatın teknik özellikleri (BASF Group, 2014).....	38
Tablo 5.1: PUR'un ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.	51
Tablo 5.2: PP'nin ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.	52
Tablo 5.3: HDPE'nin ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.	54
Tablo 5.4: ABS'nin ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.	55
Tablo 5.5: APP ve PER'in ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.	58
Tablo 5.6: Malzemelerin ısı bozunma kinetiği parametreleri.	66
Tablo 5.7: Malzemelerin reaksiyon ısı değerleri.....	68
Tablo 5.8: Malzemelerin yoğunluk değerleri.....	68
Tablo 5.9: Malzemelerin ısı iletim katsayı değerleri.	68
Tablo 5.10: PUR malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.	75
Tablo 5.11: PP malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.....	81
Tablo 5.12: HDPE malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.....	88
Tablo 5.13: ABS malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.	94
Tablo 5.14: PP ve PP25IFR'nin konik kalorimetre test sonuçları.	103
Tablo 5.15: HDPE ve HDPE25IFR'nin konik kalorimetre test sonuçları.	114
Tablo 5.16: PP malzeme için giriş parametreleri.	123
Tablo 5.17: HDPE malzeme için giriş parametreleri.	124
Tablo 5.18: ABS malzeme için giriş parametreleri.....	125

SEMBOL LİSTESİ

A	: Arrhenius frekans faktörü (1/s)
A_s	: Numunenin ısıya maruz kalan alanı (m ²)
C	: Orifis sabiti (kg ^{1/2} .m ^{1/2} .K ^{1/2})
c	: Özgül ısı (kJ/kg.K)
E	: Aktivasyon enerjisi (kJ/kmol)
f_b	: Kuvvet vektörü (N)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
k	: Isı iletim katsayısı (W/m.K)
m	: Kütle (kg)
ṁ	: Kütle kayıp hızı (g/s)
M	: Molar kütle (g/mol)
m_f	: Numunenin yanma sonunda kalan kütlesi (g)
m_s	: Numunenin yanmadan önceki kütlesi (g)
n	: Reaksiyon sırası
p	: Basınç (Pa)
r	: Reaksiyon hızı (1/s)
R	: Ünlversal gaz sabiti (kJ/mol.K)
s	: Oksijen tüketiminin yakıt tüketimine oranı
T	: Sıcaklık (K)
t	: Zaman (s)
T_e	: Orifisteki gaz sıcaklığı (K)
u	: Vektörel hız (m/s)
V	: Hacim (m ³)
Z	: Karışım oranı
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
τ	: Viskoz gerilim (kg/m ²)
X_{O₂}	: Çıkıştaki O ₂ konsantrasyonu
X_{O₂}⁰	: Başlangıçtaki O ₂ konsantrasyonu
q̇(t)	: Isı yayılım hızı (kW)
Δh_{c,eff}	: Etkin yanma ısısı (MJ/kg)
Δh_c	: Net yanma ısısı (kJ/kg)
ΔP	: Orifisteki basınç farkı (Pa)

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
APP	: Amonyum polifosfat
CFD	: Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
FDS	: Fire Dynamics Simulator
FIGRA	: Yangın büyüme oranı
FPI	: Yangın performans indeksi
FR	: Alev geciktirici
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen
HRR	: Isı yayılım hızı
IFR	: Kabaran alev geciktirici
ML	: Kütle kaybı
MLR	: Kütle kayıp hızı
PER	: Pentaeritritol
PHRR	: Maksimum ısı yayılım hızı
PP	: Polipropilen
PU	: Poliüretan
PUF	: Esnek poliüretan
PUI	: İntegral (yarı sert) poliüretan
PUR	: Rijit poliüretan
R_{1maks}	: Birinci maksimum bozunma hızı
R_{2maks}	: İkinci maksimum bozunma hızı
R_{3maks}	: Üçüncü maksimum bozunma hızı
RIM	: Reaksiyon enjeksiyon kalıplama
R_{maks}	: Maksimum bozunma hızı
T_{%5wt}	: % 5 kütle kaybındaki sıcaklık
T_{%10wt}	: % 10 kütle kaybındaki sıcaklık
T_{%50wt}	: % 50 kütle kaybındaki sıcaklık
T_{1maks}	: Birinci maksimum bozunma sıcaklığı
T_{2maks}	: İkinci maksimum bozunma sıcaklığı
T_{3maks}	: Üçüncü maksimum bozunma sıcaklığı
TGA	: Termogravimetrik analiz
THR	: Toplam ısı yayılım miktarı
T_{maks}	: Maksimum bozunma sıcaklığı
t_{PHRR}	: Maksimum ısı yayılım hızına erişim süresi
TTI	: Tutuşma zamanı

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda her türlü katkıyı sunan, yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Nazım USTA'ya, malzemelerin üretimi ve deneylere hazırlık safhasında desteğini esirgemeyen değerli kuzenim Arş. Gör. Fatih DEMİRYUĞURAN'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına 2021FEBE008 nolu proje ile desteğinden dolayı Pamukkale Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Ayrıca maddi ve manevi olarak desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



1. GİRİŞ

Polimerlerin, birçok üstün özelliklerinden dolayı tekstil, elektronik, otomotiv, sağlık, yapı ve gıda gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Genel olarak, polimerler metallere göre daha hafif, kolay şekillendirilebilirler, kimyasallara karşı dayanıklıdırlar, geri dönüştürülebilirler ve uygun maliyetlidirler. Bununla birlikte, ısıl bozunma ve yanma dirençleri zayıftır. Polimerlerin ısıl bozunma ve yanma dirençlerinin düşük olması bazı alanlarda kullanımlarına sınırlamalar getirmiş olup bu malzemelerin ısıl bozunma ve yanma direncinin artırılması üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Bu kapsamda da özellikle farklı alev geciktirici ve dolgu malzemeleri kullanılabilmektedir. Malzemelerin ısıl bozunma ve yanma direnci artırılırken diğer özelliklerin olumsuz etkilenmemesi hatta mümkünse iyileştirilmesi önemli bir konudur.

Polimer malzemelerin yanma direncinin belirlenmesi için farklı yanma testleri uygulanmaktadır. Bu testler arasında en kapsamlı bilgi verebilen testlerden birisi de konik kalorimetre testidir. Konik kalorimetre testinde malzeme üzerine uygulanan ısı akısı değiştirilerek farklı yangın senaryoları gerçekleştirilebilmektedir. Malzemelerin tutuşma zamanı, ısı yayılım hızları, maksimum ısı yayılım hızları, toplam ısı yayılım miktarı, kütle kaybı ve kütle kayıp hızları, yanma sırasında oluşan is , CO , CO_2 ve NO_x gibi emisyonların tespiti yapılabilmektedir. Bu şekilde malzemelerin farklı yangın senaryolarındaki yanma davranışları tespit edilebilmektedir. Ayrıca yanma direncinin artırılması amacı ile polimer malzemeye farklı miktarlarda ilave edilen alev geciktirici/dolgu maddelerinin yanma direncine etkileri ortaya konulabilmektedir. Malzemelerin yanma davranışının daha iyi analiz edilebilmesi için ısıl bozunma davranışlarının da belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda malzemelerin termogravimetrik analizleri yapılarak kütle değişimi ve kütle değişim hızları belirlenmektedir.

Polimer malzemelerin yanma davranışının belirlenmesinde deneysel çalışmaların maliyetli ve zaman almasından dolayı deneysel çalışmalar ile yanma modelleme çalışmalarının yapılması da büyük önem kazanmaktadır. Belirli deneysel

alışmalarla geçerliliği uygun bulunan modelleme çalışmaları kullanılarak deney yapılmayan şartlar için de yanma davranışlarının belirlenmesi ile hem zamandan hem de maliyetten tasarruf edilebilmektedir. Bu çerçevede, araştırmacılar tarafından özel programlar geliştirilmekle birlikte farklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği paket programları da kullanılabilir. Yanma modelleme çalışmalarının en önemli aşamalarından ilki incelemeye alınan malzemenin gerekli özelliklerinin belirlenmesidir. Bu yüzden modelleme çalışmaları öncesi malzemelerin gerekli özelliklerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Daha sonra, yanma modellemesi için uygun m ağının ve farklı kriterlerin uygulamaya alınması ile mler gerçekleştirilebilmektedir. Modelleme sonuçlarının geçerliliği için deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak gerekiyorsa modelleme üzerinde iyileştirmeler yapılabilir.

Bu tez kapsamında, birçok alanda yaygın olarak kullanılan termoset bir malzeme olan ve özellikle farklı sektörlerde ısı yalıtım amaçlı kullanılan rijit poliüretan köpük (PUR) ve termoplastik malzemeler arasında birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılan polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemeler incelemeye alınmıştır. Bu malzemelerin farklı yangın senaryolarında yanma dirençlerinin belirlenmesi amaçıyla deneysel ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, polipropilen ve polietilen malzemelere kütlece % 25 oranında amonyum polifosfat ve pentaeritritol sentezinden oluşan kabaran alev geciktirici ilave edilerek kabaran alev geciktirici ilavesinin etkilerinin tespiti amaçıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlara ek olarak, FDS (Fire Dynamics Simulator) programı kullanılarak bu malzemelerin yanma modellemesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Tezin içeriği ile ilgili olarak ikinci bölümde incelemeye alınan polimer malzemeler, ısıl bozunma ve tez konusu ile ilgili literatür çalışmalarının zetleri sunulmuştur. nc bölümde polimer malzemelerin yanma modellemesi çerçevesinde kullanılan FDS (Fire Dynamics Simulator) programı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde kullanılan polimer malzemelerin özellikleri, üretimleri, fiziksel, termal ve yanma deneyleri ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Beşinci bölümde ise malzemelerin termogravimetrik analiz sonuçları, kinetik parametreleri, reaksiyon ısı değerleri, yoğunlukları, ısı iletim katsayıları, özgül ısı değerleri, konik

kalorimetre deney sonuçları verilmiş ve konik kalorimetre sonuçları FDS modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde ise tez kapsamında yapılan çalışmaların sonuçları özetlenerek değerlendirmeler yapılmıştır.



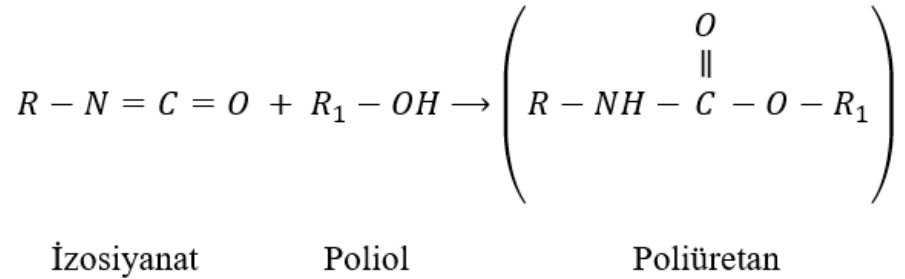
2. POLİMER MALZEMELER, ISIL BOZUNMA, YANMA VE LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Polimer Malzemeler

Bu tez kapsamında poliüretan, polipropilen, polietilen ve akrilonitril bütadien stiren malzemeler ile ilgili çalışmalar yapıldığı için bu malzemeler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

2.1.1 Poliüretan

Poliüretan, poliol ve izosiyanat arasında gerçekleşen tepkimeyle birlikte kabarma ajanı, katalizör ve bazı katkı malzemelerinin sonucunda oluşur (Zafar ve Sharmin 2012). Endüstride kullanılan polioller genellikle eter ve ester bazlıdır (Sonnenschein 2014). Poliüretan tepkimeleri ekzotermiktir (Aydın ve Ekmekçi 2002). Şekil 2.1’de tipik bir poliüretan reaksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Poliüretan reaksiyonu (Pinto ve diğ. 2018).

Poliüretanlar; esnek köpükler (PUF), integral (yarı sert) köpükler (PUI), sert (rijit) köpükler (PUR), RIM (Reaction Injection Moulding) köpükler ve poliüretan elastomerler olarak sınıflandırılabilir.

Esnek poliüretan köpükler; büküldüğünde eski şekline dönebilen, açık hücreli malzemelerdir. Yatak, mobilya ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Szycher 2013). Şekil 2.2’de esnek poliüretan köpüğün örnek uygulama alanları gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Esnek poliüretan köpük uygulamaları (Url-1, Url-2).

Yarı sert poliüretan köpükler; açık hücreli ve kısmen esneyebilen malzemelerdir. Darbe sönümleme özellikleri iyi olduğundan otomotiv sanayinde (direksiyon, göğüslük, paspas, tampon vb.) sıklıkla kullanılmaktadır (Szycher 2013). Şekil 2.3'te yarı sert poliüretan köpüğün örnek uygulama alanları gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Yarı sert poliüretan köpük uygulamaları (Url-3).

Sert poliüretan köpükler; genellikle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan kapalı hücre yapısındaki malzemelerdir. Sandviç panellerde, yapı izolasyonunda, mobilya ve otomotiv sektörlerinde, yapı ve soğutucu ekipmanları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Szycher 2013). Şekil 2.4'te sert poliüretan köpüğün örnek uygulama alanları gösterilmiştir.

RIM poliüretan köpükler; sert, yüksek yoğunluklu ve darbeye karşı dayanıklı özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründe (tampon ve tekerlek kaplamaları, hava yastığı kapakları, tavan döşemesi, gövde panelleri, gösterge panelleri vb.) kullanılmaktadır (Szycher 2013, Yurtseven 2014). Şekil 2.5'te RIM poliüretan köpüğün uygulama alanlarına örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Sert poliüretan köpük uygulamaları (Url-4, Url-5).



Şekil 2.5: RIM poliüretan köpük uygulamaları (Url-6).

Poliüretan elastomerler; sert, mekanik ve elastik özellikleri yüksek, darbe ve aşınmaya karşı dirençlidirler. İnşaat, otomotiv ve ayakkabı sektöründe kullanılmaktadırlar (Szycher 2013, Yurtseven 2014). Şekil 2.6’da poliüretan elastomerin uygulama alanlarına örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Poliüretan elastomer uygulamaları (Url-7, Url-8).

2.1.2 Polipropilen

Polipropilen, darbelere dayanıklılığı, neme karşı dirençli olması, iyi yalıtkanlık özelliğine sahip olması ve kimyasallara karşı direncinin yüksek olması gibi üstün özelliklerinden dolayı en yaygın kullanılan polimerlerdendir. Termoplastik özelliğinden dolayı geri dönüşümü yapılabilmektedir (Yaşar 2001). İlk kez 1957 yılında ticari plastik olan izotaktik polipropilen elde edilmiştir. Polipropilenin gerekli polimerizasyon koşullarında sindiyotaktik ve ataktik tipleri de üretilebilmektedir (Fried 2014). Şekil 2.7’de polipropilenin kimyasal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Polipropilenin kimyasal yapısı (Chanda 2000).

Polipropilen, propilen monomerlerinin Natta-Ziegler katalizörüyle birlikte polimerizasyona uğramasıyla elde edilmektedir (Yaşar 2001). Polipropilen, enjeksiyonla kalıplama ve ekstrüzyon tekniğiyle işlenebilmektedir. Polipropilen kristalleri yaklaşık 163 °C sıcaklıkta ergimeye başlamaktadır (Url-9). Polipropilen otomotiv parçalarında, makine ve beyaz eşya parçalarında, gıda ve sağlık sektörlerinde, ambalaj ve etiketleme, ayakkabı sektöründe, oyuncaklar, mutfak eşyaları, elektrik malzemesi, masa, sandalye, boru, levha gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Yaşar 2001, Peacock ve Calhoun 2006). Şekil 2.8’de polipropilenin kullanım alanlarına örnekler gösterilmiştir.

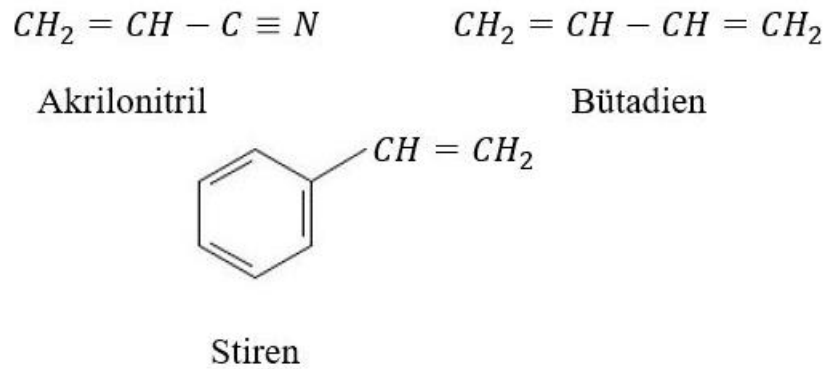


Şekil 2.8: Polipropilenin kullanım alanlarına örnekler (Url-10, Url-11).

2.1.4 Akrilonitril bütadien stiren

Akrilonitril, Bütadien ve Stiren monomerlerinin birleşmesiyle oluşan ABS, termoplastik polimer grubundadır. ABS, günlük hayatta hemen her alanda üstün özelliklerinden (esnek tasarım, boyut kararlılığı, kimyasal direnç, darbe dayanımı yüksek, kolay işlenebilirlik, yüzey kalitesi, parlaklık, elektriksel yalıtkanlık) dolayı tercih sebebidir (Yaşar 2001).

ABS'nin yapısındaki akrilonitril % 15 ile % 35, bütadien % 5 ile % 30 ve stiren ise % 40 ile % 60 arasında değişen oranlarda bulunmaktadır (McKeen 2010). Akrilonitril malzemeye ısı dayanımı, rijitlik ve kimyasal direnç sağlamaktadır. Bütadien düşük sıcaklıklarda sağlamlık ve darbe dayanımı sağlarken, stiren ise parlaklık, sertlik ve kolay işlenebilirlik kazandırmaktadır (Yaşar 2001, Pious ve Thomas 2016). Şekil 2.11'de ABS'yi oluşturan monomerlerin kimyasal yapısı verilmiştir.



Şekil 2.11: ABS'yi oluşturan monomerlerin kimyasal yapısı (McKeen 2010).

ABS, ekstrüzyon tekniği kullanılarak ya da enjeksiyonla kalıplama şeklinde işlenebilmektedir. ABS geniş işleme yelpazesi, düşük kalıp büzülmesi ve iyi bir ısı kararlılığına sahip olduğu için enjeksiyonla kalıplama işlemi kolaylaşmaktadır. Kalıplama sıcaklığı 220 ile 260 °C arasında yapılabilmektedir (Url-13).

ABS; sanayide çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Televizyonlar ve güç donanım kabinleri, şalter kutuları, dekoratif eşyalar, oyuncaklar, telefon gövdeleri, boru ve bağlantı parçaları, çanta ve bavullar bunlardan bazılarıdır (Yaşar 2001).

2.2 Alev Geciktiriciler ve Kompozit Malzemeler

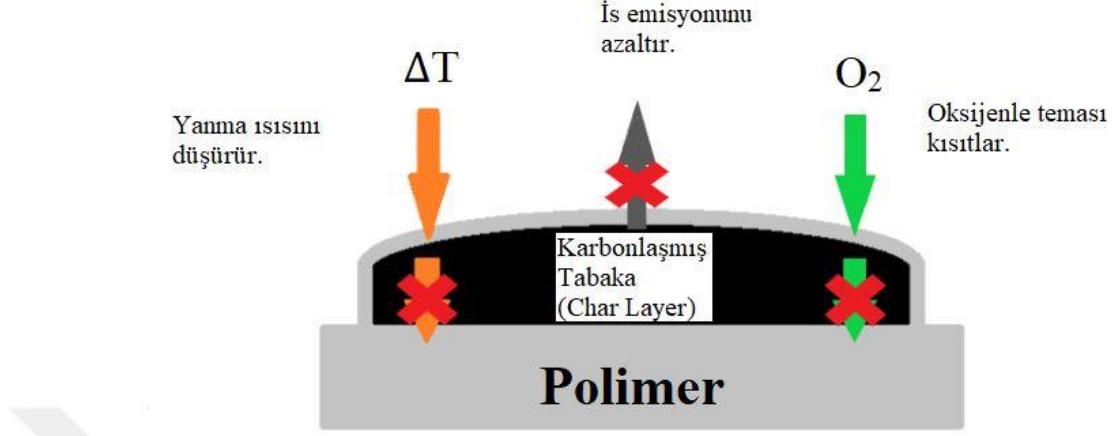
Polimer malzemeler; hafif olmaları, kolay işlenebilmeleri, elektriksel yalıtkanlıkları ve korozyona karşı dayanıklı olmaları nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Fakat polimer malzemelerin ısıl bozunmaya ve yanmaya karşı dirençleri düşüktür. Kolayca tutuşmakta ve yanma esnasında ısı dışında zehirli gazlar ve is üretmektedirler. Bundan dolayı polimer malzemelerin yanma özelliklerini iyileştirmek için çeşitli alev geciktiriciler ilave edilebilmektedir (Laoutid ve diğ. 2009). Alev geciktiriciler, ilave edildikleri malzemelerin yanma direncini artırırken malzemenin ısıl, mekanik, elektriksel ve işlenebilirlik gibi özelliklerine olumsuz etki yapmamaları beklenmektedir (Kaya 1998).

Alev geciktiriciler, farklı şekillerde sınıflandırılmakla birlikte, genel olarak halojen içeren ve halojen içermeyen sistemler olarak sınıflandırılabilir. Halojen içeren alev geciktiriciler brom ve klor içerirken, halojen içermeyen alev geciktiriciler azotlu, fosforlu, metal hidroksitler ve silikon bazlı maddeler içerebilmektedir (Kaya 1998, Laoutid ve diğ. 2009).

Halojen içeren alev geciktiricilerin ilave edildiği malzemelerin yanması anında gaz fazında oluşan serbest radikaller halojen içeren alev geciktiricilerle tepkimeye girerler. Bunun sonucunda yanan malzemedan çıkan duman miktarı artmaktadır. Halojen içeren alev geciktiriciler, malzemenin yanmasını tam önleyemezler, fakat yangının büyük felaketlere yol açmamasını sağlayarak kurtarma işlemleri sırasında vakit kazandırır. Bununla birlikte, halojen içeren alev geciktirici ilaveli malzemeler yandıklarında hem çevreye hem de insan sağlığına zararlı gazlar (HCl, CO gibi) ürettiği için yerine zararlı gaz seviyesini azaltabilecek halojen içermeyen alev geciktirici sistemler araştırılmaya başlanmıştır (Kaya 1998, Lu ve Hamerton 2002, Chen ve Wang 2010^a).

Halojen içermeyen alev geciktiricilerden fosfor bazlı olanlar en çok kullanılan alev geciktiricilerdendir. Fosfor içeren alev geciktiricili malzemeler yanmaya başladığında alev geciktiricinin etkisiyle malzeme kabarmaya başlayarak yanan malzemeyle oksijen arasında karbonlaşmış bir tabaka (char layer) oluşturmaktadır. Oluşan bu tabaka malzeme yüzeyi ile oksijenin temasını keserek yanmayı sınırlandırabilmekte ve yeniden serbest radikal oluşumunu engelleyebilmektedir

(Chen ve Wang 2010^b). Fosfor içeren alev geciktiricilerden en çok bilinen ve kullanılanı amonyum polifosfattır. Kabaran alev geciktiricili sistemin işleyiş mekanizması Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Kabaran alev geciktiricilerin işleyişi (Maqsood ve Seide 2020).

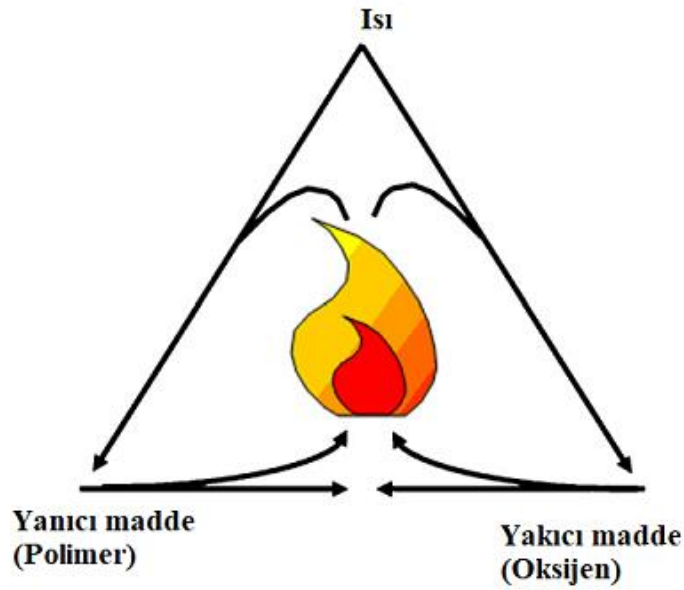
Kompozit malzeme, en az iki ya da ikiden fazla farklı fiziksel veya kimyasal özellikteki malzemelerin karıştırılması sonucu elde edilen ve karışımındaki malzemelerden farklı yeni özellikler kazanabilen malzemelerdir. Kompozit malzemeler iki ana yapıdan meydana gelmektedir. Bu yapılar matris ve takviye elemanlarıdır. Matris yapı takviye elemanlarını bir arada tutmaya ve desteklemeye yararken, takviye elemanları da taşıyıcı görevi yerine getirirler (Ulçay ve diğ. 2002, Chung 2010).

2.3 Isıl Bozunma ve Yanma

Polimer malzemeler, ısıya maruz bırakıldıklarında kimyasal ve fiziksel özelliklerinde büyük değişiklikler oluşabilir. Isıl bozunma; polimerin yapısında erime, süblimasyon, buharlaşma ve karbonlaşma gibi fiziksel süreçlere neden olabilir. Bu süreçlere bağlı olarak malzemenin rengi, kütlesi, yoğunluğu ve şekli değişikliğe uğrayabilmektedir (Ray ve Cooney 2012). Isıl bozunma üç grupta incelenebilir. Bunlar zincir kesilmesi, çapraz bağlanma ve karbonlaşmadır. Zincir kesilmesi, reaktif türlerin (asitler, bazlar, radikaller, güçlü oksitleyiciler gibi) polimer omurgasına kimyasal etkisi sonucu polimer zincirine bağlanmasıyla oluşur. Bu olay sonucunda polimer malzemenin ortalama molekül ağırlığı ve gerilme mukavemeti azalır ve gevrekleşme

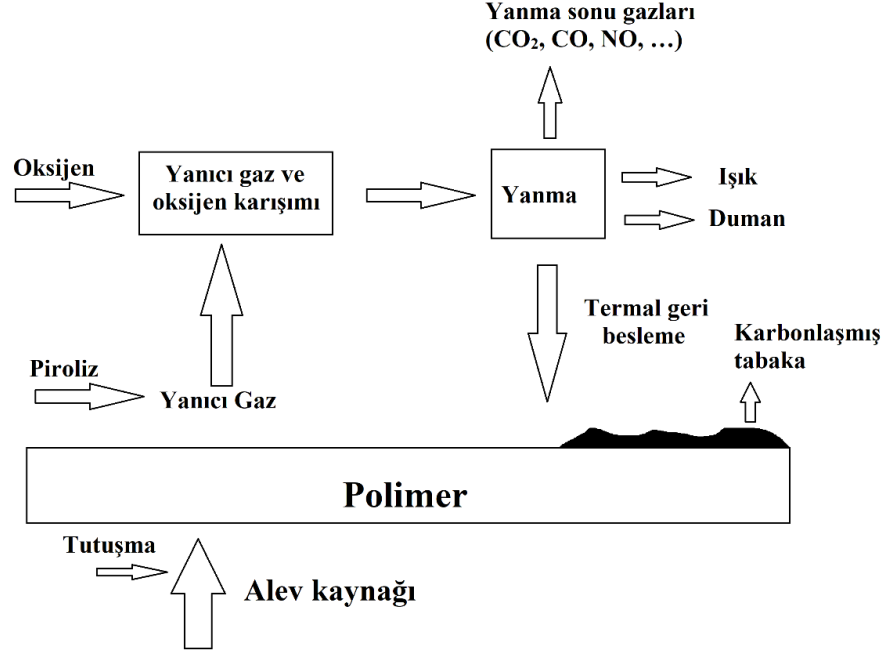
görülür. Çapraz bağlanma, polimer zincirindeki reaktif bölgenin farklı bir zincirle reaksiyonu sonucu oluşur. Karbonlaşma ise polimerin yapısal olarak özelliklerini yitirmesidir. Sonuç olarak siyah ve kırılğan bir madde oluşur (Peacock ve Calhoun 2006).

Polimer malzemeler yanmaya çok elverişlidirler. Yanmayla beraber aşındırıcı veya toksik gazla birlikte duman oluşur. Yanma; yanıcı madde, yakıcı madde ve ısı unsurlarının birleşimiyle meydana gelir. Şekil 2.13'te yanma prensibi gösterilmiştir. Yakıcı madde olarak ilk akla gelen oksijendir. Yanma işlemi, ısı kaynağının polimerin sıcaklığını artırması ve polimerdeki bağların parçalanmasıyla başlar. Parçalanmış polimerlerin uçucu kısmı havaya dağılır ve yanıcı bir gaz karışımı oluşur. Karışım tutuşma sıcaklığına geldiğinde tutuşur ve ısı açığa çıkarır. Yanma süresi malzeme kütlesi ve yanma esnasında oluşan ısı miktarına bağlıdır (Laoutid ve diğ. 2009).



Şekil 2.13: Yanma prensibi (Yangın üçgeni), (Laoutid ve diğ. 2009).

Şekil 2.14'te polimerin yanma çevrimi gösterilmektedir. Çevrim tutuşma, piroliz, yanma ve geri besleme kısımlarından oluşmaktadır. Alev kaynağından çıkan ısıyla bozulan polimerde piroliz (ısıl bozunma) sonucunda yanıcı gazlar meydana gelmektedir. Yanıcı gazların oksijenle tepkimesi sonucu yanma başlar (Goda ve diğ. 2018).



Şekil 2.14: Polimerin yanma çevrimi (Goda ve diğ. 2018).

2.4 Literatür Çalışması

Polimer malzemeler sağladıkları üretim kolaylığı ve çeşitliliği, hafiflik, üstün mekanik özellikler ve uygun maliyetleri nedeniyle tercih sebebi olmuşlardır. Hemen hemen her alanda kullanılmaktadırlar. Ancak polimer malzemelerin ısıl bozunma ve yanma dirençleri düşüktür. Bu özellikleri geliştirmek için çeşitli dolgu ve alev geciktiriciler polimer malzemelere eklenmektedir. Polimer malzemelerin yanma dirençlerini belirlemek için bazı yanma testleri uygulanmaktadır. En yaygın olan testler LOI, UL94, MVSS 302, kızgın tel ve konik kalorimetre testleridir. Bu yanma testleri arasında en detaylı bilgi verebilen test konik kalorimetre testidir. Polimer malzemelerin yanma davranışları farklı modelleme programları ile simüle edilebilmektedir. Bu programlardan bazıları FDS (Fire Dynamics Simulator), ThermaKin ve COMSOL gibi programlardır.

Bu kısımda farklı kompozit malzemelerin yanma davranışlarının konik kalorimetre ile belirlenmesi ve yanma davranışlarının modellenmesi hakkında son zamanlarda yapılan çalışmalar hakkında özet bilgiler verilecektir.

Hermouet ve diğ. (2021), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) malzemenin farklı oksijen konsantrasyonları (% 21, % 18, % 15, % 12,5, % 10, % 0) ve farklı ısı akılarında yanma davranışlarını belirlemek için atmosfer kontrollü konik kalorimetrede çalışmalar yapmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 20 kW/m², 35 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. Isı akısının artmasıyla malzemenin daha erken tutuştuğunu, maksimum ısı yayılım hızının (PHRR) ve kütle kayıp hızının (MLR) arttığını bildirmişlerdir. 20 kW/m² ısı akısında malzemenin yanması için gerekli oksijen konsantrasyonu % 12,5 - 15, 35 kW/m² ısı akısında % 12,5 ve 50 kW/m² ısı akısında ise % 10 - 12,5 seviyelerinde olduğunu, oksijen seviyesinin % 10'un altına düştüğünde yanma prosesinin gerçekleşmediğini rapor etmişlerdir.

Ren ve diğ. (2015), polipropilen (PP), akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) ile bu iki malzemenin nanokompozitlerinin modellemesi için çalışmışlar ve yanma sonucunda oluşan karbonlaşmış tabakanın ısı yayılım hızına etkisini araştırmışlardır. Konik kalorimetre testlerini PP ve PP/MMT (polipropilen/montmorillonit) için 50 kW/m² ısı akısında, ABS ve ABS/MHR/GNS (akrilonitril-bütadien-stiren/metal hidroksit nano çubuklar/grafen nano plaka) için ise 35 kW/m² ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. Modelleme çalışmalarını ThermaKin programında yapmışlardır. PP ve PP/MMT kompozit malzemelerinin HRR değerlerini karşılaştırdıklarında, deneysel ve modelleme çalışmalarının tutuşma sürelerinin farklı olduğu, modellemede malzemenin daha geç tutuştuğunu bildirmişlerdir. Tutuşma süresinden sonra deneysel ve modelleme sonuçlarının PP için uyumlu olduğu, PP/MMT için farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. ABS ve ABS/MHR/GNS kompozit malzemelerinde ise malzemelerin tutuşma süreleri ve PHRR bölgeleri de dahil olmak üzere deneysel ve modelleme çalışmalarının daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Yanma sonucunda oluşan karbonlaşmış tabakanın polipropilen nanokompozitinde yalıtım tabakası oluşturduğu, ABS kompozitinde ise kütle transfer sürecini yavaşlattığını saptamışlardır. Karbonlaşmış tabakanın HRR üzerindeki etkisini belirlemek için parametrik analiz yapmışlardır. PP/MMT kompozitinde karbonumsu tabakanın yoğunluk ve ısı iletim katsayısının artışlarının PHRR değerinin artmasına sebep olduğu, ABS/MHR/GNS kompozitinde ise yoğunluğun artmasıyla PHRR değerinin arttığı, ısı iletim katsayısının artışının PHRR değeri üzerinde kayda değer bir etki göstermediğini bildirmişlerdir.

Lyon ve Crowley (2021), 2 ile 6 mm arasında değişen kalınlıkta 6 farklı polimerin (PMMA, PA66, HIPS, PC, HDPE, PEEK) yanma davranışlarını belirlemek için konik kalorimetre testleri yapmışlardır. 6 farklı malzeme için konik kalorimetrede uyguladıkları ısı akısı 35 ile 92 kW/m² arasında değişmektedir. Bütün numuneler için ısı akısı arttıkça maksimum ısı yayılım hızının arttığı rapor edilmiştir.

Patel ve Wang (2016), polietilen malzemelerin yanma özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneysel ve matematiksel modelleme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Konik kalorimetre testlerini 40, 45, 50 ve 55 kW/m² ısı akılarında yapmışlardır. Isı akısının artışıyla malzemelerin erken tutuştuğu, CO₂ ve CO emisyonlarının arttığını belirtmişlerdir. Deneylerden gözlemlenen ve hesaplanan maksimum ısı yayılım hızı (PHRR) değerlerinde $\pm$ % 4,56 standart sapma olduğunu bildirmişlerdir.

Luche ve diğ. (2012), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemenin yanma davranışlarını belirlemek için 10 farklı ısı akısında (15, 17, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80 kW/m²) konik kalorimetre testi yapmışlardır. Isı akısının artmasıyla genel olarak maksimum ısı yayılım hızı (PHRR), toplam ısı yayılımı (THR) ve kütle kaybı hızlarının (MLR) arttığını bildirmişlerdir.

Ferng ve Liu (2011), nükleer santrallerde kullanılan elektrik kablolarının yanma davranışlarının modelleme çalışmaları için FDS programını kullanmışlardır. Deneysel çalışma kapsamında, dış kısmı polivinil klorür (PVC) ve iç kısmı çapraz bağlı polietilenden (XLPE) kabloyu yanma testinde kullanmışlardır. Konik kalorimetre testini 50 kW/m² ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. Deneysel olarak elde edilen ısı yayılım hızı (HRR) ve gaz konsantrasyonlarını (CO₂, CO, O₂) FDS sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. HRR için deneysel ve modelleme sonuçlarının uyumlu olduğu, deneysel olarak PHRR'nin 37. saniyede 122 kW/m² değerini aldığını modellemeye ise PHRR'nin 40. saniyede 120 kW/m² değerine ulaştığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde, CO ve CO₂ konsantrasyonlarının deneysel ve modelleme sonuçları uyum gösterirken, O₂ konsantrasyonunda tepe noktalarının farklı olduğunu belirtmişlerdir. Bu farklılığa is emisyonundaki hidrojen fraksiyonunun neden olabileceğini belirtmişlerdir. Bu ölçümün doğruluğunu desteklemek için is verimi düşük olan polimetilmetakrilat (PMMA) malzemenin deneysel ve modelleme

sonuçlarını karşılaştırmışlardır. HRR değerleri ile O₂ konsantrasyonların iyi bir uyum içinde olmasının sonucu doğruladığını rapor etmişlerdir.

Ali ve diğ. (2021), kabaran alev geciktirici ilaveli (IFR) keten-polipropilen kompozit malzemeye farklı oranlarda grafen ekleyerek etkisini araştırmışlardır. Grafen nanolevhacıkların (GNP) ilavesiyle eğilme ve çekme dayanımlarında kayda değer değişimler elde etmişlerdir. Konik kolorimetre testlerini 50 kW/m² ısı akısında yapmışlardır. Kabaran alev geciktiricili sisteme GNP'nin eklenmesinin daha iyi bir karbonumsu tabaka oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Keten-polipropilen kompozitine kütlece % 0,5, % 1 ve % 2 GNP ilavesinin PHRR (% 4,5, % 3,6 ve % 8,5) ve THR (% 6,4, % 1,5 ve % 13,2) değerlerini azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, alev geciktirici ilaveli keten-polipropilen için FDS programında modelleme yapmışlardır. Konik kalorimetre ve FDS sonucunu elde ettikleri HRR değerlerini karşılaştırdıklarında yanma başlangıcının uyumlu olduğunu sonrasında ise farklılık oluştuğunu belirtmişlerdir.

Kim ve diğ. (2019), kısa ve uzun keten elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dikey ve yatay yöndeki yanma özelliklerini araştırmak için çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre deneylerini 35 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişler ve yanma modellemesini FDS programında yapmışlardır. Kompozit malzemelere alev geciktirici (APP) ekleyerek etkilerini incelemişlerdir. 50 kW/m² ısı akısı uygulanan malzemelere alev geciktirici ilavesiyle maksimum ısı yayılımı hızı (PHRR) ve toplam ısı yayılımı (THR) azalırken, yangın performans indeksinin (FPI) arttığını bildirmişlerdir. Alev geciktirici içermeyen numunelerin dikey pozisyonda yapılan testlerinde kısa ve uzun keten-polipropilen kompozit malzemelerinin yatay pozisyona göre geç tutuştuğunu gözlemlemişlerdir. Alev geciktiricisiz kompozit malzemelerde her iki pozisyonda da ısı akısı arttıkça malzemelerin tutuşma süresinin (TTI) ve yangın performans indeksinin (FPI) azaldığı, maksimum ısı yayılım hızının arttığını (PHRR) belirtmişlerdir. 50 kW/m² ısı akısında yaptıkları deneyde kısa keten-polipropilen kompozitinin dikey ve yatay pozisyonundaki HRR değerlerini FDS sonuçları ile karşılaştırdıklarında, tutuşma süreleri ve yanma ilerlemesinin yatay pozisyonda yaklaşık 100. saniyeye ve dikey pozisyonda yaklaşık 120. saniyeye kadar uyum gösterdiğini, sonraki kısımlarda farklılık olduğunu rapor etmişlerdir.

Dutta ve diğ. (2019), yün (kütlege % 25 ve % 35) ve keten (kütlege % 25 ve % 35) esaslı polipropilen kompozitlerin dikey ve yatay pozisyonundaki yanma özelliklerini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre sonuçlarını karşılaştırmak için FDS programı kullanılarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. Dikey pozisyonundaki numunelerin yatay pozisyonundaki numunelere göre daha geç tutuştukları saptanmıştır. Simülasyon ve deneysel ısı yayılım hızı (HRR) değerleri karşılaştırılmış olup, 50 kW/m² ısı akısında kütlege % 25 yün içeren polipropilen kompozitinin her iki pozisyonunda da tutuşma süreleri ve 100. saniyeye kadar olan bölgeler uyumlu iken, kütlege % 35 yün esaslı malzemede dikey pozisyonundaki sonuçların daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. 35 kW/m² ısı akısında malzemelerin tutuşma süreleri birbirine yakın iken diğer bölgelerde kısmi farklılıklar olduğunu bildirmişlerdir. 50 kW/m² ısı akısında kütlege % 25 ve % 35 keten içeren PP kompozitlerinin tutuşma sürelerinin uyumlu olduğu ve PHRR değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. 35 kW/m² ısı akısında genel olarak tutuşma sürelerinin ve 100. saniyeye kadar olan bölgelerin uyum içinde olduğu, diğer bölgelerin farklılık gösterdiği rapor edilmiştir.

Bhattacharyya ve Kim (2017), doğal elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin yanma ve ısı özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Polipropilen (PP), yün/keten esaslı PP ve alev geciktirici ilaveli yün/keten esaslı PP kompozitlerin termogravimetrik analizlerini yapmışlardır. PP'nin kalan kütle olmaksızın bozunduğu ve yün ilaveli PP kompozitlerin ise yaklaşık % 28 ile en yüksek kalan kütleyi oluşturduğu belirtilmiştir. 50 kW/m² ısı akısında gerçekleştirilen konik kalorimetre testinde polipropilenin yaklaşık 1200 kW/m² ile en yüksek PHRR'e sahip olduğu, en düşük PHRR değerinin ise yaklaşık 400 kW/m² ile alev geciktirici ilaveli yün-polipropilen kompozitinde olduğu bildirilmiştir. Modelleme çalışmalarında FDS programı kullanılmıştır. Modellemelerden elde edilen PHRR değerlerinin deneysel verilere kıyasla yüksek, tutuşma süresinin birbirlerine yakın olduğu fakat diğer bölgelerde farklılıklar bulunduğu ifade edilmiştir.

Kim ve Bhattacharyya (2016), yün esaslı polipropilen kompozit malzemeler elde etmek için, amonyum polifosfat (APP), talk ve maleik anhidrit aşılansız polipropilen (MAPP) maddeleri bir araya getirip üretim yapmışlardır. Konik

kalorimetre deneylerini 50 kW/m^2 ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. Yün/polipropilen kompozitine iki farklı amonyum polifosfat ilave ederek etkisini araştırmışlardır. APP'lerin yün/polipropilen kompozitine eklenmesiyle maksimum ısı yayılım hızının (PHRR) ve toplam ısı yayılımının (THR) düştüğü, ayrıca azot içeriği yüksek olan APP'nin daha etkili olduğu rapor edilmiştir. FDS programı kullanılarak elde edilen HRR değerleri deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Modelleme ve deneysel sonuçların maksimum ısı yayılım hızının (PHRR) gerçekleştiği zamana kadar uyum sağladığını sonrasında ise farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Linteris ve diğ. (2013), dört farklı malzemenin (polipropilen, poliamid 6,6, polioksimetilen ve polietilen tereftalat) 50 kW/m^2 sabit ısı akısına maruz bırakıldığında kütle kayıp hızlarının (MLR) zamana bağlı değişimini incelemek için çalışma yapmışlardır. Kütle kayıp hızlarını modellemek için FDS ve ThermaKin programları kullanılmıştır. Deneysel ve modelleme sonuçlarının polipropilen için ilk 300 s, poliamid 6,6 için ilk 400 s, polietilen tereftalat için ilk 150 s ve polioksimetilen için ise tüm yanma zamanında uyum içinde oldukları belirtilmiştir. Ayrıca FDS ve ThermaKin programlarının modelleme sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu rapor edilmiştir.

Szustakiewics ve diğ. (2011), polipropilen ve nanokompozitlerinin yanma davranışlarını belirlemek için çalışma yapmışlardır. Polipropilen ve nanokompozitlerine alev geciktirici olarak amonyum polifosfat (APP) ekleyerek, konik kalorimetre testlerini 35 kW/m^2 ve 50 kW/m^2 ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. Isı akısı arttıkça malzemelerin tutuşma süresinin azaldığı (TTI) ve maksimum ısı yayılım hızının (PHRR) arttığı belirtilmiştir. Ham polipropilene kıyasla polipropilen nanokompozitlerine alev geciktirici ilavesinin PHRR değerlerini % 50'ye yakın seviyelerde azalttığı bildirilmiştir.

Kempel ve diğ. (2012), simülasyon programları yardımıyla, farklı yanma koşullarında polimer malzemelerin kütle kayıp hızlarını (MLR) belirlemek için çalışma yapmışlardır. Malzeme olarak PBT (polibütilentereftalat) ile cam elyaf takviyeli PBT (PBT-GF) kullanmışlardır. Simülasyonlar için Fire Dynamics Simulator (FDS) ve ThermaKin programlarını kullanmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m^2 , 50 kW/m^2 ve 70 kW/m^2 ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. PBT'nin tamamına yakınının bozunduğu, PBT-GF malzemenin ise karbonumsu tabaka

oluşturduğunu tespit etmişlerdir. PBT için iki farklı simülasyon programı ve deneysel MLR değerlerinin çok iyi uyuştugu, PBT-GF için ise simülasyon eğrilerinin deneysel eğrilere göre kısmen farklı olduğu bildirilmiştir.

Zhou ve diğ. (2018), iki farklı simülasyon programıyla farklı yangın koşullarına maruz bırakılan polimer çimento harcı, çimento harcı ve EPS çekirdek katmanlarından oluşan genleşmiş polistren dış ısı yalıtım kompozit sistem (EPS ETICS) ürünlerinin kütle kayıp hızlarının (MLR) tahminine yönelik araştırma yapmışlardır. Simülasyon programı olarak Fire Dynamics Simulator (FDS 6.5) ve ThermaKin2D programlarını kullanmışlardır. Konik kalorimetre deneylerini 30 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon ve deneysel MLR eğrileri arasındaki ortalama hatayı her iki ısı akısı için yaklaşık % 16 olarak hesaplamışlardır. Deney sonuçlarıyla simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında kütle kaybı hızı (MLR) ve ısı yayılım hızı (HRR) tahminlerinin, deney sonuçlarıyla kısmen farklılıklar olmasına rağmen kabul edilebilir doğrulukta olduğunu bildirmişlerdir. HRR ve MLR'deki oluşan kısmi farklılıkların alev akısının iyi modellenememesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Moinuddin ve diğ. (2020), karbonlaşmayan (PMMA) ve karbonlaşan (çam, yün, pamuk) malzemelerinin yanma davranışlarının modellenmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Farklı ısıtma hızlarında (5 ile 200 K/min arasında değişen) elde ettikleri kinetik parametreleri FDS programında girerek deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 30 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. Farklı ısıtma hızlarında elde ettikleri HRR değerlerinin, PMMA için her iki ısı akısında da 20 K/min ısıtma hızında, çam için 30 K/min ısıtma hızında simülasyon sonuçlarıyla daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Yün için simülasyon ve deneysel kütle kaybı (ML) değerlerinin 50 kW/m² ısı akısında uyumlu olduğunu, 30 kW/m² ısı akısında farklılık gösterdiğini ve bu farklılığın karbonlaşan tabakanın özelliklerinin tam olarak belirlenememesinden kaynaklanabileceğini belirtmişlerdir. Pamukta 30 kW/m² ısı akısında ML eğrilerinin birbiriyle daha uyumlu iken 50 kW/m² ısı akısında farklı olduğunu bildirmişlerdir.

Yang ve diğ. (2019), PMMA (Polimetil metakrilat) malzemenin FDS programı ile yanma davranışı modellenmesi için gerekli giriş parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmışlardır. Bu kapsamda PMMA malzeme için TGA (5, 10 ve 20 K/min)

ve konik kalorimetre testleri gerçekleştirmişlerdir. TGA ile malzemenin kinetik parametreleri belirlenmiş, 25 kW/m², 50 kW/m² ve 70 kW/m² ısı akılarında üç konik kalorimetre testi yapmışlardır. TGA sonuçlarından elde edilen kinetik parametreler algoritmada kullanılmış ve elde edilen ML (kütle kaybı) optimizasyon sonuçlarını deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. FDS programında kullanılan parametrelerin bu yaklaşımla gerçek değerlerine % 20 hata payıyla belirlenerek adapte edildiği ve sonuçlarda modelleme ile gerçek test koşullarında elde edilen MLR değerlerinin benzeştiğini belirtmişlerdir.

Nakrani ve diğ. (2020), çam esaslı ahşap malzemenin yanmasını modellemek için çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada tek kademeli ve iki kademeli olmak üzere iki farklı reaksiyon yöntemi kullanmışlardır. Ahşap malzemenin kinetik parametrelerini belirlemek için dört farklı ısıtma hızlarında (5 K/min, 10 K/min, 15 K/min ve 20 K/min) TGA analizleri gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon programı olarak FDS'yi kullanmışlardır. Ahşap malzemenin konik kalorimetre testlerini 30 kW/m², 50 kW/m² ve 75 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. FDS ve konik kalorimetreden elde ettikleri HRR sonuçlarını karşılaştırdıklarında iki kademeli reaksiyonun ilk tepe noktasına kadar uyum sağladığı sonrasında kısmi farklılıklar olduğu tespit edilmiş, tek kademeli reaksiyonun ise erken tutuşma başlangıcı göstererek iki kademeli reaksiyona göre daha az uyum sağladığı belirlenmiştir. Yanma sonucu oluşan karbonumsu tabaka özelliklerinin belirlenip modellemeye dahil edilmesiyle sonuçların iyileştirilebileceği ifade edilmiştir.

Hejtmánek ve diğ. (2017), FDS programında ahşap çam malzemenin yanmasıyla ilgili çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre deneylerini 35 kW/m² ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. FDS ve konik kalorimetreden elde ettikleri HRR değerlerini karşılaştırmışlardır. Geliştirdikleri ilk modelde net yanma ısısı, ikinci modelde ise efektif yanma ısısı değerini kullanmışlardır. Net yanma ısısının laboratuvar koşullarında karbonumsu tabakanın ve diğer yanma ürünleri ile tüm malzemenin yakılması sonucu elde edildiğini, efektif yanma ısısının ise konik kalorimetre deneyi sırasında malzemenin yanmasına bağlı olarak elde edildiği bildirilmiştir. Geliştirilen iki modelden elde edilen sonuçların benzerlik ve farklılık gösterdiği bölgeler olduğu rapor edilmiştir.

Zhang ve diğ. (2015), kapalı bir ortamda ahşap bir kafesin yanmasını modellemek için FDS programını kullanmışlardır. Ayrıca 35 kW/m², 40 kW/m², 45 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen konik kalorimetre testlerinden elde edilen tutuşma sıcaklığı ve HRR gibi verileri FDS’de girdi olarak kullanmışlardır. Simülasyon ve kapalı ortamda gerçekleştirilen deneylerle elde edilen HRR değerlerinin uyumlu olduğu belirtilmiştir. Alev sıcaklığının deneysel ve simülasyon değerleri karşılaştırıldığında ölçüm yüksekliği arttıkça deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın azaldığı bildirilmiştir.

Wang ve diğ. (2020), küçük ölçekli tünel deneyinin simülasyonunu yapmak için orta yoğunluklu ahşap levhadan (MDF) yapılmış plakaları kullanarak, farklı zorlanmış havalandırma hızlarında çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 25 kW/m², 35 kW/m² ve 50 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirmişlerdir. MDF’nin malzeme özellikleri FDS programına girildikten sonra konik kalorimetre test sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların tamamen örtüşmediği fakat modelleme ile elde edilen PHRR değerleri, toplam ısı yayılımları ve yanma sürelerinin MDF’nin yanma davranışını belirli seviyede temsil edebileceği belirtilmiştir.

Marquis ve diğ. (2013), cam elyaf takviyeli polyester-balsa özlü kompozit malzeme geliştirerek yanma özelliklerini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Kinetik parametreleri belirlemek için üç farklı ısıtma hızında (10 K/min, 20 K/min ve 50 K/min) TGA analizleri gerçekleştirmişlerdir. 35 kW/m², 50 kW/m² ve 75 kW/m² ısı akılarında konik kalorimetre deneyleri yapmışlardır. Modelleme için FDS programını kullanmışlardır. Deney ve modelleme sonuçlarından elde ettikleri ısı yayılım hızları (HRR) ve kütle kaybı hızlarını (MLR) karşılaştırdıklarında sonuçların birbiriyle genel olarak örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Wang ve diğ. (2016), büyük ölçekli tünel yangın deneyi yapmak için çalışma başlatmışlardır. Deneyde plastik ve ahşap malzemeleri kullanarak bunların yanma ve bozunma özelliklerini araştırmışlardır. Kinetik parametreleri belirlemek için elle hesaplama yöntemi ve genetik algoritma yöntemlerini kullanarak termogravimetrik analiz deneylerinden (5 K/min, 20 K/min ve 60 K/min) yararlanmışlardır. Konik kalorimetre deneylerini 25 kW/m², 35 kW/m², 50 kW/m² ve 75 kW/m² ısı akılarında yapmışlardır. Yanma modellemesini FDS programında gerçekleştirmişlerdir. Deney ve simülasyon sonuçlarından elde ettikleri HRR değerlerini karşılaştırdıklarında ahşap

malzemede en uyumlu sonuç 25 kW/m^2 ısı akısında, plastik malzemede ise 35 kW/m^2 ısı akısında olduğunu ifade etmişlerdir.

Yuen ve diğ. (2020), kompozit malzemelerde is oluşumu, alev yayılımı ve CO, CO₂ gibi gazların etkilerini araştırmak için yangın değerlendirme modeli üzerinde çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre testinde, Kitosan / Grafen oksit katmanından oluşan alev geciktirici kaplamanın esnek poliüretan köpük üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Isı akısını 35 kW/m^2 olarak uygulamışlardır. Test sonuçlarına göre, alev geciktirici kaplamaların maksimum ısı yayılım hızı (PHRR) değerlerini ham esnek poliüretan köpüğe kıyasla düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Sayısal ve deneysel HRR eğrilerinin benzerlik gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Baguian ve diğ. (2021), 20 mm ve 100 mm kalınlığındaki düşük ve yüksek yoğunluklu esnek poliüretan köpük malzemenin yanma davranışını araştırmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 20 mm köpük için 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 50 kW/m^2 , 100 mm köpük için 10 kW/m^2 ve 35 kW/m^2 ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. 20 mm köpük için yaptıkları testlerde ısı akısı arttıkça maksimum ısı yayılım hızının arttığı (PHRR), tutuşma süresinin azaldığını (TTI) belirtmişlerdir. 20 mm kalınlığındaki köpüklerin tek PHRR'ye sahip olduğunu, 100 mm kalınlığındaki köpüklerin ise iki basamaklı tepe noktası oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve diğ. (2019), esnek poliüretan köpüğün büzülme ve yanma davranışını belirlemek için çalışma yapmışlardır. 30 kg/m^3 yoğunluğundaki köpüğün büzülme mekanizması için kritik ısı akısının 13 kW/m^2 olduğunu tespit etmişlerdir. Konik kalorimetre deneylerini 22 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 50 kW/m^2 ve 60 kW/m^2 ısı akılarında yapmışlardır. Isı akısı azaldıkça köpüğün tutuşma süresinin arttığı (TTI) ve maksimum ısı yayılım hızının azaldığı, kritik ısı akısının üzerinde ısı akısı artışına paralel olarak büzülme oranının arttığı bildirilmiştir.

Xu ve Fang (2013), poliüretan alüminyum kompozit malzemenin yanma davranışını belirlemek için çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 25 kW/m^2 , 30 kW/m^2 , 35 kW/m^2 , 40 kW/m^2 , 45 kW/m^2 ve 50 kW/m^2 ısı akılarında yapmışlardır. Konik kalorimetre testlerinden elde ettikleri ısı yayılım hızı (HRR), CO, CO₂ ve O₂ emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Isı akısı arttıkça (25 kW/m^2 hariç)

maksimum ısı yayılım hızının (PHRR), CO ve CO₂ emisyonlarının arttığı, O₂ emisyonunun ise azaldığı belirtilmiştir.

Chen ve diğ. (2019), yeni fosfor-azot içerikli karbonlaştırıcı ajan olan poli (1,3-diaminopropan-1,3,5-triazin-o-bisiklik pentaeritritol fosfat) (PDTBP) maddesi sentezleyerek bu maddeyi ham HDPE ve APP ile harmanlayarak yeni bir kompozit malzeme elde etmişlerdir. Ham HDPE'ye kütlece % 30 oranında APP/PER 3:1 ve APP/PDTBP 2:1 ekleyerek malzemelerin yanma davranışlarını incelemişlerdir. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m² ısı akısında yapmışlardır. Her iki alev geciktiricili malzeme ile ham HDPE'nin konik kalorimetre sonuçlarını karşılaştırdıklarında alev geciktirici ilavesinin maksimum ısı yayılım hızı (PHRR) ile toplam ısı yayılımını (THR) düşürdüğü ve yangın performans indeksi (FPI) ile kalan madde miktarını artırdığı bildirilmiştir. APP/PDTBP ilavesinin APP/PER ilavesine göre daha iyi bir alev geciktirici özellik sağladığı belirtilmiştir.

Li ve diğ. (2021), polioksometalat bazlı iyonik sıvı katkılı sepiyolit (SEP-PIL) maddesini sentezlemişler ve amonyum polifosfat-pentaeritritol ilaveli yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE-APP/PER 3:1) kompozitine ekleyerek oluşan yeni malzemenin yanma davranışlarını belirlemek için çalışma yapmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m² ısı akısında gerçekleştirmişlerdir. Ham HDPE, kütlece % 25 APP/PER (3:1) içeren HDPE kompoziti ve kütlece % 24 APP/PER (3:1) ile kütlece %1 SEP-PIL içeren HDPE kompozit malzemesinin konik kalorimetre sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Her iki alev geciktiricili sistemin ham HDPE'ye göre maksimum ısı yayılım hızı (PHRR) ile toplam ısı yayılımını (THR) düşürdüğü ve yangın performans indeksi (FPI) ile kalan kütle miktarını artırdığını belirtmişlerdir. SEP-PIL ilaveli HDPE kompozitinin, APP/PER ilaveli HDPE kompozitine göre daha düşük PHRR ve THR değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca alev geciktirici ilavesinin CO ve CO₂ emisyonlarını azalttığı da rapor edilmiştir.

Li ve diğ. (2019), polipropilene klasik kabaran alev geciktirici olan amonyum polifosfat-pentaeritritol (APP/PER) ve ferrosen bazlı polimer (PDPFDE) ekleyerek yanma davranışlarını araştırmışlardır. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m² ısı akısında yapmışlardır. Kütlece % 23 APP/PER (3:1) içeren PP kompoziti ile kütlece % 22,5 APP/PER (3:1) ve kütlece % 0,5 PDPFDE içeren PP kompozitinin konik kalorimetre sonuçlarını ham PP ile karşılaştırmışlardır. İki farklı alev geciktiricili

sistemin de toplam ısı yayılımını (THR), maksimum ısı yayılım hızını (PHRR), CO ve CO₂ emisyonlarını düşürdüğü ve yangın performans indeksi ile kalan kütle miktarını artırdığı bildirilmiştir.

Lai ve diğ. (2015), silikon içerikli makromoleküler karbonlaştırıcı ajan (Si-MCA) sentezlemişler ve amonyum polifosfat (APP) ile ham polipropilene ekleyerek oluşan yeni kompozit malzemenin yanma davranışlarını incelemişlerdir. Konik kalorimetre testlerini 35 kW/m² ısı akısında yapmışlardır. Kütlece % 25 APP/PER (3:1) ve kütlece % 25 APP/Si-MCA (3:1) içeren polipropilen kompozitleri ile ham polipropilenin konik kalorimetre sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Ham PP'ye kıyasla her iki kabaran alev geciktiricili polipropilen kompozitinin maksimum ısı yayılım hızı (PHRR) ile toplam ısı yayılımının azaldığı (THR) ve kalan kütle miktarının arttığını bildirmişlerdir.

3. POLİMER MALZELERİN YANMA MODELLEMESİ

Konik kalorimetrede malzemelerin yanma olayının modellenmesi için FDS (Fire Dynamics Simulator) programı kullanılmıştır. Bu bölümde bu program hakkında bilgiler verilmektedir (McGrattan ve diğ. 2020^a, McGrattan ve diğ. 2020^b).

3.1 FDS (Fire Dynamics Simulator) Programı

FDS özellikle yanma olaylarının modellenmesi için Fortran dilinde geliştirilmiş kullanımı serbest bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği programıdır. Programın ilk sürümü Şubat 2000’de yayınlanmıştır. Günümüze kadar program sürekli geliştirilerek güncellenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sürüm FDS 6.7.5’tir.

3.1.1 Hidrodinamik model

FDS programı, Navier-Stokes denklemlerini kullanarak sayısal çözüm yapmaktadır. Bu çözümü yaparken düşük hızlı ve ısı olarak tahrik edilen bir akış alanı kullanır. Yanma sırasında oluşan ısı taşınımı ve is özellikleri üzerinde durur. FDS’nin sayısal çözüm yaparken kullandığı üç korunum denklemleri olan kütle, momentum, enerji ile ideal gaz denklemi aşağıda verilmiştir.

Kütlenin korunumu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3.1)$$

burada, $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ zamana bağlı yoğunluk değişimini, $\nabla \cdot \rho \mathbf{u}$ ise kütle taşınımını göstermektedir. $\mathbf{u}$ ise üç bileşenli (u, v, w) hızı belirtmektedir.

Momentum korunumu:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3.2)$$

burada, $\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ momentum değişimini, $\nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u}$ momentum akısını, ∇p ise basınç kuvvetini belirtir. ρ yoğunluğu, g yerçekimi ivmesini, $\mathbf{f}_b$ Lagrangian parçacıklarından kaynaklanan momentum değişiminin kuvvetini belirtir ve $\nabla \cdot \tau_{ij}$ ise viskoz gerilimleri temsil etmektedir.

Enerjinin korunumu:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (3.3)$$

burada, h_s hissedilebilir entalpiyi, $\frac{D\bar{p}}{Dt}$ basıncı belirtmektedir. $\dot{q}'''$ birim hacim başına düşen ısı yayılma oranını, $\dot{q}_b'''$ küçük ölçekli damlacıklar ve parçacıklara transfer edilen enerjiyi, $\nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}''$ iletken, difüzyon ve ışıma ısı akılarını belirtir.

İdeal gaz denklemi:

$$p = \frac{\rho R T}{M} \quad (3.4)$$

burada, p basıncı, ρ yoğunluk, R universal gaz sabiti, T sıcaklık ve M ise moleküler kütle belirtir.

3.1.2 Yanma modeli

FDS, birçok uygulamada hava, yakıt ve ürünleri tek kademede karışım oranına dayalı bir yanma modeli kullanır. Aşağıda yanma reaksiyonunun en genel hali verilmiştir.



burada, $\nu_Y, \nu_O, \nu_{\bar{U},i}$ sırayla yakıt, oksijen ve ürünler için yanma sürecinde gerekli stokiyometrik katsayılarıdır. Yakıt ve oksijen için kütle tüketim oranını belirten denklem aşağıda verilmiştir (McGrattan 2006).

$$\frac{\dot{m}_Y'''}{\nu_Y M_Y} = \frac{\dot{m}_O'''}{\nu_O M_O} \quad (3.6)$$

burada, $\dot{m}_Y'''$ ve $\dot{m}_O'''$ kütle tüketim oranını, M_Y ve M_O ise moleküler kütleleri gösterir.

Yakıt akımından meydana gelen bilinen bir noktadaki malzeme oranını belirten nicelik karışım oranı olarak adlandırılan Z değeri denklem (3.7) ile hesaplanmaktadır (McGrattan 2006).

$$Z = \frac{sY_Y - (Y_O - Y_O^\infty)}{sY_Y^I + Y_O^\infty} \quad (3.7)$$

burada, s ($\frac{\nu_O M_O}{\nu_Y M_Y}$) oksijen tüketiminin yakıt tüketimine oranını, Y_Y yakıtın kütle oranını, Y_O oksijenin kütle oranını, Y_O^∞ ortamdaki oksijenin kütle oranını, Y_Y^I yakıt içindeki yanabilen maddenin oranını belirtir (McGrattan 2006).

3.1.3 Piroliz modeli

FDS, katı ve sıvıların pirolizini tanımlarken çeşitli yollar kullanır. Katı faz pirolizini modellerken, katı faz sıcaklığı için tek boyutlu ısı iletim denklemi kullanılır. Bu denklem aşağıda verilmiştir.

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}_s''' \quad (3.8)$$

burada, ρ_s katının yoğunluğunu, c_s özgül ısısını, k_s ısı iletim katsayısını, T_s katı faz sıcaklığını, t zamanı ve $\dot{q}_s'''$ ise hacimsel ısı kaynağını belirtir.

Piroliz modelde, bir malzeme bileşeninin uğradığı reaksiyon sonucundaki reaksiyon hızını belirlemek için aşağıdaki denklem kullanılır.

$$r_{ij} = A_{ij} \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s(0)}} \right)^{n_{s,ij}} \exp \left(\frac{E_{ij}}{RT_s} \right) \max[0, S_{thr,ij}(T_s - T_{thr,ij})]^{n_{t,ij}} \quad (3.9)$$

burada, r_{ij} reaksiyon hızını, A_{ij} frekans faktörü, $\rho_{s,i}$ malzeme bileşeninin yoğunluğunu, $\rho_{s(0)}$ malzemenin başlangıç yoğunluğunu, $n_{s,ij}$ reaksiyon sırasını, E_{ij} aktivasyon enerjisini, R universal gaz sabitini (8.314×10^{-3} kJ/mol K), T_s katı faz sıcaklığını, $S_{thr,ij}$ eşik yönü, $T_{thr,ij}$ eşik sıcaklığı ve $n_{t,ij}$ ise eşik sıcaklığa göre 0 veya 1 olarak tanımlanabilen eşik indeksidir.

3.2 FDS Girdi Dosyasındaki Genel Tanımlamalar

Dosyayı oluştururken ilk olarak, HEAD isim listesi grubu ile dosyaya bir isim verilir. TIME isim listesi grubu ile simülasyon süresi, MISC isim listesi grubu ile diğer değişkenler belirlenir. Gaz fazı yanma tepkimesi REAC isim listesi grubuyla hazırlanır. Radyasyon modeli RADİ ile düzenlenir. Hesaplama alanını belirlemek için MESH isim listesi grubu kullanılır. Akış alanının bazı başlangıç koşulları INIT isim listesi grubuyla belirlenir.

Malzemelerin özellikleri için MATL, ekstra gaz türlerinin özellikleri için SPEC, Lagrangian parçacıklarının özellikleri için PART ve sınır koşullarının türleri için SURF isim listesi gruplarından yararlanılır. Malzeme geometrisinin tanımı, sınır koşulları belirlenmesi OBST, VENT ve HOLE isim listesi grupları yardımıyla gerçekleştirilir. PROP, DEVC ve CTRL isim listesi grupları vasıtasıyla otomasyon ve kontrol mantığı belirlenir.

Çıktı türlerini belirlemek için PROF, SLCF, BNDF, ISOF ve DUMP isim listesi grupları kullanılır. Programın bittiğini belirtmek için en sona TAIL yazılır. Girdi dosyası oluşturulurken bu komutlardan hangileri gerekliyse onlar kullanılır.

3.2.1 HEAD isim listesi grubu

HEAD isim listesi grubu, girdi dosyasının isminin verildiği yerdir. Burada iki parametre vardır. Bunlar CHID ve TITLE'dir. Örnek bir satır aşağıda verilmiştir.

```
&HEAD CHID='PP_1', TITLE='PP 35 kW/m2' /
```

CHID, karakter kimliği demektir. CHID'de nokta ya da boşluk kullanılmaz. 50 karaktere kadar isim yazılabilir.

TITLE, simülasyon hakkında bilgi verilen bölümdür. 256 karaktere kadar açıklama yazılabilir.

3.2.2 TIME isim listesi grubu

TIME, simülasyon süresinin belirtildiği yerdir. TIME grubu içinde T_END parametresinde simülasyon süresi saniye (s) cinsinden tanımlanır. Örnek satır aşağıda verilmiştir.

```
&TIME T_END=1000./
```

3.2.3 MISC isim listesi grubu

Herhangi bir kategoriye girmeyen girdi değişkenlerin belirtildiği gruptur. TMPA (ortam sıcaklığı), HUMIDITY (ortamın bağıl nemi), Y_O2_INFTY (ortamdaki kütlece oksijen oranı), Y_CO2_INFTY (ortamdaki kütlece karbondioksit oranı) gibi. Örnek satır aşağıda verilmiştir.

```
&MISC TMPA=25./
```

3.2.4 REAC grubu

Yanma reaksiyonu ile ilgili parametrelerin belirtildiği gruptur. Bu grup içinde FUEL, ID, C, H, O, N, CO_YIELD, SOOT_YIELD gibi değişkenler vardır.

FUEL, reaksiyon için gerekli yakıt türlerinin belirtildiği yerdir.

C, H, O ve N, yakıt türlerinin kimyasal formülünün belirtildiği yerdir. Burada tanımlanan bütün sayılar pozitifdir.

CO_YIELD, yakıt kütlelerinin karbonmonoksit dönüştüğü kısımdır. Bu değişken sadece basit kimya modelinde uygulanır.

SOOT_YIELD, yakıt kütlelerinin is partikülüne dönüştüğü kısımdır. Bu değişken sadece basit kimya modelinde uygulanır.

REAC grubu ile ilgili örnek satır aşağıda verilmiştir.

&REAC FUEL='propilen', C=3, H=6, SOOT_YIELD=0.06/

3.2.5 RADI isim listesi grubu

RADI, radyasyon çözücüyle ilişkili değişkenleri barındıran isim listesi grubudur. Girdi dosyasında sadece bir RADI satırı olabilir. RADI grubu içinde birçok değişken vardır. Bunlardan bazıları; RADTMP, NUMBER_RADIATION_ANGLES, TIME_STEP_INCREMENT, ANGLE_INCREMENT'dir. Örnek bir RADI grubu satırları aşağıda verilmiştir.

```
&RADI RADTMP=...  
NUMBER_RADIATION_ANGLES = ...  
TIME_STEP_INCREMENT=...  
ANGLE_INCREMENT=... /
```

3.2.6 MESH isim listesi grubu

FDS hesaplamaları ağ olarak adlandırılan doğrusal hacimlerden oluşan bir alan içinde gerçekleştirilmelidir. MESH hesaplama alanını belirten isim listesi grubudur. MESH grubu içinde de birçok değişken vardır. Bunlardan en çok kullanılanlar IJK ve XB değişkenleridir.

Bir ağ içinde koordinat sistemi sağ el kuralına göre ayarlanır. Hesaplaması yapılacak alanın başlangıç ve bitiş noktaları XB'de tanımlanır. IJK değişkeninde ise hücreler tek tip olacak şekilde yani birim hücreler halinde bölünmüştür. Aşağıda örnek bir MESH satırı verilmiştir.

&MESH IJK=10, 10, 15, XB = -0.1, 0.1, -0.1, 0.1, 0.0, 0.3 /

3.2.7 INIT isim listesi grubu

Akış alanındaki bazı başlangıç koşullarına INIT isim listesi grubunda yer verilir. Bir girdi dosyasında birden çok INIT satırı bulunabilir. Aşağıda INIT grubuyla ilgili örnek verilmiştir.

```
&INIT XB=0.11, 0.22, 0.11, 0.22, 0.0, 0.1,  
MASS_FRACTION (1) =0.21, SPEC_ID (1) ='OXYGEN',
```

3.2.8 MATL isim listesi grubu

Malzeme özellikleri MATL isim listesi grubunda tanımlanır. Girdi dosyasındaki her MATL ile SURF arasında bağlantı kurabilmek için MATL_ID değişkeni vasıtasıyla bir isim verilir. MATL grubu içinde birçok değişken vardır. Aşağıda MATL grubuyla ilgili bir bölüm örnek verilmiştir.

```
&MATL ID='PP'  
ABSORPTION_COEFFICIENT=966.  
N_REACTIONS=1  
A (1) = 4.3E15  
E (1) = 246000  
EMISSIVITY=0.96  
DENSITY=838.  
SPEC_ID='propilen'  
NU_SPEC=1.  
HEAT_OF_REACTION=2000.  
CONDUCTIVITY=0.24  
SPECIFIC_HEAT=2.25 /
```

Her malzeme için yukarıda verilen örnekteki değişkenlerden bazıları olabilir ya da olmayabilir. Bu örnekte verilen değişkenler hakkında bilgi Tablo 3.1'de verilmiştir.

3.2.9 SPEC isim listesi grubu

FDS dosyasında gaz türünü belirtmek için SPEC isim listesi grubu kullanılır. SPEC grubunda belirtilen gaz türü bir veya birden fazla olabilir. SPEC kullanarak belirtilen gaz türleri en fazla 20 olabilir. Aşağıda SPEC grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&SPEC ID='NITROGEN'/  
&SPEC ID='OXYGEN'/  
&SPEC ID='METHANE'/  
&SPEC ID='PROPANE'/  
&SPEC ID='CARBON DIOXIDE'/
```

Tablo 3.1: Malzeme özelliklerini belirten değişkenler.

Malzeme özelliklerini belirten değişkenler	Birim	Açıklama
ABSORPTION_COEFFICIENT	1/m	Absorpsiyon katsayısıdır.
N_REACTIONS	-	Reaksiyon sayısını belirtir.
A	s ⁻¹	Arrhenius frekans faktörü. TGA analizleri sonucunda elde edilir.
E	kJ/kmol	Aktivasyon enerjisi. TGA analizleri sonucunda elde edilir.
EMISSIONIVITY	-	Yayıcılık. Bir malzeme yüzeyinin göreceli olarak radyasyon ile enerji yaymasıdır. 0 ile 1 arasında değer alır. Bu değerler literatürden bulunabilir.
DENSITY	kg/m ³	Yoğunluk. Numunenin boyutları ve kütlesi ölçülerek elde edilir.
SPEC_ID	-	Gaz türünü belirtmek için kullanılır.
NU_SPEC	-	Reaksiyondaki gazlaşmış ürün miktarının veriminin belirtildiği kısımdır.
HEAT_OF_REACTION	kJ/kg	Reaksiyon ısısı. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ya da TG/DTA testleri sonucu elde edilir.
HEAT_OF_COMBUSTION	kJ/kg	Yanma ısısı. Mikro Ölçekli Yanma Kalorimetresi (MCC) ya da konik kalorimetre testleri sonucu elde edilir.
CONDUCTIVITY	W/m. K	Isı iletim katsayısı. Numune için yapılan ölçümlerden veya literatürden bulunabilir.
SPECIFIC_HEAT	kJ/kgK	Özgül ısı. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testleri sonucu elde edilir.

3.2.10 PART isim listesi grubu

PART isim listesi grubunda, değişik türlerdeki Lagrangian partiküllerinin özellikleri tanımlanır. Aşağıda PART grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&PART ID='...', SPEC_ID='...',
QUANTITIES (1:2) ='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE
TEMPERATURE', DIAMETER=..., SAMPLING_FACTOR=... /
```

3.2.11 SURF isim listesi grubu

Malzemelerin sınır koşullarının belirlendiği bölümdür. Aşağıda SURF grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&SURF ID='PP SLAB'  
COLOR='WHITE'  
HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=0.0  
BACKING='INSULATED'  
MATL_ID='PP'  
THICKNESS=0.006  
EXTERNAL_FLUX=35 /
```

3.2.12 OBST isim listesi grubu

OBST, hesaplama alanındaki engelleri tanımlamak için kullanılan isim listesi grubudur. FDS dosyasında tanımlanan her bir OBST satırı dikdörtgen bir katının koordinatlarını belirtir. Engelin yüzeyleri için gerekli sınır koşulları OBST satırı içinde SURF_ID veya SURF_IDS değişkenleri vasıtasıyla belirtilir. Aşağıda OBST grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&OBST XB=-0.05, 0.05, -0.05, 0.05, 0.00, 0.06, SURF_ID='PP' /
```

3.2.13 VENT isim listesi grubu

Engellere veya dış duvarlara bitişik düzlemleri tanımlamak için VENT isim listesi grubu kullanılır. Havalandırma değişkenlerini belirtir. Aşağıda VENT grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir. Burada XB altı noktadan (koordinat) oluşan katı yüzeye bitişik bir düzlem belirtmektedir. Bu koordinatlardan ikisi aynı olmalıdır. Katı yerine bir düzlem belirtmelidir. Dış duvarları belirlemek için XB yerine MB kullanılır. MB; XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, ZMIN, ZMAX düzlemlerini belirtir.

```
&VENT MB = 'XMIN', SURF_ID = 'OPEN' /  
&VENT MB = 'XMAX', SURF_ID = 'OPEN' /  
&VENT MB = 'YMIN', SURF_ID = 'OPEN' /  
&VENT MB = 'YMAX', SURF_ID = 'OPEN' /  
&VENT MB = 'ZMIN', SURF_ID = 'OPEN' /  
&VENT MB = 'ZMAX', SURF_ID = 'OPEN' /
```

3.2.14 HOLE isim listesi grubu

Mevcut bir veya birkaç engel üzerinde delik oluşturmak için HOLE isim listesi grubundan yararlanılır. Aşağıda HOLE grubuyla ilgili örnek satır verilmiştir.

```
&HOLE XB=0.4,1.0,0.1,0.4,0.5,1.0 /
```

3.2.15 DEVC isim listesi grubu

Yağmurlama sistemleri (sprinkler), duman dedektörleri, ısı akısı göstergeleri, termokupllar (ısı çifti) gibi FDS’de kendilerine tanımlanan özelliklere göre çalışan cihazlardır. Tüm bu cihazlar DEVC isim listesi grubuyla belirlenir. Aşağıda DEVC grubuyla ilgili örnek satır verilmiştir.

```
&DEVC XYZ=5.0,5.6,3.3, PROP_ID='Yagmurlama', ID='Ymr' /
```

3.2.16 PROP isim listesi grubu

Bir simülasyondaki birden fazla cihazın özellikleri belirlemek için PROP isim listesi grubu kullanılır. PROP satırları isimleri farklı olacak şekilde tanımlanır ve DEVC satırında PROP_ID ile çağrılır. Aşağıda PROP grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&SPEC ID='....' /  
&PART ID='...', DIAMETER=..., SPEC_ID='...'/  
&PROP ID='...', QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',  
RTI=..., C_FACTOR=...,ACTIVATION_TEMPERATURE=...,  
OFFSET=..., PART_ID='...', FLOW_RATE=...,  
PARTICLE_VELOCITY=..., SPRAY_ANGLE=...,  
SMOKEVIEW_ID='...'/  
&DEVC ID='...', XYZ=..., PROP_ID='...' /
```

3.2.17 DUMP isim listesi grubu

DUMP, çıktı dosyalarının yazılma sınıfını ve bu dosyalar ile ilişkili diğer genel değişkenleri barındıran isim listesi grubudur. Aşağıda DUMP grubuyla ilgili örnek

satır verilmiştir. Burada DT_DEVC çıktı sonuçlarını belirlenen sayı aralıklarıyla kaydeder. SIG_FIGS ise “csv” uzantılı dosyadaki virgülden sonraki sayı basamağını belirlemek için kullanılır.

```
&DUMP DT_DEVC=2., SIG_FIGS=6 /
```

3.2.18 PROF isim listesi grubu

FDS, bir katıdaki ısı iletimi ve reaksiyonları hesaplarken sınır hücrelerinde hassas tek boyutlu sistem kullanır. Aşağıda PROF grubuyla ilgili örnek satır verilmiştir.

```
&PROF ID='T2', XYZ=..., QUANTITY='S', IOR=3 /
```

3.2.19 SLCF isim listesi grubu

Birçok gaz fazı niceliklerini birden fazla noktada kaydetmek için SLCF isim listesi grubu kullanılır. Aşağıda SLCF grubuyla ilgili örnek satır verilmiştir.

```
&SLCF PBY=1.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION',  
SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' /  
&SLCF PBY=1.0, QUANTITY='VOLUME FRACTION',  
SPEC_ID='OXYGEN' /
```

3.2.20 BNDF isim listesi grubu

Tüm katı engellerde yüzey niceliklerini kaydetmek için BNDF isim listesi grubu kullanılır. SLCF grubundaki gibi istenilen her nicelik farklı satırlarda belirtilir. Aşağıda BNDF grubuyla ilgili örnek satırlar verilmiştir.

```
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /  
&BNDF QUANTITY='GAUGE HEAT FLUX' /  
&BNDF QUANTITY='BURNING RATE' /  
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX' /
```

3.2.21 ISOF isim listesi grubu

Gaz fazı sayısal miktarının üç boyutlu animasyonlu konturlar oluşturmak için ISOF isim listesi grubu kullanılır. Aşağıda ISOF grubuyla ilgili örnek satır verilmiştir.

&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE (1) =..., VALUE (2) =...,
VALUE (3) =... /



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kullanılan Hammaddeler

Tez çalışmasında, rijit poliüretan köpük (PUR), polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) kullanılmıştır. PP ve HDPE malzemeler PETKİM’den temin edilen enjeksiyonla kalıplamaya uygun ve teknik özellikleri Tablo 4.1’de verilen Petoplen MH418 ve Petilen YY I668 ürünlerdir (Url-9). ABS malzeme olarak teknik özellikleri Tablo 4.2’de verilen TERLURAN GP-22 marka ticari ürün kullanılmıştır (Url-13). Rijit poliüretan hammaddeleri (poliol ve izosiyanat) Elastogran BASF firmasının ürünleri olup teknik özellikler Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.1: HDPE ve PP malzemelerinin teknik özellikleri (Url-9).

Özellikler	Metot	Birim	Petilen YY I668	Petoplen MH418
Erime akış hızı (190°C/2,16 kg, 230°C/2,16 kg)	ASTM D1238	g/10 min	5,5	4,7
Yoğunluk, 23°C	ASTM D1505	g/cm ³	0,965	0,905
Ergime noktası, (DSC, 2.ısıtma)	ASTM D3418	°C	134	163
Akmada gerilme dayanımı	ASTM D638	MPa	30	34
Kopmada gerilme dayanımı	ASTM D638	MPa	17	-
Kopmada uzama	ASTM D638	%	1250	-
Bükülme modülü, 23°C	TS EN ISO 178	MPa	1200	1450
İzod darbe dayanımı, 23°C (çentikli)	ASTM D256	J/m	50	22
Sertlik (Shore D)	ASTM D2240	-	66	-
Rockwell sertliği	ASTM D785	R-scale	-	94
Çevresel baskıyla kırılma dayanımı (%10 Igepal, F50)	ASTM D1693	saat	4	-
Vicat yumuşama noktası, 10N	ASTM D1525	°C	124	-
Deformasyon sıcaklığı, 0,45 MPa	ISO 75	°C	-	83

Tablo 4.2: ABS malzemenin teknik özellikleri (Url-13)

Özellikler	Metot	Birim	ABS
Erime akış hızı (220°C/10 kg)	ISO 1133	cm ³ /10 min	19
Yoğunluk	ISO 1183	kg/m ³	1040
Akmada gerilme dayanımı	ISO 527	MPa	45
Bükülme modülüsü, 23°C	ISO 527	MPa	2300
İzod darbe dayanımı, 23°C (çentikli)	ISO 180/A	kJ/m ²	26
Vicat yumuşama noktası, VST/A/10 (10N, 50°C/h)	ISO 306	°C	105

Tablo 4.3: Poliöl ve izosiyanatın teknik özellikleri (BASF Group, 2014).

	Poliöl (Elastopor H 2011/4)	İzosiyanat (PMDI)
Yoğunluk (g/cm ³) (25°C’de)	1,13	1,23
Viskozite (mPa.s) (25°C’de)	240	210
NCO oranı (%)	-	31,5

Kabaran alev geciktirici (IFR) sentezinde kullanılan amonyum polifosfat (APP) Exolit AP 423, Türkiye Clariant firmasından ve pentaeritritol (PER) ise Marmara Kimya firmasından temin edilmiştir.

4.2 Numune Üretimleri

Ham PUR, PP, HDPE ve ABS numune üretimleri yanında PP ve HDPE malzemelere kütlece % 25 IFR (kabaran alev geciktirici) ilave edilerek kompozit malzeme numune üretimleri de gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 PUR numune üretimleri

Rijit poliüretan köpük üretiminde alüminyum alaşımından üretilmiş kalıplar kullanılarak elle üretim yöntemi uygulanmıştır. Üretimde, izosiyanat/poliöl oranı üretici firma tavsiyesi ile 120/100 olarak uygulanmıştır. Poliöl ve izosiyanat, mekanik karıştırıcı ile 3000 min⁻¹’de 15 s süreyle karıştırma silindiri içerisinde karıştırılmış ve ardından kalıba dökülmüştür. Kapağı kapatılan kalıp, alttan ve üstten ısıtmalı hidrolik pres altında 30 dakika köpürmeye bırakılmıştır. Daha sonra kalıp hidrolik presten alınarak köpük malzeme kalıp içerisinde çıkarılarak test boyutlarında kesilmiştir.

4.2.2 PP ve HDPE granüllere IFR ilave edilmesi

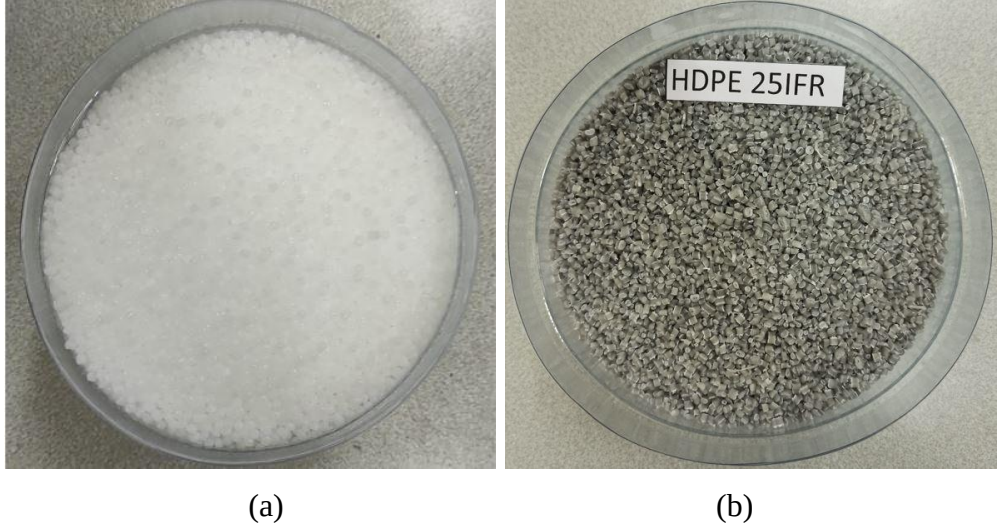
Kabaran alev geciktirici (IFR), k t lece 3 birim amonyum polifosfat (APP) ve 1 birim pentaeritritol (PER) olacak şekilde hazırlanmıştır. PP ve HDPE granüllere k t lece % 25 oranında IFR ilavesinin homojen bir şekilde yapılabilmesi için Erciyes Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'nde yer alan Gülnar Makina GM-TWIN 16/40 marka çift vidalı ekstruder kullanılmıştır. Şekil 4.1'de hizmet alımı yapılan çift vidalı ekstruder gösterilmiştir.



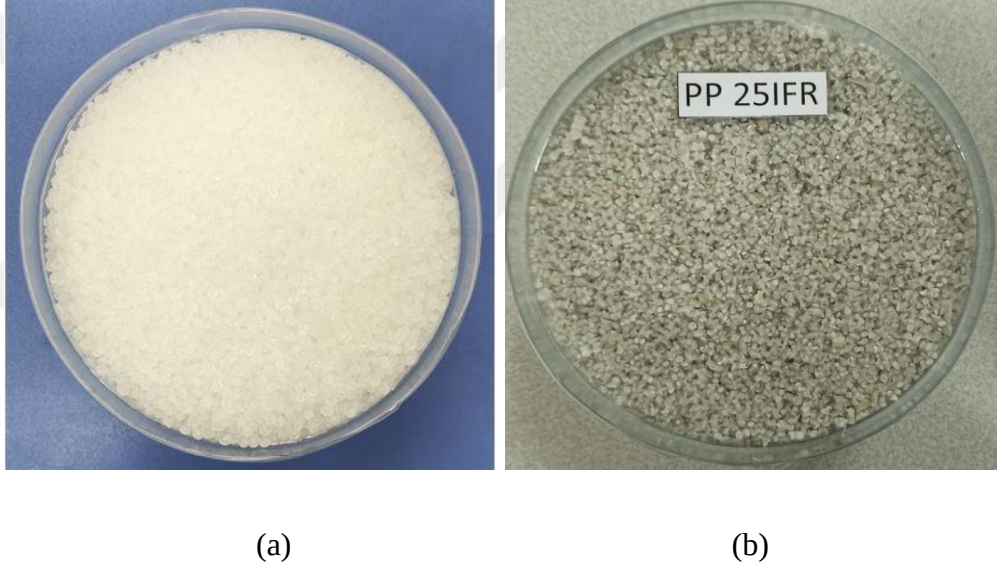
Şekil 4.1: Çift vidalı ekstruder cihazı.

Çift vidalı ekstruder malzeme girişinden çıkışına kadar 6 ısıtma bölgesine sahiptir. % 25 IFR'nin HDPE granüllere homojen ilavesi için bu ısıtma bölgeleri sırayla 35  C, 170  C, 180  C, 185  C, 180  C ve 170  C sıcaklıklar olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.2'de ham HDPE ve çift vidalı ekstruderde hazırlanan IFR ilaveli HDPE granülleri gösterilmiştir.

% 25 IFR'nin PP granüllere homojen ilavesi için ısıtma bölgelerinin sıcaklıkları ise sırasıyla 40  C, 170  C, 180  C, 190  C, 180  C ve 170  C olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.3'te ham PP ve çift vidalı ekstruderde hazırlanan IFR ilaveli PP granülleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2: (a) Ham HDPE granülleri, (b) IFR ilaveli HDPE granülleri



Şekil 4.3: (a) Ham PP granülleri, (b) IFR ilaveli PP granülleri

4.2.3 Plastik enjeksiyon makinesinde numune üretimleri

Ham granüller ve çift vidalı ekstruderde hazırlanan alev geciktirici ilaveli granüller enjeksiyon kalıplama işlemi yapılmadan önce 60 °C sıcaklıkta ve en az 4 saat olacak şekilde fanlı kurutma fırınında bekletilmiştir (Şekil 4.4). Üretilecek malzemelerde herhangi bir kalıntı ya da kir oluşmaması için kalıp yüzeyleri temizlenmiş ve kalıp ayırıcı olarak silikonlu kalıp ayırıcı kullanılmıştır. Şekil 4.5'te üretimde kullanılan plastik enjeksiyon makinesi gösterilmiştir.



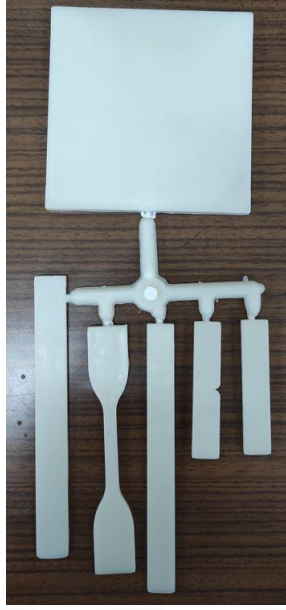
Şekil 4.4: Fanlı kurutma fırını.



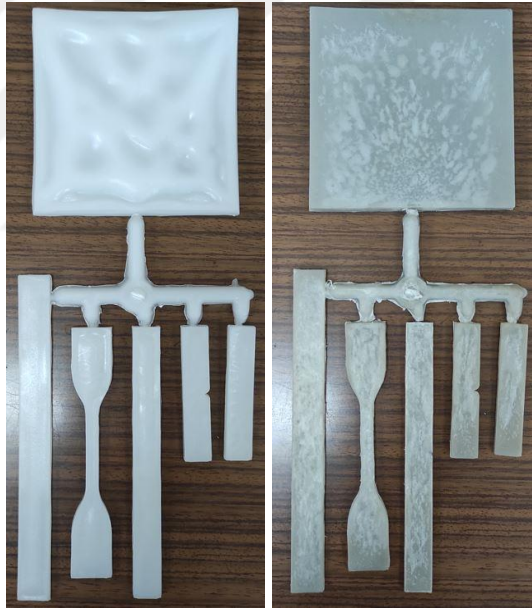
Şekil 4.5: Plastik enjeksiyon makinesi.

Ham ABS granülleri 210-260 °C arasında değişen erime sıcaklığına sahiptir. ABS malzemesi üretilmeden önce ısıtma bölgelerine 4 farklı sıcaklık girilmiştir. Bunlar sırasıyla 210 °C, 220 °C, 225 °C ve 230 °C'dir. Üretilen ABS numuneleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

HDPE granülleri teknik özelliklerde verilen 134 °C erime sıcaklığına sahip olduğu için HDPE malzemesi üretilmeden önce 4 ısıtma bölgesi için sırasıyla 160 °C, 170 °C, 180 °C ve 190 °C sıcaklıklar girilmiştir. Ham HDPE ve IFR ilaveli HDPE (HDPE25IFR) numuneler Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Ham ABS numuneleri.

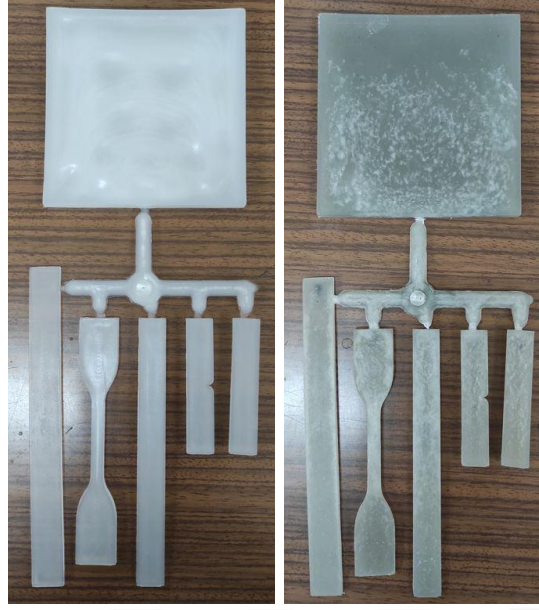


(a)

(b)

Şekil 4.7: (a) Ham HDPE numuneleri, (b) HDPE25IFR numuneleri.

PP granüllerinin teknik özelliklerde verilen erime sıcaklığı $163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. PP malzemesi üretilmeden önce 4 ısıtma bölgesi için sırasıyla $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $195\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklar girilmiştir. Üretilen ham PP ve IFR ilaveli PP (PP25IFR) numuneler Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.8: (a) Ham PP numuneleri, (b) PP25IFR numuneleri.

4.3 Fiziksel, Termal ve Yanma Deneyleri

Testler öncesi numuneler en az 24 saat 23 ± 1 °C sıcaklık ve % 50 ± 5 bağıl neme sahip Nüve TK 252 şartlandırma ünitesinde bekletilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: Şartlandırma ünitesi.

4.3.1 Yoğunluk hesabı

Malzemelerin boyutları ölçülüp hacimleri hesaplanmış ve Şekil 4.10’da gösterilen hassas terazide kütleleri tartılmıştır. Denklem (4.1) kullanılarak malzemelerin yoğunlukları hesaplanmıştır.

$$\rho = m/V \quad (4.1)$$

burada, ρ yoğunluk (kg/m^3), m kütle (kg) ve V hacim (m^3) dir.



Şekil 4.10: Hassas terazi.

4.3.2 Isı iletim katsayısı ölçümü

Malzemelerin ısı iletim katsayıları Şekil 4.11’de gösterilen ASTM C1113/ C1113M – 09 standartlarına uygun olarak Kyoto Electronics (QTM-500) model cihaz yardımıyla belirlenmiştir.

Cihaz sıcak tel metoduna kullanmakta ve PD-11 prob yardımıyla ölçüm yapmaktadır. Her malzemeden 3 adet ölçüm yapılmış ve ortalaması alınıp ısı iletim katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 4.11: Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı

4.3.3 Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TG/DTA)

Şekil 4.12’de gösterilen Perkin Elmer Diamond marka termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz cihazı kullanılarak malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak kütle değişimleri, kütle değişim hızları, ısıl bozunma kinetik parametreleri (E , A) ve reaksiyon ısıları belirlenmiştir. Deneyler 200 ml/min debide yüksek saflıkta azot gazı ortamında, 5 °C/min, 10 °C/min ve 20 °C/min ısıtma hızlarında, 30 °C ile 1000 °C sıcaklık aralığında, seramik numune kapları kullanılarak $10 \pm 0,3$ mg numuneler ile gerçekleştirilmiştir.

Bütün ölçümler cihazın özel paket programı kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Özel paket program, kinetik parametreleri belirlemek için üç farklı ısıtma hızında (5 °C/min, 10 °C/min ve 20 °C/min) çoklu doğrusal regresyon (MLR) yöntemini kullanmaktadır (Url-14).

Her bir malzeme için analiz sonrası önemli sayısal değerler olan % 5, % 10 ve % 50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklıklar (T_{5wt} , T_{10wt} , T_{50wt}), maksimum bozunma sıcaklığı (T_{maks}), maksimum bozunma hızı (R_{maks}) ve 1000 °C’deki kalan kütle miktarı ($m_{1000\text{ °C}}$) değerleri de tespit edilmiştir.



Şekil 4.12: Termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz (TG/DTA) cihazı.

4.3.4 Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC)

Şekil 4.13’te gösterilen Perkin Elmer Pyris 6 DSC model diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı kullanılarak malzemelerin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimleri belirlenmiştir. Testler; 30-400 °C sıcaklık aralığında, 20 ml/min yüksek saflıkta azot ortamında ve 10 °C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13: Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analiz cihazı.

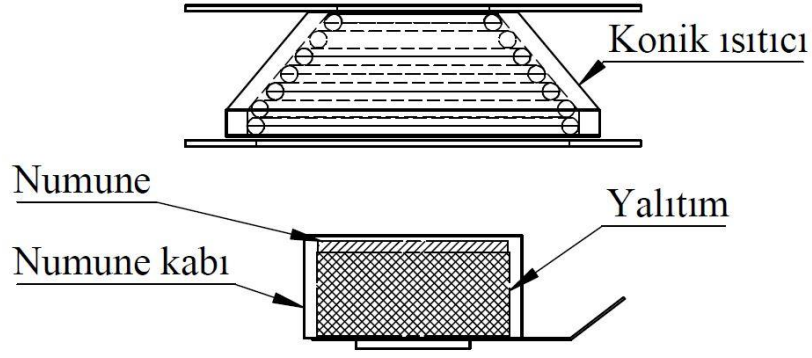
4.3.5 Konik kalorimetre

Konik kalorimetre testi, malzemelerin yanma davranışlarını belirlemek için yaygın olarak kullanılan önemli bir testtir. Tez kapsamında kullanılan ISO 5660 (ISO 5660-1, 2002) ve ASTM E-1354 (ASTM E-1354, 2004) standartlarına uygun konik kalorimetre cihazı Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Bu test ile tutuşma zamanı, ısı yayılım hızı, toplam ısı yayılım değeri, maksimum ısı yayılım değeri, ısı emisyonu, CO, CO₂ ve NO emisyonları, kütle kayıp miktarı ve hızı gibi birçok parametre belirlenebilmektedir.



Şekil 4.14: Konik kalorimetre test cihazı.

Numuneler, konik kalorimetre testleri yapılmadan önce ABS, HDPE, HDPE25IFR, PP ve PP25IFR için 100 mm x 100 mm x 6 mm ve PUR için ise 100 mm x 100 mm x 50 mm boyutlarında hazır hale getirilmiştir. Daha sonra en az 24 saat süre ile 23±1 °C sıcaklık ve %50 ±5 bağıl nem ortamına sahip şartlandırıcıda bekletilmiştir. Deneyler 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında yanma davranışlarını belirlemek için yapılmıştır. Şekil 4.15’te konik kalorimetre testindeki konik ısıtıcı ve numunenin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 4.15: Konik ısıtıcı ve numunenin kesit görünüşü.

Deney sırasında CO, CO₂, NO ve O₂ konsantrasyonları ile kütle kaybı, is ve sıcaklık verileri özel yazılım yardımıyla 1 s aralıklarla kaydedilmektedir. Isı yayılım hızı (HRR), toplam ısı yayılım miktarı (THR), kütle kayıp hızı (MLR) ve etkin yanma ısısı ($\Delta h_{c,eff}$), ASTM E-1354 ve ISO-5660 standartlarına uygun şekilde aşağıda verilen denklemlere göre hesaplanmıştır.

$$HRR = \left(\frac{\Delta h_c}{r_0} \cdot \frac{1}{A_s} \right) \cdot 1,10C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2})}{(1,105 - 1,5X_{O_2})} \quad (4.2)$$

burada, HRR: Isı yayılım hızı (kW/m²)

$$\frac{\Delta h_c}{r_0}: 13,1 \times 10^3 \text{ (kJ/kg)}$$

A_s : Numunenin ısıya maruz kalan alanı (0,008836 m²)

C: Orifis sabiti (kg^{1/2}.m^{1/2}.K^{1/2})

ΔP : Orifisteki basınç farkı (Pa)

T_e : Orifis girişindeki gaz sıcaklığı (K)

$X_{O_2}^0$: Test başlangıcındaki O₂ konsantrasyonu

X_{O_2} : Test sırasında O₂ konsantrasyonu

Kütle kayıp hızının (MLR) ilk iki verisi hesaplanırken denklem (4.3) ve (4.4), ara basamaklardaki veriler hesaplanırken denklem (4.5) ve son iki veriyi hesaplamak için ise denklem (4.6) ve (4.7) kullanılmaktadır.

$$-[\dot{m}]_{i=0} = \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t}, (i=0) \quad (4.3)$$

$$-[\dot{m}]_{i=1} = \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t}, (i=1) \quad (4.4)$$

$$-[\dot{m}]_i = \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t}, (1 < i < n-1) \quad (4.5)$$

$$-[\dot{m}]_{i=n-1} = \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t}, (i=n-1) \quad (4.6)$$

$$-[\dot{m}]_{i=n} = \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t}, (i=n) \quad (4.7)$$

burada, $\dot{m}$: Kütle kayıp hızı (g/s) (MLR)

Δt : Zaman (s)

Etkin yanma ısısı Denklem (4.8)'e göre hesaplanmıştır.

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum \dot{q}(t)\Delta t}{m_s - m_f} \quad (4.8)$$

burada, $\Delta h_{c,eff}$: Etkin yanma ısısı (MJ/kg)

$\dot{q}(t)$: Isı yayılım hızı (kW)

Δt : Zaman (s)

m_s : Numunenin yanmadan önceki kütlesi (g)

m_f : Numunenin yanma sonunda kalan kütlesi (g)

Toplam ısı yayılım miktarı (THR-MJ/m²) deney sonucundan elde edilen HRR değerlerinin integrali alınarak hesaplanmaktadır (Denklem 4.9).

$$THR = \int_a^b HRR(t).dt \quad (4.9)$$

5. DENEYSEL VE MODELLEME SONUÇLARI

5.1 Termogravimetrik Analiz Sonuçları

Malzemelerin termogravimetrik analizleri yüksek saflıkta azot gazı ortamında, 20 °C/min ısıtma hızında, 30 °C ile 1000 °C sıcaklık aralığında, seramik numune kapları kullanılarak $10 \pm 0,3$ mg numuneler ile gerçekleştirilmiş olup sıcaklığa bağlı kütle değişim ve kütle değişim hızları tespit edilmiştir. Analizlerle, % 5, % 10 ve % 50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklıklar ($T_{\%5wt}$, $T_{\%10wt}$, $T_{\%50wt}$), maksimum bozunma sıcaklığı (T_{maks}), maksimum bozunma hızı (R_{maks}) ve 1000 °C'deki kalan kütle miktarı ($m_{1000\text{ °C}}$) değerleri de belirlenmiştir.

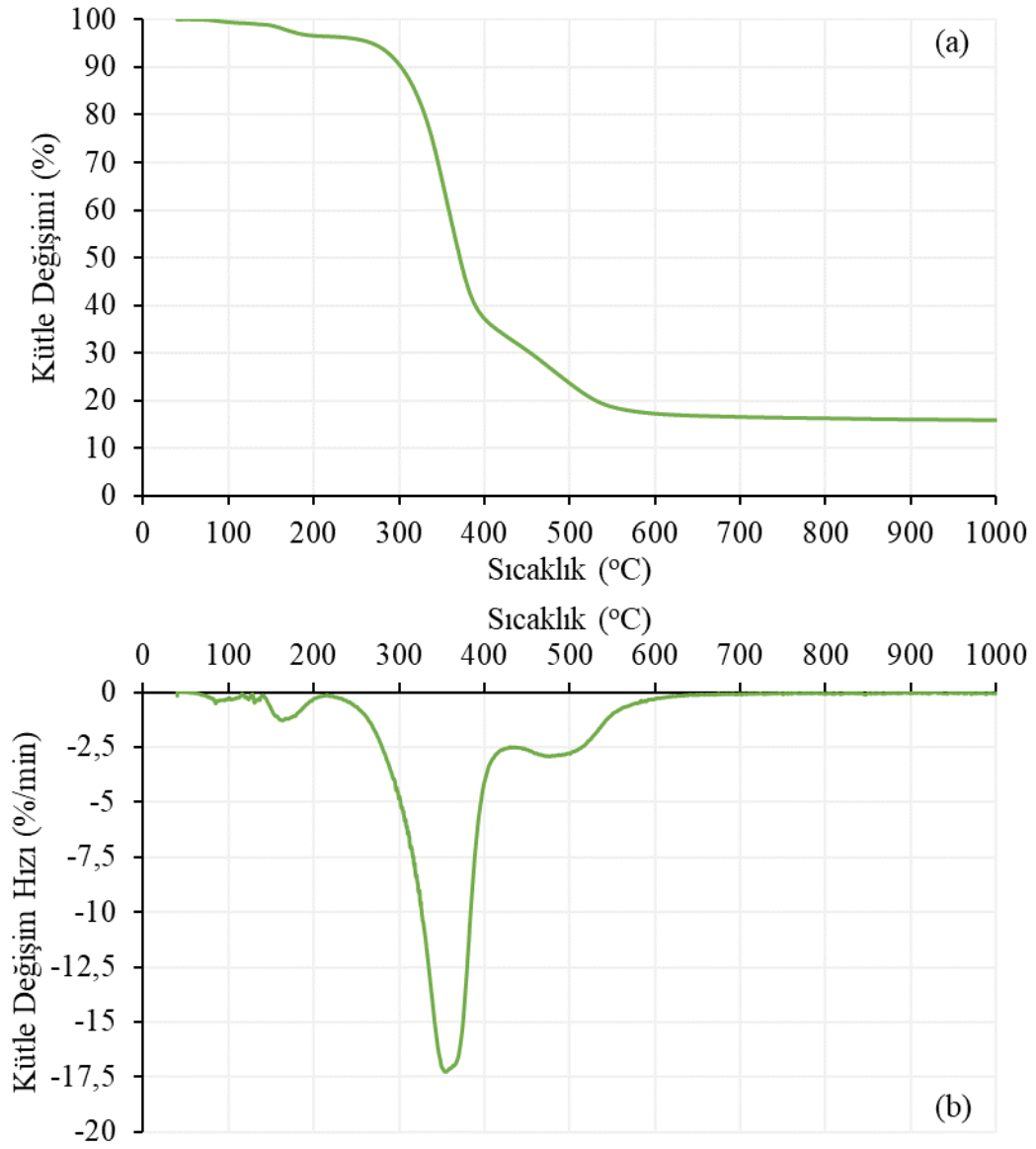
5.1.1 PUR malzemenin termogravimetrik analizi

PUR malzemenin termogravimetrik analizi sonucu elde edilen sıcaklığa bağlı kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.1'de verilmiştir. PUR malzemede nemin 100 °C civarı ayrılması sonrası başlıca 3 basamakta ısıl bozunmanın gerçekleştiği belirlenmiştir (Jiao ve diğ. 2013, Feng ve Qian 2014).

PUR, poliol ve izosiyanatın reaksiyona girmesi sonucu oluşan bir yapıya sahiptir. Birinci basamak yaklaşık 140-220 °C arasında gerçekleşmekte ve bu basamakta ısıl yönden zayıf bağların bozunması ile ısıl bozunma gerçekleşmektedir. İkinci basamak ana bozunma basamağı olup yaklaşık 220-440 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. Bu basamakta maksimum bozunma sıcaklığı 355,2 °C ve maksimum bozunma hızı 17,3 %/min olarak tespit edilmiştir. Isıl bozunmanın son basamağı ise yaklaşık 440 – 700 °C sıcaklık aralığında daha düşük bozunma hızında (2,9 %/min) oluşmuştur. 1000 °C'de kalan kütle miktarı % 15,9 olarak belirlenmiştir. PUR malzemenin özelliğine bağlı olarak karbonlaşmış tabaka oluşumu, termoplastik malzemelere göre daha fazla olmaktadır (Shi ve diğ. 2018).

PUR üretiminde kullanılan poliol ve izosiyanatın özelliklerine, karışım oranlarına ve üretim yöntemine bağlı olarak ısıl bozunma sıcaklık aralıklarında, bozunma hızlarında, kalan kütle miktarlarında değişiklikler görülebilmektedir (Jiao ve

diğ. 2013, Liu ve diğ. 2018, Wu ve diğ. 2019, Zhang ve diğ. 2020). PUR malzemenin ısı bozunmasında önemli sayısal değerler Tablo 5.1’de verilmiştir.



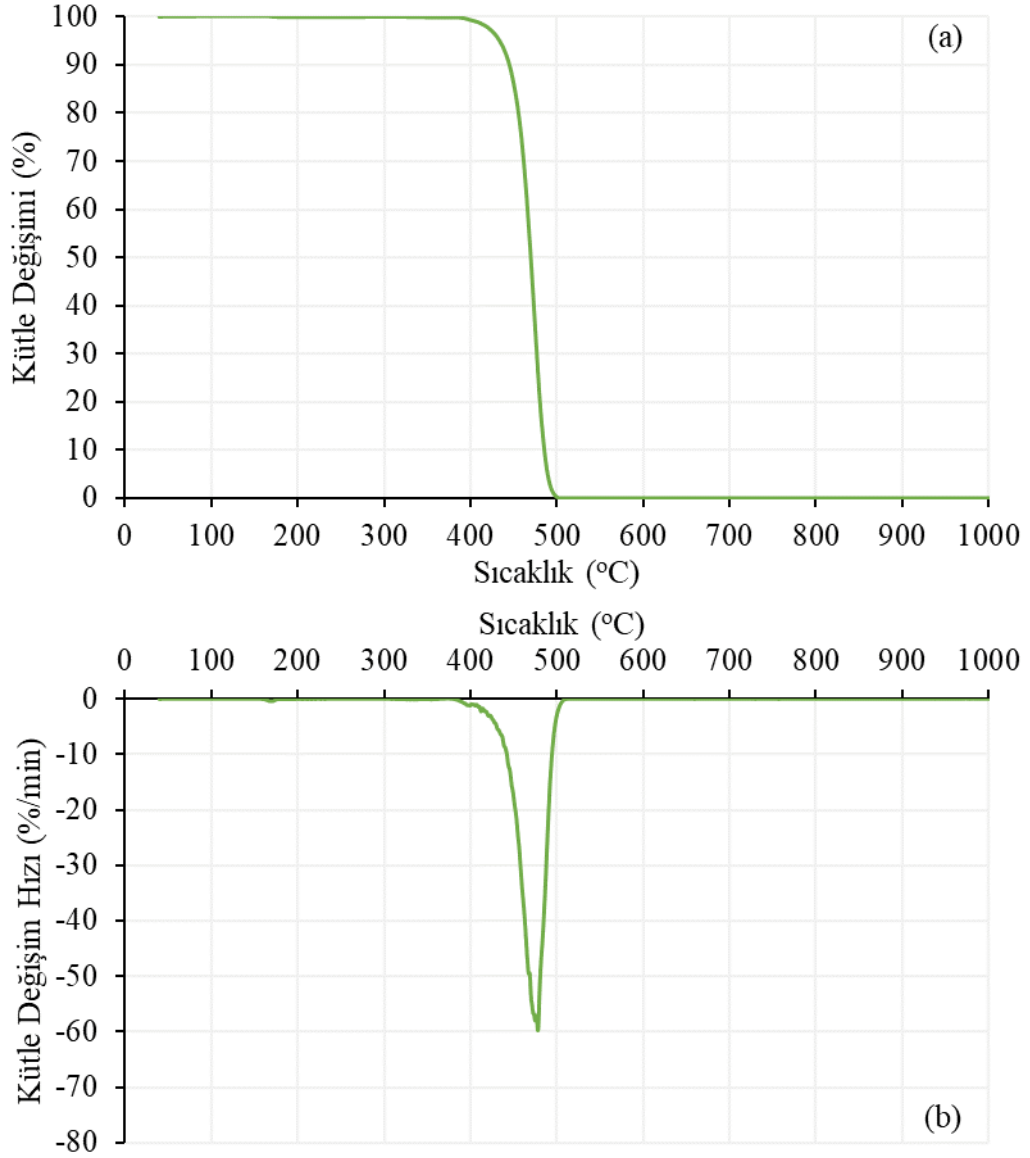
Şekil 5.1: PUR’un (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Tablo 5.1: PUR’un ısı bozunmasında önemli sayısal değerler.

T_{5wt} (°C)	T_{10wt} (°C)	T_{50wt} (°C)	T_{1maks} (°C) R_{1maks} (%/min)	T_{2maks} (°C) R_{2maks} (%/min)	T_{3maks} (°C) R_{3maks} (%/min)	$m_{1000^{\circ}C}$ (%)
268,7	302,4	371,2	163,8 -1,3	355,2 -17,3	476,9 -2,9	15,9

5.1.2 PP malzemenin termogravimetrik analizi

PP malzemenin termogravimetrik analizi sonucu elde edilen kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Analizlerden elde edilen önemli sayısal değerler Tablo 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2: PP’nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Tablo 5.2: PP’nin ısıl bozunmasında önemli sayısal değerler.

T _{5wt} (°C)	T _{10wt} (°C)	T _{50wt} (°C)	T _{maks} (°C)	R _{maks} (%/min)	m _{1000 °C} (%)
433,5	445,0	469,8	478,0	-59,8	0,0

PP malzeme 385 – 510 °C sıcaklık aralığında tek basamakta bozunmuştur (Vahabi ve diğ. 2019). Maksimum bozunma sıcaklığı 478,0 °C ve maksimum bozunma hızı 59,8 %/min olarak ölçülmüştür. % 5 ve % 10 kütle kaybının olduğu sıcaklıklar ise sırasıyla 433,5 °C ve 445,0 °C olarak belirlenmiştir. Maksimum bozunma sıcaklığına gelmeden 469,8 °C’de kütlede % 50 kayıp olduğu tespit edilmiştir. 1000 °C sıcaklıkta kalan kütle olmamıştır (Tang ve diğ. 2018). PP malzemenin özelliklerine bağlı olarak ısı bozunma karakteristiğinde de bazı küçük değişimler literatürde görülmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar literatürle genel olarak uyum içindedir (Cheng ve diğ. 2020).

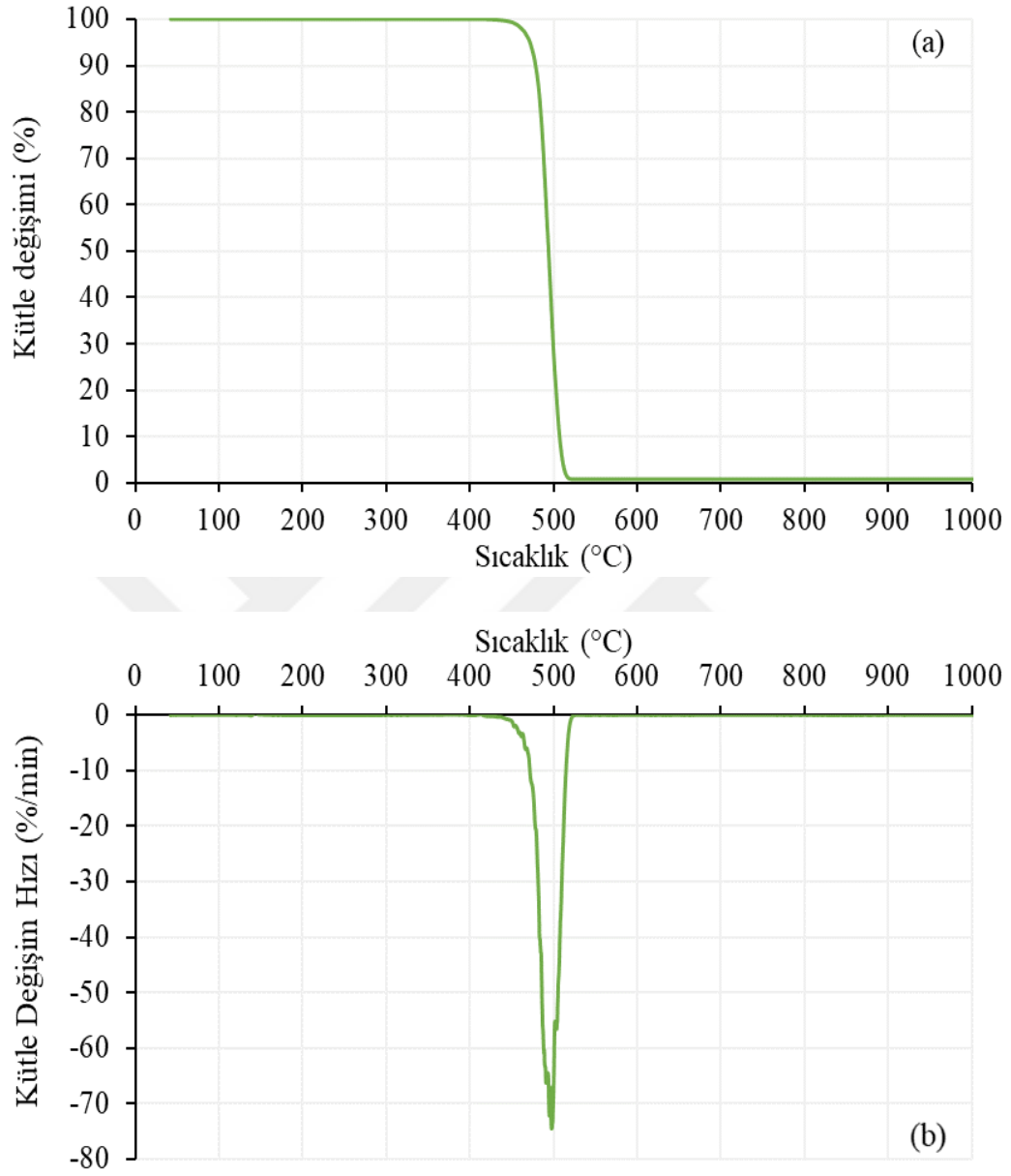
5.1.3 HDPE malzemenin termogravimetrik analizi

HDPE malzemenin termogravimetrik analizi sonucu elde edilen kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.3’te verilmiştir. Analizlerden elde edilen önemli sayısal değerler Tablo 5.3’te sunulmuştur. HDPE malzeme tek basamakta yaklaşık 445 – 520 °C sıcaklık aralığında bozunmuştur (Makhlouf ve diğ. 2020). % 5 ve % 10 kütle kaybının olduğu sıcaklıklar ise sırasıyla 471,8 °C ve 478,5 °C olarak belirlenmiştir. Maksimum bozunma sıcaklığına gelmeden 494,1 °C’de kütlede % 50 kayıp olduğu tespit edilmiştir. Maksimum bozunma sıcaklığı 497,7 °C ve maksimum bozunma hızı 74,5 %/min olarak ölçülmüştür. 1000 °C sıcaklıkta kalan kütle % 0,8 olarak tespit edilmiştir. HDPE malzemenin özelliklerine bağlı olarak ısı bozunma karakteristiğinde de bazı küçük farklılıklar literatürde görülmektedir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar literatürle genel olarak uyum içindedir (Jiang ve diğ. 2019, Salasinska ve diğ. 2020).

5.1.4 ABS malzemenin termogravimetrik analizi

Ham ABS malzemenin termogravimetrik analizi sonucu elde edilen sıcaklığa bağlı kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.4’te verilmiştir. Analizlerden elde edilen önemli sayısal değerler Tablo 5.4’te sunulmuştur. ABS malzeme, farklı oranlarda akrilonitril (% 15-35), bütadien (% 5-30) ve stiren (%)

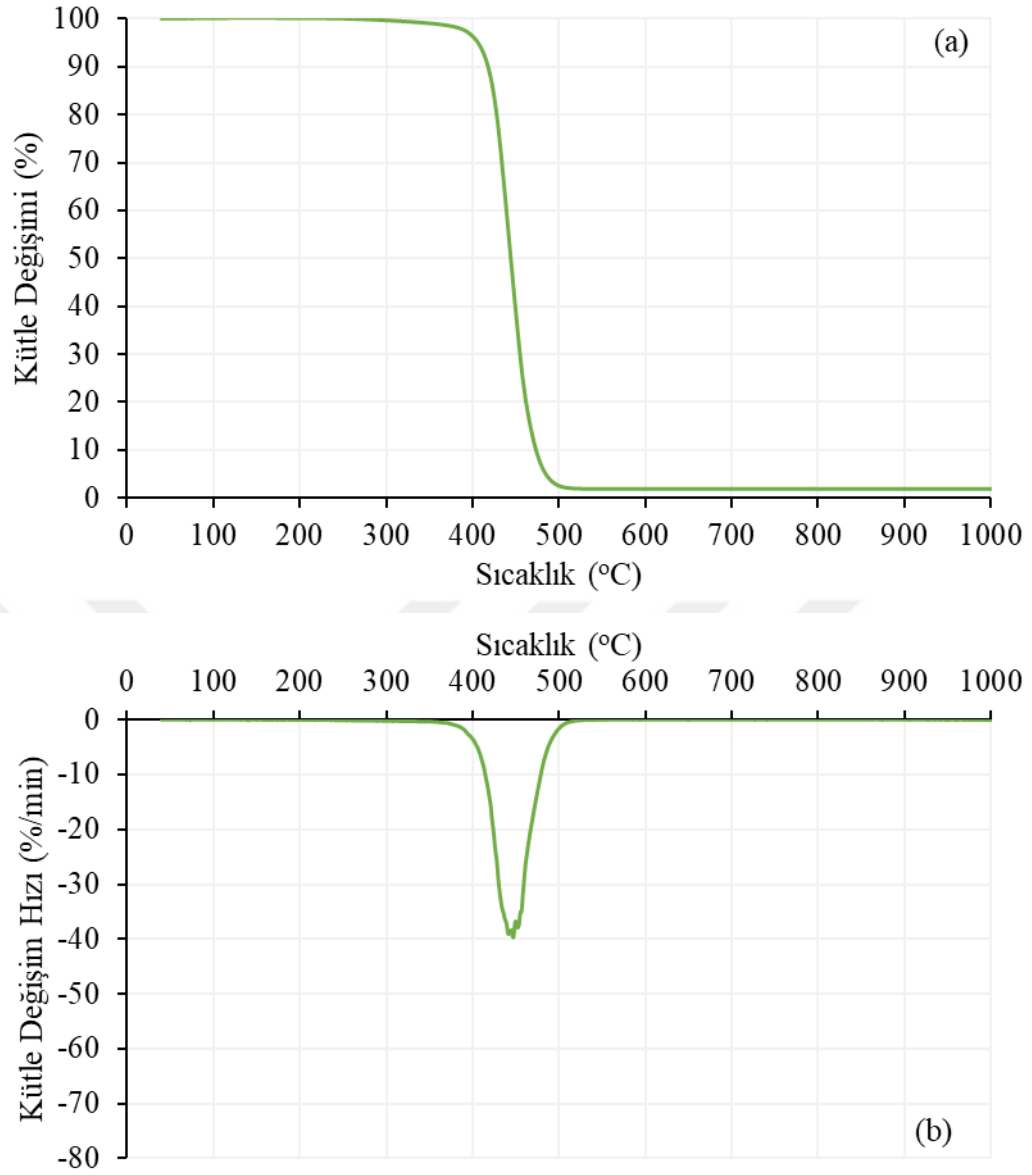
40-60) monomerlerinin birleşmesiyle oluşan bir termoplastik polimerdir (McKeen 2010).



Şekil 5.3: HDPE'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Tablo 5.3: HDPE'nin ısıl bozunmasında önemli sayısal değerler.

T _{%5wt} (°C)	T _{%10wt} (°C)	T _{%50wt} (°C)	T _{maks} (°C)	R _{maks} (%/min)	m _{1000 °C} (%)
471,8	478,5	494,1	497,7	-74,5	0,8



Şekil 5.4: ABS'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı

Tablo 5.4: ABS'nin ısıl bozunmasında önemli sayısal değerler.

T _{%5wt} (°C)	T _{%10wt} (°C)	T _{%50wt} (°C)	T _{maks} (°C)	R _{maks} (%/min)	m _{1000 °C} (%)
406,5	417,9	444,1	446,7	-39,7	1,9

ABS malzeme 20 °C/min ısıtma hızında yaklaşık 300 ile 550 °C aralığında SAN (stiren akrilonitril) ve bütadienin ısıl bozunması ile tek basamakta bozunma karakteristiği göstermiştir (Wu ve Li 2014, Feng ve diğ. 2016, Zhu ve diğ. 2021).

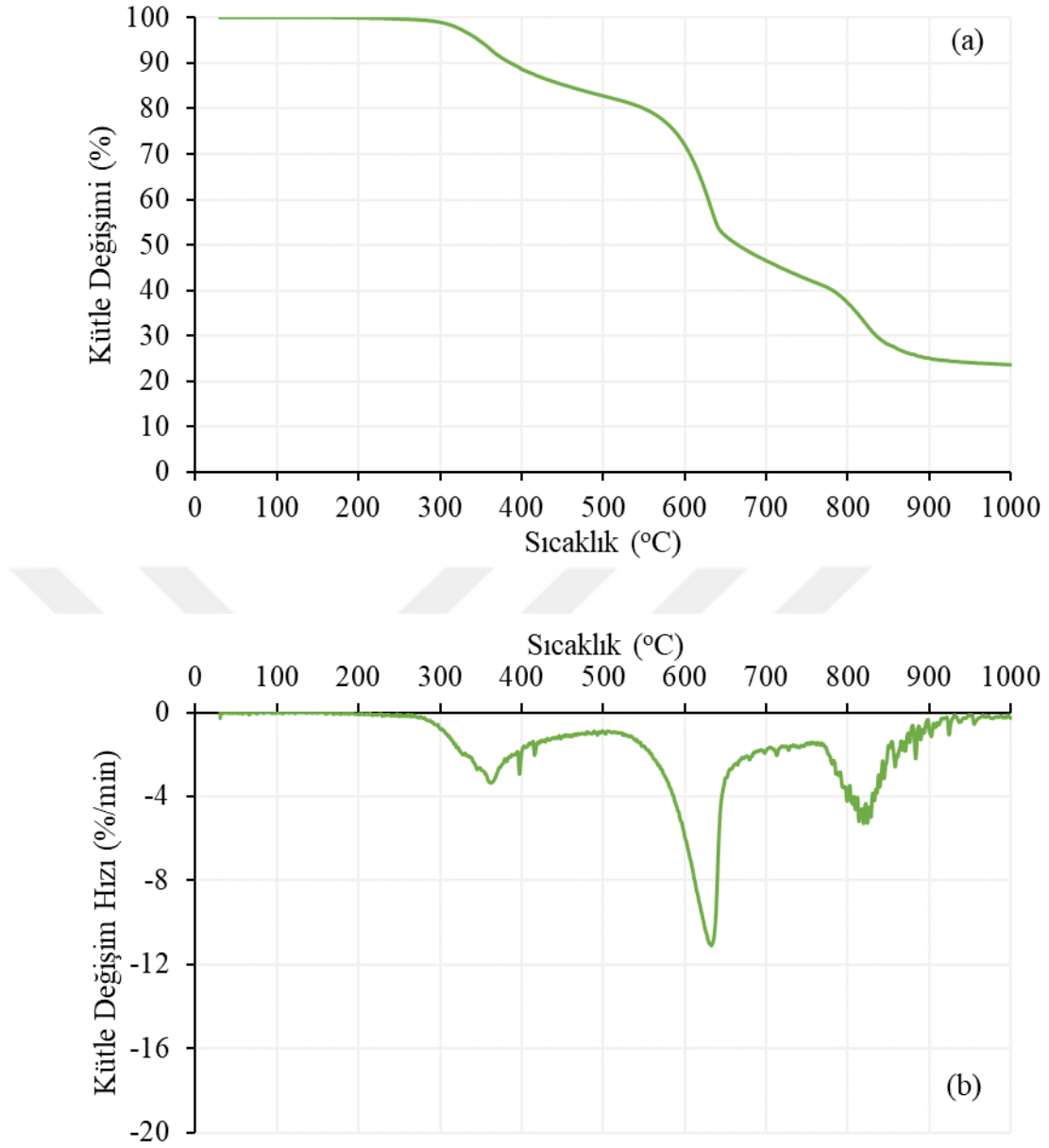
ABS malzemenin % 5 kütle kaybının 406,5 °C’de, % 10 kütle kaybının 417,9 °C’de ve % 50 kütle kaybının ise 444,1 °C’de gerçekleştiği belirlenmiştir. 446,7 °C’de maksimum bozunma hızı (39,7 %/min) gerçekleşmiştir. 1000 °C sıcaklıkta kalan kütle oranı ise yaklaşık % 1,9 olmuştur. Analizin azot ortamında yapılmasından dolayı kalan kütlenin karbonlaşmış kalıntı olduğu değerlendirilmiştir (Pawlowski ve Schartel 2008, Czégény ve diğ. 2012). Genel olarak yüksek ısıtma hızlarında ısıl bozunmanın daha hızlı olmasından dolayı kalan kütlenin bir miktar daha fazla olduğu tespit edilmiştir. ABS malzemenin termogravimetrik analizleri ile belirlenen ısıl bozunmanın moleküler kütle, bileşim oranları, kütle miktarı, örnek hacmi, ısıtma hızı, ortam gazı ve gaz akış debisi gibi parametrelere bağlı olarak tek veya iki basamakta gerçekleşebileceği rapor edilmiştir (Yang ve diğ. 2004). Hoang ve diğ. (2008), hava ortamında 10 °C/min ısıtma hızında yaptığı termogravimetrik analizde ABS malzemenin iki basamakta gerçekleşen ısıl bozunmasının bütadien kısmında başlayarak SAN kısmı ile devam ettiğini rapor etmişlerdir.

5.1.5 APP ve PER malzemelerin termogravimetrik analizleri

Kabaran alev geciktiricinin sentezinde kullanılan APP ve PER maddelerinin termogravimetrik analizleri sonucu elde edilen sıcaklığa bağlı kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da verilmiştir. Analizlerden elde edilen önemli sayısal değerler Tablo 5.5’te sunulmuştur.

APP üç basamakta bozunmaya uğramakta olup ilk basamakta (200-500 °C) su ve amonyak ortaya çıkmakta ve aynı zamanda fosforik asit oluşmaktadır. İkinci basamakta (500-770 °C) fosforik asit, fosfor okside dönüşmektedir. Üçüncü basamak 770 – 950 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiş olup, 1000 °C’de kalan kütle oranı % 23,6 olarak tespit edilmiştir. En yüksek kütle kayıp hızı (11,0 %/min) ikinci basamakta tespit edilmiştir.

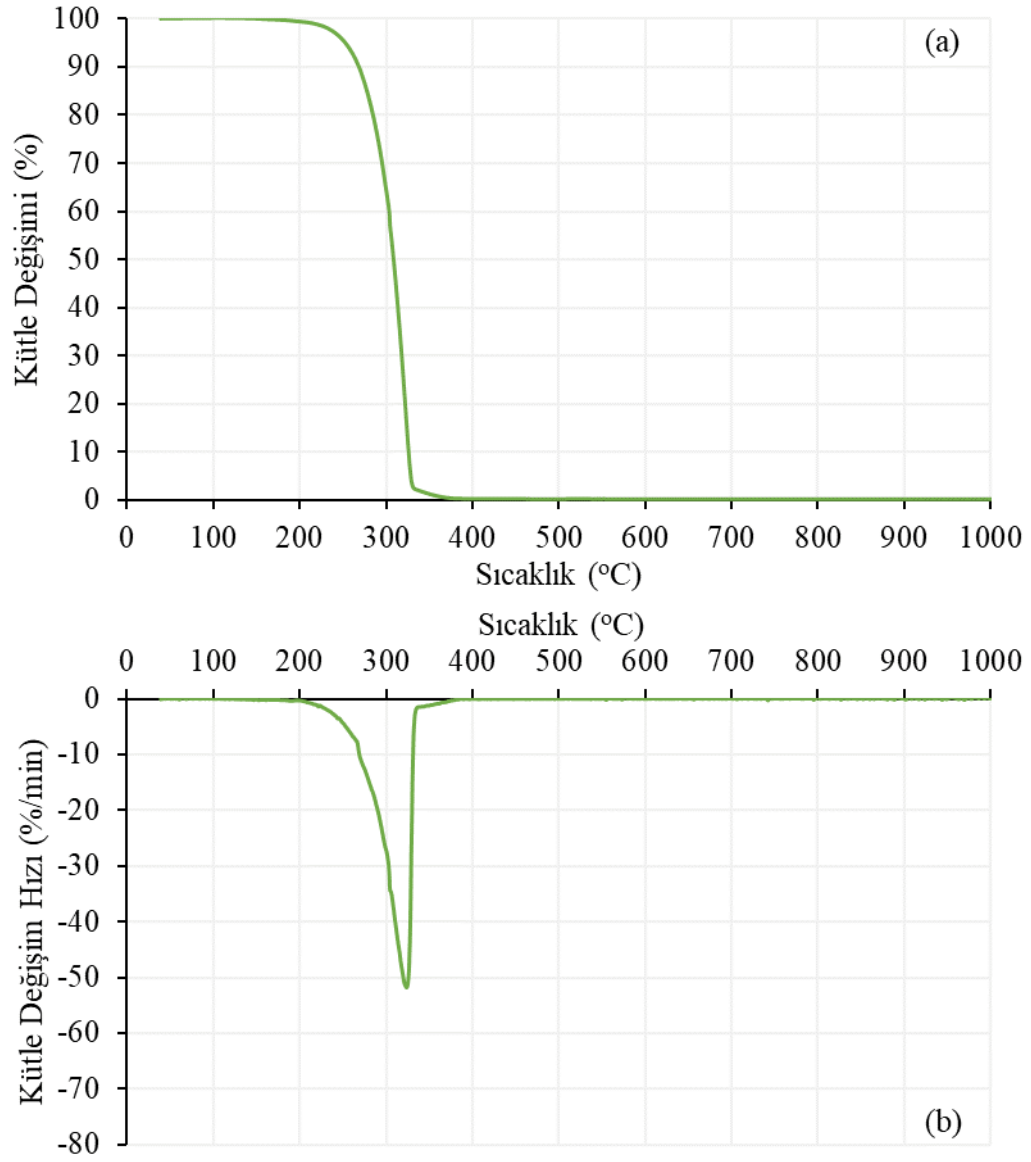
PER ise 200 °C ile 370 °C sıcaklık aralığında tek basamakta tamamen ısıl bozunmaya uğramaktadır. Maksimum bozunma sıcaklığı 323,5 °C ve hızı 51,8 %/min olarak tespit edilmiştir (Aydoğan ve Usta, 2015).



Şekil 5.5: APP'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Kabaran alev geciktirici sentezinde asit ve kabarma ajanı olarak kullanılan APP ve karbonlaştırıcı ajan olan PER 'in polimer malzemelerden erken bozunarak karbon tabakası oluşturması ile malzemelerin ısıl bozunma ve yanma dirençleri artırılabilir.

PP ve HDPE malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda etkili ısıl bozunma ve yanma direnci için kabaran alev geciktirici sentezinde kütlece APP/PER oranı (3:1) olarak rapor edilmiştir (Lai ve diğ. 2015, Chen ve diğ. 2019, Li ve diğ. 2021).



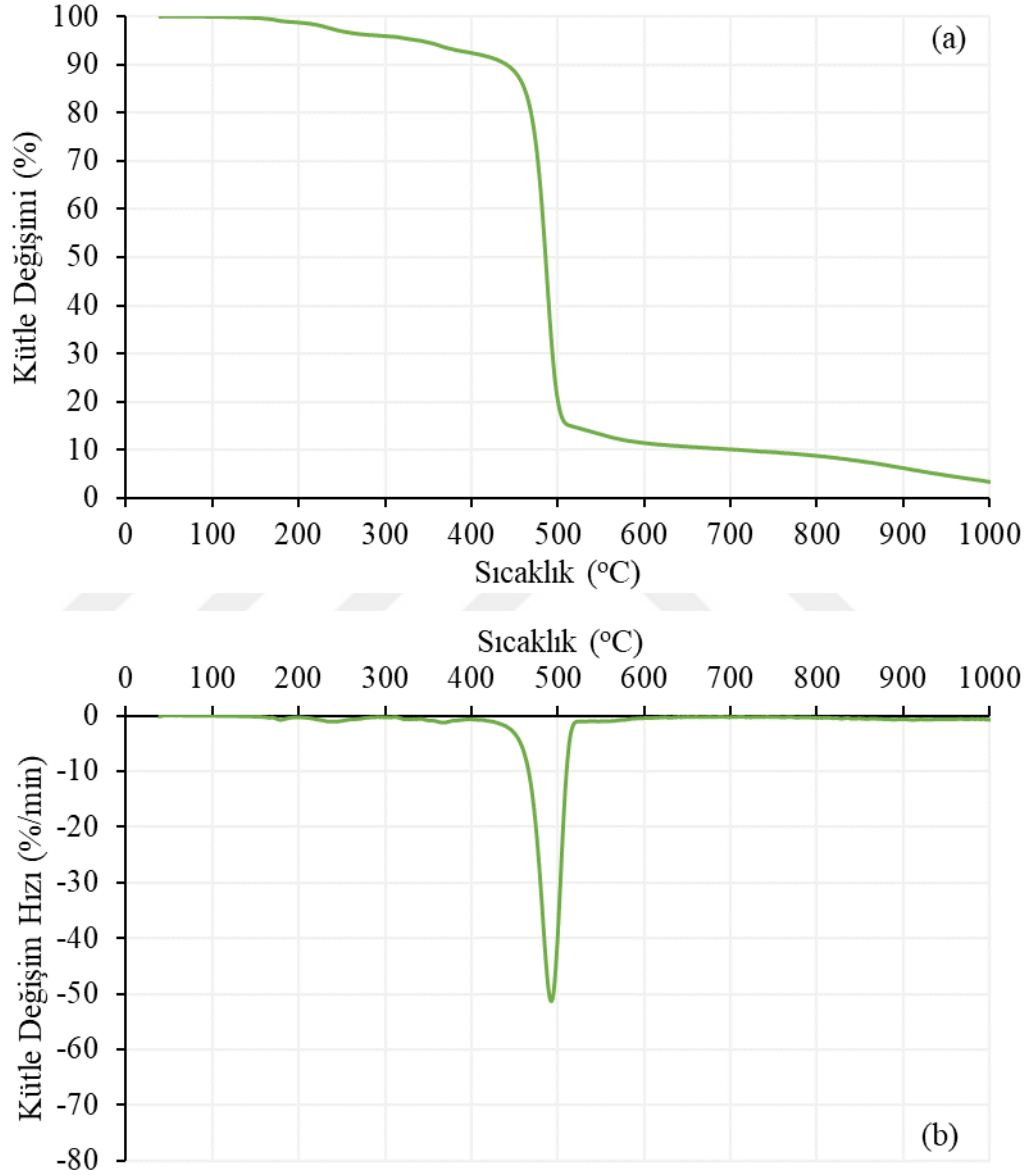
Şekil 5.6: PER'in (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Tablo 5.5: APP ve PER'in ısıl bozunmasında önemli sayısal değerler.

Malzeme	T _{%5wt} (°C)	T _{%10wt} (°C)	T _{%50wt} (°C)	T _{1maks} (°C) R _{1maks} (%/min)	T _{2maks} (°C) R _{2maks} (%/min)	T _{3maks} (°C) R _{3maks} (%/min)	m _{1000 °C} (%)
APP	347,8	386,8	665,1	366,1 -3,3	635,4 -11,0	820,4 -4,9	23,6
PER	252,6	268,7	308,7	323,5 -51,8	-	-	0,0

5.1.6 PP25IFR malzemenin termogravimetrik analizi

% 25 IFR içeren PP (PP25IFR) malzemenin termogravimetrik analizleri sonucu elde edilen sıcaklığa bağlı kütle değişim (%) ve kütle değişim hızı (%/min) grafikleri Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7: PP25IFR’nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

Ham PP malzemeye % 25 IFR ilavesi ile malzemenin bozunma karakteristiği kısmi olarak değişmiştir. Ham PP malzeme tek basamakta tamamen bozunmasına

rağmen IFR ilavesi ile APP ve PER'in PP'ye göre erken bozunmasının ve karbon tabakası oluşumunun etkileri görülmektedir.

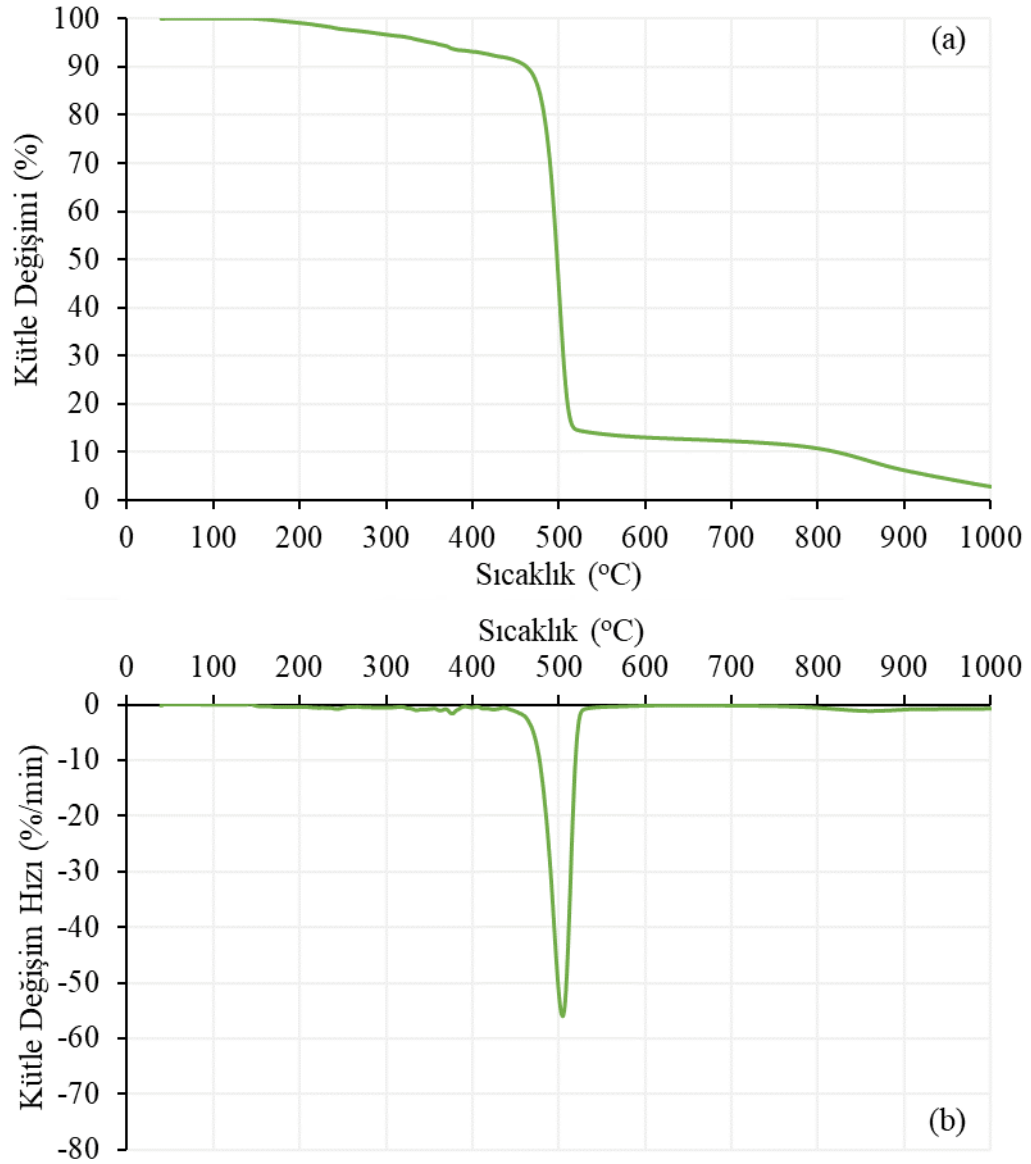
% 5 kütle kaybının olduğu sıcaklık 341,9 °C'ye düşmüştür. % 10 ve % 50 kütle kaybının gerçekleştiği sıcaklıklar 441,0 °C ve 485,8 °C olmuştur. Ana bozunma 400 °C ile 600 °C arasında gerçekleşmiş olup, maksimum bozunma sıcaklığı ham malzemeye göre 14,1 °C gecikme ile 492,1 °C ve kütle değişim hızı da düşerek 51,30 %/min olmuştur. Bununla birlikte, 200-300 °C, 300-400 °C ve 800-1000 °C sıcaklık aralıklarında düşük hızlarda küçük kütle kayıpları olmuştur. IFR ilaveli malzemenin 1000 °C'de kalan kütle oranı % 3,3 olarak tespit edilmiştir.

5.1.7 HDPE25IFR malzemenin termogravimetrik analizi

Alev geciktirici ilaveli yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE25IFR) malzemenin termogravimetrik analizleri ile elde edilen kütle değişim ve kütle değişim hızı sonuçları Şekil 5.8'de verilmiştir.

Ham HDPE malzemenin azot ortamında tek basamakta tamamına yakınının bozunmasına rağmen APP ve PER içeren IFR ilavesi malzemenin bozunma karakteristiğini kısmi olarak değiştirmiştir. APP ve PER'in HDPE'ye göre erken bozunması ile % 5 kütle kaybının olduğu sıcaklık (351,5 °C) yaklaşık 120 °C erken gerçekleşmiştir. % 10 ve % 50 kütle kayıplarının gerçekleştiği sıcaklıklar 462,4 °C ve 498,1 °C olmuştur.

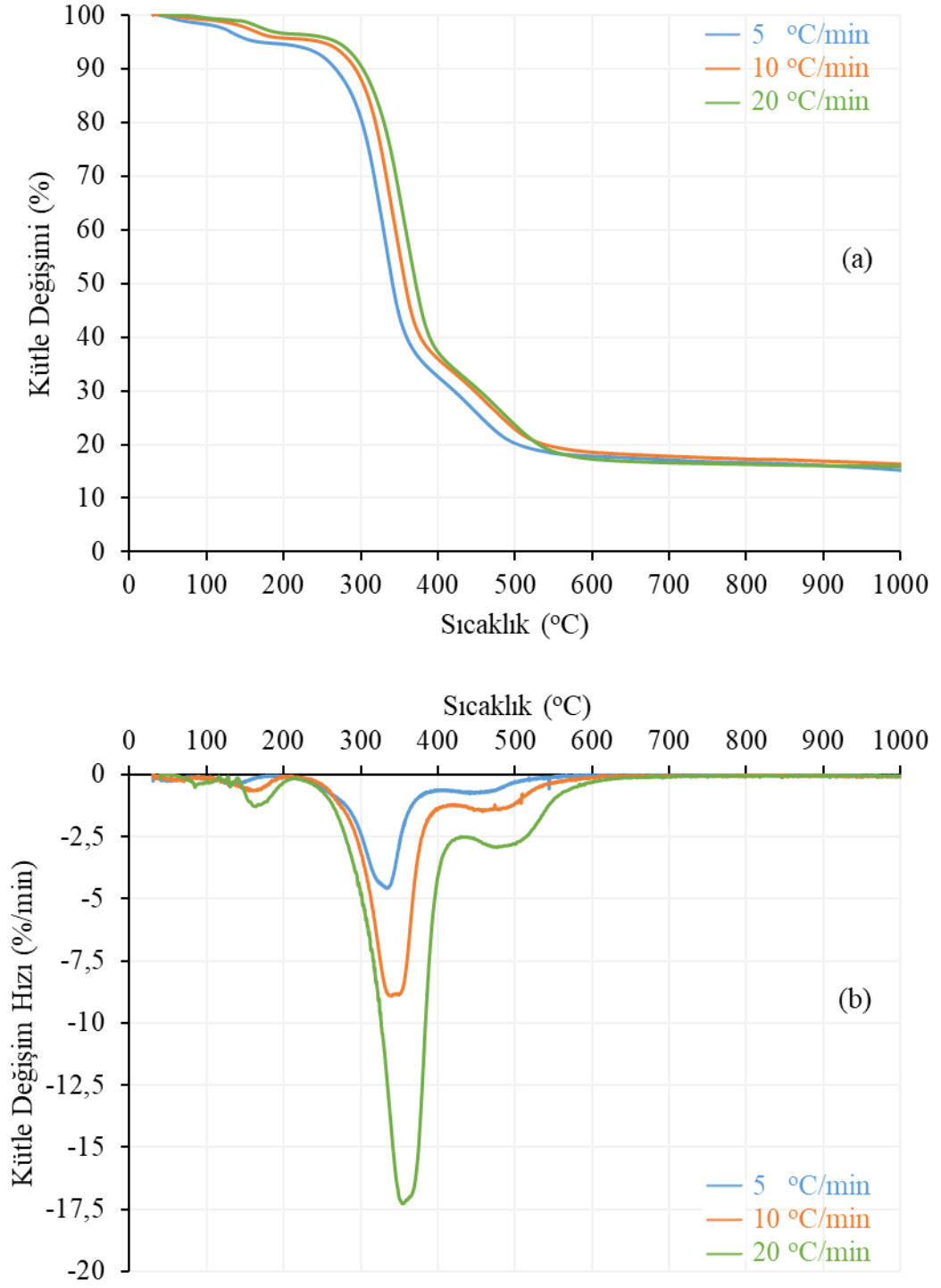
HDPE25IFR malzemenin ana bozunması 450 °C ile 550 °C arasında gerçekleşmiş olup, maksimum bozunma sıcaklığı ham malzemeye göre 6,6 °C gecikme ile 504,3 °C olmuş ve değişim hızı da 74,5 %/min'den 56,01 %/min'e düşmüştür. Bununla birlikte, 200-400 °C ve 750-1000 °C sıcaklık aralıklarında düşük hızlarda küçük kütle kayıpları tespit edilmiştir. Kabaran alev geciktiricinin karbon tabakası oluşturmaya bağlı olarak HDPE25IFR malzemenin 1000 °C'de kalan kütle oranı % 2,7 olarak belirlenmiştir.



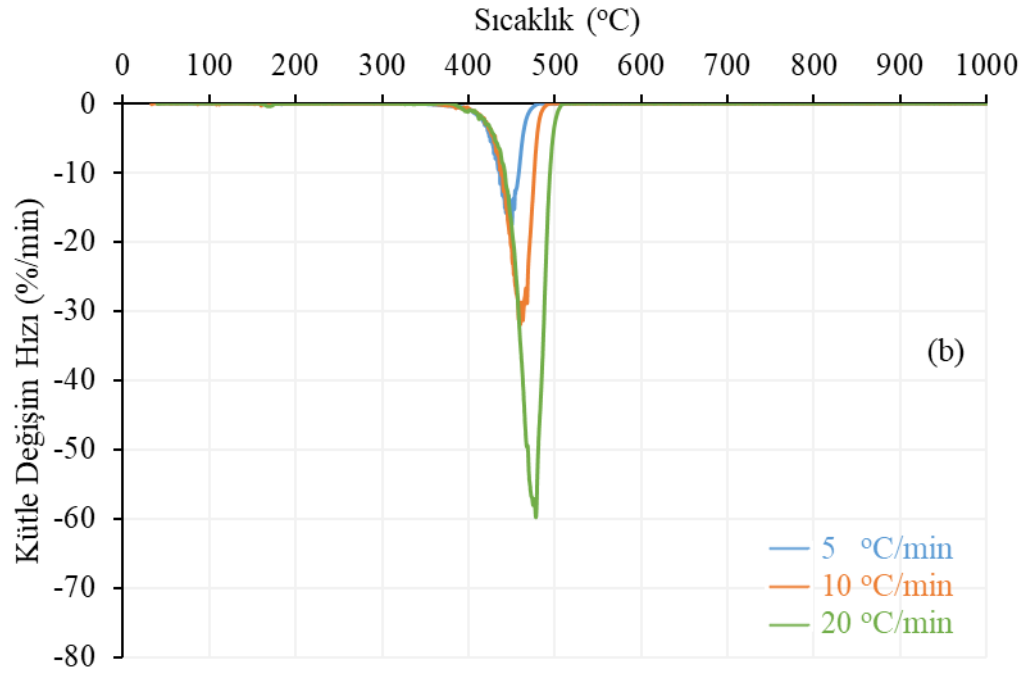
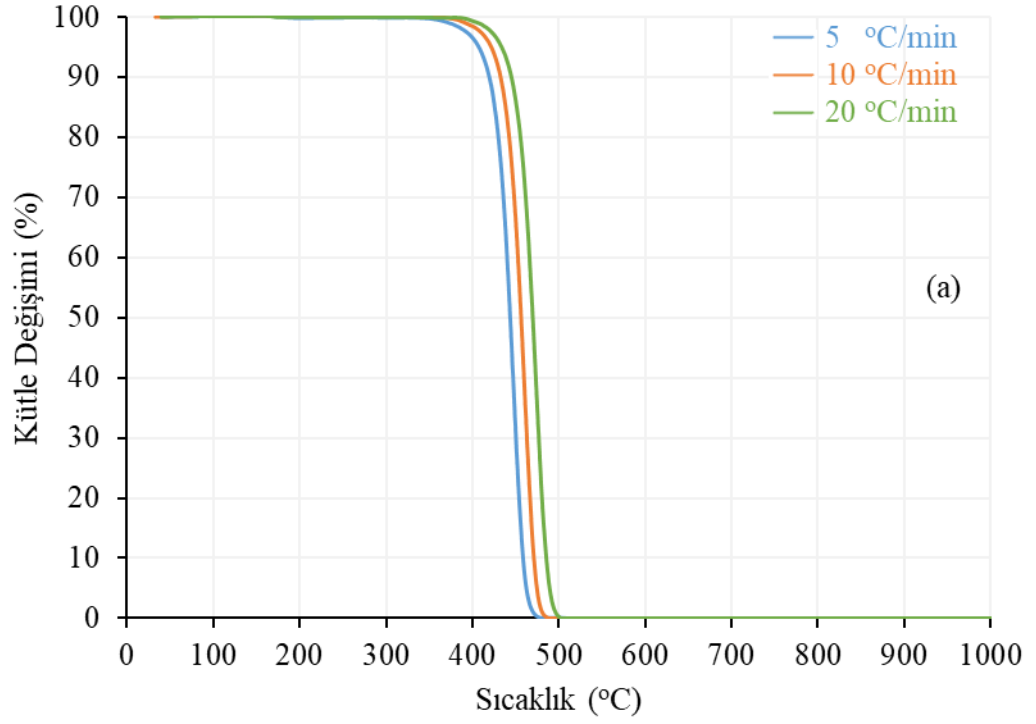
Şekil 5.8: HDPE25IFR'nin (a) kütle değişim ve (b) kütle değişim hızı.

5.2 Malzemelerin Kinetik Parametreleri

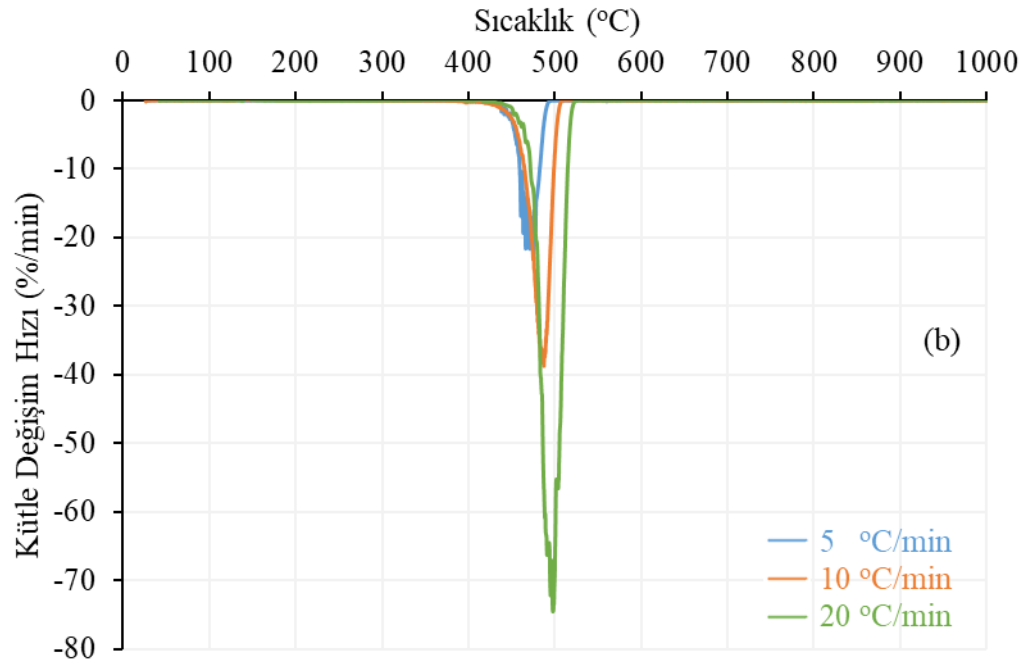
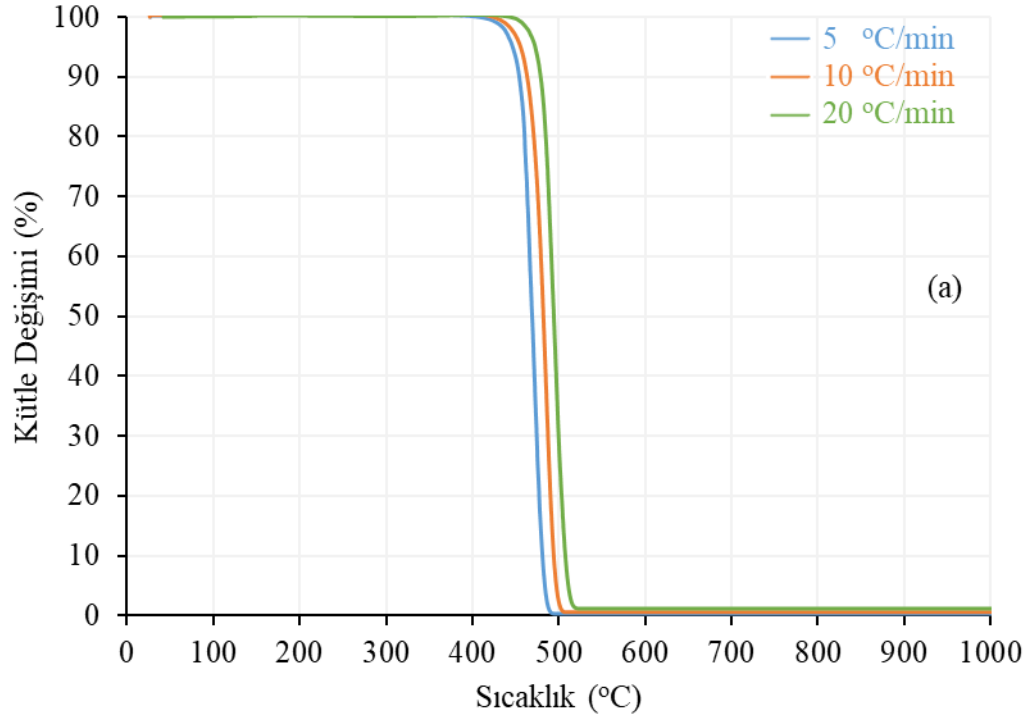
PUR, PP, HDPE ve ABS malzemelerin ısıl bozunma kinetik parametrelerinin belirlenebilmesi için 20 °C/min ısıtma hızı dışında 5 ve 10 °C/min ısıtma hızlarında da termogravimetrik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu malzemelerin üç farklı ısıtma hızlarında kütle değişim ve kütle değişim hızı grafikleri Şekil 5.9- 5.12'de verilmiştir.



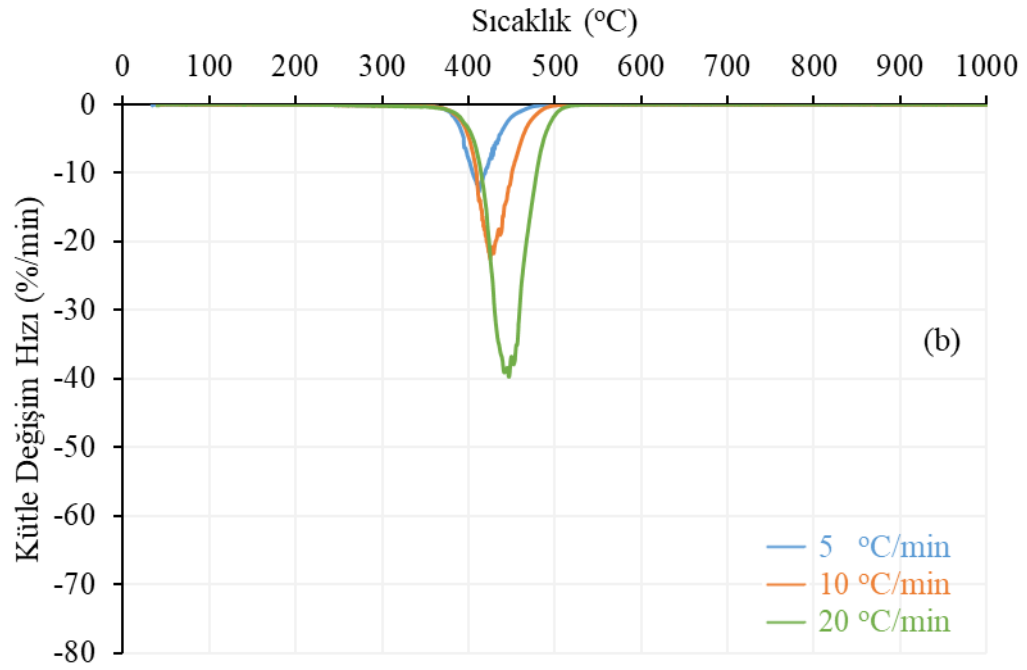
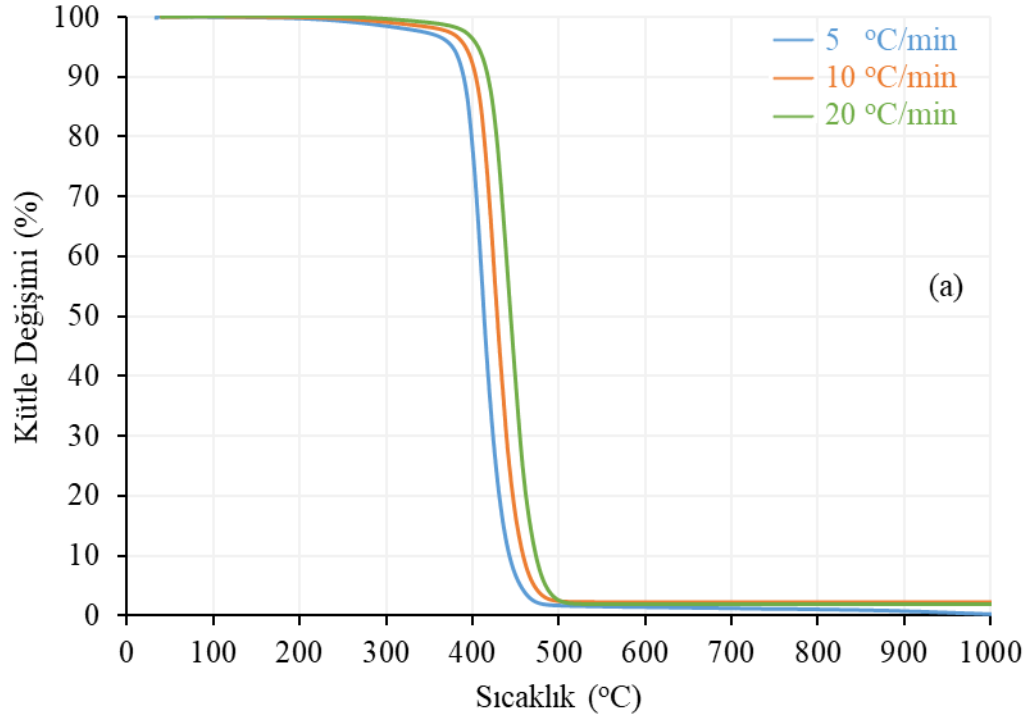
Şekil 5.9: PUR'un farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.



Şekil 5.10: PP'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.



Şekil 5.11: HDPE'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.



Şekil 5.12: ABS'nin farklı ısıtma hızlarında (a) kütle değişimi, (b) kütle değişim hızı.

Genel olarak ısıtma hızı azaldıkça maksimum bozunma sıcaklıkları ve bozunma hızları düşmektedir.

Malzemelerin üç farklı ısıtma hızında elde edilen veriler cihazın özel bir yazılımı yardımıyla çoklu doğrusal regresyon (MLR) yöntemi kullanılarak ısıl bozunma kinetiği parametreleri (E ve A) belirlenmiştir. Malzemelerin E ve A değerleri Tablo 5.6’da verilmiştir.

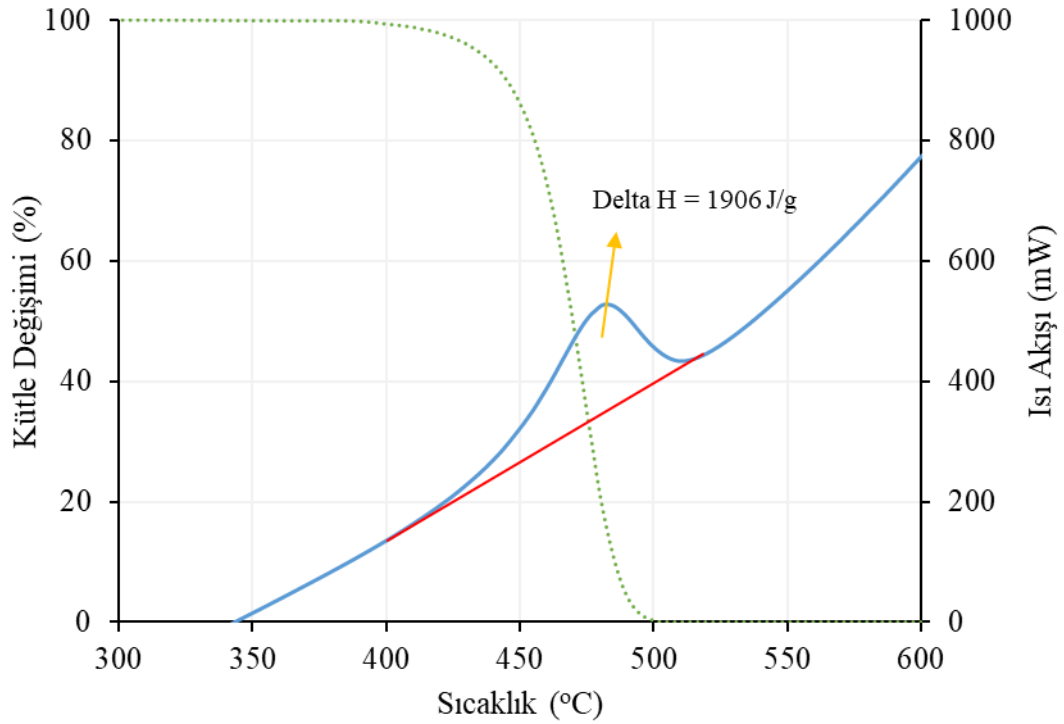
Tablo 5.6: Malzemelerin ısıl bozunma kinetiği parametreleri.

	PUR	PP	HDPE	ABS
E (kJ/mol)	110±14	247±9	307±33	232±17
ln A (1/s)	17±3	36±3	44±5	34±3

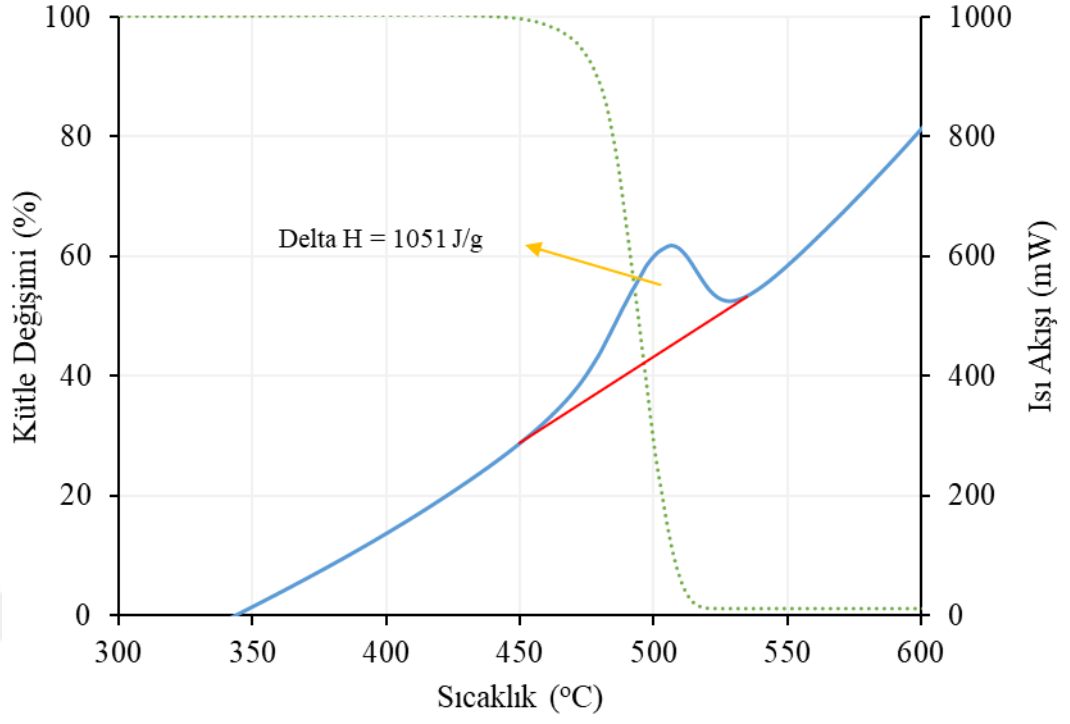
5.3 Malzemelerin Reaksiyon Isı Değerleri

PP, HDPE ve ABS malzemelerin reaksiyon ısı değerleri, 20 °C/min ısıtma hızında sıcaklığa bağlı ısı akışı değişiminden cihazın sahip olduğu özel yazılım vasıtasıyla hesaplanmıştır.

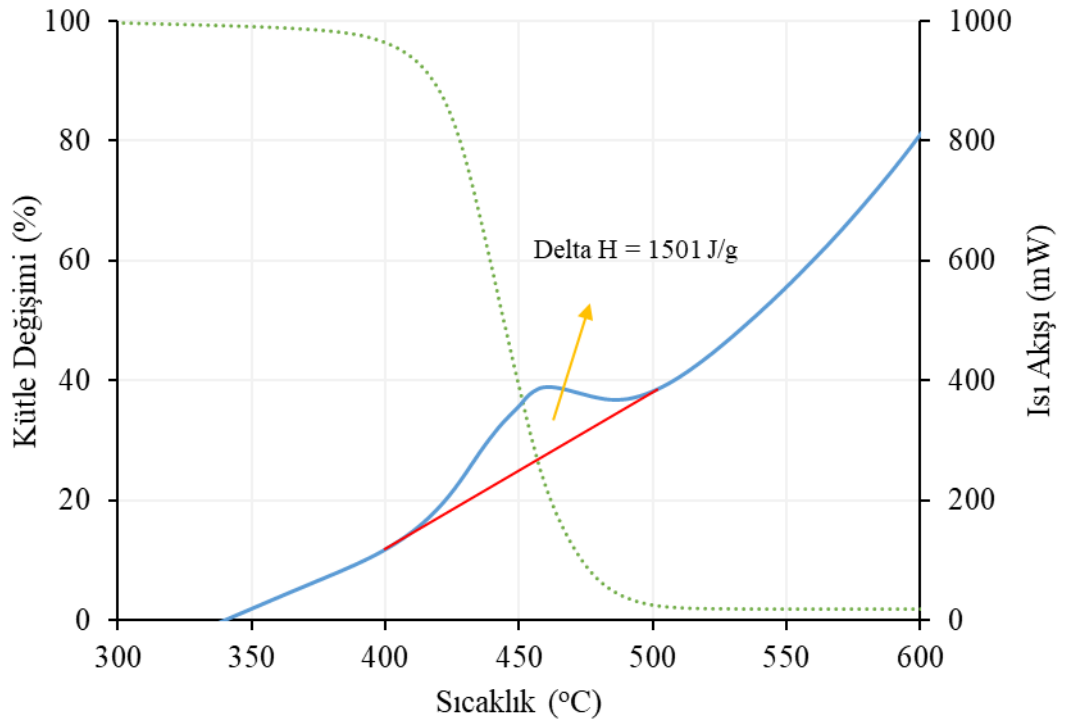
PP, HDPE ve ABS malzemelerin sıcaklığa bağlı kütle ve ısı akışı değişimleri Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te gösterilmiştir.



Şekil 5.13: PP için reaksiyon ısısı tespiti.



Şekil 5.14: HDPE için reaksiyon ısısı tespiti.



Şekil 5.15: ABS için reaksiyon ısısı tespiti.

PP, HDPE ve ABS'nin reaksiyon ısı değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. PP ve HDPE için elde edilen değerler literatür ile genel olarak uyumludur (Kim ve Bhattacharyya 2016, Stoliarov ve diğ. 2009). ABS malzemenin içeriği değişebildiği için farklı reaksiyon ısı değerleri görülmektedir (Li ve diğ. 2015).

Tablo 5.7: Malzemelerin reaksiyon ısı değerleri.

	PP	HDPE	ABS
Reaksiyon ısı değerleri (kJ/kg)	1906	1051	1501

5.4 Malzemelerin Yoğunlukları

PUR, PP, HDPE, ABS, PP25IFR ve HDPE25IFR malzemelerinin hacim ve kütle ölçümleri yapılarak yoğunlukları hesaplanmış ve değerler Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8: Malzemelerin yoğunluk değerleri.

Yoğunluk (kg/m ³)					
PUR	PP	HDPE	ABS	PP25IFR	HDPE25IFR
46	838	892	1071	974	1037

5.5 Malzemelerin Isı İletim Katsayıları

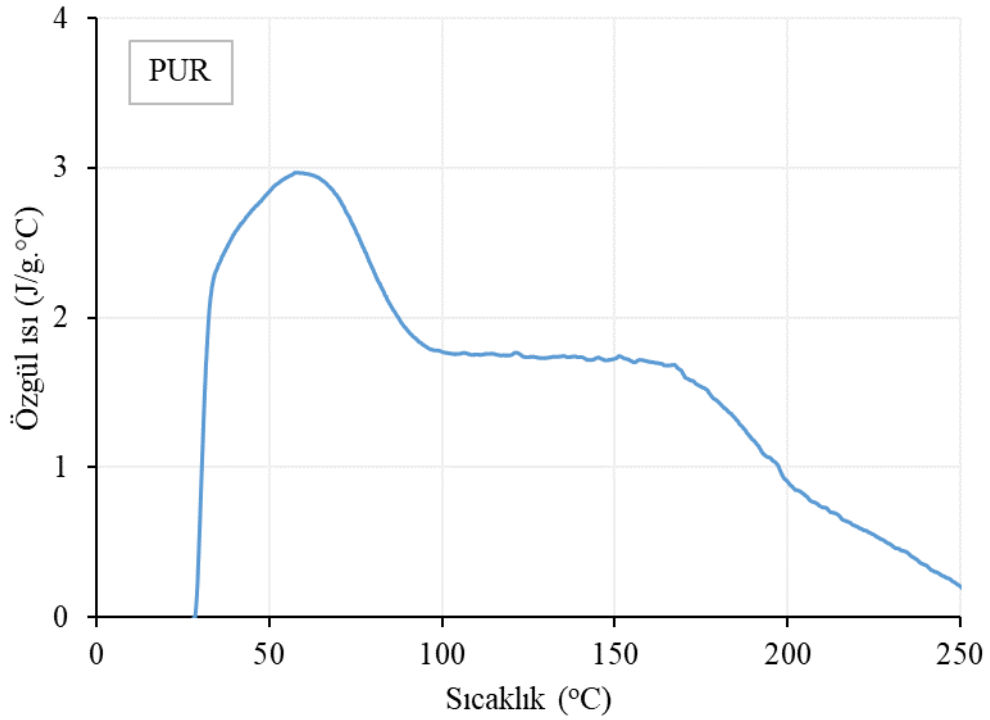
PUR, PP, HDPE, ABS, PP25IFR ve HDPE25IFR malzemelerinin ASTM C1113/ C1113M – 09 standartlarına uygun olarak Kyoto Electronics (QTM-500) model cihaz kullanılarak ısı iletim katsayılarının tespiti için 3'er tane ölçüm yapılmıştır. Yapılan bu 3 ölçümün ortalaması alınarak ısı iletim katsayısı belirlenmiştir. Değerler Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9: Malzemelerin ısı iletim katsayı değerleri.

Isı iletim katsayısı (mW/m.K)					
PUR	PP	HDPE	ABS	PP25IFR	HDPE25IFR
26,3	242,7	447,7	191,7	258,2	455,4

5.6 Malzemelerin Özgöl Isı Değerleri

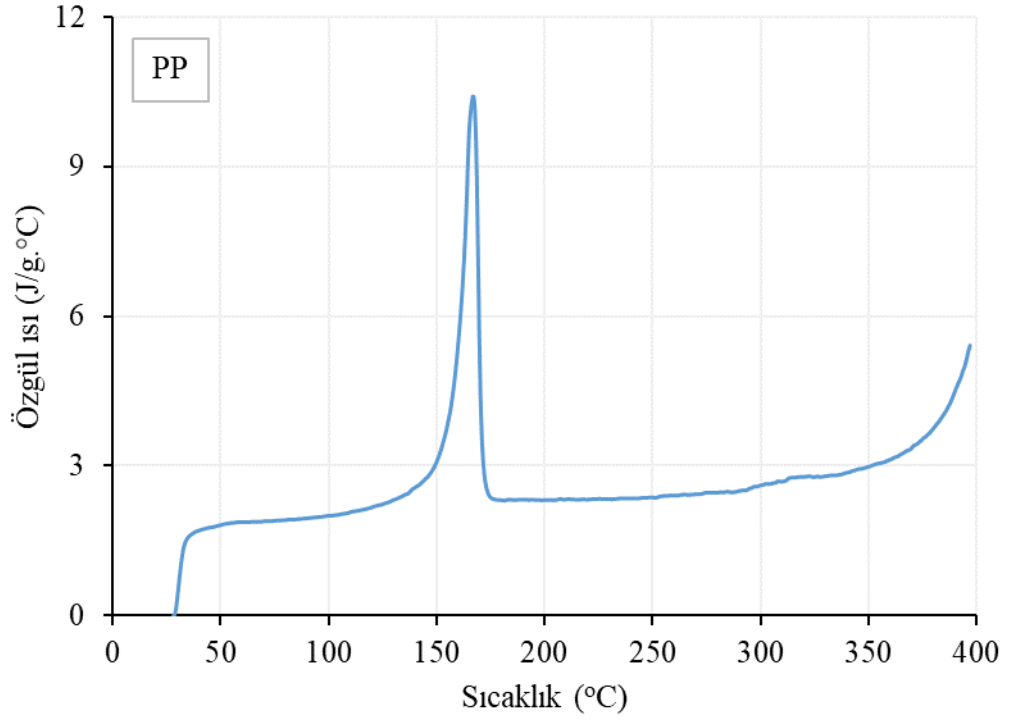
Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak PUR, PP, HDPE ve ABS malzemelerin yüksek saflıkta azot ortamında (20 ml/min), 30-400 °C sıcaklık aralığında ve 10 °C/min ısıtma hızındaki testleri sonucunda elde edilen sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimleri sırasıyla Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



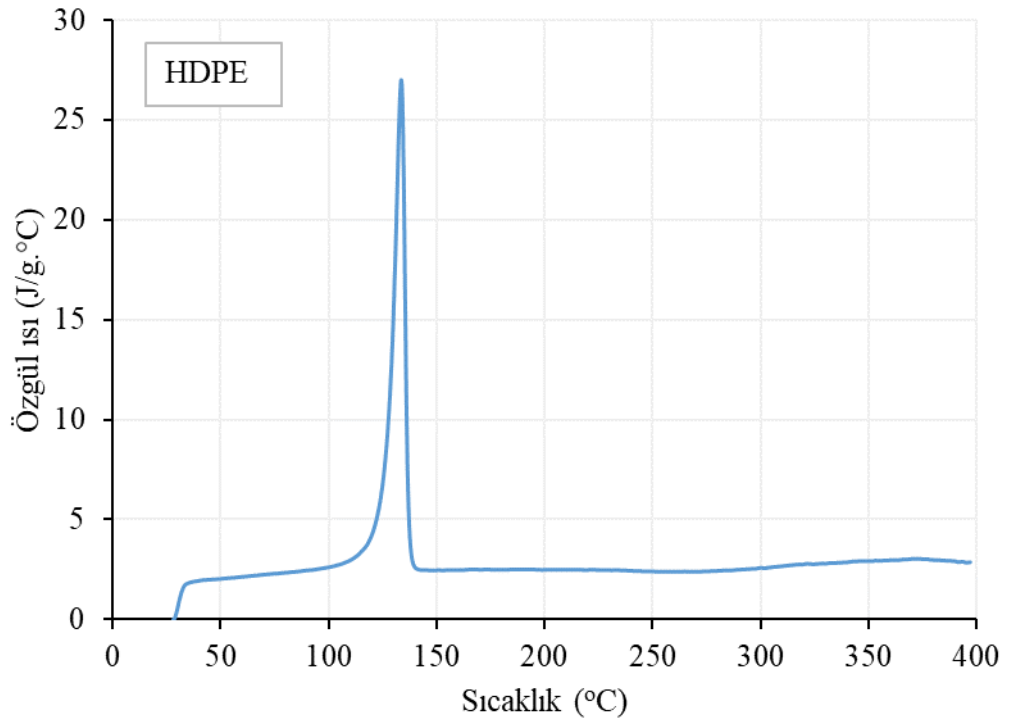
Şekil 5.16: PUR'un sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.

Polimer malzemelerin yanma modellemesinde özgül ısı değerlerinin tespiti önemlidir. Bazı modelleme çalışmalarında sabit özgül ısı yaklaşımı kullanılırken bazı çalışmalarda özgül ısının sıcaklığa bağlı değişim yaklaşımı uygulamaya alınabilmektedir.

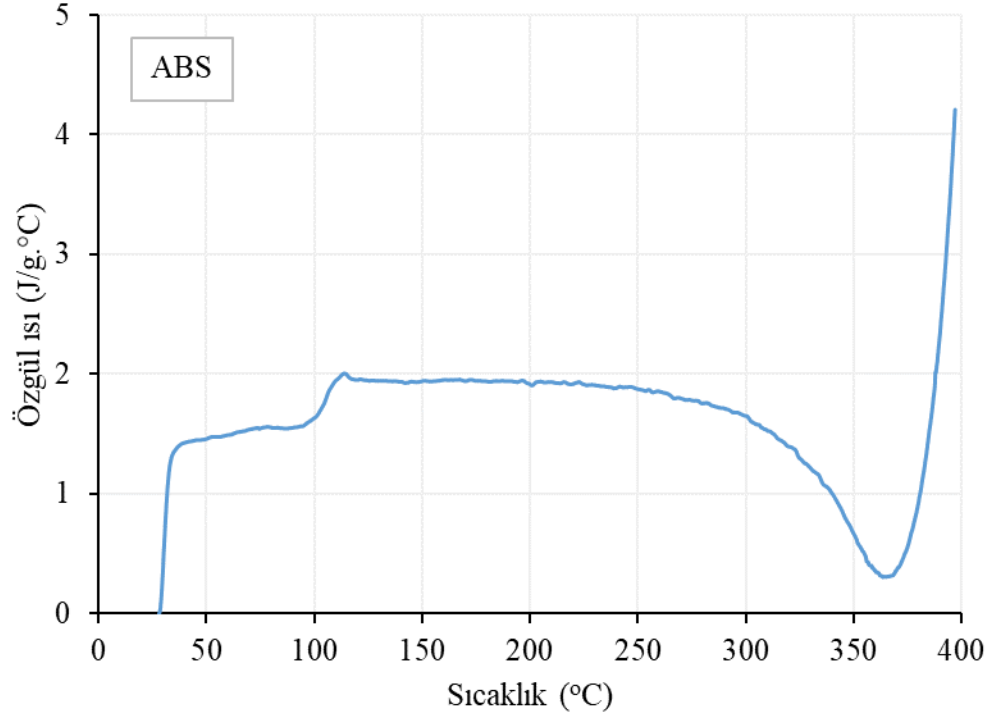
PP ve HDPE malzemelerin grafiklerinde (Şekil 5.17 ve Şekil 5.18) oluşan tepeler malzemelerin ergime bölgesini göstermektedir. Modelleme çalışmalarında ergime ısısı ayrı değerlendirmeye alınabiliyorsa özgül ısı değişiminde düzeltme yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.17: PP'nin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.



Şekil 5.18: HDPE'nin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.



Şekil 5.19: ABS'in sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi.

5.7 Malzemelerin Konik Kalorimetre Test Sonuçları

Malzemelerin konik kalorimetre testleri üç farklı ısı akısında (25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2) gerçekleştirilmiştir. Her malzemeden üç numune aynı şartlarda test edilerek, üç testin sonuçlarının ortalaması alınmış ve o malzemenin sonucu olarak sunulmuştur.

5.7.1 PUR malzemenin konik kalorimetre testleri

Rijit poliüretan köpük (PUR) malzemenin konik kalorimetre testi için hazırlanan numunesi Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Malzemenin 35 kW/m^2 ısı akısında yanma sırasındaki görüntüsü ise Şekil 5.21'de verilmiştir.

Rijit poliüretan köpük (PUR) malzemenin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akıları altında yanma sonucu oluşan görüntüleri ise Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



Şekil 5.20: PUR numunesi.



Şekil 5.21: PUR'un yanma anındaki görüntüsü.

PUR malzemenin farklı ısı akıları altında zamana bağlı HRR ve THR değişimleri sırasıyla Şekil 5.23 ve 5.24'te verilmiş olup tutuşma zamanı (TTI), maksimum ısı yayılım hızı (PHRR), toplam ısı yayılım miktarı (THR), maksimum ısı yayılım hızına erişim süresi (t_{PHRR}) ve yanma sonrası kalan kütle miktarı (m_k) değerleri Tablo 5.10'da sunulmuştur. PUR malzeme ısı akısına maruz kaldıktan kısa bir süre içinde tutuştuğu, HRR değerlerinin hızla yükseldiği, maksimum bir değere ulaştığı ve kısmi olarak karbonlaşmış tabaka oluşumu ile düştüğü görülmektedir. PUR malzemeye uygulanan ısı akısı arttıkça PHRR değerleri artarken TTI değerleri azalmaktadır (Branca ve diğ. 2003, Wang ve diğ. 2019, Baguian ve diğ. 2021). 25 kW/m^2 ısı akısında 9 s'de tutuşma başlarken ısı akısı 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 'ye çıktığında TTI değerleri 6 s ve 3 s'ye düşmektedir. 25 kW/m^2 ısı akısında PHRR 171,1 kW/m^2 olarak belirlenmiştir. Isı akısının 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 'ye çıkarılması durumunda sırasıyla 199,3 kW/m^2 ve 231,0 kW/m^2 değerlerine ulaşmıştır. Bu değerler

incelendiğinde her 10 kW/m^2 ısı akısı artışı ile PHRR'in yaklaşık % 16 arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca ısı akısı arttıkça t_{PHRR} değerinin azaldığı belirlenmiştir.



(a)

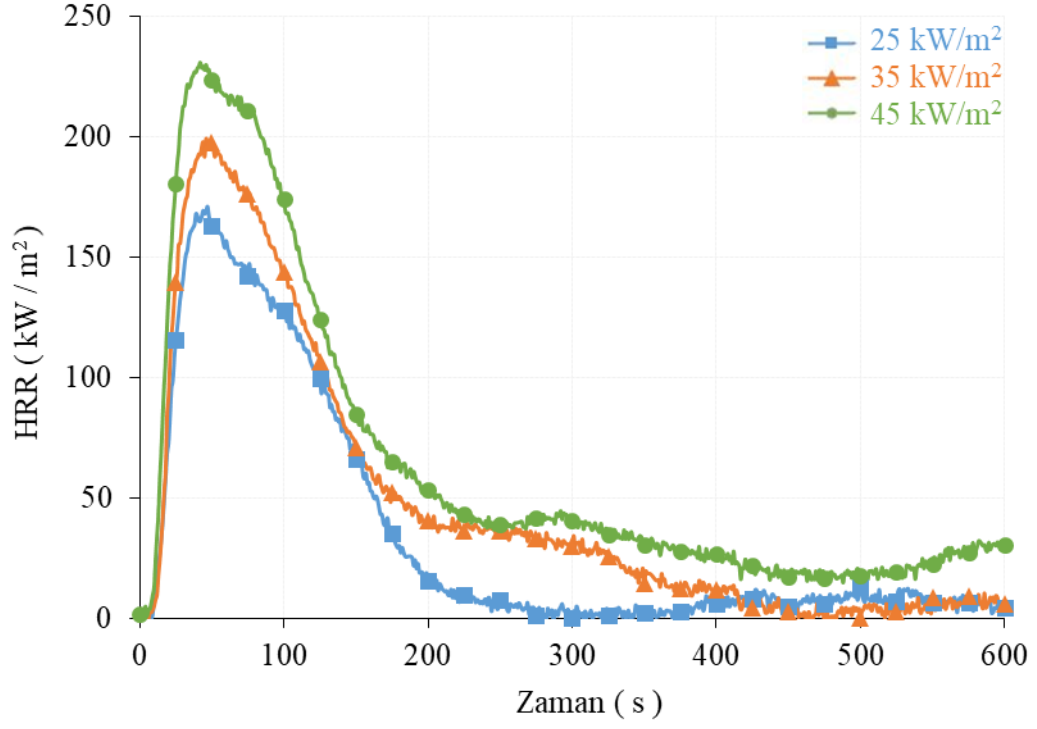


(b)

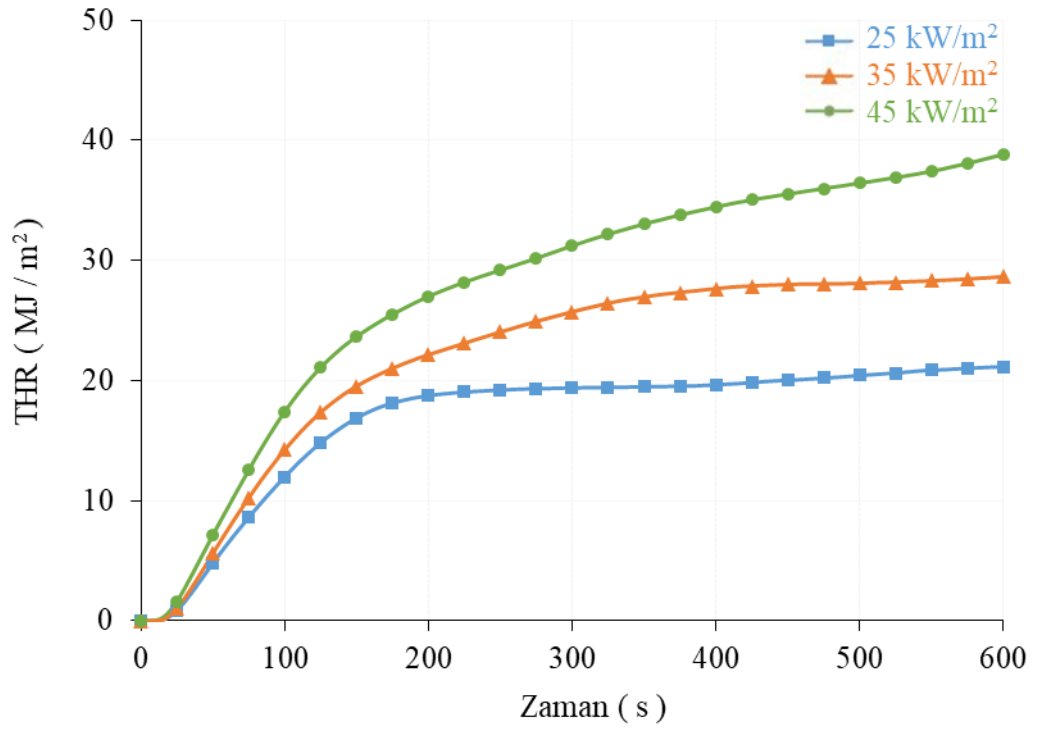


(c)

Şekil 5.22: PUR'un (a) 25 kW/m^2 , (b) 35 kW/m^2 ve (c) 45 kW/m^2 ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.



Şekil 5.23: PUR'un farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.



Şekil 5.24: PUR'un farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.

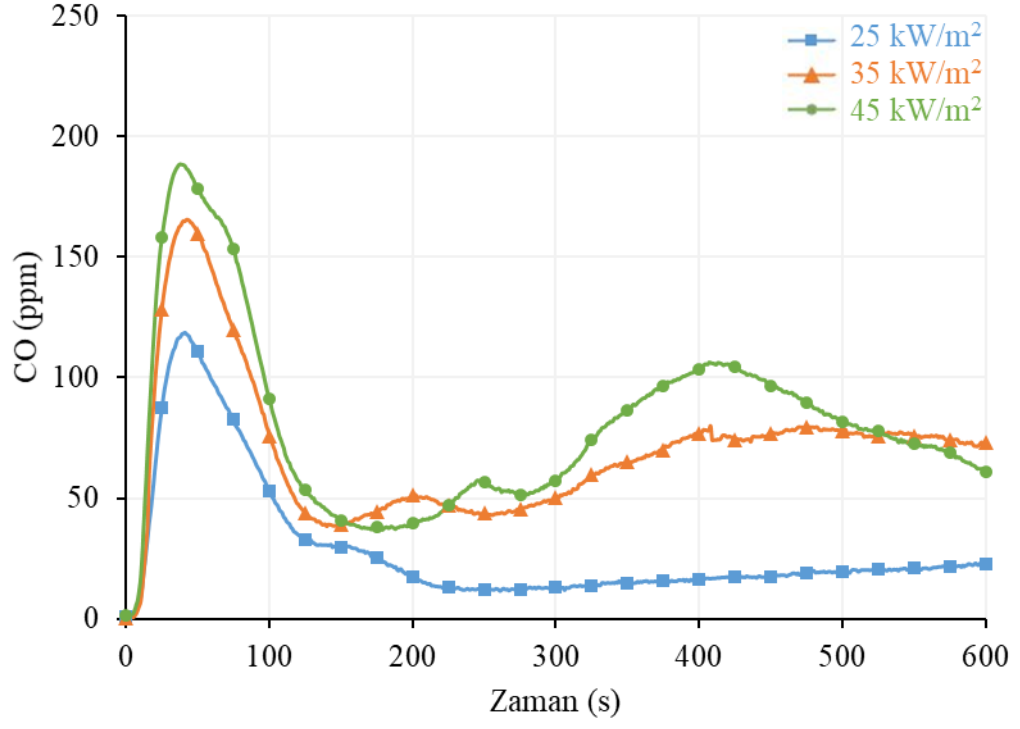
Tablo 5.10: PUR malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.

Isı Akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t _{PHRR} (s)	m _k (%)
25	9	171,1	22,97	47	57,58
35	6	199,3	28,64	46	42,17
45	3	231,0	38,84	42	26,23

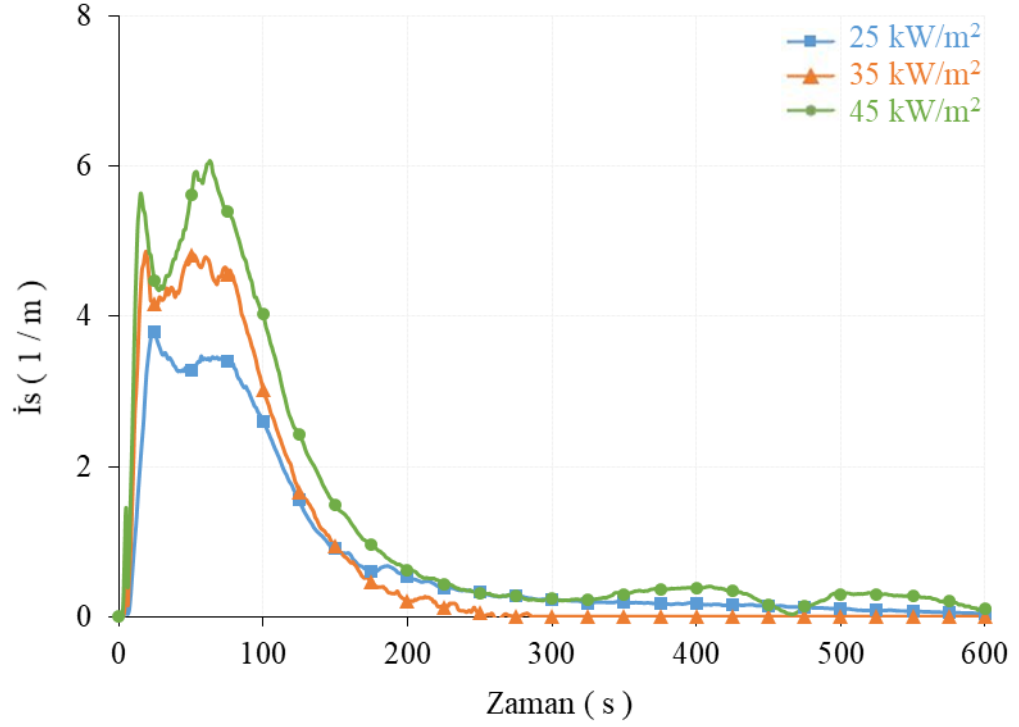
THR değerleri incelendiğinde ısı akısı artışına paralel olarak malzemenin daha çok yandığı, dolayısıyla THR değerlerinin arttığı ve m_k değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. PUR malzemenin 600 s içinde 25 kW/m² ısı akısında THR değeri 22,97 MJ/m² iken, ısı akısı 35 kW/m² ve 45 kW/m² olduğunda % 24,7 ve % 69,1 oranında artış göstererek 28,64 MJ/m² ve 38,84 MJ/m² değerlerine ulaşmıştır.

PUR malzemenin farklı ısı akıları altında zamana bağlı CO emisyon değişimleri Şekil 5.25'te verilmiştir. Malzemelerin ısı akısına maruz kalması ile CO emisyonunda hızlı bir artış daha sonra da HRR değişimine benzer şekilde düşme görülmektedir. Isı akısı artıkça maksimum CO emisyon değeri de artmaktadır (Branca ve diğ. 2003, Xu ve Fang 2013). 25 kW/m² ısı akısında maksimum CO emisyon değeri 119 ppm iken 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında bu değer 165 ppm ve 188 ppm değerlerine çıkmaktadır. Alevli yanmanın son bulması sonrası CO emisyonun belirli seviyede gözükmesi rijit poliüretan köpüklerde alevsiz yanma durumu ile açıklanabilmektedir.

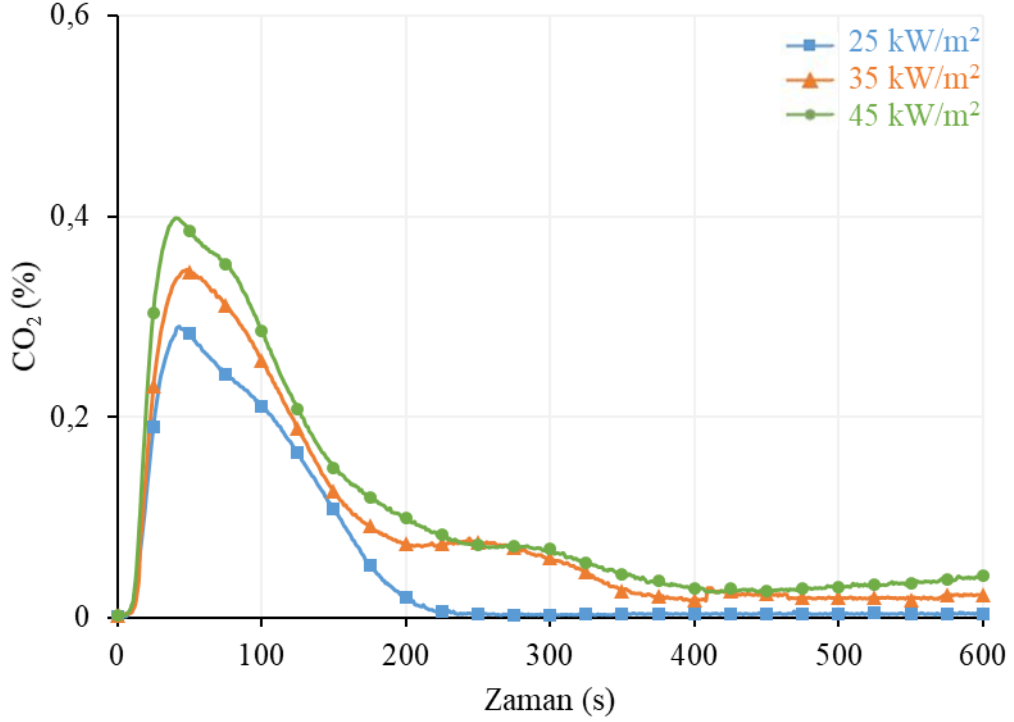
Şekil 5.26'da PUR malzemenin farklı ısı akıları altında oluşan is emisyonlarının değişimleri gösterilmektedir. Malzemenin ısı akısına maruz kalması ile hızlı bir şekilde is emisyonunda artış olduğu, ilk maksimum noktaya ulaşıldıktan sonra önce düşme ve tekrar artış görülmekte, son aşamada kademeli olarak düşme gerçekleşmektedir. Genel olarak ısı akısı artışına bağlı olarak maksimum is emisyonlarında da artış görülmektedir. PUR malzemenin farklı ısı akıları altında yanma süreçlerinde oluşan CO₂ emisyon değişimleri Şekil 5.27'de verilmektedir. CO₂ emisyonu yanan malzeme miktarına bağlı olarak değişen bir emisyon olup HRR değişimine benzer bir değişim göstermektedir. Yüksek ısı akılarında daha fazla malzemenin yanmasına bağlı olarak maksimum CO₂ emisyonları da yükselmektedir (Branca ve diğ. 2003, Xu ve Fang 2013). En yüksek CO₂ emisyonu 45 kW/m² ısı akısı altında % 0,40 olarak ölçülmüştür. Isı akısının 35 kW/m² ve 25 kW/m²'ye düşmesi ile CO₂ emisyonları % 0,35 ve % 0,29 değerlerine düşmüştür.



Şekil 5.25: PUR'un farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.



Şekil 5.26: PUR'un farklı ısı akılarındaki is değişimleri.

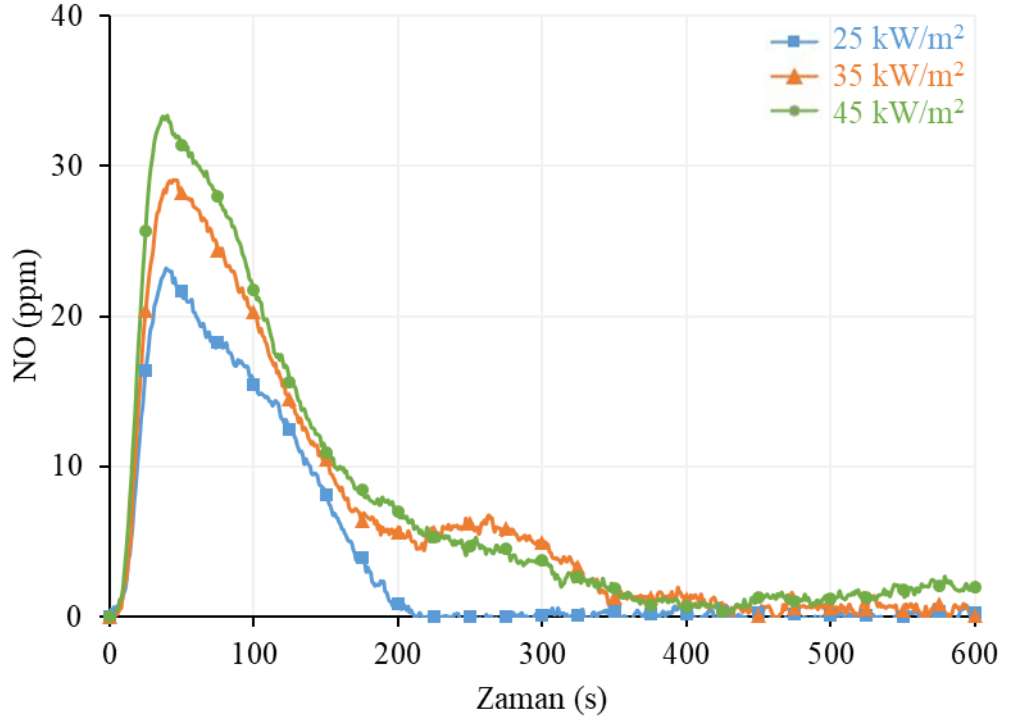


Şekil 5.27: PUR'un farklı ısı akılarındaki CO₂ değişimleri.

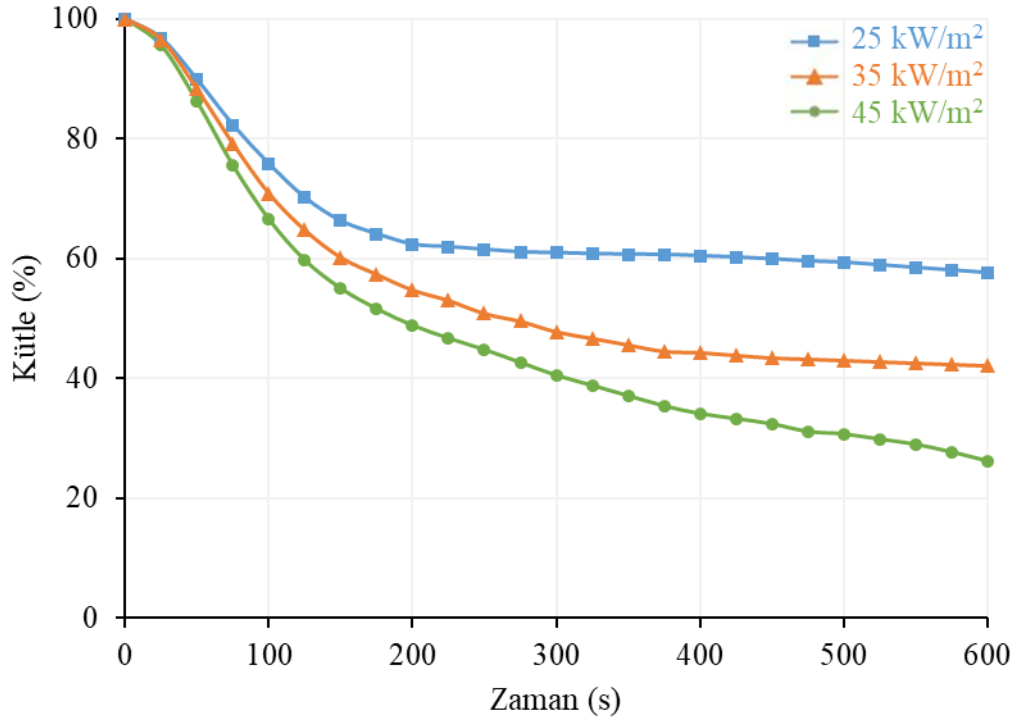
Şekil 5.28'de PUR malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları altında oluşan NO emisyonlarının değişimi verilmektedir. HRR değişimine benzer şekilde NO emisyonlarının belirli bir noktaya kadar arttığı, sonrasında düştüğü görülmektedir. Isı akısının artmasına bağlı NO emisyonlarının da arttığı görülmektedir. Bu durum yanan malzeme miktarının artışı ve sıcaklıkların daha yüksek değerlere ulaşması ile açıklanabilmektedir. Malzeme içeriğindeki azottan ve yüksek sıcaklıktan kaynaklanan NO emisyonların 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları altında maksimum değerleri sırasıyla 23 ppm, 29 ppm ve 33 ppm olarak belirlenmiştir.

PUR malzemenin konik kalorimetre testinde farklı ısı akılarına maruz kalması durumunda kütle kayıp (%) değerleri ve kütle kayıp hızları (MLR – g/s) Şekil 5.29 ve 5.30'da verilmiştir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında 600 s sonunda kalan kütle oranları sırasıyla % 57,58, % 42,17 ve % 26,23 olarak belirlenmiştir. Sert poliüretan köpüklerde alevin sönmesi sonrası alevsiz yanmanın bir müddet devam etmesi sebebiyle az da olsa kütle kaybı devam edebilmektedir.

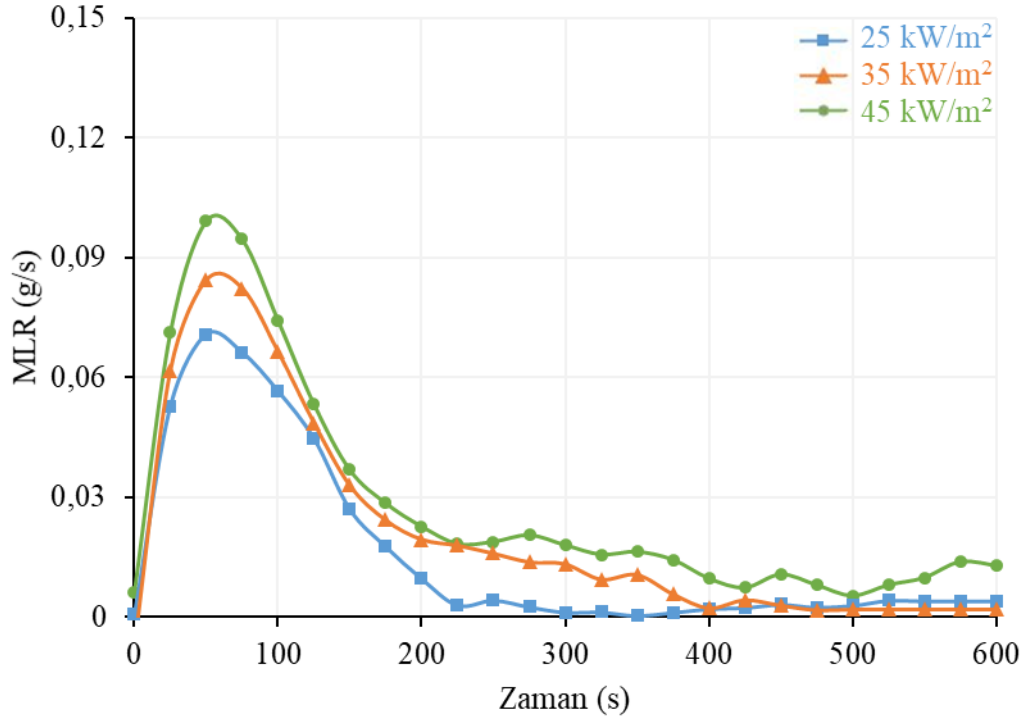
Genel olarak ısı akısının artması ile kütle kayıp miktarlarının ve kütle kayıp hızlarının (MLR) arttığı görülmektedir (Xu ve Fang 2013). 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,071 g/s, 0,084 g/s ve 0,100 g/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.28: PUR'un farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.



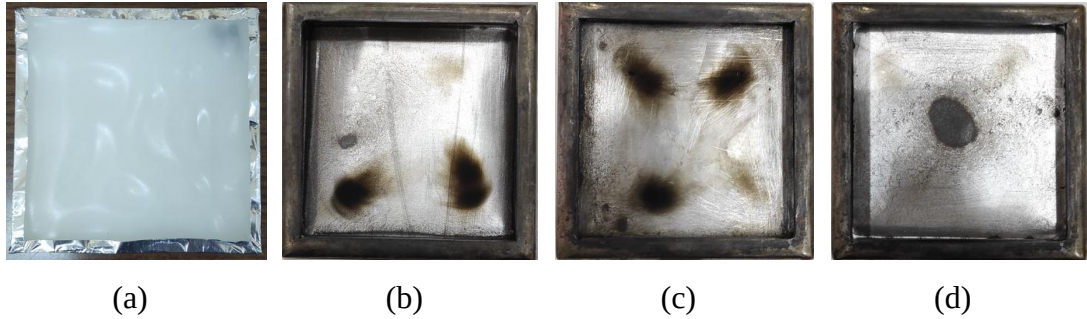
Şekil 5.29: PUR'un farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.



Şekil 5.30: PUR'un farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.

5.7.2 PP malzemenin konik kalorimetre testleri

Konik kalorimetre testi öncesi PP malzeme ile 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarındaki yanma sonrası numune kabında oluşan görüntüler Şekil 5.31'de verilmiştir. Bütün ısı akılarında numune kabı içindeki PP malzemelerin tamamen yandığı ve kalan kütle olmadığı görülmektedir. Ayrıca, 35 kW/m^2 ısı akısı altında PP malzemenin yanma anındaki bir görüntüsü Şekil 5.32'de gösterilmektedir.

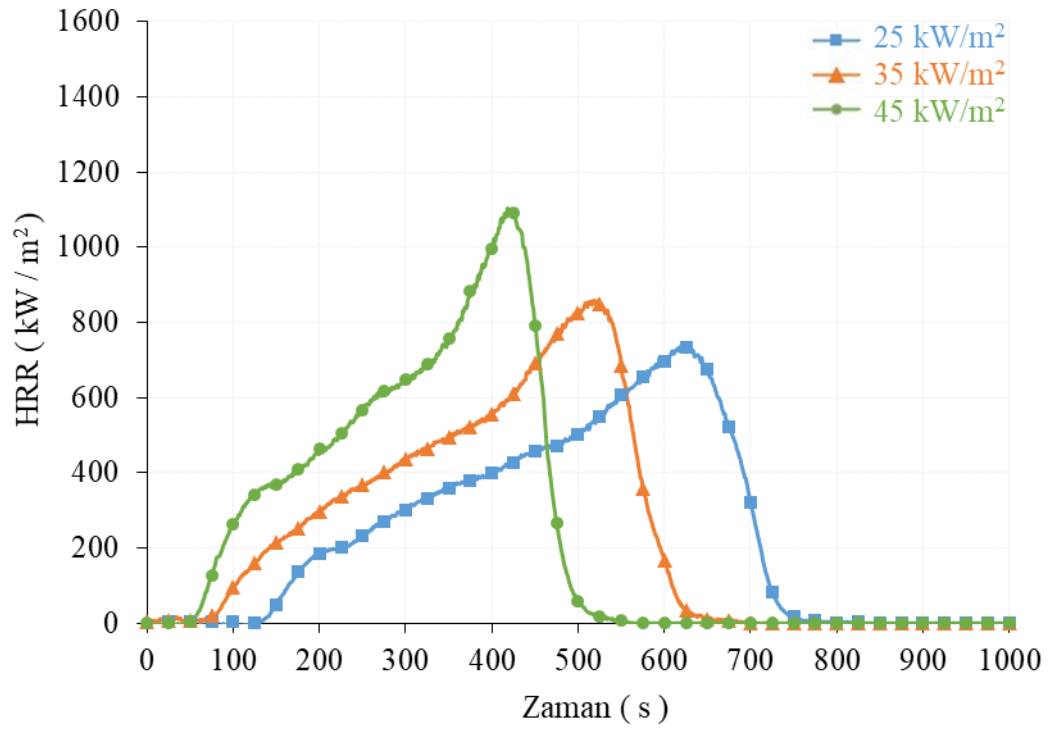


Şekil 5.31: (a) PP numunesi, (b) 25 kW/m^2 , (c) 35 kW/m^2 ve (d) 45 kW/m^2 ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.

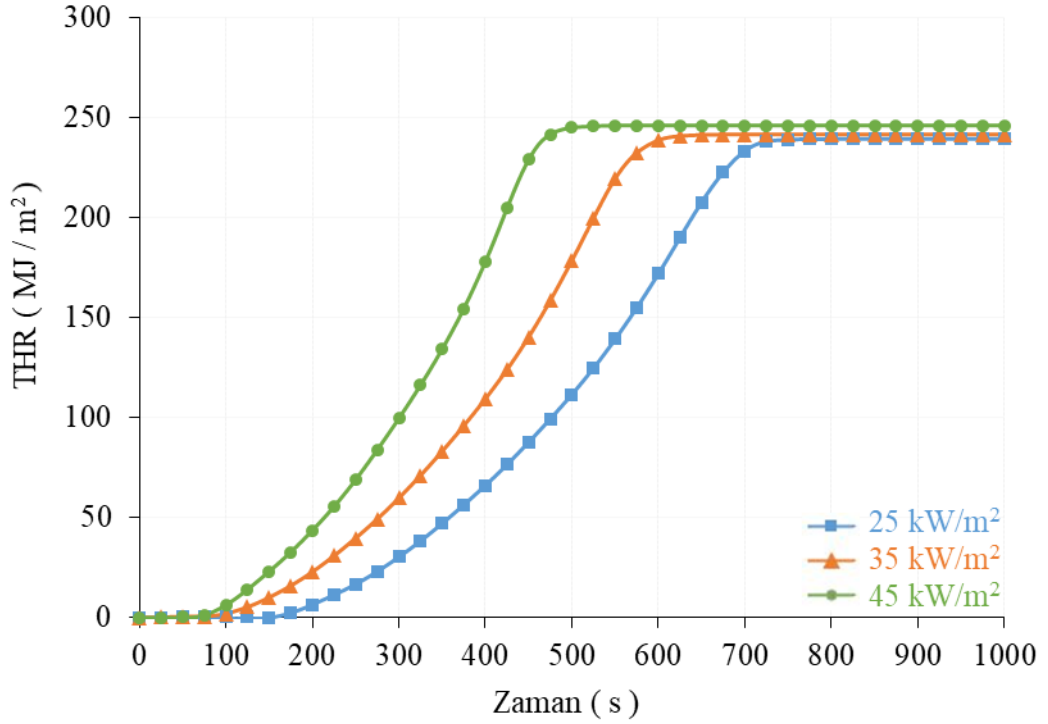


Şekil 5.32: PP'nin yanma anındaki görüntüsü.

PP malzemenin farklı ısı akıları altında HRR ve THR değişimleri Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'te verilmiştir. Ayrıca, TTI, PHRR, THR, t_{PHRR} ve m_k değerleri Tablo 5.11'de sunulmuştur.



Şekil 5.33: PP'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.



Şekil 5.34: PP'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.

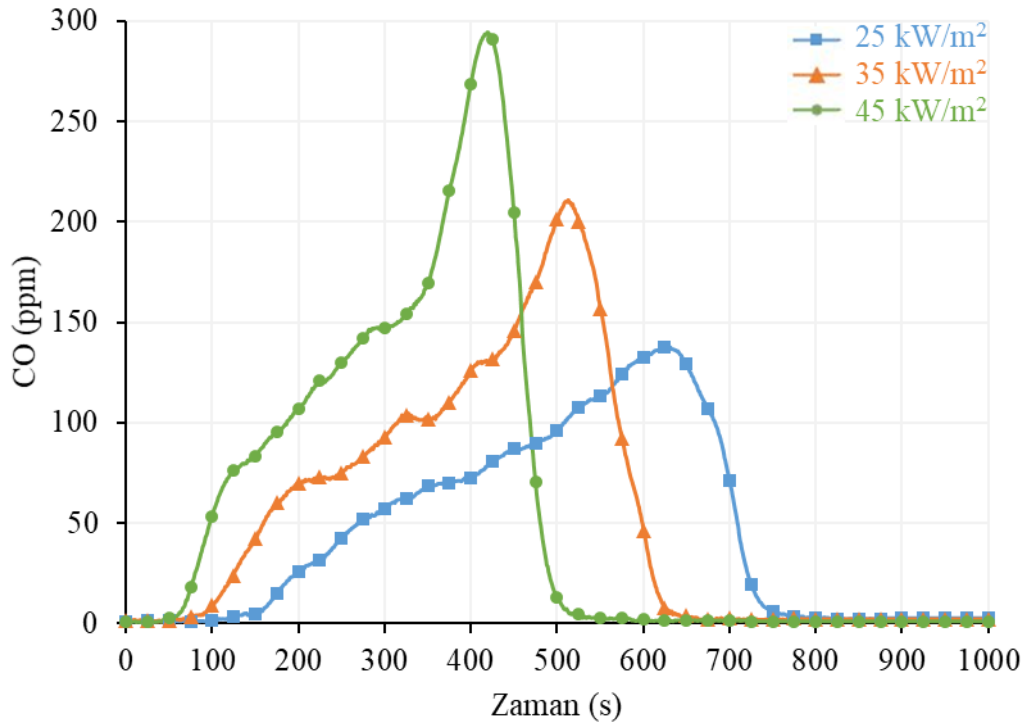
Tablo 5.11: PP malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.

Isı Akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t _{PHRR} (s)	m _k (%)
25	126	739,8	239,36	624	0
35	72	858,7	241,63	518	0
45	47	1104,3	246,02	418	0

PP malzeme, PUR malzemeden farklı bir yanma karakteristiğine sahip olup tutuşma zamanlarının arttığı, karbonlaşmış tabaka oluşmayan bir yanma ile bütün ısı akılarında numune kabındaki malzemelerin tamamen yandığı tespit edilmiştir. Isı akısı azaldıkça malzemenin tutuşma süresinin arttığı ve maksimum ısı yayılım hız değerlerinin azaldığı görülmektedir (Szustakiewicz ve diğ. 2011). PP malzeme 45 kW/m² ısı akısına maruz bırakıldığında 47. saniyede tutuşma başlamakta, 418. saniyede 1104,3 kW/m² maksimum ısı yayılım hızına ulaşmakta ve yanma yaklaşık 525 saniyede tamamlanmaktadır. 35 kW/m² ısı akısı altında ise malzeme 25 s geç tutuşarak 518. saniyede 858,7 kW/m² maksimum ısı yayılım hızı değerine ulaştıktan sonra yaklaşık 625 s içinde yanma sona ermektedir. En düşük ısı akısında (25 kW/m²) tutuşma süresi 126 s'ye çıkmış olup 624. saniyede maksimum ısı yayılım hızı değerine (739,8 kW/m²) ulaşmaktadır. Yanmanın yaklaşık 750. saniyede sona erdiği görülmektedir. Isı akısının artışı ile THR değerlerinde de az da olsa bir artış tespit

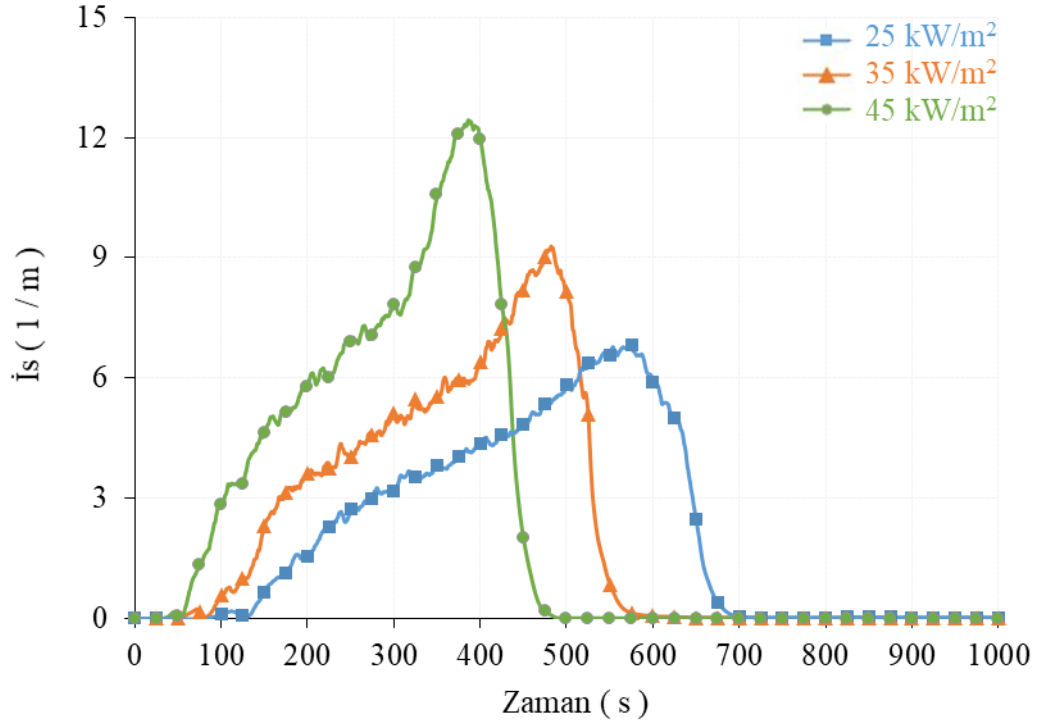
edilmiştir. 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki THR değerleri 25 kW/m² ısı akısındaki değerden sırasıyla % 0,9 ve % 2,8 fazla olarak belirlenmiştir.

Karbonmonoksit (CO) emisyonlarının 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında zamana bağlı değişimleri Şekil 5.35'te gösterilmiştir. CO, karbon kaynaklı yakıtların yanması esnasında açığa çıkan eksik yanma ürünü ve zehirleyici bir gazdır. 45 kW/m² ısı akısında tutuşma ile birlikte CO emisyonu artmaya başlamış, 425. saniyede 294 ppm değerle en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 35 kW/m² ve 25 kW/m² ısı akılarında ise sırasıyla yaklaşık 520. ve 625. saniyelerde maksimum CO emisyon değerleri 211 ppm ve 138 ppm değerlerine düşmüştür. CO emisyonları, maksimum değerlerine ulaştıktan sonra hızlı bir şekilde düşerek sıfırlanmıştır.



Şekil 5.35: PP'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.

Şekil 5.36'da gösterilen is emisyon değişimleri de CO değişimlerine benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, is oluşumunun başlangıcının ve maksimum is oluşum zamanlarının CO emisyonuna göre daha erken olduğu tespit edilmiştir.



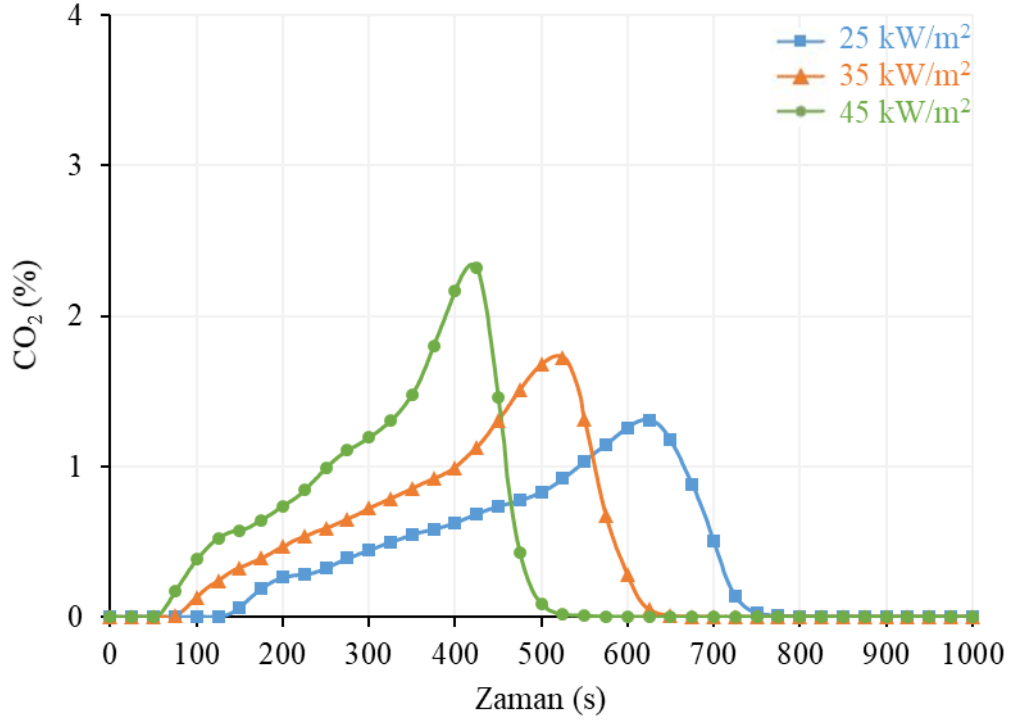
Şekil 5.36: PP'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.

PP malzemenin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında yanma testlerinde CO_2 emisyonlarının değişimleri Şekil 5.37'de verilmiştir. CO_2 doğrudan malzemenin yanma miktarına bağlı olarak değiştiği için değişimler HRR değişimlerine oldukça benzerlik göstermektedirler. Isı akısı azaldıkça malzemenin geç tutuşması ve daha düşük PHRR değerlerine erişilmesi CO_2 değişiminde birebir görülmektedir. 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında ulaşılan maksimum CO_2 emisyon değerleri sırasıyla % 1,31, % 1,74 ve % 2,34 olarak belirlenmiştir.

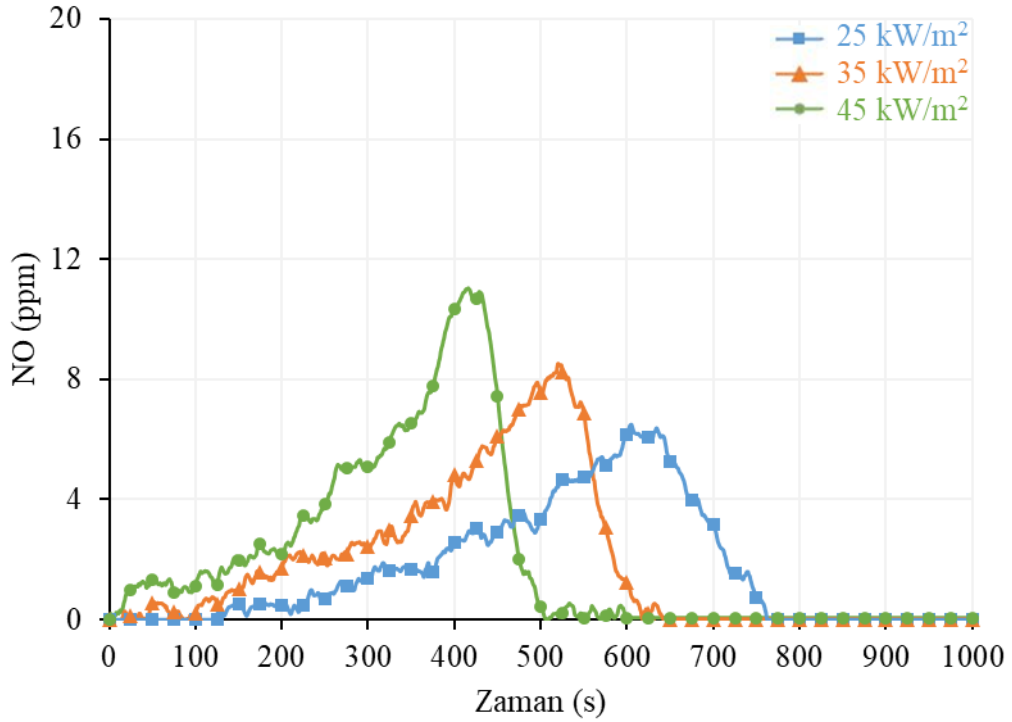
Şekil 5.38'de farklı ısı akılarında NO emisyonlarının değişimleri verilmiştir. PP malzemenin yapısında azot olmamasına rağmen noktasal sıcaklıkların yükselmesine bağlı olarak termal NO oluşumu gerçekleştiği görülmektedir. Isı akısı arttıkça maksimum NO değerlerinde artış görülmektedir. En yüksek NO emisyonu 45 kW/m^2 ısı akısında 11 ppm olarak ölçülürken ısı akısının 35 kW/m^2 ve 25 kW/m^2 olması durumlarında bu değer 9 ve 7 ppm'in altına düşmüştür.

Şekil 5.39 ve 5.40'ta PP malzemenin kütle kaybı ve kütle kayıp hızları (MLR) verilmektedir. Isı akısı azaldıkça tutuşmanın gecikmesi ve yanmanın daha geç sürede tamamlanmasının yansıması zamana bağlı kütle kayıp miktarlarında da görülmüştür.

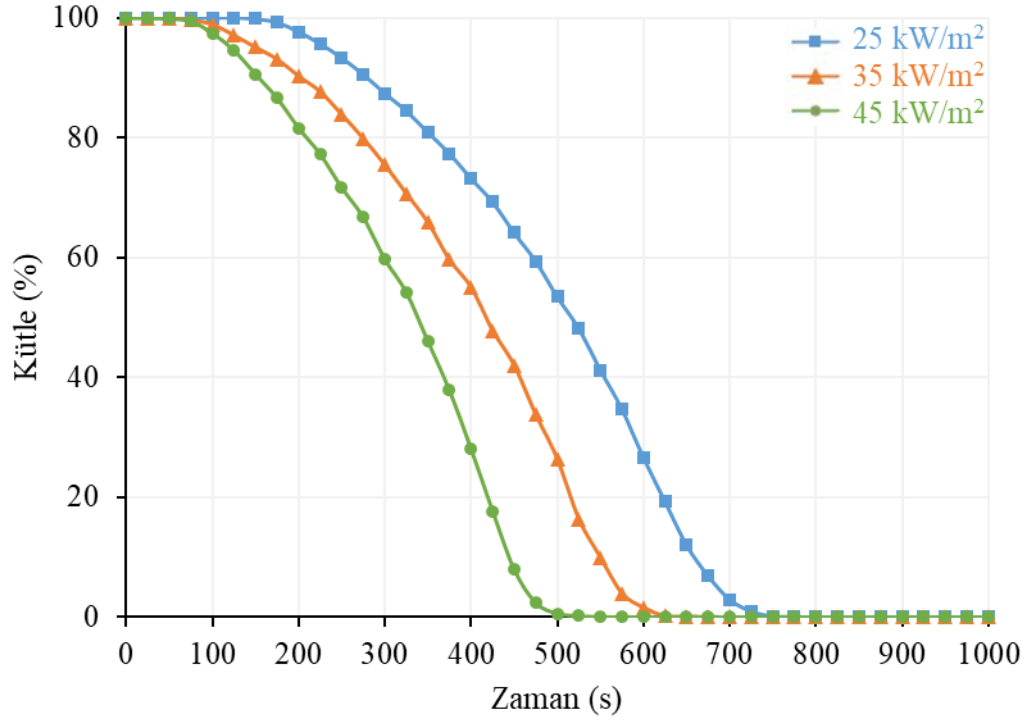
Isı akısının artması ile kütle kayıp miktarlarının ve kütle kayıp hızlarının arttığı tespit edilmiştir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,16 g/s, 0,18 g/s ve 0,21 g/s olarak tespit edilmiştir.



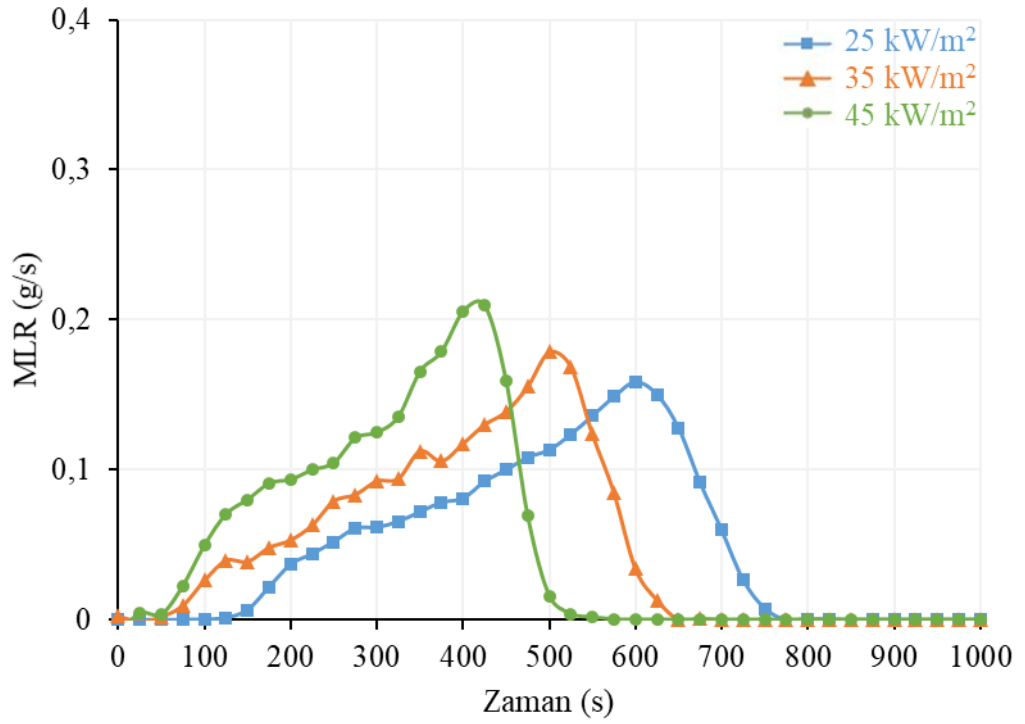
Şekil 5.37: PP'nin farklı ısı akılarındaki CO₂ değişimleri.



Şekil 5.38: PP'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.



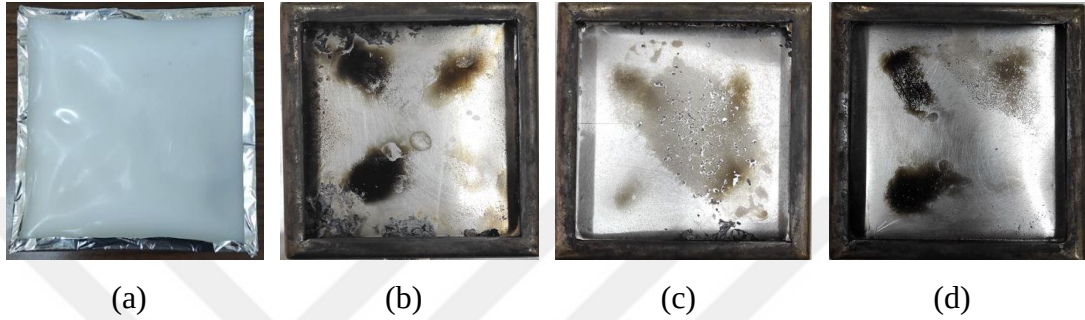
Şekil 5.39: PP'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.



Şekil 5.40: PP'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.

5.7.3 HDPE malzemenin konik kalorimetre testleri

Konik kalorimetre testi öncesi HDPE malzeme ile 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarındaki yanma sonrası numune kabında oluşan görüntüler Şekil 5.41’de verilmiştir. Bütün ısı akılarında numune kabı içindeki HDPE malzemelerin tamamen yandığı ve kalan kütle olmadığı görülmektedir. Ayrıca, 35 kW/m^2 ısı akısı altında HDPE malzemenin yanma anındaki bir görüntüsü Şekil 5.42’de gösterilmektedir.

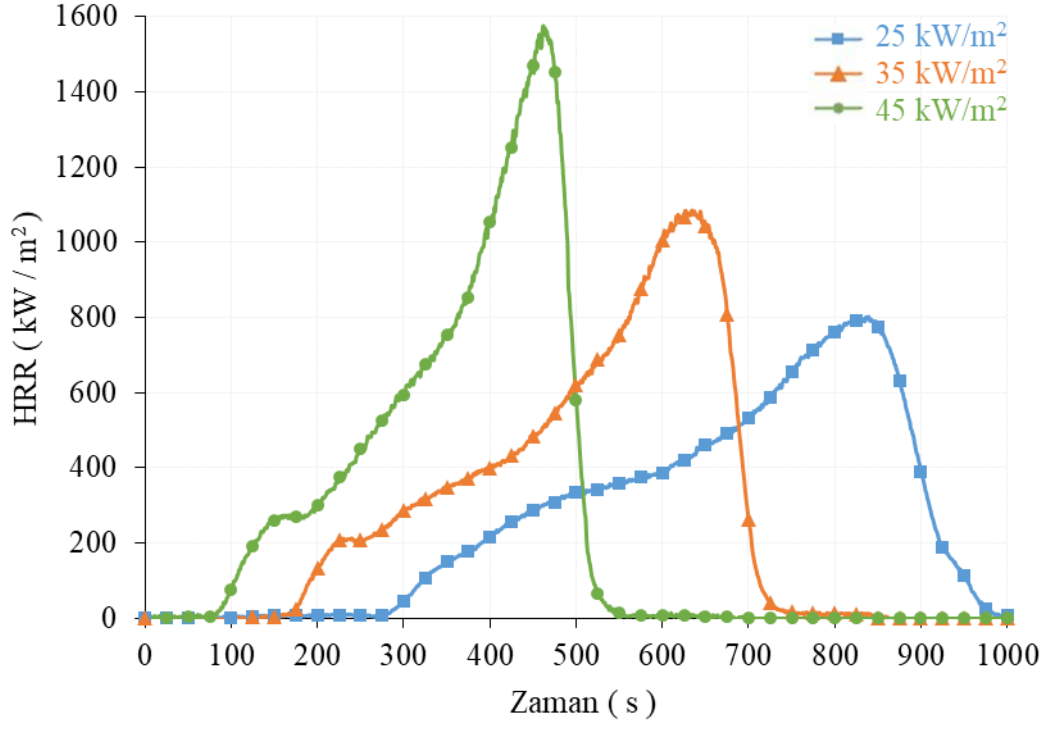


Şekil 5.41: (a) HDPE numunesi, (b) 25 kW/m^2 , (c) 35 kW/m^2 ve (d) 45 kW/m^2 ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.

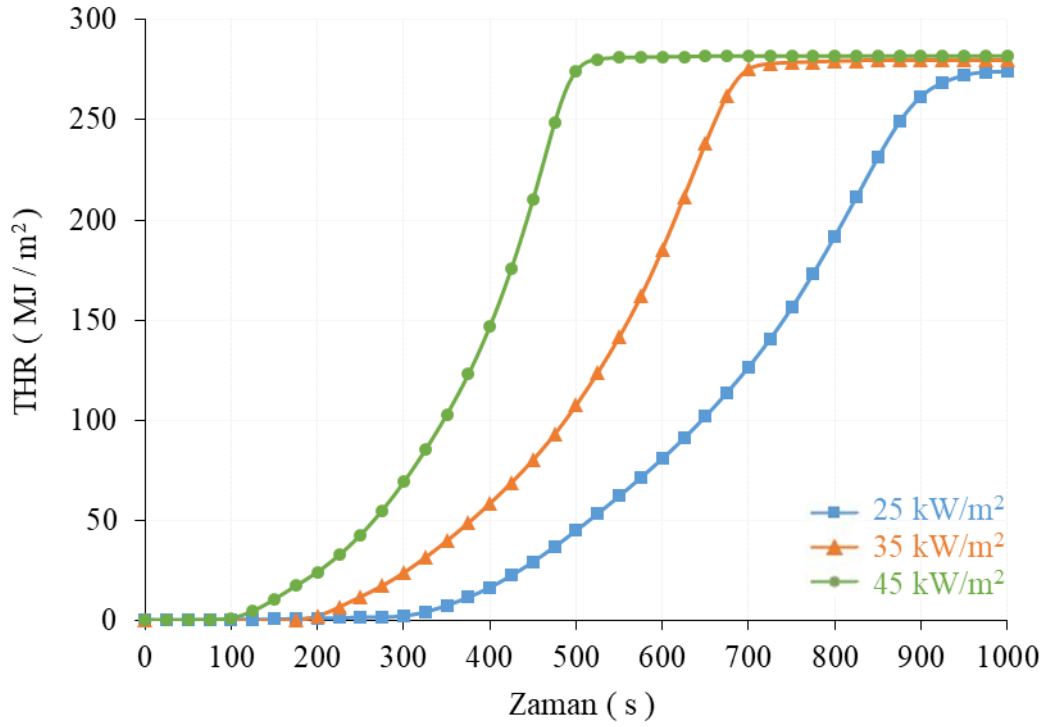


Şekil 5.42: HDPE’nin yanma anındaki görüntüsü

Şekil 5.43 ve Şekil 5.44’te HDPE malzemenin farklı ısı akıları altında HRR ve THR değişimleri verilmiştir. HDPE malzeme, PP malzeme gibi karbonlaşmış tabaka oluşturmadan bütün ısı akıları altında tamamen yanmıştır. Isı akısı arttıkça malzemenin tutuşma süresinin azaldığı ve maksimum ısı yayılım hız değerlerinin arttığı görülmektedir (Luche ve diğ. 2012, Lyon ve Crowley 2021).



Şekil 5.43: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.



Şekil 5.44: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.

Tablo 5.12’de malzemenin farklı ısı akıları altında konik kalorimetre testi sonrası elde edilen TTI, PHRR, THR, t_{PHRR} ve m_k değerleri verilmiştir.

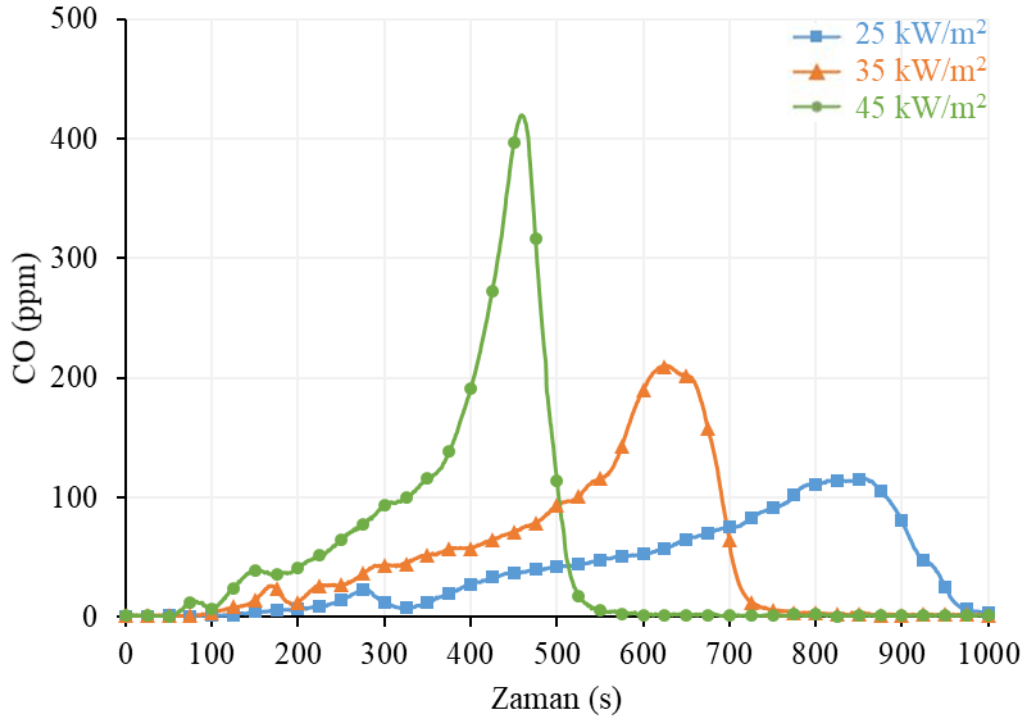
Tablo 5.12: HDPE malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.

Isı Akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t_{PHRR} (s)	m_k (%)
25	272	802,2	274,21	839	0
35	164	1085,1	279,90	634	0
45	77	1575,8	282,01	462	0

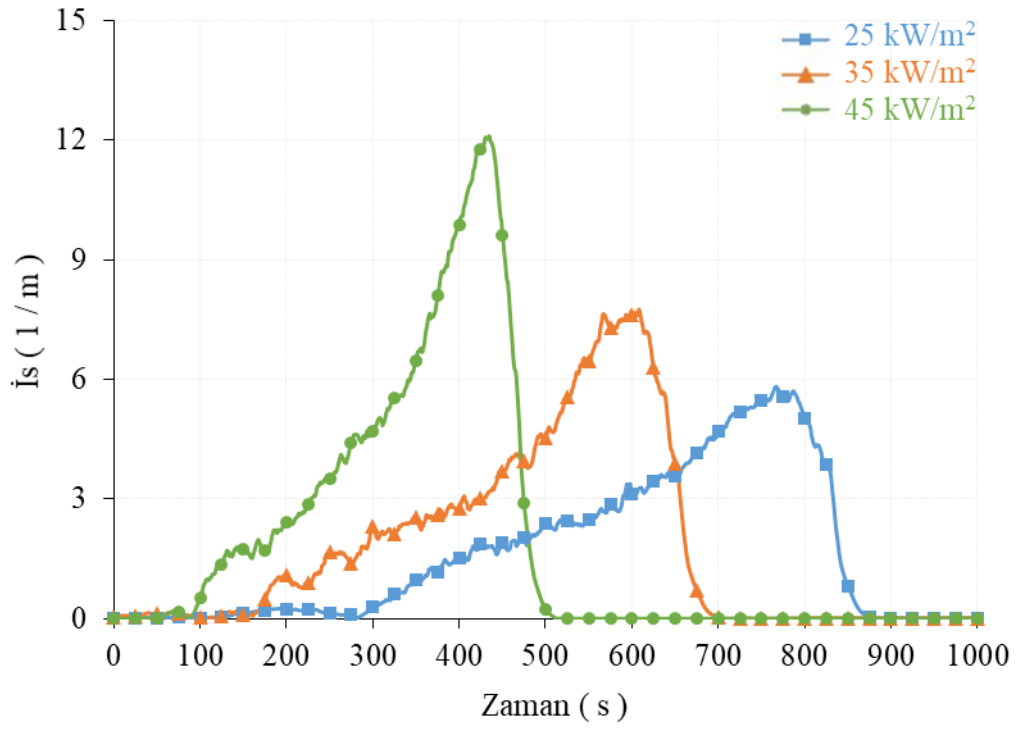
HDPE malzeme 25 kW/m² ısı akısına maruz bırakıldığında 272. saniyede tutuşma başlamakta, 839. saniyede 802,2 kW/m² maksimum ısı yayılım hızına ulaşmakta ve yanma yaklaşık 1000 saniyede tamamlanmaktadır. 35 kW/m² ısı akısı altında ise malzeme 108 s erken tutuşarak 634. saniyede 1085,1 kW/m² maksimum ısı yayılım hızı değerine ulaştıktan sonra yaklaşık 750 saniye içinde yanma sona ermektedir. En yüksek ısı akısında (45 kW/m²) tutuşma süresi 77 s’ye inmiş olup 462. saniyede maksimum ısı yayılım hızı değerine (1575,8 kW/m²) ulaşılmaktadır. Yanmanın yaklaşık 550. saniyede sona erdiği görülmektedir. Uygulanan ısı akısı arttıkça THR değerlerinde çok küçük miktarlarda artış olduğu belirlenmiştir.

Şekil 5.45’te 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında zamana bağlı CO emisyonlarının değişimleri verilmiştir. 25 kW/m² ısı akısında tutuşma ile birlikte CO emisyonu artmaya başlamış ve oldukça düşük hızda artış devam ederek ancak 856. saniyede maksimum değere (116 ppm) ulaşılabilmiştir. 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında ise sırasıyla yaklaşık 625. ve 459. saniyelerde maksimum CO emisyon değerleri 211 ppm ve 420 ppm değerlerine yükselmiştir. Şekil 5.46’da gösterilen is emisyon değişimleri de CO değişimlerine benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, maksimum is oluşumları, maksimum CO oluşumlarından daha önce gerçekleştiği tespit edilmiştir.

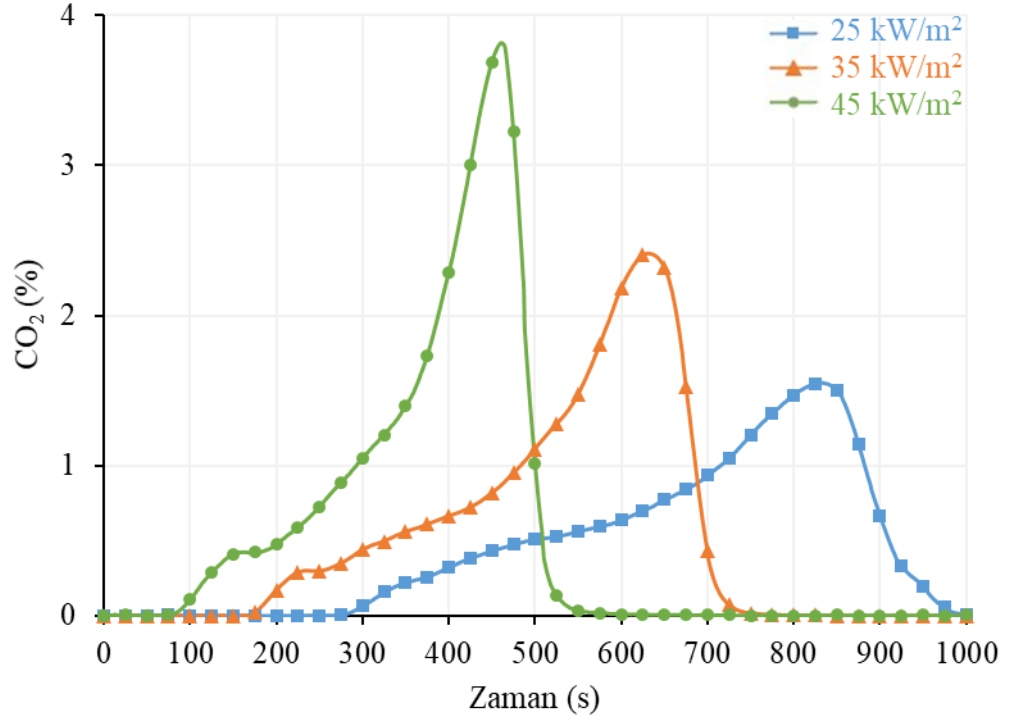
Şekil 5.47’de HDPE malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında CO₂ emisyonlarının değişimleri verilmiştir. Isı akısı arttıkça malzemenin erken tutuşması ve daha yüksek PHRR değerlerine erişilmesi CO₂ değişiminde birebir görülmektedir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında ulaşılan maksimum CO₂ emisyon değerleri sırasıyla % 1,55, % 2,41 ve % 3,82 olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.45: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.



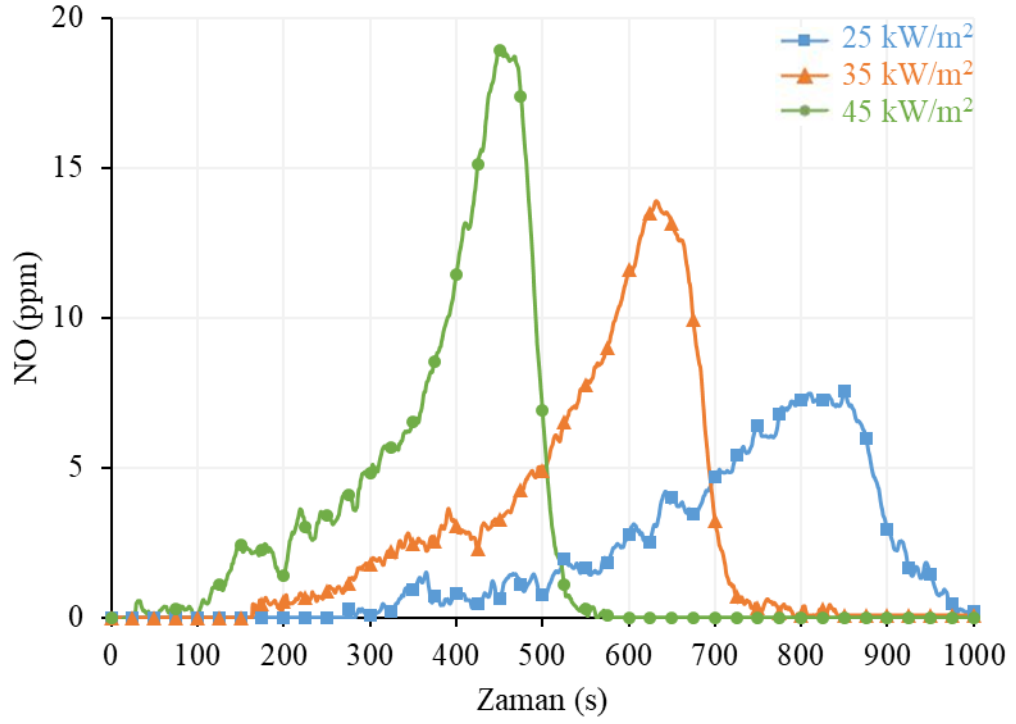
Şekil 5.46: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.



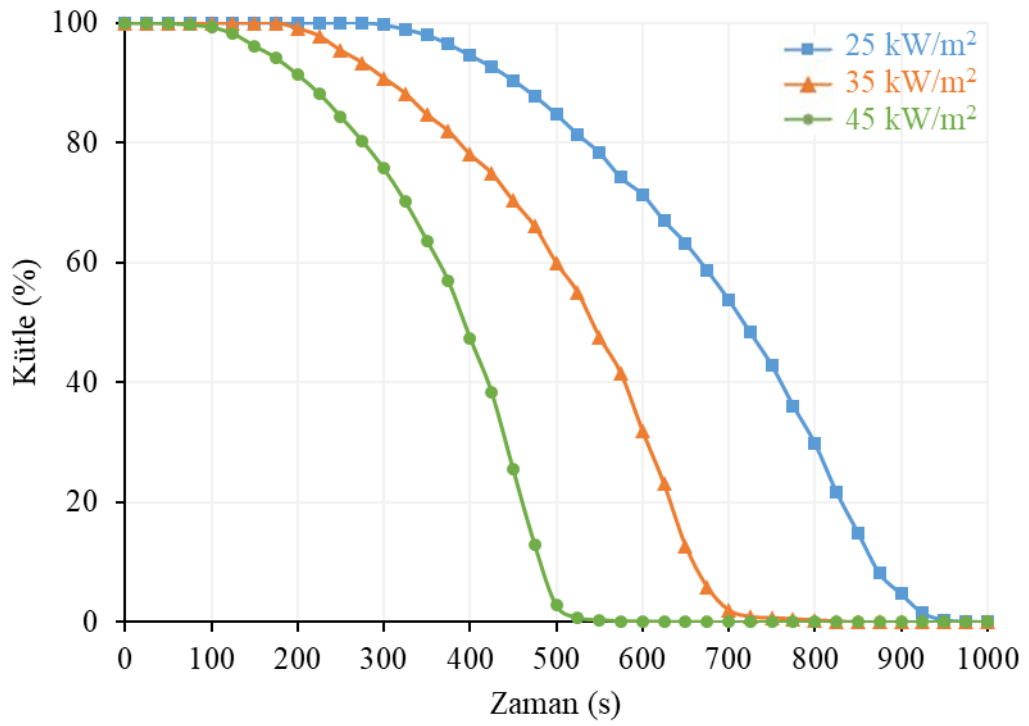
Şekil 5.47: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki CO₂ değişimleri.

Farklı ısı akılarında NO emisyonlarının değişimleri Şekil 5.48'de verilmiştir. HDPE malzemenin yanma sırasında bölgesel yüksek sıcaklıkların termal NO oluşumuna neden olduğu tespit edilmiştir. Genel olarak ısı akısı artışı ile NO oluşum hızı da artmakta, maksimum NO emisyonu daha kısa sürede gerçekleşmekte ve maksimum NO artmaktadır. En düşük maksimum NO emisyonu 25 kW/m² ısı akısında yaklaşık 8 ppm olarak ölçülürken ısı akısının 35 kW/m² ve 45 kW/m² olması durumlarında bu değerler 14 ppm ve 19 ppm'e yükselmektedir.

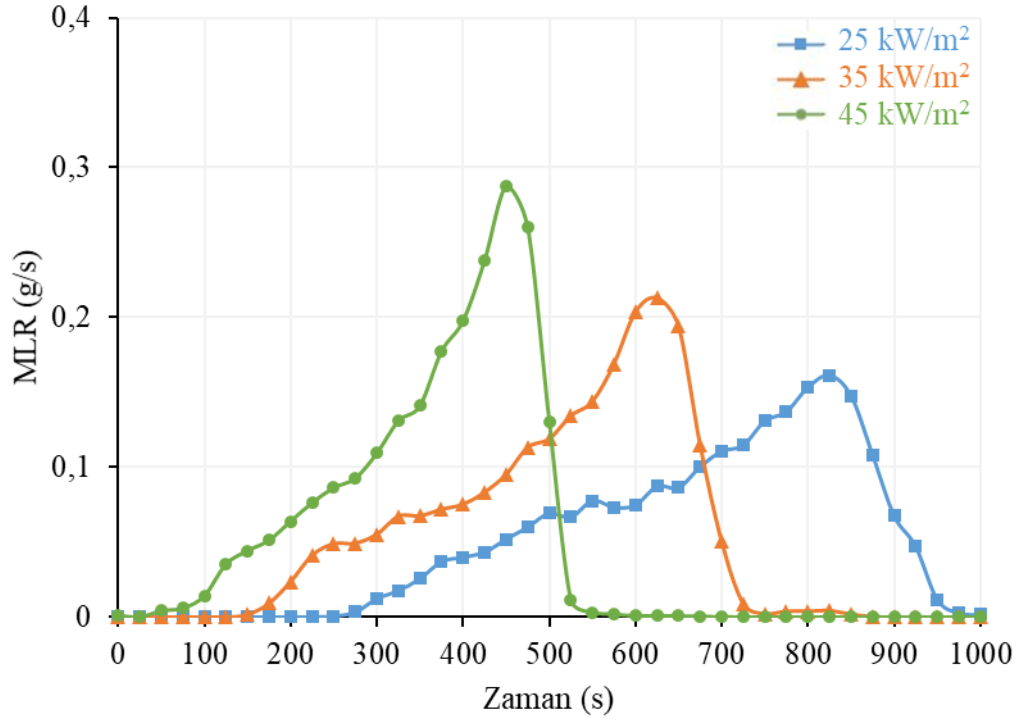
Şekil 5.49 ve 5.50'de HDPE malzemenin kütle kayıpları ve kütle kayıp hızları (MLR) verilmektedir. Isı akısı arttıkça tutuşmanın daha erken olması ve yanmanın daha erken sürede tamamlanması durumu kütle kaybında da görülmektedir. Isı akısının artması ile kütle kayıpları daha erken zamanlarda görülmektedir. Ayrıca ısı akısının artışına bağlı olarak kütle kayıp hızlarının da arttığı belirlenmiştir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,16 g/s, 0,21 g/s ve 0,29 g/s olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.48: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.



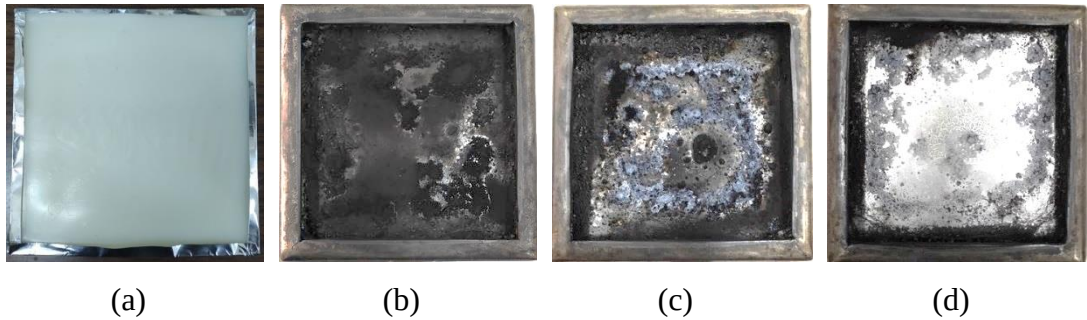
Şekil 5.49: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.



Şekil 5.50: HDPE'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.

5.7.4 ABS malzemenin konik kalorimetre testleri

ABS malzemenin konik kalorimetre testi için hazırlanan numunesi ile 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki yanma sonrası oluşan görüntüleri Şekil 5.51'de verilmiştir. Ayrıca, ABS malzemenin 35 kW/m² ısı akısı altında yanma anındaki görüntüsü Şekil 5.52'de gösterilmektedir.

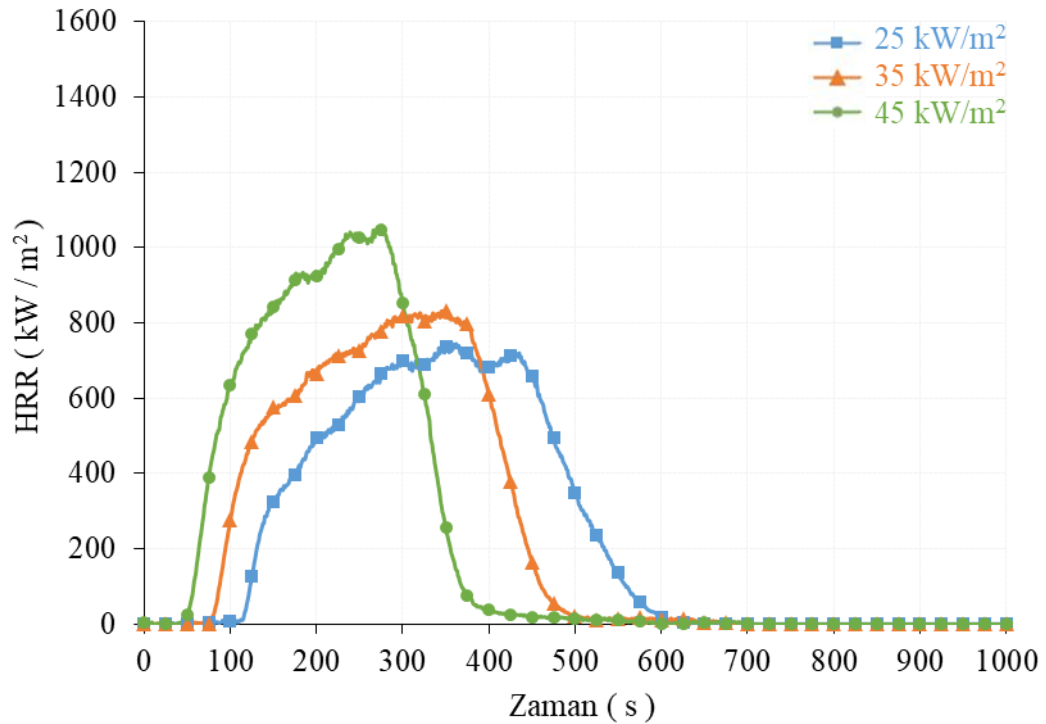


Şekil 5.51: (a) ABS numunesi, (b) 25 kW/m², (c) 35 kW/m² ve (d) 45 kW/m² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.

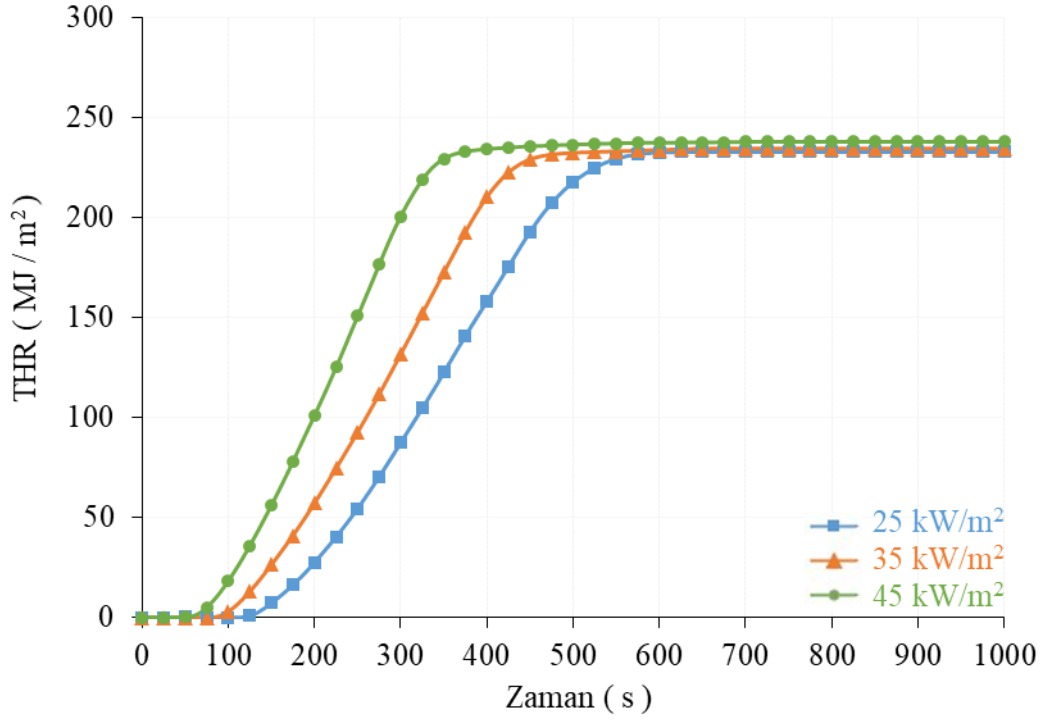


Şekil 5.52: ABS'nin yanma anındaki görüntüsü.

Şekil 5.53 ve 5.54'te HRR ve THR değerlerinin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Isı akısı arttıkça PHRR değerleri artmakta ve malzemenin TTI değerleri azalmaktadır (Despinasse ve Schartel 2012, Hermouet ve diğ. 2021). Malzeme 25 kW/m^2 ısı akısına maruz bırakıldığında 113. saniyede tutuşma başlamakta, 356. saniyede $748,3 \text{ kW/m}^2$ PHRR değerine ulaşmakta ve yanma yaklaşık 600. saniyede sona ermektedir.



Şekil 5.53: ABS'nin farklı ısı akılarındaki HRR değişimleri.



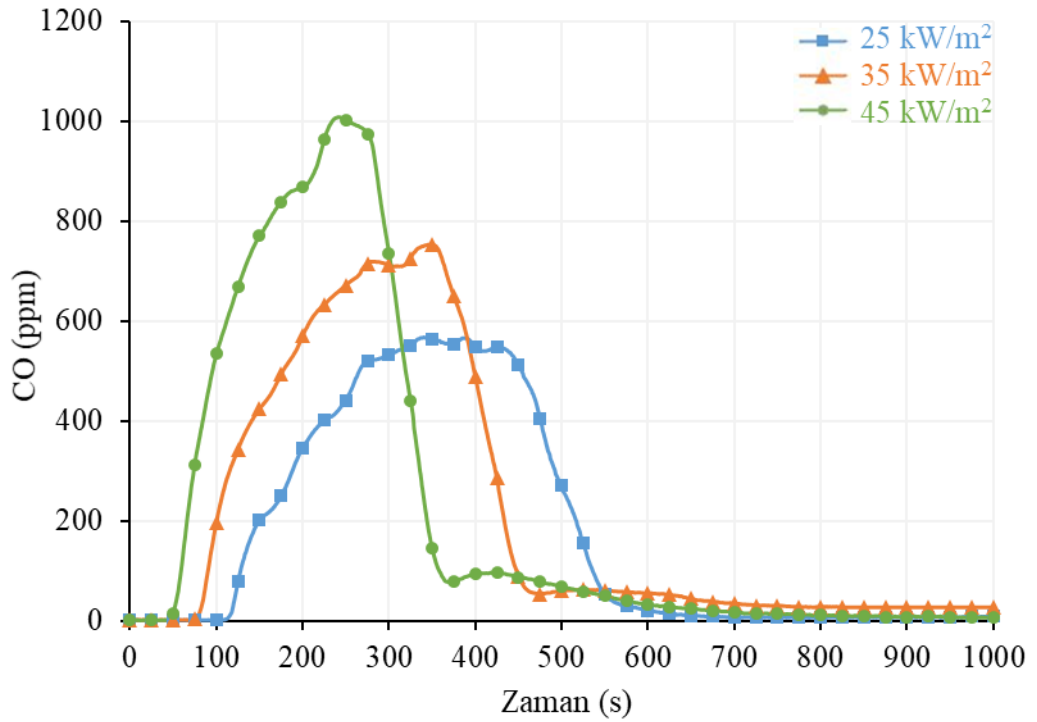
Şekil 5.54: ABS'nin farklı ısı akılarındaki THR değişimleri.

Isı akısı 35 kW/m² seviyesine çıkarıldığında malzeme 75. saniyede tutuşmaya başlayarak 347. saniyede 832,5 kW/m² PHRR değerine ulaştıktan sonra yaklaşık 525. saniyede yanma sona ermektedir. Isı akısı 45 kW/m² seviyesine çıktığında ise tutuşma 48. saniyede başlamış, 276. saniyede 1058,8 kW/m² PHRR değerine ulaşmış ve yaklaşık 450. saniyede yanmanın sona erdiği görülmektedir. ABS'nin 25 kW/m² ve 35 kW/m² ısı akılarındaki PHRR değerleri karşılaştırıldığında % 11,3 , 25 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki PHRR değerleri karşılaştırıldığında ise % 41,5 oranında artışlar gerçekleştiği tespit edilmiştir. ABS malzemenin farklı ısı akılarındaki TTI, PHRR, THR, t_{PHRR} ve m_k değerleri belirlenmiş olup bu değerler Tablo 5.13'de verilmiştir. Isı akısının artışı ile THR değerlerinde düşük oranlarda artışlar tespit edilmiştir. Isı akısı 25 kW/m²'den 35 kW/m²'ye çıkınca THR değerinde % 0,79 ve 35 kW/m²'den 45 kW/m²'ye çıkınca THR değerinde % 1,40 artış olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.13: ABS malzemenin konik kalorimetre test sonuçları.

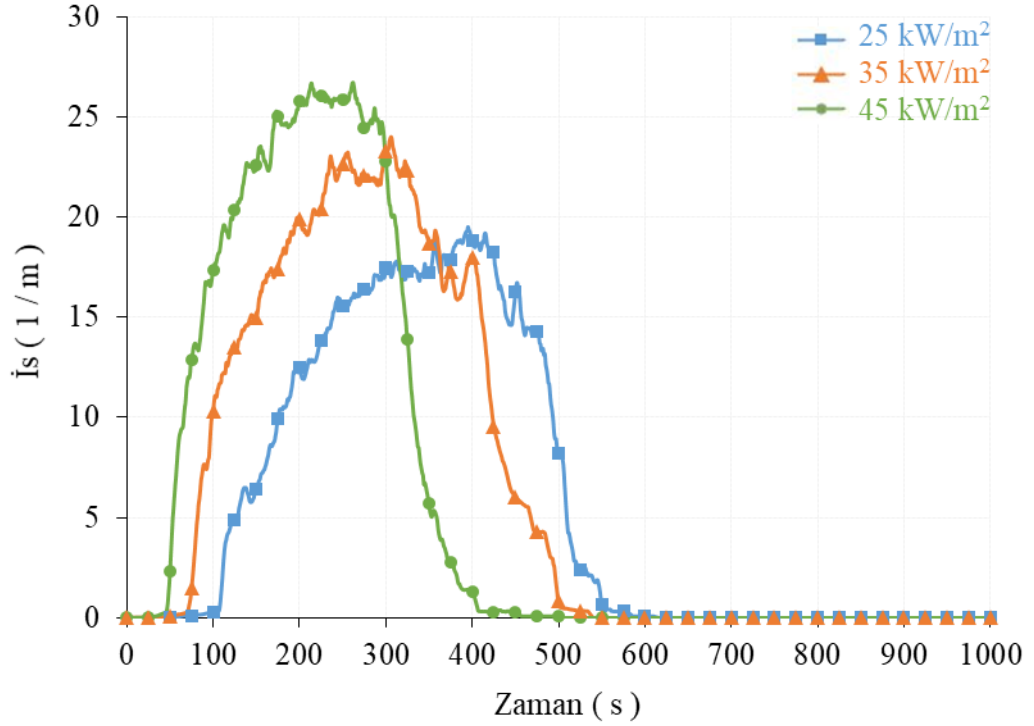
Isı Akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t _{PHRR} (s)	m _k (%)
25	113	748,3	232,74	356	2,84
35	75	832,5	234,57	347	1,16
45	48	1058,8	237,85	276	0,15

CO emisyonlarının 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarına göre değişimleri Şekil 5.55'te gösterilmiştir. Karbonmonoksit, karbon kaynaklı yakıtların yanması esnasında açığa çıkan zehirleyici bir gaz olarak bilinmektedir. Isı akısının azalmasıyla maksimum CO emisyon değerlerinin azaldığı belirlenmiştir (Hermouet ve diğ. 2021). CO emisyon değişimleri incelendiğinde, 25 kW/m^2 ısı akısında yaklaşık 100. s'den sonra CO emisyonu artmaya başlamış, 340. s'de 567 ppm değerle en yüksek seviyeye ulaşmıştır. 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında ise sırasıyla yaklaşık 75. ve 50. s'den sonra artmaya başlayarak, % 32,7 artışla 348. s'de 753 ppm ve 242. s'de ise % 77,7 oranında artışla 1008 ppm ile maksimum değerlere ulaştığı belirlenmiştir.



Şekil 5.55: ABS'nin farklı ısı akılarındaki CO değişimleri.

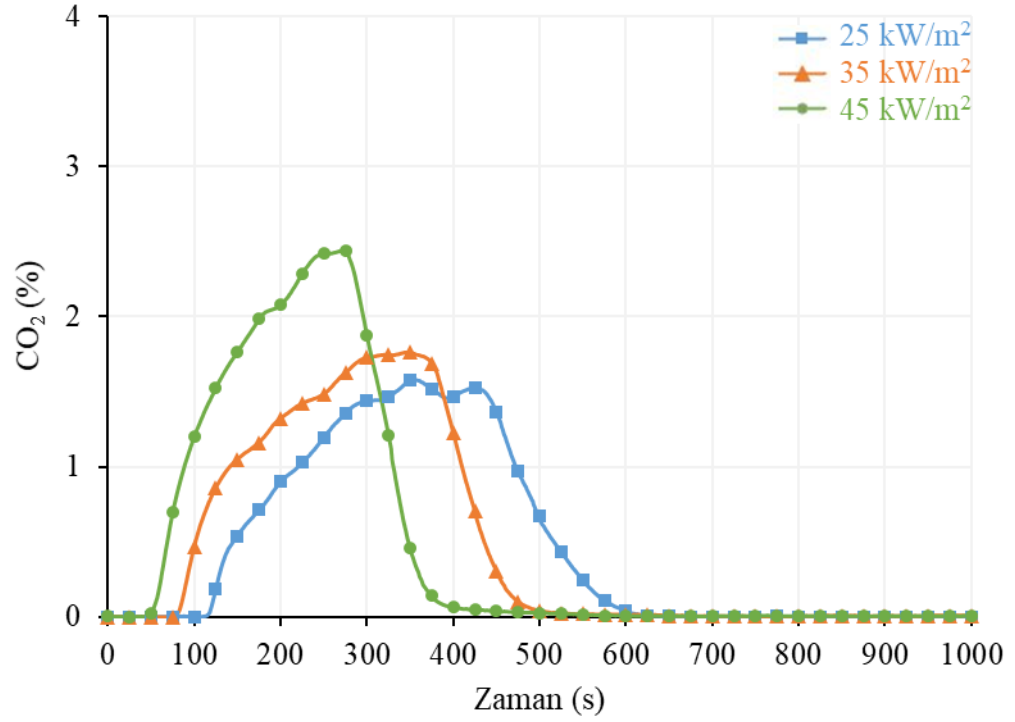
Şekil 5.56'da is emisyonlarının 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında değişimleri verilmiştir. İs emisyonu da CO emisyonu gibi yanma sırasında oluşan zararlı bir emisyondur. 25 kW/m^2 ısı akısında is emisyonu yaklaşık 100. saniyeden sonra artmaya başlamış ve 396. saniyede $19,3 \text{ m}^{-1}$ maksimum değerine ulaşmıştır. 35 kW/m^2 ısı akısında yaklaşık 75. saniyeden sonra artış başlamış, 306. saniyede $24,0 \text{ m}^{-1}$ seviyesine çıkmıştır. 45 kW/m^2 ısı akısında ise yaklaşık 50. saniyeden sonra artış yaşanırken 262. saniyede $26,7 \text{ m}^{-1}$ değeriyle en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



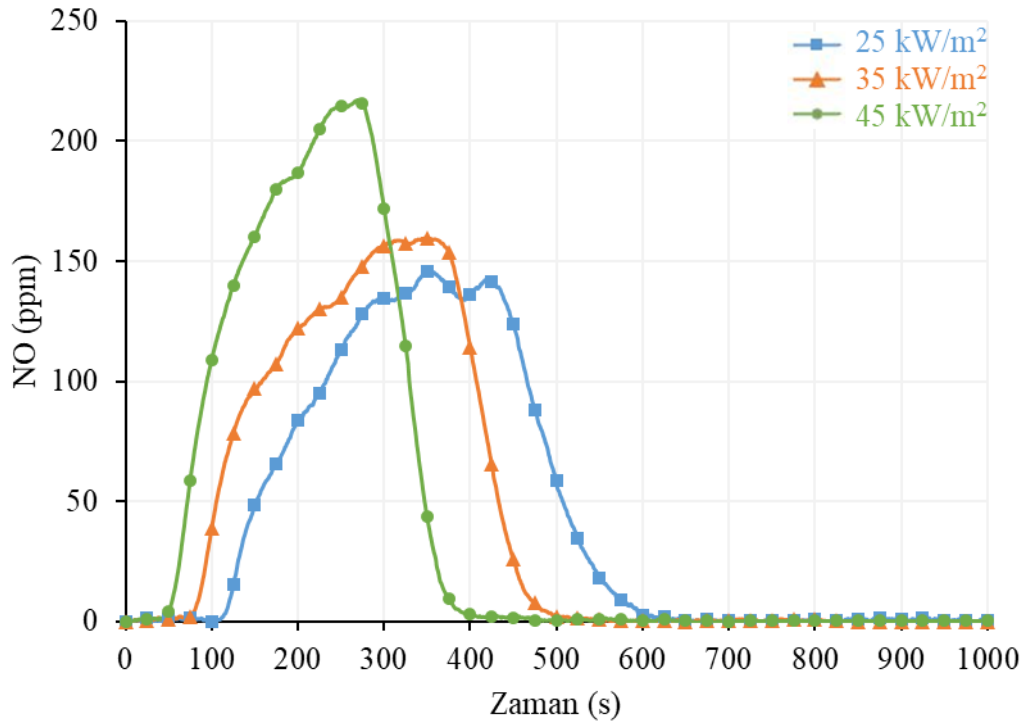
Şekil 5.56: ABS'nin farklı ısı akılarındaki is değişimleri.

CO₂ emisyonlarının 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarına göre değişimleri Şekil 5.57'de verilmiştir. Karbondioksit eğrileri malzemenin yanma miktarını gösterdiği için HRR eğrilerine benzemektedir. Isı akısı azaldıkça maksimum CO₂ emisyon değerleri azalmaktadır (Hermouet ve diğ. 2021). CO₂ oluşumu, 25 kW/m² ısı akısında yaklaşık 100. saniyeden sonra başlamakta, yaklaşık 600. saniyede sona ermektedir. Maksimum CO₂ emisyon değeri 357. saniyede % 1,58 olarak ölçülmüştür. Isı akısı 35 ve 45 kW/m² seviyelerine çıkarıldığında CO₂ çıkışı sırasıyla yaklaşık 75. ve 50. saniyelerden sonra başlamış, 348. saniyede % 1,76 ve 271. saniyede % 2,44'lük maksimum değerler ölçülmüştür.

Şekil 5.58'de NO emisyonunun üç farklı ısı akısındaki değişimleri verilmiştir. Isı akısının artmasıyla birlikte maksimum NO emisyon değerlerinde artış görülmektedir. NO emisyon değerleri 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları için sırasıyla yaklaşık 100, 75 ve 50. saniyelerden sonra artmaya başlamış ve 352, 348 ve 271. saniyelerde maksimum değerler 146 ppm, 160 ppm ve 217 ppm olarak ölçülmüştür. Bu değerler PP ve HDPE'nin maksimum NO değerlerinden oldukça yüksektir. Bu artışın sebebinin ABS içindeki azot içeriğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

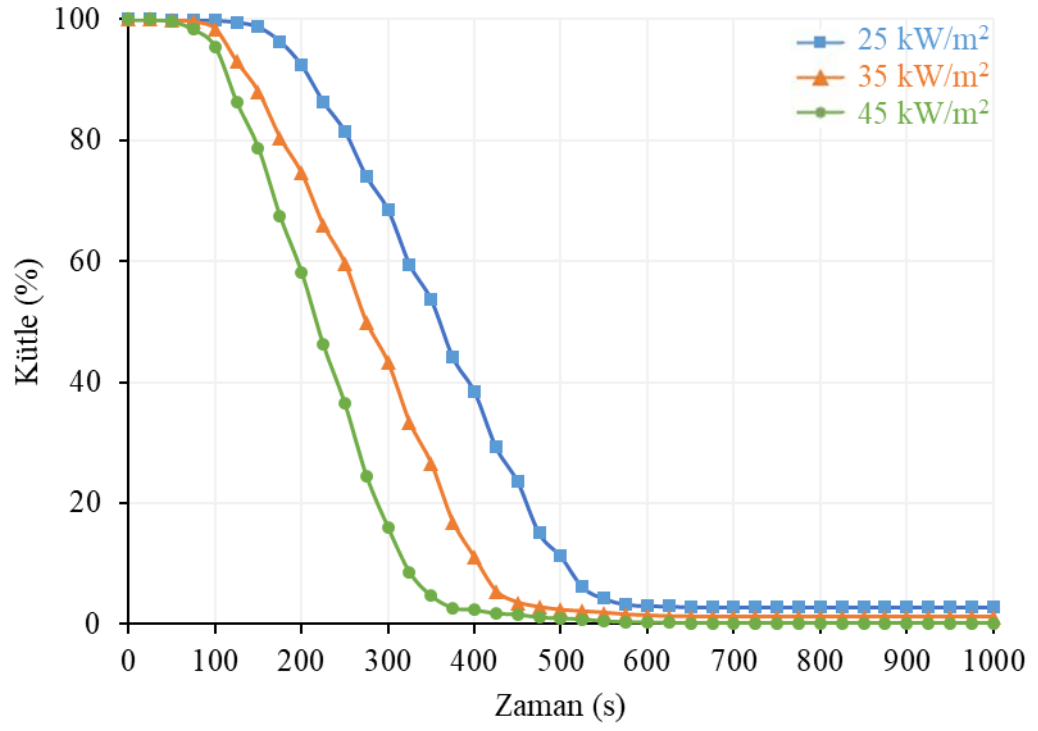


Şekil 5.57: ABS'nin farklı ısı akılarındaki CO₂ değişimleri.

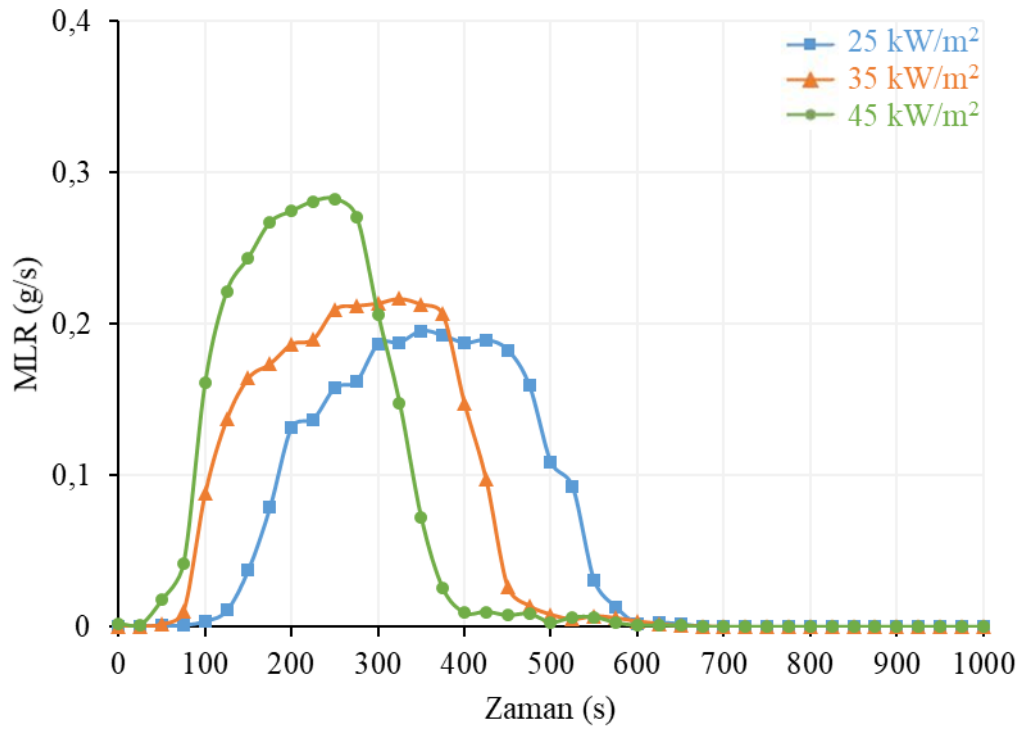


Şekil 5.58: ABS'nin farklı ısı akılarındaki NO değişimleri.

Şekil 5.59 ve Şekil 5.60'ta ABS malzemenin zamana bağlı kütle kayıp değişimleri ve kütle kayıp hızları (MLR) verilmiştir. Isı akısı arttıkça kalan kütle miktarı azalmaktadır (Despinasse ve Schartel 2012).



Şekil 5.59: ABS'nin farklı ısı akılarındaki kütle değişimleri.



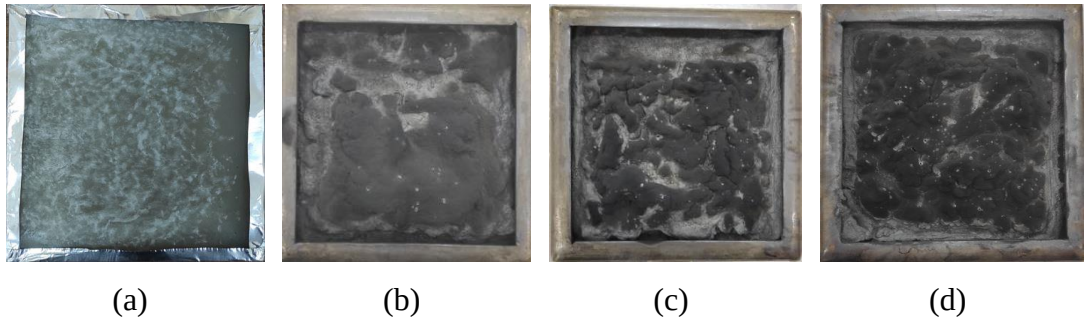
Şekil 5.60: ABS'nin farklı ısı akılarındaki MLR değişimleri.

Malzemenin 25 kW/m^2 ısı akısında 200. s'de kütlesinde yaklaşık % 8 azalma olurken, 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında ise yaklaşık % 25 ve % 42 azalma olmaktadır. 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akıları altında 400. saniyede kalan kütle oranları sırasıyla % 38,5, % 11,0 ve % 2,30 olarak tespit edilmiştir. Yanma sonunda kalan kütle oranları % 2,84, % 1,16 ve % 0,15 olarak belirlenmiştir.

Isı akısı azaldıkça maksimum MLR değerleri azalmaktadır. 25 kW/m^2 ısı akısında malzemenin maksimum kütle kayıp hızı 350. saniyede gerçekleşmiş ve değeri $0,20 \text{ g/s}$ olarak ölçülmüştür. Isı akısı 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 'ye çıkarıldığında 325. ve 250. saniyelerde maksimum kütle kayıp hızına ulaşılmış ve değerleri $0,22$ ve $0,28 \text{ g/s}$ olarak tespit edilmiştir.

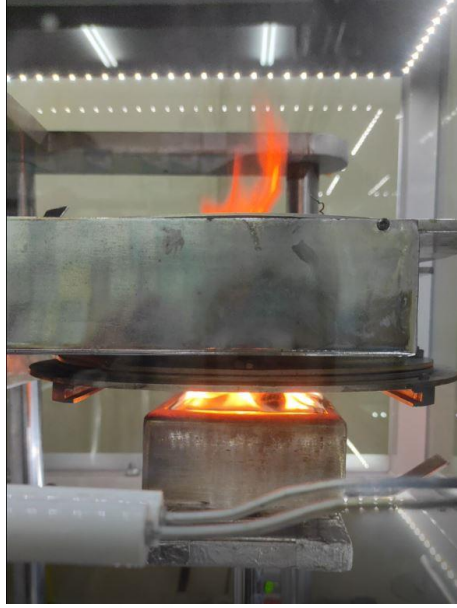
5.7.5 IFR ilaveli PP malzemenin konik kalorimetre testleri

PP malzemeye kütsel olarak % 25 oranında IFR ilavesi ile üretilen kabaran alev geciktiricili polipropilen (PP25IFR) malzemenin konik kalorimetre testi için hazırlanan numunesi ile 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarındaki yanma sonrası görüntüleri Şekil 5.61'de verilmiştir.



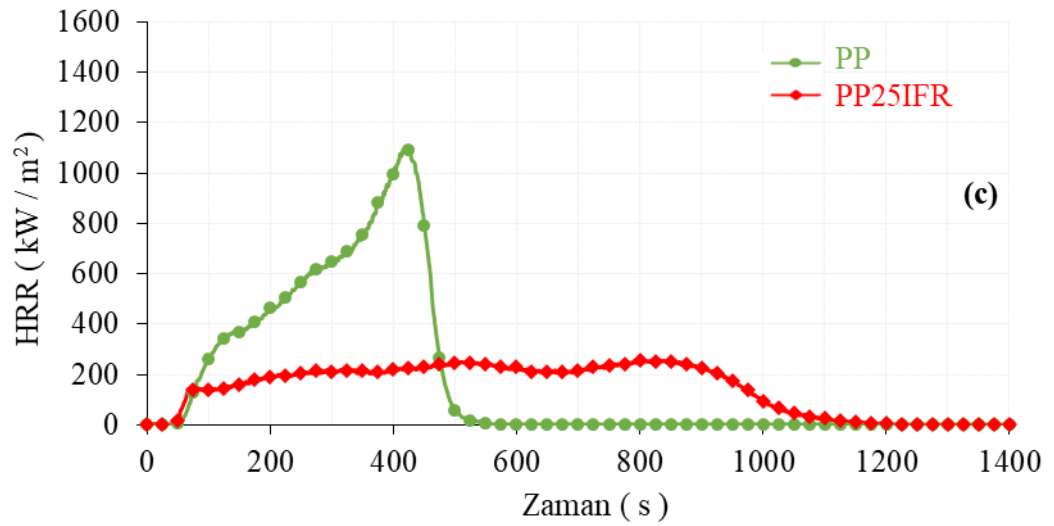
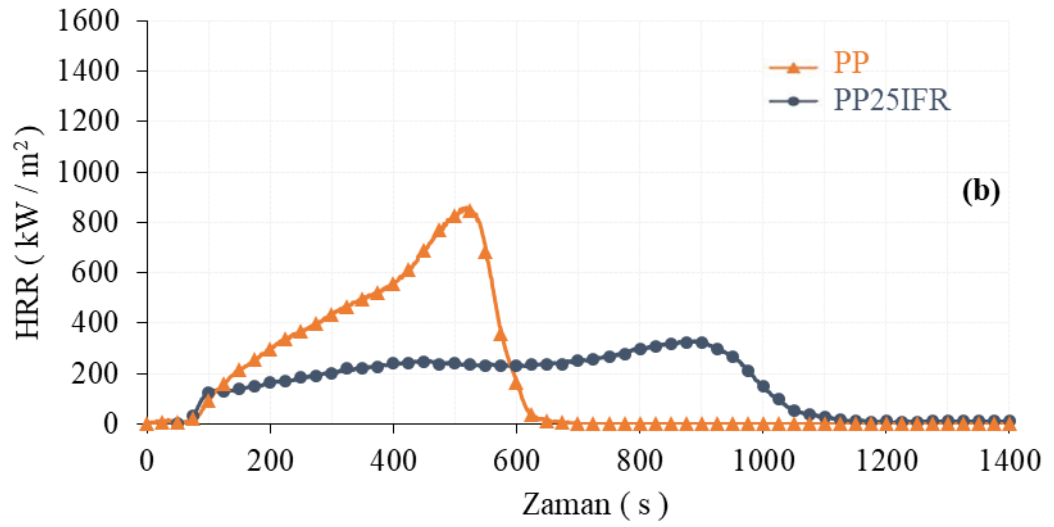
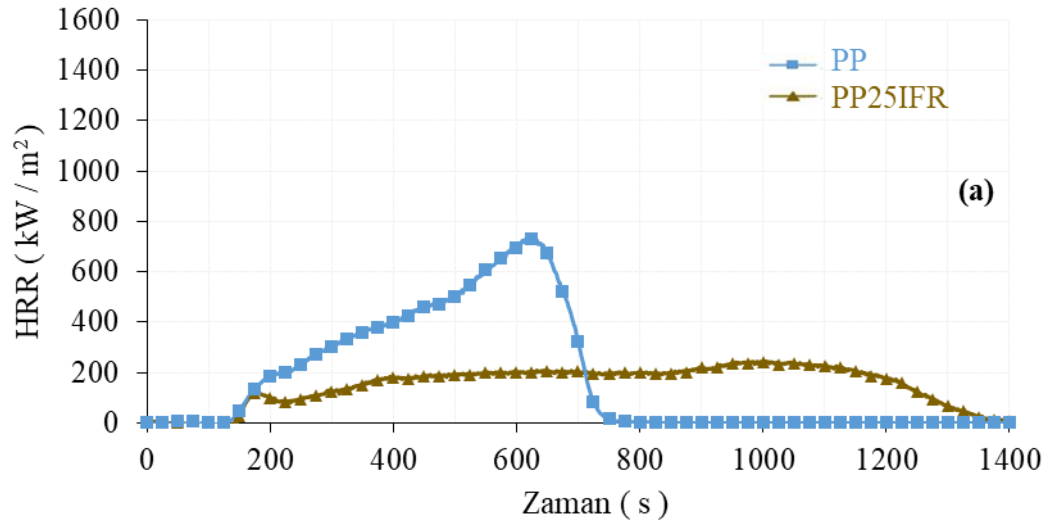
Şekil 5.61: (a) PP25IFR numunesi, (b) 25 kW/m^2 , (c) 35 kW/m^2 ve (d) 45 kW/m^2 ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.

Numunenin konik kalorimetrede 35 kW/m^2 ısı akısında yanma anındaki bir görüntüsü Şekil 5.62'de gösterilmiştir.

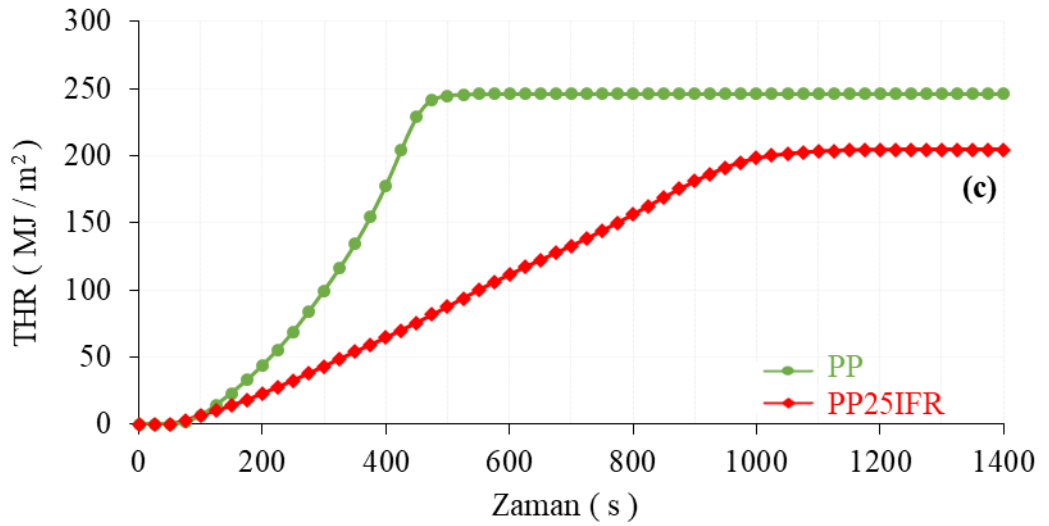
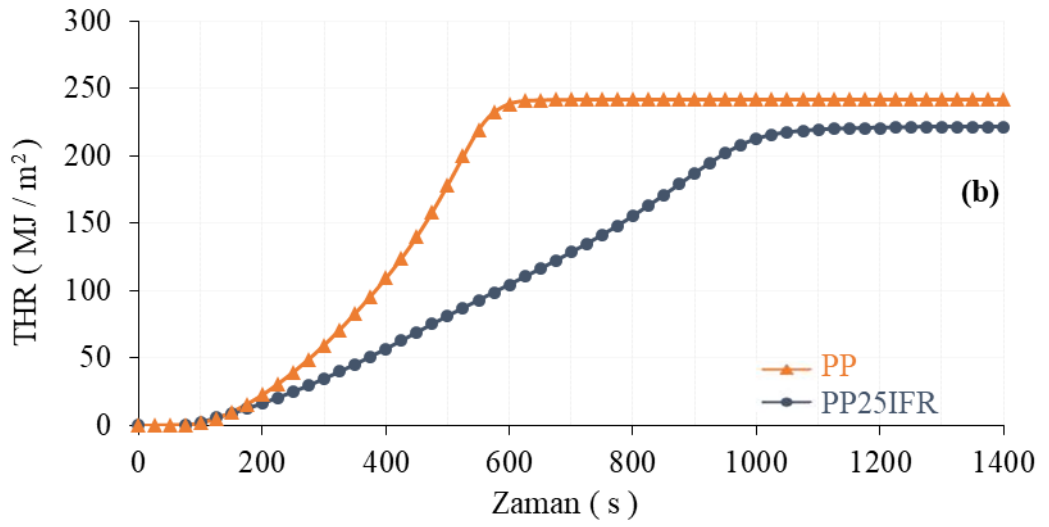
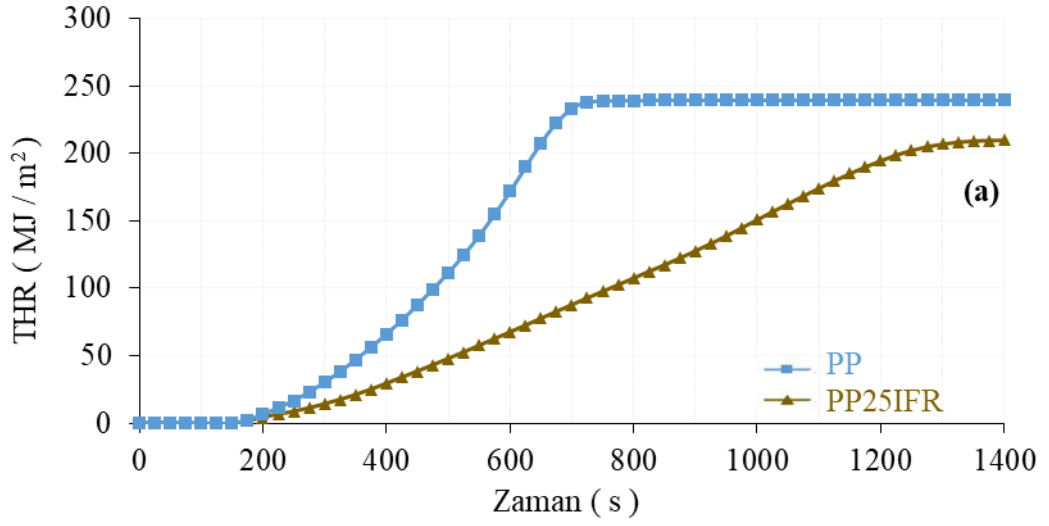


Şekil 5.62: PP25IFR'nin yanma anındaki görüntüsü.

PP25IFR ve PP malzemelerin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarındaki HRR ve THR değişimleri Şekil 5.63 ve 5.64'te karşılaştırılmıştır. PP ve PP25IFR malzemelerin TTI, PHRR, THR, t_{PHRR} , yangın performans indeksi ($\text{FPI} = \text{TTI}/\text{PHRR}$), yangın büyüme oranı ($\text{FIGRA} = \text{PHRR}/t_{\text{PHRR}}$) ve m_k değerleri belirlenmiş olup bu değerler Tablo 5.14'te verilmiştir. 25 kW/m^2 ısı akısı altında ham polipropilene alev geciktirici ilave edildiğinde malzeme 146. saniyede tutuşmuş, ham PP'ye göre yanma süresi artmış, PHRR ve THR değerlerinde kayda değer düşüş olmuştur. PHRR değeri yaklaşık % 67 azalarak $245,7 \text{ kW/m}^2$ 'ye düşerken, THR değeri ise yaklaşık % 12,3 azalarak $210,10 \text{ MJ/m}^2$ 'ye düşmüştür. 35 kW/m^2 ısı akısında PP malzemeye IFR (APP/PER 3:1) ilave edildiğinde malzeme ham polipropilene göre 9 s erken tutuşmuş, yanma süresi oldukça artmış ve PHRR değeri önemli derecede düşmüştür (Lai ve diğ. 2015, Li ve diğ. 2019). PP25IFR malzemesinin PHRR değeri ham PP'e göre yaklaşık % 62 azalarak $328,8 \text{ kW/m}^2$ değerine düşmüştür. Ham PP'nin THR değeri $241,63 \text{ MJ/m}^2$ iken IFR ilavesi ile bu değer yaklaşık % 8,5 oranında azalma göstererek $221,10 \text{ MJ/m}^2$ 'ye düşmüştür. En yüksek ısı akısında (45 kW/m^2) alev geciktirici ilaveli malzeme ham polipropilene göre 3 s önce tutuşmuş, PHRR ve THR değerleri azalmıştır. Ham polipropilende PHRR değeri $1104,3 \text{ kW/m}^2$ iken alev geciktiricili malzemede bu değer yaklaşık % 76,5 azalarak $259,8 \text{ kW/m}^2$ olmuştur. THR değeri ise ham PP'ye göre yaklaşık % 17 azalarak $204,73 \text{ MJ/m}^2$ 'ye düşmüştür.



Şekil 5.63: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m^2 , (b) 35 kW/m^2 ve (c) 45 kW/m^2 ısı akıları altında HRR değişimleri.



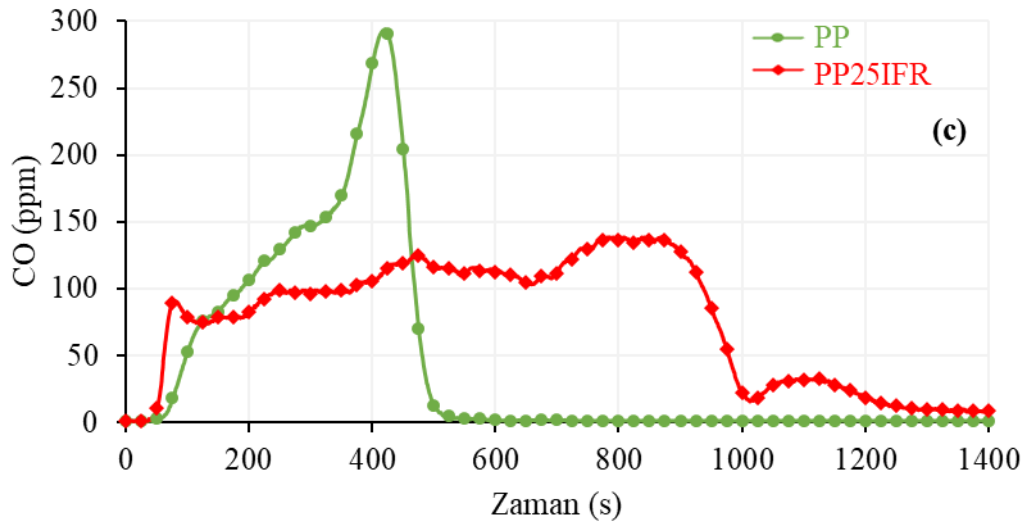
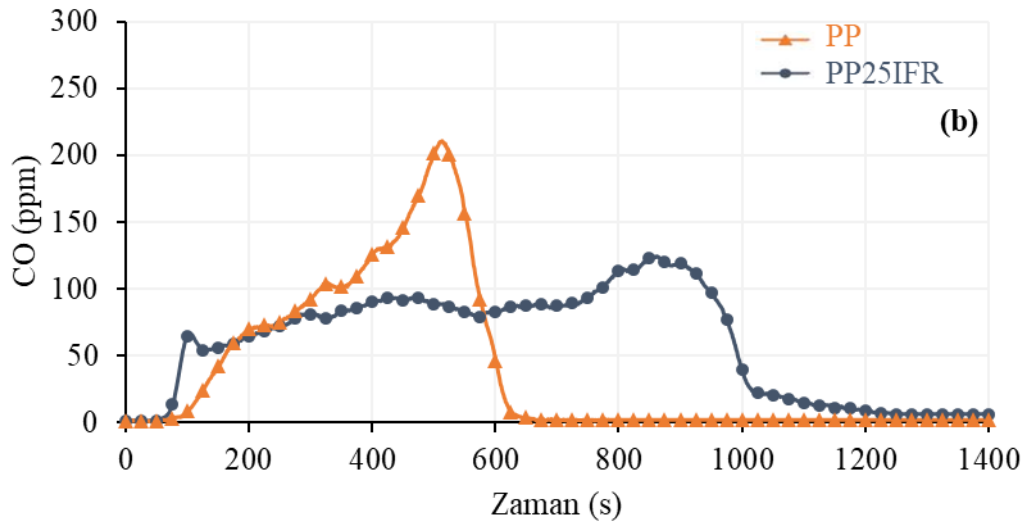
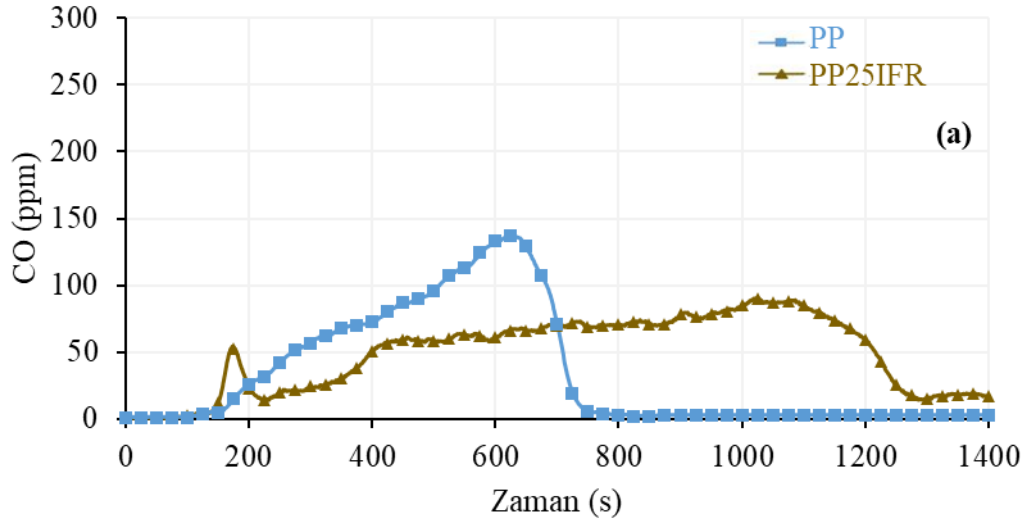
Şekil 5.64: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında THR değişimleri.

Tablo 5.14: PP ve PP25IFR'nin konik kalorimetre test sonuçları.

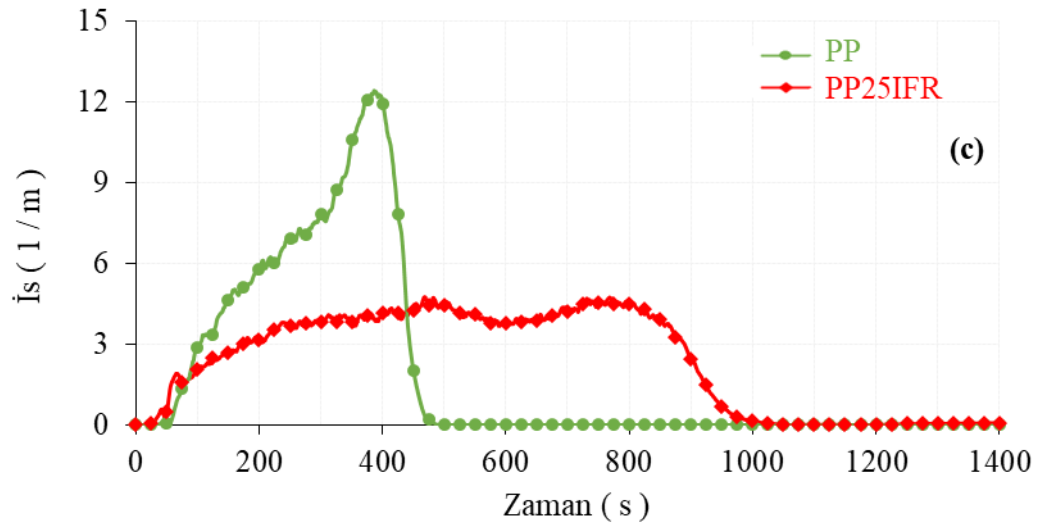
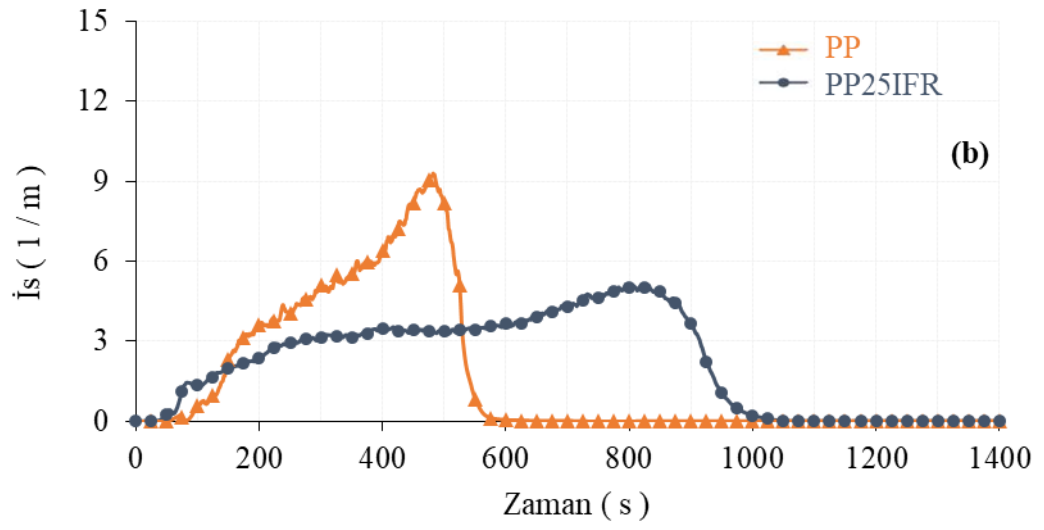
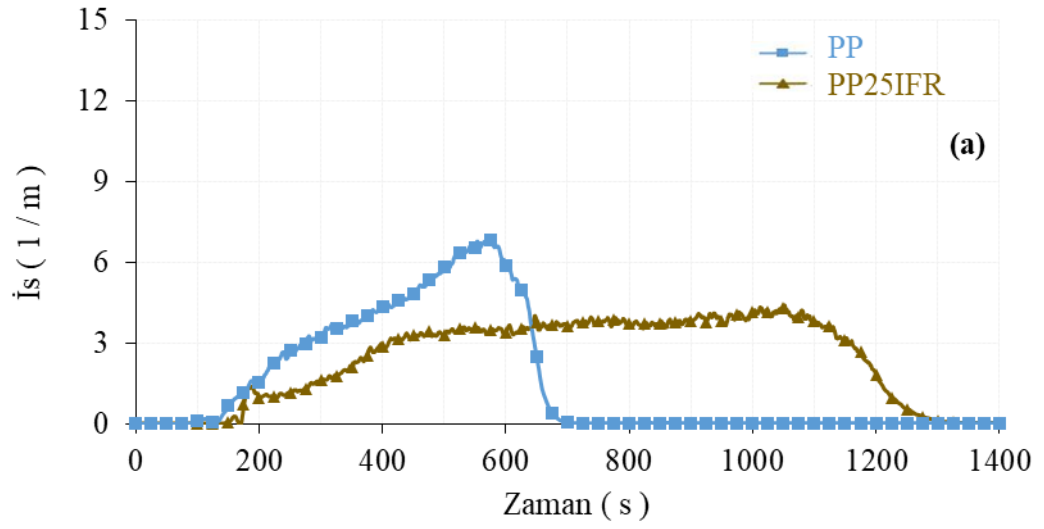
Malzeme /Isı akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t _{PHRR} (s)	FPI (m ² .s/kW)	FIGRA (kW/m ² .s)	m _k (%)
PP 25	126	739,8	239,36	624	0,170	1,185	0
PP25IF 25	146	245,7	210,10	1005	0,594	0,244	16,12
PP 35	72	858,7	241,63	518	0,084	1,658	0
PP25IFR 35	63	328,8	221,10	889	0,191	0,370	15,14
PP 45	47	1104,3	246,02	418	0,043	2,642	0
PP25IFR 45	44	259,8	204,73	829	0,169	0,313	14,38

FPI ve FIGRA malzemenin yanmaya karşı olan direncini gösteren önemli parametrelerdendir. Artan FPI ve düşen FIGRA malzemenin yangına karşı direncinin artışı göstermektedir (Lin ve diğ. 2007, Kim ve diğ. 2019). PP malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında FPI değerleri sırasıyla 0,170 m².s/kW, 0,084 m².s/kW ve 0,043 m².s/kW iken % 25 IFR ilavesi ile bu değerler yükselerek 0,594 m².s/kW, 0,191 m².s/kW ve 0,169 m².s/kW olmuştur. Bununla birlikte, PP için FIGRA değerleri sırasıyla 1,185 kW/m² s, 1,658 kW/m² s ve 2,642 kW/m² s iken % 25 IFR ilavesi ile bu değerler 0,244 kW/m² s, 0,370 kW/m² s ve 0,313 kW/m² s değerlerine düşmüştür. Bu durum da % 25 IFR ilavesinin PP malzemenin yangına karşı direncini dikkate değer oranda artırdığını göstermektedir.

% 25 IFR ilavesinin 25, 35, 45 kW/m² ısı akılarında CO ve is emisyonlarına etkileri Şekil 5.65 ve Şekil 5.66'da gösterilmektedir. Genel olarak, CO ve is benzer değişimler göstermektedir. IFR'nin erken bozunması ile bağlantılı olarak PP'ye göre CO ve is oluşumu erken başlamakla birlikte (25 kW/m² hariç) daha sonra karbonlaşmış tabakanın oluşumuna bağlı olarak daha düşük seviyelerde CO ve is emisyonları olduğu görülmektedir. Maksimum CO ve is emisyonlarında dikkate değer düşme gerçekleşmiştir (Li ve diğ. 2019). IFR ilaveli malzemenin ham PP'ye göre 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki maksimum CO değerleri sırasıyla yaklaşık % 34, % 41 ve % 53 oranlarında azalarak 91 ppm, 125 ppm ve 139 ppm olarak ölçülmüştür. Maksimum is emisyonları ise yaklaşık % 35, % 44 ve % 62 azalarak 4,5 1/m, 5,2 1/m ve 4,8 1/m değerlerine düşmüştür.



Şekil 5.65: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında CO değişimleri.



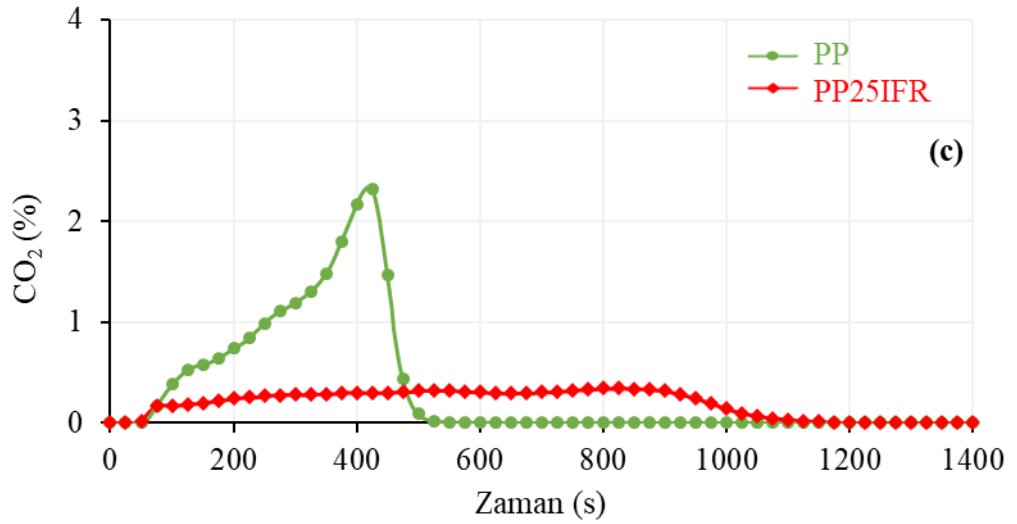
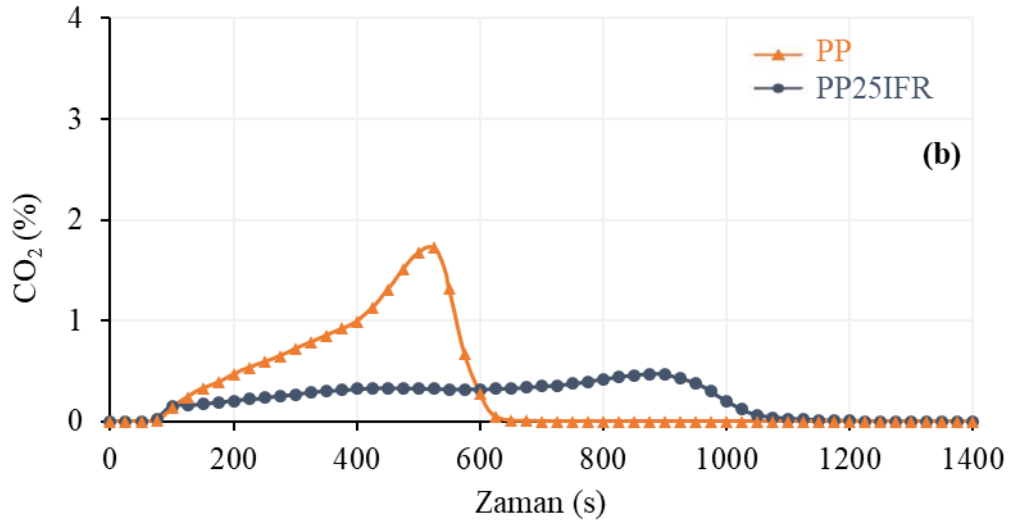
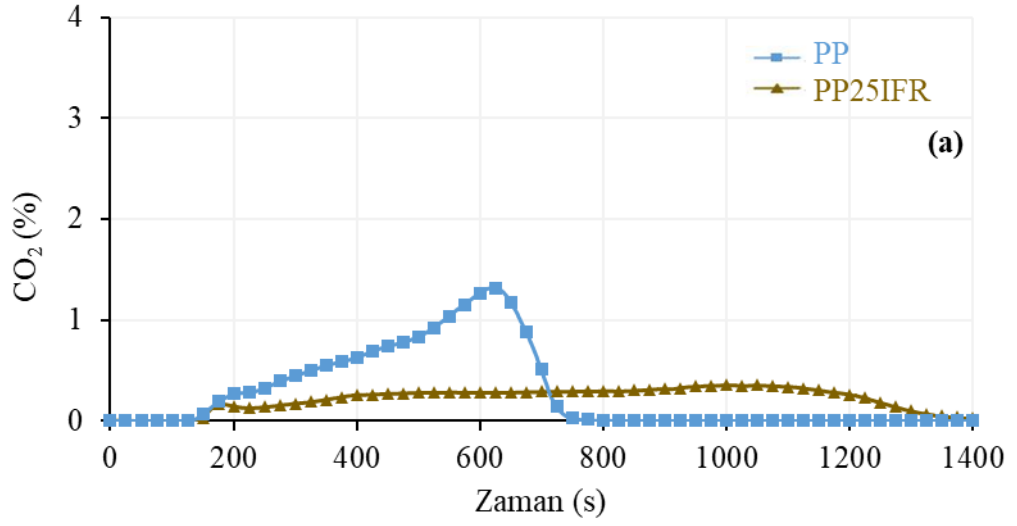
Şekil 5.66: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m^2 , (b) 35 kW/m^2 ve (c) 45 kW/m^2 ısı akıları altında is değişimleri.

PP'ye % 25 IFR ilavesinin farklı ısı akılarında CO₂ emisyonlarına etkisi Şekil 5.67'de gösterilmektedir. PP25IFR malzemenin yavaş yanması ve yanma süresinin uzamasına bağlı olarak CO₂ emisyonunun PP malzemeye göre oldukça düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir (Li ve diğ. 2019). PP25IFR malzeme için 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki maksimum CO₂ emisyonları PP'ye göre yaklaşık % 73, % 72 ve % 85 oranlarda azalarak sırasıyla % 0,36, % 0,48 ve % 0,35 değerlerine ancak ulaşabilmiştir.

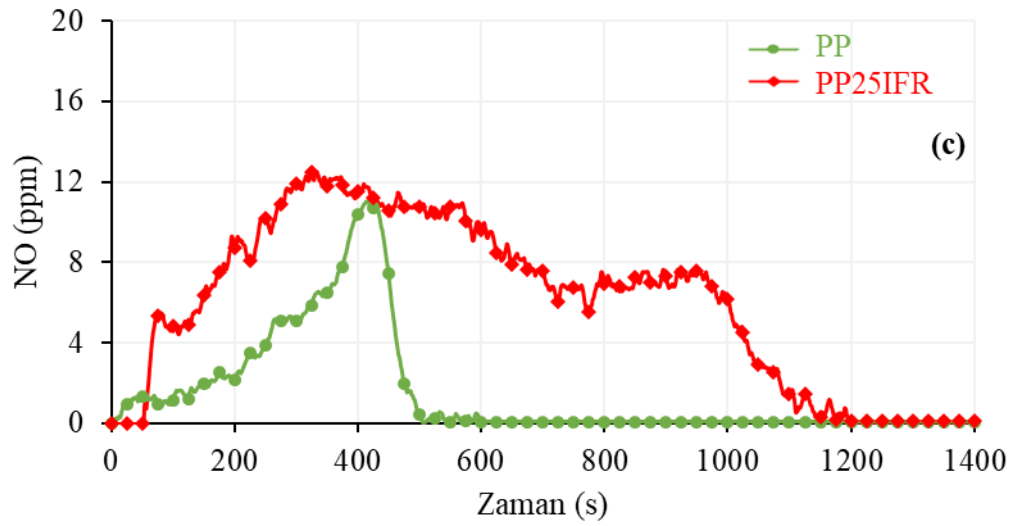
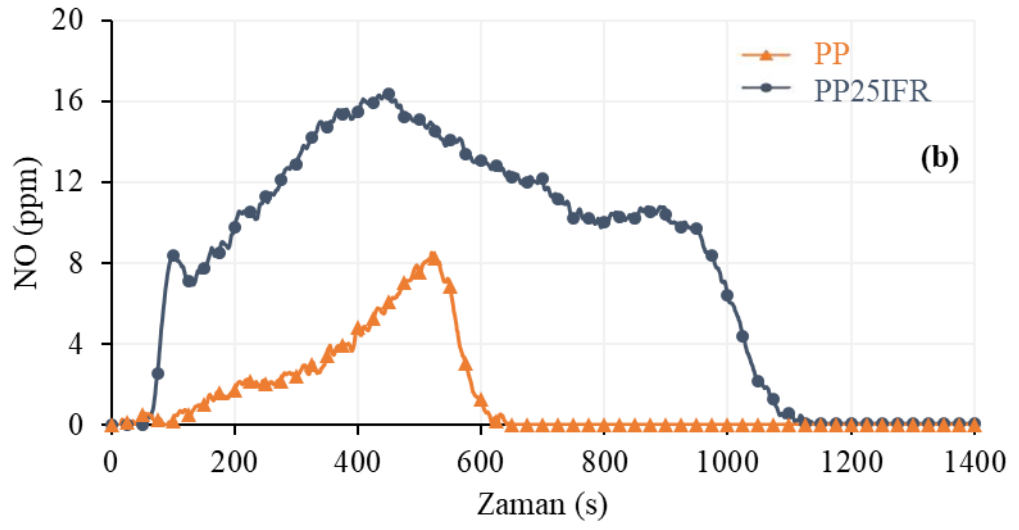
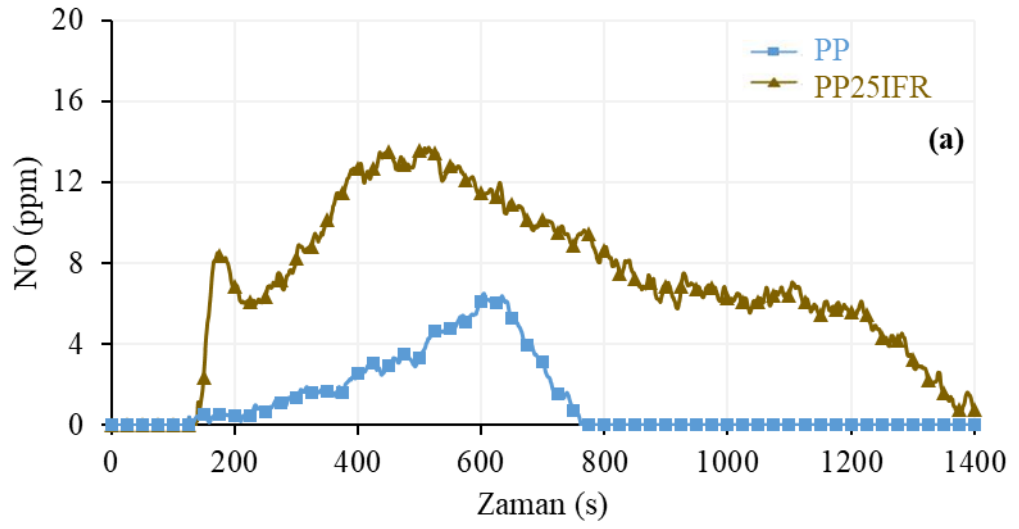
IFR ilavesinin olumsuz etkisi ise yanma sırasında NO emisyonlarının artışına sebep olmasıdır (Şekil 5.68). PP25IFR malzemenin ısı akısına maruz kalması ile azot içeren APP'nin de ısıl bozunmaya uğraması sonucu termal NO yanında malzeme kaynaklı NO oluşumu da ortaya çıkmıştır. Bu da IFR içeren malzemenin yanma sırasında ham polipropilene göre bir miktar daha fazla NO emisyonunun ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte, üç ısı akısında da maksimum NO değerleri artarak sırasıyla 14 ppm, 17 ppm ve 13 ppm değerlerine ulaşmıştır.

Şekil 5.69'da 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki kütle kaybı değişimlerinin karşılaştırılmaları verilmektedir. Üç ısı akısında da PP malzemenin tamamı yanmakta ve kalan kütle olmamaktadır. Bununla birlikte, % 25 IFR ilavesi ile erken tutuşma sonrası APP ve PER'in ısıl bozunması sonucu karbonlaşmış tabaka oluşumunun etkisi ile yanma hızı ve dolayısıyla yanan malzeme miktarı azalmaktadır (Lai ve diğ. 2015, Li ve diğ. 2019). PP25IFR malzemenin yanma sonucunda üç ısı akısı için sırasıyla % 16,12 , % 15,14 ve % 14,38 oranlarında kalan kütle tespit edilmiştir.

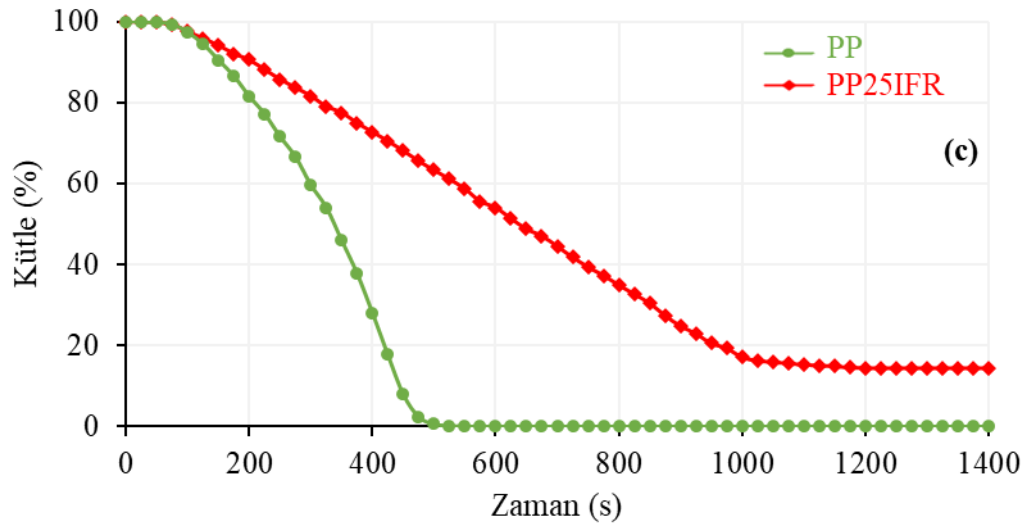
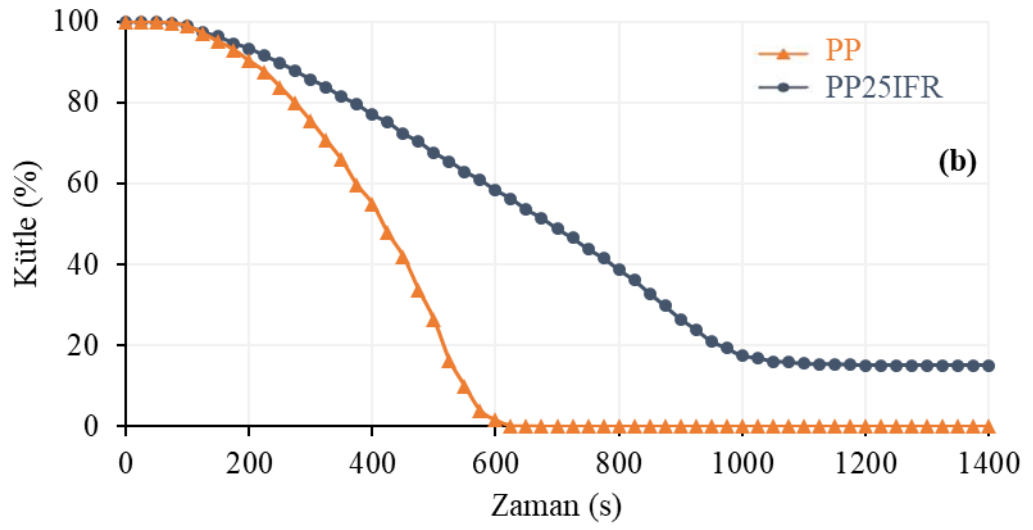
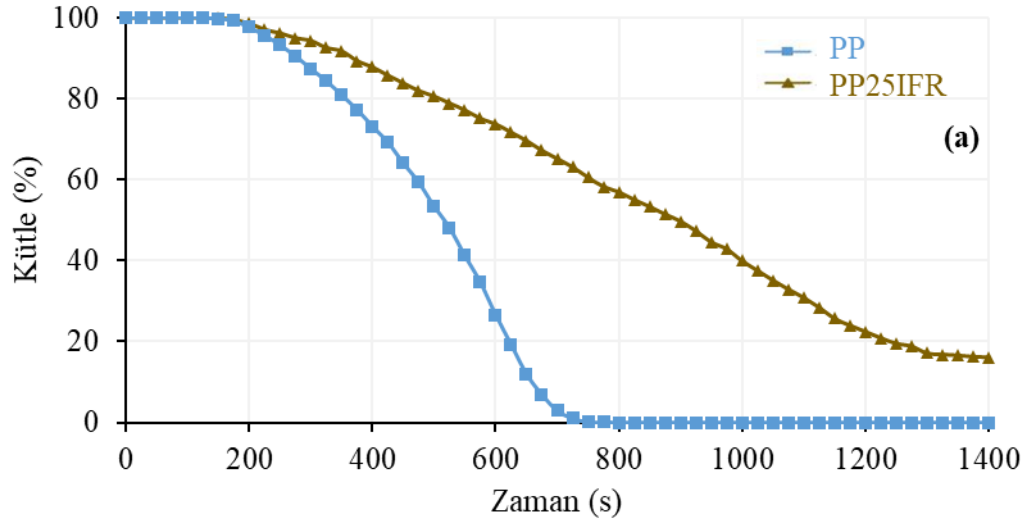
Şekil 5.70'te PP25IFR ve PP malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki MLR değişimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. PP25IFR'nin maksimum MLR değerleri ham PP'ye göre % 60, % 58 ve % 67 oranlarında azalış göstererek sırasıyla yaklaşık 0,064 g/s, 0,075 g/s ve 0,069 g/s maksimum değerlerine ulaştıktan sonra düşmeye başlayarak sıfırlandığı görülmektedir.



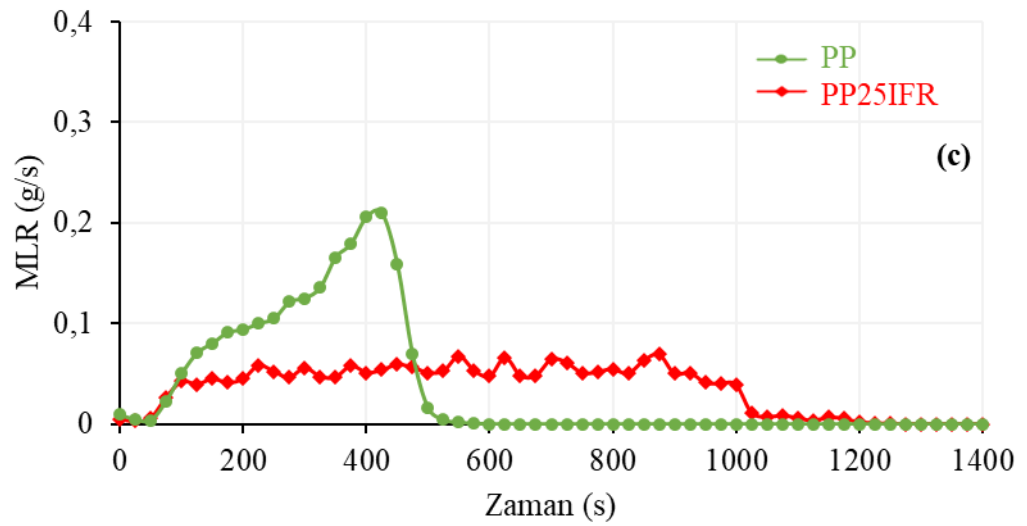
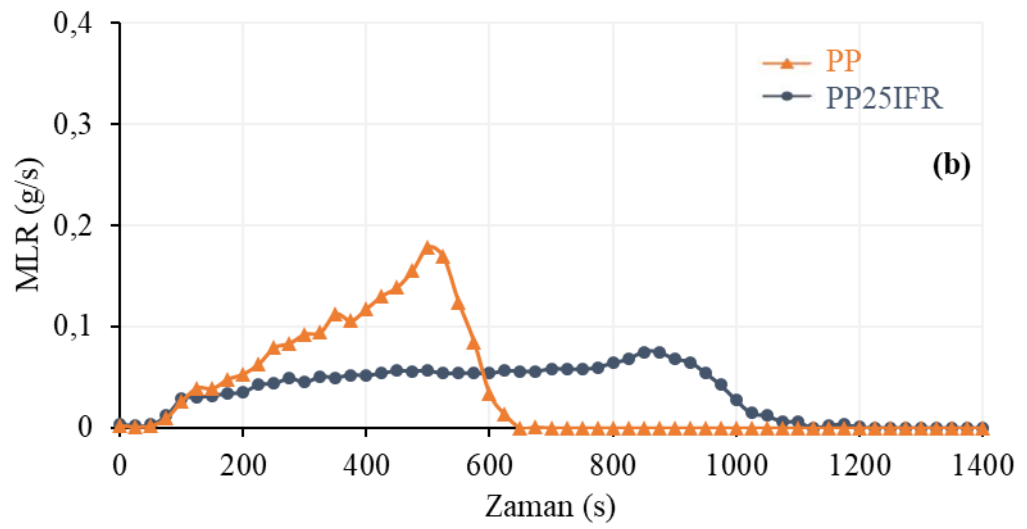
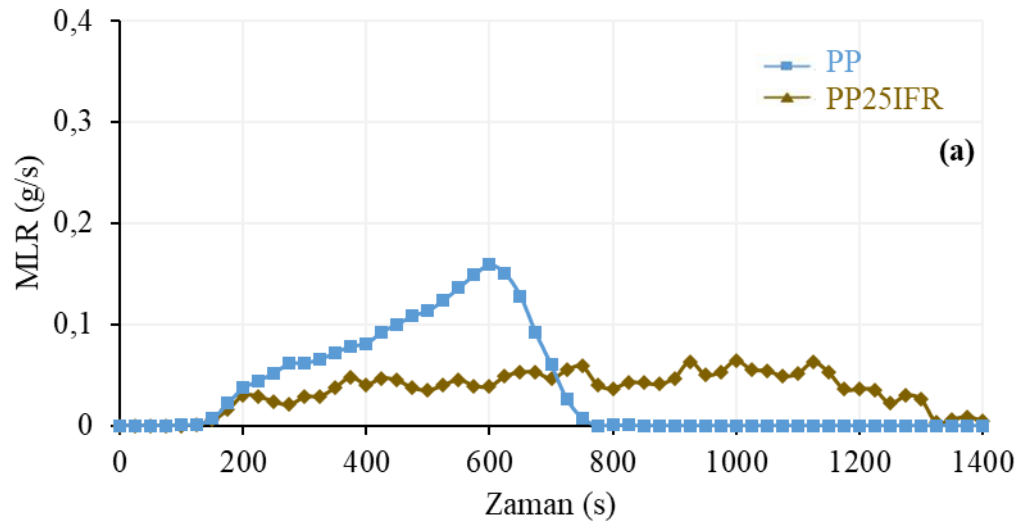
Şekil 5.67: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında CO₂ değişimleri.



Şekil 5.68: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında NO değişimleri.



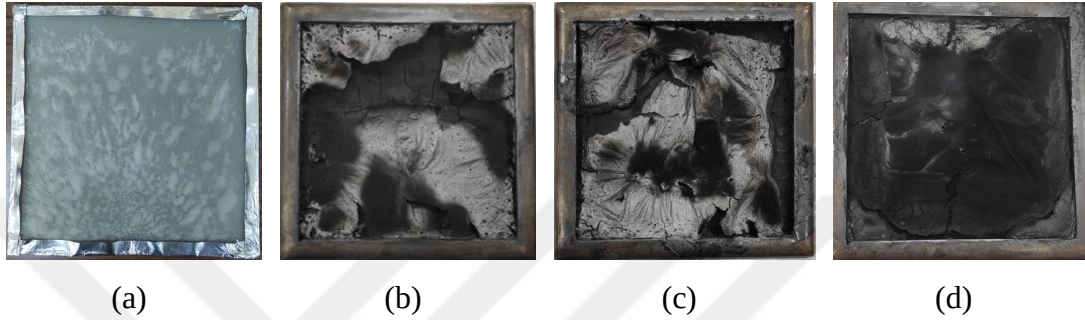
Şekil 5.69: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında kütle değişimleri.



Şekil 5.70: PP25IFR ve PP'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında MLR değişimleri.

5.7.6 IFR ilaveli HDPE malzemenin konik kalorimetre testleri

Kütlesel olarak % 25 oranında IFR içeren HDPE25IFR malzemenin konik kalorimetre testi için hazırlanan numunesi ile 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları altında yanma sonrası görüntüleri Şekil 5.71’de verilmiştir. Numunenin konik kalorimetrede 35 kW/m² ısı akısında yanma anındaki bir görüntüsü de Şekil 5.72’de gösterilmiştir.

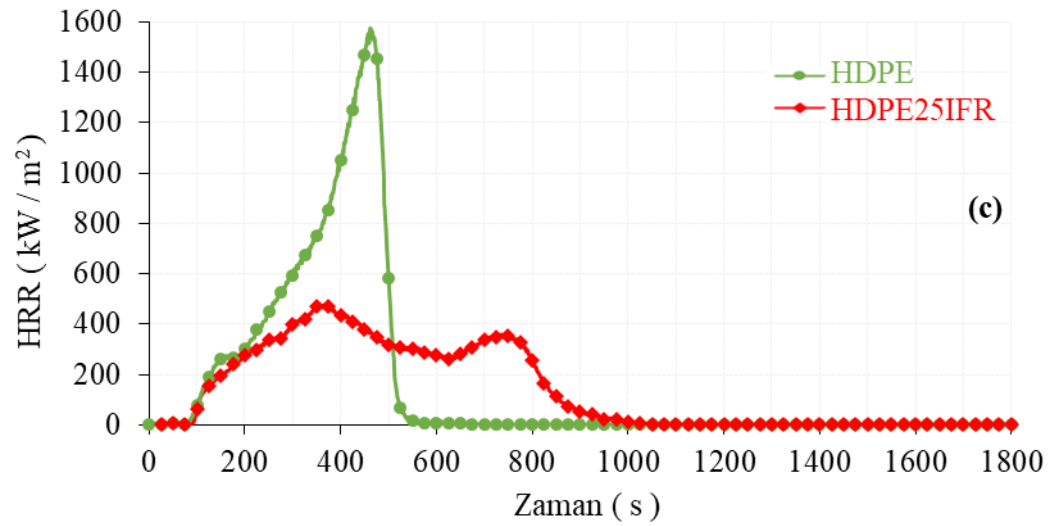
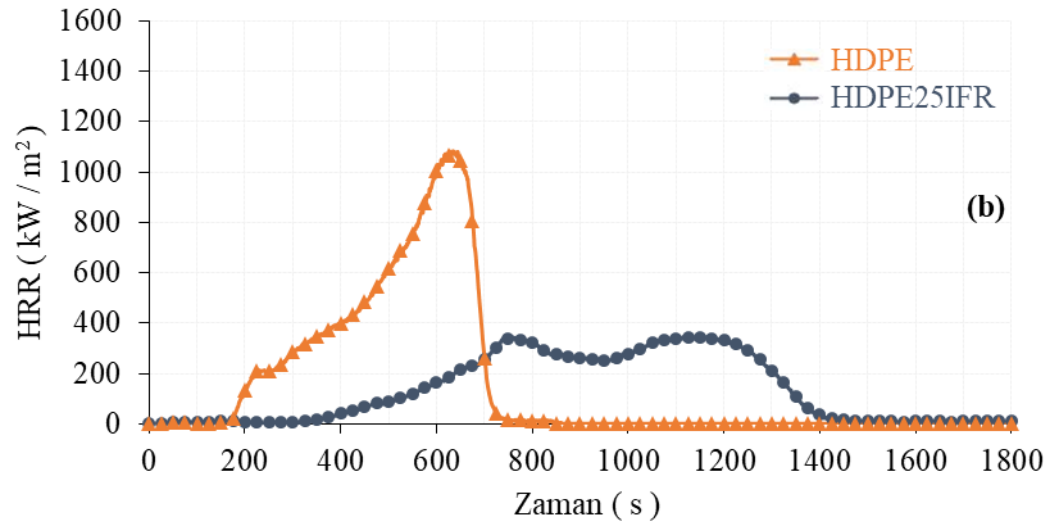
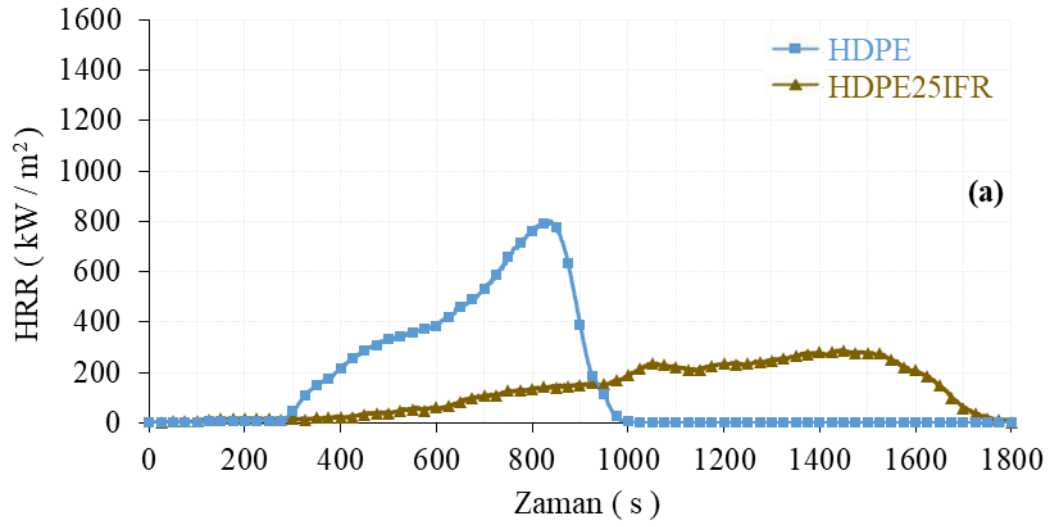


Şekil 5.71: (a) HDPE25IFR numunesi, (b) 25 kW/m², (c) 35 kW/m² ve (d) 45 kW/m² ısı akıları altında test sonrası oluşan görüntüler.

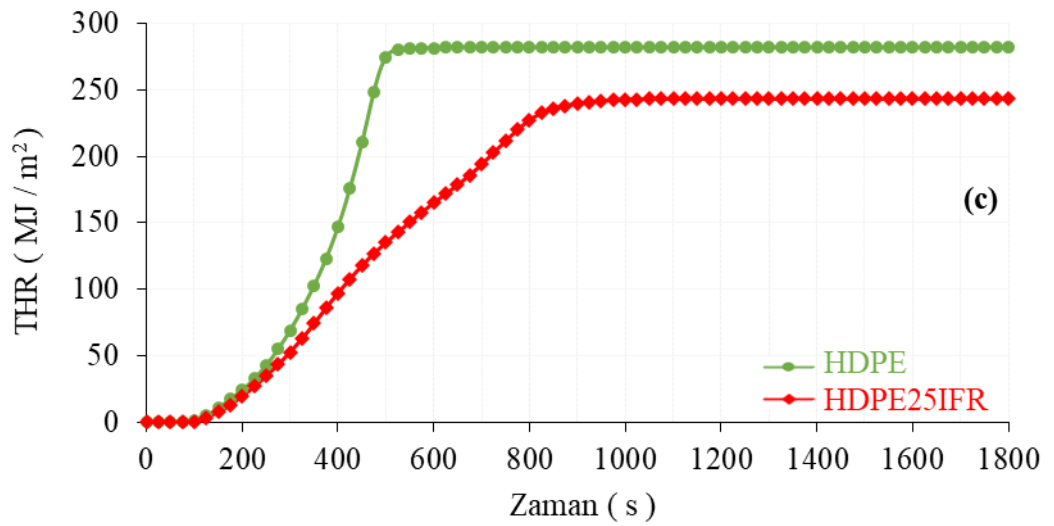
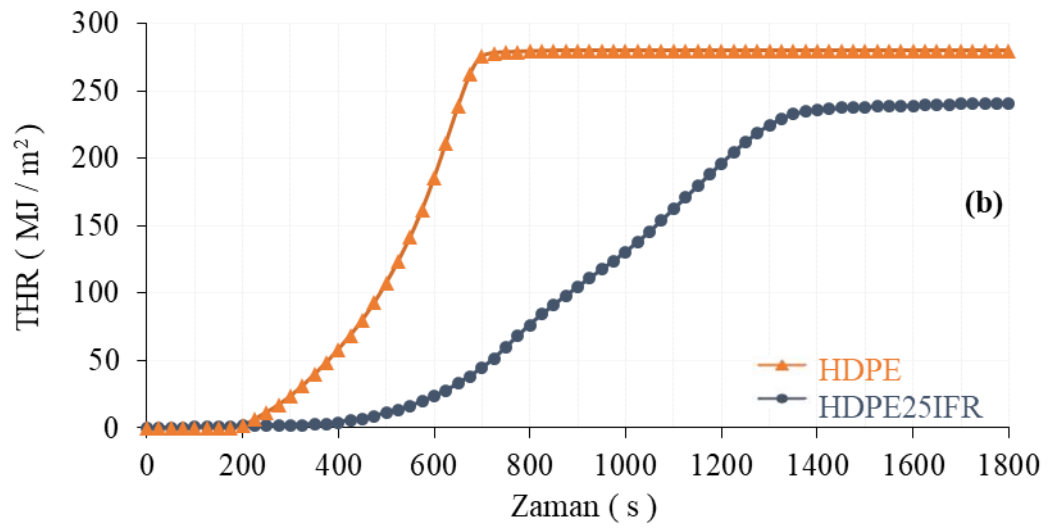
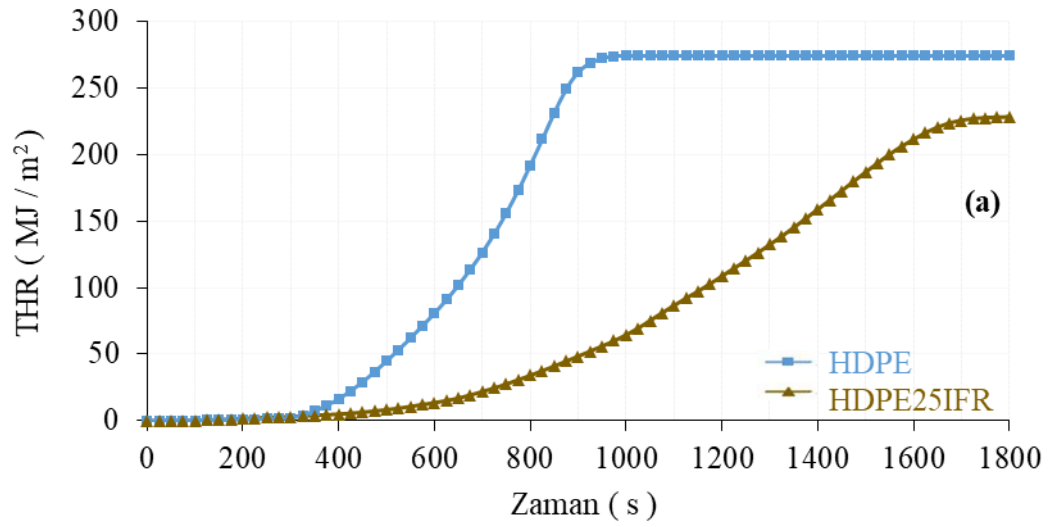


Şekil 5.72: HDPE25IFR’nin yanma anındaki görüntüsü.

Şekil 5.73 ve 5.74’te HDPE ve HDPE25IFR malzemelerin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akısındaki HRR ve THR değişimleri verilmiştir. HDPE ve HDPE25IFR malzemelerin TTI, PHRR, THR, t_{PHRR}, FPI, FIGRA ve m_k değerleri belirlenmiş olup bu değerler Tablo 5.15’de verilmiştir.



Şekil 5.73: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m^2 , (b) 35 kW/m^2 ve (c) 45 kW/m^2 ısı akıları altında HRR değişimleri.



Şekil 5.74: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında THR değişimleri.

Tablo 5.15: HDPE ve HDPE25IFR'nin konik kalorimetre test sonuçları.

Malzeme / Isı akısı (kW/m ²)	TTI (s)	PHRR (kW/m ²)	THR (MJ/m ²)	t _{PHRR} (s)	FPI (m ² .s/kW)	FIGRA (kW/m ² .s)	m _k (%)
HDPE 25	272	802,2	274,21	839	0,339	0,956	0
HDPE25IFR 25	177	291,1	228,32	1445	0,608	0,201	17,67
HDPE 35	164	1085,1	279,90	634	0,151	1,711	0
HDPE25IFR 35	225	346,3	240,32	1153	0,650	0,300	15,00
HDPE 45	77	1575,8	282,01	462	0,049	3,411	0
HDPE25IFR 45	85	477,0	243,04	359	0,178	1,329	13,53

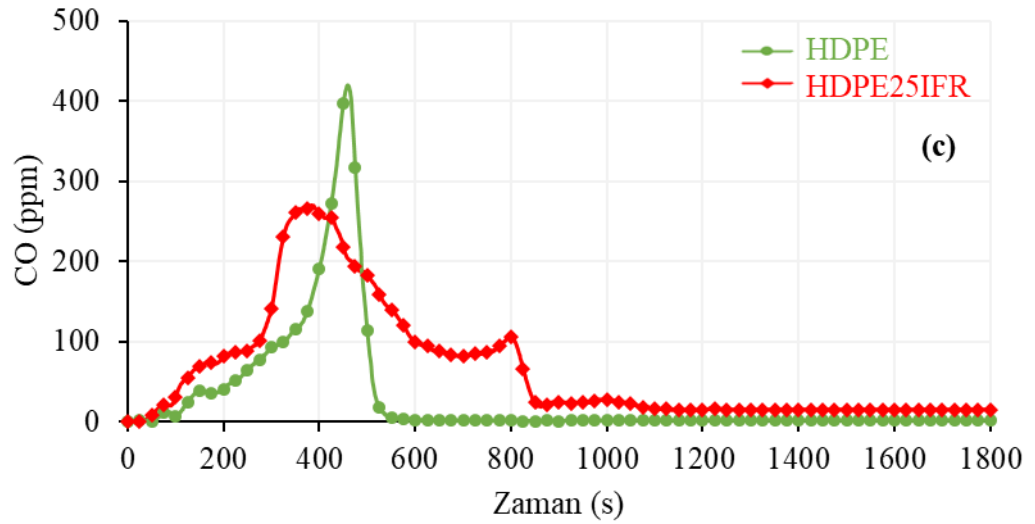
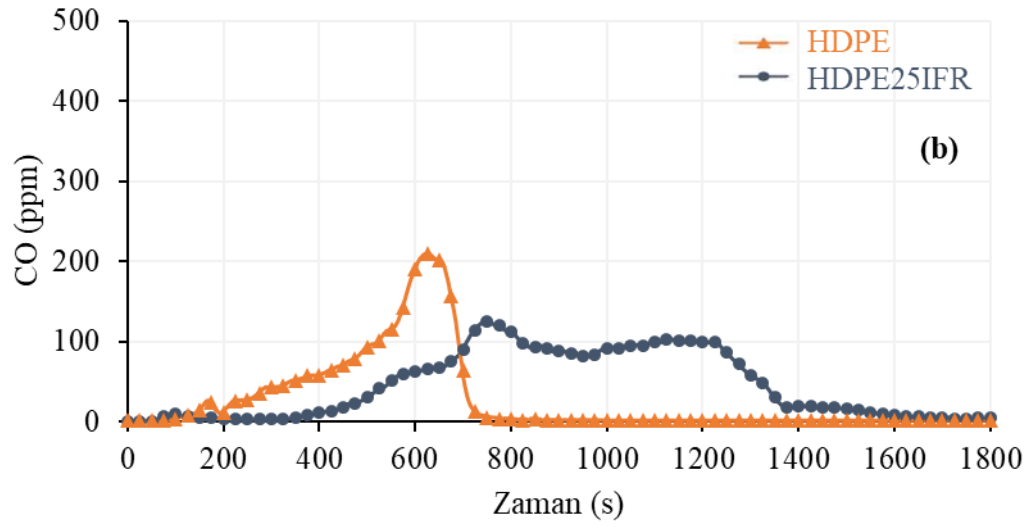
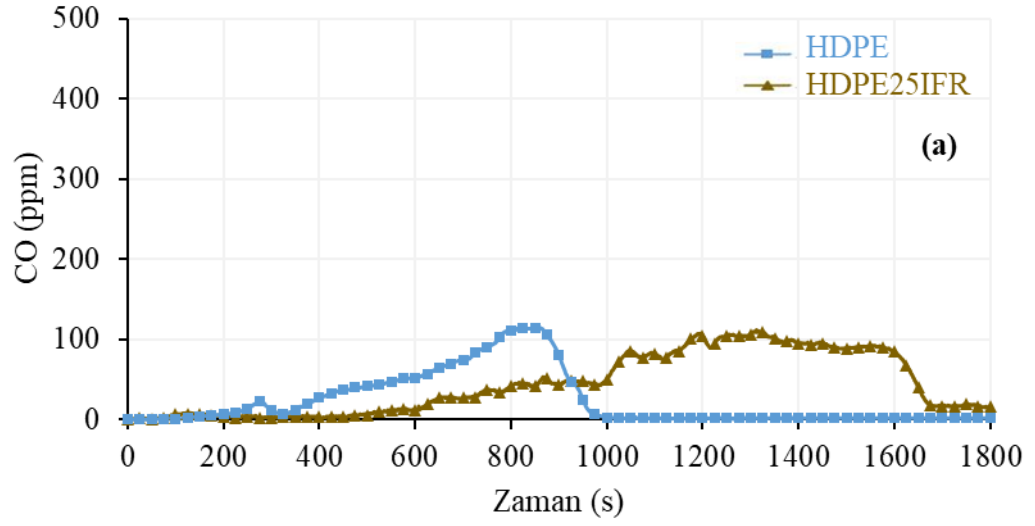
45 kW/m² ısı akısında IFR ilaveli malzeme, HDPE'ye göre 8 s geç tutuşmuş, 359. saniyede 477,0 kW/m² PHRR değerine ulaşmış, önce azalmaya başlamış sonra tekrar artış göstererek bir tepe noktası daha oluşturduktan sonra tekrar düşüşe geçmiştir. PHRR değeri ham polietilene göre yaklaşık % 70 azalmış, THR değeri ise yaklaşık % 14 azalarak 243,04 MJ/m²'ye düşmüştür. 35 kW/m² ısı akısında HDPE malzemeye IFR ilave edildiğinde malzeme ham polietilene göre 61 s geç tutuşmuş bu andan itibaren HRR'de yükselme başlamış, yaklaşık 775. saniyede 340 kW/m² değerine ulaştıktan sonra düşmeye başlamış daha sonra tekrar yükselmiştir. PHRR değerine (346,3 kW/m²) 1153. saniyede ulaşmıştır. Bu değer, HDPE malzemenin PHRR değerine göre yaklaşık % 68 daha düşüktür. Sonra tekrar düşme olmuştur. IFR'nin etkisi ile oluşan karbonlaşmış tabakanın yanmayı yavaşlattığı fakat daha sonra bu tabakada kısmi çatlaklar oluştuğu ve bu çatlaklardan çıkan yanıcı uçucu gazlar ile yanmanın tekrar hızlandığı ve ikinci karbonlaşmış tabaka oluşumu ile tekrar yanmanın yavaşladığı değerlendirilmiştir. Yanma süresi oldukça artmış ve PHRR değeri önemli derecede azalmıştır. HDPE'nin THR değeri 279,90 MJ/m² iken IFR ilavesi ile bu değer yaklaşık % 14 oranında azalma göstererek 240,32 MJ/m²'ye düşmüştür. 25 kW/m² ısı akısında alev geciktiricili malzeme ham polietilene göre 95 s daha erken tutuşmuş PHRR değeri yaklaşık % 64 azalarak 291,1 kW/m² olmuştur. HDPE25IFR malzemenin THR değeri ise yaklaşık % 17 azalarak 228,32 MJ/m²'ye düşmüştür.

HDPE malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında FPI değerleri sırasıyla 0,339 m².s/kW, 0,151 m².s/kW ve 0,049 m².s/kW iken % 25 IFR

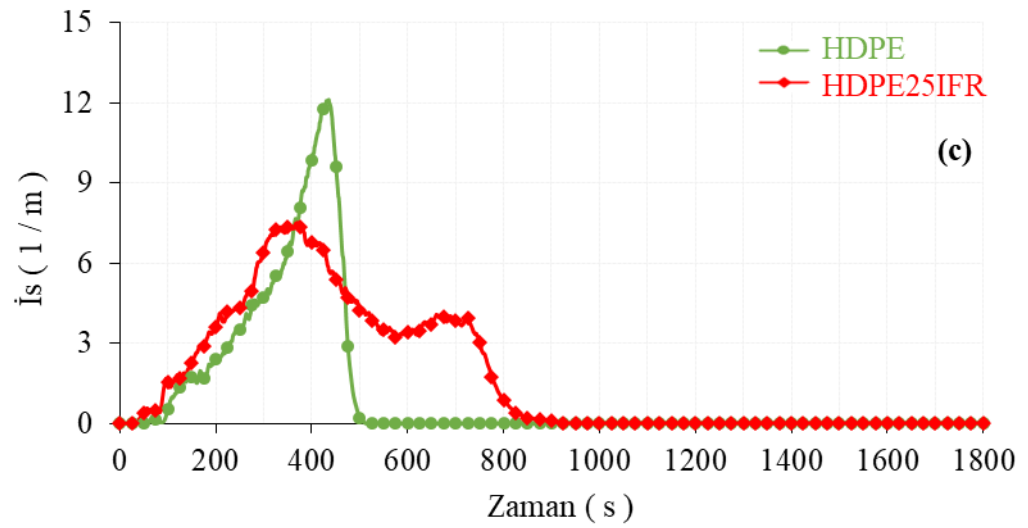
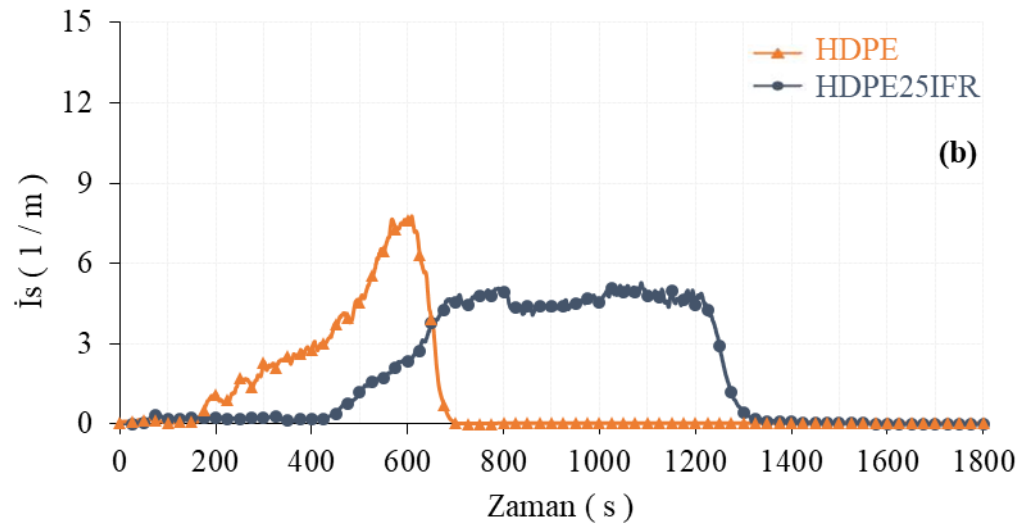
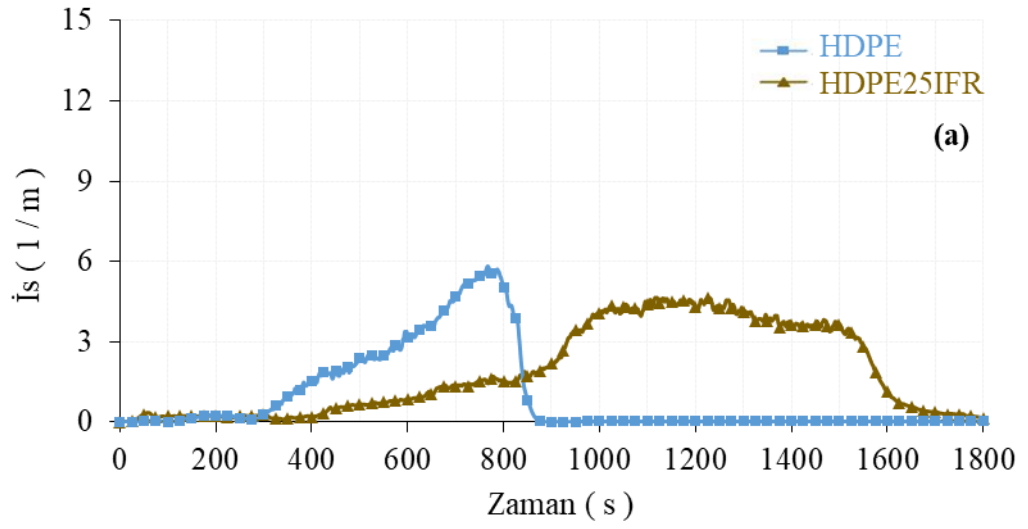
ilavesi ile bu değerler yükselerek 0,608 m².s/kW, 0,650 m².s/kW ve 0,178 m².s/kW olmuştur. Bununla birlikte, HDPE için FIGRA değerleri sırasıyla 0,956 kW/m².s, 1,711 kW/m².s ve 3,411 kW/m².s iken % 25 IFR ilavesi ile bu değerler 0,201 kW/m².s, 0,300 kW/m².s, 1,329 kW/m².s değerlerine düşmüştür. FPI değerlerindeki artış ve FIGRA değerlerindeki azalma miktarları, % 25 IFR ilavesinin HDPE malzemenin yangına karşı direncini dikkate değer oranda arttırdığını göstermektedir (Chen ve diğ. 2019, Li ve diğ. 2021).

şekil 5.75 ve şekil 5.76’da 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki % 25 IFR ilavesinin CO ve is emisyonlarına etkileri gösterilmektedir. Genel olarak, CO ile is benzer değişimler göstermekte ve % 25 IFR ilavesi CO ile is emisyonlarını düşürmektedir. Tutuşmadaki gecikmeye bağlı olarak CO ve is oluşumlarında da gecikmeler görülmektedir. CO emisyonları üç farklı ısı akısı için sırasıyla 450., 350. ve 50. saniyeden, is emisyonları ise 450., 425. ve 50. saniyeden sonra dikkate değer oranda artmaya başlamıştır. Karbonlaşmış tabaka oluşumu, tabakada çatlakların oluşumu ve tekrar ikinci tabaka oluşumunun etkileri CO ve is emisyonlarında da görülmektedir. Ham HDPE’ye kıyasla maksimum CO emisyonlarında sırasıyla yaklaşık % 4, % 40 ve % 35 oranlarda azalma olurken, is emisyonlarında ise %20, % 32 ve % 38 oranlarında azalmalar gerçekleşmiştir. HDPE25IFR için maksimum CO değerleri sırasıyla 112 ppm, 126 ppm ve 270 ppm iken maksimum is değerleri 4,65 1/m, 5,26 1/m ve 7,52 1/m olarak llmştir.

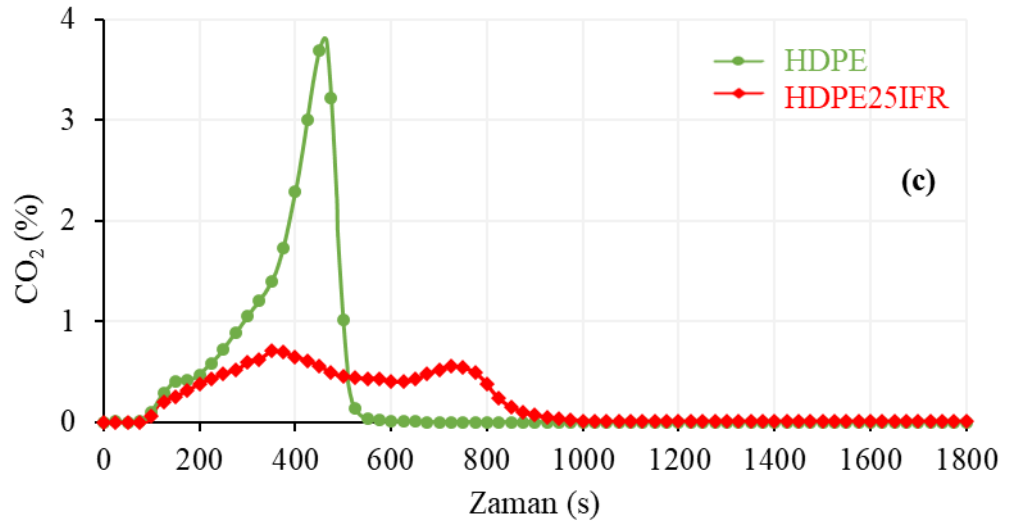
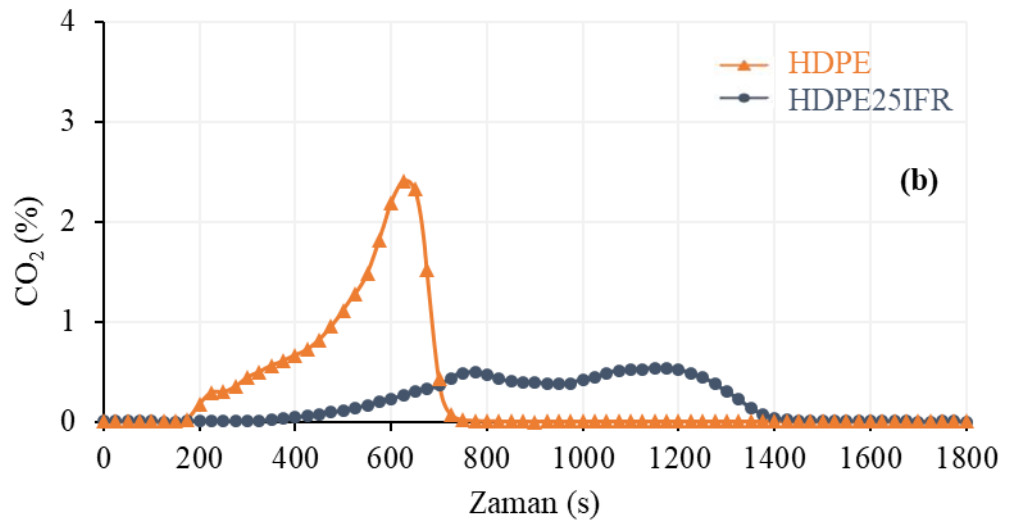
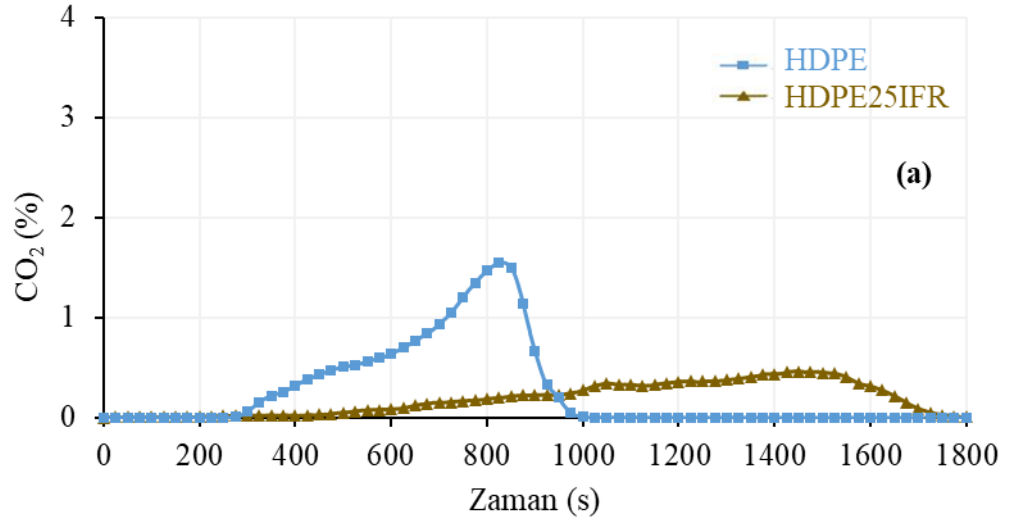
25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında HDPE’ye % 25 IFR ilavesinin CO₂ emisyonlarına etkisi şekil 5.77’de gösterilmektedir. HDPE25IFR malzemenin yavaş yanması ve yanma süresinin uzamasına bağlı olarak HDPE malzemeye göre oldukça düşük seviyede CO₂ oluştuğu tespit edilmiştir (Li ve diğ. 2021).  ısı akısındaki maksimum CO₂ emisyonları ham polietilene kıyasla sırasıyla yaklaşık % 70, % 78 ve % 82 oranlarda azalma göstererek % 0,47, % 0,53 ve % 0,71 değerlerine ancak ulaşabilmiştir. şekil 5.78’de üç farklı ısı akısında % 25 IFR ilavesinin sebep olduğu NO emisyonlarındaki artışı göstermektedir. PP25IFR malzemede olduğu gibi ısıl NO yanında malzeme kaynaklı NO oluşumu HDPE25IFR’nin NO emisyonlarının artmasına sebep olmuştur. Bununla birlikte, maksimum NO değerleri ham polietilene göre sırasıyla yaklaşık % 95, % 55 ve % 53 oranlarda artarak 15 ppm, 22 ppm ve 29 ppm olarak llmştir.



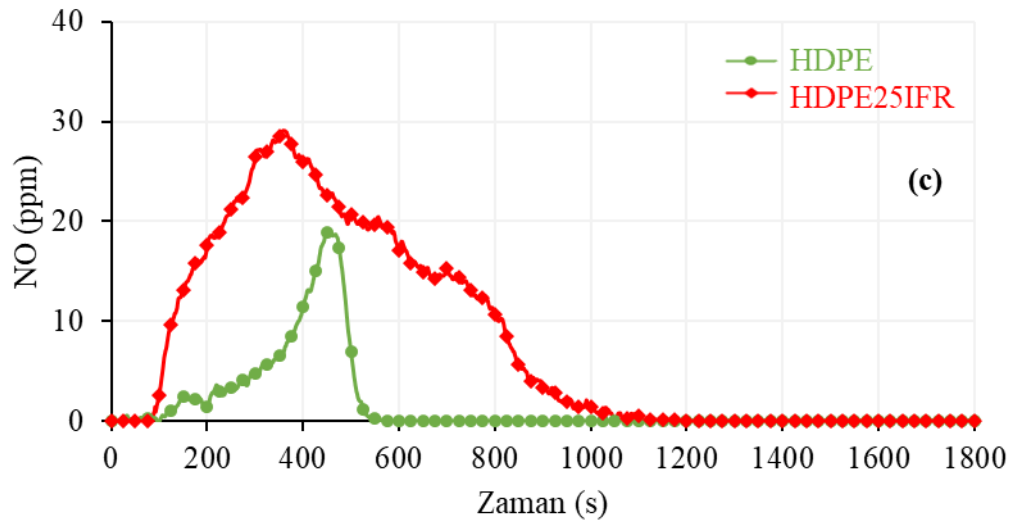
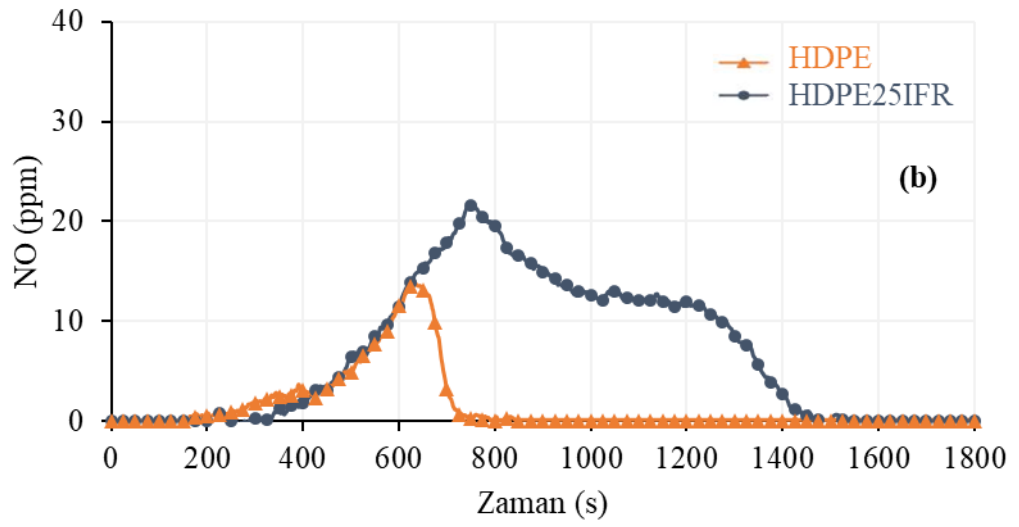
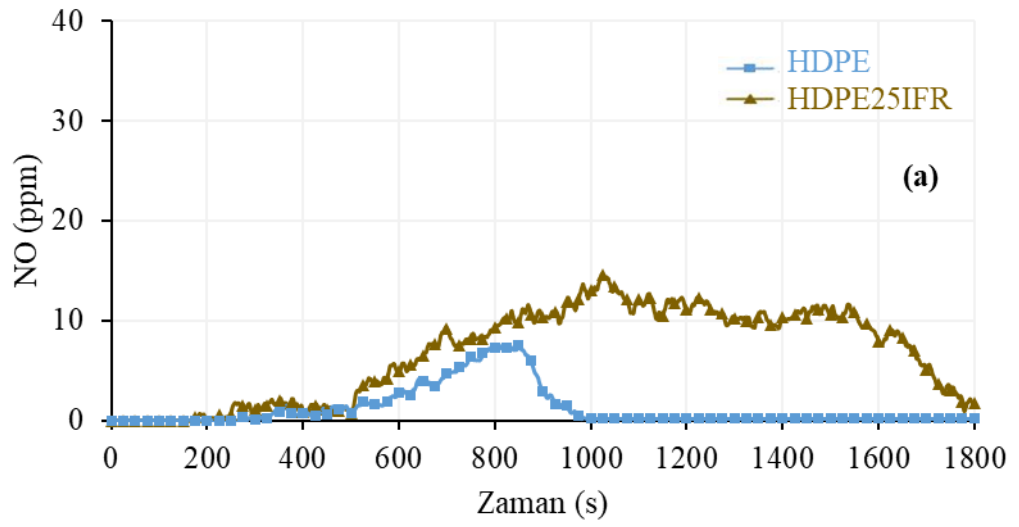
Şekil 5.75: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında CO değişimleri.



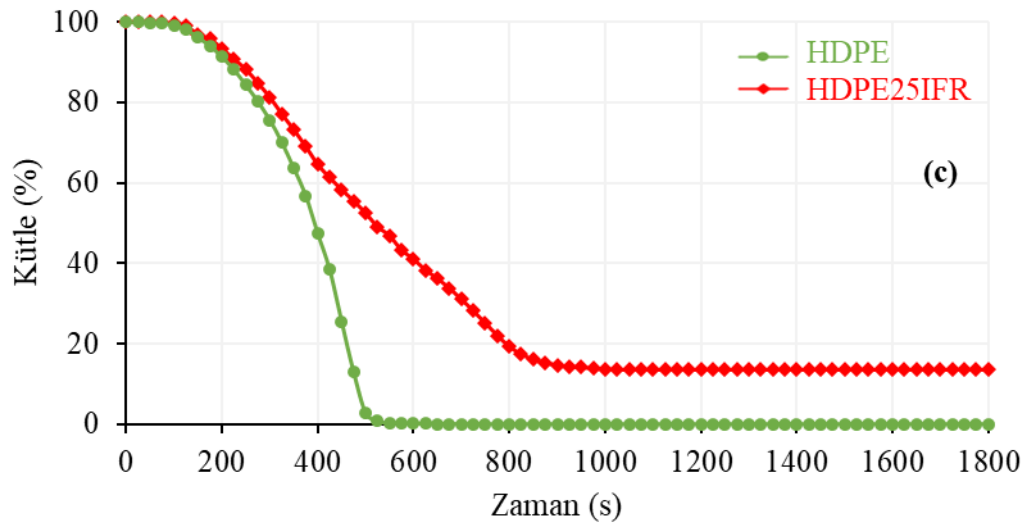
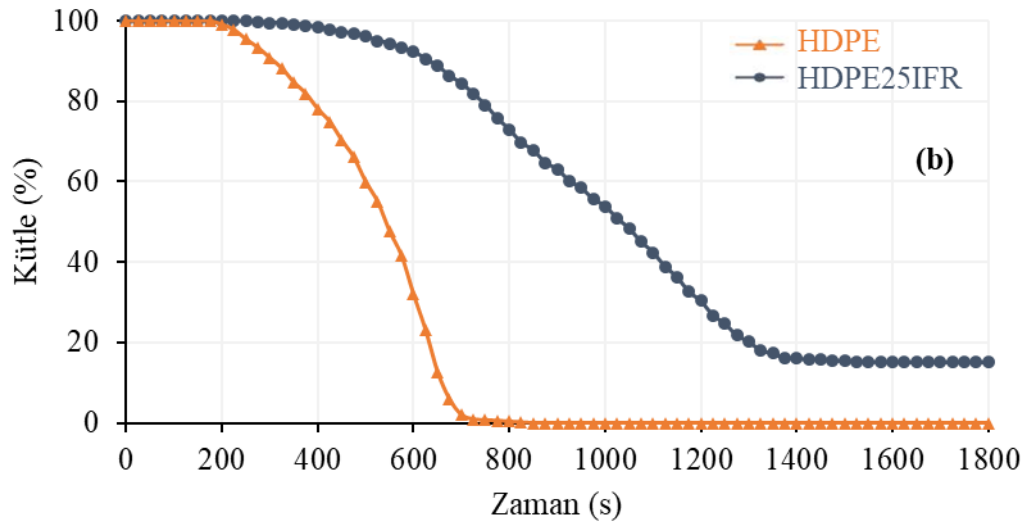
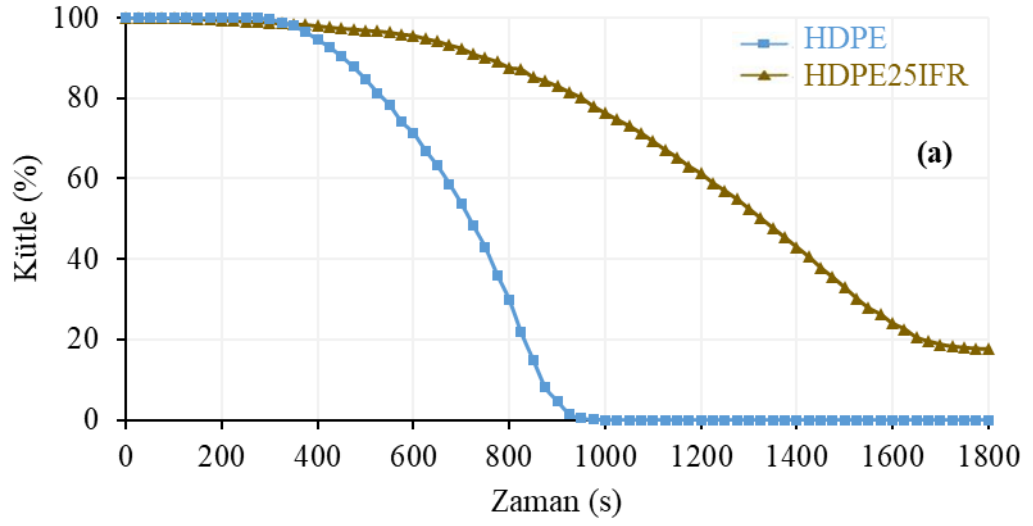
Şekil 5.76: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m^2 , (b) 35 kW/m^2 ve (c) 45 kW/m^2 ısı akıları altında is değişimleri.



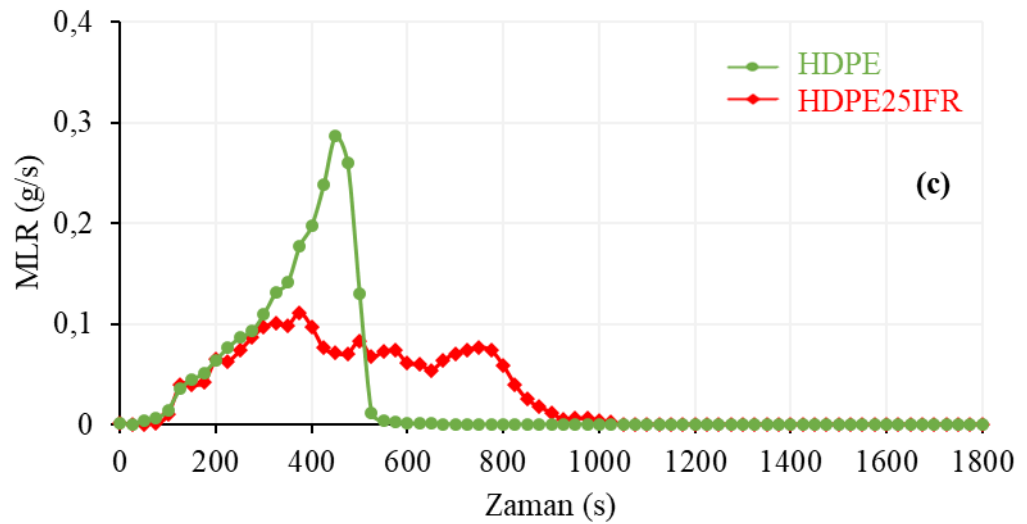
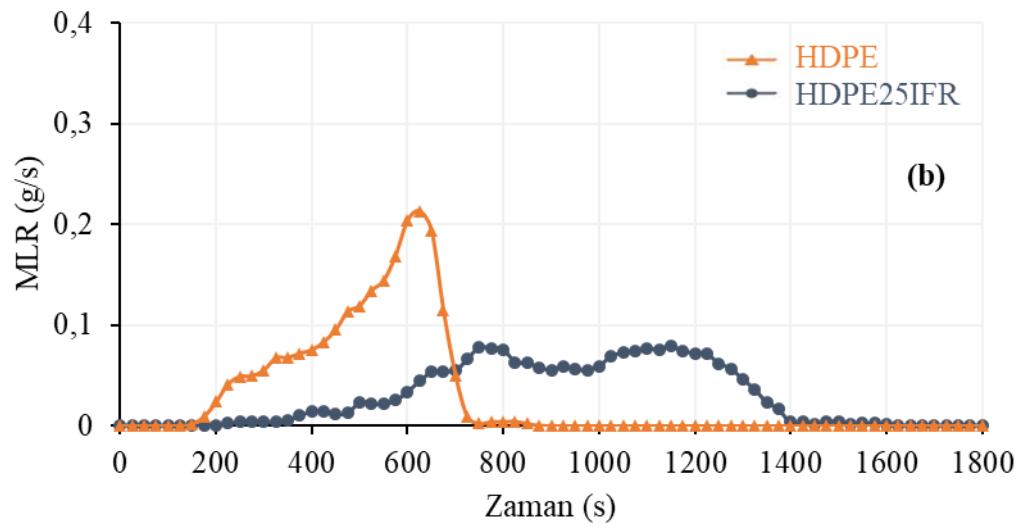
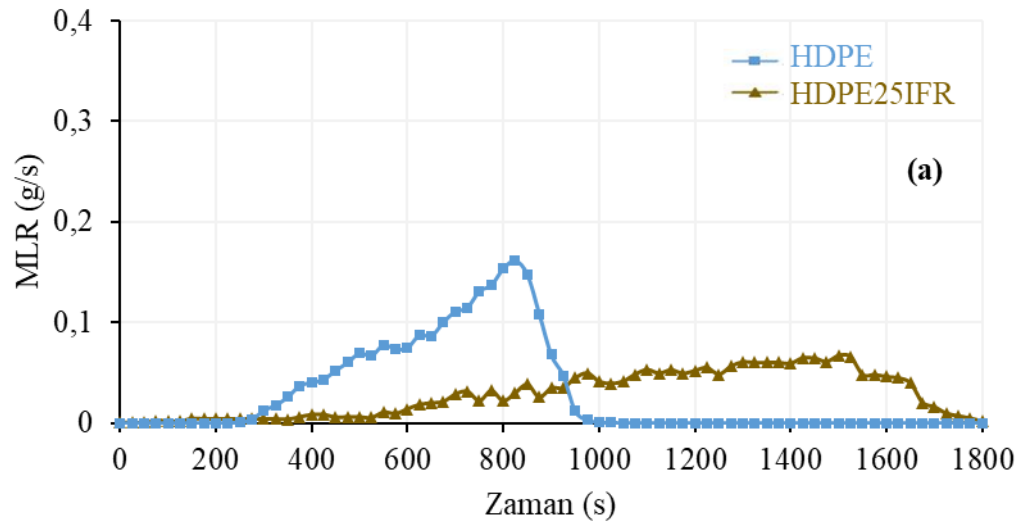
Şekil 5.77: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında CO₂ değişimleri.



Şekil 5.78: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında NO değişimleri.



Şekil 5.79: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında kütle değişimleri.

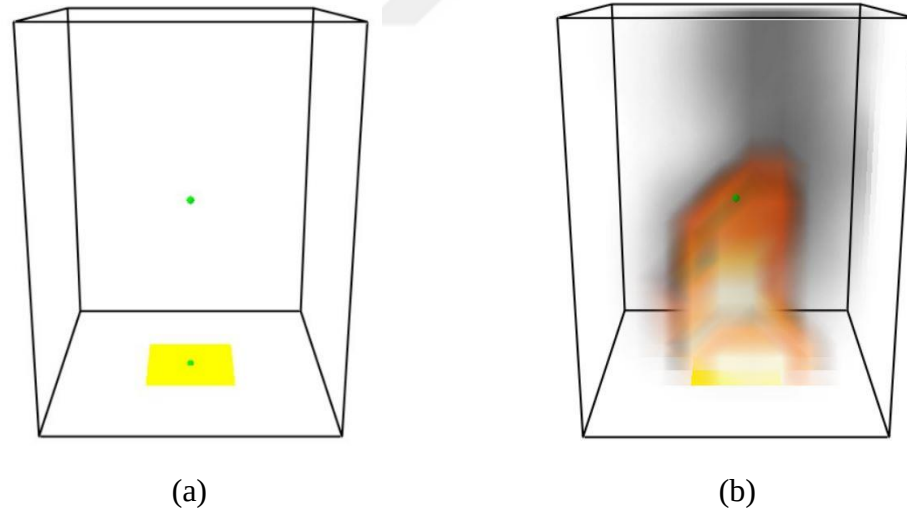


Şekil 5.80: HDPE25IFR ve HDPE'nin (a) 25 kW/m², (b) 35 kW/m² ve (c) 45 kW/m² ısı akıları altında MLR değişimleri.

HDPE ve HDPE25IFR malzemelerin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarındaki kütle kaybı ve kütle kayıp hızı (MLR) değişimleri sırasıyla Şekil 5.79 ve Şekil 5.80’de verilmektedir. HDPE malzemenin tamamı yanarak tükenmekte ve kalan kütle olmamaktadır. Kütlece % 25 IFR ilavesi ile yanma anında karbonlaşmış tabaka oluşumunun etkisi ile yanma hızı ve dolayısıyla yanan malzeme miktarı azalmaktadır. HDPE25IFR malzemenin 25 kW/m^2 , 35 kW/m^2 ve 45 kW/m^2 ısı akılarında yanma sonucunda sırasıyla % 17,67, % 15,00 ve % 13,53 oranlarında kalan kütle tespit edilmiştir (Li ve diğ. 2021). HDPE’ye kütlece % 25 IFR ilavesi ile maksimum MLR değerlerinde % 58, % 63, % 62 oranlarda azalmalar olmuştur. Maksimum MLR değerleri sırasıyla 0,067 g/s, 0,079 g/s ve 0,111 g/s olarak hesaplanmıştır.

5.8 Konik Kalorimetre Deney ve FDS Modelleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

FDS’de malzemenin yanma davranışlarını belirlemek için oluşturulan geometri ve malzemenin yanarken oluşturduğu görüntüsü Şekil 5.81’de gösterilmiştir.



Şekil 5.81: Malzemenin; (a) modelleme için oluşturulan geometrisi, (b) yanma esnasındaki görüntüsü.

PP, HDPE ve ABS malzemelerinin modellemesi için oluşturulan giriş dosyası parametreleri sırasıyla Tablo 5.16, Tablo 5.17 ve Tablo 5.18’de gösterilmiştir. 100 mm x 100 mm x 6 mm boyutlarındaki malzemelerin yandığı bölge olarak 300 mm x 300

mm x 400 mm boyutlarında bir hacim incelemeye alınmış ve bu bölge X, Y, Z eksenleri boyunca 9, 9, 12 parçaya bölünüp 972 küp oluşturulmuştur. Simülasyon süresi 1000 s olarak girilmiştir. Isı transfer katsayısı (HEAT_TRANSFER_COEFFICIENT=0), yalıtım koşulu (BACKING='INSULATED') ve esneme faktörü (STRETCH_FACTOR=1.0) değerleri girilip modelleme yapılmıştır.

Tablo 5.16: PP malzeme için giriş parametreleri.

PP	Değerler	Ölçüm/Kaynak
Yoğunluk (kg/m ³)	838	Hesaplandı.
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	T=25 °C, k=0,24 T=50 °C, k=0,19 T=75 °C, k=0,195 T=100 °C, k=0,16 T=125 °C, k=0,14 T=150 °C, k=0,30 T=163 °C, k=0,46 T=175 °C, k=0,35 T=200 °C, k=0,125	Dos Santos ve diğ. 2013
Özgül ısı (kJ/kgK)	T=50 °C, k=1,81 T=100 °C, k=2,00 T=150 °C, k=3,08 T=155 °C, k=3,82 T=160 °C, k=5,51 T=162 °C, k=6,66 T=165 °C, k=9,60 T=167 °C, k=10,41 T=169 °C, k=7,00	DSC
Yayıcılık	0,96	Linteris ve diğ. 2013
Absorpsiyon katsayısı (1/m)	966	Linteris ve diğ. 2013
Reaksiyon ısısı (kJ/kg)	1906	TG-DTA
Yanma ısısı (kJ/kg)	43000	Konik kalorimetre
Reaksiyon sayısı	1	-
Arrhenius frekans faktörü (1/s)	$2,15 \cdot 10^{14} - 8,66 \cdot 10^{16}$	TG-DTA
Aktivasyon enerjisi (kJ/kmol)	238000 - 256000	TG-DTA
İs verimi (g/g)	0,059	Khan ve diğ. 2016

Tablo 5.17: HDPE malzeme için giriş parametreleri.

HDPE	Değerler	Ölçüm/Kaynak
Yoğunluk (kg/m ³)	892	Hesaplandı.
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	T=50 °C, k=0,44 T=75 °C, k=0,43 T=100 °C, k=0,425 T=125 °C, k=1,35 T=136 °C, k=2,25 T=150 °C, k=0,25 T=175 °C, k=0,22 T=200 °C, k=0,17	Dos Santos ve diğ. 2013
Özgül ısı (kJ/kgK)	T=50 °C, k=2,03 T=100 °C, k=2,61 T=110 °C, k=2,96 T=120 °C, k=4,23 T=125 °C, k=6,84 T=127 °C, k=9,00 T=130 °C, k=15,19 T=133,6 °C, k=27,0 T=136,6 °C, k=7,26	DSC
Yayıcılık	0,92	Stoliarov ve diğ. 2009
Absorpsiyon katsayısı (1/m)	1300	Stoliarov ve diğ. 2009
Reaksiyon ısısı (kJ/kg)	1051	TG-DTA
Yanma ısısı (kJ/kg)	45775	Konik kalorimetre
Reaksiyon sayısı	1	-
Arrhenius frekans faktörü (1/s)	$8,66 \cdot 10^{16} - 1,91 \cdot 10^{21}$	TG-DTA
Aktivasyon enerjisi (kJ/kmol)	274000 - 340000	TG-DTA
İs verimi (g/g)	0,06	Khan ve diğ. 2016

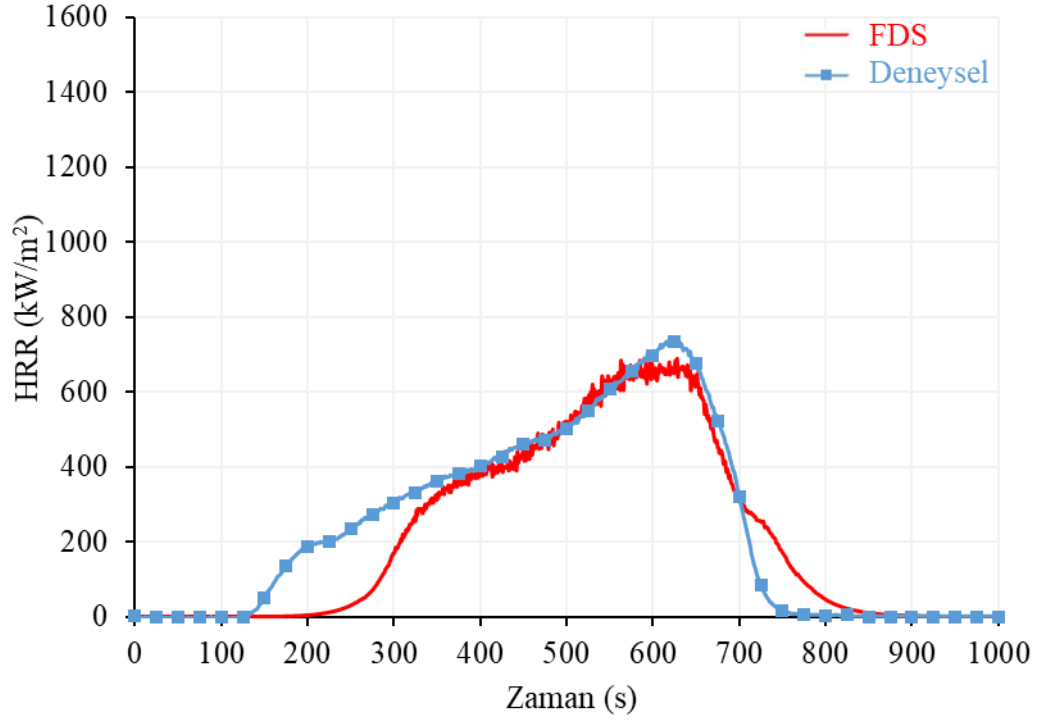
PP, HDPE ve ABS malzemelerin malzeme özellikleri ve modelleme parametreleri kullanılarak FDS programında üç farklı ısı akısında (25 kW/m², 35 kW/m², 45 kW/m²) yanma modelleri üzerine çalışmalar yapılmış olup elde edilen HRR ve MLR değerleri, deneysel olarak konik kalorimetre testlerinden elde edilen HRR ve MLR değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.18: ABS malzeme için giriş parametreleri.

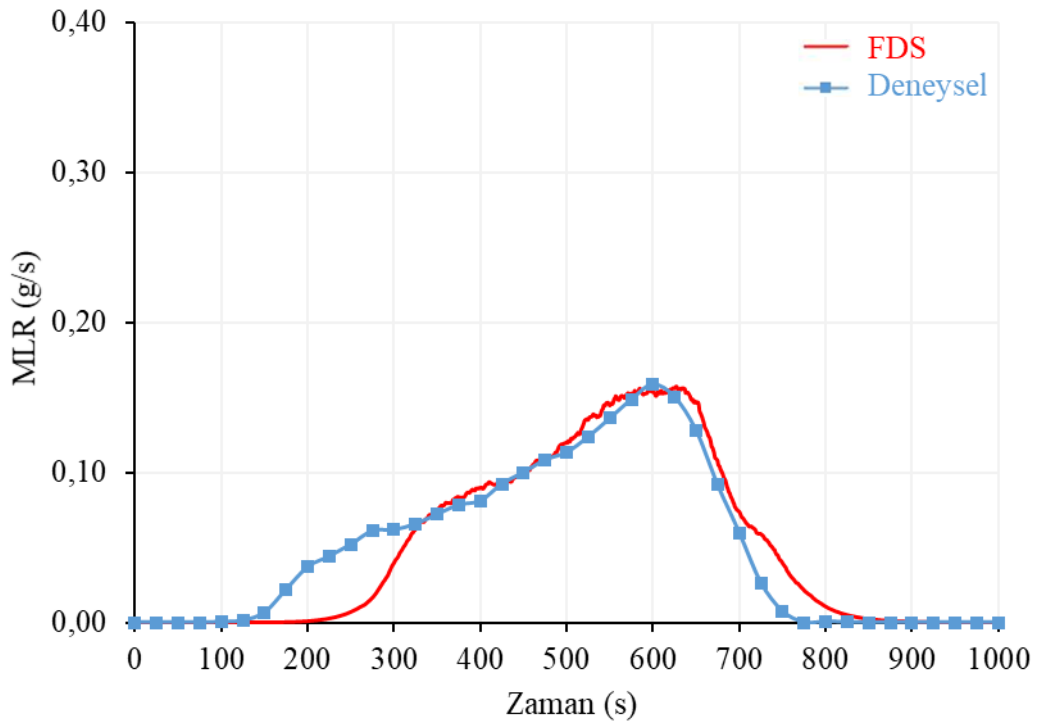
ABS	Değerler	Ölçüm/Kaynak
Yoğunluk (kg/m ³)	ABS 1071	Hesaplandı.
	CHAR 80	Li ve diğ. 2015
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	ABS T=27 °C, k=0,216 T=597 °C, k=0,056	Li ve diğ. 2015
	CHAR T=27 °C k=0,098 T=597 °C, k=2,821	
Özgül ısı (kJ/kgK)	ABS T=50 °C, k=1,46 T=100 °C, k=1,63 T=115 °C, k=2 T=150 °C, k=1,94 T=200 °C, k=1,9	DSC
	CHAR T=27 °C, k=0,854 T=597 °C, k=0,917	Li ve diğ. 2015
Yayıcılık	ABS 0,95	Li ve diğ. 2015
	CHAR 0,86	
Absorpsiyon katsayısı (1/m)	ABS 1800	Li ve diğ. 2015
	CHAR 2500	
Reaksiyon ısısı (kJ/kg)	1501	TG-DTA
Yanma ısısı (kJ/kg)	32900	Konik kalorimetre
Reaksiyon sayısı	1	-
Arrhenius frekans faktörü (1/s)	$2,90 \cdot 10^{13} - 1,17 \cdot 10^{16}$	TG-DTA
Aktivasyon enerjisi (kJ/kmol)	215000 - 249000	TG-DTA
İs verimi (g/g)	0,105	Khan ve diğ. 2016

5.8.1 PP'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması

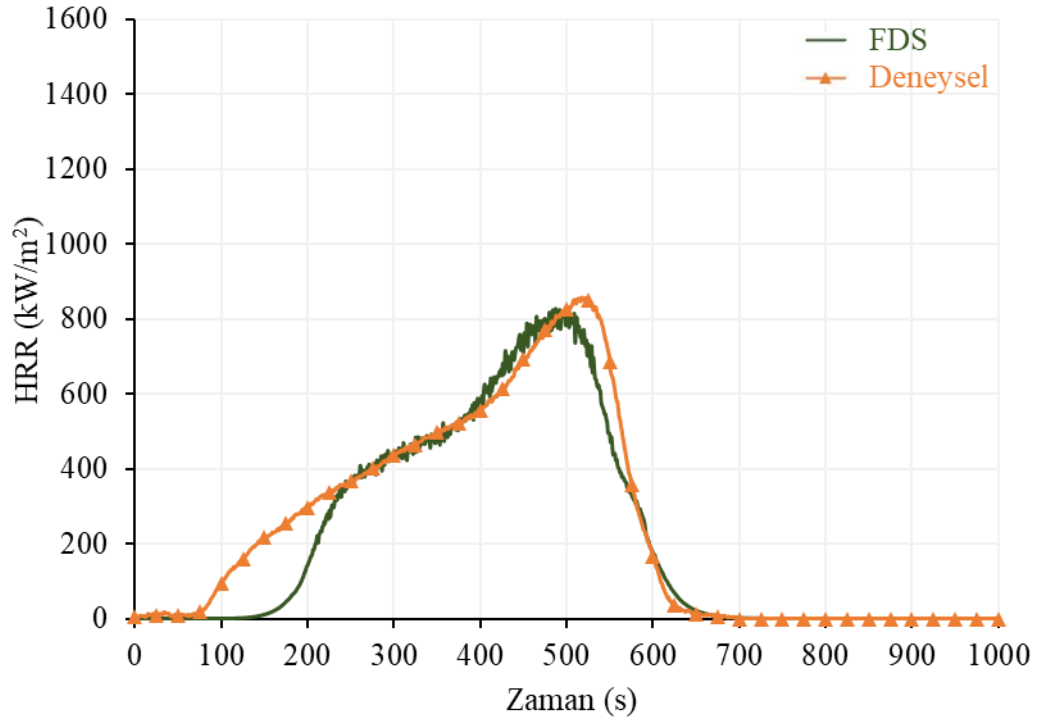
PP malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen konik kalorimetre testleri ve FDS programı kullanılarak elde edilen modelleme HRR ve MLR değişimleri sırasıyla Şekil 5.82-5.87'de karşılaştırılmıştır. PP malzemenin üç farklı ısı akısındaki deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırıldığında genel olarak maksimum ısı yayılımının olduğu bölgede modelleme sonuçlarının deneysel sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, malzemenin tutuşma ve yanma başlangıcı bölgelerinde farklılıklar olduğu modellemenin daha geç tutuşma ve yanma başlangıcı verdiği görülmektedir.



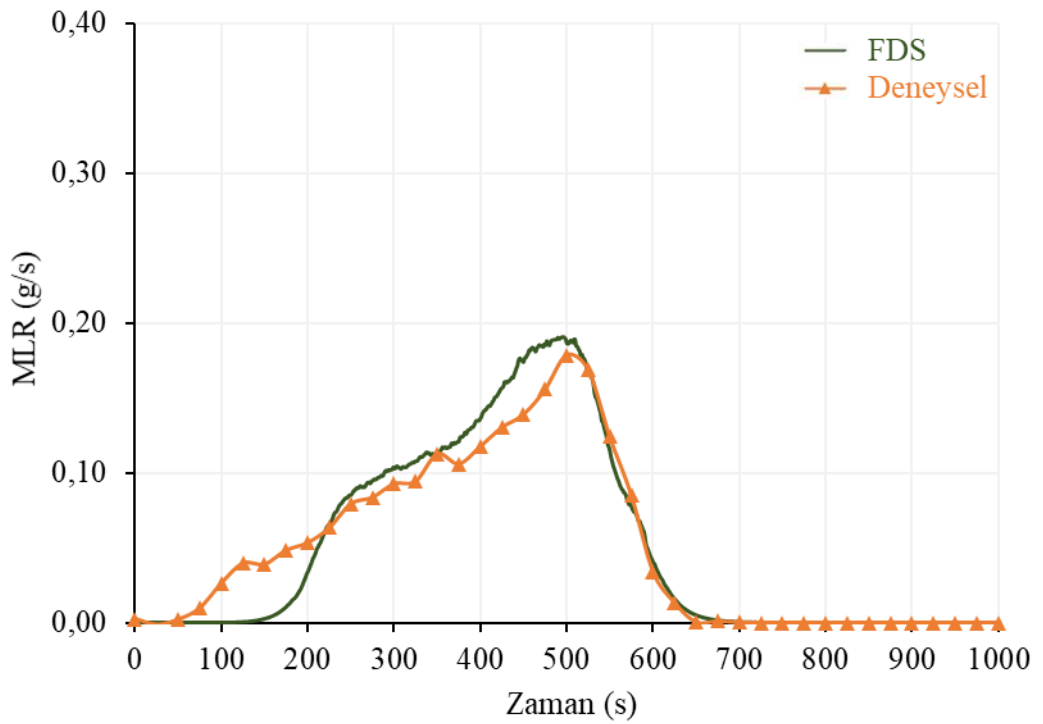
Şekil 5.82: PP'nin 25 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme HRR değişimleri.



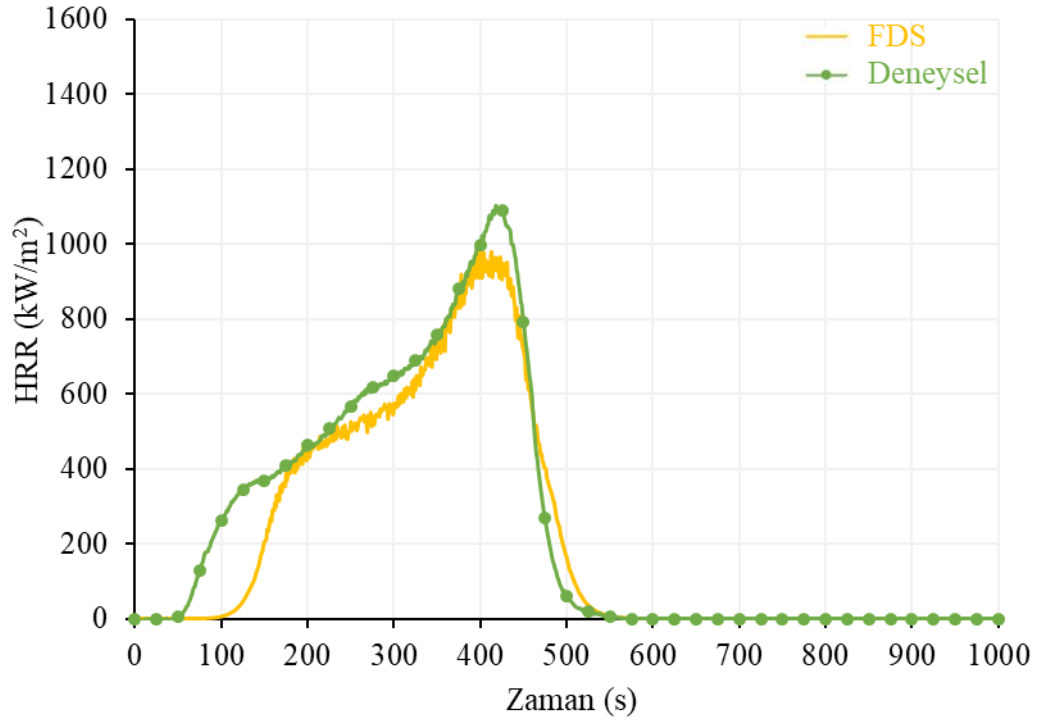
Şekil 5.83: PP'nin 25 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme MLR değişimleri.



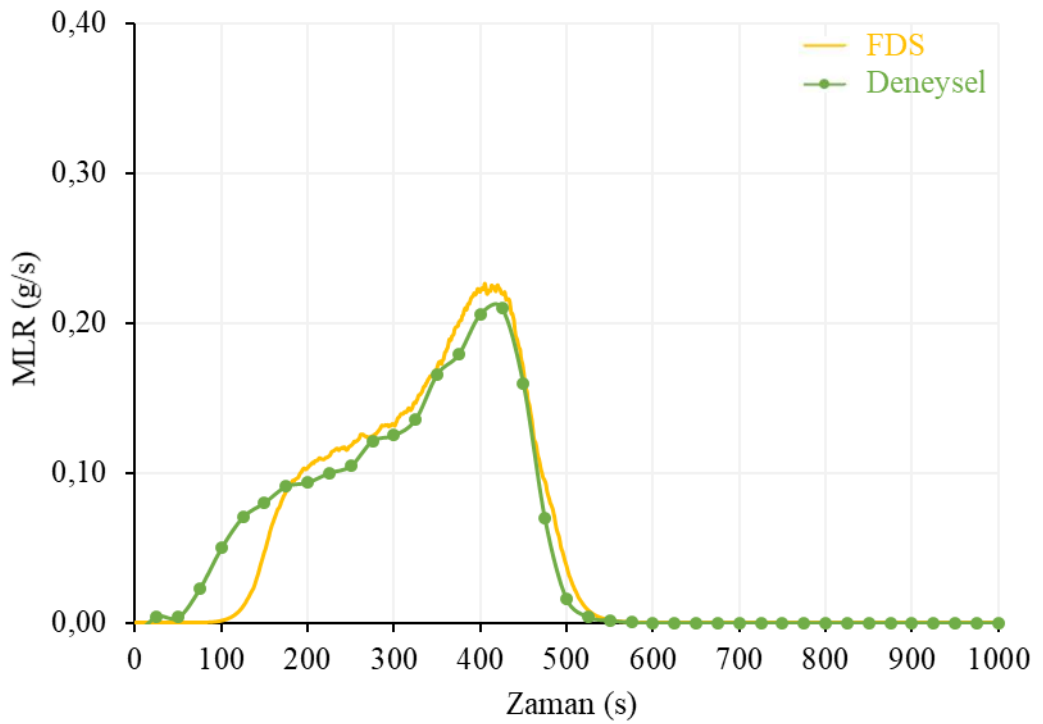
Şekil 5.84: PP'nin 35 kW/m^2 ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.



Şekil 5.85: PP'nin 35 kW/m^2 ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.



Şekil 5.86: PP'nin 45 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.

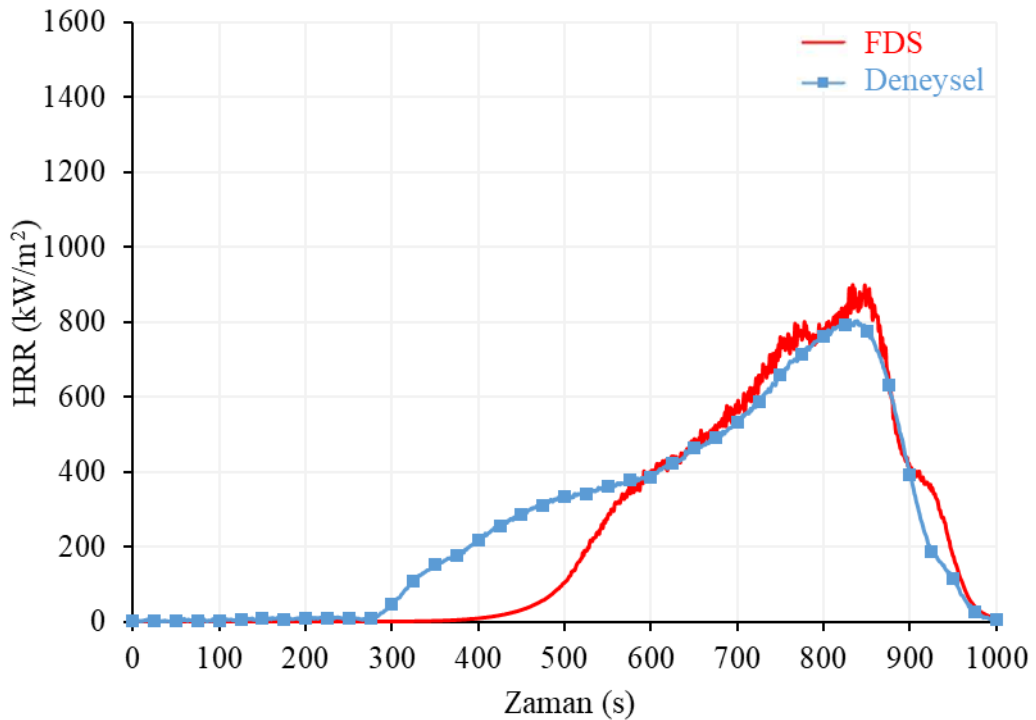


Şekil 5.87: PP'nin 45 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.

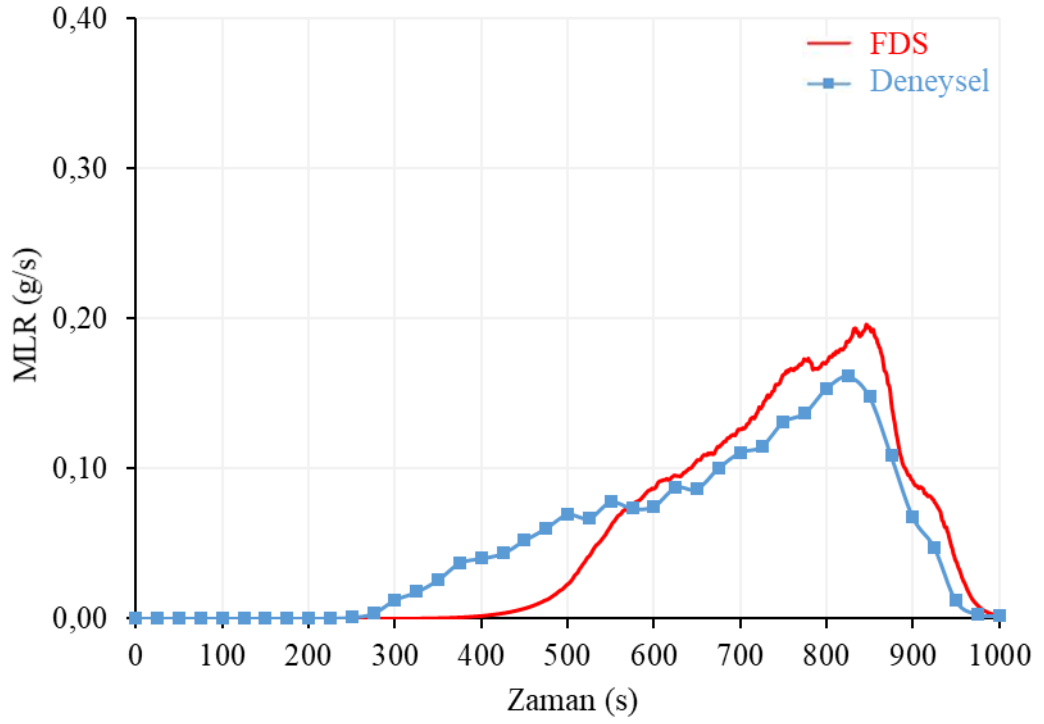
5.8.2 HDPE'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması

HDPE malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen konik kalorimetre testi ve FDS'den elde edilen HRR ve MLR değişimleri sırasıyla Şekil 5.88-5.93'te gösterilmiştir.

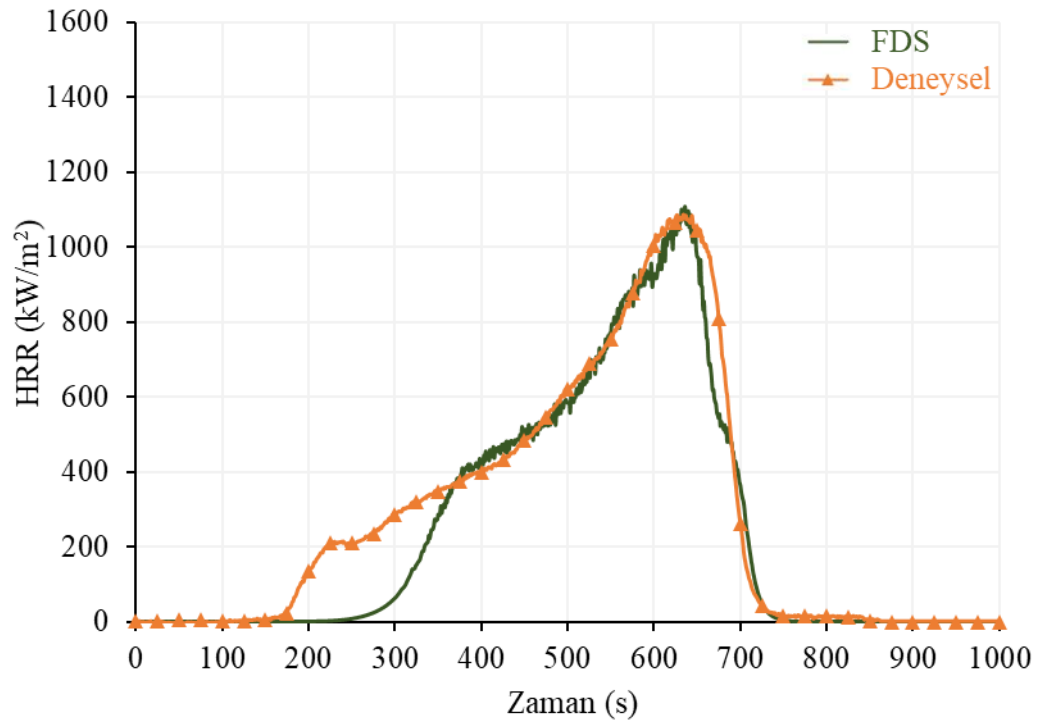
HDPE için üç farklı ısı akısındaki deneysel ve modellemelerden elde edilen HRR ve MLR değişimleri karşılaştırıldığında, PP malzemenin yanma modellemesinde olduğu gibi, FDS modelinin daha geç tutuşma ve yanma başlangıcı oluşturduğu görülmektedir (Stoliarov ve diğ. 2009, Kempel ve diğ. 2012). Daha sonraki yanma bölgelerinde model sonuçlarının deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu değerlendirilmiştir. Model sonuçlarının 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında sırasıyla yaklaşık 600., 400. ve 200. saniyelerden sonra deneysel sonuçlara daha yakın değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.



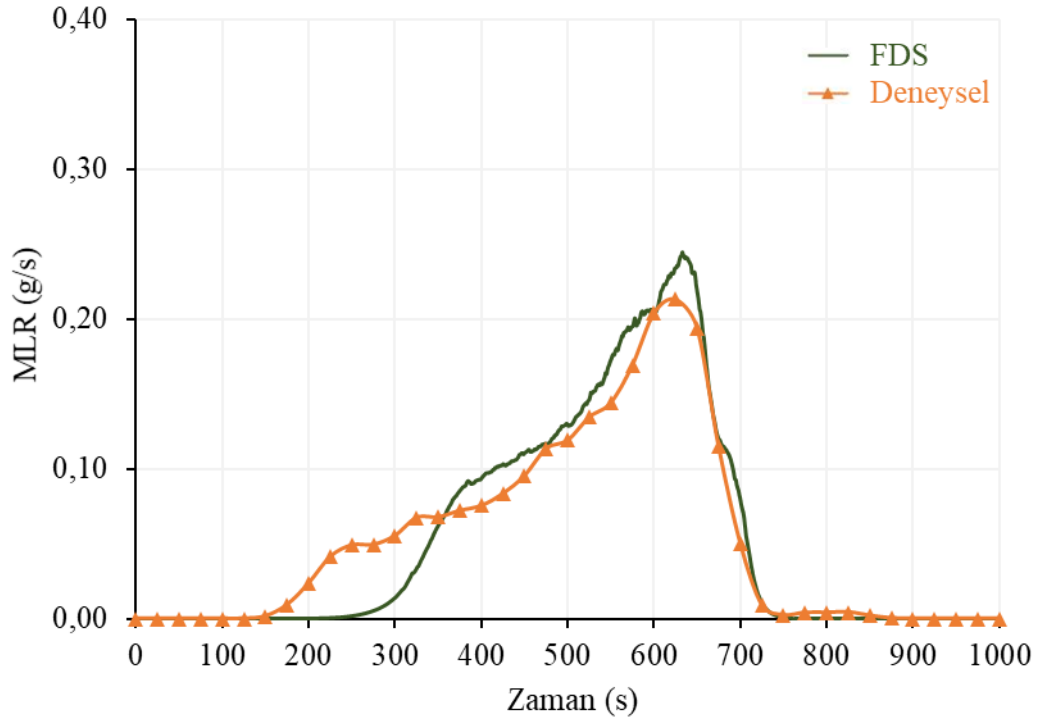
Şekil 5.88: HDPE'nin 25 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.



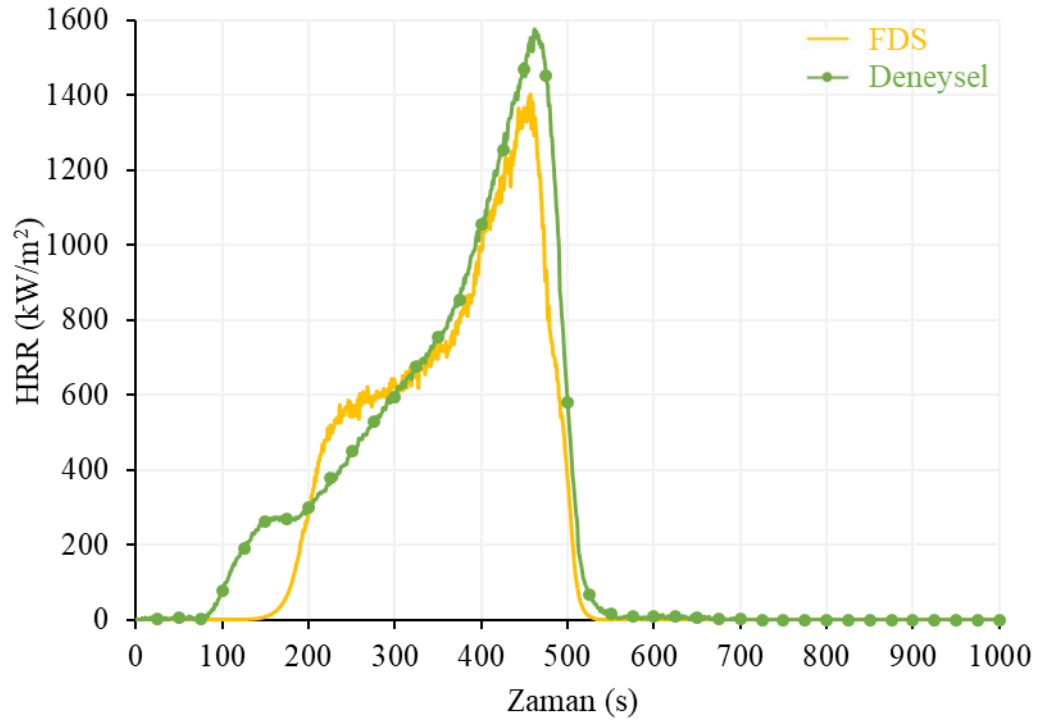
Şekil 5.89: HDPE'nin 25 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.



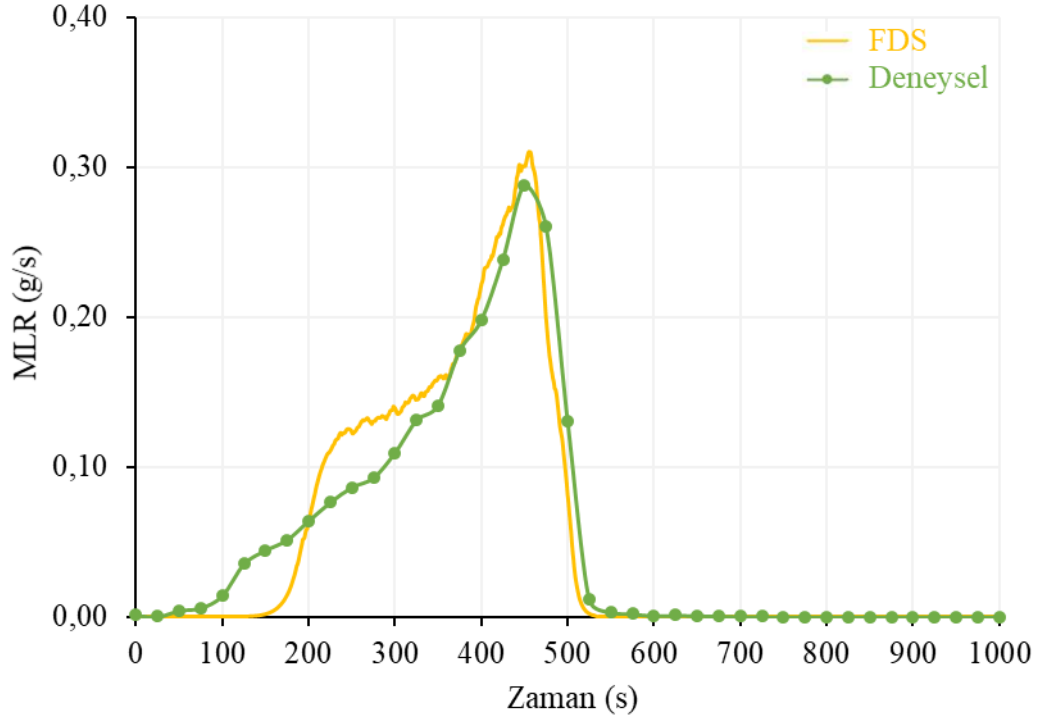
Şekil 5.90: HDPE'nin 35 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.



Şekil 5.91: HDPE'nin 35 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme MLR değişimleri.



Şekil 5.92: HDPE'nin 45 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme HRR değişimleri.

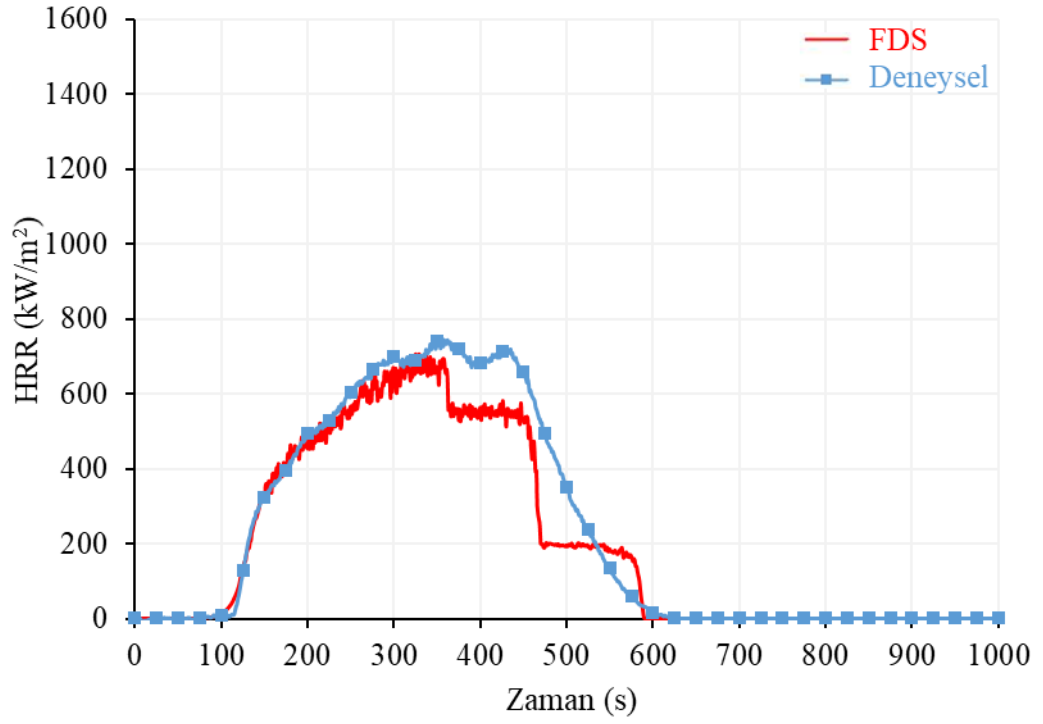


Şekil 5.93: HDPE'nin 45 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.

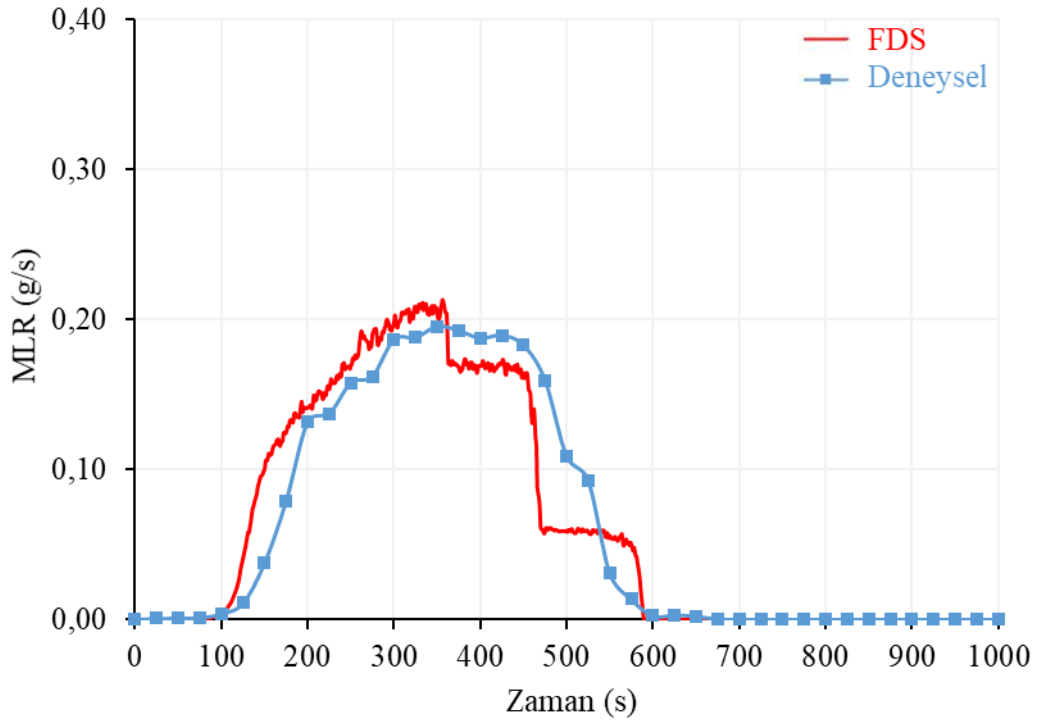
5.8.3 ABS'nin deneysel ve modelleme sonuçlarının karşılaştırması

ABS malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında gerçekleştirilen konik kalorimetre testleri ve FDS'den elde edilen modelleme HRR ve MLR değişimleri sırasıyla Şekil 5.94-5.99'da gösterilmiştir.

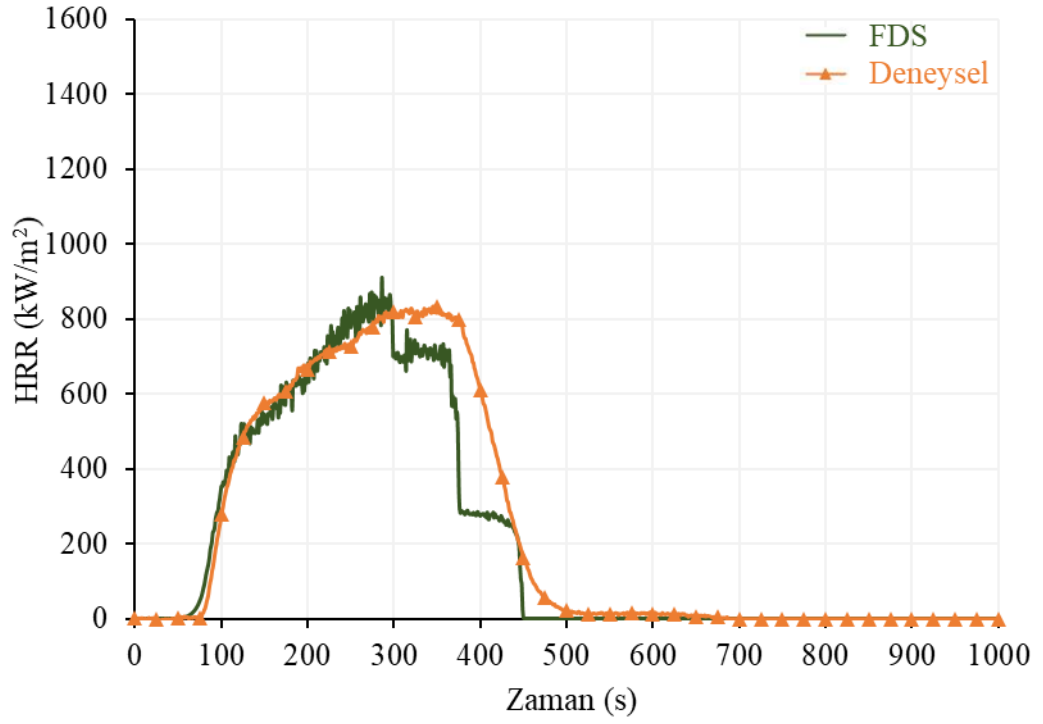
Üç farklı ısı akısındaki modelleme ve deneysel veriler incelendiğinde, HRR ve MLR değişimlerinin 45 kW/m² ısı akısında genel olarak uyumlu olduğu, 25 kW/m² ve 35 kW/m² ısı akılarında ise kısmen uyumlu olduğu görülmektedir (Marquis ve diğ. 2013, Li ve diğ. 2015). PP ve HDPE malzemelerin modelleme sonuçlarından farklı olarak, ABS malzemenin modelleme sonuçlarının tutuşma başlangıcı ve yanma ilerlemesi bölgelerinde deneysel verilerle daha uyumlu olduğu, maksimum HRR ve MLR sonrası uyumun daha zayıf olduğu görülmektedir.



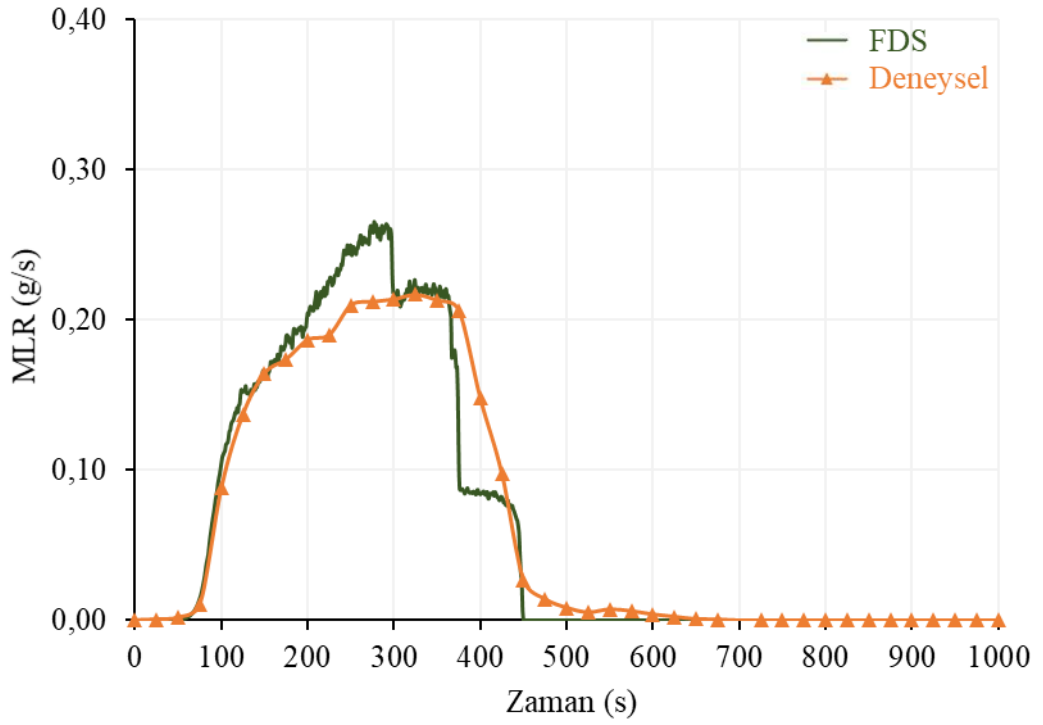
Şekil 5.94: ABS'nin 25 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme HRR değişimleri.



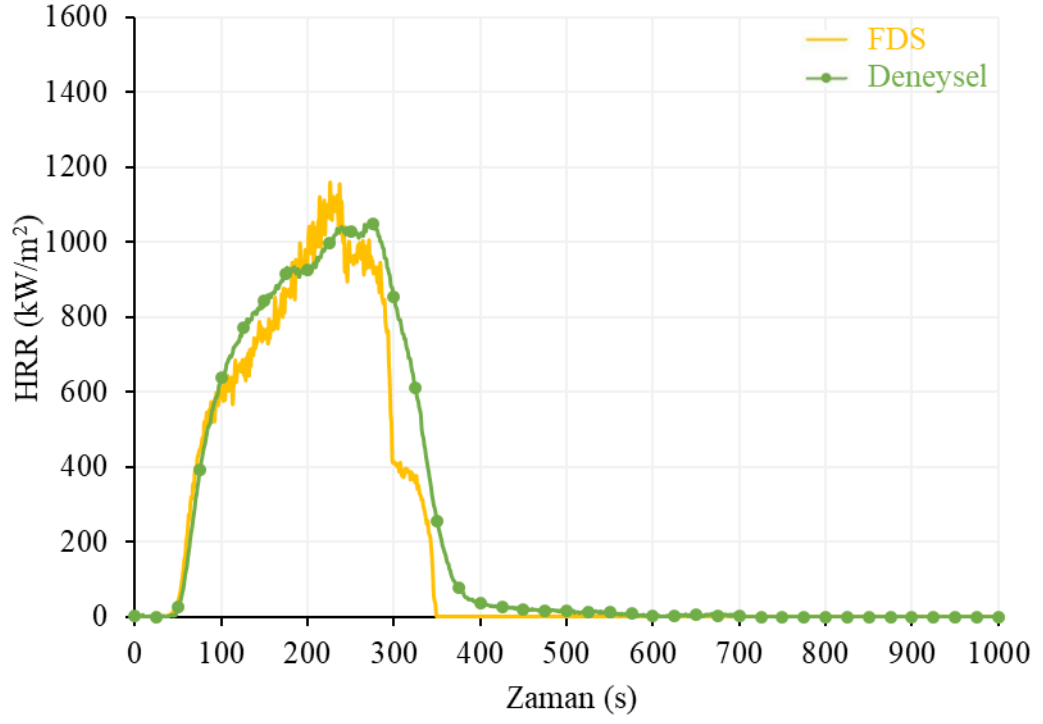
Şekil 5.95: ABS'nin 25 kW/m² ısı akısında deneysel ve modelleme MLR değişimleri.



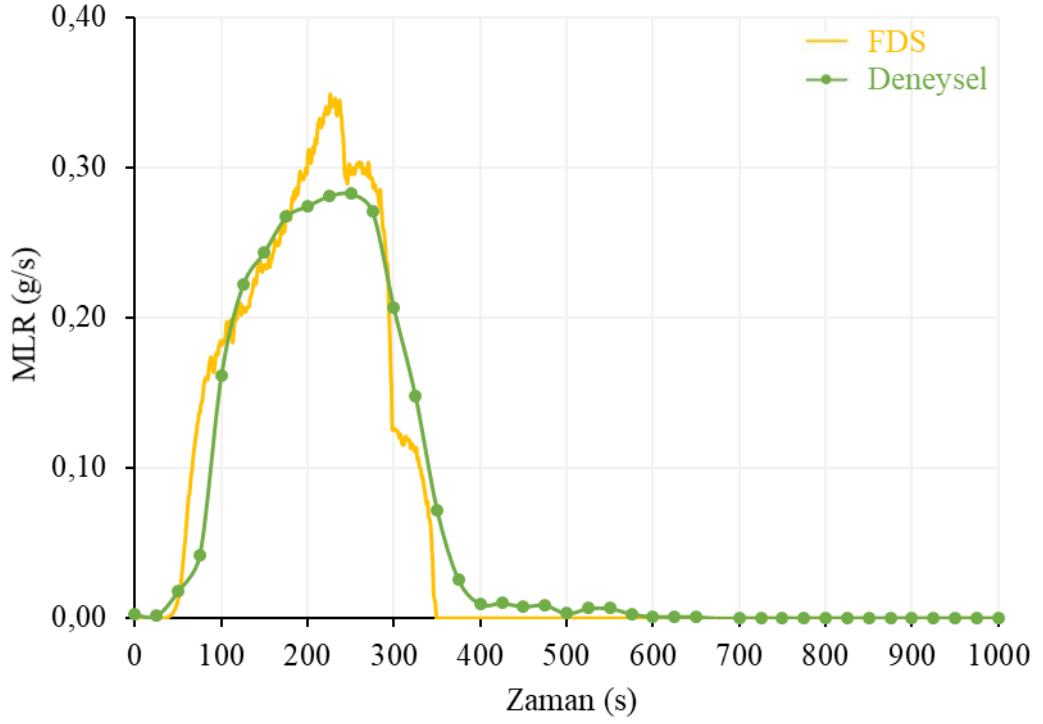
Şekil 5.96: ABS'nin 35 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme HRR değişimleri.



Şekil 5.97: ABS'nin 35 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme MLR değişimleri.



Şekil 5.98: ABS'nin 45 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme HRR değişimleri.



Şekil 5.99: ABS'nin 45 kW/m² ısı akısında deneyisel ve modelleme MLR değişimleri.

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Tez kapsamında birçok alanda yaygın olarak kullanılan rijit poliüretan köpük (PUR), polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) malzemelerin farklı yangın senaryolarında yanma davranışlarının belirlenmesi amacı ile farklı ısı akıları altında konik kalorimetre testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, amonyum polifosfat ve pentaeritritol sentezi ile elde edilen kabaran alev geciktirici (IFR) kütlece % 25 oranında PP ve HDPE malzemelere ilave edilerek IFR ilavesinin yanma davranışlarına etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalar yanında özellikle konik kalorimetre testinde gerçekleştirilen yanmanın modellenmesi için FDS (Fire Dynamics Simulator) programı kullanılmıştır. Yanma davranışlarının tam anlaşılabilmesi ve modelleme çalışmalarında malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacı ile konik kalorimetre testleri dışında farklı çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Hem ham hem de IFR ilaveli malzemelerin 30°C ile 1000 °C sıcaklık aralığında 20 °C/min ısıtma hızında termogravimetrik analizleri gerçekleştirilmiştir. PUR malzemenin içeriği ve karbonlaşmış tabaka oluşturabilme özelliği nedeniyle başlıca üç basamakta bozunduğu ve malzemenin kütlece yaklaşık % 84,1 oranında kayba uğradığı tespit edilmiştir. Ana bozunma basamağı 220-440 °C aralığında gerçekleşmiştir. Bu basamakta maksimum bozunma sıcaklığı 355,2 °C ve maksimum bozunma hızı 17,3 %/min olarak belirlenmiştir.

PP, HDPE ve ABS malzemeler ise karbonlaşmış tabaka oluşturmada yanan malzemeler olarak tek basamakta bozunmuşlardır. Polipropilenin 20 °C/min ısıtma hızında ısıl bozunması sonucu 1000 °C’de kalan kütle olmaz iken HDPE ve ABS malzemelerin ısıl bozunma sonucu kalan kütle oranları % 0,8 ve % 1,9 olarak tespit edilmiştir. Bu malzemeler arasında maksimum bozunma sıcaklığı en düşük olan ABS malzeme olup bu değer 446,7 °C olarak belirlenmiştir. PP ve HDPE malzemelerin maksimum bozunma sıcaklık değerleri sırasıyla 478,0 °C ve 497,7 °C olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, en yüksek maksimum bozunma hızı HDPE malzemenin bozunmasında 74,5 %/min olarak belirlenmiştir. PP ve ABS malzemelerin maksimum bozunma hızı değerleri ise sırasıyla 59,8 %/min ve 39,7 %/min olarak bulunmuştur.

PP ve HDPE malzemelere kütlece % 25 IFR ilavesi ile elde edilen PP25IFR ve HDPE25IFR malzemelerin aynı şartlarda termogravimetrik analizleri yapılmıştır. IFR içinde bulunan APP ve PER'in erken bozunarak karbonlaşmış tabaka oluşturmaya bağlı olarak ısı bozunma daha düşük sıcaklıklarda başlamasına rağmen PP25IFR ve HDPE25IFR malzemelerin maksimum bozunma sıcaklıklarında sırasıyla 14,1 °C ve 6,6 °C artışlar belirlenmiştir. Ayrıca, maksimum bozunma hızlarında da PP ve HDPE'ye göre sırasıyla 8,5 %/min ve 18,5 %/min kadar düşme olmuştur. Bunlara ek olarak, 1000 °C'de PP malzemedan kalan kütle olmaz iken PP25IFR malzemedan kalan kütle oranı % 3,3 olarak tespit edilmiştir. HDPE25IFR'den kalan kütle oranı ise % 2,7 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında malzemelere IFR ilavesinin maksimum bozunma sıcaklıklarını geciktirmesi yanında bozunma hızlarını da azalttığı değerlendirilebilir. Ayrıca karbonlaşmış tabakanın etkisi ile kalan kütle oranlarında da artışlar olduğu belirlenmiştir.

Ham malzemelerin kinetik parametrelerinin belirlenmesi amacı ile 20 °C/min dışında 10 °C/min ve 5 °C/min ısıtma hızlarında da termogravimetrik analizler yapılmıştır. Analizlerin gerçekleştirildiği cihazın paket programı ile E ve A değerleri tespit edilmiştir.

Malzemelerin yanma modelleme çalışmalarında kullanılmak üzere termogravimetrik cihazın diferansiyel termal analiz özelliği kullanılarak reaksiyon ısıları tespit edilmiştir. Malzemeler içinde en düşük reaksiyon ısısına (1051 kJ/kg) HDPE malzemenin sahip olduğu, ABS malzemesinin reaksiyon ısısının 1501 kJ/kg ve PP malzemenin ise en büyük reaksiyon ısısına (1906 kJ/kg) sahip olduğu belirlenmiştir.

Malzemelerin plastik enjeksiyon makinesi ile üretimleri sonrası yoğunlukları da belirlenmiştir. PUR, PP, HDPE ve ABS malzemelerin yoğunlukları sırasıyla 46 kg/m³, 838 kg/m³, 892 kg/m³ ve 1071 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Ayrıca % 25 IFR ilavesi edilmesi üretilen PP ve HDPE esaslı kompozit malzemelerin yoğunlukları sırasıyla 974 kg/m³ ve 1037 kg/m³ olarak tespit edilmiştir.

Isı iletim katsayılarının tespiti çalışmalarında beklenildiği gibi ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan PUR malzemesi ısı iletim katsayısı en düşük değere (26,3 mW/m.K) sahiptir. ABS, PP ve HDPE malzemelerin ısı iletim katsayıları sırasıyla

191,7 mW/m.K, 242,7 mW/m.K ve 447,7 mW/m.K olduğu tespit edilmiştir. HDPE malzemenin ısı iletim katsayısının PP ve ABS'den çok büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca % 25 IFR ilavesi ile elde edilen PP ve HDPE esaslı kompozit malzemelerin ısı iletim katsayılarının ham PP ve HDPE'ye göre sırasıyla % 6,4 ve % 1,7 oranlarında arttığı tespit edilmiştir.

Malzemelerin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları altında konik kalorimetre testleri yapılarak farklı yangın senaryolarında yanma davranışları araştırılmıştır. PUR malzeme düşük ısı iletim katsayısına (26,3 mW/m.K) sahip olduğu için ısı akısına maruz kalması sonrası yüzeyde kısa sürede sıcaklık yükselmesine bağlı ısıl bozunma ile ortaya çıkan yanabilen uçucu gazlar hızlıca tutuşmaktadır. Yüksek ısı akılarında tutuşma zamanı azalmaktadır. 25 kW/m² ısı akısında 9 s'de tutuşan malzeme, ısı akısının 35 kW/m² ve 45 kW/m²'ye çıkması ile tutuşma zamanları sırasıyla 6 s ve 3 s değerlerine düşmüştür. Yine ısı akısının artışıyla bağlı olarak maksimum ısı yayılım hızları ve yanan malzeme miktarları artmaktadır. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında THR değerleri 22,97 MJ/m², 28,64 MJ/m² ve 38,84 MJ/m² olarak belirlenmiştir. PUR yanma sırasında karbon tabakası oluşturan bir malzeme olarak maksimum ısı yayılım hızına ulaşıldıktan sonra ısı yayılım hızı düşerek belirli bir süre sonra alev sönmektedir. Genel olarak PUR malzemenin ısı akısının artışı ile maksimum CO ve is emisyonlarının arttığı görülmektedir. Alevin sönmesi sonrası düşük seviyede CO ve is emisyonları görülmekte ve bu da PUR malzemenin alevli yanma sonrası alevsiz yanma davranışını göstermektedir. Yanan malzeme miktarının artmasına bağlı olarak maksimum CO₂ emisyonu da yüksek ısı akılarında artmaktadır. PUR malzemenin yanması sırasında hem sıcaklığa bağlı NO emisyonu hem de malzeme içeriğinde bulunan azot kaynaklı NO emisyonları oluşmaktadır. Maksimum NO değeri 45 kW/m² ısı akısı altında 33 ppm olarak belirlenmiştir. Bu değer 35 kW/m² ve 25 kW/m² ısı akılarında 29 ve 23 ppm değerlere düşmektedir. Isı akısının artması ile daha kısa sürede daha fazla malzeme yandığı için maksimum kütle kayıp hızları da artmaktadır.

PP malzemenin yanma karakteristiği PUR malzemedan oldukça farklıdır. PP malzemedeki karbonlaşan bir tabaka oluşumu olmadan yanma gerçekleşmektedir. Uygulanan bütün ısı akılarında PP malzemenin tamamı yanmakta, kalan kütle bulunmamaktadır. PP malzemenin tutuşma zamanlarının PUR malzemeye göre daha

geç olduğu belirlenmiştir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında tutuşma zamanları sırasıyla 126 s, 72 s ve 47 s olarak ölçülmüştür. 25 kW/m² ısı akısında 739,8 kW/m² maksimum ısı yayılım hızı görülürken ısı akısı 35 kW/m² ve 45 kW/m²'ye çıkarıldığında maksimum ısı yayılım hızları 858,7 kW/m² ve 1104,3 kW/m² değerlerine yükselmiştir. THR değerleri birbirine yakın olmakla birlikte ısı akısı arttıkça THR'de az da olsa artış görülmüştür. Isı akısı arttıkça CO, is ve CO₂ emisyonlarının başlangıcı öne çekilmekle birlikte bu emisyonların maksimum değerlerinde artışlar tespit edilmiştir. PP içinde azot olmadığından dolayı sadece sıcaklığa bağlı NO oluşumu gerçekleştiği için en yüksek ısı akısında (45 kW/m²) bile oluşan maksimum NO 11 ppm olarak belirlenmiştir. Üç ısı akısında da malzemenin tamamı yanmakta ısı akısı arttıkça hem tutuşma erken başlamakta hem de yanma hızlı gerçekleşmekte ve buna bağlı olarak kütle kayıp hızları da artmaktadır. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,16 g/s, 0,18 g/s ve 0,21 g/s olarak tespit edilmiştir.

HDPE, PP malzemeye benzer olarak karbonlaşmış tabaka oluşturmadan tamamı yanan bir malzemedir. HDPE malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarına maruz kaldığında tutuşma zamanları (272 s, 164 s ve 77 s) PP'ye göre artmıştır. Bu durum daha yüksek yoğunluk, ısı iletkenlik ve ısı bozunma başlangıcı sıcaklığı ile açıklanabilmektedir. Ayrıca PHRR değerleri (802,2 kW/m², 1085,1 kW/m² ve 1575,8 kW/m²) de daha yüksektir. Farklı ısı akılarında THR değerleri birbirine yakın değerler almıştır. Isı akısının artışına bağlı olarak CO, is ve CO₂ emisyonlarının maksimum değerlerinde artışlar görülmüştür. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında oluşan maksimum NO emisyon değerleri sırasıyla 8 ppm, 14 ppm ve 19 ppm olarak tespit edilmiştir. Üç ısı akısında da malzemenin tamamı yanmakta, ısı akısı yükseldikçe yanma hızlandığı için buna bağlı olarak kütle kayıp hızlarının da arttığı belirlenmiştir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,16 g/s, 0,21 g/s ve 0,29 g/s olarak tespit edilmiştir.

ABS malzeme de yanma anında karbonlaşan bir tabaka oluşturmadığı halde farklı ısı akılarında yanması sonucu oluşan HRR değişimleri PP ve HDPE malzemelerden biraz farklılıklar göstermektedir. ABS malzemenin üzerine ısı akısı uygulanması sonrası HRR yükselmesi daha hızlı gerçekleşmekte, yükselme hızı

azalarak maksimum ısı yayılım hızına ulaşıldıktan sonra düşme görülmektedir. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında tutuşma zamanı 113 s, 75 s ve 48 s olarak ölçülmüştür. 45 kW/m² ısı akısında 1058,8 kW/m² maksimum ısı yayılım hızına ulaşılırken ısı akısı 35 kW/m² ve 25 kW/m²'ye düştüğünde bu değerler 832,5 kW/m² ve 748,3 kW/m² olmaktadır. Isı akısı arttıkça THR'de az da olsa artışlar belirlenmiştir. ABS malzemenin yanması sırasında PP ve HDPE'ye göre oldukça kısa sürede yüksek seviyelerde CO ve is oluşumları tespit edilmiştir. CO₂ emisyonlarının başlangıcı öne çekilmekle birlikte bu emisyonların maksimum değerlerinde de artışlar belirlenmiştir. ABS malzeme içinde bulunan azot içeriğinin etkisi ile NO emisyonunda çok ciddi artışlar belirlenmiştir. Maksimum NO değerleri 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akıları için sırasıyla 146 ppm, 160 ppm ve 217 ppm olarak ölçülmüştür. Malzemenin daha hızlı yanmasına bağlı olarak kütle kayıp hızları da artmaktadır. 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarında maksimum kütle kayıp hızları sırasıyla 0,20 g/s, 0,22 g/s ve 0,28 g/s olarak tespit edilmiştir.

Üç farklı ısı akısı altında (25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m²), PP ve HDPE malzemelere kütlece % 25 oranında kabaran alev geciktirici ilavesinin etkileri de araştırılmış olup APP/PER (3:1) sentezinden oluşan IFR'nin dikkate değer yanma direnci oluşturduğu tespit edilmiştir. IFR ilavesi sonucu erken tutuşma ile ısıl bozunmaya uğrayan APP ve PER karbon tabaka oluşumu yapmışlardır. Bu durumda daha düşük ısı yayılım hızları ile daha uzun sürede malzemeler yanmıştır. PP malzemeye % 25 IFR ilavesi ile malzemenin 25 kW/m², 35 kW/m² ve 45 kW/m² ısı akılarındaki FPI değerlerinin sırasıyla 3,5, 2,3 ve 3,9 kat artış gösterdiği ve FIGRA değerlerinin ise sırasıyla % 79,4, % 77,6 ve % 88,2 oranında azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, HDPE malzemeye % 25 IFR ilavesi ile malzemenin FPI değerlerinin sırasıyla 1,8, 4,3 ve 3,6 kat artış gösterdiği ve FIGRA değerlerinin ise sırasıyla % 79,0, % 82,5 ve % 61,0 oranında azaldığı tespit edilmiştir. FPI değerinin yükselmesi ve FIGRA değerinin düşmesi malzemelerin yanma direncinin arttığının bir göstergesidir. Ayrıca konik kalorimetre yanma testleri sonrasında ham PP ve HDPE malzemelerden kalan kütle olmaz iken PP25IFR malzemedde sırasıyla % 16,12, % 15,14 ve % 14,38 ve HDPE25IFR malzemedde sırasıyla % 17,67, % 15,00 ve % 13,53 oranlarında kalan kütle tespit edilmiştir. CO, is, CO₂ emisyonlarında % 85'e yakın oranlarda azalma görülürken NO emisyonlarında % 111'e varan oranlarda artışlar belirlenmiştir.

PP, HDPE ve ABS malzemelerin FDS programı kullanılarak yanma modelleme çalışmaları yapılmış olup zamana bağlı HRR ve MLR değişimleri tespit edilmiştir. Genel olarak modelleme sonuçlarının kabul edilebilir seviyede deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, PP ve HDPE malzemelerde üç ısı akısında da modelden elde edilen sonuçlarda geç tutuşma ve alev ilerlemesinin başlangıcında gecikme görülmüştür. Bununla birlikte maksimum ısı yayılım ve yanmanın son kısımlarında deneysel ve model sonuçları daha iyi uyum içindedir. ABS malzemede ise genellikle tutuşma ve alev ilerleme bölgelerinde uyumlu iken, sönme kısmında bir miktar farklılık görülmüştür.

Bu tez kapsamında PP, HDPE ve ABS malzemeler için FDS programı kullanılarak yanma modelleme çalışmaları belirli seviyelere getirilmiştir. Bununla birlikte, daha iyi uyum için yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, PUR ve IFR ilaveli malzemelerin yanma modellemesi için de detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

Ali, I., Kim, N. K., and Bhattacharyya, D., “Effects of graphene nanoplatelets on mechanical and fire performance of flax polypropylene composites with intumescent flame retardant”, *Molecules*, 26 (13), 4094, (2021).

ASTM C1113 / C1113M-09, “Standard Test Method for Thermal Conductivity of Refractories by Hot Wire”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, U.S.A., (2013).

ASTM E1354, “Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter”, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, U. S. A., (2004).

Aydın, H. ve Ekmekçi, İ., “Isı yalıtım malzemesi olarak poliüretan köpüğün fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretimi ve incelenmesi”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6.1: 45-50, 2002.

Aydoğan, B., ve Usta, N., “Nanokalsit ve kabaran alev geciktirici ilaveli rijit poliüretan köpüklerin ısı iletkenlik, ısı bozunma ve yanma direncinin deneysel incelenmesi”, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35 (2), 63-74, (2015).

Baguian, A. F., Ouiminga, S. K., Longuet, C., Caro-Bretelle, A. S., Corn, S., Bere, A., and Sonnier, R., “Influence of density on foam collapse under burning”, *Polymers*, 13 (1), 13, (2021).

BASF Group, Teknik Bilgi Kartı, (2014).

Bhattacharyya, D., and Kim, N. K., “Flammability of natural fibre-reinforced polymeric composites”, In *21st International Conference on Composite Materials, Xi'an, China*, (2017).

Branca, C., Di Blasi, C., Casu, A., Morone, V., and Costa, C., “Reaction kinetics and morphological changes of a rigid polyurethane foam during combustion”, *Thermochimica Acta*, 399 (1-2), 127-137, (2003).

Chanda, M., *Advanced polymer chemistry: A problem solving guide*, New York: Marcel Dekker, 1-41, (2000).

Chen, J., Wang, J., Ni, A., Chen, H., and Shen, P., “Synthesis of a novel phosphorous-nitrogen based charring agent and its application in flame-retardant HDPE/IFR composites”, *Polymers*, 11 (6), 1062, (2019).

Chen, L., and Wang, Y. Z., “A review on flame retardant technology in China. Part I: development of flame retardants”, *Polymers for Advanced Technologies*, 21 (1), 1-26, (2010).

Chen, L., and Wang, Y. Z., “Aryl polyphosphonates: useful halogen-free flame retardants for polymers”, *Materials*, 3 (10), 4746-4760, (2010).

Cheng, Z., Liao, D., Hu, X., Li, W., Xie, C., Zhang, H., and Yang, W., “Synergistic fire retardant effect between expandable graphite and ferrocene-based non-phosphorus polymer on polypropylene”, *Polymer Degradation and Stability*, 178, 109201, (2020).

Chung, D. D. L., *Composite Materials: Science and Applications, 2nd Edition*, New York: Springer Science and Business Media, 1-33, (2010).

Czégény, Z., Jakab, E., Blazsó, M., Bhaskar, T., and Sakata, Y., “Thermal decomposition of polymer mixtures of PVC, PET and ABS containing brominated flame retardant: Formation of chlorinated and brominated organic compounds”, *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 96, 69-77, (2012).

Despinasse, M. C., and Schartel, B., “Influence of the structure of aryl phosphates on the flame retardancy of polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene”, *Polymer degradation and stability*, 97 (12), 2571-2580, (2012).

Dobbin, C., “An industrial chronology of polyethylene.”, (eds: M. A. Spalding and A. M. Chatterjee), *Handbook of Industrial Polyethylene and Technology: Definitive Guide to Manufacturing, Properties, Processing, Applications and Markets*, USA: Wiley-Scrivener, Set: 1, 3-24, (2017).

Dos Santos, W. N., De Sousa, J. A., and Gregorio Jr, R., “Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperatures”, *Polymer Testing*, 32 (5), 987-994, (2013).

Dutta, S., Kim, N. K., Das, R., and Bhattacharyya, D., “Effects of sample orientation on the fire reaction properties of natural fibre composites”, *Composites Part B: Engineering*, 157, 195-206, (2019).

Feng, F., and Qian, L., “The flame retardant behaviors and synergistic effect of expandable graphite and dimethyl methylphosphonate in rigid polyurethane foams”, *Polymer Composites*, 35 (2), 301-309, (2014).

Feng, J., Carpanese, C., and Fina, A., “Thermal decomposition investigation of ABS containing Lewis-acid type metal salts”, *Polymer Degradation and Stability*, 129, 319-327, (2016).

Ferng, Y. M., and Liu, C. H., “Investigating the burning characteristics of electric cables used in the nuclear power plant by way of 3-D transient FDS code”, *Nuclear Engineering and Design*, 241 (1), 88–94, (2011).

Fried, J. R., *Polymer Science and Technology: Third Edition*, Pearson Education, (2014).

Goda, E. S., Yoon, K. R., El-sayed, S. H., and Hong, S. E., “Halloysite nanotubes as smart flame retardant and economic reinforcing materials: A review”, *Thermochimica Acta*, 669, 173–184, (2018).

Hejtmánek, P., Ševčík, L., and Cábová, K., “Input data of burning wood for cfd modelling using small-scale experiments”, *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 26 (4), 471–482, (2017).

Hermouet, F., Rogaume, T., Guillaume, E., Richard, F., Marquis, D., and Ponticq, X., “Experimental characterization of the reaction-to-fire of an Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) material using controlled atmosphere cone calorimeter”, *Fire Safety Journal*, 121, 103291, (2021).

Hoang, D., Kim, J., and Jang, B. N., “Synthesis and performance of cyclic phosphorus-containing flame retardants”, *Polymer Degradation and Stability*, 93 (11), 2042-2047, (2008).

ISO 5660-1: “Reaction to Fire Tests Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate, Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)”, (2002).

Jiang, T., Qi, Y., Wu, Y., and Zhang, J., “Application of antioxidant and ultraviolet absorber into HDPE: Enhanced resistance to UV irradiation”, *e-Polymers*, 19 (1), 499-510, (2019).

Jiao, L., Xiao, H., Wang, Q., and Sun, J., “Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS”, *Polymer Degradation and Stability*, 98 (12), 2687-2696, (2013).

Kempel, F., Scharrel, B., Linteris, G. T., Stoliarov, S. I., Lyon, R. E., Walters, R. N., and Hofmann, A., “Prediction of the mass loss rate of polymer materials: Impact of residue formation”, *Combustion and Flame*, 159 (9), 2974-2984, (2012).

Khan, M. M., Tewarson, A., and Chaos, M., “Combustion characteristics of materials and generation of fire products”, (ed: M. J. Hurley), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York: Springer, Appendix 3 3437-3476, (2016).

Kim, N. K., and Bhattacharyya, D., “Development of fire resistant wool polymer composites: Mechanical performance and fire simulation with design perspectives”, *Materials & Design*, 106, 391-403, (2016).

Kim, N. K., Dutta, S., and Bhattacharyya, D., “Heat and smoke production of flax fibre reinforced composites under horizontal and vertical orientations”, *Composites Part B: Engineering*, 178, 107467, (2019).

Lai, X., Yin, C., Li, H., and Zeng, X., “Synergistic effect between silicone-containing macromolecular charring agent and ammonium polyphosphate in flame retardant polypropylene”, *Journal of Applied Polymer Science*, 132 (10), (2015).

Laoutid, F., Bonnaud, L., Alexandre, M., Lopez-Cuesta, J. M., and Dubois, P., “New prospects in flame retardant polymer materials: from fundamentals to nanocomposites”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 63 (3), 100-125, (2009).

Li, J., Gong, J., and Stoliarov, S. I., “Development of pyrolysis models for charring polymers”, *Polymer Degradation and Stability*, 115, 138–152, (2015).

Li, W. X., Liao, D. J., Hu, X. P., Cheng, Z., and Xie, C. Q., “Synergistic improvement of fire retardancy and mechanical properties of ferrocene-based polymer in intumescent polypropylene composite”, *Polymers for Advanced Technologies*, 30 (9), 2402-2413, (2019).

Li, X., Liang, D., Hu, Z., He, J., Bian, X., and Cui, J., “Synergistic effects of polyoxometalate-based ionic liquid-doped sepiolite in intumescent flame-retardant high-density polyethylene”, *Polymers for Advanced Technologies*, 32 (5), 2240-2251, (2021).

Lin, T. S., Cogen, J. M., and Lyon, R. E., “Correlations between microscale combustion calorimetry and conventional flammability tests for flame retardant wire and cable compounds”, *56th IWCS Conference - Proceedings of the International Wire and Cable Symposium, Inc., IWCS 2007*, 176–185, (2007).

Linteris, G. T., Lyon, R. E., and Stoliarov, S. I., “Prediction of the gasification rate of thermoplastic polymers in fire-like environments”, *Fire safety journal*, 60, 14-24, (2013).

Lu, S. Y., and Hamerton, I., “Recent developments in the chemistry of halogen-free flame retardant polymers”, *Progress in polymer science*, 27 (8), 1661-1712, (2002).

Luche, J., Mathis, E., Rogaume, T., Richard, F., and Guillaume, E., “High-density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter”, *Fire Safety Journal*, 54, 24-35, (2012).

Lyon, R. E., and Crowley, S., “Fire properties of combustible materials from unsteady burning”, *Fire Safety Journal*, 120, 103054, (2021).

Makhlouf, A., Belaadi, A., Amroune, S., Bourchak, M., and Satha, H., “Elaboration and characterization of flax fiber reinforced high density polyethylene biocomposite: effect of the heating rate on thermo-mechanical properties”, *Journal of Natural Fibers*, 1-14, (2020).

Maqsood, M., and Seide, G., “Biodegradable flame retardants for biodegradable polymer”, *Biomolecules*, 10 (7), 1038, (2020).

Marquis, D. M., Pavageau, M., Guillaume, E., and Chivas-Joly, C., “Modelling decomposition and fire behaviour of small samples of a glass-fibre-reinforced polyester/balsa-cored sandwich material”, *Fire and materials*, 37 (6), 413-439, (2013).

McGrattan, K., “Fire Dynamics Simulator (Version 4) - Technical Reference Guide”, *Special Publication (NIST SP), National Institute of Standards and Technology*, (2006).

McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J., and Vanella, M., “Fire Dynamics Simulator User ’s Guide (Sixth Edition)”, *NIST Special Publication 1019, Sixth Edit*, (2020).

McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J., and Vanella, M., “Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model (Sixth Edition)”, *NIST Special Publication 1018-1, Sixth Edit*, (2020).

McKeen, L. W., “Styrenic Plastics”, (ed: L. W. McKeen), *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers (Second Edition)*, William Andrew Publishing, 51-71, (2010).

Moinuddin, K., Razzaque, Q. S., and Thomas, A., “Numerical simulation of coupled pyrolysis and combustion reactions with directly measured fire properties”, *Polymers*, 12 (9), 2075, (2020).

Kaya, M., “Alev geciktirici ve duman bastırıcı katkı maddeleri”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11 (2), 77-883, (1998).

Nakrani, D., Wani, T., and Srivastava, G., “Simulation of pyrolysis and combustion of pine wood using two-step reaction scheme”, *The 11th International Conference on Structures in Fire*, (2020).

Patel, R. J., and Wang, Q., “Prediction of properties and modeling fire behavior of polyethylene using cone calorimeter”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 411-418, (2016).

Pawlowski, K. H., and Schartel, B., “Flame retardancy mechanisms of aryl phosphates in combination with boehmite in bisphenol A polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene blends”, *Polymer degradation and stability*, 93 (3), 657-667, (2008).

Peacock, A. J., and Calhoun, A., *Polymer Chemistry: Properties and Applications*, USA and Canada: Hanser, 171–181, (2006).

Pinto, P. C. D. C., Silva, V. R. D., Yoshida, M. I., and Oliveira, M. A. L. D. “Synthesis of flexible polyurethane foams by the partial substitution of polyol by steatite”, *Polímeros*, 28, 323-331, (2018).

Pious, C. V., and Thomas, S., “Polymeric materials-structure, properties and applications”, (eds: J. Izdebska and S. Thomas), *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, William Andrew Publishing, 21-39, (2016).

Ray, S., and Cooney, R. P., “Thermal degradation of polymer and polymer composites”, (eds: M. Kutz), *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, William Andrew, 213-242, (2012).

Ren, X., Zong, R., Hu, Y., Lo, S., Stec, A. A., and Hull, T. R., “Investigation of thermal decomposition of polymer nanocomposites with different char residues”, *Polymers for Advanced Technologies*, 26 (8), 1027-1033, (2015).

Salasinska, K., Mizera, K., Celiński, M., Kozikowski, P., Borucka, M., and Gajek, A., “Thermal properties and fire behavior of polyethylene with a mixture of copper phosphate and melamine phosphate as a novel flame retardant”, *Fire Safety Journal*, 115, 103137, (2020).

Sharmin, E., and Zafar, F., “Polyurethane: An introduction”, (eds: F. Zafar and E. Sharmin), *Polyurethane*, Croatia: InTech, 3-16, (2012).

Shi, X., Jiang, S., Zhu, J., Li, G., and Peng, X., “Establishment of a highly efficient flame-retardant system for rigid polyurethane foams based on bi-phase flame-retardant actions”, *RSC Advances*, 8 (18), 9985-9995, (2018).

Sonnenschein, M. F., *Polyurethanes: Science, Technology, Markets, and Trends*, Canada: Wiley & Sons, 10-104, (2014).

Stoliarov, S. I., Crowley, S., Lyon, R. E., and Linteris, G. T., “Prediction of the burning rates of non-charring polymers”, *Combustion and Flame*, 156 (5), 1068–1083, (2009).

Szustakiewicz, K., Kiersnowski, A., Gazińska, M., Bujnowicz, K., and Pigłowski, J., “Flammability, structure and mechanical properties of PP/OMMT nanocomposites”, *Polymer degradation and stability*, 96 (3), 291-294, (2011).

Szycher, M., *Szycher's Handbook of Polyurethanes: Second Edition*, New York: CRC Press, (2013).

Tang, W., Li, H., Zhang, S., Sun, J., and Gu, X., “The intercalation of ammonium sulfamate into kaolinite and its effect on the fire performance of polypropylene”, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31 (10), 1352-1370, (2018).

Ulçay, Y., Akyol, M., and Gemci, R., “Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, 7 (1), 93-116, (2002).

Vahabi, H., Paran, S. M. R., Shabanian, M., Dumazert, L., Sonnier, R., Movahedifar, E., Zarrintaj, P., and Saeb, M. R., “Triple-faced polypropylene: Fire retardant, thermally stable, and antioxidative”, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 25 (4), 366-376, (2019).

Vasile, C., and Pascu, M., *Practical Guide to Polyethylene*, In Rapra Technology Limited, 15-28, (2005).

Wang, X., Fleischmann, C. M., and Spearpoint, M. J., “Parameterising study of tunnel experiment materials for application to the Fire Dynamics Simulator pyrolysis model”, *Journal of Fire Sciences*, 34 (6), 490-514, (2016).

Wang, X., Fleischmann, C., and Spearpoint, M., “Applying the FDS pyrolysis model to predict heat release rate in small-scale forced ventilation tunnel experiments”, *Fire Safety Journal*, 112, 102946, (2020).

Wang, Y., Kang, W., Chen, C., Zhang, X., Yang, L., Chen, X., Cui, G., Zhang, Y., Zhang, F., and Li, S., “Combustion behaviour and dominant shrinkage mechanism of flexible polyurethane foam in the cone calorimeter test”, *Journal of hazardous materials*, 365, 395-404, (2019).

Wu, N., and Li, X., “Flame retardancy and synergistic flame retardant mechanisms of acrylonitrile-butadiene-styrene composites based on aluminum hypophosphite”, *Polymer degradation and stability*, 105, 265-276, (2014).

Wu, S., Deng, D., Zhou, L., Zhang, P., and Tang, G., “Flame retardancy and thermal degradation of rigid polyurethane foams composites based on aluminum hypophosphite”, *Materials Research Express*, 6 (10), 105365, (2019).

Xu, J., and Fang, T., “Experimental study on combustion characteristics for polyurethane-aluminum composite insulation material under different heat fluxes”, *Procedia Engineering*, 62, 837-843, (2013).

Yang, F., Rippe, C., Hodges, J., and Lattimer, B., “Methodology for material property determination”, *Fire and Materials*, 43 (6), 694-706, (2019).

Yang, S., Castilleja, J. R., Barrera, E. V., and Lozano, K., “Thermal analysis of an acrylonitrile–butadiene–styrene/SWNT composite”, *Polymer Degradation and Stability*, 83 (3), 383-388, (2004).

Yaşar, H., Plastikler Dünyası, Yayın No: 142/2, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 6-33 s., Ankara, (2001).

Yuen, A. C. Y., Chen, T. B. Y., Wang, C., Wei, W., Kabir, I., Vargas, J. B., Chan, Q. N., Kook, S., and Yeoh, G. H., “Utilising genetic algorithm to optimise pyrolysis kinetics for fire modelling and characterisation of chitosan/graphene oxide polyurethane composites”, *Composites Part B: Engineering*, 182, 107619, (2020).

Yurtseven, R., “Uçucu kül içeren poliüretan esaslı kompozit malzemelerin mekanik ve termal özelliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2014).

Zhang, S., Ni, X., Zhao, M., Feng, J., and Zhang, R., “Numerical simulation of wood crib fire behavior in a confined space using cone calorimeter data”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 119 (3), 2291-2303, (2015).

Zhang, Z., Li, D., Xu, M., and Li, B., “Synthesis of a novel phosphorus and nitrogen-containing flame retardant and its application in rigid polyurethane foam with expandable graphite”, *Polymer Degradation and Stability*, 173, 109077, (2020).

Zhou, B., Yoshioka, H., Noguchi, T., and Ando, T., “Numerical prediction of mass loss rate of expanded polystyrene (EPS) used for external thermal insulation composite systems (ETICS) in cone calorimeter”, *Fire and Materials*, 42 (5), 517-526, (2018).

Zhu, S. E., Wang, F. D., Liu, J. J., Wang, L. L., Wang, C., Yuen, A. C. Y., Chen, T. B. Y., Kabir, I. I., Yeoh, G. H., Lu, H. D., and Yang, W., “BODIPY coated on MXene nanosheets for improving mechanical and fire safety properties of ABS resin”, *Composites Part B: Engineering*, 223, 109130, (2021).

Url-1 <<http://purotto.com.tr/puro-foam-esnek-ve-kopuk-sistemleri-grubu/>>, (11 Mart 2021).

Url-2 <<https://pluskim.com.tr/product/hr-molded-sunger-flexible-poliuretan-sistemler-2/otomobil-koltuklari/>>, (11 Mart 2021).

Url-3 <<https://kimpur.com/tr/otomotiv/poliuretan-integral-kopuk-sistemleri/#>>, (18 Ocak 2022).

Url-4 <<http://www.izolanya.com/hizmetler/17/poliuretan-kopuk>>, (18 Ocak 2022).

Url-5 <<http://www.isopol.com.tr/sayfa-detay/sandvic-panel-nedir-/15/>>, (18 Ocak 2022).

Url-6 <<http://purotto.com.tr/puro-cast-dokum-sistemleri-grubu/>>, (11 Mart 2021).

Url-7 <<https://www.ema.gen.tr/urun/termoplastik-poliuretan/>>, (11 Mart 2021).

Url-8 <<https://www.turkchem.net/termoplastik-poliuretan-tpu-nedir.html>>, (11 Mart 2021).

Url-9 <<https://www.petkim.com.tr/Sayfa/1/1779/TEKNIK-BILGI-FORMLARI-VE-URUN-SARTNAMELERI.aspx>>, (28 Ağustos 2021).

Url-10 <<https://polychem-usa.com/polypropylene-plastic/>>, (12 Nisan 2022).

Url-11 <<https://www.ek-er.com.tr/urun/polipropilen-pp.html>>, (11 Mart 2021).

Url-12 <<http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/termoplastikler-genelticari-plastikler.html>>, (11 Mart 2021).

Url-13 <https://www.ineos-styrolution.com/Product/Terluran_TERLURAN-GP-22_SKU300600120827.html>, (28 Ağustos 2021).

Url-14 <https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/BRO_PyrisSoftware.pdf>, (13 Eylül 2021).