T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMEYLE PASİF SOĞUTMANIN İNCELENMESİ

ERHAN AKYOL

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. OKTAY HACIHAFIZOĞLU

EDİRNE-2021

ERHAN AKYOL'un hazırladığı "**FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMEYLE PASİF SOĞUTMANIN İNCELENMESİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad): İmza

Prof. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU

Prof. Dr. Ayşegül ÖZTÜRK

Prof. Dr. Mehmet SEZGİN

Prof. Dr. Kadir BİLEN

Doç. Dr. Soner ÇELEN

Tez Savunma Tarihi: 05/04/2021

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

05 / 04 / 2021

Erhan AKYOL

Doktora Tezi
Faz Değiştiren Malzemeyle Pasif Soğutmanın İncelenmesi
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada herhangi bir ısı kaynağı kullanmadan, başlangıçta ortam sıcaklığını kullanarak, içinde levha bulunan bir faz değiştiren malzeme (FDM)-hava ünitesinin termal analizi incelenmiştir. Ayrıca seri dizilimli levhalar arasındaki mesafenin, ünite performansı üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu analizlerde, parafin bazlı iki farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler, küçük bir faz değişim sıcaklık aralığında büyük miktarda termal enerjiyi depolamaktadır. Kompakt depolama modülleri içerisine yerleştirilen malzemeler, ünite içerisinde tekli ve çoklu kombinasyonlar olmak üzere beş farklı şekilde konumlandırılmıştır. Hava giriş sıcaklığı ile hızının, sistem başlangıç sıcaklığının, Stefan sayısının ve faz değiştiren malzemelerin kanal içerisindeki konumlarının; sistemin çıkış sıcaklığı, soğutma gücü, etkenliği ve FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, pasif soğutma sistemlerinde, FDM seçiminde faz değişim sıcaklık aralığı ile erime gizli ısısının uygun bir şekilde seçilmesi gerektiğini ortaya koyarken, hava giriş sıcaklık ve hızının, sistemin termal performansını belirlemede önemli parametreler olduğunu göstermektedir. Tekli FDM dizilimlerinde, iki farklı malzeme üzerinde elde edilen sonuçlara göre, giriş hızında 0,5 m/s'lik artışın erime süresini %53, giriş sıcaklığında 2°C'lik artışın ise erime süresini %60 oranında azalttığı ortaya konmuştur. Çoklu FDM kullanımının, ünitenin ortalama etkenliğini %13 ve ortamdan çekilen toplam ısıyı da %43 artırdığı, ayrıca seri dizilimli plakalar arasındaki mesafe artışının ortalama etkenliği %12, çekilen ısı miktarını ise %18 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Nümerik sonuçların, deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğu da görülmüştür.

Yıl : 2021

Sayfa Sayısı : 165

Anahtar Kelimeler : Faz Değiştiren Malzeme (FDM), Parafin, Pasif Soğutma, Termal Enerji Depolama (TED), Makrokapsülleme, Kompakt Depolama Modülü, Hava-FDM Ünitesi

Phd. Thesis
Investigation of Passive Cooling with Phase Change Material
Trakya University Institute of Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, thermal analysis of a phase change material (PCM)-air unit with a plate inside was investigated, using the ambient temperature at the beginning, without using any heat source. In addition, the effects of the distance between the plates arranged in series on the performance of the unit were also examined. In these analyses, two different paraffin-based materials were used. These materials store large amounts of thermal energy in a small phase change temperature range. Materials placed in compact storage modules are positioned in five different cases in the unit as single and multiple combinations. The effects of air inlet temperature and velocity, system initial temperature, Stefan number and the positions of the phase change materials in the duct on the outlet temperature, cooling power, efficiency and the amount of heat absorbed by the PCM were investigated. The results show that the phase change temperature range and the latent heat of melting should be selected appropriately in passive cooling systems in PCM selection, while the air inlet temperature and velocity are important parameters in determining the thermal performance of the system. In single PCM configurations, according to the results obtained on two different materials, it was observed that an increase of 0.5 m/s in the inlet velocity decreased the melting time by 53%, and an increase of 2°C in the inlet temperature decreased the melting time by 60%. It has also been shown that these increases in the inlet speed and temperature reduce the total amount of heat absorbed by the PCM by approximately 20%. It has been observed that the use of multiple PCMs increased the average efficiency of the unit by 13% and the total heat extracted from the environment by 43%, and the increase in the distance between the serially arrayed plates increased the average efficiency by 12% and the amount of heat drawn by 18%. It has

also been observed that the numerical results are in agreement with the experimental results.

Year : 2021

Number of Pages : 165

Keywords : Phase Change Material (PCM), Paraffin, Passive Cooling, Thermal Energy Storage (TES), Macroencapsulation, Compact Storage Module, Air-FDM Unit.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Oktay HACIHAFIZOĞLU'na,

Çalışmalarımda tecrübesinden yararlandığım Prof. Dr. Kamil KAHVECİ'ye ve fikirlerini paylaşarak, emeği geçen arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem SUSANTEZ'e,

Çalışmalarımın her aşamasında önerilerini sunan ve destekleriyle yanımda olan değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Tolga AKSENCER'e ve Öğr. Gör. Dr. Anıl ŞAHİN'e,

Gerek akademik anlamda gerekse hayatım boyunca her zaman desteklerini yanımda hissettiğim ağabeylerim Doç. Dr. Uğur AKYOL'a ve Dr. Öğr. Üyesi Tuğrul AKYOL'a,

Gecesini gündüzüne katarak, anneliği en güzel şekilde yapmaya çalışan, çalışmalarım boyunca büyük bir sabırla yanımda olan sevgili eşim Selin AKYOL'a ve annem Sevim BAYRAKTAR'a,

Hayatım boyunca nerede olurlarsa olsunlar maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve bugünlere kavuşmamda sonsuz emeği bulunan annem Güleray AKYOL'a ve babam Ahmet AKYOL'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmamı evde beni büyük bir sabırsızlıkla bekleyen çocuklarım Kerem Egehan'a ve Atahan'a armağan ediyorum.

Bu çalışma, 2018/210 proje numaralı Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (TÜBAP) tarafından desteklenmiştir.

Nisan 2021 Erhan AKYOL

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi
ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER DİZİNİ xvi
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
1.1. Enerjinin Önemi 1
1.2. Türkiye'de Enerjiye Genel Bakış 2
1.3. Enerji Depolama ve Yöntemleri 8
1.3.1. Termal Enerji Depolama 10
1.3.1.1. Duyulur Isı Depolama 11
1.3.1.2. Gizli Isı Depolama 12
BÖLÜM 2 15
FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER VE TEMEL ÖZELLİKLERİ 15
2.1. Giriş 15
2.2. Organik Faz Değiştiren Malzemeler 17
2.2.1. Parafinler 17
2.2.2. Parafin Olmayan Bileşikler 19
2.3. İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler 21
2.3.1. Hidrat Tuzlar 21
2.3.2. Metaller 22
2.4. Ötektik Karışımlar 23
2.5. Faz Değiştiren Malzeme Seçimindeki Kriterler 28
2.5.1. FDM'nin Termofiziksel Özellikleri 29
2.5.2. FDM'nin Kinetik Özellikleri 30
2.5.3. FDM'nin Kimyasal Özellikleri 31

2.5.4. FDM'nin Ekonomik Özellikleri 32
2.5.5. FDM'nin Çevresel Özellikleri 32
2.6. Literatür Araştırması 32
2.7. Çalışmanın Amacı 41
BÖLÜM 3 42
MATERYAL VE YÖNTEM 42
3.1. Materyal 42
3.2. Deney Düzeneği 47
3.3. Yönetici Denklemler ve Başlangıç-Sınır Koşulları 53
3.4. Çözüm Bölgesinde Çalışılan Ağ Eleman Sayısı 55
BÖLÜM 4 57
SONUÇLAR VE TARTIŞMA 57
4.1. Giriş 57
4.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Kombinasyonları 57
4.3. Giriş Sıcaklığının Etkisi 59
4.4. Giriş Hızının Etkisi 72
4.5. FDM Başlangıç Sıcaklığının Etkisi 85
4.6. Ste Sayısının Etkisi 98
4.7. Kombinasyonların Etkisi 122
BÖLÜM 5 134
DEĞERLENDİRME 134
KAYNAKLAR 139
ÖZGEÇMİŞ 145

SİMGELER DİZİNİ

A	alan, m^2
c_p	özgül ısı, kJ/kgK
k	ısı iletim katsayısı, W/mK
L_c	FDM-Hava ünitesinin uzunluğu, m
L_e	kanal çıkışına yakın yerde bulunan levhalar ile kanal çıkışı arasındaki mesafe, m
L_g	seri dizilimli levhalar arasındaki mesafe, m
L_h	faz değişim ısısı, kJ/kg
L_i	kanal girişine yakın yerde bulunan levhalar ile kanal girişi arasındaki mesafe, m
L_p	levha uzunluğu, m
m	kütle, kg
$\dot{m}$	kütle debisi, kg/s
P	basınç, atm
Q	ısı miktarı, kJ
Q_{ks}	kısa süreli zaman içerisinde absorbe edilen ısı miktarı, kJ
Q_t	toplam ısı miktarı, kJ
$\dot{Q}_c$	birim zamandaki ısı geçişi, kW
S_H	kaynak terimi, W/m^3
Ste	Stefan Sayısı
T	sıcaklık, °C
T_{an}	anemometreden ölçülen sıcaklık değeri, °C
$T_{b,FDM}$	FDM'nin başlangıç sıcaklığı, °C
$T_ç$	çıkış sıcaklığı, °C
$T_{ç,ort}$	ortalama kanal çıkış sıcaklığı, °C
T_{DL}	data logger cihazından ölçülen sıcaklık değeri, °C
T_e	erime sıcaklığı, °C

T_f	son sıcaklık, °C
T_g	giriş sıcaklığı, °C
T_l	FDM'nin sıvı haldeki sıcaklığı, °C
T_m	FDM'nin ortalama erime sıcaklığı, °C
T_0	kanal giriş sıcaklığı, °C
T_{ort}	ortalama kanal giriş sıcaklığı, °C
T_s	FDM'nin katı haldeki sıcaklığı, °C
T_{TK}	termokupldan ölçülen sıcaklık değeri, °C
t	zaman, s
U	belirsizlik
u, v	x ve y yönündeki kartezyen hız bileşenleri, m/s
V	hız, m/s
V_g	giriş hızı, m/s
W_a	akışkan geçiş aralığı, m
W_c	kanal genişliği, m
W_h	kanal giriş yüksekliği, m
W_p	levha yüksekliği, m
W_t	levha kalınlığı, m
x, y	kartezyen koordinatlar
Δm	kütle ölçüm hatası, kg
ΔT_{An}	anemometre ölçüm hatası, °C
ΔT_{DL}	data logger ölçüm hatası, °C
ΔT_{TK}	termokupl ölçüm hatası, °C
ΔV	hız ölçüm hatası, m/s
β	erime oranı
ε	etkenlik
μ	dinamik viskozite, kg/ms
ρ	yoğunluk, kg/m^3

KISALTMALAR

FDM	faz değiştiren malzeme
FHID	faz değiştiren malzeme-hava ısı değiştiricisi
KDM	kompakt depolama modülü
Mtep	milyon ton eşdeğer petrol
TED	termal enerji depolama

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Ülkemizin elektrik enerjisi görünümü (GWh), 2014-2019. 2
Çizelge 2.1. 20°C-30°C arasında faz değiştiren organik malzemeler (Kuznik vd., 2011, Raj & Velraj, 2010, Sharma vd., 2015, Zeinelabdein vd., 2018). 20
Çizelge 2.2. 20°C-30°C arasında faz değiştiren inorganik malzemeler (Kuznik vd., 2011, Raj& Velraj, 2010, Zeinelabdein vd., 2018). 23
Çizelge 2.3. 20°C-30°C arasında faz değiştiren organik-organik ötektik malzemeler (Pielichowska & Pielichowski, 2014, Zeinelabdein vd., 2018). 24
Çizelge 2.4. 20°C-30°C arasında faz değiştiren inorganik-inorganik ötektik malzemeler (Pielichowska & Pielichowski, 2014, Zeinelabdein vd., 2018). 25
Çizelge 2.5. 20°C-30°C arasında faz değiştiren ticari malzemeler. 26
Çizelge 3.1. RT22HC ve RT25HC'nin özellikleri. 43
Çizelge 3.2. Hava kanalının ve levhanın ölçüleri [m]. 51
Çizelge 3.3. Farklı ağ eleman sayısına göre ortalama çıkış sıcaklık değerleri (t=4.75 saat) 56
Çizelge 4.1. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ]. 64
Çizelge 4.2. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için Durum1 ile Durum2'nin erime sürelerinin karşılaştırılması [sa]. 66
Çizelge 4.3. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ]. 70
Çizelge 4.4. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ]. 78
Çizelge 4.5. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için RT22HC ile RT25HC'nin süre olarak karşılaştırılması [sa]. 81
Çizelge 4.6. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları [kJ], Durum2. 83
Çizelge 4.7. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ]. 91
Çizelge 4.8. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ]. 96
Çizelge 4.9. Sistemin başlangıç şartları. 100
Çizelge 4.10. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ]. 103
Çizelge 4.11. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri, Durum1. 105
Çizelge 4.12. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ]. 109
Çizelge 4.13. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ]. 114

Çizelge 4.14. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri, Durum2. 116
Çizelge 4.15. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ].....121
Çizelge 4.16. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları [kJ]. 127
Çizelge 4.17. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri.....128
Çizelge 4.18. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C sıcaklıklarında, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları [kJ].....132
Çizelge 4.19. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama etkenlik değerleri.....133
Çizelge 5.1. Durum1 ve Durum2'nin T_g=27°C, V_g=1,3 m/s, L_g=0,2 m durumları için; erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması. 134
Çizelge 5.2. Durum1'in $T_{b,FDM}$=16°C ve L_g=0 m durumları için erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması. 136
Çizelge 5.3. Durum2 için hız ve giriş sıcaklığının sırasıyla 0,5 m/s ve 2°C artmasının termal performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.....136
Çizelge 5.4. Durum3-Durum4 ve Durum5 kombinasyonlarının T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s ve L_g=0,2 m durumları için erime süreleri, absorbe ettikleri maksimum ısı miktarlar ve ortalama etkenliklerinin karşılaştırılması. 137
Çizelge 5.5. Durum1 ve Durum2'nin T_g=27°C, V_g=1,3 m/s durumları için erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması. 138

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Ülkemizin elektrik enerjisi üretiminin gelişimi (2008-2019). 3
Şekil 1.2. Elektrik santrallerinin toplam kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi. 4
Şekil 1.3. Birincil kaynaklara göre kurulu güç, 2019. 4
Şekil 1.4. Türkiye'de nihai enerji tüketiminin sektörel dağılımı, 2018. 5
Şekil 1.5. Türkiye'de sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2018. 7
Şekil 1.6. Termal enerji depolamanın sınıflandırılması. 11
Şekil 2.1. Faz değiştiren malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılması. . 16
Şekil 2.2. Faz değiştiren malzemenin aşırı soğutma etkisi. 31
Şekil 3.1. Deneyde kullanılan parafin. 43
Şekil 3.2. Kompakt depolama modülü. 44
Şekil 3.3. Sıcaklık sensörlerinin levhaya bağlanmış hali. 45
Şekil 3.4. Ölçüm cihazları. 46
Şekil 3.5. Fan kontrol ünitesi. 46
Şekil 3.6. Hava-FDM ünitesi. 48
Şekil 3.7. Levhalar arasındaki mesafenin L_g=0 m olması durumunda kanal içerisindeki görünüm. 49
Şekil 3.8. Levhalar arasındaki mesafenin L_g=0,2 m olması durumunda kanal içerisindeki görünüm. 50
Şekil 3.9. Deney düzeneği şematik gösterimi. 52
Şekil 3.10. Levhalar arasında hız ölçüm yerleri (önden görünüş). 52
Şekil 3.11. Sayısal çözümlemede sistem kontrol hacmi sınırları. 53
Şekil 3.12. Sayısal çözümlemede hava-FDM ünitesinin meshlenmiş hali. 55
Şekil 4.1. Faz değiştiren malzemelerin kanal içindeki kombinasyonları. 59
Şekil 4.2. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için sıcaklık konturları, Durum1. 60
Şekil 4.3. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1. 61
Şekil 4.4. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 61
Şekil 4.5. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1. 62
Şekil 4.6. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 63
Şekil 4.7. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1. 64
Şekil 4.8. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 64
Şekil 4.9. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1. 65

Şekil 4.10. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....65
Şekil 4.11. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için sıcaklık konturları, Durum2.....67
Şekil 4.12. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....68
Şekil 4.13. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 68
Şekil 4.14. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....69
Şekil 4.15. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....70
Şekil 4.16. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....71
Şekil 4.17. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 71
Şekil 4.18. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....72
Şekil 4.19. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....72
Şekil 4.20. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için sıcaklık konturları, Durum1.....74
Şekil 4.21. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....75
Şekil 4.22. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 75
Şekil 4.23. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....76
Şekil 4.24. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....76
Şekil 4.25. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....77
Şekil 4.26. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 78
Şekil 4.27. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....79
Şekil 4.28. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....79
Şekil 4.29. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için sıcaklık konturları, Durum2.....80
Şekil 4.30. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....81
Şekil 4.31. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 82
Şekil 4.32. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....82
Şekil 4.33. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....83
Şekil 4.34. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....84

Şekil 4.35. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 84
Şekil 4.36. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2....85
Şekil 4.37. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2....85
Şekil 4.38. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1....87
Şekil 4.39. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1....88
Şekil 4.40. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 88
Şekil 4.41. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1....89
Şekil 4.42. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1....89
Şekil 4.43. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....90
Şekil 4.44. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1....90
Şekil 4.45. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1....91
Şekil 4.46. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1....92
Şekil 4.47. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2....93
Şekil 4.48. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2....94
Şekil 4.49. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 94
Şekil 4.50. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2....95
Şekil 4.51. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2....95
Şekil 4.52. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....96
Şekil 4.53. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2....97
Şekil 4.54. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2....98
Şekil 4.55. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2....98
Şekil 4.56. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1. 99
Şekil 4.57. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1....100
Şekil 4.58. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1. 101
Şekil 4.59. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1....101

Şekil 4.60. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....102
Şekil 4.61. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....103
Şekil 4.62. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....103
Şekil 4.63. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....104
Şekil 4.64. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....104
Şekil 4.65. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....105
Şekil 4.66. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1.....106
Şekil 4.67. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....107
Şekil 4.68. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....107
Şekil 4.69. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....108
Şekil 4.70. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....108
Şekil 4.71. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....109
Şekil 4.72. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.....110
Şekil 4.73. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.....110
Şekil 4.74. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2.....111
Şekil 4.75. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....112
Şekil 4.76. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....112
Şekil 4.77. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....113
Şekil 4.78. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....113
Şekil 4.79. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....114
Şekil 4.80. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....114
Şekil 4.81. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....115
Şekil 4.82. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.....115
Şekil 4.83. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2.....117
Şekil 4.84. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.....118

Şekil 4.85. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 118
Şekil 4.86. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2..... 119
Şekil 4.87. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2..... 119
Şekil 4.88. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2..... 120
Şekil 4.89. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2. 120
Şekil 4.90. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2..... 121
Şekil 4.91. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2..... 122
Şekil 4.92. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum3-Durum4-Durum5..... 123
Şekil 4.93. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 124
Şekil 4.94. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 124
Şekil 4.95. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5. 125
Şekil 4.96. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 125
Şekil 4.97. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5... 126
Şekil 4.98. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5. .. 126
Şekil 4.99. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5. 127
Şekil 4.100. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5. 128
Şekil 4.101. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 129
Şekil 4.102. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 129
Şekil 4.103. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum3-Durum4-Durum5..... 130
Şekil 4.104. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 131
Şekil 4.105. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 131
Şekil 4.106. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5. 132
Şekil 4.107. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5..... 133

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Enerjinin Önemi

Enerji, bir ülkenin büyümesinin ve kalkınmasının bir göstergesidir ve o ülkenin sağlam bir ekonomik, sosyal-kültürel ve siyasi bir yapıya sahip olmasında enerjinin rolü bir hayli fazladır. Sanayi ve konut-ticaret-hizmet sektöründen, tarım hayvancılık ve ulaştırma sektörlerine kadar hemen hemen günlük yaşantımızın ayrılmaz bir parçası olarak karşımıza çıkan enerji, büyük oranda çevremizin de kirlenmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra enerji fiyatlarının yüksek olması, enerji üretiminde en büyük paya sahip olan petrol, kömür ve doğal gaz kaynaklarının bitecek olma kaygısı, iklim değişikliği konusu ve dışa bağımlılığın etkisi nedeniyle ülkeler ucuz ve temiz enerji kaynakları olan yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki çalışmalarını artırmıştır.

Önemi giderek artan ve en büyük yakıt büyümesi olan yenilenebilir enerji kaynakları, sürekliliği nedeniyle ve dünyada her yerde bulunabilme özelliğine sahip olmasından dolayı büyük bir önem taşımaktadır. Yerli yakıt olarak tabir ettiğimiz bu kaynaklar, maliyeti ve geleneksel yakıtlara göre çevreci olması açısından bakıldığında hem daha etkili bir şekilde kullanılmakta hem de ülkelerin enerji konusundaki dışa bağımlılığını azaltmaktadır.

Ülkeler enerji politikaları kapsamında, enerji ve çevre faktörlerini birlikte ele alarak, önümüzdeki dönemlerde zamanın en büyük zorluklarından biri olan artan enerji talebini karşılamaya çalışarak, zararlı karbon emisyonlarını da azaltacaktır.

1.2. Türkiye'de Enerjiye Genel Bakış

Ülke nüfusunun giderek artması**,** hızla gelişen teknoloji, ulaşım ağının ve hizmet sektörünün büyümesi nedeniyle, ülkemiz enerji konusunda gittikçe artan ve önem teşkil eden bir taleple karşı karşıyadır. Nüfus artışından dolayı, barınma ihtiyacını karşılamak için yeni yerleşkelerin kurulmasıyla enerji tüketimleri de giderek artmaktadır.

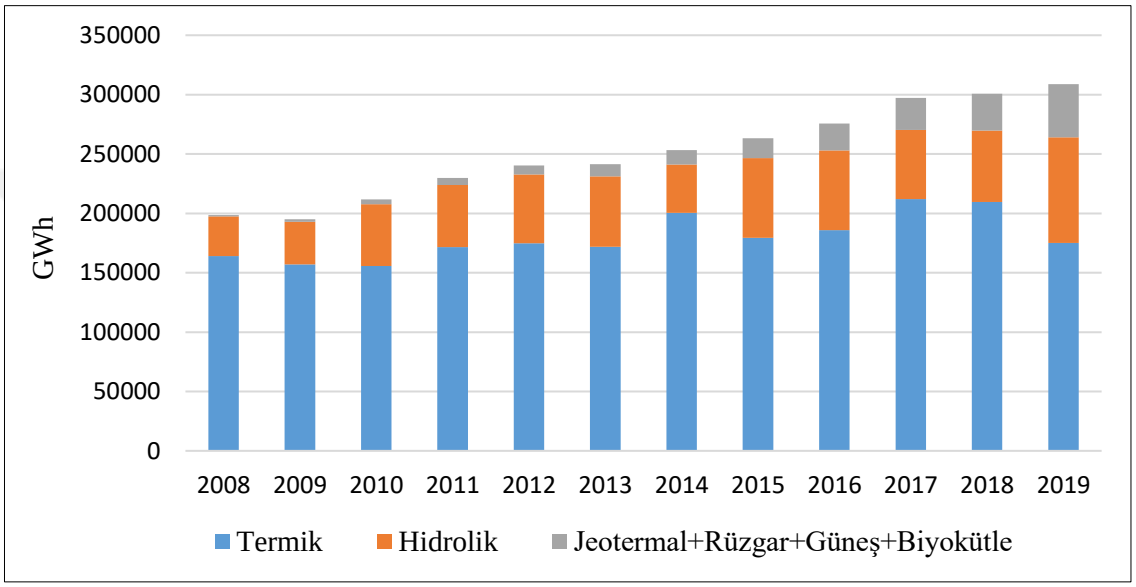
Özellikle enerjinin temel bir bileşenini oluşturan elektrik enerjisi, gittikçe yükselen bir potansiyelde gelişmektedir ve dünyada en çok kullanılan enerji türü olarak da görülmektedir. Ülkemizde 2019 yılı sonu itibariyle, brüt elektrik üretiminin 304,2 milyar kWh, tüketiminin 303,6 milyar kWh olduğu görülmektedir. Elektrik enerjisi tüketimindeki artış 2015 yılında %3,3, 2016 yılında %5,1, 2017 yılında %6,2 ve 2018 yılında %2,5 olarak gerçekleşirken 2019 yılında elektrik enerjisinde %0,2 azalma meydana gelmiştir. Çizelge 1.1'de Türkiye'de 2014-2019 yılları arasındaki elektrik enerjisi görünümü verilmektedir (EMO 2020, TEİAŞ 2020a).

Çizelge 1.1. Ülkemizin elektrik enerjisi görünümü (GWh), 2014-2019.

Yıl	Brüt Üretim	İthalat	İhracat	Tüketim	Üretim Artış Oranı (%)	Tüketim Artış Oranı (%)
2014	251962,8	7953,5	2696,0	257220,3	4,9	4,7
2015	261783,3	7135,5	3194,5	265724,3	3,9	3,3
2016	274407,7	6330,3	1451,7	279286,3	4,8	5,1
2017	297277,5	2728,3	3303,7	296702,1	8,3	6,2
2018	304801,9	2476,9	3111,9	304166,8	2,5	2,5
2019	304251,6	2211,5	2788,7	303674,4	-0,2	-0,2

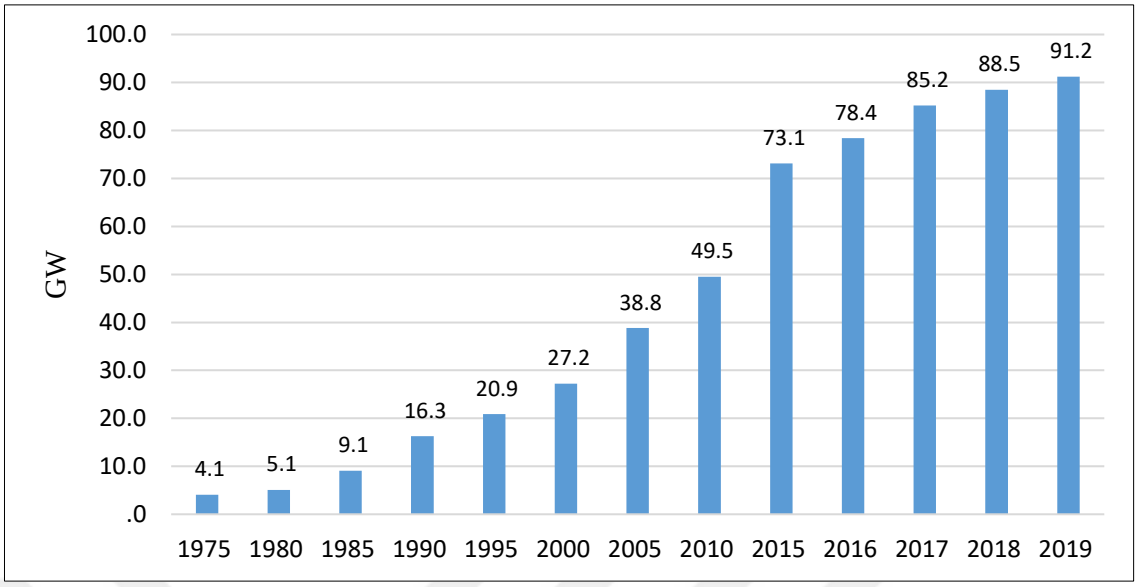
Ülkemizde elektrik enerjisi üretiminde, termik ve hidrolik santrallerin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından da yararlanılmaktadır. 2019 yılı itibariyle, üretilen elektriğimizin 175078 GWh'i (%57.5) termik santrallerden sağlanmıştır. Bu oran içerisinde ilk sırayı %37.2'lik pay ile kömür kaynaklı santraller alırken %18.6'lık payı doğalgaz kaynaklı santraller takip etmiştir. Diğer yandan 88886 GWh'i (%29.2) hidroelektrik santrallerden, 40287 GWh'i (%13,3) diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar ve jeotermal

bazlı üretimimiz, 2008 yılındaki 1009 GWh seviyelerinden 2019 yılı sonu itibariyle güneşin de dahil olmasıyla 40287 GWh düzeyine ulaşmıştır (TEİAŞ, 2020b). Bu ise son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önemi göstermektedir. Jeotermal, güneş ve rüzgar enerji santrallerinin üretim miktarı ve toplam elektrik üretimindeki payının artmasında temel etkenin, kurulu güç ve verimlilik artışı olduğu söylenebilir. Şekil 1.1'de 2008-2019 yılları arasındaki ülkemizin elektrik enerjisi üretiminin gelişimi görülmektedir (EMO 2020, TEİAŞ 2020a).

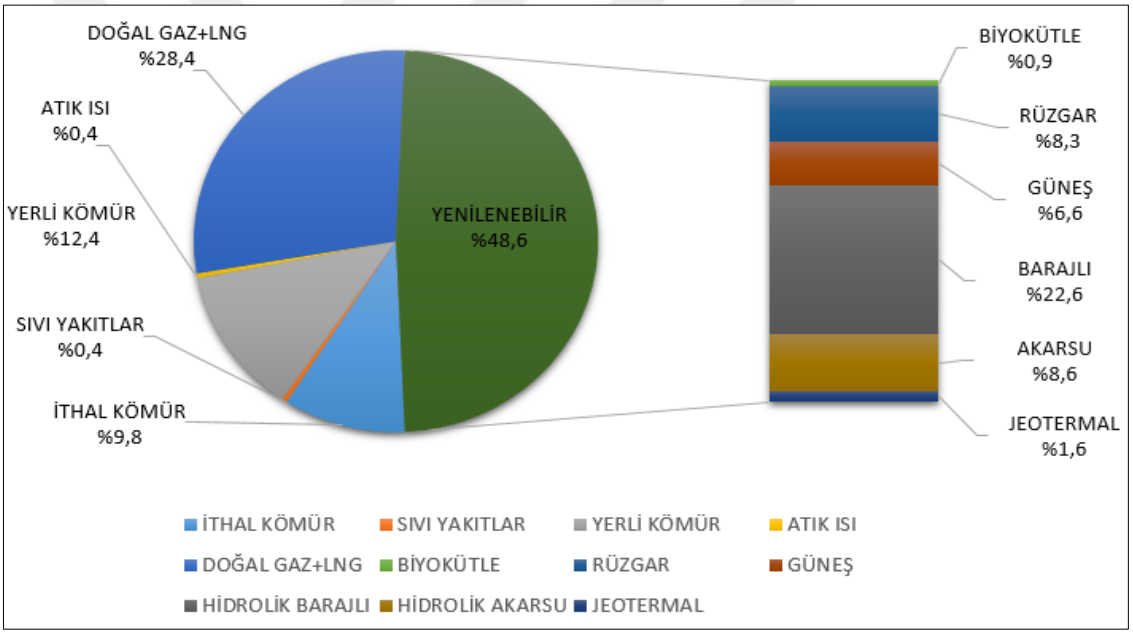


Şekil 1.1. Ülkemizin elektrik enerjisi üretiminin gelişimi (2008-2019).

Elektrik enerjisi kurulu gücümüze baktığımızda, 2008 yılında 41872 MW olan gücümüz 2019 yılı sonu itibariyle bir önceki yıla göre %3,07 oranında artarak 91270 MW'a yükselmiştir. 2019 yılındaki kurulu gücümüzün %51'ini termik santraller oluşturmuştur. İkinci sırada %31,2 oranla hidroelektrik santraller yer alırken, %8,3 ile rüzgar enerjisi santralleri, %6,6 ile güneş enerjisi santralleri ve %2,9 ile biyokütle-atık ısı ve jeotermal enerji santralleri takip etmiştir (EMO, 2020). Kalkınma planları kapsamında ise 2023 itibariyle kurulu gücümüzün 109474 MW'a çıkarılması öngörülmektedir (Enerji Portalı, 2019). Şekil 1.2'de elektrik santrallerinin toplam kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi (EMO 2020, TEİAŞ 2020a) ve Şekil 1.3'te 2019 yılına ait birincil kaynaklara göre kurulu güç verilmektedir (EMO, 2020).

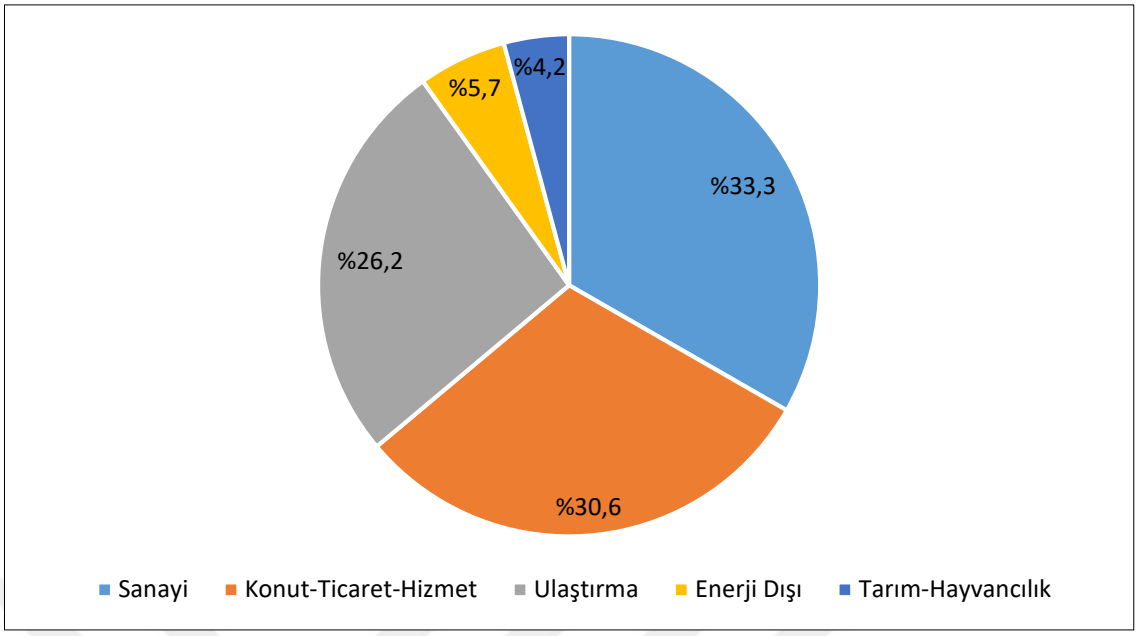


Şekil 1.2. Elektrik santrallerinin toplam kurulu gücünün yıllar itibariyle gelişimi.



Şekil 1.3. Birincil kaynaklara göre kurulu güç, 2019.

Türkiye'de 2018 yılında nihai enerji tüketiminde en fazla payı, sanayi sektörü (%33,3) ile binalardan oluşan konut, ticaret ve hizmet sektörü (%30,6) almış ve bunları ulaştırma sektörü (%26,2), enerji dışı sektör (%5,7) ve tarım-hayvancılık sektörü (%4,2) takip etmiştir. Ayrıca 2018 yılında tüketilen enerjinin %75'inin ithal edildiğinin, Türkiye'nin enerjide dış kaynaklara bağımlı olduğunun da göstergesi olmuştur. Şekil 1.4'te Türkiye'de nihai enerji tüketiminin 2018 yılına ait sektörel dağılımı verilmektedir (EİGM, 2020).



Şekil 1.4. Türkiye'de nihai enerji tüketiminin sektörel dağılımı, 2018.

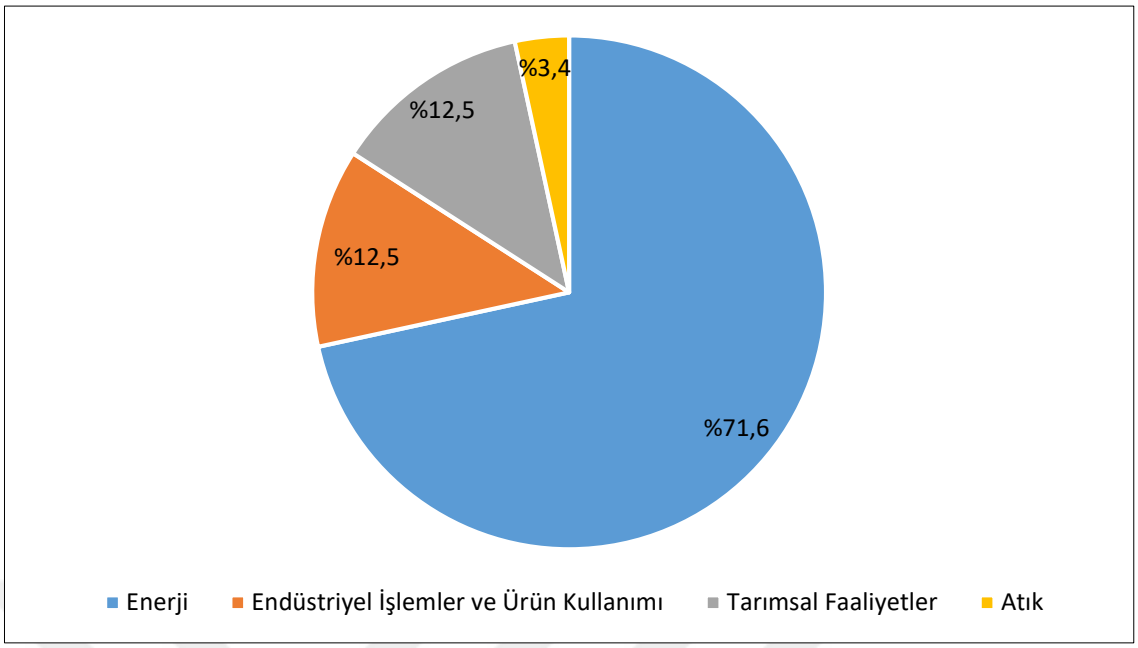
Ülkemizin birincil enerji arzı, enerji denge tabloları incelendiğinde, 2018 yılında bir önceki yıla göre %1,14 azalarak 143,6 Mtep olmuştur. Kaynak dağılımına bakıldığında 41.9 Mtep (%29,1) petrol ve petrol ürünlerini 41,1 Mtep (%28,6) ile doğalgaz ürünleri, 40,9 Mtep (%28,5) ile kömür, 11,6 Mtep (%8,1) ile jeotermal, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklar, 5,1 Mtep (%3,6) ile hidrolik ve 3 Mtep (%2,1) ile biyoenerji ve atıklar izlemektedir. Türkiye'de yenilenebilir enerji arzı hidrolik kaynaklar, rüzgar, güneş, jeotermal ve biyokütleden meydana gelmektedir. 2018 yılı sonu itibariyle birincil enerji arzımız 143,6 Mtep iken yerli enerji üretimi 39,7 Mtep değerine ulaşmıştır. 2008 yılında yerli enerji üretiminin %12'si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanırken 2018'de yaklaşık %50'si yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmıştır (EİGM, 2020).

Toplam enerji tüketiminde sanayinin yanı sıra binaların da rolü bir hayli fazladır. Binalar, ekonomi sektöründeki en uzun ömürlü ve önemli boyutta enerji tüketen ürünlerdir (COB, 2018). Bu nedenle binalarda hem enerji verimliliğinin artırılması konusunda hem de sera gazı emisyonunu azaltmaya yönelik ülkemizde ve Avrupa'da önemli çalışmalar yapılmaktadır. 2008-2018 yılları arasındaki 10 yıllık dönemde ulusal enerji denge tablosu incelendiğinde, bina sektörünün tükettiği enerjinin yaklaşık %23, sanayi sektörünün tükettiği enerjinin ise %46 oranda arttığı görülmüştür. Bu artış oranının temel nedenleri, artan nüfus ve buna bağlı olarak kentleşme ve bina sayıları ile artan

sanayileşme neticesinde ticari bina sayılarıdır. En önemli enerji çeşitlerinden biri olan elektrik enerjisi tüketiminde ise bina sektörünün toplam tüketimindeki payı 2018 yılı itibariyle %50'dir (EİGM, 2020).

Enerji taleplerinin giderek artması beraberinde iklim değişikliği, hava ve su kirliliği, tarım alanlarının kaybı gibi çevresel sorunların da artmasına neden olmaktadır. Birincil enerji kaynakları sıralamasında doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlar yanma sonucunda az veya çok atık çıkartarak çevre ve insan sağlığına zarar vermektedir. Fosil yakıtlar yandıkları zaman büyük miktarda sera gazı da açığa çıkarmaktadır. En önemli sera gazı olan karbondioksit (CO_2) salınımları Avrupa ülkelerinde son 10 yıla göre azalış gösterirken, Türkiye'de %50 oranında artış göstermiştir (BP, 2020). Bu salınımların yaklaşık %18'i konutlardan kaynaklanmaktadır (İMSAD, 2014).

Sera gazı emisyon envanterine göre; 2018 yılında toplam sera gazı emisyonu CO_2 eşdeğeri olarak 521 Mtep olarak hesaplanmıştır. Sera gazı emisyonlarının 2018 yılı sektörel dağılımında toplam emisyonlar içinde en büyük payı 373 Mtep ile (%71,6) enerji sektörü almaktadır. Enerji sektörü kapsamında enerji üretimi, sanayi, ulaştırma ve diğer sektörlerde (binalar, tarım, ormancılık ve balıkçılık faaliyetlerinde) yakılan yakıtlardan kaynaklanan emisyonlar yer almaktadır. Geri kalanlarını ise endüstriyel işlemler, tarımsal faaliyetler ve atıklar oluşturmaktadır. 2008 yılına göre sera gazı emisyon değişimi %34,4 artarken, enerji sektörü emisyonlarındaki artış ise %30 olarak gerçekleşmiştir (TÜİK, 2020). Türkiye 2021-2030 Uygulama Döneminde Referans Senaryosuna göre sera gazı emisyonlarında 2030 yılında %21 oranına kadar azaltma taahhüdünde bulunmuştur (MMO, 2018). Şekil 1.5'te 2018 yılına ait Türkiye'de sektörlere göre sera gazı emisyonları verilmiştir (TÜİK, 2020).



Şekil 1.5. Türkiye'de sektörlere göre sera gazı emisyonları, 2018.

Bu bilgiler doğrultusunda, temiz üretim teknolojileri, yeni ve alternatif yakıtlar kullanarak, termik santralleri iyileştirme çalışmaları yaparak, elektrik enerjisi üretiminde yenilenebilir enerji payını artırarak, ulaşımda enerji verimliliğini artıracak uygulamalar geliştirerek, temiz araç teknolojilerini yaygınlaştırarak, enerji ve doğal kaynaklarda yerli teknolojileri kullanarak hem enerji konusunda dışa bağımlılığı bir anlamda düşürmüş hem de zararlı gaz emisyonlarını azaltmış olacağız.

Yenilenebilir enerji kaynakları açısından oldukça zengin bir konumda yer alan ülkemizde, çeşitli düzenlemeler ve teşvikler sayesinde daha ekonomik ve çevre dostu enerji üretiminin artırılması gerekmektedir. Bunun yanı sıra enerji tasarrufunun ve verimliliğinin artırılarak, enerji tüketimlerini de azaltmak mümkün olmaktadır. Bu yönde yapılan çalışmalardan biri de Termal Enerji Depolama (TED) sistemleridir. Binalarda enerji performansını artıran bu çalışmalarda ozon tabakasına zarar veren gazlara ihtiyaç duyulmadan soğutma ve ısıtma yapılabilmektedir. Elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın azalmasının yanı sıra elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda bile aşırı yüklenmenin önüne geçilebilmektedir. Böylece hem enerji santrallerine duyulan ihtiyaç hem de fosil tabanlı yakıtların kullanımı azalmış olmaktadır. Bu da çevre kirliliği açısından daha az kirleten çözümler sunmaktadır (Konuklu, 2008).

Termal enerji depolama oldukça farklı şekilde ve farklı uygulama alanlarında uygulanabilir olup, en yaygın termal enerji depolama yöntemi, faz değiştiren malzemeler

(FDM) kullanılarak enerjinin depolandığı yöntemdir. Bu yöntemde, ısı depolama kapasitesi yüksek olan kimyasal maddeler kullanılarak enerji depolanabilmektedir. FDM, belirli bir sıcaklık altında faz değiştirme yeteneğine sahiptirler. Ortam sıcaklığı faz değişim sıcaklığının üzerine çıktığında çevreden ısı alarak faz değiştirirler. Soğuma esnasında bu ısıyı tekrar ortama geri verirler. Bu alınan veya verilen ısı gizli ısı olarak adlandırılır (Okcu, 2011).

1.3. Enerji Depolama ve Yöntemleri

Birçok enerji kaynağı, doğası gereği kesintili olduğu için enerjinin depolanması mevcut enerjinin korunmasında, kullanımının iyileştirilmesinde önemli rol oynar. Çoğu uygulamada sadece birkaç saatlik kısa süreli depolamaya ihtiyaç duyulurken, bazı uygulamalarda ise birkaç aylık uzun süreli depolama gerekebilir. Örneğin güneş enerjisi sadece gün boyunca kullanılabilir ve bu nedenle verimli bir termal enerji depolaması gerektirir; böylece güneş saatlerinde toplanan aşırı ısı daha sonra kullanılmak üzere saklanabilir. Kullanım sürelerinin farklı olduğu ısı geri kazanım sistemlerinde bir miktar termal enerji depolaması gerekebilir (Farid, Khudhair, Razack & Al-Hallaj, 2004).

Artan nüfusumuz ve gelişen sanayileşmemizden dolayı her geçen gün enerjiye olan ihtiyacımız da artmaktadır. Enerji üretimi ve tüketimi arasındaki farkın açılmasıyla, bu ihtiyacı karşılamak için alternatif ve yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan biri de enerjinin uygun bir şekilde depolanmasıdır.

Mevcut enerjiyi daha sonra kullanmak üzere farklı bir enerji türüne dönüştürme ve ihtiyaç olduğunda da depolanan enerjinin kullanımını içeren sürece enerji depolama denir (Akgün, 2006). Enerji depolanması sayesinde, hem enerjinin sürekli kullanıldığı durumlarda meydana gelen atık ısının depolanması hem de hava şartlarına ve günün saatlerine göre üretimde değişiklik gösterebilen rüzgar ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisi depolanabilmektedir. Bu sayede kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil tabanlı enerji kaynaklarının korunması sağlanabilmektedir.

Enerji depolama teknolojileri, üretilen kesintili enerjiyi depolayarak ve daha sonra talep üzerine erişilebilir hale getirerek yenilenebilir enerji kaynaklarının kesiklilik

problemini de telafi edebilir. Daha geniş anlamda, enerji depolaması, enerji arz ve talebinin daha iyi yönetilmesini kolaylaştıran bir teknolojidir (Revankar, 2019).

Enerji depolama sistemleri, toplumun bina ısıtma ve soğutma, havacılık gücü ve hizmet uygulamalarında daha verimli, çevreye zarar vermeyen enerji kullanımına yönelik gereksinimlerinin karşılanmasına da önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

Enerji depolama sisteminin kullanımıyla aşağıdaki faydalar sağlanabilir (Dinçer & Rosen, 2011) :

- Düşük enerji maliyetleri
- Düşük enerji tüketimleri
- Geliştirilmiş iç hava kalitesi
- Başlangıç ve bakım maliyetlerinin azalması
- Ekipman boyutunun küçülmesi
- Verimli ve etkin ekipmanların kullanımı
- Daha verimli enerji kullanılmasıyla fosil yakıtların korunması
- CO_2 ve kloroflorokarbonlar gibi emisyonların azalması

Genel olarak enerji aşağıdaki formlarda depolanabilir (Akgün, 2016; Dinçer & Rosen, 2011; Revenkar, 2019):

- Mekanik Enerji Depolama
    - Hidrolik akümülatör
    - Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
    - Flywheel (mekanik bataryalarda) enerji depolama
- Kimyasal Enerji Depolama
    - Elektrokimyasal bataryalar
    - Organik moleküler depolama
- Manyetik Depolama
    - Kapasitör
    - Süper iletken manyetik enerji depolama
- Termal Enerji Depolama
    - Duyulur ısı depolama
    - Gizli ısı depolama

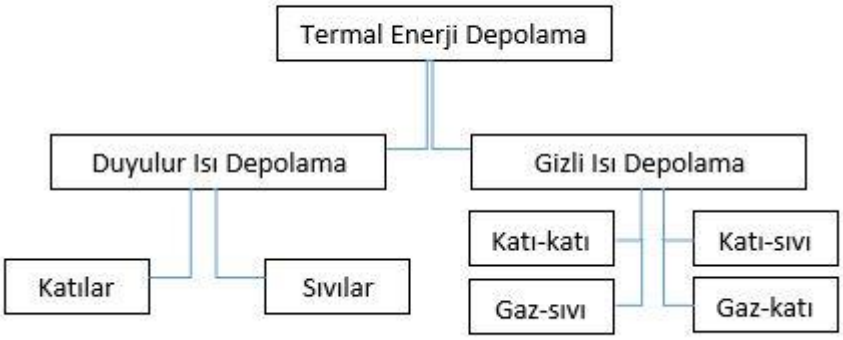
Bu kısımda, çalışmalarımızla ilgili olan termal enerji depolama hakkında bilgi verilecektir.

1.3.1. Termal Enerji Depolama

TED sistemleri, bir malzemenin soğutulması, ısıtılması, eritilmesi, katılaştırılması veya buharlaştırılması yoluyla enerjinin depolanması ile ilgilidir. TED, daha sonra kullanılmak üzere yüksek veya düşük sıcaklık enerjisinin geçici olarak depolanmasıdır (Dinçer & Rosen, 2011). Günümüzde termal enerji depolama sistemleri, fosil yakıtlara bağlılığı azaltmak, güneş ve diğer enerji kaynaklarından gelen ısıyı kullanarak daha verimli bir çevre dostu enerji kullanımına katkıda bulunmak için gerekli araçlardan biri haline gelmiştir (Kant, Shukla & Sharma, 2017).

Termal enerji depolaması için çalışılan tekniklerden biri faz değişim malzemelerinin uygulanmasıdır (Sharma, Tyagi, Chen & Buddhi, 2009). Faz değişim malzemeleri, gizli ısı termal enerji depolama sistemleri için kullanılan malzemelerdir (Nazir vd., 2019). Faz değiştiren malzeme içeren termal enerji depolama teknolojileri, binalarda ekonomik olarak enerji verimliliği sağlamak için uygun bir seçenektir (Iten, Liu & Shukla, 2016). Termal enerji, faz değiştiren malzemelerde buharlaşma ısısı (sıvı-buhar geçişi) veya erime ısısı (katı-sıvı geçişi) olarak depolanabilir (Osterman, Tyagi, Butala, Rahim & Stritih, 2012). Binalarda termal enerji depolaması duyulur ısı (örneğin bina kabuğunun sıcaklığının artırılması veya azaltılması) ve gizli ısı (termal ataletin artırılması için faz değiştiren malzemelerin dahil edilmesi) ile gerçekleştirilebilir (Cabeza, Castell, Barreneche, Gracia & Fernandez, 2011).

Isıtma veya soğutma uygulamaları için genellikle iki tür TED tekniği kullanılmaktadır; duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama. Duyulur ısı sistemleri, erime ve katılaşma işlemi sırasında ısı kapasitesini ve malzemenin sıcaklığındaki değişimi kullanırken; gizli ısı sistemleri, erime veya donma yoluyla, malzemenin fazının sabit sıcaklıkta değiştirilmesiyle enerji depolamasını gerçekleştirir (İnce, 2014). Şekil 1.6'da termal enerji depolamanın sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 1.6. Termal enerji depolamanın sınıflandırılması.

1.3.1.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolamada, termal enerji bir katı veya sıvının sıcaklığını yükselterek depolanır. Duyulur ısı depolama sistemi, şarj ve deşarj işlemi sırasında ısı kapasitesini ve malzemenin sıcaklığındaki değişimi kullanır. Depolanan ısı miktarı ortamın özgül ısısına, sıcaklık değişimine ve depolama malzemesinin miktarına bağlıdır (Sharma vd., 2009) ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Q = \int_{T_b}^{T_f} mc_p dT = mc_{p,ort}(T_f - T_b) \quad (1.1)$$

Burada;

c_p: depolama malzemesinin özgül ısısı, kJ/kgK

$c_{p,ort}$: T_b ve T_f sıcaklıkları arasındaki ortalama özgül ısı, kJ/kgK

m: depolama malzemesinin kütlesi, kg

Q: malzemede depolanan ısı miktarı, kJ

T_b: başlangıç sıcaklığı, °C

T_f: son sıcaklık, °C

Duyulur ısı depolama, ısı depolama ortamına dayanarak sıvı ortam depolama (su, yağ bazlı sıvılar, erimiş tuzlar vb.) ve katı ortam depolama (kayalar, metaller vb.) olarak sınıflandırılabilir (Hasnain, 1998). Gazlar çok düşük hacimsel ısı kapasitesine sahiptir ve bu nedenle duyulur ısı ve soğuk depolama için kullanılmazlar (Mehling & Cabeza, 2008). Diğer alaşımlarla birlikte bakır, alüminyum, dökme demir ve saf demir gibi metaller,

yüksek sıcaklık duyulur ısı depolama için uygundur; ancak bu metallerden oluşan TED sisteminin daha yüksek maliyeti, ticarileştirmede büyük bir engeldir. Beton, kaya, çakıl, tuğla, mermer, granit, kumtaşı gibi metal olmayanlar TED için aday malzemelerdir; ancak düşük özgül ısı kapasitesi ve ısıl iletkenlikleri, bu tip bir depolamanın güvenirliğindeki en önemli engellerdir (Nazir vd., 2019).

Düşük sıcaklıkta su, en iyi depolama ortamlarından biridir. Diğer malzemelerden daha yüksek özgül ısıya sahiptir ve ucuz ve yaygın olarak temin edilebilir. Bununla birlikte, yüksek buhar basıncı nedeniyle, yüksek sıcaklık uygulamaları için pahalı yalıtım ve basınç dayanımı gerektiren basınç gerektirir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda ısıl enerji depolaması için, kaya, metal, beton, kum, tuğla vb. gibi katı malzemeler kullanılabilir. Bu durumda, enerji düşük veya yüksek sıcaklıklarda depolanabilir, çünkü bu malzemeler donmayacak veya kaynamayacaktır. Suyun yüksek buhar basıncının ve diğer sıvıların sınırlarının zorluğundan, termal enerjinin katılarda duyulur ısı olarak depolanmasıyla önlenebilir (Hasnain, 1998).

1.3.1.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı deposu, bir depolama malzemesi katıdan sıvıya veya sıvıdan gaza veya tam tersinden bir faz değişikliğine uğradığında ısı emilimine veya salıverilmesine dayanır. Gizli ısı depolama sisteminin bir faz değiştiren malzeme ortamı ile depolama kapasitesi, FDM'nin kütlesine ve gizli ısısına bağlıdır. FDM için enerji depolama denklemi, malzemenin sıcaklık artışı faz dönüşümüne yol açtığından hem duyulur hem de gizli ısı denklemlerini içerir (Sharma vd., 2009):

$$Q = \int_{T_b}^{T_e} mc_p dT + m\beta L_h + \int_{T_e}^{T_f} mc_p dT \quad (1.2)$$

$$Q = m\left[c_{p,k}(T_e - T_b) + L_h\beta + c_{p,s}(T_f - T_e)\right] \quad (1.3)$$

Burada;

$c_{p,k}$: başlangıç ve erime sıcaklığı arasındaki özgül ısı, kJ/kgK

$c_{p,s}$: erime sıcaklığı ve son sıcaklık arasındaki özgül ısı, kJ/kgK

L_h: faz değişim ısısı, kJ/kg

T_e: erime sıcaklığı, °C

β: erime oranı

Gizli ısı, erime ısısını ifade eder (Farid vd., 2004). Gizli ısı depolamanın temel avantajı küçük sıcaklık aralıklarında yüksek depolama yoğunluğudur ve aktif ve pasif sistemlere dahil edilebilir. Duyulur ısı depolamaya kıyasla, aynı miktarda enerji depolamak için çok daha küçük miktarda malzeme gerekir. Faz değişim malzemesi kullanım prensibi basittir: Sıcaklık arttıkça, malzeme fazı katıdan sıvıya geçer. Reaksiyon endotermiktir, FDM ısıyı emer. Benzer şekilde, sıcaklık düştüğünde, malzeme fazı sıvıdan katıya dönüşür. Reaksiyon ekzotermiktir, FDM ısıyı salar (Cabeza vd., 2011).

Erime ve katılaşma döngüleri arasındaki düşük sıcaklık değişimleri ve yüksek termal enerji depolama kapasiteleri gibi gizli ısı termal depolamanın sunduğu avantajlar nedeniyle, faz değiştiren malzemeler solar ısıtma ve soğutma, geleneksel klima dahil olmak üzere çok sayıda uygulamada kullanılmıştır (Mosaffa, Ferreira, Talati & Rosen, 2013).

Gizli ısı enerji depolamada kullanılan malzemelere faz değiştiren malzemeler de denilmektedir (Akeiber vd., 2016) ve gizli ısı termal enerji depolama sistemleri sıvı-gaz, katı-gaz, katı-katı ve katı-sıvı faz dönüşümüne bağlı olarak alt kategoriler olarak sınıflandırılır (Nazir vd., 2019).

Sıvı-gaz faz dönüşümüne sahip termal enerji depolama sistemlerinin gizli ısı kapasiteleri yüksek olmasına rağmen, uygulamalarda gaz fazın depolanabilmesi için basınçlı depolama kapların karmaşık ve pratik olmayan tasarımları, gizli ısının depolanmasını sınırlandırır (Aydın, 2010; Kurt, 2012).

Katı-gaz faz dönüşümüne sahip sistemler de sıvı-gaz sistemleri gibi yüksek gizli ısıya sahiptir; ancak çok büyük hacim değişikliklerinden dolayı büyük hacimli kaplar gerektirir ve ısı depolamada sınırlı olarak kullanılırlar (Zeinelabdein, Omer & Gan, 2018).

Katı-katı faz değişimlerinde gizli ısı, malzemenin kristalindeki değişim ile depolanır. Malzeme bir kristal formdan diğerine dönüştürüldüğünde kristalleşme ısısı şeklinde ısı depolanır ve malzeme ilk durumdaki katı fazına yeniden dönüştüğünde faz değişimi sırasında depolanan ısı da geri kazanılır. Bu tip bir faz değişimi, katı-sıvı faz değişikliğine kıyasla genellikle daha az gizli ısı kapasitesine sahiptir (Konuklu, 2008).

Ancak katı-sıvı faz değiştiren malzemelerde gözlenen sızıntı problemlerini önlediklerinden dolayı büyük ölçüde pratiklerdir. Bu özellik, örneğin beton veya alçı gibi inşaat malzemelerinde termal enerji depolama için kapsüllenmeye ihtiyaç duyulmadan diğer malzemelerle karıştırılmalarını sağlar (Fallahi, Guldentops, Tao, Granados-Focil & Van Dessel, 2017). Uygulamalarda hacimsel enerji depolama kapasitesi yüksek olduğundan dolayı, sadece katı-sıvı veya kristalleşme ısısı yüksek olan katı-katı faz değişimleri önem taşımaktadır. (Konuklu, 2008). Hacim ısıtma ve proses ısısı uygulamaları için kullanılan katı-katı faz değiştiren malzemeler pentaeritritol ($C_5H_{12}O_4$), pentagliserin [CH_3-C-(CH_2-OH_3)], neopentil glikol diakrilat [$(CH_3)_2$-C-(CH_2-$OH)_2$] ve bunların karışımlarıdır (Zeinelabdein vd., 2018).

Katı-sıvı faz dönüşümüne sahip sistemler gizli ısı depolama sistemleri arasında en çok incelenen ve ticari olarak üretilen bir tiptir ve bu nedenle çok çeşitli çalışma sıcaklıklarında çok sayıda malzeme mevcuttur. Katı-sıvı faz değişiminde malzemeler, başlangıçta ısıyı absorbe ettikleri için sıcaklıkları yükselmeye başlar ve duyulur ısı depolama malzemeleri gibi davranırlar. Faz geçiş sıcaklığına ulaştıkları zaman tüm malzeme sıvı faza dönüşünceye kadar sıcaklıkta önemli bir artış olmadan ısıyı absorbe etmeye devam eder. Erimiş bir faz değiştiren malzemenin sıcaklığı düştüğünde malzeme katılaşır ve depolanan gizli ısı serbest kalır (Nazir vd., 2019). Katı-sıvı faz dönüşümüne sahip malzemeler, katı-gaz ve sıvı-gaz malzemelerine kıyasla nispeten daha az gizli ısıya sahiptir; fakat küçük hacim değişiklikleri (%10 veya daha az) sistemi uygun maliyetli hale getirir ve genellikle termal enerji depolama sistemleri için uygulanır (Zeinelabdein vd., 2018).

Sonraki bölümde katı-sıvı faz dönüşümü gerçekleştiren malzemelerin genel adına faz değiştiren malzemeler denilecek ve ayrıntılı olarak incelenecektir.

BÖLÜM 2

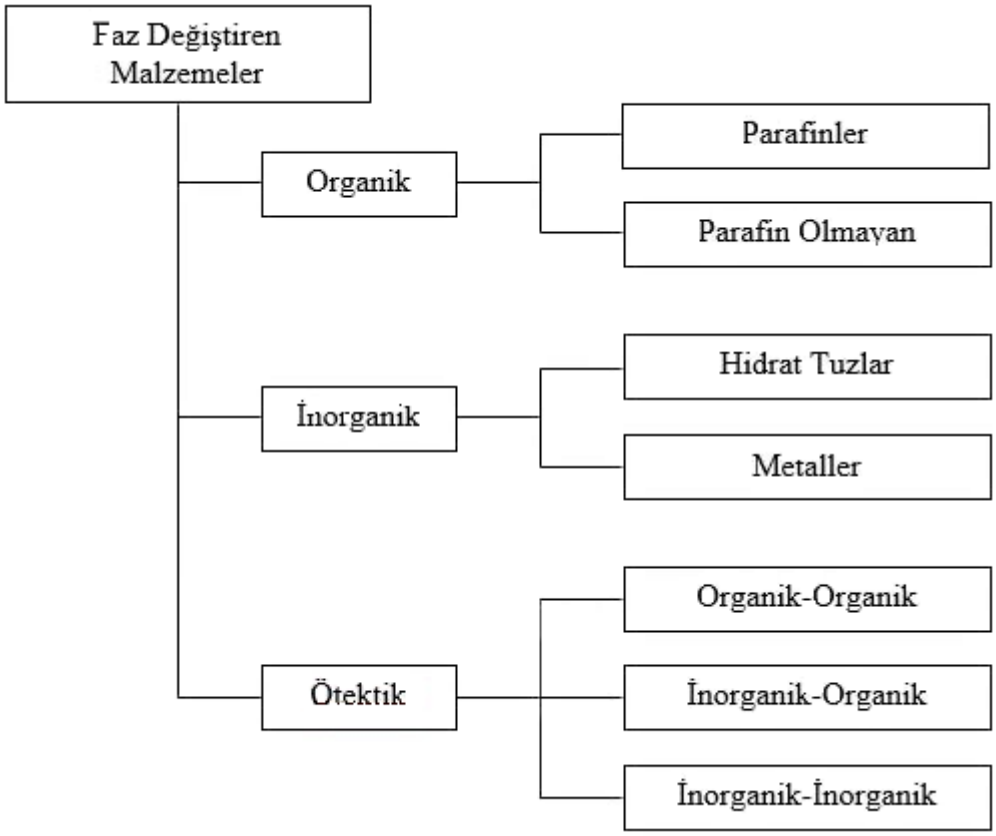
FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER VE TEMEL ÖZELLİKLERİ

2.1. Giriş

Faz değişim malzemeleri, belirli bir aralıktaki sıcaklıkları kontrol etmek için faz değişiminin gizli ısısını kullanırlar. Sıcaklık, belirli bir noktanın üzerine çıktığında malzemedeki kimyasal bağlar parçalanmaya başlayacak ve malzeme katıdan sıvıya değişen bir endotermik işlemde ısıyı absorbe edecektir. Sıcaklık düştüğünde, malzeme enerjisini vererek katı hale dönecektir (Kalnæs & Jelle, 2015). FDM, faz geçiş döngüleri sırasında ısı emme ve bırakma özelliğine sahip olan ve şarj ve deşarjla sonuçlanan bir malzeme grubudur. FDM'nin ekzotermik ve endotermik faz geçişleri, TED sistemlerine ve termal yüklere katılarak etkin bir şekilde kullanılabilir (Nazir vd., 2019). Şekil 2.1'de faz değiştiren malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılması görülmektedir (Zeinelabdein vd., 2018).

Alan soğutma ve ısıtma için FDM'den yararlanmaya yönelik ilk çalışmalar 1975'ten beri yapılmaktadır. Günümüzde FDM ürünleri büyük ölçüde toz, granül, sıvı gibi çeşitli şekillerde tüp, küre ve panel gibi kap türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çeşitlilik FDM'nin yapı malzemelerinde, binaların yapı kabuğunda ve binaların ısıtma/soğutma uygulamalarında kullanılmaktadır (Zeinelabdein vd., 2018). Bina yapı kabuğu uygulamalarında FDM'de yararlı enerjiyi depolamak için herhangi bir mekanik cihaza gerek yokken, ısıtma/soğutma uygulamalarında FDM'den yararlı enerjiyi şarj etmek/boşaltmak için eksenel fanların/üfleyicilerin çalıştırılması gerekmektedir. Her iki metodolojinin termal performansı öncelikle yerel iklim koşullarına bağlıdır ve her ikisinin de avantajları ve dezavantajları vardır (Panchabikesan, Vellaisamy & Ramalingam, 2017).

Yaz aylarında insan konfor bölgesi 23°C ile 27°C arasındadır. Yeterli ısı transferini sağlamak için, hava sıcaklığı ile FDM'nin erime sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı 3°C ile 5°C aralığında olmalıdır. Bu, bir yaz soğutma sistemi için FDM erime sıcaklığının 19°C ile 24°C arasında olması gerektiği anlamına gelmektedir (Butala & Stritih, 2009). Serbest soğutma uygulamalarında gizli ısı depolamanın, 12°C ile 15°C arasında değişen günlük sıcaklık değişiminin olduğu yerlerde etkili şekilde çalıştığı bilinmektedir. Bunun altındaki herhangi bir günlük sıcaklık değişimi, FDM özelliklerinin uygun bir şekilde seçilmesiyle birlikte dikkatli tasarım kusurlarını gerektirmektedir (Zeinelabdein vd., 2018). Bina uygulamalarında termal konfor ihtiyacını karşılamak için 18-30°C faz değişim sıcaklığına sahip FDM tercih edilir (Darzi, Moosania, Tan & Farhadi, 2013).



Şekil 2.1. Faz değiştiren malzemelerin kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırılması.

2.2. Organik Faz Değiştiren Malzemeler

Organik faz değiştiren malzemeler, karbon bazlı bileşiklerdir. Faz değiştiren malzemenin erime ısısı, moleküler ağırlıktaki veya karbon atomlarının sayısındaki artışla artar (Veerakumar & Sreekumar, 2016).

Organik FDM geniş bir yelpazeyi kaplar. Saf n-alkanlar, yağ asitleri ve esterler gizli ısı depolaması için en iyi bilinenlerdir (Akeiber vd., 2016). Bina uygulamalarında kullanılmak üzere, onları uygun hale getiren birçok özelliğe sahiptir. Genellikle organik faz değiştiren malzemeler faz ayrışmasına uğramazlar, tekrar tekrar erir ve donarlar; yani uyumlu bir şekilde erime yeteneğine sahiptirler (Rathod & Banerjee, 2013). Çok az kristalize olurlar ya da hiçbir şekilde aşırı soğumayla kristalize olmazlar (Kalnæs & Jelle, 2015). Alçıtaşı, beton, vermikülit, ahşap, çimento ve diğer gözenekli yapı malzemeleriyle uyumludur (Kuznik, David, Johannes & Roux, 2011). Geniş ve değişken erime noktası aralığı ve geniş sıcaklık aralığına sahiptirler (Socaciu, Pleşa, Ungureşan & Giurgiu, 2014). Faz geçişi süresince küçük hacim değişikliği gösterirler ve düşük buhar basıncına sahiptiler (Nazir vd., 2019). Yüksek özgül ısı ve uygun erime ısısına sahiptirler (120 kJ/kg - 210 kJ/kg) (Socaciu vd., 2014). İyi bir termal performans gösterirler ve kimyasal olarak kararlıdırlar (Nazir vd., 2019). Korozif değillerdir, zararsızdır (toksik ve tahriş edici değillerdir) (Socaciu vd., 2014), reaktif değillerdir (Nazir vd., 2019). Son olarak da kendi kendine çekirdeklenme özelliklerine sahiptirler (Kuznik vd., 2011). Bunların yanı sıra FDM, yüksek hacimsel genişlemeye sahiptir (Nazir vd., 2019), FDM'nin ısıl iletkenlikleri düşüktür, plastik kaplarla uyumlu değildir (Socaciu vd., 2014) ve birçok organik FDM'nin çevreye bağlı olarak yanıcı kabul edilmesi de güvenlik yönünü önemli ölçüde etkileyen bir dezavantajıdır (Kuznik vd., 2011). Yanıcı olma özelliği, uygun bir kap ile kolayca hafifletilebilir (Nazir vd., 2019).

Organik faz değiştiren malzemeler genellikle parafin ve parafin olmayan malzemeler olarak sınıflandırılır.

2.2.1. Parafinler

En yaygın olarak kullanılan organik FDM parafinlerdir. Parafin bir alkan için teknik bir isimdir ve genellikle C_nH_{2n+2} genel formülüne sahip doğrusal alkanlar için kullanılır (Mehling & Cabeza, 2008). Alkanın zincir uzunluğuna bağlı olarak parafinler

çift zincirli (n-parafin) veya tek zincirli (izo-parafin) olabilir (Sharma, Ganesan, Tyagi, Metselaar & Sandaran, 2015). C_nH_{2n+2} tipi normal parafinler doymuş hidrokarbonlar ailesidir ve n değeri ne kadar yüksek olursa erime sıcaklığı ve erime ısısı o kadar yüksek olur (Rathod & Banerjee, 2013). Erime sıcaklığındaki bu artış n-alkan zincirleri arasındaki yüksek uyarılmış dipol çekiminden kaynaklanmaktadır (Sharma vd., 2015).

Çalışma sıcaklığı geniş olan ve bina ile ilgili uygulamaların yanı sıra birçok alanda kullanılan parafinlerin, çok sayıda faz değişim döngüsü boyunca yüksek miktarda ısıyı emebildiği, depolayabildiği ve serbest bırakabildiği pek çok çalışmada görülmüştür. Özellikle binalarda, 2,1-2,4 kJ/kgK ısı kapasitesine ve 200-220 kJ/kg gizli ısıya sahip parafinler enerji depolamada seçkin malzeme olarak belirtilmiştir (Sharma vd., 2015).

Katı-sıvı geçişleri ile tekrarlanan döngüden sonra faz ayrımı belirtileri göstermezler ve düşük bir buhar basıncına sahiptir. Erime üzerine hacim artışları %10 hacim düzeyindedir. Bu birçok inorganik malzemeninkine benzer; ancak parafinler daha yumuşak olduğundan ve bu nedenle genleşme üzerine daha küçük kuvvetler oluşturduğundan daha az kritiktir. Parafinler su itici oldukları için suda çözünmezler. En yaygın kimyasal reaktiflerle reaksiyona girmezler. Aslında "parafin" ismi Latince kökenlidir ve çok az reaktif oldukları anlamına gelmektedir (Mehling & Cabeza, 2008).

Parafinler güvenli, sağlıklı, ucuz, korozif olmayan ve kimyasal olarak 500°C'nin altında inert, kararlı, ihmal edilebilir aşırı soğuma, ekolojik olarak zararsız ve toksik olmayan uygun özellikler sergiler (Sharma vd., 2015). Bununla birlikte FDM olarak kullanılan parafinlerin bazı dezavantajları da vardır. İnorganik malzemelere kıyasla düşük ısıl iletkenliğe sahiptir (yaklaşık 0,2 W/mK) ve bu nedenle pratik güneş enerjisi uygulamaları için kullanılabileceklerin seçimi çok sınırlıdır. Termal iletkenliklerini artırmak için metalik dolgu maddeleri, metal matris yapıları, kanatlı boru ve alüminyum talaşları kullanılmaktadır (Hasnain, 1998). Metallerle uyumluluğu çok iyi olmasına rağmen (Mehling & Cabeza, 2008) plastik kaplarda kapsüllenmesi, parafinler plastiğin yumuşamasına neden olabileceği için, uygun değildir ve ayrıca orta derecede yanıcıdırlar (Kalnæs & Jelle, 2015).

Ticari parafinler genellikler petrol damıtmasından elde edilir ve bir dizi farklı hidrokarbon içerir. Bu karışımlar, erime sıcaklığı ve saf alkanlardan daha düşük bir erime

ısısı gösterir. Özellikle farklı erime sıcaklıklarına sahip FDM elde etmek için farklı zincir uzunluğundaki alkanlar da karıştırılır (Mehling & Cabeza, 2008).

2.2.2. Parafin Olmayan Bileşikler

Parafin olmayan organik faz değiştiren malzemeler ise yağ asitlerini ve bunların yağ asidi esterlerini, alkollerini, glikollerini vb. içerirler (Kalnæs & Jelle, 2015). Yağ asitleri temel olarak kirletici olmayan, tedarik kaynağı bitkisel ve hayvansal kaynaklarından üretilir. En çok kullanılan yağ asitleri arasında kaprik asit, kaprilik asit, laurik asit, miristik asit, palmitik asit ve sterarik asit bulunur (Sharma vd., 2015). Parafinlerde olduğu gibi bunlar da 0,15-0,17 W/mK arasında değişen düşük termal iletkenliğe sahiptir (Kalnæs & Jelle, 2015).

Yağ asitleri yüksek erime ısısına sahiptir; ayrıca tekrarlanabilir erime ve donma davranışı gösterir ve aşırı soğutma olmadan donar. Tüm yağ asidini tarif eden kimyasal formül $CH_3 (CH_2)_{2n}.COOH$ şeklindedir. Bununla birlikte en büyük dezavantajları teknik sınıf parafinlerinden 2-2,5 kat daha yüksek maliyetleridir. Ayrıca hafif aşındırıcıdırlar (Sharma vd., 2009).

Parafinlerle karşılaştırıldığında, bu malzemeler mükemmel faz değişimi (katı-sıvı) özellikleri göstermelerine rağmen parafinlerden yaklaşık üç kat daha pahalıdır. Bu malzemeler son derece yanıcıdır ve bu malzemelerin yüksek sıcaklığa, alevlere ve oksitleyici maddelere maruz kalmaktan kaçınılması gerekmektedir (Sharma vd., 2015).

Yağ asitlerinin birçok gizli ısı depolama uygulaması için uygun erime ve erime sıcaklık aralığı, biyolojik bozunabilirlik, toksik olmayan, iyi bir kimyasal ve termal kararlılık gibi üstün özellikleri vardır. Ayrıca termal özelliklerde kayda değer bir bozulma olmadan binlerce termal (erime-donma) çevrimi yapabilirler. Yağ asitleri ve bunların ötektik karışımları son zamanlarda, güneş enerjisi depolama ve konut uygulamaları gibi düşük / orta enerji depolama uygulamaları için faz değişim malzemeleri olarak mümkün olduğunca kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Sharma vd., 2015).

Polialkoller olarak da bilinen şeker alkolü orta sıcaklıkta (90-200°C) FDM olarak kabul edilir ve araştırmacılar tarafından daha az ilgi görmüştür. Yapılan çalışmalar ksilitol, eritritol ve mannitol gibi alkollerin bu ailedeki diğer malzemelerden daha yüksek gizli ısı değerine sahip olduğunu göstermiştir (Sharma vd., 2015).

Esterler, bir hidroksil grubunun bir alkil grubu ile değiştirildiği asitlerden üretilir. Yağ asidi esterleri, dar bir sıcaklık aralığında katı-sıvı geçişi gösterirler ve aşırı soğutmasız veya çok az soğutma olan ötektikleri oluşturabilirler. Birçok yağ asidi esterleri polimer, kozmetik ve akıllı giysilerdeki uygulamalar için büyük miktarda ticari olarak temin edilebilir (Sharma vd., 2015).

Polioksietilen veya polietilen oksit olarak da bilinen polietilen glikoller kimyasal ve termal olarak kararlı, yanıcı olmadığı, toksik olmayan, aşındırıcı olmayan ve ucuz olmasına rağmen düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemeler olarak bilinmektedirler (Sharma vd., 2015). Çizelge 2.1'de 20°C - 30°C arasında faz değiştiren organik malzemelerin listesi verilmiştir.

Çizelge 2.1. 20°C-30°C arasında faz değiştiren organik malzemeler (Kuznik vd., 2011; Raj & Velraj, 2010; Sharma vd., 2015; Zeinelabdein vd., 2018).

Termal Depolama Malzemesi	**Faz Değişim Sıc. (°C)**	**Erime Isısı (kJ/kg)**	**Termal İletkenlik (W/mK)**	**Yoğunluk (kg/m³)**
n-Heksadekan C_{16}	20	236	0,21(k)	773(s)
Propil palmitat	20	190	-	-
Polietilen glikol 600	20-25	146	-	-
Oktadesil 3-menkaptopropilat	21	143	-	-
Lityum klorid etanolat	21	188	-	-
Dimetil sebakat	21	135	-	-
n-Heptadekan C_{17}	22	215	-	778(s)
Poliglikol E 600	22	127,2	0,1897(s)	1126(s)
Alil palmitat	23	173	-	-
Bütil stearat	23	200	-	-
Etil palmitat	23	122	-	-
Dodekanol	26	200	-	-
Oktadesil tiyoglikolat	26	90	-	-
Laktik asit	26	184	-	-
Vinil stearat	27-29	122	-	-
n-Oktadekan	28-28,1	245	0,148(s),0,358(k)	774(s),814(k)
1-3 Metil pentakosan	29	197	-	-

Metil stearat	29	169	-	-
Metil palmitat	29	215	-	-
Kaprik asit	30,1	158	-	-

2.3. İnorganik Faz Değiştiren Malzemeler

Genellikle hidrat tuzlar ve metallerdir ve güneş enerjisinde çok sayıda uygulamaya sahiptirler. Bu malzemeler, birçok çevrimden sonra bile erime ısılarını koruyabilirler (Sharma vd., 2015).

İnorganik FDM'nin de bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. İnorganik FDM yüksek ısı depolama kapasitesine ve yüksek ısıl iletkenliğe sahiptirler (Nazir vd., 2019). Organik FDM'ye göre, faz değişiminde hacimsel genişlemeleri düşüktür. Plastik kaplarla uyumludurlar ve düşük çevresel etkiye sahiptirler (Socaciu vd., 2014). Yanıcı değillerdir, düşük maliyetlidir ve kolayca bulunabilirler (Kuznik vd., 2011). Bunların yanı sıra inorganik FDM termal döngü sırasında tutarsız erime ve dehidrasyon özelliği sergiler (Nazir vd., 2019). Oksidasyon, hidroliz, termal ayrışma ve diğer reaksiyonlarla uzun süreli bozunma gösterebilir (Socaciu vd., 2014). Yüksek buhar basıncı su kaybına neden olur ve termal döngü işlemi sırasında termal davranışta kademeli bir değişikliğe neden olur (Socaciu vd., 2014). Kimyasal ve termal olarak kararsızdırlar. Bazı yapı malzemelerinde uyumluluk sorunu yaşarlar (Nazir vd., 2019). Koroziftirler ve tahriş edici olabilirler (Socaciu vd., 2014). Yüksek derecede aşırı soğuma özelliği gösterirler ve faz ayrımına uğrarlar (Nazir vd., 2019). Çekirdeklenme oranları iyi değildir (Socaciu vd., 2014) ve bazıları yüksek ağırlığa sahiptir (Nazir vd., 2019).

2.3.1. Hidrat Tuzlar

Hidrat tuzları genel olarak $AB.nH_2O$ formunda gösterilirler (Sharma vd., 2009) ve inorganik tuzların ve suyun bir karışımından oluşur, kolay bulunabilirlik ve düşük maliyet nedeniyle uygun maliyetli bir FDM sağlar. Faz dönüşümü tipik erime ve donmaya benzeyen bir işlemde tuzların hidrasyonunu ve dehidrasyonunu içerir. Tuz hidrat ya daha az su içeren bir tuz hidrata ya da tuz ve suyun tamamen ayrıldığı susuz bir forma eriyebilir. FDM olarak kullanılan tuz hidratların arzu edilen özellikleri arasında birim hacim başına yüksek gizli ısı, organik FDM'den daha yüksek termal iletkenlik ve

küçük hacim değişimi ve daha düşük maliyetle kolay bulunabilirlik sayılabilir (Kalnæs & Jelle, 2015). Ayrıca çok aşındırıcı değillerdir, plastiklerle uyumludur ve sadece biraz toksiktir (Sharma vd., 2009).

Ticari kullanıma uygun hidratlanmış tuzlarda en büyük problem uyumsuz erimedir. Bu hidratlanmış tuzlar için tipik bir sorundur; çünkü birçok durumda eritme işlemi, tuzun su salmasına ve susuz bir tuza veya farklı bir tuza dönüşmesine yol açar. Katı tuz, yüksek yoğunluğu nedeniyle, kabın dibine çöker. Sıcaklık donma noktasına ulaştığında, tuz alt kısımda toplanacak ve bir miktar tuz suyu yeniden ememeyecektir. Böylece faz değişikliğine uğrayabilecek toplam tuz hacmi ve FDM'nin etkenliği azalacaktır (Kalnæs & Jelle, 2015); yani geri dönüşü olmayan bir erime-donması ile sonuçlanarak her bir şarj-deşarj döngüsü azalacaktır. Uyumsuz erime sorunu mekanik karıştırma, FDM'nin kapsüllenmesi, katı tuzların süspansiyonda tutularak sertleşmesini önleyen kıvam artırıcı maddeler ilave edilerek, erimiş kristallerin aşırı doymuş çözelti üretmemesi için fazla su kullanılması ve sistemin kimyasal bileşimini modifiye ederek çözülebilir (Sharma vd., 2009).

Hidratlanmış tuzlar için başka bir sorun ise birçok tuz hidratındaki zayıf çekirdeklenme özellikleri nedeniyle oluşan aşırı soğutmadır. Aşırı soğutma meydana geldiğinde, bir FDM'nin sıvı fazı istenen sıcaklıkta katılaşmaz ve gerçekten katılaşmadan önce donma noktasından daha düşük sıcaklıklara ulaşır. Faz değişiminin sıcaklığını değiştirdiği için bu kritik bir unsurdur (Kalnæs & Jelle, 2015). Bu soruna bir çözüm, kristal oluşumunun başlatıldığı çekirdeği sağlayan bir çekirdekleştirici madde eklemektir. Bu maddeler arasında boraks, karbon, TiO_2, bakır, alüminyum, Na_2SO_4, $SrSO_4$, K_2SO_4, $Na_2P_2O_7.10H_2O$ sayılabilir (Farid vd., 2004). Başka bir yöntem ise, çekirdek olarak hizmet etmek için küçük bir soğuk bölgede bazı kristalleri tutmaktır (Sharma vd., 2009).

2.3.2. Metaller

Birim hacim başına yüksek gizli ısıları, yüksek termal iletkenlikleri ve düşük buhar basınçlarına sahip olmalarına rağmen (Sharma vd., 2009) bina uygulamaları için metaller, istenilen sıcaklık aralığında olmamaları ve ağır olmaları nedeniyle uygulamalarda kullanılmamaktadır (Kalnæs & Jelle, 2015). Çizelge 2.2'de 20°C - 30°C arasında faz değiştiren inorganik malzemelerin listesi verilmiştir.

Çizelge 2.2. 20°C-30°C arasında faz değiştiren inorganik malzemeler (Kuznik vd., 2011; Raj& Velraj, 2010; Zeinelabdein vd., 2018).

Termal Depolama Malzemesi	Faz Değişim Sıc. (ºC)	Erime Isısı (kJ/kg)	Termal İletkenlik (W/mK)	Yoğunluk (kg/m^3)
$Na_2SO_4.1/2NaCl.10H_2O$	20	-	-	-
$Na_2SO_4.10H_2O$	21	198	-	-
$FeBr_3.6H_2O$	21-27	105	-	-
P_4O_6	23,7	64	-	-
$LiBO_2.8H_2O$	25,7	289	-	-
$Mn(NO_3)_2.6H_2O$	25,5	148	-	-
H_3PO_4	26	147	-	-
$Mn(NO_3)_2.6H_2O$	26	125,9	-	-
Cs	28,3	15	-	-
$CaCl_2.6H_2O$	29	190,8	0,54(s)	1562(s)
$CaCl_2.12H_2O$	29,8	174	-	-
Ga	30	80	-	-
$AsBr_3$	30	38	-	-
$SnBr_4$	30	28	-	-

2.4. Ötektik Karışımlar

Ötektik karışımlar, ötektik nokta olarak da adlandırılan minimum donma noktasında aynı anda sıvıdan katılaşan iki veya daha fazla bileşenin karışımıdır. Ötektik noktada sıvı, farklı bileşime sahip iki veya daha fazla katı fazdan oluşan bir katıya reaksiyon gösterir; bununla birlikte genel bileşim hala sıvıdaki ile aynıdır. Bu nedenle ötektik karışımlar faz ayrımı göstermezler, fazların hiçbiri farklı bir yoğunluk nedeniyle batmazlar. FDM olarak kullanılan tuzlu çözeltilerinin hepsinin ötektik bir bileşim olmasının nedeni budur (Mehling & Cabeza, 2008).

Ötektiklerin diğer FDM sınıflarına göre en önemli avantajı, erime noktalarının, bileşenlerin çeşitli ağırlık oranlarının bir kombinasyonu yoluyla manipüle edilebilmesidir. Ötektik FDM, yüksek hacimsel termal depolama yoğunlukları, tek erime sıcaklığı ve erime ve donma avantajı nedeniyle binalarda ısıtma ve soğutma gereksinimleri için büyük ölçüde karşılanmaktadır. Bununla birlikte, ötektik FDM'nin

termofiziksel özellik verilerinin sınırlı bir mevcudiyeti bulunmaktadır. Ayrıca, bazı yağlı ötektikler çok güçlü bir kokuya sahiptir ve bu da FDM duvar kaplaması olarak kullanılmasını istenmeyen hale getirir (Zeinelabdein vd., 2018). Bazı ötektikler aşırı soğuma etkisinden muzdariptirler, toplam gizli ısı kapasiteleri düşüktür ve pahalıdır (Nazir vd., 2019).

Ötektik malzemeler organik-organik, inorganik-inorganik ve inorganik-organik malzemelerin karışımları olabilirler (Nazir vd., 2019). Organik ötektik karışımlardan en yaygın olarak test edilen yağ asitlerinden oluşur. İncelenen bazı organik ötektikler arasında kaprik asit / miristik asit, laurik asit / stearik asit, miristik asit / palmitik asit ve palmitik asit / stearik asit ve kaprik asit / laurik asit bulunmaktadır. İncelenen en yaygın inorganik ötektikler farklı tuz hidratlarından oluşur (Kalnæs & Jelle, 2015).

Araştırmacılar tarafından son on yılda önemli ilgi görmesine rağmen, gizli ısı termal depolama sistemlerinde kullanım için ötektik FDM'nin kullanımı saf bileşik FDM kadar yaygın değildir. Bu nedenle, ötektiklerin termofiziksel özellikleri, birçok kombinasyon henüz test edilip kanıtlanmadığından, hala daha fazla araştırma alanı gerektirmektedir. (Kalnæs & Jelle, 2015). Çizelge 2.3'te 20°C - 30°C arasında faz değiştiren organik-organik ötektik malzemelerin ve Çizelge 2.4'te 20°C - 30°C arasında faz değiştiren inorganik-inorganik ötektik malzemelerin listesi verilmiştir. Son olarak da Çizelge 2.5'te 20°C - 30°C arasında faz değiştiren ticari malzemelerin listesi verilmiştir.

Çizelge 2.3. 20°C-30°C arasında faz değiştiren organik-organik ötektik malzemeler (Pielichowska & Pielichowski, 2014; Zeinelabdein vd., 2018).

Termal Depolama Malzemesi	**Faz Değişim Sıc. (°C)**	**Erime Isısı (kJ/kg)**	**Termal İletkenlik (W/mK)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**
%55 Kaprik asit + %45 Laurik asit	21	143	-	-
%73,5 Kaprik asit + %26,5 Miristik asit	21,4	152	-	-
%76,5 Kaprik asit + %23,5 Palmitik asit	21,8	171,2	-	-
%75,2 Kaprik asit + %24,8 Palmitik asit	22,1	153	-	-
%91 Metil stearat + %9 Setil stearat	22,2	180	-	-

%65-90 Metil palmitik + %10-35 Metil stearat	22-25,5	120	-	-
%86 Metil stearat + %14 Metil palmitik	23,9	220	-	-
%83 Kaprik asit + %17 Stearik asit	24,6	178,64	-	-
Oktadekan + Dekosan	25,5-27	203,8	-	-
Oktadekan + Heneikosan	25,8-26	173,93	-	-
%34 Miristik asit + %66 Kaprik asit	26	147,7	-	-
%86,6 Kaprik asit + %13,4 Stearik asit	26,8	188	-	-
%50 CH_3CONH_2 + %50 NH_2CONH_2	27	163	-	-

Çizelge 2.4. 20°C-30°C arasında faz değiştiren inorganik-inorganik ötektik malzemeler (Pielichowska & Pielichowski, 2014; Zeinelabdein vd., 2018).

Termal Depolama Malzemesi	**Faz Değişim Sıc. (^oC)**	**Erime Isısı (kJ/kg)**	**Termal İletkenlik (W/mK)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**
%45 $Ca(NO_3)_2.6H_2O$ + %55 $Zn(NO_3)_2$	25	130	-	1930
%66,6 $CaCl_2.6H_2O$ + %33,3 $MgCl_2.6H_2O$	25	127	-	-
%50 $CaCl_2$ +%50 $MgCl_2.6H_2O$	25	95	-	1590
%48 $CaCl_2$ + % 4,3 NaCl + %0,4 KCl + %47,3 H_2O	26,8-29	190,8	-	1640(s)
%47 $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ + %53 $Mg(NO_3)_2.6H_2O$	30	136	-	-
%60 $Na(CH_3COO).3H_2O$ + %40 $CO(NH_2)_2$	30	200,5	-	-
%80 $CaCl_2.6H_2O$ + %20$CaBr_2.6H_2O$	20	117	-	-
%93 $CaCl_2.6H_2O$ + %5 $Ca(NO_3)_2.4H_2O$ + %2 $Mg(NO_3)_2.6H_2O$	24	125	-	-

%96 $CaCl_2.6H_2O$ + %2 KNO_3 + %2 KBr	23	138	-	-
%96 $CaCl_2.6H_2O$ + %2NH_4NO_3 + %2 NH_4Br	20	141	-	-
%55-65 $LiNO_3.3H_2O$ + %35-45$Ni(NO_3)_2$	24,2	230	-	-

Çizelge 2.5. 20˚C-30˚C arasında faz değiştiren ticari malzemeler.

Termal Depolama Malzemesi	**Tür**	**Faz Değişim Sıcaklığı (ºC)**	**Gizli Isı Depolama Kapasitesi (kJ/kg)**	**Termal İletkenlik (W/mK)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Maksimum Çalışma Sıcaklığı (ºC)**	**Özgül ısı (kJ/kgK)**
RubithermTechnologies GmbH (Rubitherm Technologies GmbH)							
RT21	Parafin	18-23	125	0,2 (k,s)	770 (s) 880 (k)	50	2
RT21HC	Parafin	20-23	160	0,2 (k,s)	770 (s) 880 (k)	45	2
RT22HC	Parafin	20-23	160	0,2 (k,s)	700 (s) 760 (k)	50	2
RT24	Parafin	21-25	130	0,2 (k,s)	770 (s) 880 (k)	55	2
RT25HC	Parafin	22-26	200	0,2 (k,s)	770 (s) 880 (k)	65	2
RT26	Parafin	25-26	150	0,2 (k,s)	750 (s) 880 (k)	60	2
RT28HC	Parafin	27-29	220	0,2 (k,s)	770 (s) 880 (k)	50	2

SP21EK	İnorganik	22-23	140	0,5	1400 (s) 1500 (k)	45	2
SP24E	İnorganik	24-25	150	0,5	1400 (s) 1500 (k)	45	2
SP25E2	İnorganik	24-26	150	0,5	1400 (s) 1500 (k)	45	2
SP26E	İnorganik	25-27	150	0,5	1400 (s) 1500 (k)	45	2
SP29Eu	İnorganik	29-31	170	0,5	1500 (s) 1550 (k)	60	2
PX25	Granül	22-25	65	0,1 (k,s)	650	55	2

EPS Ltd (Environmental Process Systems Ltd)							
A22	Organik	22	160	0,18	785	200	2,20
A23	Organik	23	155	0,18	785	200	2,20
A24	Organik	24	155	0,18	790	200	2,22
A25	Organik	25	150	0,18	785	200	2,22
A26	Organik	26	230	0,21	790	200	2,22
A27	Organik	27	250	0,22	768	200	2,22
A28	Organik	28	265	0,21	789	200	2,22
A29	Organik	29	225	0,18	810	250	2,22

S22	Hidrat tuz	22	215	0,54	1530	60	2,20
S23	Hidrat tuz	23	200	0,54	1530	60	2,20
S24	Hidrat tuz	24	180	0,54	1530	60	2,20
S25	Hidrat tuz	25	175	0,54	1530	60	2,20
S27	Hidrat tuz	27	185	0,54	1530	60	2,20

Climator (Climator)							
ClimSelC21	Hidrat tuz	21-26	134	0,75 (s) 0,93 (k)	1400	-	-
ClimSelC24	Hidrat tuz	24-27	140	0,93 (s) 0,74 (k)	1400	-	-
ClimSelC28	Hidrat tuz	27-31	170	0,72 (s) 0,98 (k)	1400	-	-

2.5. Faz Değiştiren Malzeme Seçimindeki Kriterler

Hiçbir FDM, istenilen tüm özelliklere sahip değildir. Bu nedenle uygulamalarda FDM seçimi yaparken malzemelerin termofiziksel, kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel özelliklerinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırılarak, herhangi bir TED uygulaması için dikkatle incelenmesi gerekmektedir.

Belirli bir FDM'nin belirli bir uygulama ve sıcaklık aralığı için uygunluğunu değerlendirmek açısından termofiziksel özelliklerin belirlenmesi çok önemlidir. Belirli

uygulamalar için FDM'yi seçmede kimyasal ve termal kararlılıkları belirlemek açısından çeşitli teknikler vardır. Erime/donma sıcaklıkları, gizli erime ısısı ve özgül ısı kapasitesi gibi özellikler Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) tekniği kullanılarak ölçülür. Termal iletkenlik, T-history metot yöntemi gibi tekniklerle belirlenebilir. Bunlara ek olarak belirli bir FDM için termal stabilite, termal güvenilirlik ve ısı kapasitesi Termogravimetrik Analiz (TGA) kullanılarak belirlenirken, kimyasal yapısını ve stabilitesini araştırmak için Fourier Dönüşüm Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) kullanılır. ASTM E1269-11, ASTM C1784-14 gibi standartlara uyulmalı ve sonuçlardaki tutarsızlıkları önlemek için termal analiz ekipmanı kalibrasyonu yapılmalıdır. Döngüsel kararlılık, belirli FDM'nin uyarlanması için gereklidir ve termofiziksel özelliklerin sapma derecesini analiz etmek için DSC ve FDM'nin çoklu erime/donma döngüleri için de T-history yöntemi kullanılarak belirlenebilir (Nazir vd., 2019).

Termal depolama sisteminin tasarımında kullanılacak FDM, aşağıda önerilen termo-fiziksel, kinetik, kimyasal, ekonomik ve çevresel özelliklere sahip olmalıdır.

2.5.1. FDM'nin Termofiziksel Özellikleri

- İstenilen çalışma sıcaklık aralığında, **uygun faz değişim sıcaklığına** sahip olmalıdır (Osterman vd., 2012; Socaciu vd., 2014). Faz değişim sıcaklık (FDS) aralığı, bir FDM seçerken dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir (Thambidurai, Panchabikesan, Mohan & Ramalingam, 2015). Farklı yazarlar, FDM'nin uygun erime sıcaklığını seçmek için farklı kriterler önermişlerdir. Thambidurai vd. (2015) yapmış oldukları araştırmada, FDM'nin maksimum şarjını sağlamak için, FDM erime sıcaklık aralığının, tasarlanmış oda sıcaklığına yakın olması gerektiğini belirtmişlerdir. Medved ve Arkar (2008), ılıman iklime sahip şehirler için daha yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'nin daha uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Tanımlanan gizli ısı termal enerji depolama çalışma koşulları ve yaz aylarında hesaplanan ortalama ortam hava sıcaklıkları için optimum FDM erime sıcaklığına ait $T_p = T_a + 2K$ bağıntısını ileri sürmüşlerdir (T_p: FDM erime pik sıcaklığı, T_a: ortalama ortam sıcaklığı). Lazaro, Dolado, Marin ve Zalba (2009b), soğutma talebinin yüksek olduğunda belirli bir sıcaklık seviyesini korumak için FDM faz değişim sıcaklığının daha düşük olması gerektiğini ve çok düşük soğutma talepleri için faz değişim sıcaklığının objektif sıcaklık seviyesine yakın olması gerektiğini de belirtmişlerdir. Waqas ve Kumar (2011a), sıcak ve kuru iklim koşullarında, erime

sıcaklığının konfor sıcaklığına eşit olan FDM'nin, serbest soğutma sisteminin potansiyelini artırdığını göstermişlerdir.

- Isı depolamanın fiziksel boyutunu en aza indirmek için, FDM **yüksek gizli ısıya** sahip olmalıdır (Socaciu, 2012).

- Sınırlı zaman dilimi içinde, FDM'nin şarj edilmesine ve boşaltılmasına yardımcı olmak için **yüksek termal iletkenliğe** sahip olmalıdır (Socaciu vd., 2014). Çoğu FDM'nin düşük ısıl iletkenliği büyük ve pahalı ısı transfer yüzeylerinin kullanılmasını gerektirir. Bu ise uygulamada büyük dezavantaj olarak kabul edilir (Farid vd., 2004).

- Termal enerji depolama sistemlerinde gizli ısı şeklinde ek enerji kullanılabilmesi için **yüksek özgül ısıya** sahip olmalıdır.

- Depolama sorunlarını azaltmak için çalışma sıcaklıklarında faz dönüşümü ve küçük buhar basıncı üzerindeki **küçük hacim değişikliklerine** sahip olmalıdır

- Katı ve sıvı fazların homojen olması için (ayrışmayı önlemek için), faz geçişi boyunca faz değiştiren malzemenin **tamamen erimesi (uyumlu erime**) gerekmektedir.

- Faz değiştiren malzemenin, uzun süre kullanılabilmesi için, erime ısısı ve faz değişim sıcaklığı açısından **kararlı olması (termal olarak güvenilir**) gerekmektedir.

- **İyi ısı transferine** sahip olmalıdır.

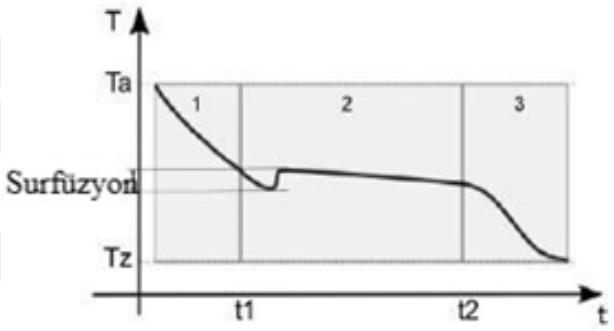
- Çalışma sıcaklığında, **düşük buhar basıncına** sahip olmalıdır (Socaciu vd., 2014).

- Daha küçük bir kap hacminin malzemeyi tutması için, **yüksek yoğunluğa** sahip olması gerekmektedir. Tuz hidratlar parafinlerden daha yoğundur ve bu nedenle hacim başına daha etkilidir (Farid vd., 2004).

2.5.2. FDM'nin Kinetik Özellikleri

- Faz değiştiren malzemenin sıvı fazda aşırı soğutmasını önlemek için, **yüksek çekirdekleşme oranına** sahip olması gerekmektedir (Socaciu vd., 2014). Aşırı soğutma veya süper soğutma bir FDM'nin katılaşma özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdendir. FDM'nin katılaşması, bir çekirdeklenme etkisi ile başlar. Çekirdeklenme, çekirdek adı verilen başlangıç kristallerinin oluşumudur. Daha sonra kristaller, katı fazı oluşturmak

için malzemede yayılır. Bir malzemenin çekirdeklenme oranı, sıcaklığın füzyon sıcaklığının altına düştüğünde çekirdek üretme kabiliyetidir. Bir malzemenin çekirdeklenme oranı çok düşükse, sıcaklığı füzyon sıcaklığının altına düştüğünde sıvı fazda kalabilir. Katılaşma daha sonra başlar. Malzeme sıcaklığı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi tekrar ani faz değişim sıcaklığına yükselir. Bu etkiye süper soğutma etkisi denir ve saf FDM çalışmalarında bu durum çok önemlidir (Kuznik vd., 2011). Bir başka deyişle, bir malzemenin sıvı fazında erime noktasının çok altında kalarak uzun bir katılaşma süresi ile sonuçlanmasıdır süper soğutma özelliği. Aşırı soğutma tamamen ortadan kaldırılamasa da, katkı maddeleri ve çekirdekleştirici maddeler ilave edilerek azaltılabilir. Aşırı soğutma inorganik FDM'de, organik FDM'den daha fazla görülür (Thambidurai vd., 2015).



Şekil 2.2. Faz değiştiren malzemenin aşırı soğutma etkisi.

- Depolama sisteminden ısı geri kazanımı taleplerini karşılamak için, **yüksek kristal büyüme oranına** sahip olmalıdır (Socaciu vd., 2014).

2.5.3. FDM'nin Kimyasal Özellikleri

- Tamamen **tersinir donma ve erime döngüsüne**,
- **Kimyasal kararlılığa**,
- **Yüksek donma ve erime kararlılığına**,
- Kapsüllenmiş malzemelerde ve inşaat malzemelerinde **korozyona karşı dayanıklılık** özelliğine,
- Kapsüllenmiş malzemelerle **kimyasal olarak uyumlu** olması özelliğine,
- Güvenliği sağlamak için **toksik, yanıcı ve patlayıcı malzeme olmama** özelliğine,

- Uzun çalışma ömrünü garantilemek için, çok sayıda donma ve erime döngüsünden sonra **bozulma olmaması** gibi özelliğe sahip olmaları gerekmektedir (Socaciu vd., 2014).

2.5.4. FDM'nin Ekonomik Özellikleri

- **Düşük maliyet**,
- Geniş ölçüde **bulunabilirlik,**
- Büyük ölçekli **kullanılabilirlik** (Zhou, Zhao & Tian, 2012).

2.5.5. FDM'nin Çevresel Özellikleri

- Kullanım süresi boyunca **kirletici olmaması** ve **düşük çevresel etkiye** sahip olması.
- **Geri dönüşüm potansiyeline** sahip olması (Socaciu vd., 2014).

2.6. Literatür Araştırması

Binalardaki yüksek enerji tüketim eğilimi ile birlikte, soğutma yükünü azaltmaya yönelik TED sistemlerinin kullanılması, son yıllarda artmış ve gizli ısı termal enerji depolama kavramı kullanılarak faz değiştiren malzemeler, literatürde geniş ölçüde yer almıştır. Duyulur ısı depolamaya kıyasla, küçük bir sıcaklık aralığında ısının doldurulması ve boşaltılması, gizli ısı termal enerji depolama sistemlerini ayırt eden özelliktir.

Yapılan çalışmalarda, FDM-Hava Isı Değiştiricilerinin (FHID) bina içinde serbest soğutma uygulamasında kullanımı incelenmiştir. Bu uygulamalarda, FHID sistem parametrelerinin termal performansı tanımlamasındaki önemi de vurgulanmıştır. FHID sistem yönetim parametrelerinin faz değişim sıcaklık aralığı, hava akış hızları, kapsüllenme dayanıklılığı, kapsülleme termal iletkenlik, FDM levha kalınlığı, FDM sistem uzunluğu ve hava boşluğunu içerdiği sonucuna varılmıştır. Isı transfer artışının; levhalar arasındaki hava boşluğunun azaltılması, kapsüllenme kalınlığının azaltılması, FDM sistem uzunluğunun artırılması, FDM levha kalınlığının azaltılması, kapsüllenen yüzeyin sağlamlılığının pürüzlülük ve karmaşıklığının artırılması, daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip kapsülleme malzemeleri, daha yüksek debiler ve giriş havası sıcaklığı

ve faz değişim sıcaklığı arasındaki farkın artırılması ile sağlanabileceği bildirilmiştir (Dardir, Panchabikesan, Haghighat, El Mankibi & Yuan, 2019).

FHID sistem performansını, sistemin yapılandırma ve işletim parametrelerinin yanı sıra yerel iklim koşulları da etkilemektedir. Yerel iklim koşullarına göre bina uygulamaları için uygun bir pasif konseptin seçilmesi, dış hava koşullarının tasarımda farklılıklar gerektirmesi nedeniyle kilit faktörlerden biridir. Pasif soğutma potansiyeli, ılık ve nemli bölgelerde, yüksek nem ve daha az günlük sıcaklık değişimleri nedeniyle düşüktür. Yerel iklim koşullarına karşılık gelen uygun bir faz değişim sıcaklığı ile FDM seçimi çok önemli bir konudur. Ortam sıcaklığı, bağıl nem, hava hızı ve günlük sıcaklık, ortam koşulları uygun FHID konfigürasyonunu, FDM tipini ve tasarım parametrelerini belirleyebilir (Panchabikesan vd., 2017).

Enerji tasarrufu ve pasif soğutma stratejileri, enerji tüketimini en aza indirirken, iç mekan termal performansını artırmakla ilgilenmektedir. Binalara pasif soğutmanın entegre edilmesinin temel nedenlerinden biri, ısı kazanımlarını düzenleyerek soğutma yüklerini azaltmaktır. Böylece termal enerji depolama, enerji tasarrufu teknikleri için etkili bir çözüm olarak kabul edilir.

FHID uygulamaları düz plaka kapsülleme, paketlenmiş yatak kapsülleme, FDM granülleri ve merkezi üniteler gibi sistem konfigürasyonlarına göre kategorize edilebilir. Birçok çalışma, simetrik bir erime ve donma sürecine sahip, hacim başına yüksek bir orana sahip alana, kolay tasarım ve kuruluma sahip olduğundan FDM'nin düz plaka konfigürasyonunda kapsüllenmesini test etmişlerdir.

Lazaro, Dolado, Marin & Zalba (2009a), binalardaki serbest soğutma uygulamaları için FDM-hava ısı değiştiricileri üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında gerçek ölçekli iki prototip kullanmışlardır. Prototip 1, inorganik FDM (k=0,7 W/mK) ile doldurulmuş alüminyum poşetler kullanılarak, Prototip 2 ise organik FDM (k=0,16 W/mK) ile doldurulmuş alüminyum paneller kullanılarak tasarlanmıştır. Isı değiştiricisinin soğutma gücünü tahmin etmek için, havanın giriş ve çıkış sıcaklıkları kullanılmıştır. Sonuçlara göre daha düşük ısı iletkenliğine ve daha düşük toplam depolanan enerjiye sahip FDM kullanan ısı değiştiricisinin, uygun şekilde tasarlandığında, daha yüksek soğutma gücüne sahip olduğunu ve serbest soğutma için uygulanabileceğini göstermiştir. Bu sonuçlardan, serbest soğutma uygulamaları için

FDM termal iletkenliği artırmak yerine, ısı değiştiricisi tasarlamanın ekonomik açıdan da daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca alüminyum poşetlerde sıvı fazdaki FDM'nin termal genleşmesinden dolayı, FDM sızıntısı gözlemlenmiştir. Yüksek soğutma oranları ve FDM sızıntısı olmaması nedeniyle serbest soğutma uygulamaları için alüminyum panelli ısı değiştiricileri önerilmiştir. Öte yandan serbest soğutma uygulamaları için soğutma talebinin yüksek olduğunda belirli bir sıcaklık seviyesini korumak için FDM faz değişim sıcaklığının düşük olması gerektiğini, soğutma talebinin düşük olduğunda ise istenilen sıcaklığın ve erime sıcaklığının yakın olması gerektiğini vurgulamışlardır (Lazaro vd., 2009b).

Zalba, Marin, Cabeza ve Mehling (2004), gece boyunca dış mekan serinliğini depolamak ve gündüz iç mekan soğutmasını sağlamak için, faz değişim sıcaklık aralığı 18,8°C-24,1°C olan kapsüllenmiş faz değiştiren malzeme (RT25, Rubitherm GmbH) içeren 1,5 cm ve 2,5 cm kalınlığında, yüksek yoğunluklu polietilenden oluşan düz plakalı ısı değiştiricisi üzerinde çalışmışlardır. Deney stratejisinin tasarlanmasında, kapsüllerdeki enerji/hacim oranı, deponun yük/boşaltma hızı ve kurulum maliyeti gibi parametreler belirlenerek, erime ve katılaşma işlemleri için sabit bir giriş havası sıcaklığının varsayıldığı deneysel bir model geliştirmişlerdir. Deneysel modelde FDM'nin erimesi sırasında havanın sıcaklıkları 28°C ve 30°C, FDM'nin katılaşması için ise 16°C ve 18°C sıcaklıklar kullanılmış olup, debiler ise 100 m^3/h ve 150 m^3/h olarak değerlendirilmiştir. Deneyler 3 kg RT25 kullanılarak yapılmış olup, kullanılan deney düzeneğinde bu, depolama cihazında 28 kWh/m^3'lük bir depolama yoğunluğu anlamına gelmektedir. Analizlere göre katılaşma işleminde kapsülleme kalınlığı, havanın giriş sıcaklığı ve debinin önemli etkiye sahip olduğu; erime işleminde de aynı parametrelerin geçerli olduğu; ancak giriş havası sıcaklığının kapsülleme kalınlığından daha fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kapsülleme kalınlığı düşük olduğunda, FDM'nin erime sıcaklığı ve hava sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı arttıkça ve debi daha yüksek olduğunda işlemin daha hızlı olduğu da sonuçlandırılmıştır.

Dolado, Lazaro, Marin ve Zalba (2011a) vd., FDM-hava dikdörtgen ısı değiştirici içeren, FDM ile doldurulmuş kompakt depolama modülleri (KDM) ile farklı termal sınır koşulları altında ısı değiştiricisinin termal performansını incelemek için, farklı giriş havası sıcaklıkları ve hava akış hızları ile kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Hava akış yönünün, ünitenin üstünden hava beslemesi ve ünitenin altından hava geri dönüşü ile

gerçekleştiği ve ünitenin içerisinde KDM panellerinin dikey olarak yerleştirildiği FDM-hava ısı değiştiricisini incelemişlerdir (Dolado, Mazo, Lazaro, Marin & Zalba, 2012). FDM olarak parafin bazlı (RT27) organik malzeme kullanmışlardır. İncelenen ısı depolama ünitesinin hem ampirik hem de sayısal modelleri geliştirilmiştir (Dolado, Lazaro, Marin & Zalba, 2011b). FDM katmanının sayısal modeli, bir boyutlu kapalı formülasyon olarak sonlu farklar yönteminin kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile hava akış hızı, yüzey pürüzlülüğü ve kapsülleme malzemesinin ısıl iletkenliğinin yanı sıra, FDM'nin termofiziksel özelliklerinin etkisi de sayısal olarak incelenmiştir. Giriş havası sıcaklığına bağlı olarak, giriş havası ve FDM'nin ortalama faz değişimi arasındaki 8°C sıcaklık farkı için FDM'nin tam katılaşmasının 3 saatten daha az bir sürede gerçekleştiği görülmüştür. Sonuçlar, FDM özelliklerinde hiçbir bozulma gözlenmeden ünitenin sürekli termal döngüsünün tekrarlayan bir işlem olduğunu da göstermiştir.

Darzi vd. (2013), gece havalandırma sistemlerinde kullanılan FDM ile doldurulmuş plaka tipi depolama sisteminin optimum tasarımı için sayısal bir çalışma yapmışlardır. FDM olarak Rubitherm firmasına ait, erime sıcaklık aralığı 22-24°C ve erime ısısı 150 kj/kg olan inorganik tuz (SP22A17) kullanmışlardır. Levha kalınlığı, giriş havası sıcaklığı ve debi gibi parametrelerin erime, soğutma gücü, çıkış sıcaklığı ve ısı değiştiricinin ısıl performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, debinin artırılarak soğutma gücünün artırabileceğini ve plaka kalınlıklarının sistemin ısıl performansında önemli bir rol oynadığını, FDM'nin erime süreci süresi ile doğrusal bir ilişkinin olduğunu da göstermiştir. Ayrıca Stefan sayısının arttırılmasının soğutma gücünün ve çıkış havası sıcaklığının artmasına neden olduğunu göstermiş ve daha düşük kütle akış oranına ve daha düşük Stefan sayısına sahip ısı değiştiricisinin daha iyi performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Yanbing, Yi & Yinping (2003), deneysel olarak FDM paketli yatak depolama sistemi (NVP) ile gece havalandırmasını incelemiş ve NVP sisteminin termal davranışını analiz etmek için matematiksel model üretmişlerdir. Tavana asılan FDM olarak 850 kg/m^3 yoğunluğuna, 0,2 W/mK ısıl iletkenliğine sahip, faz değişim sıcaklık aralığı 22-26 °C olan ve gizli ısısı yaklaşık 190 kJ/kg olan bir tür yağ asidi kullanılmıştır. Sonuçlar NVP sisteminin bu sistemde kullanılan gizli ısı depolama sistemi nedeniyle iç ortamın termal konfor seviyesini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiş olup, enerji verimli

binalar alanında büyük bir potansiyele sahip olduğunu da belirtmiştir. Bu teknik ile FDM'den odaya 300 W soğuk tahliye edildiğinden dolayı gündüz binaların konfor seviyesini artırmıştır.

Waqas ve Kumar (2011b), bina havalandırmasının ısıl performansını belirlemek için kuru ve sıcak iklimlerde FDM depolama ünitesi üzerinde, galvanizli çelikten yapılmış düz plakalı bir ısı değiştiricisi için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Seçilen FDM'nin erime sıcaklık aralığı 28-29°C'dir ve uyarlanabilir konfor kriterlerine göre kuru ve sıcak iklimlerin sıcaklık aralığına düşmektedir. FDM ünitesi gece serinliğini depolamış ve gündüz sıcak ortam havasını soğutmak için kullanmıştır. Hava akış hızının ve giriş havası sıcaklığının, şarj işlemi sırasında FDM'de soğuk birikimine ve boşaltma işlemi sırasında FDM'den soğuk ekstraksiyona etkisi analiz edilmiştir. FDM'nin yüklenmesi için kullanılan hava sıcaklıkları 20°C, 22 °C ve 24°C iken, boşaltma işlemi sırasında, 36°C, 38°C ve 40°C'dedir. FDM'nin yüklenmesi için ise hava akış hızları 4 ve 5 m^3/h'dir. Deneysel gözlemler, FDM'nin katılaşmasının, hava debisine kıyasla, şarj hava sıcaklığına daha duyarlı olduğunu ve kısa yaz gecelerinde şarj işlemi sırasında FDM'de maksimum soğuk birikimi için faydalı olduğunu göstermiştir. Şarj havası sıcaklığı 22 °C'den 20°C'ye düşürüldüğünde, FDM'yi tamamen katılaştırmak için %33 daha az zamana ihtiyaç olduğunu, şarj sıcaklığı 22°C'den 24°C'ye yükseltildiğinde, katılaşma işlemini tamamlamak için FDM tarafından %52 daha fazla zamana ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Hava akış hızının 4 m^3/h'den 5 m^3/h'e değiştirilmesi, katılaşma süresini, %16'ya kadar düşürmüştür. Yüksek günlük sıcaklıkta, şarj sırasındaki daha düşük giriş havası sıcaklığının daha iyi sistem performansına yol açtığını göstermiştir.

Mosaffa vd. (2013), birden fazla FDM kullanan bir termal enerji depolama ünitesi kullanarak, bir serbest soğutma sisteminin performans geliştirmesini sayısal olarak incelemişlerdir. Termal enerji depolama ünitesi, FDM levhaları ile ayrılmış bir dizi dikdörtgen kanaldan oluşmuştur. Efektif ısı kapasitesi yöntemi kullanılarak FDM'nin erimesi ve katılaşması incelenmiştir. FDM slab uzunluğu, kalınlığı ve akışkan geçiş aralığı gibi tasarım parametrelerinin depolama performansı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, konfor koşullarını garanti edebilen bir sistemin 7 optimum COP değerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu ise 3,2 mm'lik optimum hava kanalı kalınlığına, 1,3 m uzunluğa ve 10 mm FDM levha kalınlığınsa sahip RT25'li bir $CaCl_2.6H_2O$ kombinasyonu ile başarılmıştır.

Arkar ve Medved (2007), düşük enerjili bir binanın serbest soğutma potansiyelini belirlemek için, 50 mm çapında plastik bir küre içerisine yerleştirilmiş FDM (RT20) ile kapsüllenmiş silindirik termal enerji depolama ünitesini, bir binanın mekanik havalandırma sistemine entegre ederek nümerik olarak incelemişlerdir. Depolama ünitesinin etkin performansı için, FDM'nin erime sıcaklığı çalışma sıcaklığının ±2°C aralığında tutulmuştur. FDM depolamasının performansını değerlendirmek için, soğutma derecesi saatleri bir gösterge olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma ile kg FDM başına 1,0-0,7 m^3/h hava debisine sahip, m^2 alan başına yaklaşık 6,4 kg FDM'nin maksimum soğutma derecesi saatlerini sağlamak için en uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Sayısal simülasyonlar, serbest soğutmanın mekanik havalandırma sisteminin boyutunu azaltmaya yardımcı olduğunu ve daha iyi termal konfor koşulları sağladığını göstermiştir. Ayrıca FDM'nin erime noktasının da depolama ünitesinin tasarımında önemli rol oynadığı ve erime noktasının, şarj işlemi sırasında maksimum katılaşmayı sağlayacak şekilde seçileceğinin sonuçlarını da göstermektedir (Arkar, Vidrih & Medved, 2007).

Turnpenny, Etheridge ve Reay (2000), hava ile FDM arasında bir ısı borusu ile ısı transferinin teorik bir modelini tasarlamış ve test etmişlerdir. Serbest soğutma çalışmalarında ısı borularının silindirik geometrisini havadan FDM'ye olan ısı transferi ile bir boyutlu matematiksel model olarak incelemişler ve ısı transfer hızı ile erime zamanlarının ölçümleri değerlendirilmişlerdir. FDM içine gömülü ısı borularını içeren bir gizli ısı depolama ünitesi geliştirmiş ve binaların düşük enerjili soğutmasında test etmişlerdir. Bu sistem gece boyunca soğukluğu muhafaza etmiş ve gündüz serbest bırakmıştır. Termal enerji depolaması için kullanılan FDM, erime noktası 21°C olan tuz hidrattır ($Na_2SO_4.10H_2O$). Ölçümler, FDM'yi pratik zaman ölçeklerinde (7-10 sa) eritmek ve dondurmak için hava ile FDM arasında büyük bir sıcaklık farkının (15°C veya daha fazla) gerekli olduğunu göstermiştir. Daha makul sıcaklık farklarında ve akış hızlarında (örneğin 5°C, 0,18 m^3s^{-1}), ısı transferinin 40 W'ın altına düştüğü ve erime süresinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir (19 saatlik bir erime süresi). Ayrıca kanatlı bir ısı borusu tasarlandığında, ısı transfer hızının iyileştirilebilir ve faz değişim süresinin kısalabilir olduğu vurgulanmaktadır.

Vakilaltojjar ve Saman (2001), farklı erime sıcaklık ve ısılarına sahip kalsiyum klorür hekzahidrat ($CaCl_2.6H_2O$) ve potasyum florür tetrahidrat ($KF.4H_2O$) kullanarak termal enerji depolama sisteminin nümerik analizini incelemişlerdir. Faz değiştiren

malzemeler, farklı kalınlıklardaki ince düz levhalara yerleştirilerek aralarından hava geçirilmiştir. Yarı-analitik metot geliştirilerek sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamalar yapmışlardır. Farklı varsayımlara sahip üç modelden elde ettikleri verilere göre, FDM levha kalınlığı ve hava geçiş aralığı gibi parametrelerin depolama performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sayısal çalışma sonuçları girişteki hava hızı profilinin ısı transfer özelliklerini ve çıkış havası sıcaklığını önemli derecede etkilemediğini göstermiştir. Ayrıca daha küçük hava boşlukları ve daha ince FDM levhaları kullanarak daha iyi performans elde edilebileceğini belirtmişlerdir; ancak bunun FDM levhalarının sayısını ve depolama sisteminin toplam hacmini artıracağından, depolama sistemi boyunca daha yüksek basınç düşüşüne neden olacağını vurgulamışlardır.

Butala ve Stritih (2009), serbest soğutmaya dayalı olarak önerilen bir FDM soğuk depolama sistemi içindeki ısı transferini incelemek için deneysel olarak çalışma yapmışlardır. Erime sıcaklık aralığı 20-22°C olan yaklaşık 3,6 kg ticari olarak temin edilen RT20 parafini, bina tavanına basit entegraston sağlayacak şekilde yapılandırılmış, dıştan yalıtılmış bir metal kanal içine yerleştirilmiştir. Metal kanalın her iki yanında, soğuk depolamanın ısı transfer kapasitesini artıracak iki alüminyum kanatçık kullanılmıştır. Seçilen FDM üzerinde gece boyunca giriş hava sıcaklığı ve hızı değiştirilerek ayrıntılı inceleme yapmışlardır. 1,5 ve 2,4 m/s hava hızları ve 26, 36 ve 40 °C soğuk depo birimine giren hava sıcaklığı için, gece boyunca depolanan soğuk enerji 6 saatlik bir süre içinde 340 ile 940 kJ arasında değişmekteydi. Hava sıcaklıkları ve zamanın bir fonksiyonu olarak ısı akısı sayısal bir model kullanılarak çeşitli hava hızları ve giriş sıcaklıkları için hesaplanmıştır. Deneysel ölçümler ve modelleme sonuçları iyi bir uyum göstermiş olup iç hava sıcaklığı 27°C'den 24°C'ye 2,5 saatten fazla süreyle 7,8 l/s akış hızında düşürülmüştür. Ayrıca seçilen parametrelere göre %14-87 arasında enerji tasarrufu öngörülmüştür.

Rouault, Bruneau, Sebastian ve Lopez (2013), sundukları sayısal model ile bir dizi dikdörtgen borudan oluşan enerji depolama sisteminin termal davranışını incelemişlerdir. İncelenen termal enerji depolama ünitesi ticari parafin olan RT28HC ile doldurulmuş ve 42 paralel yatay alüminyum tüpten (30x40x3440 mm) oluşmuştur. Üst üste sıralanmış 6 katmandan oluşan boru demeti FDM ile ısı alışverişi yapan boruların eksenine paralel hava akışları olan ahşap bir kutuya monte edilmiştir. Sayısal modelde, dikdörtgen boruların şekillerinin ve düzenlemelerinin ısı değiştiricisinin verimliliği üzerindeki

etkisini dikkate alınmıştır. Hava akışı enerji depolama ünitesine sabit bir giriş sıcaklığı ve akış hızında beslenmiş olup ve havanın fiziksel özelliklerinin termal enerji depolama ünitesi boyunca sabit olduğu ve hava akışının eşit olarak yayıldığı varsayılmıştır. Çalışma sonucunda dikey kesitli tüplerin yatay olanlara göre biraz daha iyi performans gösterdiğini ve ayrıca sistemin soğutma gücünü artırmak için hava ve tüpler arasındaki ısı alışverişini geliştirme ihtiyacının gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Lopez, Kuznika, Baillis ve Virgone (2013), serbest soğutma uygulamaları için bir FDM-hava ısı değiştiricisinin modellenmesini ve deneysel çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Levhalar arasında hava boşlukları olan paralel yatay FDM levhalarından oluşan ısı değiştiricisini ele alarak, hem FDM levhasında iletim hem de levha ile hava akışı arasındaki ısı transferi dikkate alınarak iki boyutlu sayısal bir model geliştirmişlerdir. Simülasyon modeli MATLAB'de kontol hacmi yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu model deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Modelin, bina uygulamalarında hem ısıtma hem de soğutma için kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Iten ve Liu (2015), yaptıkları deneysel çalışmada, bir havalandırma sistemine dahil edilen termal enerji depolama ünitesinin farklı çalışma koşulları altında termal performansını analiz etmişlerdir. Hava giriş sıcaklığı ve hızının hava çıkış sıcaklığı ve ısı transfer hızı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Depolama ünitesi olarak RT25 ile doldurulmuş ve yalıtılmış bir ahşap kanalın içinde tutulan üç adet dikdörtgen metalik modül bulunmaktadır. Klima kontrolü olarak soğutma/ısıtma ünitesi kullanılmıştır. Faz değişimi için giriş havası sıcaklık ve hızının etkileri incelenmiş olup özellikle giriş havası hızının faz değişiminde önemli bir parametre olduğu vurgulanmıştır. Giriş havası hızının artırılmasının katılaşma süresi ve erime süresini doğrudan azalttığı sonucunu bulmuşlardır. Giriş havası sıcaklığının, erime ve katılaşma süresinin yanı sıra ısı transfer hızına pek etki etmediği sonucuna da varmışlardır. Kısacası hava giriş sıcaklık ve hızının hem erime hem de katılaşma süreçlerinde etkili olduğu ve bu parametrelerin optimizasyon çalışmalarında dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Belirli bir yerin havası, iklimsel mevsime bağlı olarak yıl boyunca değişmeye devam eder. Bu nedenle, belirli bir veya dar faz geçiş sıcaklığına sahip olan FDM ile serbest bir soğutma sistemi, şarj döngüsü sırasında yeterli enerjiyi saklama yeteneğine sahip olmayabilir. Bunu çözmek için, yerel termal konfor koşullarını sağlayan farklı FDS

aralıklarına sahip birden fazla FDM kabul edilebilir. Çoklu FDM kullanımı, serbest soğutma potansiyelinin bant genişliğini arttırdığı için bir ısı transferi geliştirme tekniğidir (Dardir vd., 2019).

Peiro, Gasia, Miro ve Cabeza (2015), çoklu FDM üzerinde pilot ölçekli deneysel bir çalışma yapmışlardır. Pilot tesiste, termal enerji depolama sistemlerinde tek FDM konfigürasyonu yerine çoklu FDM konfigürasyonunun kullanılmasının avantajlarını deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Deneylerde FDM olan hidrokinon ($C_6H_6O_2$) ve d-manitolun ($C_6H_{14}O_6$) kullanılmıştır. Daha yüksek faz değişim sıcaklık aralığında bulunan FDM soğutma boşaltma işlemi sırasında giriş bölümünde, düşük faz değişim sıcaklık aralığına sahip FDM çıkış bölümüne yerleştirilmiştir. Sonuçlar, çoklu FDM konfigürasyonunun, tek FDM konfigürasyonuyla karşılaştırıldığında %19,36'lık bir etkenliğin arttırılmasının yanı sıra, giriş ve çıkış arasındaki ısı transfer akışkanı sıcaklık farkında daha yüksek bir homojenlik sağladığını göstermiştir.

Chiu ve Martin (2013), üç ve tek aşamalı gizli ısı soğuk termal enerji depolama sisteminin performansını nümerik olarak analiz etmişlerdir. Üç aşamalı çoklu FDM depolama biriminin, tekli FDM biriminden %10-40 daha yüksek performans sergilediğini belirtmişlerdir.

Liu, Iten ve Shukla (2017), binaların serbest soğutulması ve havalandırılması için hava-çoklu FDM ünitesinin potansiyelini nümerik olarak araştırmışlardır. Geometrik boyutlar ve farklı erime sıcaklıklarına sahip malzemeler kullanarak (RT25, RT20 ve RT18) optimum bir seçim sunmuşlardır.

Fang ve Chen (2007), farklı çoklu faz değiştiren malzemelerin gizli termal enerji depolama sistemi üzerindeki performansını incelemek için nümerik bir simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Nümerik sonuçlar, termal enerji depolama biriminde maksimum termal enerjinin yükleme oranını elde etmek için birden fazla FDM arasında optimum bir oranın olduğunu göstermiştir. Çoklu faz değiştiren malzemeler arasındaki erime sıcaklığı farkının, depolama ünitesinin performansında önemli bir rol oynadığını da belirtmişlerdir. Bu ünitenin performansını iyileştirmek için, birden fazla FDM'nin uygun olarak seçilmesinin de önemini vurgulamışlardır.

2.7. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, bir hava kanalının içerisinde herhangi bir ısı kaynağı kullanmadan, başlangıçta ortam sıcaklığını kullanarak, içerisinde FDM bulunan levhalar üzerinden havanın akması durumunda, ünitenin termal performansını analiz etmektir. Analizlerde, seri dizilimli levhalar arasındaki mesafenin, iki farklı FDM türü üzerine performansları incelenmiştir. Tekli ve çoklu FDM kombinasyonlarından oluşan çalışmada, FDM'nin faz değişim süreci, paket programı kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada hava giriş sıcaklık ve hızının, FDM başlangıç sıcaklığının, Stefan sayısının ve seri dizilimli levhalar arasındaki mesafenin; sistemin çıkış sıcaklığı, soğutma gücü, etkenliği ile FDM'nin absorbe ettiği ısı miktarı üzerine etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 3

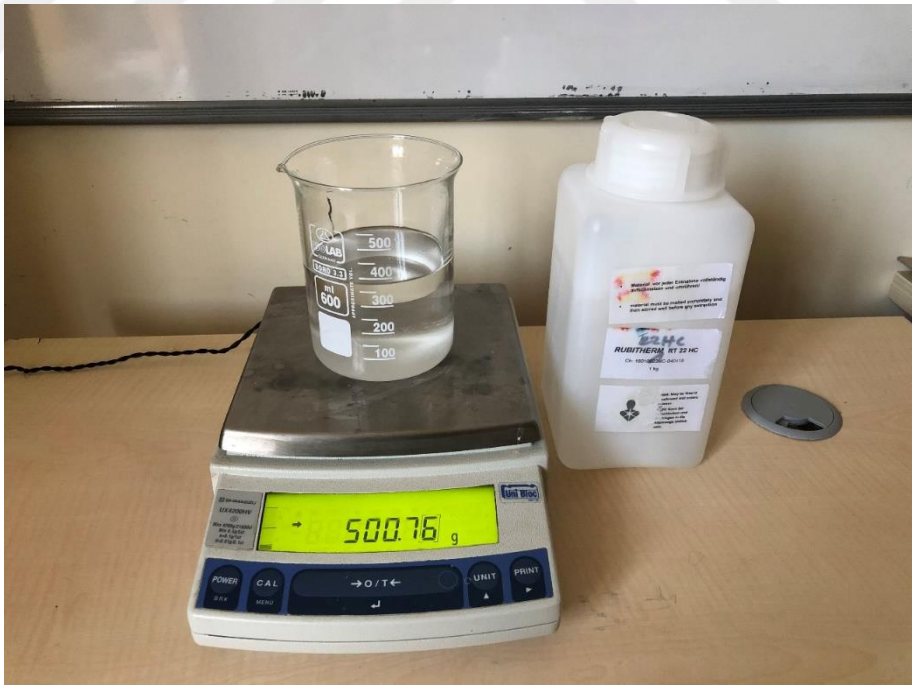
MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Yapılan çalışmada, termal enerji depolaması için faz değiştiren malzeme olarak Rubitherm firmasından temin edilen ve ticari parafinler olan RT22HC ve RT25HC'nin makrokapsülleri hazırlanmıştır. Bu kapsüller, FDM'nin sıvı ve katı fazını tutarak çevre ile temas yoluyla bileşiminin değişmesini önlemenin yanı sıra çevre ile malzeme uyumluluğunu iyileştirir. Ayrıca ısı transferini artırmak için kullanılan bir araçtır ve FDM'nin ısı transfer akışkanı olan hava ile karışmasını önler. Isı transferi için gerekli yüzey alanını sağlayıp, doğrudan ısı eşanjörü olarak kullanılabilirler. Makrokapsüllenmiş FDM'de sızıntı probleminden kaçınılabilir. RT22HC ve RT25HC saf bir faz değiştiren malzemedir. Bu ısı depolama malzemeleri, neredeyse sabit sıcaklıkta büyük miktarlarda termal enerjiyi depolamak ve serbest bırakmak için katı ve sıvı arasındaki (erime ve donma) faz değişim işlemlerini kullanır. Faz değişim döngüleri boyunca istikrarlı performansa sahip uzun ömürlü malzemelerdir. Aşırı soğuma etkileri yoktur ve kimyasal olarak etkisizdir. Kullanılan parafinlerin özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Isı depolama kapasitesi duyulur ve gizli ısı toplamı şeklinde RT22HC için 14-29°C aralığında, RT25HC için ise 16-31°C aralığında verilmiştir. Şekil 3.1'de ise deneyde kullanılan parafin görülmektedir.

Çizelge 3.1. RT22HC ve RT25HC'nin özellikleri.

Özellikler	RT22HC	RT25HC
Erime bölgesi, °C	20-23	22-26
Donma bölgesi, °C	23-20	26-22
Isı depolama kapasitesi, kj/kg	190 (14-29°C)	230 (16-31°C)
Özgül ısı kapasitesi (k/s), kj/kgK	2	2
Katı fazdaki yoğunluk (20°C), kg/m^3	760	880
Sıvı fazdaki yoğunluk (50°C), kg/m^3	700	770
Isıl iletkenlik (k/s), W/mK	0,2	0,2
Hacim genleşmesi, %	12,5	12,5
Alevlenme noktası, °C	>150	150
Maksimum çalışma sıcaklığı, °C	50	65



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan parafin.

Kapsül olarak, aynı firmadan temin edilen dikdörtgen ve alüminyumdan üretilmiş kompakt depolama modülü (levhalar) kullanılmıştır. Bu levhaların boyutları 450x300

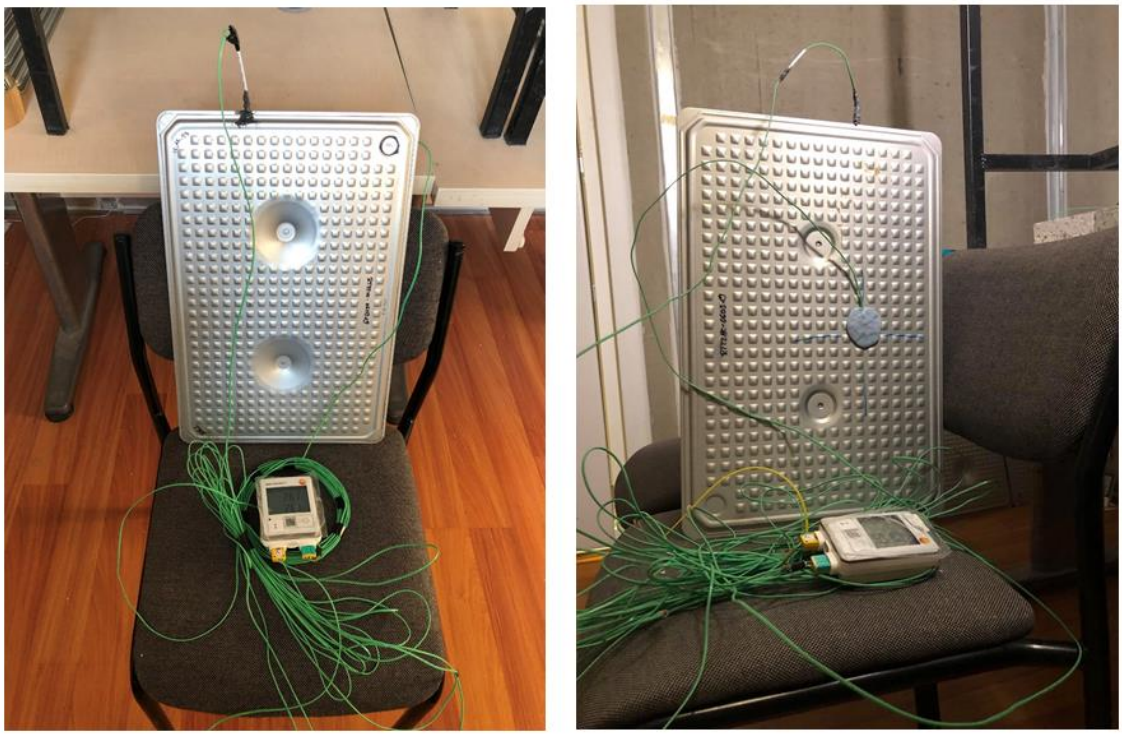
mm, et kalınlığı 14,65 mm ve ağırlığı 0,35 kg'dır. Bu levhaların içerisi sıvı fazda ve 1 kg olacak şekilde RT22HC ve RT25HC ile doldurularak sızdırmazlığı sağlanmıştır. Levhalar faz değişikliği meydana geldikçe depolama malzemesi olan parafinlerin hacmindeki değişiklikleri kontrol etmektedir. Şekil 3.2'de faz değiştiren malzemelerin içinde bulunduğu kompakt depolama modülü görülmektedir.



Şekil 3.2. Kompakt depolama modülü.

Deneylerde sıcaklık ölçümleri için veri kayıt cihazları (data loggerlar) ve bunlara bağlı sıcaklık sensörleri (termokupllar); hava akışını sağlayan fanlar; havanın hızını/debisini ve sıcaklığını ölçen anemometreler ve bu hızı/debiyi kontrol etmek için fan kontrol ünitesi kullanılmıştır.

Testo firmasından temin edilen Saveris-2 T3 kablosuz veri kayıt cihazı ile harici bağlanabilir termokupl problar sayesinde, sıcaklık değerleri ölçülerek çevrim içi veri depolamaya (Testo Bulut) gönderilmektedir. Bu cihazın verilerine anlık olarak internet ortamından erişilebilmektedir. Cihazın doğruluğu ±(0,5+%0,5 ölç.değ)°C'dir. Termokupllar K tipidir ve 250°C'ye kadar ısı geçirmez olan politetrafloroetilen (teflon) ile kaplıdır. Termokuplların doğrulukları ±0,1°C'dir. Kullanılan termokupllar, hem levha içindeki faz değiştiren malzemelerin hem de levha yüzeyinin sıcaklığını aynı anda ölçmektedir. Şekil 3.3'te termokuplların levha ile bağlantısı görülmektedir.



Şekil 3.3. Sıcaklık sensörlerinin levhaya bağlanmış hali.

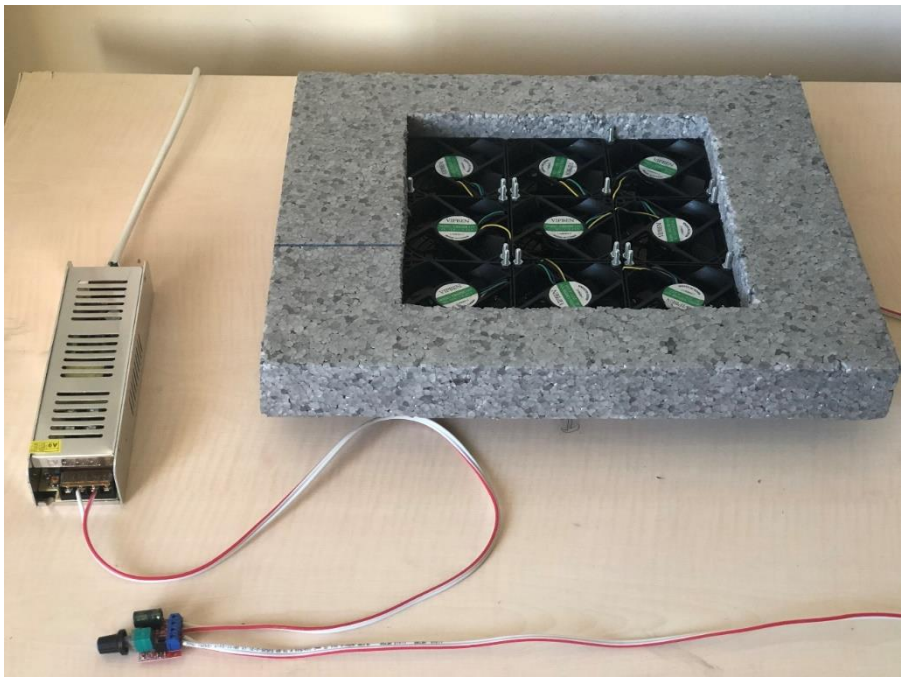
Bir diğer kablosuz veri kayıt cihazı yine Testo firmasından temin edilen 160TH modelidir. Sıcaklık ve nem sensörü ile kablosuz veri kayıt cihazı olup, aldığı verileri çevrim içi veri depolama sistemine göndermektedir ve anlık olarak internet ortamından bu verilere erişilebilmektedir. Bu cihaz ile kanal giriş sıcaklığı ölçülmektedir. Sıcaklık ölçümünü -10 ile 50°C aralığında yapmaktadır. Cihazın doğruluğu ±0,5°C'dir.

Testo firmasından temin edilen bir diğer cihaz olan 405i modelindeki anemometre, akıllı telefon ile yönetilebilen termal anemometredir. 400 mm'ye uzatılabilir teleskobik tüp sayesinde, levhalar arasındaki debi/hız ve kanal çıkışındaki sıcaklıklar ölçülmektedir. Sıcaklık ölçüm aralığı -20 ile 60°C olup, hız ölçüm aralığı ise 0 ile 30 m/s aralığındadır. Cihazın doğruluğu ±0,5°C ve 0-2 m/s hız aralığında ±(0,01 m/s+%5 ölç.değ.) şeklindedir. Şekil 3.4'te ölçüm cihazlarına ait resim görülmektedir.



Şekil 3.4. Ölçüm cihazları.

Son olarak, hava akışını sağlamak için kanal giriş kesitine uygun şekilde oluşturulan 80x80x25 mm ebatlarında, 0,25A / 3W gücünde 9 adet kasa fanına; hava akış hızını/debisini kontrol etmek için kullanılan 5A / 90W gücünde fan kontrol ünitesine ve 10A / 120W gücünde trafoya ait resim de Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Fan kontrol ünitesi.

Deneysel verilerin hata oranını tespit etmek için belirsizlik analizi, sıcaklık, hız ve kütle için ölçüm hatalarına göre belirlenmiştir ve (3.1) numaralı formül ile hesaplanmıştır (Zhou & Zhao, 2011):

$$U = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta T_{DL}}{T_{DL}}\right)^2_{FDM} + \left(\frac{\Delta T_{TK}}{T_{TK}}\right)^2_{FDM} + \left(\frac{\Delta T_{DL}}{T_{DL}}\right)^2_{hava} + \left(\frac{\Delta T_{An}}{T_{An}}\right)^2_{hava} + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2_{FDM}} \times 100\% \quad (3.1)$$

FDM sıcaklığının ölçüldüğü data loggerın, $\Delta T_{DL,FDM}$; termokupların, ΔT_{TK}; hava sıcaklığının ölçüldüğü data loggerın, $\Delta T_{DL,hava}$; hava sıcaklığının ölçüldüğü anemometrenin, ΔT_{an}; hava hızının, ΔV; kütlenin, Δm'nin hataları sırasıyla ±(0,5+%0,5 ölç.değ)°C (%3,2); ±0,1°C (%0,5); ±0,5°C (%1,6); ±0,5°C (%2); ±(0,01 m/s+%5 ölç.değ.)m/s (%5,6); ±20 g (%2)'dir. Sistemin genel belirsizliği, %6,6 olarak bulunmuştur.

3.2. Deney Düzeneği

Deney düzeneği fakültemizdeki bir sınıfta oluşturulmuştur. Sınıf içerisine yüksekliği 2,5 m ve boyutları 2,5x3,2 m olan; iç kısmı 84 mm epsden, dış kısımları 8 mm betopandan oluşan yalıtım malzemelerinden test odası yapılmıştır.

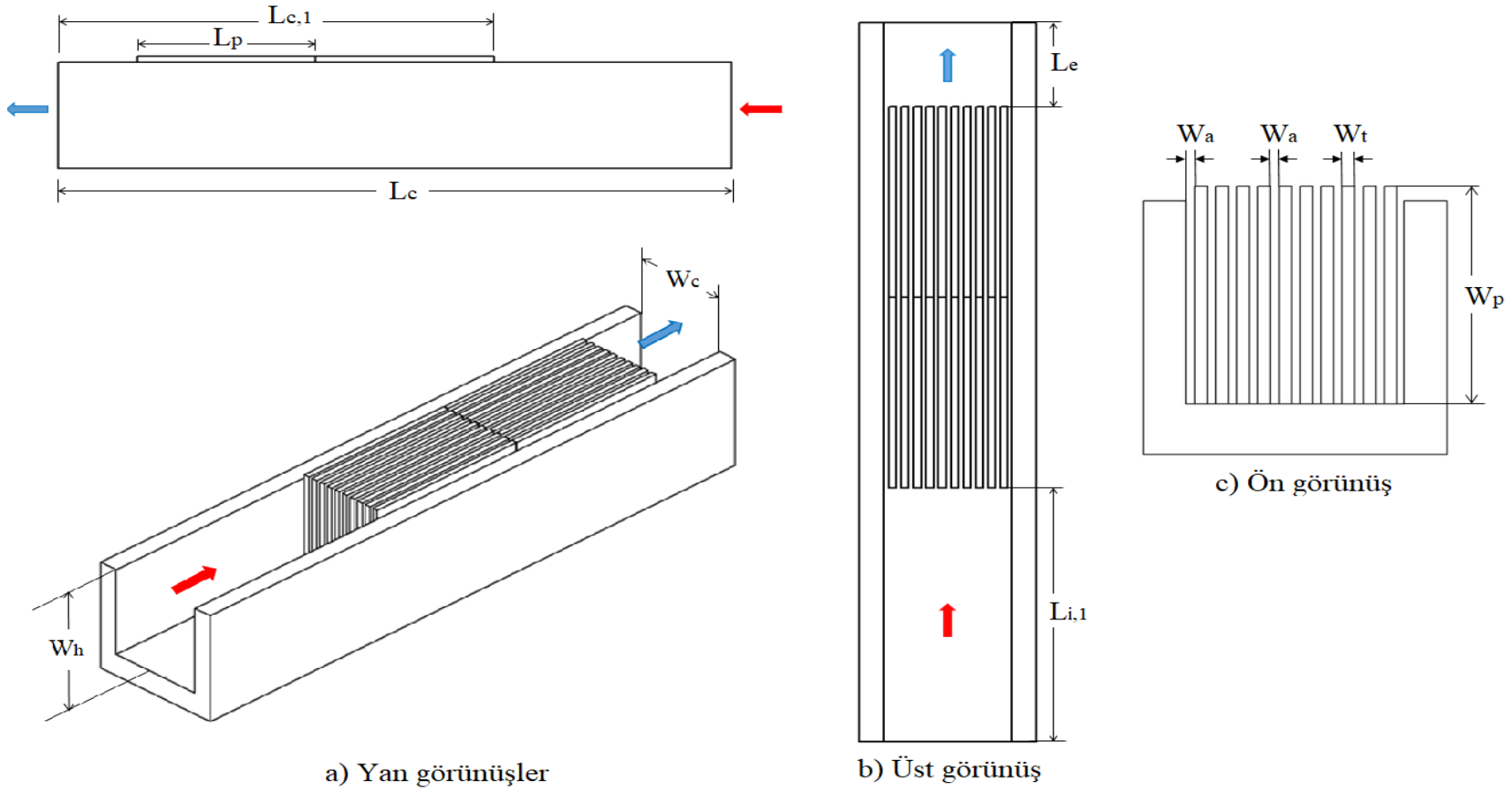
İçerisinde parafin bulunan levhalar, suntadan imal edilen ve FHID sistemini dengede tutan hava kanalına yerleştirilmiştir. Çevre ile ısı değişimini azaltmak için bu kanalın dış kısmı 5 cm kalınlığında köpük ile yalıtılmıştır. Şekil 3.6'da hava-FDM ünitesi görülmektedir.

Sistemin genel performansını değerlendirmek için, FHID ünitesinin giriş ve çıkışında sıcaklık ve hız değerlerini ölçmek için data loggerlar ve anemometreler; levha içindeki parafinin sıcaklığını ve levhanın yüzey sıcaklığını ölçmek için de termokupllar kullanılmıştır.

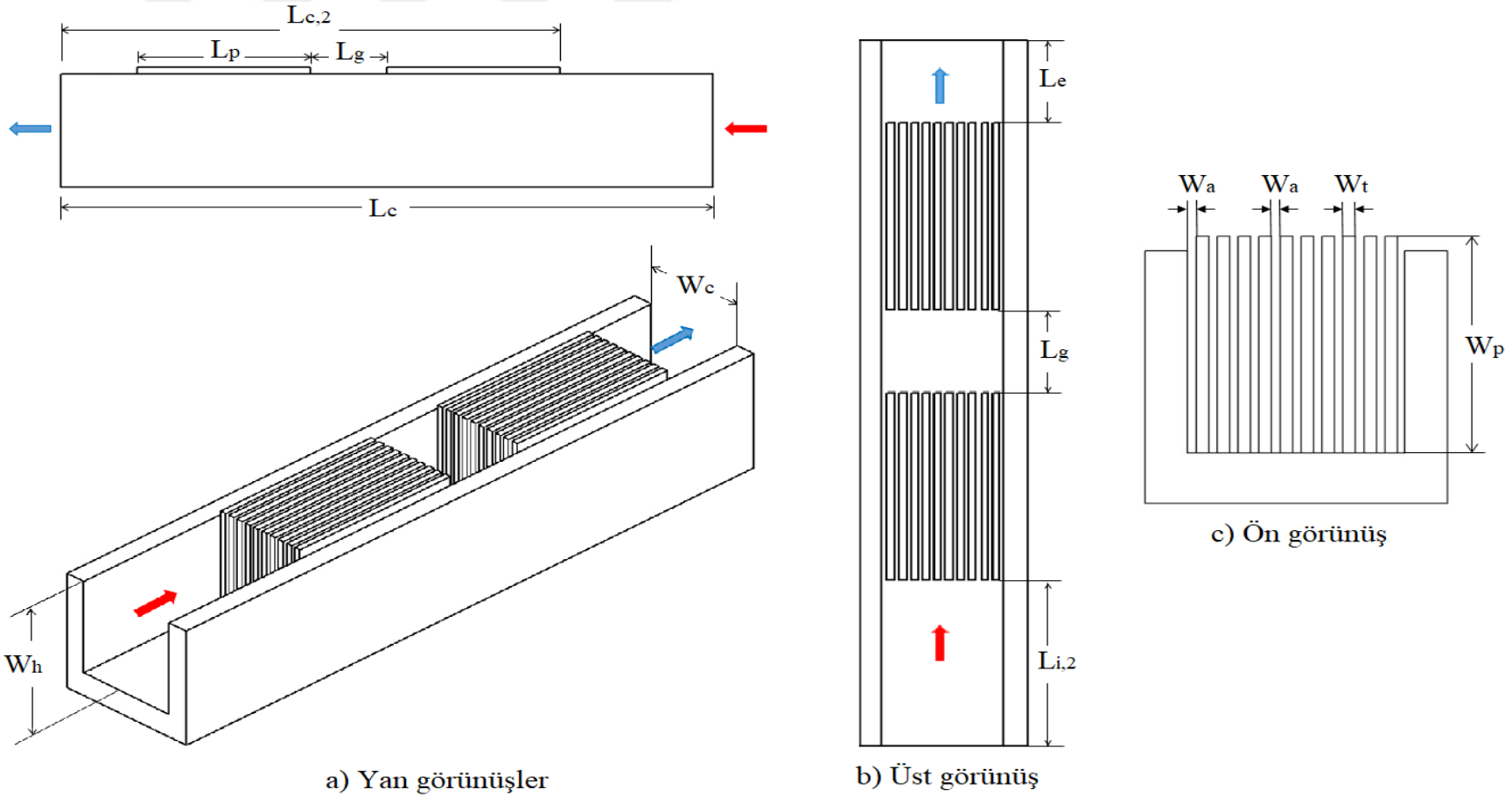


Şekil 3.6. Hava-FDM ünitesi.

Çalışmalarda, alüminyum levhalar içerisine 1'er kg faz değiştiren malzeme konulmuştur. Soğuk havanın parafini kristalleştirmesinden ve dolayısıyla soğuk birikimine neden olmasından sonra, suntadan imal edilmiş ve dışı yalıtılmış kanal içerisine, aralarında 1 cm boşluk olacak şekilde 20 adet levha dikey olarak yerleştirilmiştir. Levhaların 10 tanesi kanal çıkış kısmına 20 cm mesafede yerleştirilmiştir. Diğer 10 tanesi ise bu levhalara bitişik olarak ve 20 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Kanal içerisinde sadece RT22HC'nin, sadece RT25HC'nin ve her iki malzemenin farklı konumlandırılması üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Deney düzeneğine ait görünüşler Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de, hava kanalının ve levhanın ölçüleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Levhalar arasındaki mesafenin L_g=0 m olması durumunda kanal içerisindeki görünüm.



Şekil 3.8. Levhalar arasındaki mesafenin L_g=0,2 m olması durumunda kanal içerisindeki görünüm.

Çizelge 3.2. Hava kanalının ve levhanın ölçüleri [m].

L_c	$L_{c,1}$	$L_{c,2}$	L_e	L_g	$L_{i,1}$	$L_{i,2}$	L_p	W_a	W_c	W_h	W_p	W_t
1,7	1,1	1,3	0,2	0/0,2	0,6	0,4	0,45	0,01	0,2565	0,28	0,3	0,01465

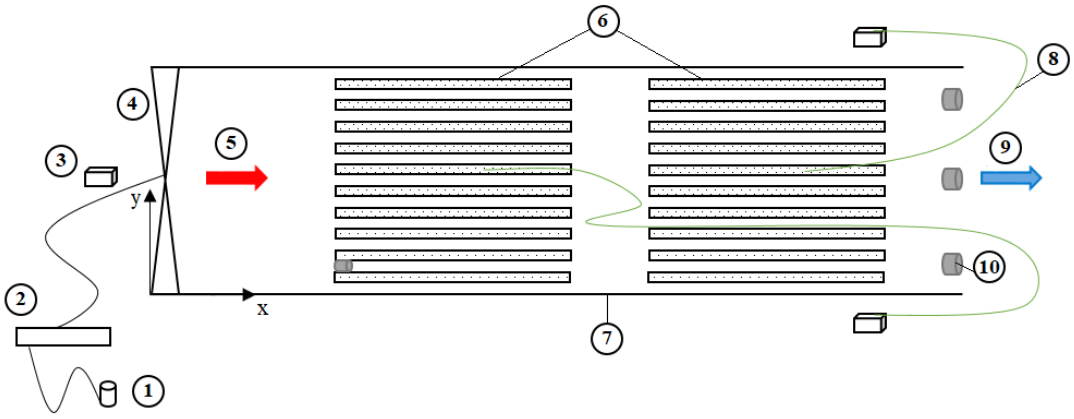
Faz değiştiren malzemelerin başlangıç sıcaklıkları RT22HC'nin bulunduğu sistemde 14 ve 16°C, RT25HC'nin bulunduğu sistemde 16 ve 18°C ve her iki malzemenin bulunduğu sistemde 16°C alınmıştır.

Erime sürecinde, FDM'yi eritmek için FDM erime sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta ve sabit akış hızlarında sıcak hava, FHID ünitesinde levhaların arasından geçmektedir. Bu süreç, havanın ortalama 25°C çıkış sıcaklığına erişmesine kadar devam etmektedir. Şekil 3.9'da deney düzeneğinin şematik resmi ve bu resimde kanal çıkış kısmına yerleştirilen anemometrelerin konumu gösterilmiştir. Bu anemometreler ortalama kanal çıkış sıcaklığını belirlemek için kullanılmıştır.

Deney düzeneğinin bulunduğu odanın sıcaklıkları $T_0 = 29°C$ ve $T_0 = 31°C$ olarak ölçülmüştür. Başlangıçta kanal giriş ve çıkış sıcaklık farkı çok küçük olduğu için ($\Delta T \approx 0{,}1\text{-}0{,}3°C$), bu sıcaklıklar eşit kabul edilmiştir. Kanal giriş sıcaklığı ile FDM başlangıç sıcaklığı arasındaki büyük ΔT'den dolayı, havanın sıcaklığı kısa süre içerisinde düşmektedir. Giriş sıcaklığı kısa bir süre sonra kararlı hale geldiği için, ilerleyen sürelerde bu sıcaklıkta daha fazla düşüş gözlemlenmemiştir. Bu nedenle nümerik çalışmalarda, kanal giriş sıcaklığının ortalama değeri olan $T_g = T_{ort} = 27°C$ ve $T_g = T_{ort} = 29°C$ alınmıştır.

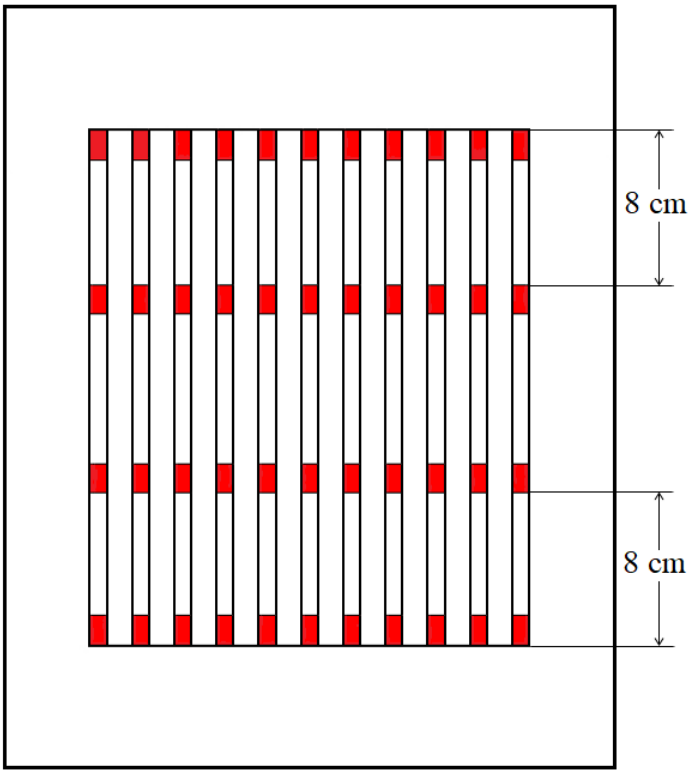
Nümerik çalışma, Comsol sonlu elemanlar modelleme programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplama alanı, iki boyutlu kabul altında analiz edilmiştir. Bu alan üç bölgeye ayrılmıştır: Giriş, hava-FDM ısı transfer ünitesi ve çıkış. Hız ölçümleri, giriş bölgesindeki hız değerlerinin belirlenmesindeki zorluklarından dolayı, levhalar arasından 44 yerden ölçüm alınarak, kesit boyunca bunların ortalaması olarak alınmıştır. Bu nedenle, analizlerde kontrol hacmi olarak FDM'den sonra çıkış bölgesi ve FDM'lerin bulunduğu ünite bölgesi alınmıştır. Şekil 3.10'da ölçülen hızların yerleri ve Şekil 3.11'de ünitenin kontrol hacmi sınırları gösterilmiştir. Deneylerde hava hızı ve bunlara karşılık

gelen Reynolds sayısı değerleri V_g=1,3 m/s (Re=1583) ve V_g=1,8 m/s (Re=2192) için deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.9. Deney düzeneği şematik gösterimi.

1) Fan hız kontrol düğmesi 2) Trafo 3) Data logger 4) Fan 5) Depolama ünitesi hava giriş bölgesi 6) Depolama malzemesi (FDM) 7) Hava kanalı 8) Termokupl 9) Depolama ünitesi hava çıkış bölgesi 10) Anemometre



Şekil 3.10. Levhalar arasında hız ölçüm yerleri (önden görünüş).



Şekil 3.11. Sayısal çözümlemede sistem kontrol hacmi sınırları.

3.3. Yönetici Denklemler ve Başlangıç-Sınır Koşulları

Nümerik analizler, hava akışının daimi olmayan, laminer, sıkıştırılabilir ve iki boyutlu akışı için yapılmıştır. Viskoz sıkıştırılabilir akış için hız ve sıcaklık dağılımı Navier-Stokes ve enerji denklemleri kullanılarak çözülür. Yönetici denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Çengel & Cimbala, 2008):

Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \tag{3.2}$$

Enerji Denklemi:

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y}\right] = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{3.3}$$

Momentum Denklemi:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] \tag{3.4}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right] \tag{3.5}$$

FDM Enerji Denklemi (Susantez, Kahveci & Akyol, 2018):

$$\rho_{FDM} c_{FDM} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{FDM}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + S_H \tag{3.6}$$

Kaynak terimi S_H aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$S_H = -\rho_{FDM} L_h \frac{\partial \beta}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.7}$$

Erime oranı β aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\beta = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ \frac{T-T_s}{T_l-T_s} & T_s < T < T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.8)$$

Başlangıç ve sınır şartları:

$$\vec{V}\big|_{t=0} = 0,\ 0 \leq x \leq L_{c,i}\ ,\ 0 \leq y \leq W_c\ ,\ (i=1,2) \quad (3.9)$$

$$T|_{t=0} = T_0,\ 0 \leq x \leq L_{c,i}\ ,\ 0 \leq y \leq W_c\ ,\ (i=1,2) \quad (3.10)$$

$$T_{RT22HC}|_{t=0} = 14°C, 16°C \quad (3.11)$$

$$T_{RT25HC}|_{t=0} = 16°C, 18°C \quad (3.12)$$

$$T|_{x=0} = T_g \quad (3.13)$$

$$P|_{x=L_c} = P_0 = 1\ \text{atm} \quad (3.14)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=L_c,i} = 0,\ (i=1,2) \quad (3.15)$$

$$-k\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_{y=0,W_c} = 0 \quad (3.16)$$

$$\vec{V}\big|_{yüzey} = 0 \quad (3.17)$$

$$u|_{x=0} = V_g = 1{,}3\ \text{m/s},\ 1{,}8\ \text{m/s} \quad (3.18)$$

FDM levhalarının deşarj işlemi (FDM'nin erimesi) sırasında hava, belirli bir soğutma yüküne ($\dot{Q}_c$) karşılık gelecek şekilde soğutulur. Bu işlem sırasında soğutma yükü, FHID ünitesinin giriş ve çıkışında hava sıcaklığı değerleri kullanılarak hesaplanır. FDM'nin erimesi sırasında, hava tarafından verilen ısı aşağıdaki şekilde ifade edilir (Chiu & Martin, 2013):

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_h c_{p,h}\left(T_g - T_ç(t)\right) = \rho_h V_h A c_{p,h}\left(T_g - T_ç(t)\right) \quad (3.19)$$

Faz değişim süreci boyunca etkenlik (Ɛ), işlem sırasındaki giriş ve çıkış sıcaklıkları ile tanımlanabilmektedir. Bu faktör, ısı değiştiricisinin maksimum soğutma potansiyeline ulaşma performansını gösterir. Denklemin paydası, havadan FDM'ye

aktarılabilen maksimum ısı miktarını gösterirken, pay kısmı ise havanın FDM'ye vermiş olduğu gerçek ısı miktarını gösterir (Darzi vd., 2013).

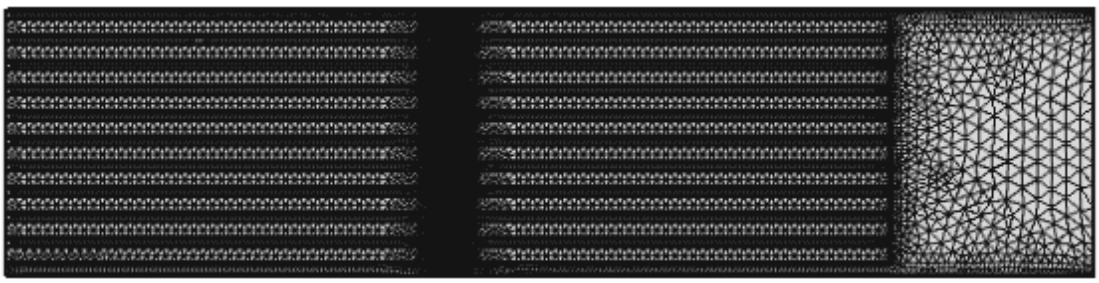
$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{hava}}{\dot{Q}_{maksimum}} = \frac{\dot{m}_h c_{p,h}\left(T_g - T_ç(t)\right)}{\dot{m}_h c_{p,h}\left(T_g - T_{b,FDM}\right)} = \frac{T_g - T_ç(t)}{T_g - T_{b,FDM}} \quad (3.20)$$

Isı ve kütle transferi problemlerinde kullanılan ve çok sayıda boyutsuz sayıdan biri olan ve faz değişim sürecinde duyulur ısının gizli ısıya oranı olarak tanımlanan Stefan Sayısı, erime ve donma sırasındaki analizlerde önemli rol oynamaktadır. Erimeye giren FDM'nin çalışma koşullarını tanımlar. Stefan sayısı aşağıda verilmiştir (Liu, Li & Zhang, 2014):

$$Ste = \frac{c_{p,k}\left(T_m - T_{b,FDM}\right) + c_{p,s}\left(T_{ort} - T_m\right)}{L_h} \quad (3.21)$$

3.4. Çözüm Bölgesinde Çalışılan Ağ Eleman Sayısı

Comsol modelleme programında, çözüm bölgesinde ağ eleman sayısından bağımsızlık çalışması, simülasyonlarda kullanılacak optimum eleman sayısını belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Hava-FDM ünite analizlerinin daha hızlı ve deneysel verilerle uyuşması için, ağ elemanlarının ünitedeki yoğunluğunun optimum düzeyde olması gerekmektedir. Çalışmada, sınırlarda quadrilateral elemanlar kullanılmış olup, geometri genel olarak üçgen elemanlarla meshlenmiştir. Çözüm yöntemi olarak Constant (Newton) ve çözücü olarak da Pardiso kullanılmıştır. Bağımsızlık çalışmasında, kanaldan çıkan havanın ortalama sıcaklığı baz alınmıştır ve 20200 elemanlı meshin yakınsamayı sağlamak için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 3.12'de geometrinin meshlenmiş hali ve Çizelge 3.3'te çözümün ağ yapısından bağımsız olduğu farklı ağ eleman sayısının ortalama çıkış sıcaklık değerleri üzerine etkisi verilmiştir.



Şekil 3.12. Sayısal çözümlemede hava-FDM ünitesinin meshlenmiş hali.

Çizelge 3.3. Farklı ağ eleman sayısına göre ortalama çıkış sıcaklık değerleri (t=4.75 saat)

Ağ Eleman Sayısı	Ortalama Çıkış Sıcaklığı (˚C)	Fark
10130	26,54	-
10630	26,29	0,25˚C (%0,94)
12290	25,96	0,33˚C (%1,25)
15900	25,31	0,65˚C (%2,5)
20200	25,17	0,14˚C (%0,55)
27100	25,14	0,03˚C (%0,12)

BÖLÜM 4

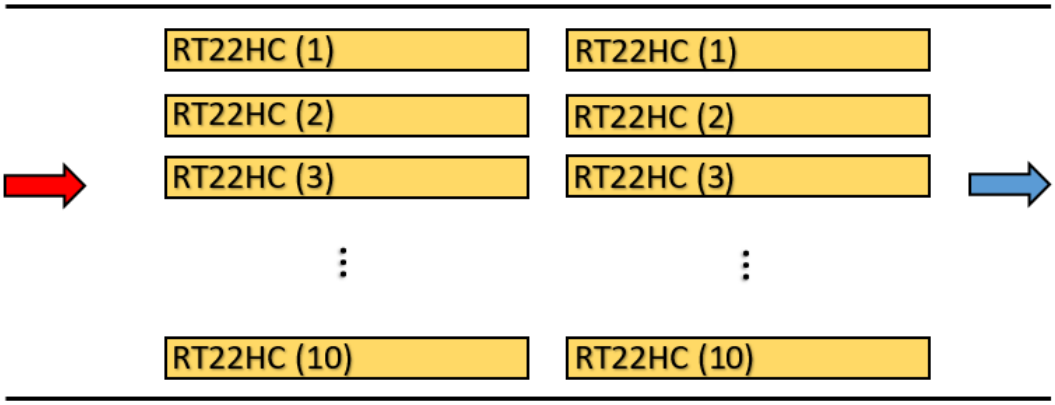
SONUÇLAR VE TARTIŞMA

4.1. Giriş

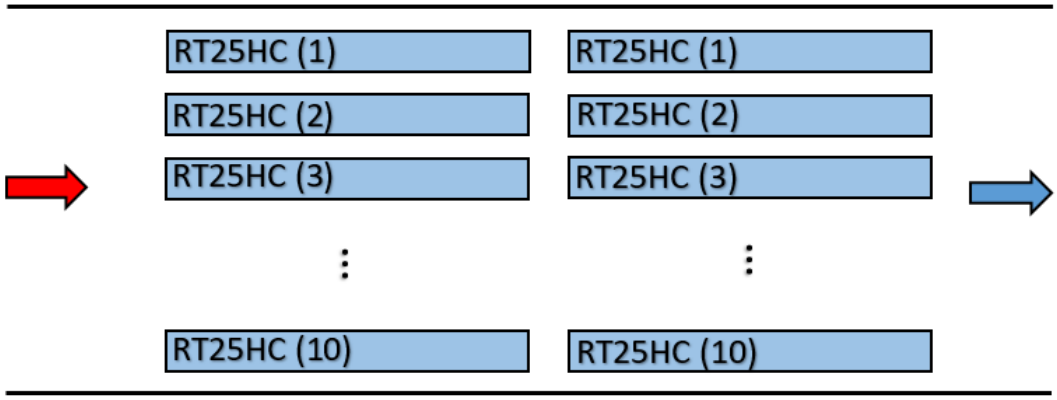
Bu bölümde, malzemelerin kanal içindeki kombinasyonlarının, kanal giriş sıcaklık ve hızının, FDM başlangıç sıcaklığının, Ste sayısının ve seri dizilimdeki levhaların arasındaki mesafenin; kanal çıkış sıcaklığı, sistemin soğutma gücü ile etkenliği ve FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

4.2. Faz Değiştiren Malzemelerin Kombinasyonları

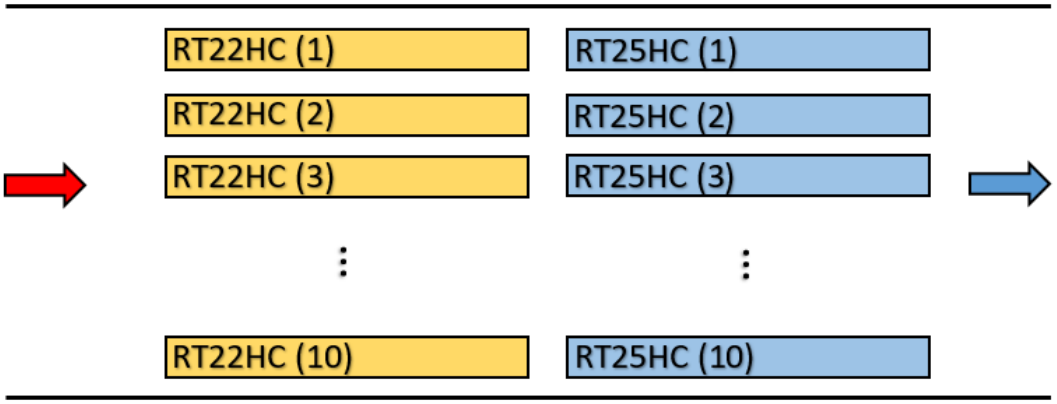
FHID sisteminde 20 adet levha kullanılmış olup, levhaların içerisine 1'er kg parafin konulmuştur. Yapılan deneylerde, 5 farklı kombinasyon üzerinde çalışma yapılmıştır. Bu kombinasyonlar Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



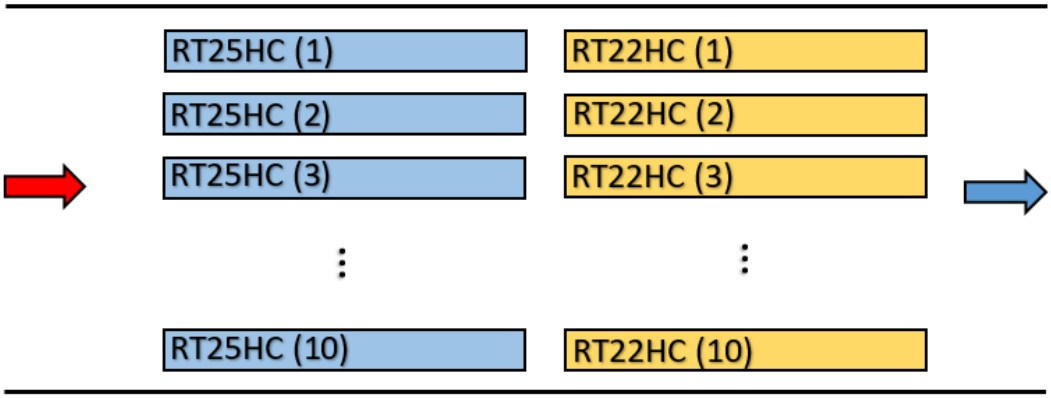
Durum1 (D1): RT22HC'den oluşan FHID.



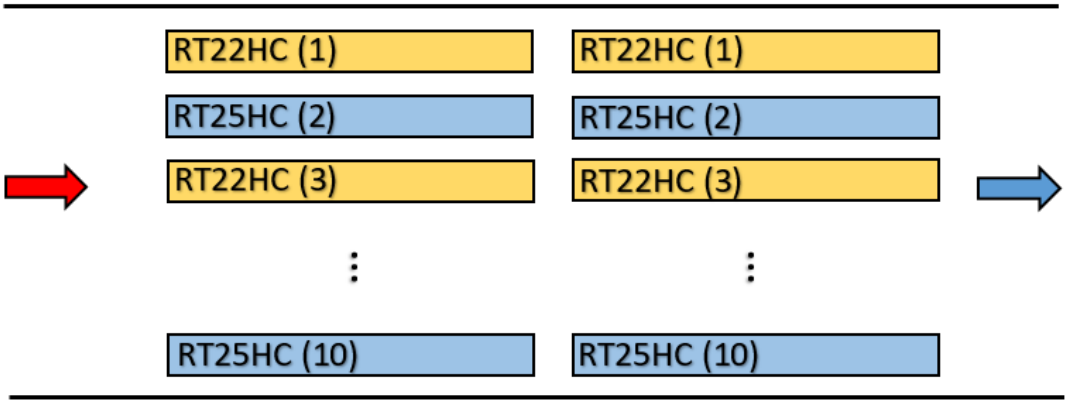
Durum2 (D2): RT25HC'den oluşan FHID.



Durum3 (D3): Girişte RT22HC ve çıkışta RT25HC'den oluşan FHID.



Durum4 (D4): Girişte RT25HC ve çıkışta RT22HC'den oluşan FHID.



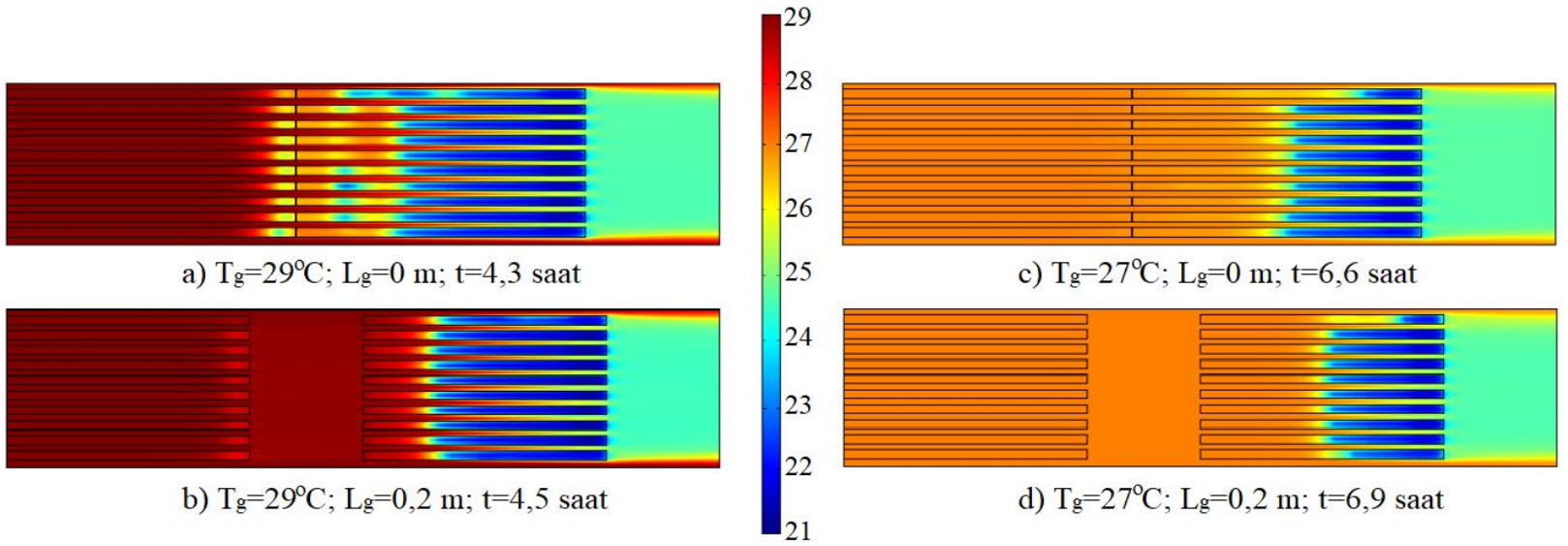
Durum5 (D5): RT22HC ve RT25HC'nin sıralı diziliminden oluşan FHID.

Şekil 4.1. Faz değiştiren malzemelerin kanal içindeki kombinasyonları.

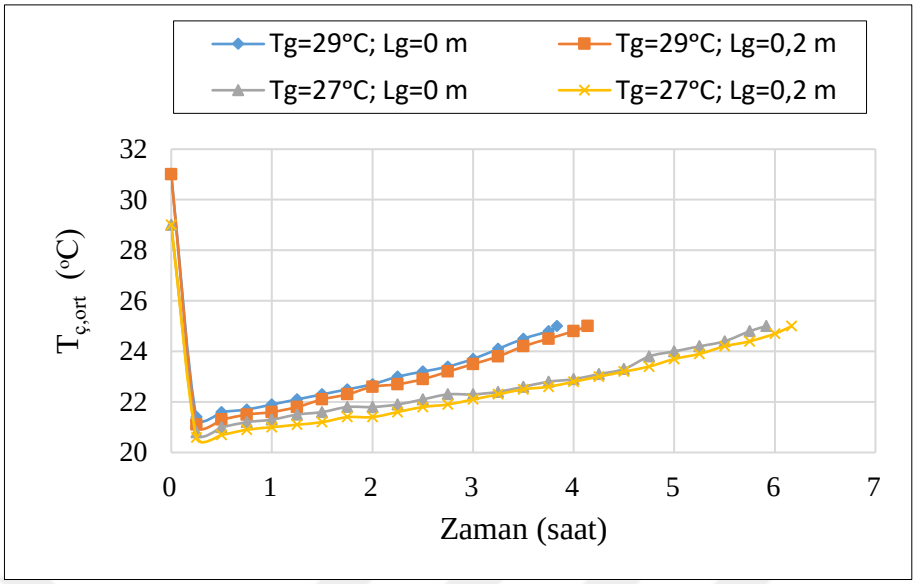
4.3. Giriş Sıcaklığının Etkisi

Bu bölümde kanal giriş sıcaklığının; ortalama kanal çıkış sıcaklığı, FHID'nin soğutma gücü ve etkenliği ile FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı üzerindeki etkileri, Durum1 ve Durum2 için sıcaklık dağılımlarının yardımıyla deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. FDM başlangıç sıcaklığı 16°C, kanal giriş hızı 1,3 m/s, kanal giriş sıcaklıkları 27°C ve 29°C ve seri dizilimli levhalar arasındaki mesafe ise L_g=0 m ve L_g=0,2 m olarak belirlenmiştir.

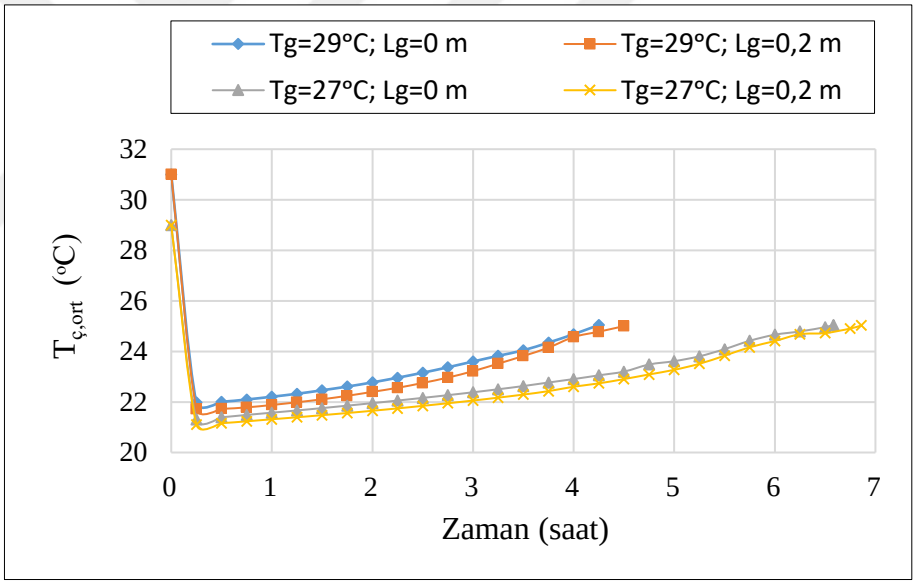
Şekil 4.2'de $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için, sıcaklık konturları Durum1 olarak verilmektedir. $T_{ç,ort}$=25°C olduğu andaki sıcaklık dağılımları incelendiğinde, L_g mesafesinin artması ve giriş sıcaklığının azalması ile istenen sıcaklığa erişme süresinin arttığı görülmektedir. Her iki hava giriş sıcaklığında, kanal girişine yakın bölgede bulunan faz değiştiren malzemelerin tamamının eridiği, diğer kısımda bulunan malzemelerin faz değişim sürecinin tamamlanmadığı görülmektedir.



Şekil 4.2. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için sıcaklık konturları, Durum1.



Şekil 4.3. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

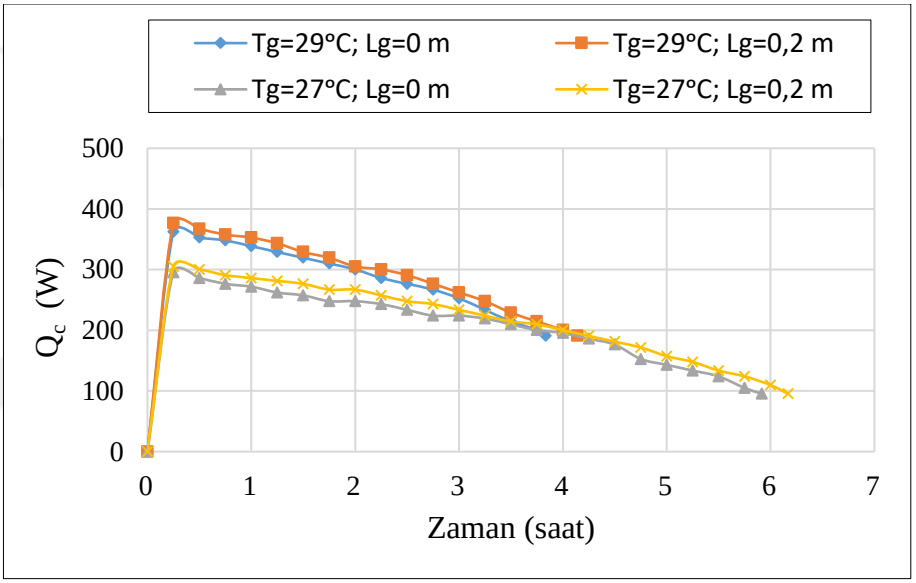


Şekil 4.4. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

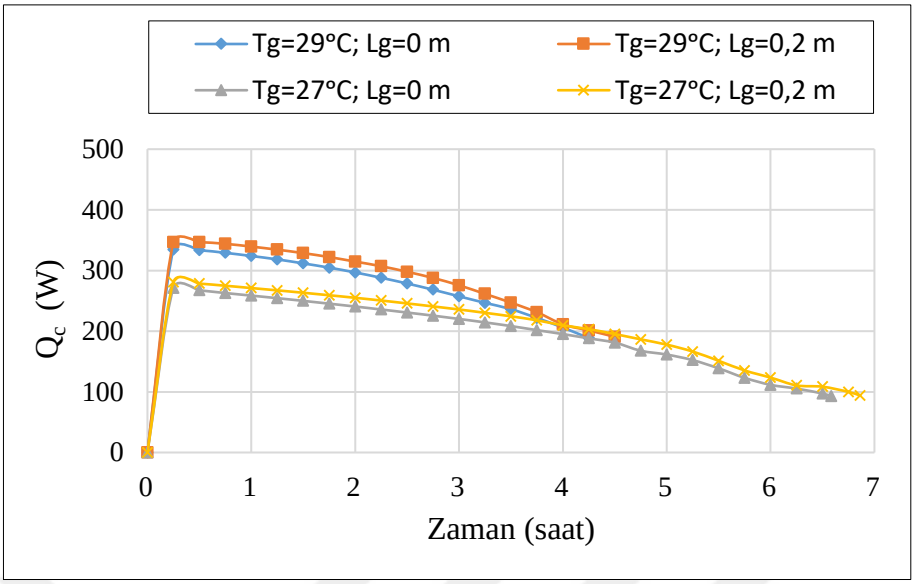
Şekil 4.3'te $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.4'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Hava giriş sıcaklığını 2°C artırmanın, istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresini, levhaların L_g=0 m ve L_g=0,2 m konumları için 2 saat azalttığı görülmüştür. L_g değerini 20 cm artırmanın, bu süreyi her iki giriş sıcaklık değerlerinde yaklaşık 0,3 saat artırdığı; giriş sıcaklığını 2°C artırmanın ve L_g mesafesini 20 cm azaltmanın ise bu süreyi 2,4 saat

azalttığı görülmüştür. Bu durum giriş sıcaklığının, faz değiştiren malzemelerin erime süresini etkileyen önemli bir etken olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.5'te $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.6'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Daha yüksek hava giriş sıcaklığında soğutma yükünün daha yüksek değerlere ulaştığı ve bu süreci daha erken tamamladığı; daha düşük hava giriş sıcaklığında ise soğutma gücünün azaldığı ve bu süreci daha geç tamamladığı görülmektedir. Aynı şartlarda L_g mesafesinin azalması, çıkış sıcaklığını artıracağından dolayı, giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ΔT değerini düşürmektedir. Bu ise soğutma gücünün bir miktar düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.5. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

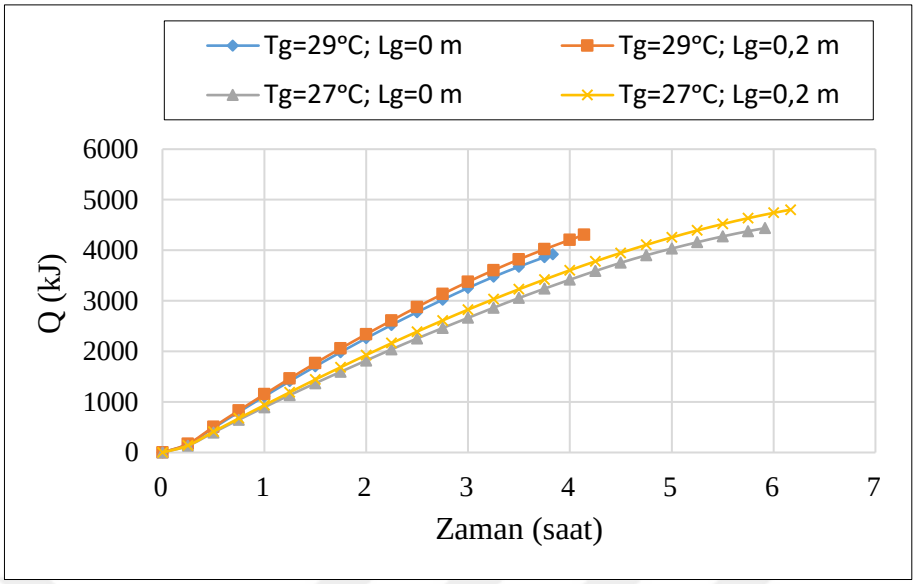


Şekil 4.6. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

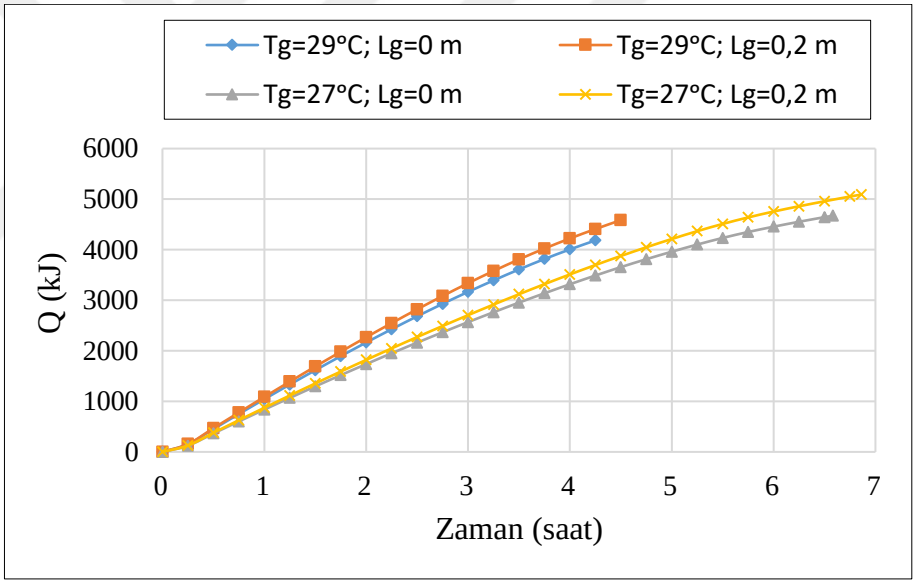
FDM tarafından depolanan toplam enerji, havanın başlangıç durumunda FDM levhaları üzerinden geçerken, en son 25°C sıcaklığa erişmesi durumuna kadar bıraktığı toplam ısı enerjisinin toplamına eşittir:

$$Q = \int_0^t \dot{Q}_c(t)dt \tag{4.1}$$

Bu değer, kapalı bir oda gibi sınırlı alandaki ısı değiştiricisinin performansını hesaplamak için önemlidir. Şekil 4.7'de $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.8'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonunda, sabit L_g değerinde, düşük hava giriş sıcaklığında bulunan faz değiştiren malzemelerin, daha fazla ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Bunun nedeni, sürecin diğerlerine göre daha uzun sürmesinden kaynaklanmasıdır. L_g mesafesinin artması, sınır tabakanın parçalanmasına ve yeniden başlamasına neden olacağından dolayı, ısı transferinin artmasına ve bu nedenle FDM içinde depolanan enerjinin bir miktar daha artmasına yol açacaktır. Kısa süreli zaman içerisinde (3,8 saat), Şekil 4.7'de en düşük süre dikkate alındığında, yüksek hava giriş sıcaklığına sahip ve L_g mesafesinin fazla olduğu sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin daha çok ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Çizelge 4.1'de verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda, FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.



Şekil 4.7. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

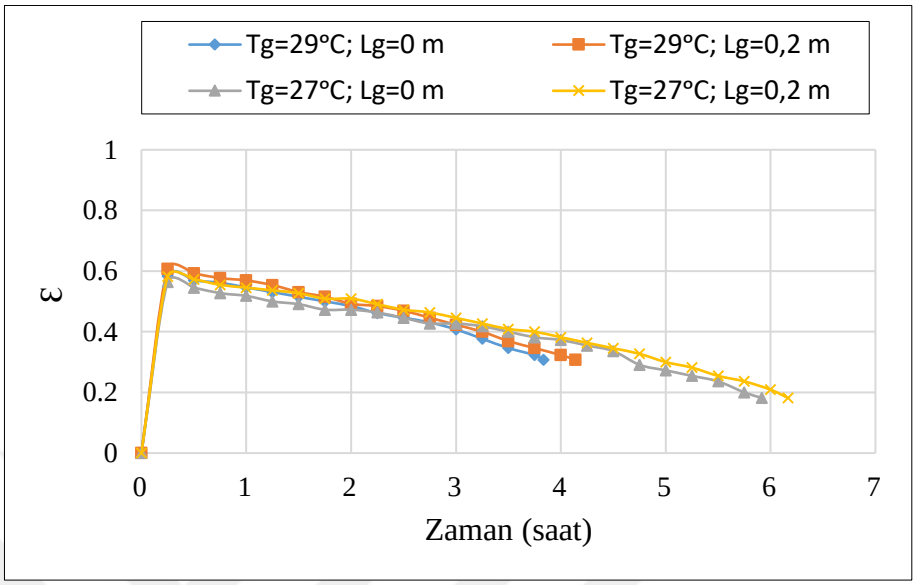


Şekil 4.8. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

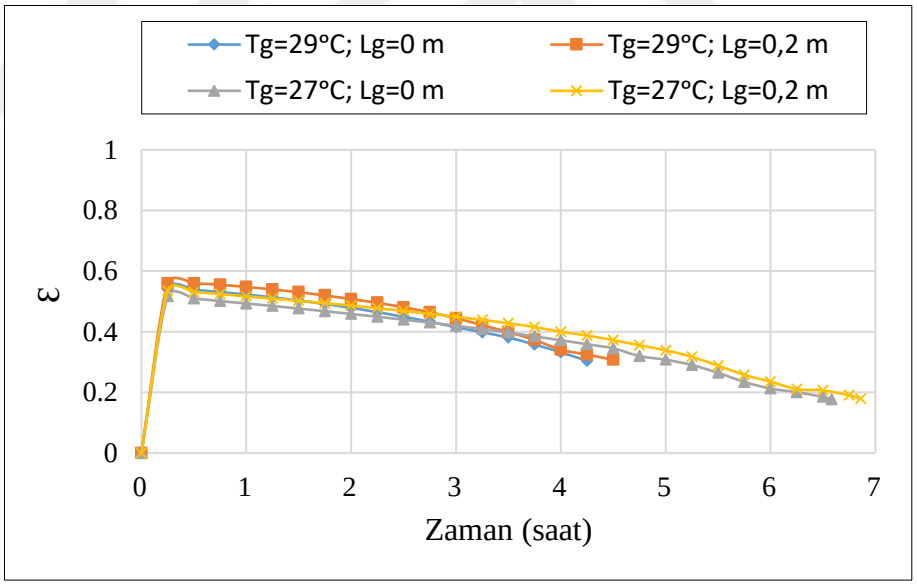
Çizelge 4.1. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ].

T_g=29°C L_g=0 m (t=3,8 sa)	T_g=27°C L_g=0 m (t=3,8 sa/5,9 sa)	T_g=29°C L_g=0,2 m (t=3,8 sa/4,1 sa)	T_g=27°C L_g=0,2 m (t=3,8 sa/6,2 sa)
Q_t=3921	Q_{ks}=3280/Q_t=4437	Q_{ks}=4062/Q_t=4303	Q_{ks}=3458/Q_t=4801

Şekil 4.9'da $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.10'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir.



Şekil 4.9. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



Şekil 4.10. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Etkenlik, sisteme giren havanın giriş sıcaklığı ve sistemden çıkan havanın çıkış sıcaklığı ile faz değiştiren malzemenin başlangıç sıcaklığına bağlı bir parametredir. Hava giriş sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda, etkenliğin belirli bir zamana kadar yüksek olduğu, sonrasında ise hava giriş sıcaklığının düşük olduğu durumdaki etkenlik değerinin altında kaldığı görülmektedir. Aynı giriş sıcaklığına sahip sistemlerde, L_g mesafesinin

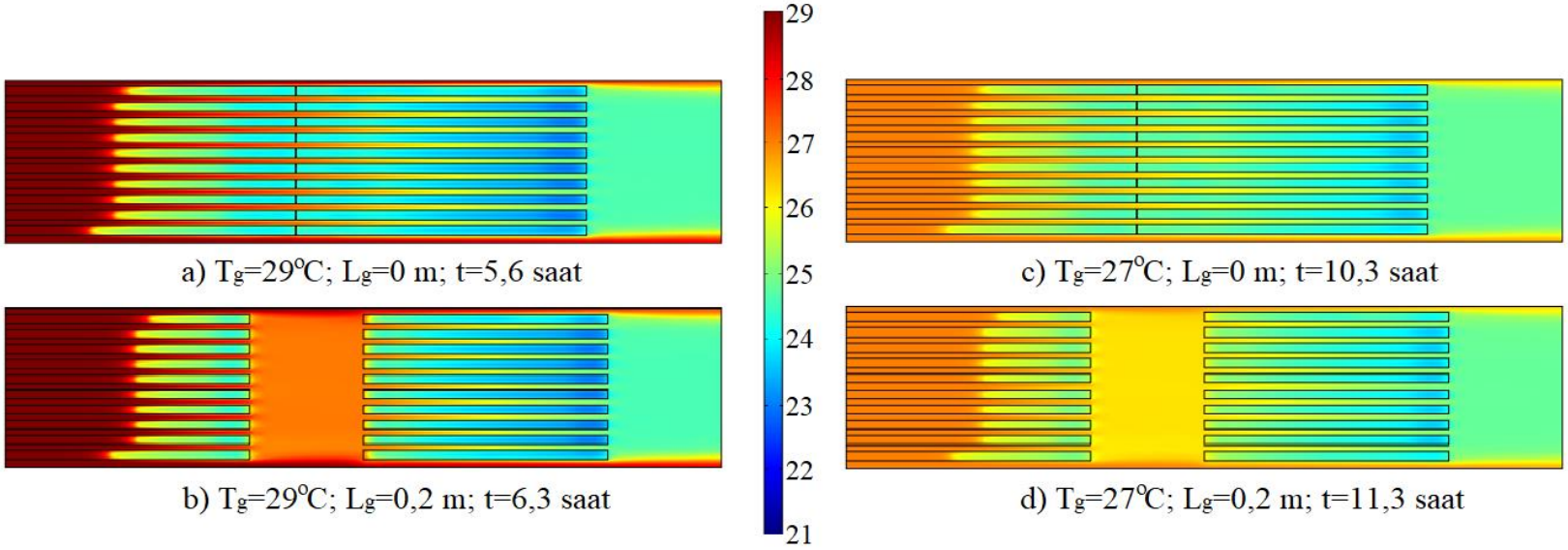
artması ile çıkış sıcaklığı her zaman daha düşük olacağından dolayı etkenliğin fazla olduğu görülmektedir. Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=27°C, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,40 olduğu ve yaklaşık 4 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür. Diğer yandan kısa süreli zaman içerisinde, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=29°C, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,45 olduğu ve 2,5 saat bu ortalamanın üzerinde çalıştığı görülmüştür.

Faz değişim sıcaklık aralığı ve gizli ısı depolama kapasitesi daha yüksek bir faz değişim malzemesi olan RT25HC'nin, yine aynı şartlar altındaki FHID üzerindeki etkileri bu kısımda incelenmektedir. Şekil 4.11'de $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için, sıcaklık konturları Durum2 olarak verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, süreç sonunda her iki hava giriş sıcaklık değerinde, kanal girişine yakın bölgede bulunan faz değiştiren malzemelerin tamamen erimediği görülmektedir. Bunun nedeni, hava giriş sıcaklığı ile faz değiştiren malzemenin erime sıcaklık aralığı arasındaki sıcaklık farkının yeteri kadar fazla olamamasıdır.

RT25HC'nin kullanılmasıyla istenilen sıcaklığa erişme süresinin Durum1'e göre arttığı görülmektedir. Çizelge 4.2'de aynı şartlarda bulunan RT22HC ile RT25HC'nin erime sürelerinin karşılaştırılması verilmektedir.

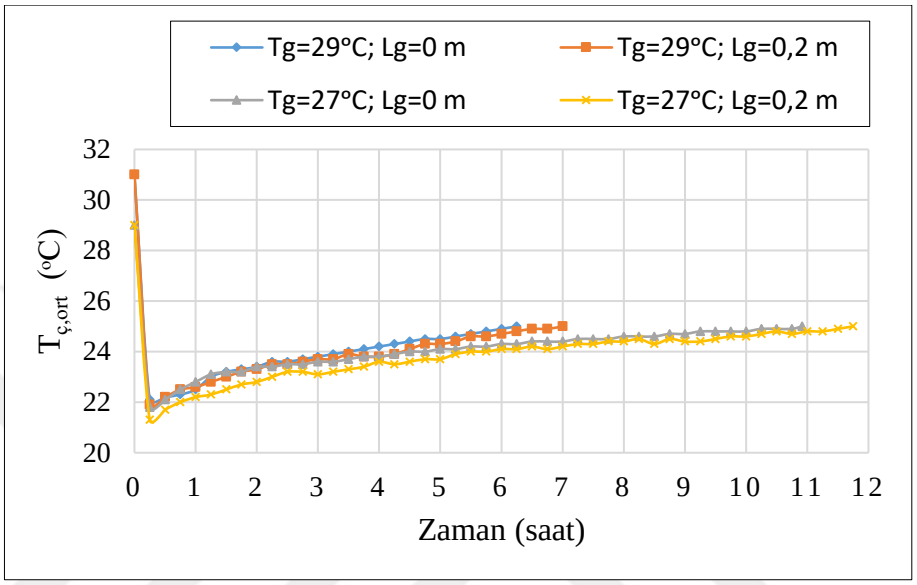
Çizelge 4.2. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için Durum1 ile Durum2'nin erime sürelerinin karşılaştırılması [sa].

Malzeme	T_g=29°C L_g=0 m	T_g=27°C L_g=0 m	T_g=29°C L_g=0,2 m	T_g=27°C L_g=0,2 m
RT22HC (D1)	3,8	5,9	4,1	6,1
RT25HC (D2)	6,3	10,9	7,0	11,8

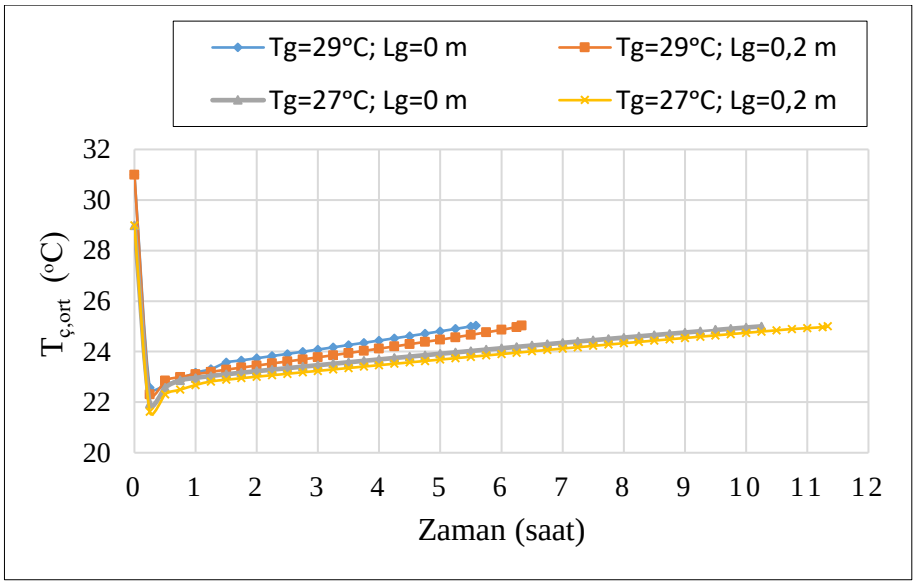


Şekil 4.11. $T_{b,FDM}$=16˚C, V_g=1,3 m/s durumları için sıcaklık konturları, Durum2.

Şekil 4.12'de $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.13'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Şekil 4.3 ile karşılaştırıldığında, bu sürecin daha uzun olduğu görülmektedir. Çünkü verilen sıcaklık aralığında RT25HC erime sürecini tamamlayamamış ve bu nedenle sıcak havadan yeteri kadar ısı depolayamamıştır.



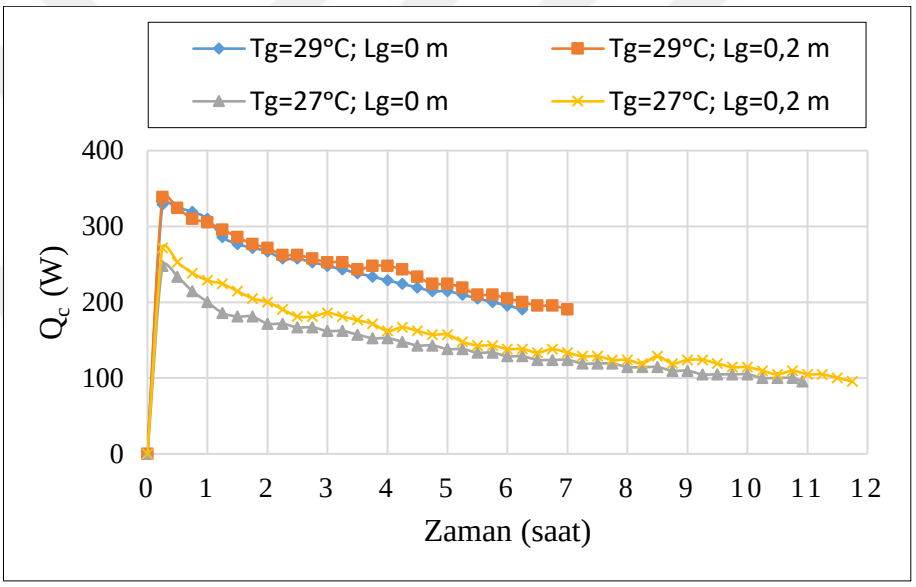
Şekil 4.12. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



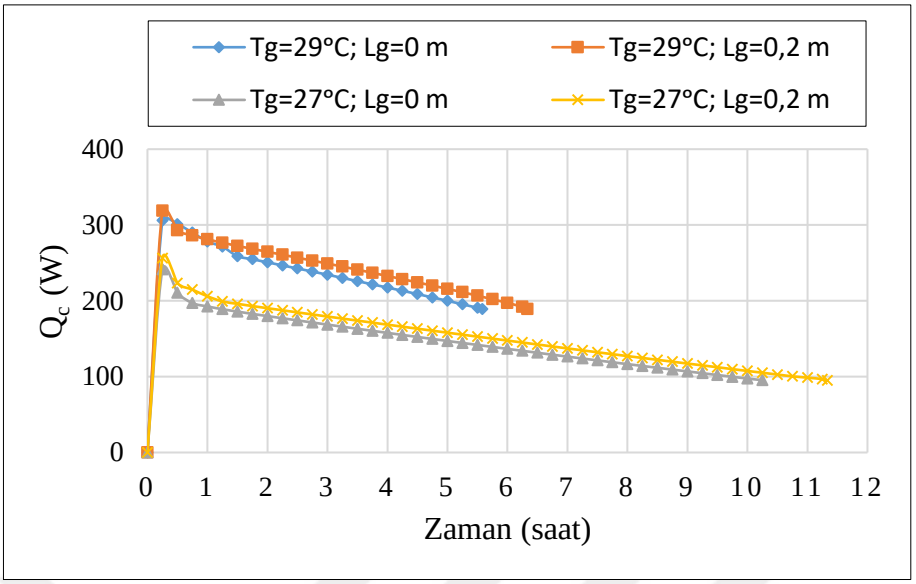
Şekil 4.13. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.14'te $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.15'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Önceki

duruma benzer şekilde, daha yüksek hava giriş sıcaklığında soğutma yükünün daha yüksek değerlerde, daha düşük hava giriş sıcaklığında da soğutma gücünün daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.5 ile karşılaştırıldığında, soğutma gücünün biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Çünkü Durum1'deki çıkış sıcaklığı daha düşük olduğundan dolayı, giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki ΔT büyük olacak ve soğutma gücü daha fazla olacaktır. Bunun en önemli nedeni, ortalama faz değişim sıcaklık aralığı arasındaki 2,5°C'lik farktır. Eğer faz değişim sıcaklık aralığı RT25HC'den daha düşük ve erime ısısı RT25HC'den daha büyük bir FDM kullanılmış olsaydı, soğutma gücü daha fazla olmuş olacaktı. Pasif soğutma sistemlerinde, ısı depolama kapasitesinin yanı sıra faz değişim sıcaklık aralığının da uygun bir şekilde seçilmesi gerektiği önem arz etmektedir.



Şekil 4.14. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

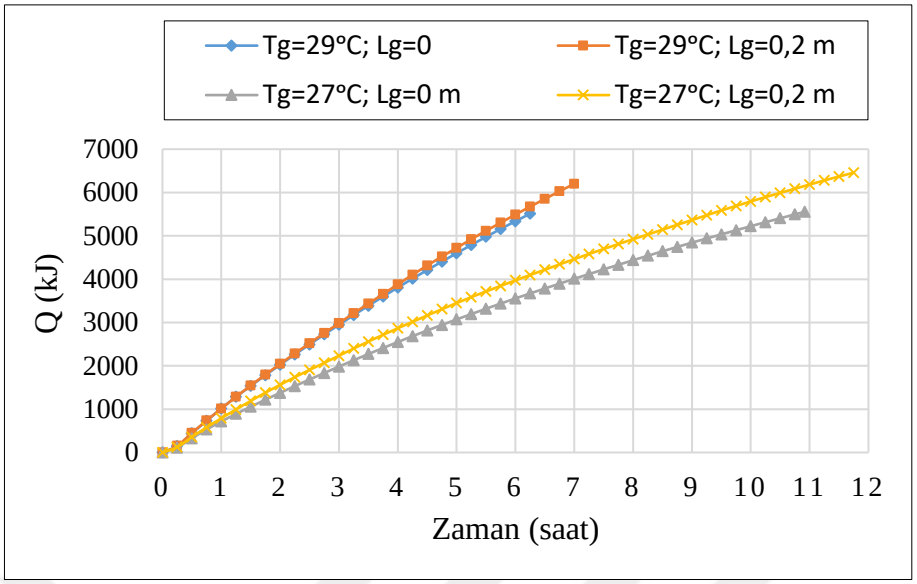


Şekil 4.15. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

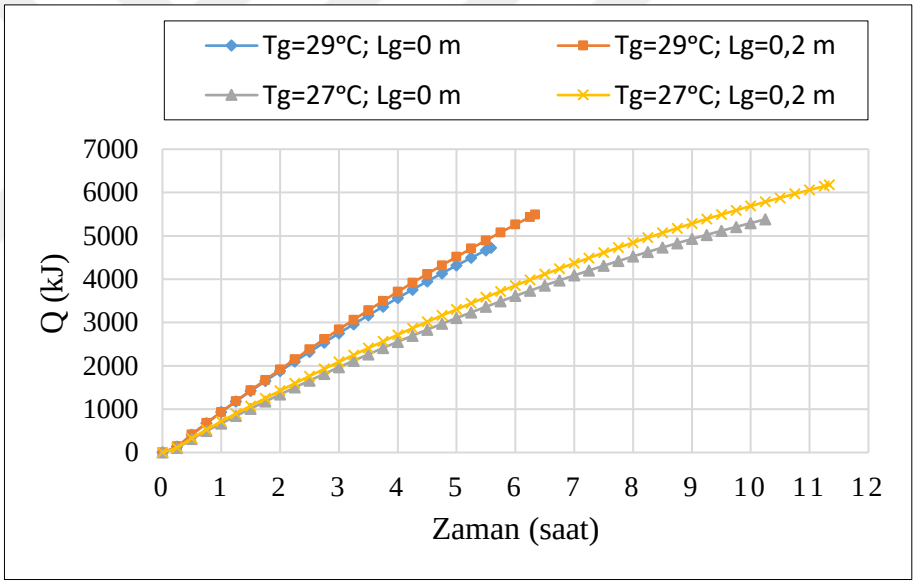
Şekil 4.16'da $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.17'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonu baz alınarak Şekil 4.7'deki Durum1'e göre kıyaslandığında, sürecin uzun sürmesinden ve RT25HC'nin faz değişim ısısının yüksek olmasından dolayı, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Kısa süreli zaman içerisinde (6,3 saat), Şekil 4.16'da en düşük süre dikkate alındığında, yüksek hava giriş sıcaklığındaki ve L_g mesafesinin fazla olduğu sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin daha çok ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Çizelge 4.3'te $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.3. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ].

T_g=29°C L_g=0 m (t=6,3 sa)	T_g=27°C L_g=0 m (t=6,3 sa/10,9 sa)	T_g=29°C L_g=0,2 m (t=6,3 sa/7,0 sa)	T_g=27°C L_g=0,2 m (t=6,3 sa/11,8 sa)
Q_t=5511	Q_{ks}=3785/Q_t=5554	Q_{ks}=5673/Q_t=6202	Q_{ks}=4096/Q_t=6556

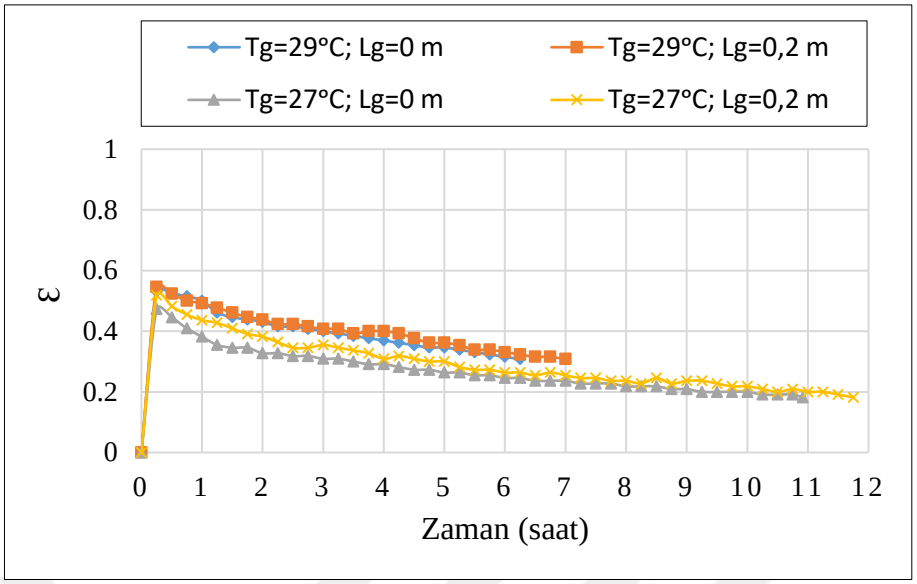


Şekil 4.16. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

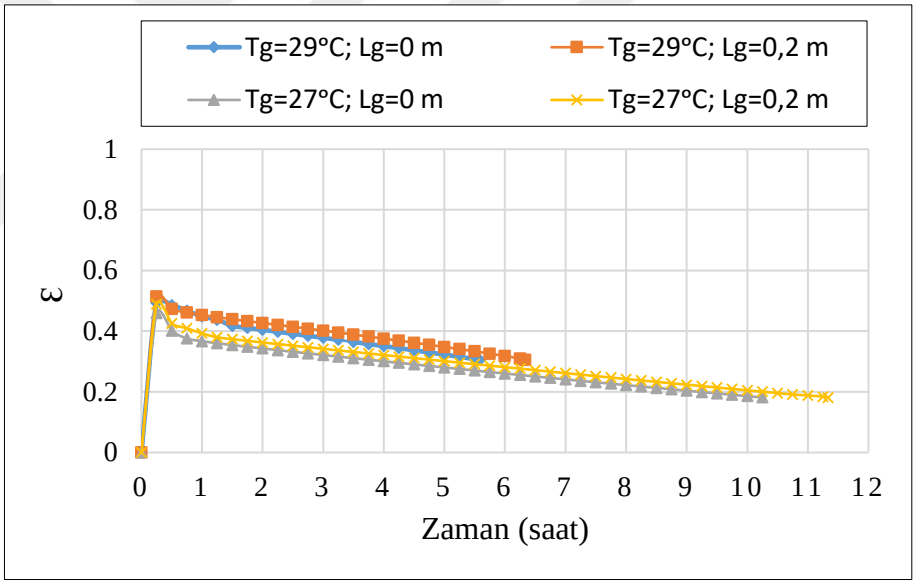


Şekil 4.17. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.18'de $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.19'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=27°C, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,28 olduğu ve 5,3 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür. Diğer yandan kısa süreli zaman içerisinde, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=29°C, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,39 olduğu ve 4,3 saat bu ortalamanın üzerinde çalıştığı görülmüştür.



Şekil 4.18. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



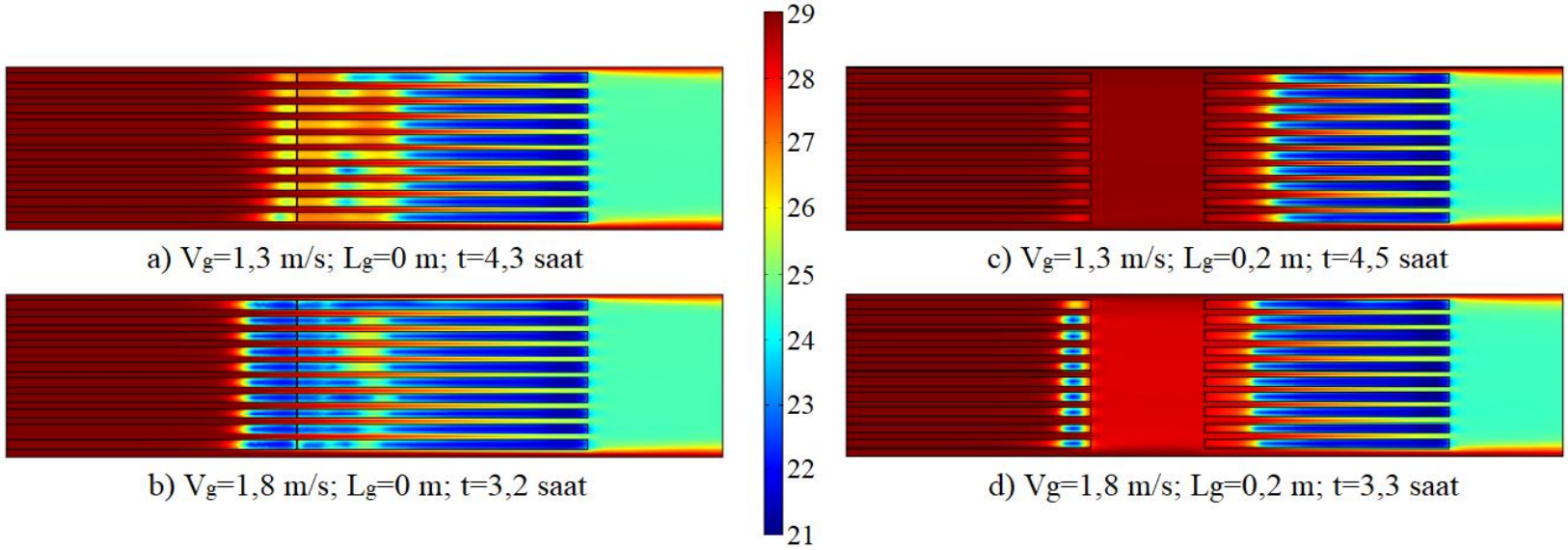
Şekil 4.19. $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

4.4. Giriş Hızının Etkisi

Bu bölümde, kanal giriş hızının; ortalama kanal çıkış sıcaklığı, FHID'nin soğutma gücü ve etkenliği ile FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı üzerindeki etkileri, Durum 1 ve Durum 2 için sıcaklık dağılımlarının yardımıyla deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. FDM başlangıç sıcaklığı 16°C, hava giriş sıcaklığı 29°C, giriş hızları 1,3

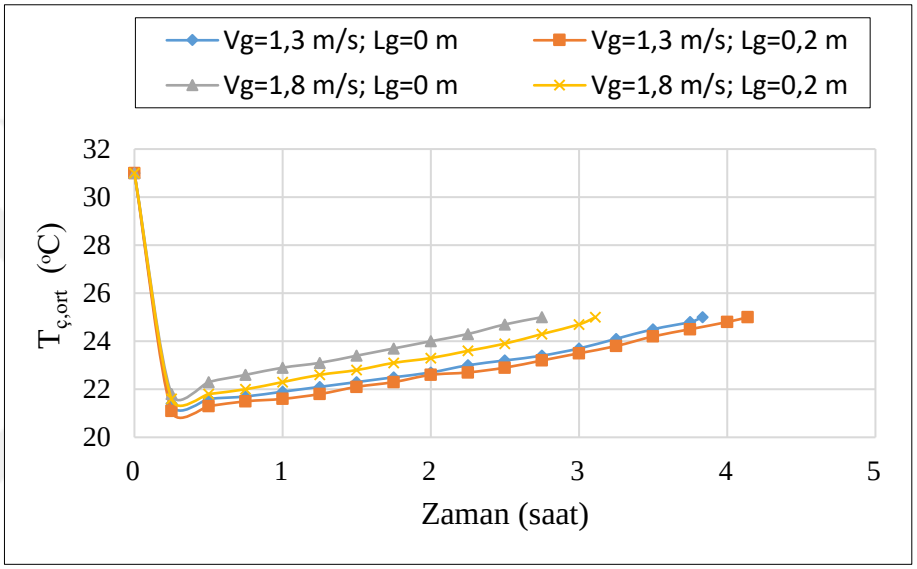
m/s ve 1,8 m/s ve seri dizilimli levhalar arasındaki mesafe ise L_g=0 m ve L_g=0,2 m olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.20'de $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için, sıcaklık konturları Durum1 olarak verilmektedir. $T_{ç,ort}$=25°C olduğu andaki sıcaklık dağılımları analiz edildiğinde, seri dizilimli levhalar arasındaki boşluğun (L_g) artması ile istenilen sıcaklığa erişme süresinin arttığı; hava giriş hızının artması ile de bu sıcaklığa erişme süresinin azaldığı görülmektedir. Süreç sonunda, sabit L_g değerinde yüksek hava giriş hızına maruz kalan FDM'nin faz değişiminin, düşük hava giriş hızlı sisteme göre daha az tamamladığı görülmektedir.

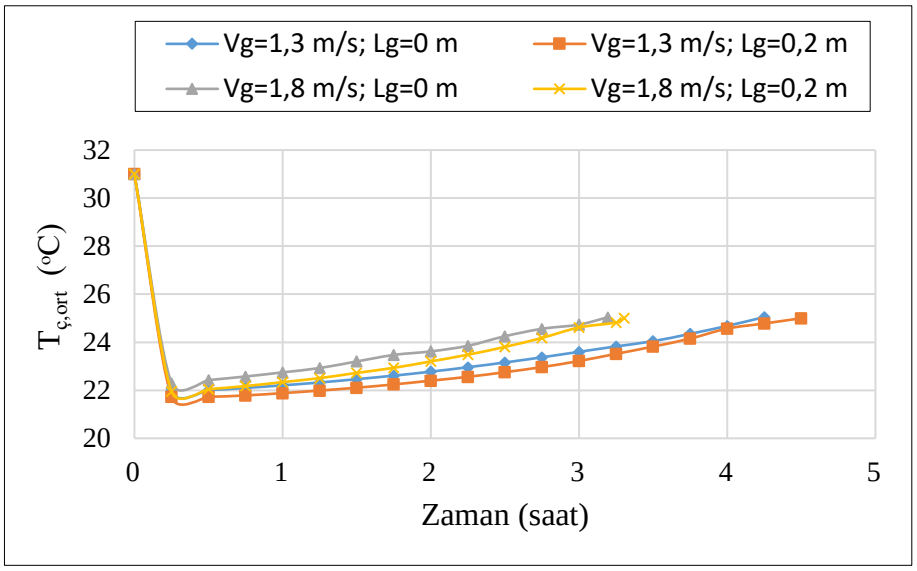


Şekil 4.20. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için sıcaklık konturları, Durum1.

Şekil 4.21'de $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.22'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Hava giriş hızını 0,5 m/s artırmanın, istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresini, L_g=0 m ve L_g=0,2 m konumları için 1 saat azalttığı görülmüştür. L_g değerini 20 cm artırmanın, bu süreyi iki giriş hız değerlerinde 0,3 saat artırdığı görülmüştür. Giriş hızını 0,5 m/s artırmanın ve L_g mesafesini 20 cm azaltmanın ise bu süreyi 1,3 saat azalttığı görülmüştür. Bu durum, giriş hız değerinin, FDM'nin erime süresini etkileyen bir parametre olduğunu göstermektedir.

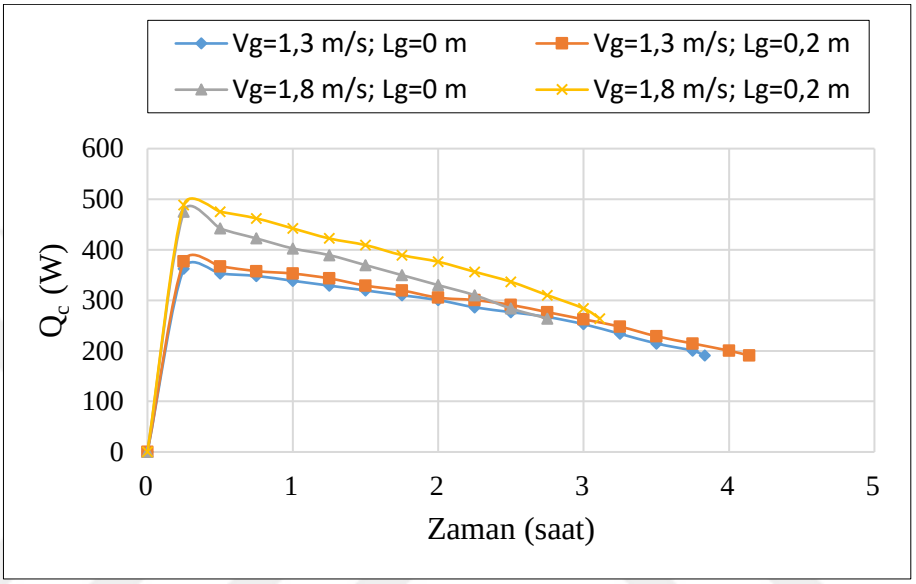


Şekil 4.21. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

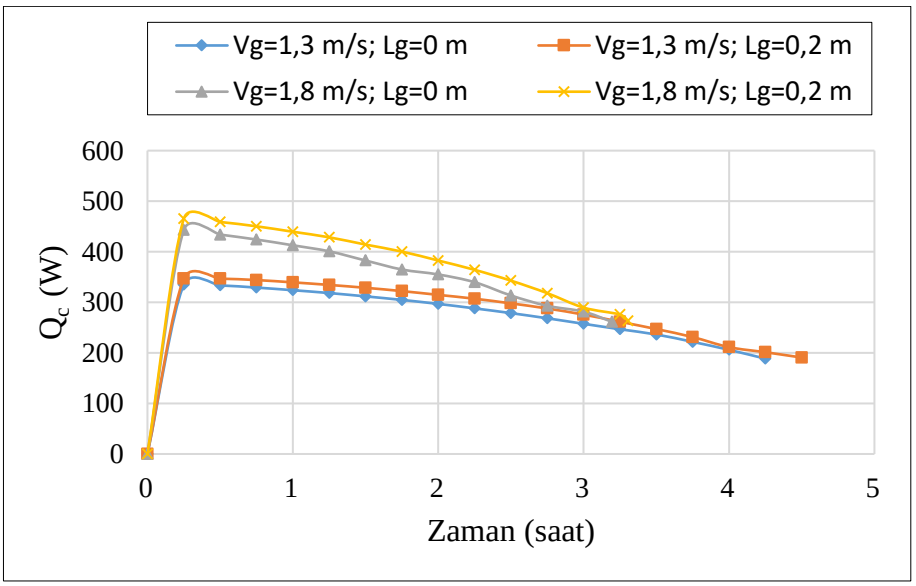


Şekil 4.22. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.23'te $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.24'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Yüksek hava giriş hızı için soğutma yükünün yüksek değerlere ulaştığı, düşük hava giriş hızı için soğutma yükünün düşük değerlere ulaşsa da daha uzun faz değişim süresine maruz kaldığı görülmektedir. Giriş hızı ile beraber L_g mesafesindeki artışın, bu yükü daha da artıracağı sonucu çıkarılmaktadır.

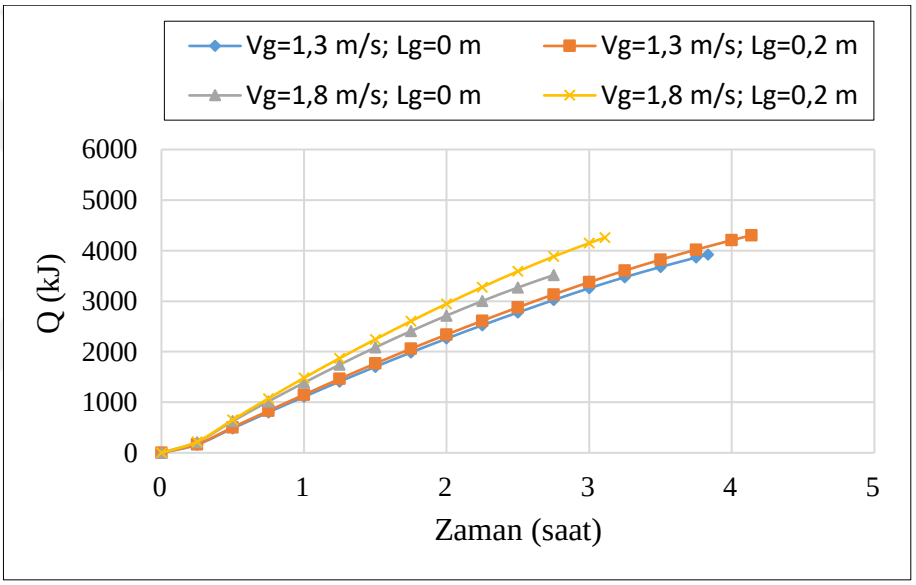


Şekil 4.23. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

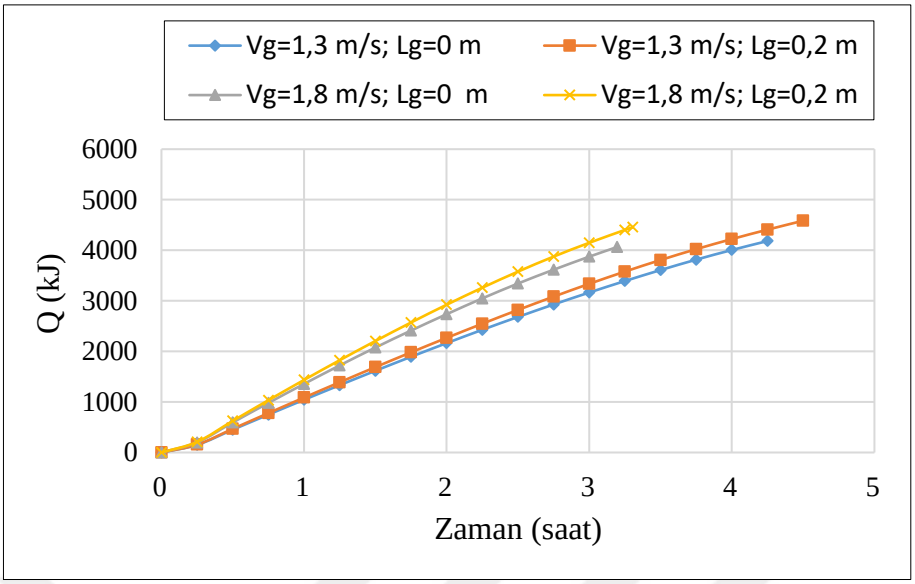


Şekil 4.24. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.25'te $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.26'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Aynı şartlarda, süreç sonunda hava giriş hızının daha düşük olduğu sistemdeki faz değiştiren malzemelerin daha fazla ısıyı absorbe ettikleri görülmektedir. L_g mesafesinin artması ile de deşarj süresi artacağından dolayı absorbe edilen ısı miktarının arttığı görülmektedir. Ancak kısa süreli zaman içerisinde (2,8 saat), Şekil 4.25'te en düşük süre dikkate alındığında, akış hızı yüksek ve L_g mesafesi fazla olan sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin daha çok ısıyı absorbe ettiği sonucuna varılmaktadır. Çizelge 4.4'te verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.



Şekil 4.25. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

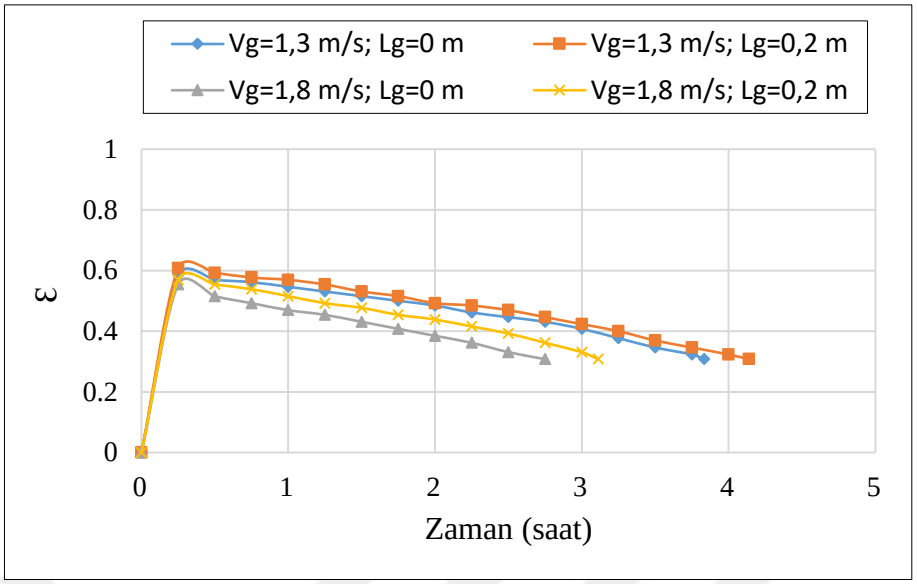


Şekil 4.26. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

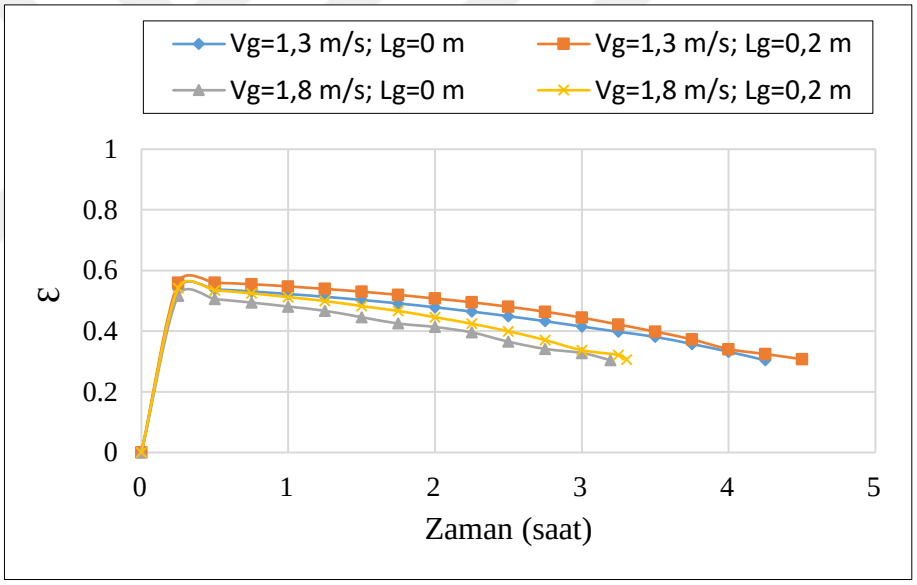
Çizelge 4.4. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ].

V_g=1,3 m/s L_g=0 m (t=2,8 sa/3,8 sa)	V_g=1,8 m/s L_g=0 m (t=2,8 sa)	V_g=1,3 m/s L_g=0,2 m (t=2,8 sa/4,1 sa)	V_g=1,8 m/s L_g=0,2 m (t=2,8 sa/3,1 sa)
Q_{ks}=3068/Q_t=3921	Q_t=3516	Q_{ks}=3180/Q_t=4303	Q_{ks}=3934/Q_t=4258

Şekil 4.27'de $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.28'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. FDM'nin hava ile daha uzun temas süresi nedeniyle, akış hızı daha düşük sistemde yüksek etkenlik elde edilmiştir. Çünkü düşük hava hızında, çıkış sıcaklığı düşük olacağı için giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark büyük olmaktadır. Bu ise etkenliğin artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, hava giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark arttığı zaman etkenlik de artmaktadır. Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (V_g=1,3 m/s, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,45 olduğu ve yaklaşık 3 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür. Diğer yandan kısa süreli zaman içerisinde, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (V_g=1,8 m/s, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,43 olduğu ve 2,2 saat bu ortalamanın üzerinde çalıştığı görülmüştür.

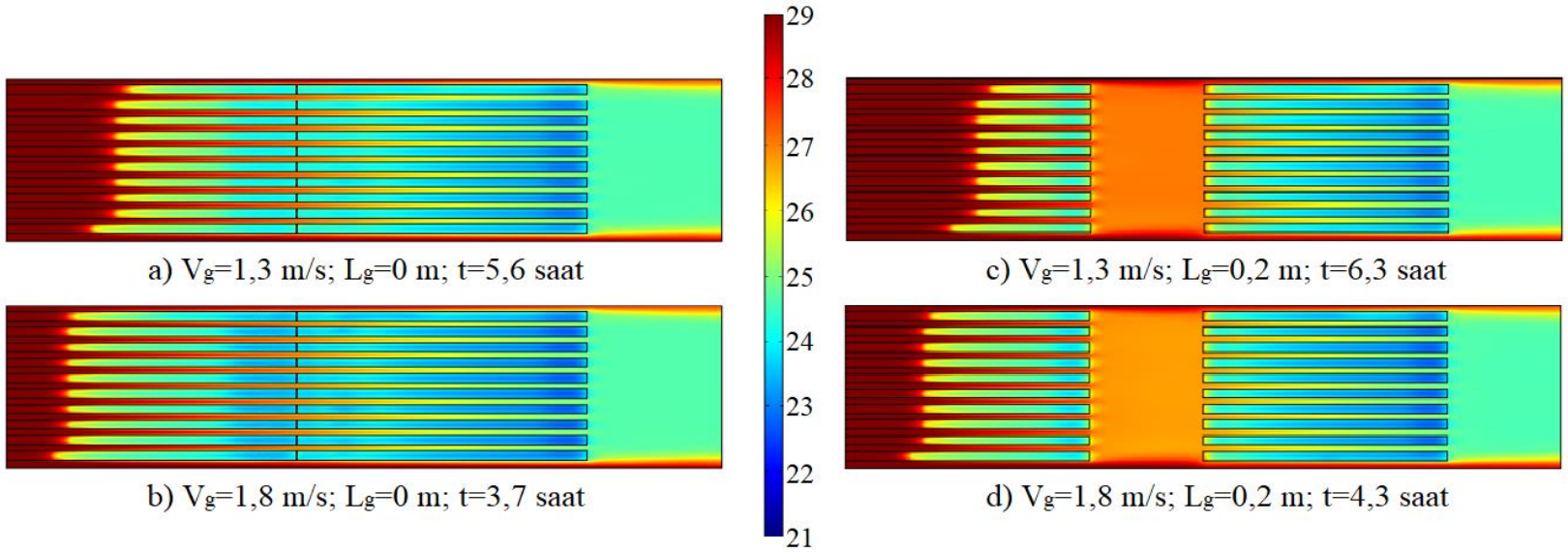


Şekil 4.27. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



Şekil 4.28. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Bu kısımda RT25HC'nin, aynı şartlar altında FHID üzerindeki etkileri incelenmektedir. Şekil 4.29'da $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için sıcaklık konturları Durum2 olarak verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, $T_{ç,ort}$=25°C olduğu durumda RT25HC'nin kanal girişinde bile faz değişimini tamamlayamadığı görülmektedir.



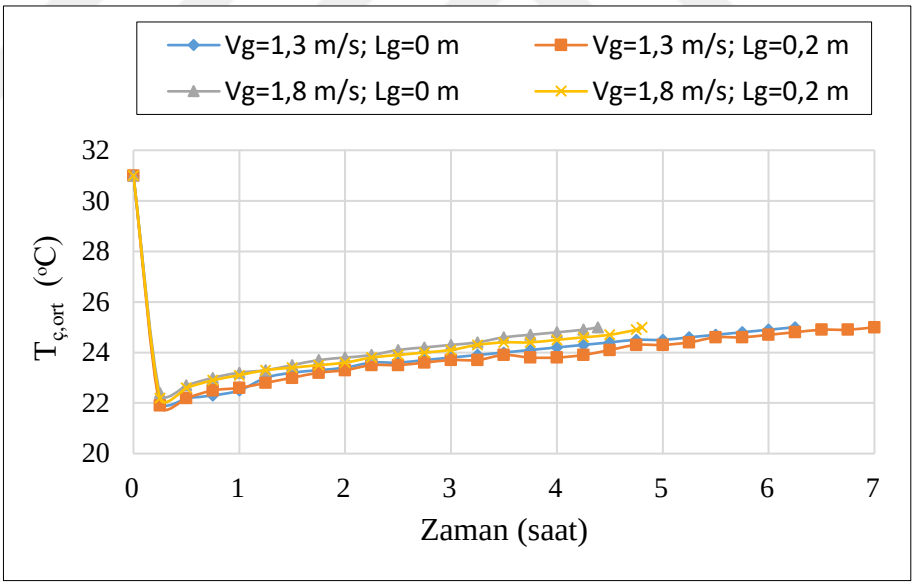
Şekil 4.29. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için sıcaklık konturları, Durum2.

Durum1'e göre kıyaslandığında, istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresinin daha fazla olduğu görülmektedir. Çizelge 4.5'te aynı şartlarda bulunan RT22HC ile RT25HC'nin süre olarak karşılaştırılması verilmektedir.

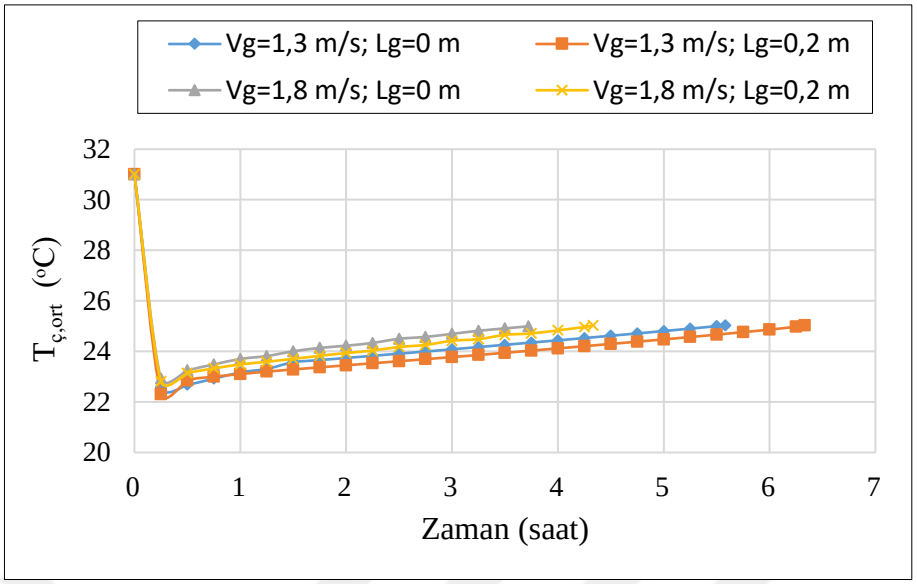
Çizelge 4.5. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için RT22HC ile RT25HC'nin süre olarak karşılaştırılması [sa].

Malzeme	V_g=1,3 m/s L_g=0 m	V_g=1,8 m/s L_g=0 m	V_g=1,3 m/s L_g=0,2 m	V_g=1,8 m/s L_g=0,2 m
RT22HC	3,8	2,8	4,1	3,1
RT25HC	6,3	4,4	7,0	4,8

Şekil 4.30'da $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.31'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Hava giriş hızının, L_g=0 m ve L_g=0,2 m konumlarında, 0,5 m/s artması ile istenilen ortalama çıkış sıcaklığına erişme süresinin yaklaşık %30 azaldığı bulunmuştur. Şekil 4.21'deki Durum1 ile karşılaştırıldığında, bu sürecin daha uzun olduğu görülmektedir.

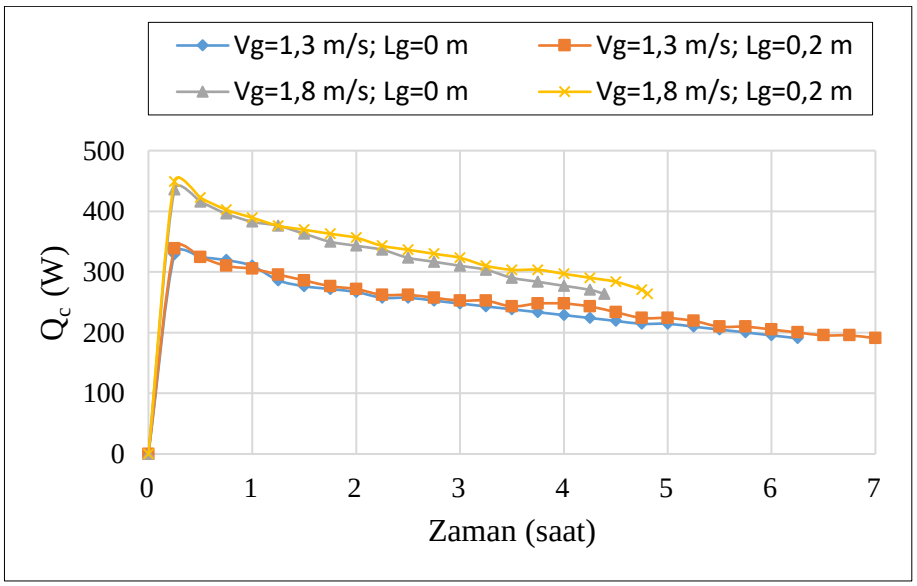


Şekil 4.30. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

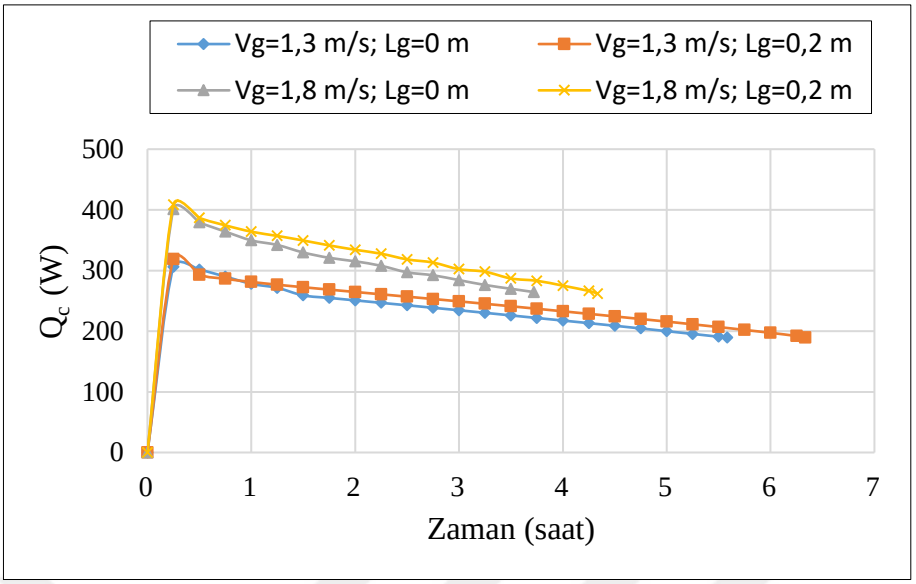


Şekil 4.31. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.32'de$T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.33'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Önceki duruma benzer şekilde, daha yüksek hava giriş hızında soğutma yükünün daha yüksek değerlerde, daha düşük hava giriş hızında soğutma gücünün daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 4.23 ile karşılaştırıldığında, soğutma gücünün biraz daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 4.32. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

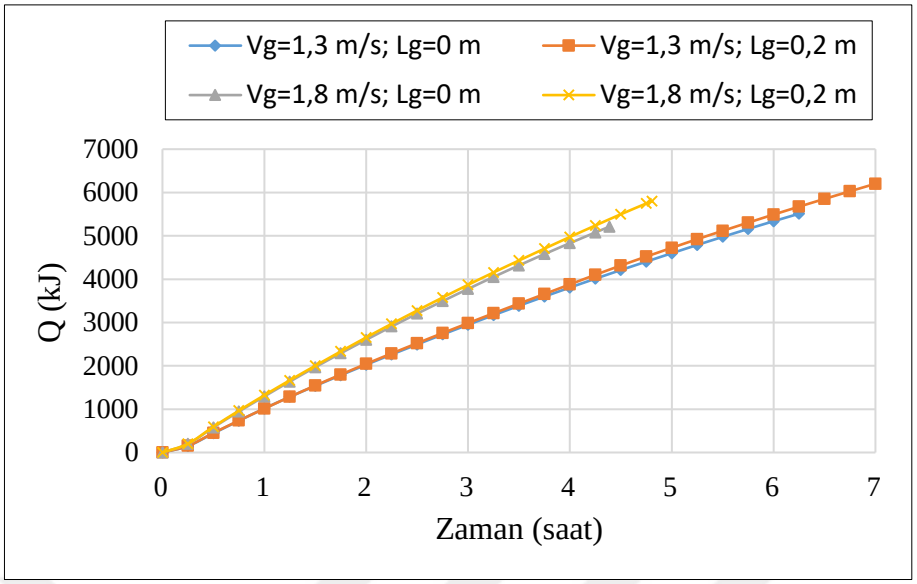


Şekil 4.33. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

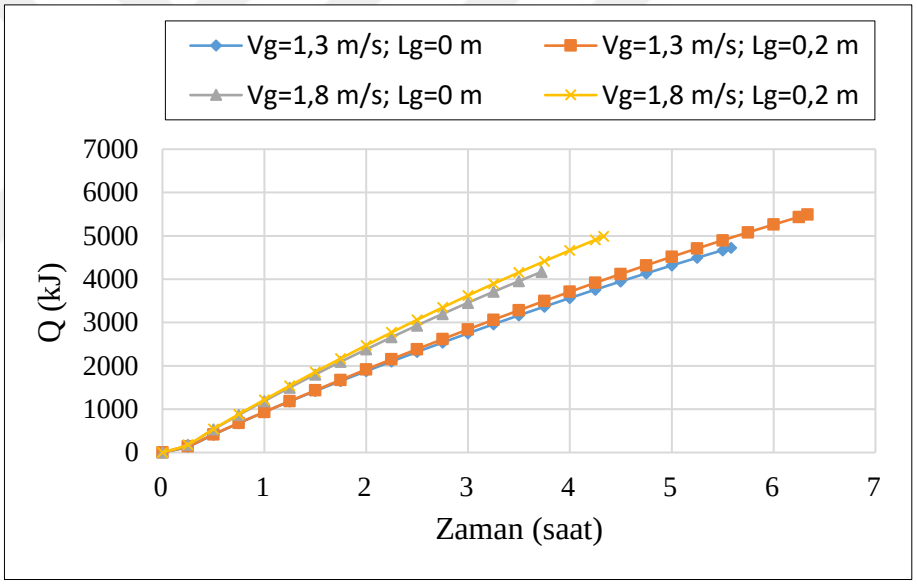
Şekil 4.34'te $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.35'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonu, Durum1'e göre kıyaslandığında, sürecin uzun sürmesinden ve RT25HC'nin faz değişim ısısının yüksek olmasından dolayı, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Durum1'in süreci tamamladığı süreler dikkate alındığında bu değerlerin hemen hemen birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Kısa süreli zaman içerisinde (4,4 saat), Şekil 4.34'te en düşük süre dikkate alındığında, yüksek hava giriş hızındaki ve L_g mesafesinin fazla olduğu sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin daha çok ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Çizelge 4.6'da $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.6. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları [kJ], Durum2.

V_g=1,3 m/s L_g=0 m (t=4,4 sa/6,3 sa)	V_g=1,8 m/s L_g=0 m (t=4,4 sa)	V_g=1,3 m/s L_g=0,2 m (t=4,4 sa/7,0 sa)	V_g=1,8 m/s L_g=0,2 m (t=4,4 sa/4,8 sa)
Q_{ks}=4130/Q_t=5511	Q_t=5211	Q_{ks}=4230/Q_t=6202	Q_{ks}=5394/Q_t=5800

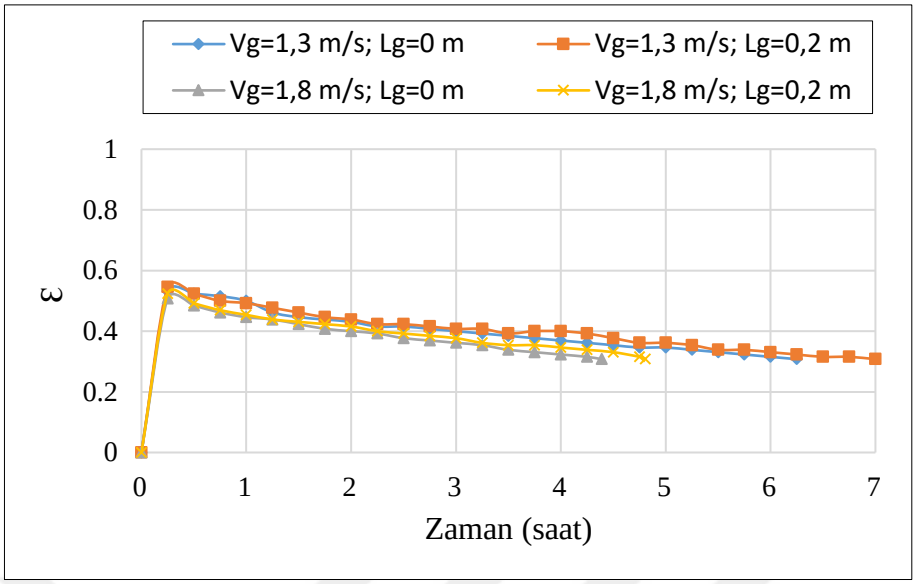


Şekil 4.34. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

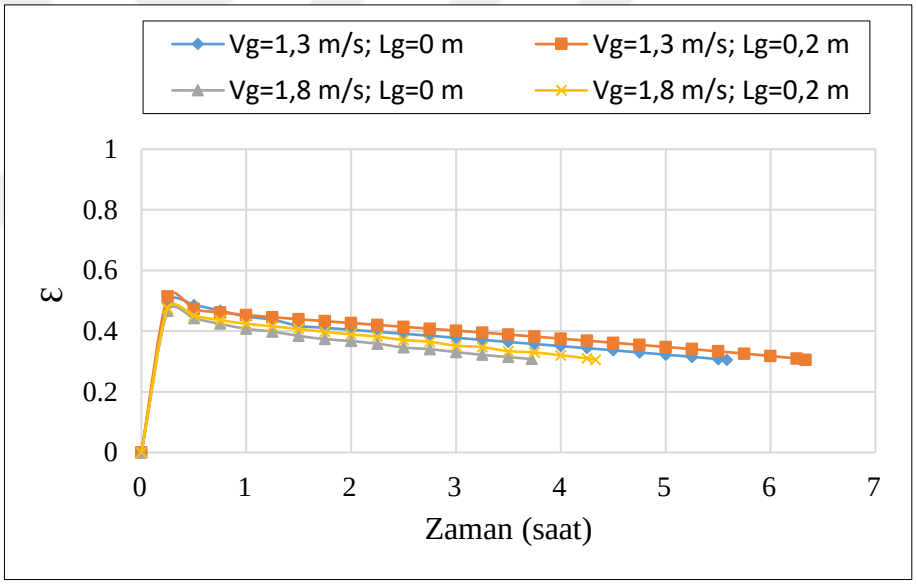


Şekil 4.35. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.36'da $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.37'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (V_g=1,3 m/s, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,39 olduğu ve 4,3 saat bu ortalamanın üzerinde çalıştığı görülmüştür. Diğer yandan kısa sürede FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (V_g=1,8 m/s, L_g=0,2 m) ortalama etkenliğinin 0,38 olduğu ve 3 saat bu ortalamanın üzerinde çalıştığı görülmüştür.



Şekil 4.36. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



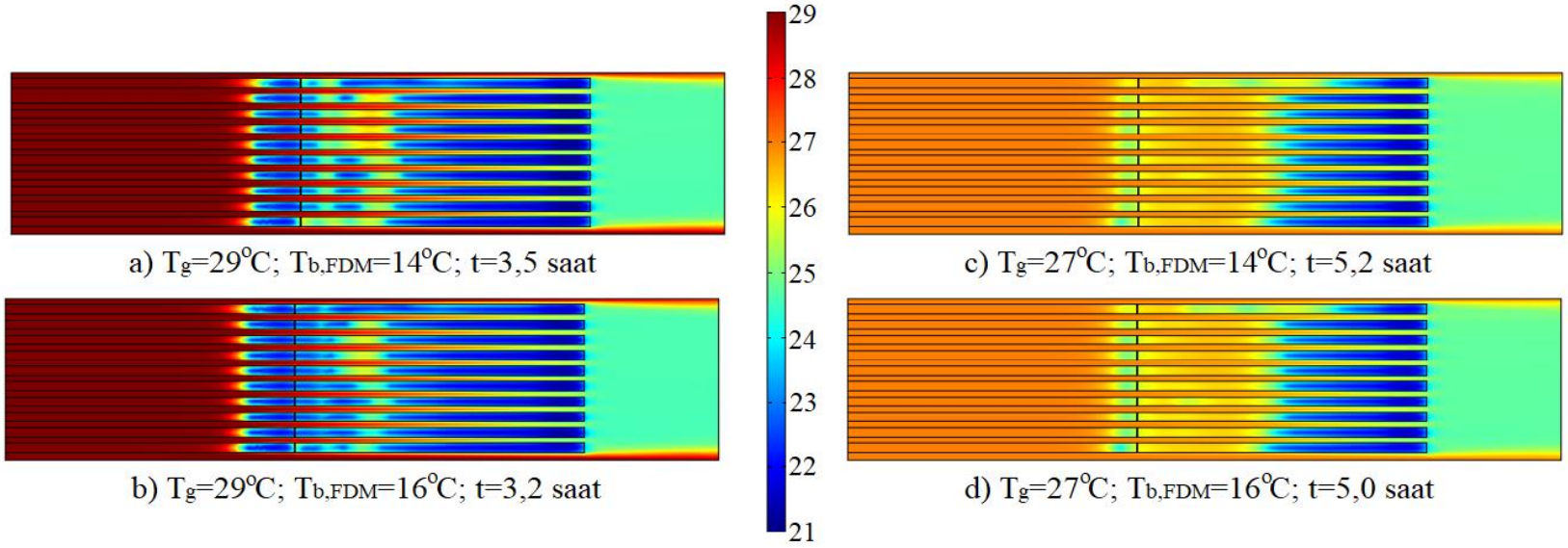
Şekil 4.37. $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

4.5. FDM Başlangıç Sıcaklığının Etkisi

Bu bölümde FDM başlangıç sıcaklığının; ortalama kanal çıkış sıcaklığı, FHID'nin soğutma gücü ve etkenliği ile FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı üzerindeki etkileri, Durum 1 ve Durum 2 için sıcaklık dağılımlarının yardımıyla deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Kanal giriş hızı 1,8 m/s, seri dizilimli levhalar arasındaki

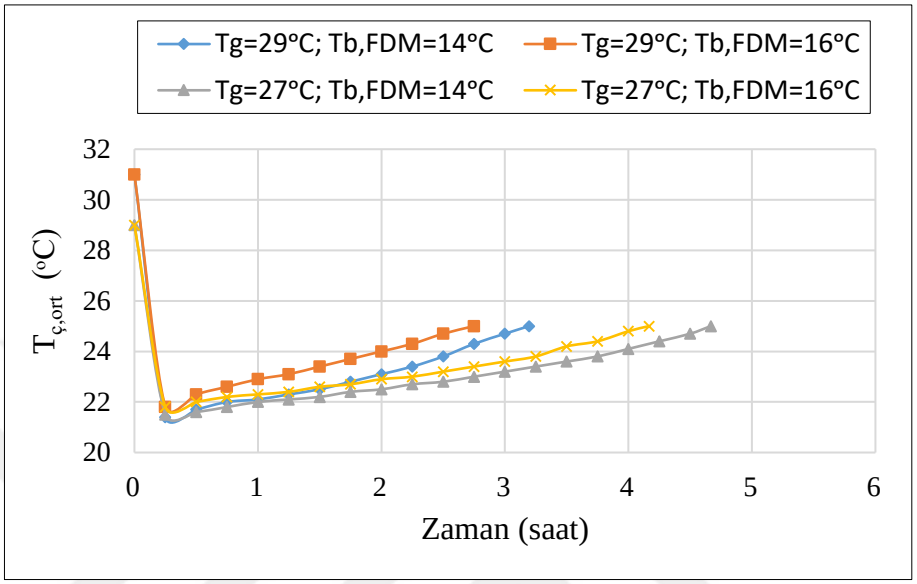
mesafe L_g=0 m, kanal giriş sıcaklıkları 27°C ve 29°C ve FDM başlangıç sıcaklıkları Durum1 için 14°C ve 16°C, Durum2 için 16°C ve 18°C olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.38'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları Durum1 olarak verilmektedir. FDM başlangıç sıcaklığının her iki hava giriş sıcaklığında artması ile $T_{ç,ort}$=25°C'ye erişme sürelerinin kısaldığı görülmektedir. Çünkü yüksek başlangıç sıcaklığı, FDM'nin erime sıcaklık aralığına daha yakın olacağından dolayı erimesi kısa sürede olmaktadır. Sabit giriş sıcaklıklarında, FDM başlangıç sıcaklığının 2°C değişmesi sistemin erime oranlarında pek bir değişikliğe yol açmamıştır.

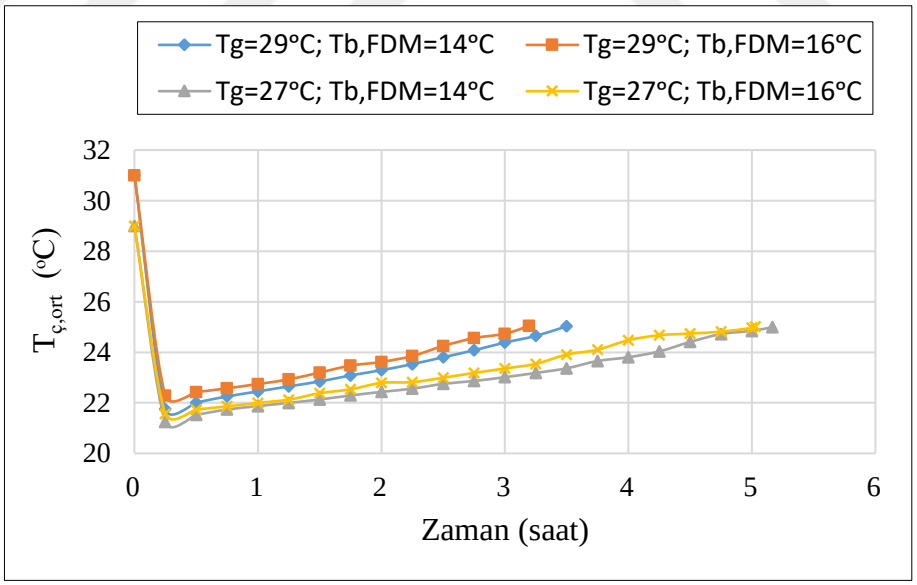


Şekil 4.38. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1.

Şekil 4.39'da V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.40'ta ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. FDM başlangıç sıcaklığının 2°C artması, her iki giriş sıcaklığına sahip sistemde, istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresini yaklaşık 30 dk kısaltmaktadır.



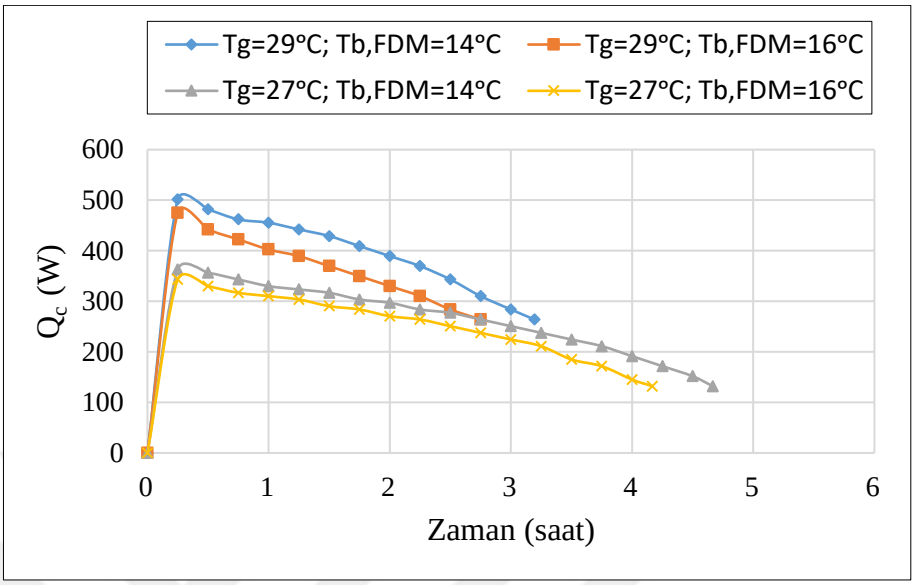
Şekil 4.39. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



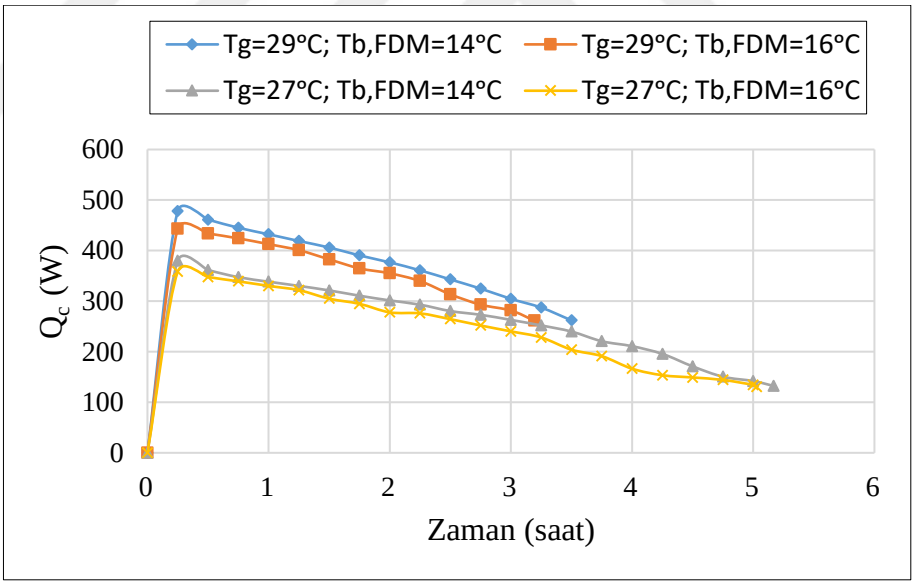
Şekil 4.40. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.41'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.42'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. FDM'nin

sistemde daha düşük sıcaklıkta başlaması, soğuğu daha fazla depoladığından dolayı, sistemin soğutma gücünü az miktar da olsa artırmaktadır.



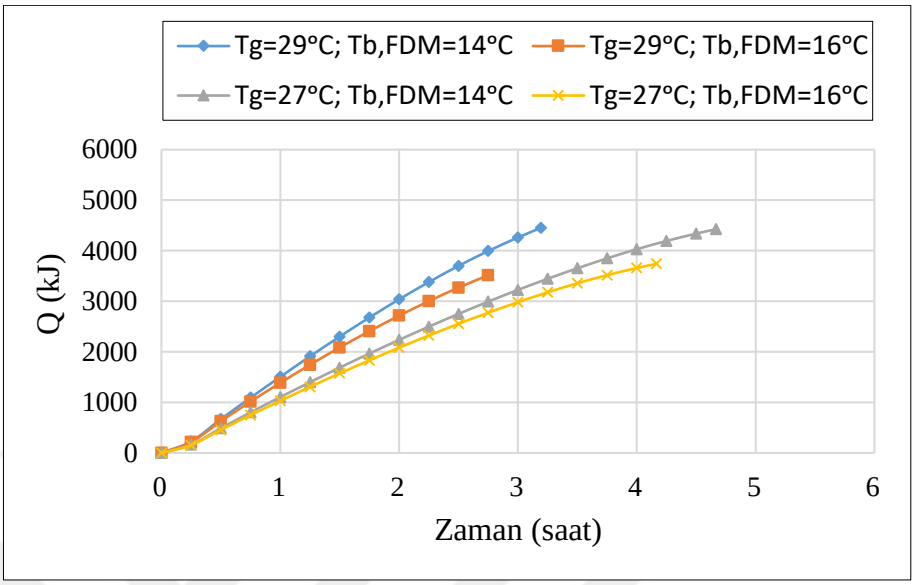
Şekil 4.41. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



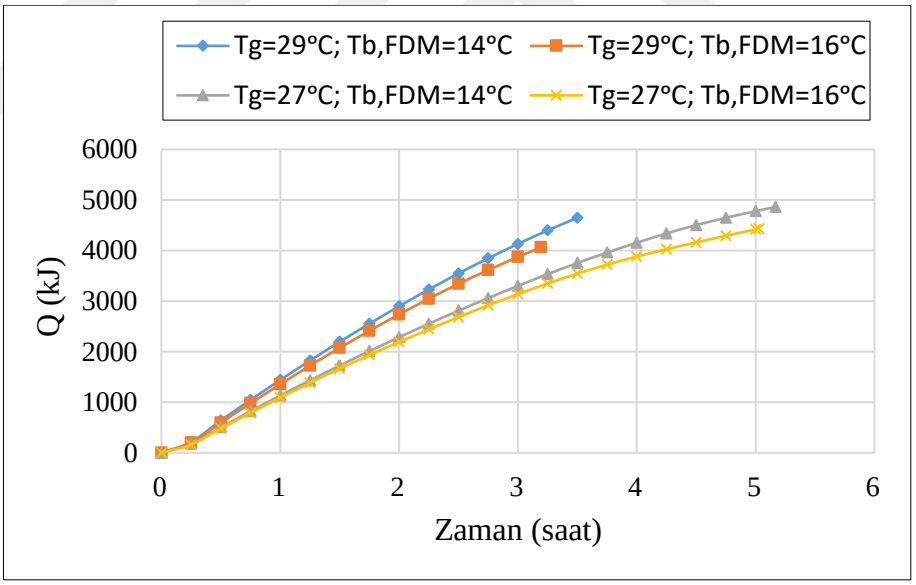
Şekil 4.42. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.43'te V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.44'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonunda, FDM başlangıç sıcaklığının düşük olduğu sistemlerdeki malzemelerin ısıyı daha çok absorbe ettikleri görülmektedir. Bu durumun

nedeni, sisteme giren hava sıcaklığı ile FDM başlangıç sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının büyük olmasından kaynaklanmasıdır.



Şekil 4.43. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



Şekil 4.44. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

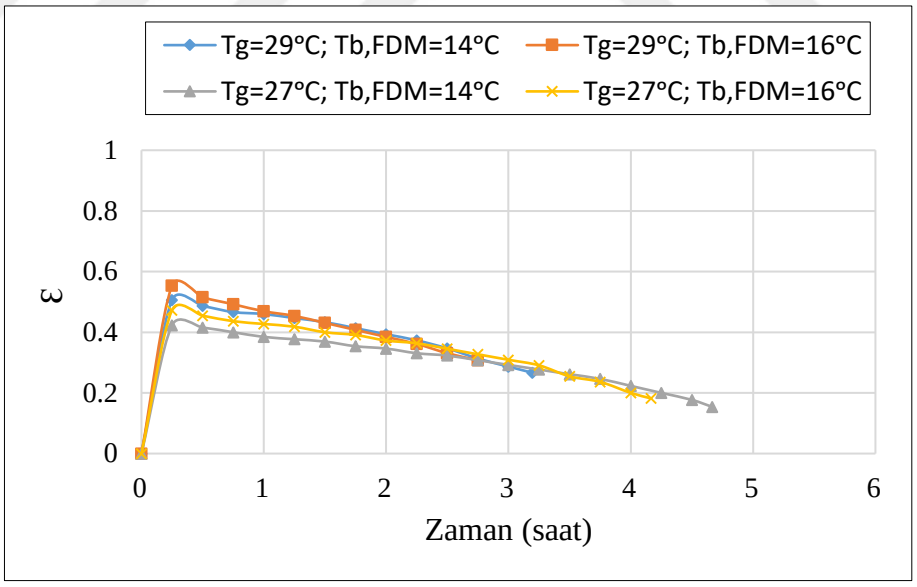
Kısa süreli zaman içerisinde (2,8 saat), Şekil 4.43'te en düşük süre dikkate alındığında, yüksek hava giriş sıcaklığına ve düşük FDM başlangıç sıcaklığına sahip sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin, daha çok ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Çizelge 4.7'de verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.7. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ].

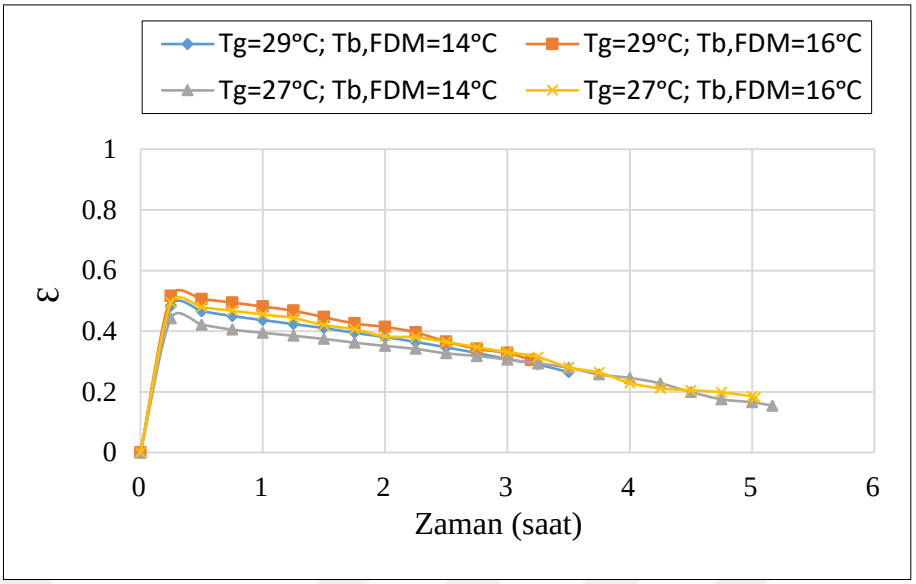
T_g=29°C $T_{b,FDM}$=14°C (t=2,8 sa/3,2 sa)	T_g=29°C $T_{b,FDM}$=16°C (t=2,8 sa)	T_g=27°C $T_{b,FDM}$=14°C (t=2,8 sa/4,7 sa)	T_g=27°C $T_{b,FDM}$=16°C (t=2,8 sa/4,2 sa)
Q_{ks}=3994/Q_t=4453	Q_t=3516	Q_{ks}=2993/Q_t=4423	Q_{ks}=2773/Q_t=3741

Şekil 4.45'te V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.46'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. İncelenen şartlar altında FDM'nin başlangıç sıcaklığının 2°C artması ile ortalama etkenliğin arttığı görülmüştür. Böylece maksimum soğutma potansiyeline erişme süresinin azalacağı sonucuna varılmaktadır.

Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının en fazla olduğu sistemin ortalama etkenliğinin 0,38 olduğu ve yaklaşık 2 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür. Kısa süreli zaman içerisinde, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C) ortalama etkenliğinin 0,40 olduğu ve yaklaşık 2 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür.

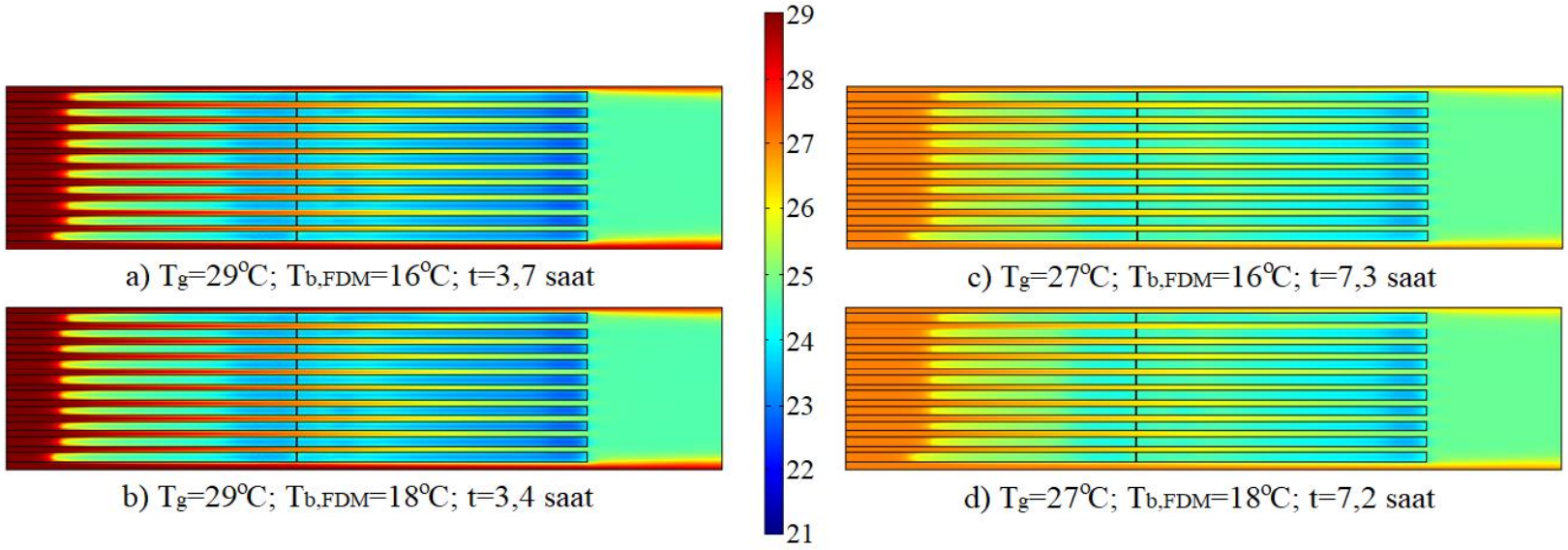


Şekil 4.45. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



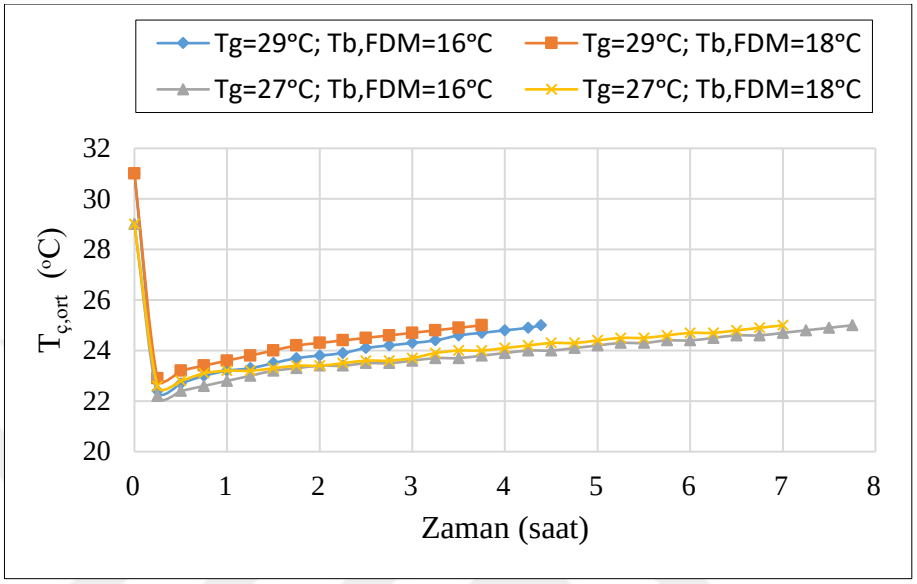
Şekil 4.46. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

RT25HC'nin, aynı şartlar altında FHID üzerindeki etkileri bu kısımda incelenmektedir. Şekil 4.47'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için, sıcaklık konturları Durum2 olarak verilmektedir. Aynı hava giriş sıcaklıklarında, FDM'nin erime süreçlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.

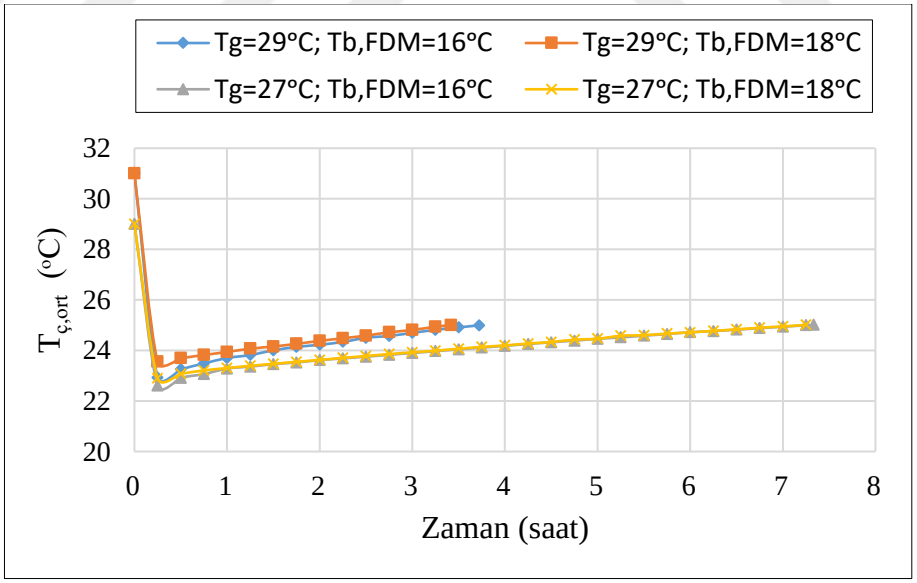


Şekil 4.47. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2.

Şekil 4.48'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.49'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. FDM başlangıç sıcaklığının 2°C artması ile istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresinin T_g=29°C'de 35 dk, T_g=27°C'de ise yaklaşık 50 dk kısaldığı görülmüştür.



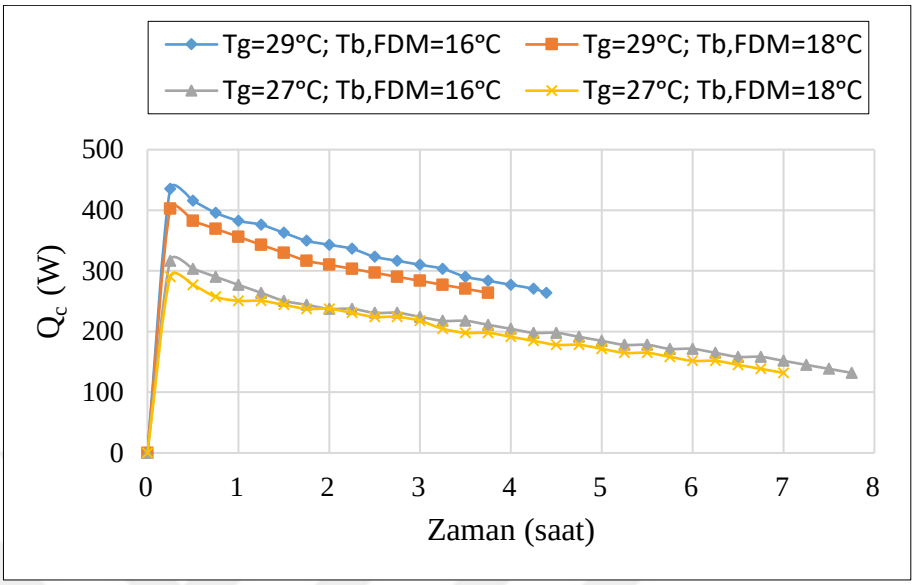
Şekil 4.48. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



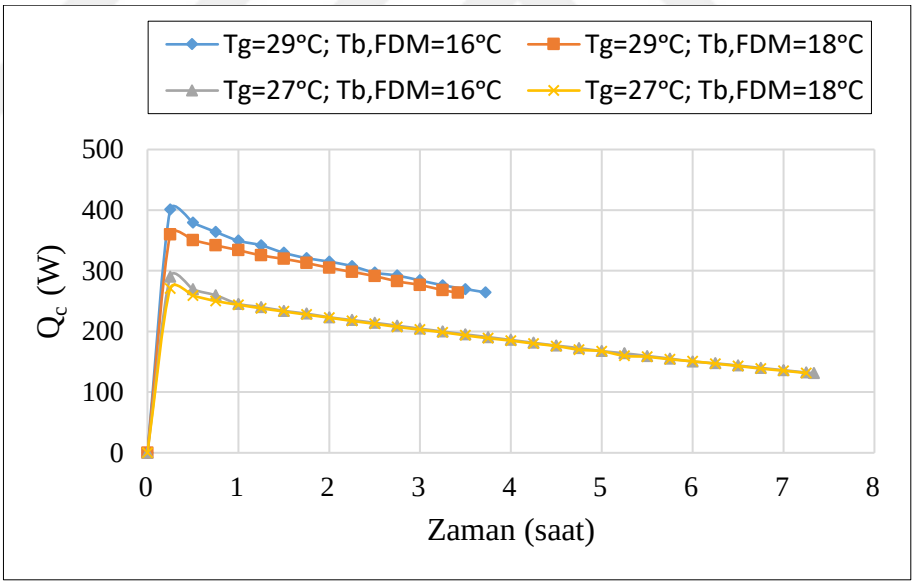
Şekil 4.49. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.50'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.51'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Durum1'e

kıyasla, ortalama soğutma gücünün biraz daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, Durum2'nin erime oranının daha küçük olmasıdır.



Şekil 4.50. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



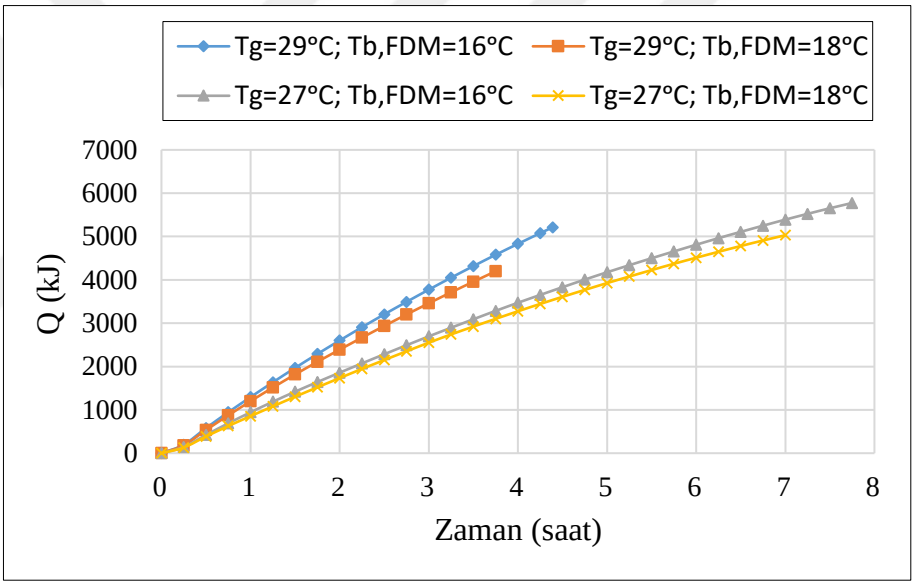
Şekil 4.51. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.52'de V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonu Durum1'e göre kıyaslandığında, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının Durum2'de daha fazla olduğu görülmektedir. Kısa süreli zaman içerisinde (3,8 saat), Şekil 4.52'de en düşük süre dikkate alındığında, yüksek hava giriş

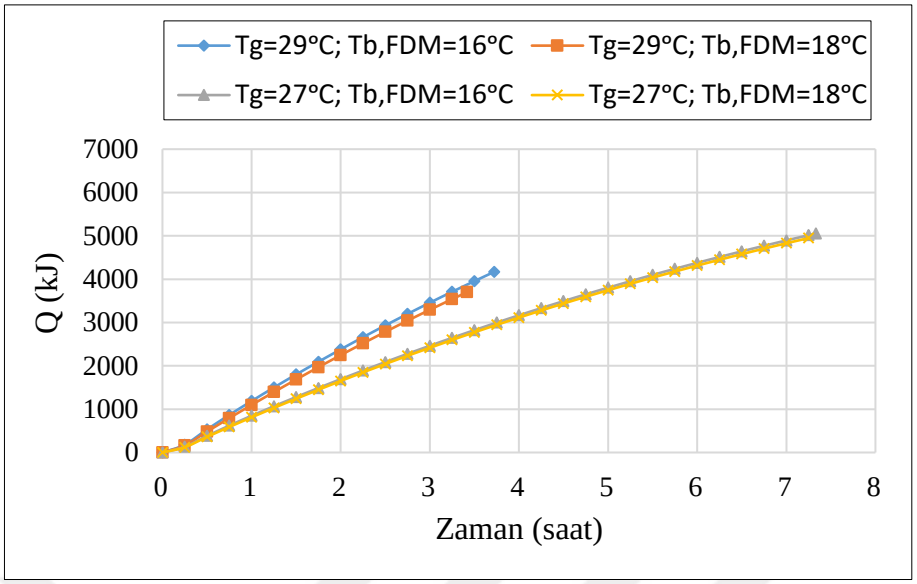
sıcaklığına ve düşük FDM başlangıç sıcaklığına sahip sistemde bulunan faz değiştiren malzemelerin, daha çok ısıyı absorbe ettiği görülmektedir. Çizelge 4.7'de verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.

Çizelge 4.8. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ].

T_g=29°C $T_{b,FDM}$=16°C (t=3,8 sa/4,4 sa)	T_g=29°C $T_{b,FDM}$=18°C (t=3,8 sa)	T_g=27°C $T_{b,FDM}$=16°C (t=3,8 sa/7,8 sa)	T_g=27°C $T_{b,FDM}$=18°C (t=3,8 sa/7,0 sa)
Q_{ks}=4578/Q_t=5211	Q_t=4198	Q_{ks}=3284/Q_t=5774	Q_{ks}=3100/ Q_t=5030



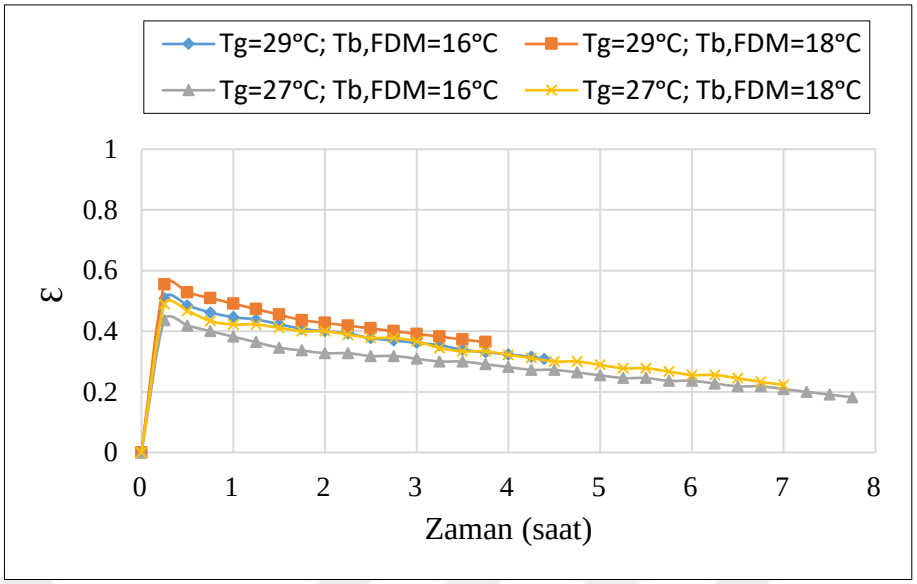
Şekil 4.52. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



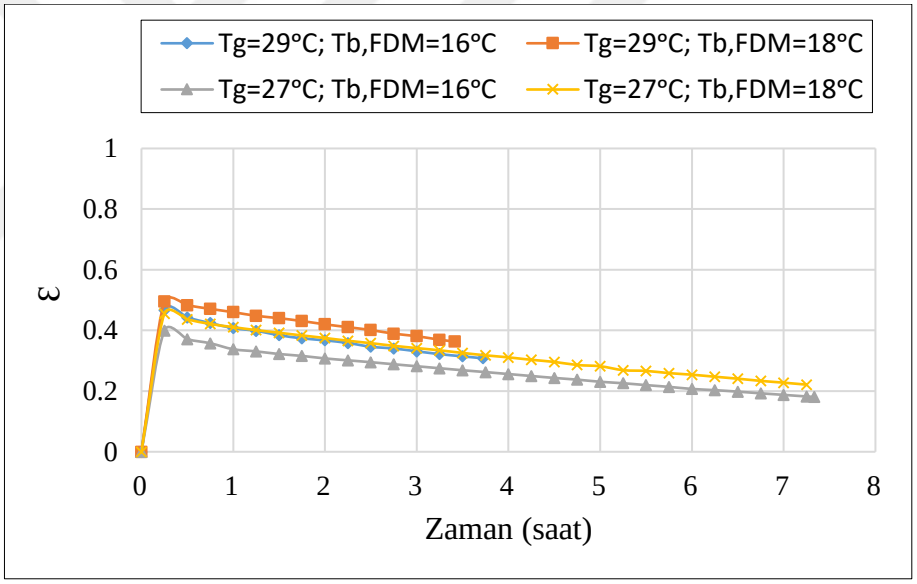
Şekil 4.53. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.54'te V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.55'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. İncelenen şartlar altında, FDM'nin başlangıç sıcaklığının 2°C artması ile ortalama etkenliğin arttığı görülmüştür.

Süreç sonunda, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=27°C, $T_{b,FDM}$=16°C) ortalama etkenliğinin 0,28 olduğu ve yaklaşık 4 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür. Kısa süreli zaman içerisinde, FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının en fazla olduğu sistemin (T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C) ortalama etkenliğinin 0,37 olduğu ve yaklaşık 2,8 saat bu değerin üzerinde çalıştığı görülmüştür.



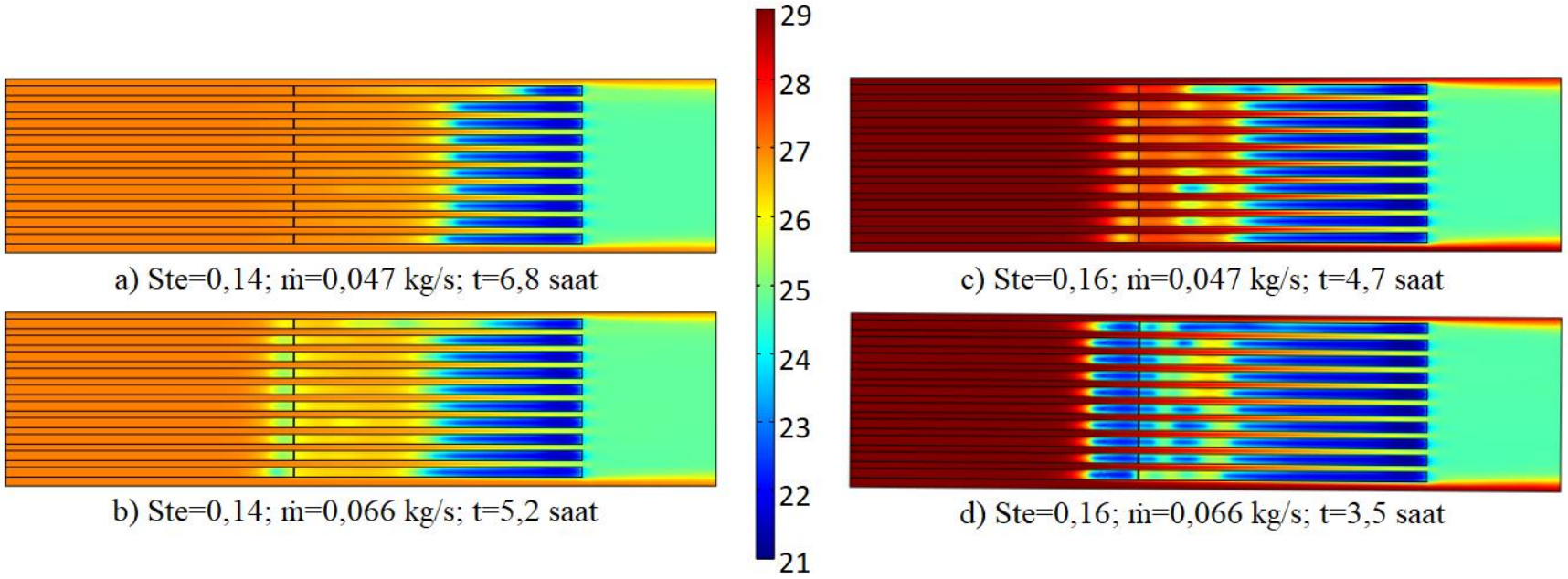
Şekil 4.54. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



Şekil 4.55. V_g=1,8 m/s, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

4.6. Ste Sayısının Etkisi

Bu bölümde Ste sayısının ve kütlesel debinin; ortalama kanal çıkış sıcaklığı, FHID'nin soğutma gücü ve etkenliği ile FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarı üzerindeki etkileri, Durum1 ve Durum2 için sıcaklık dağılımlarının yardımıyla deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Şekil 4.56'da $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık dağılımları Durum1 olarak verilmektedir.



Şekil 4.56. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1.

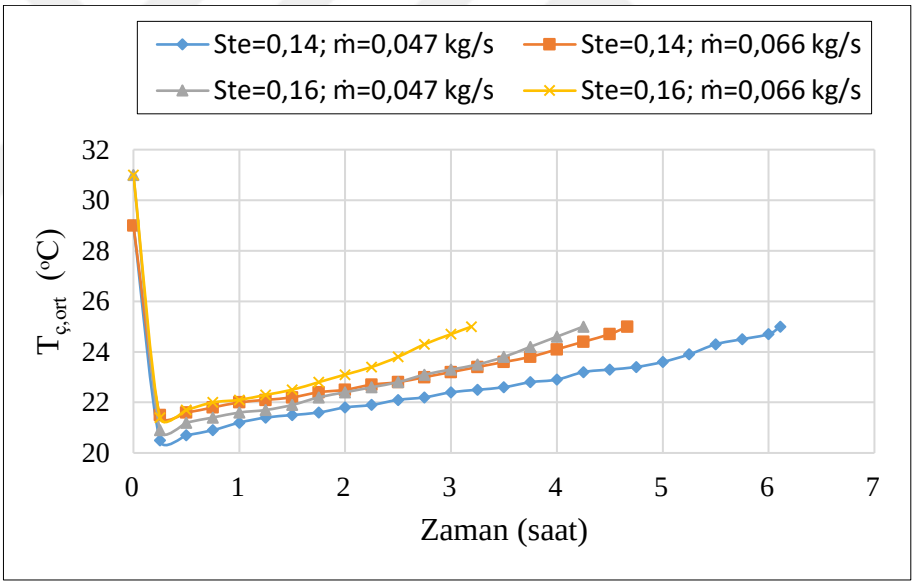
Sistemin başlangıç şartları Çizelge 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.9. Sistemin başlangıç şartları.

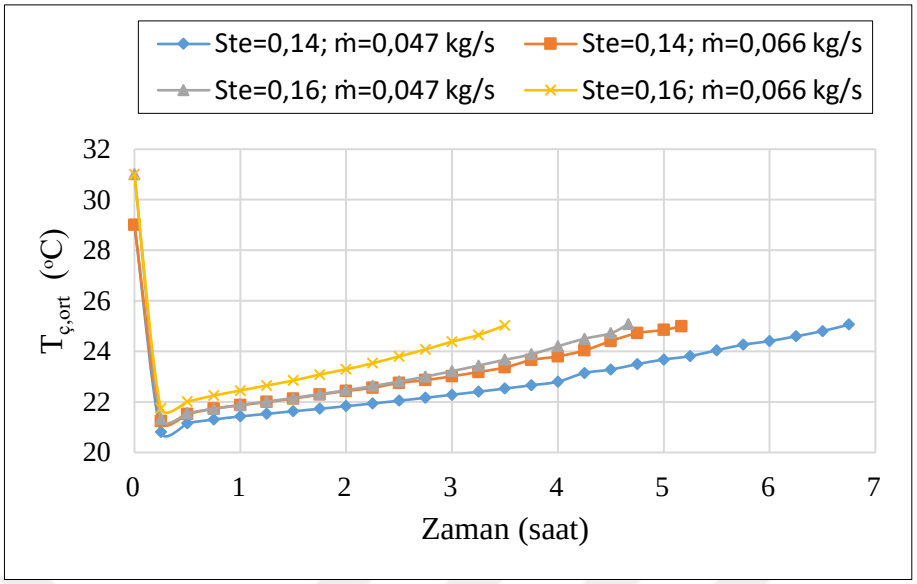
Malzeme	$T_{b,FDM}$ (°C)	L_g (m)	Ste	ṁ (kg/s)
RT22HC	14	0 / 0,2	0,14 / 0,16	0,047 / 0,066
RT25HC	16	0 / 0,2	0,11 / 0,13	0,047 / 0,066

Sabit Ste sayısında debinin ve sabit debide Ste sayısının artması, sistemin erime süresini azaltmaktadır. Sabit Ste sayısında, debinin azalması süreyi artıracağından dolayı, faz değiştiren malzemelerin erime oranlarını artırmaktadır.

Şekil 4.57'de $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.58'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Ste sayısının ve debinin artması ortalama çıkış sıcaklığına erişme süresini %48 oranında azaltmaktadır.

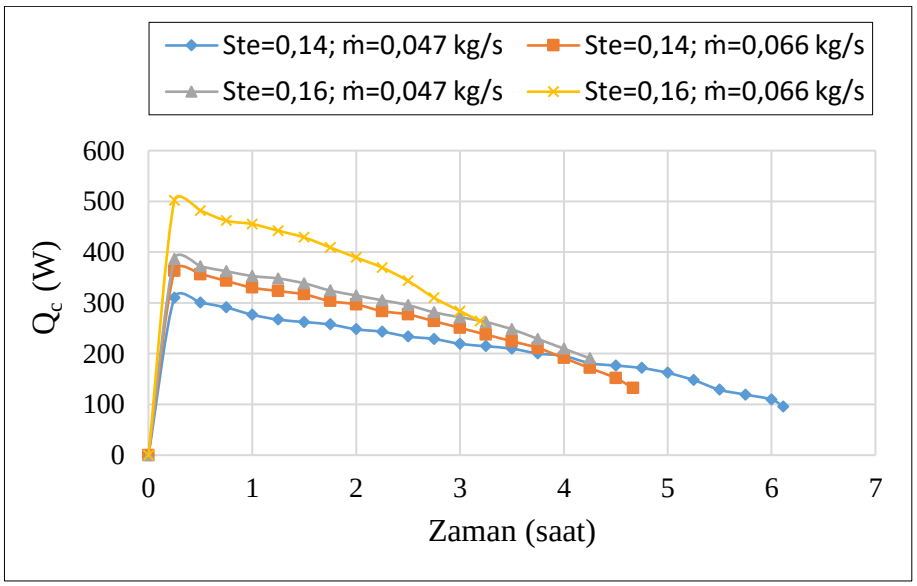


Şekil 4.57. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

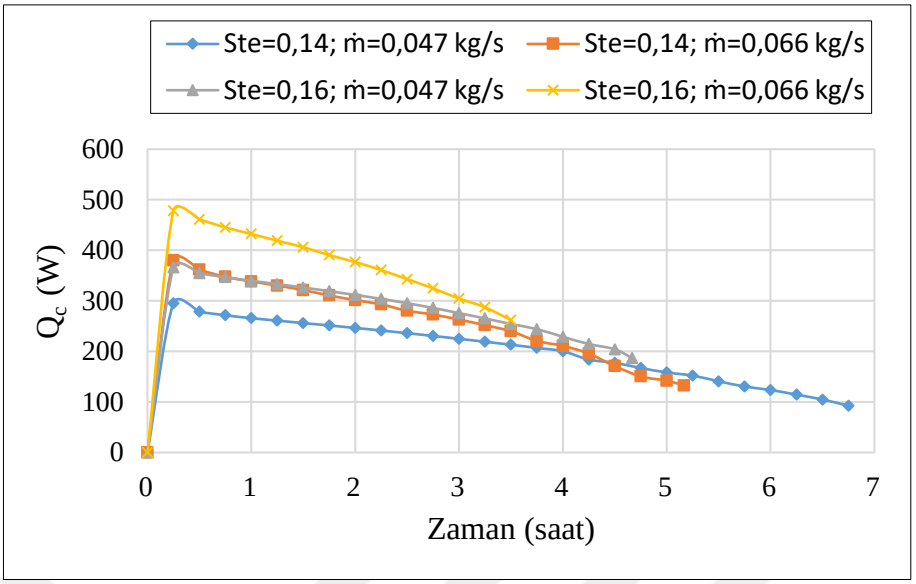


Şekil 4.58. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.59'da $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.60'ta ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Sabit Ste sayısında debiyi artırmanın ve sabit debide Ste sayısını artırmanın soğutma gücünü yukarı seviyelerde tuttuğu görülmüştür. Kısa süreli kullanımda soğutma gücünü artırmanın yolunun, Ste sayısını veya kütle akış hızını artırmakla mümkün olacağı görülmektedir.



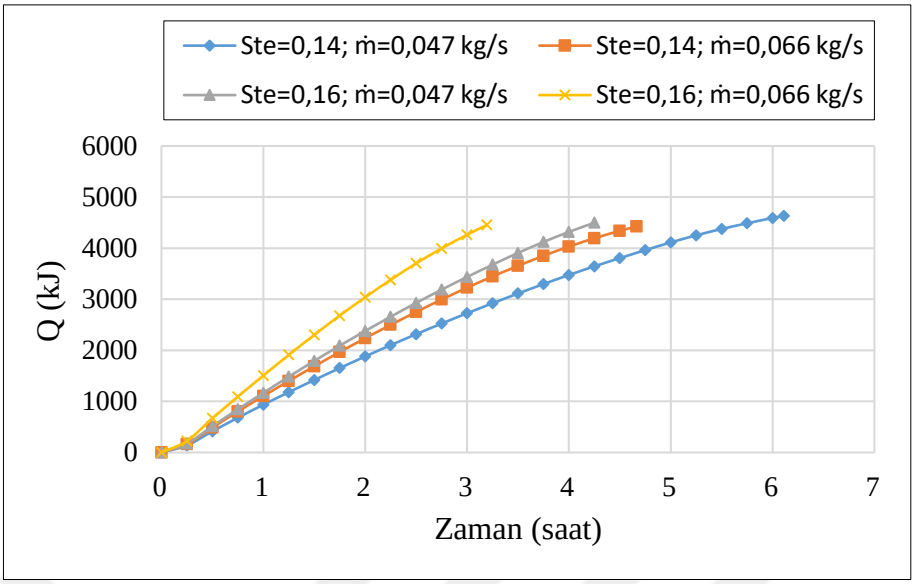
Şekil 4.59. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



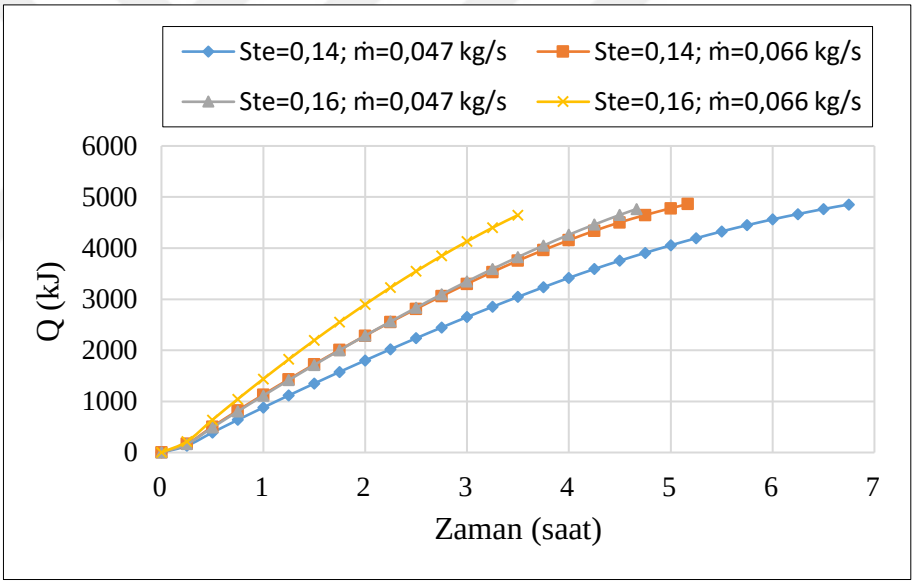
Şekil 4.60. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Kütle akış hızı artırılarak çıkış sıcaklığı artırılır ve kanal giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı azalmış olur. Çıkış sıcaklığını değiştirmede, kütle akış hızının etkisi, Denklem 3.19'a göre soğutma gücü bazındaki doğrudan etkisinden daha düşüktür. Bu nedenle, daha yüksek bir soğutma gücü gerektiğinde, büyük bir alan için daha yüksek bir kütle akış hızı daha uygun olmaktadır. Küçük bir mahalde, yüksek sıcaklık farkı gerektiğinde, düşük bir kütle akışı yeterli olmaktadır.

Şekil 4.61'de $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.62'de ise nümerik olarak değişimi değişimi verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, süreç sonunda absorbe edilen toplam ısı miktarlarının, her durumda birbirlerine yakın değerlerde olduğunu göstermiştir. Kısa süreli zaman içerisinde, Ste sayısının ve debinin daha yüksek olduğu durumlarda, FDM'nin absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının daha fazla olduğu sonucuna varılmaktadır. Çizelge 4.10'da verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.



Şekil 4.61. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

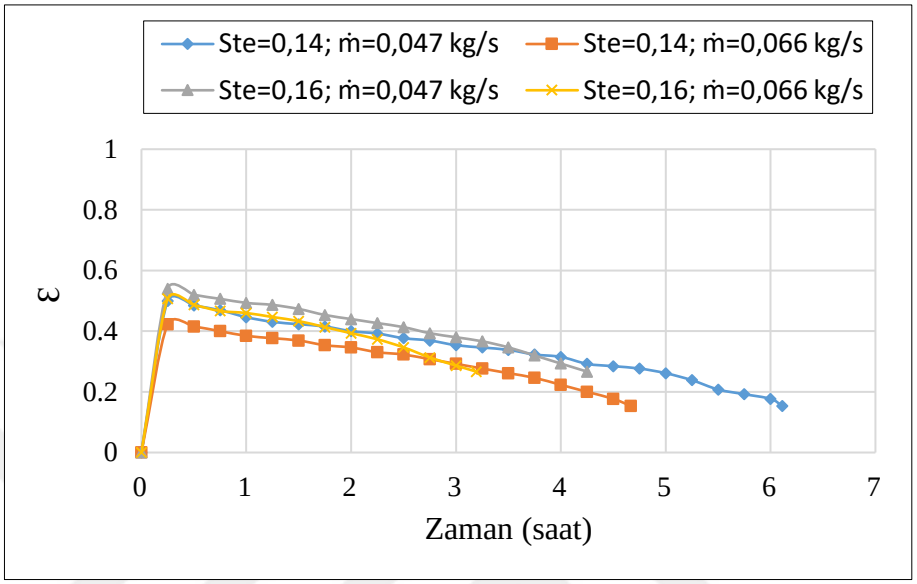


Şekil 4.62. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

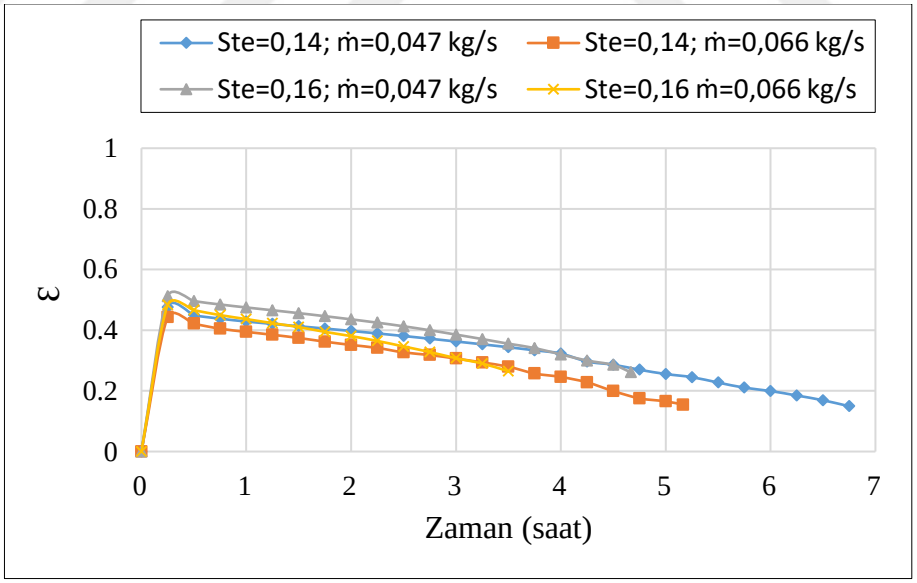
Çizelge 4.10. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ].

Ste=0,14 ṁ=0,047 kg/s (t=3,2 sa/6,1 sa)	Ste=0,14 ṁ=0,066 kg/s (t=3,2 sa/4,7 sa)	Ste=0,16 ṁ=0,047 kg/s (t=3,2 sa/4,3 sa)	Ste=0,16 ṁ=0,066 kg/s (t=3,2 sa)
Q_{ks}=2920/Q_t=4630	Q_{ks}=3444/Q_t=4423	Q_{ks}=3675/Q_t=4497	Q_t=4453

Şekil 4.63'te $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.64'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Ortalama etkenliğin en fazla olduğu durumun, sabit Ste sayılarında düşük debili sistemde; sabit debili sistemlerde ise yüksek Ste sayısına sahip sistemde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.63. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



Şekil 4.64. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

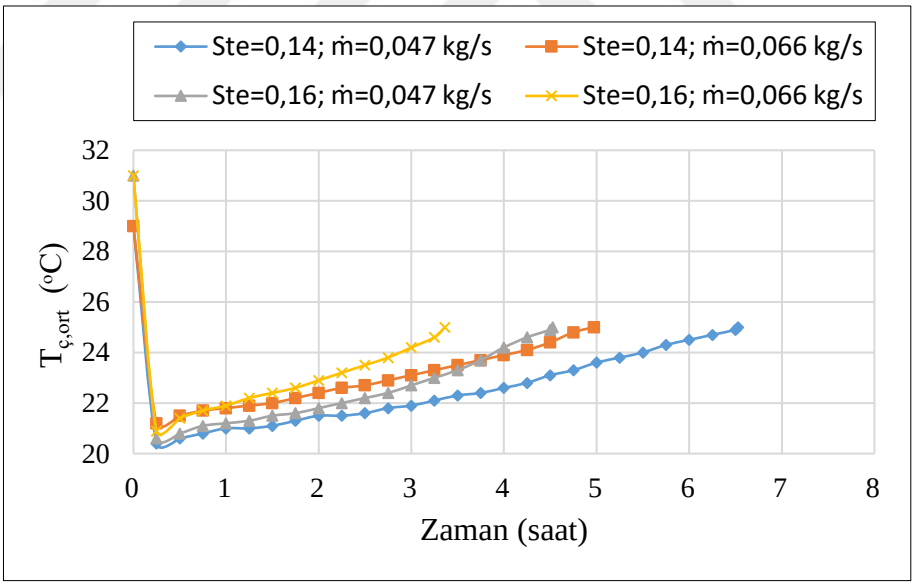
Çizelge 4.11'de verilen durumlar için ortalama etkenlik değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.11. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri, Durum1.

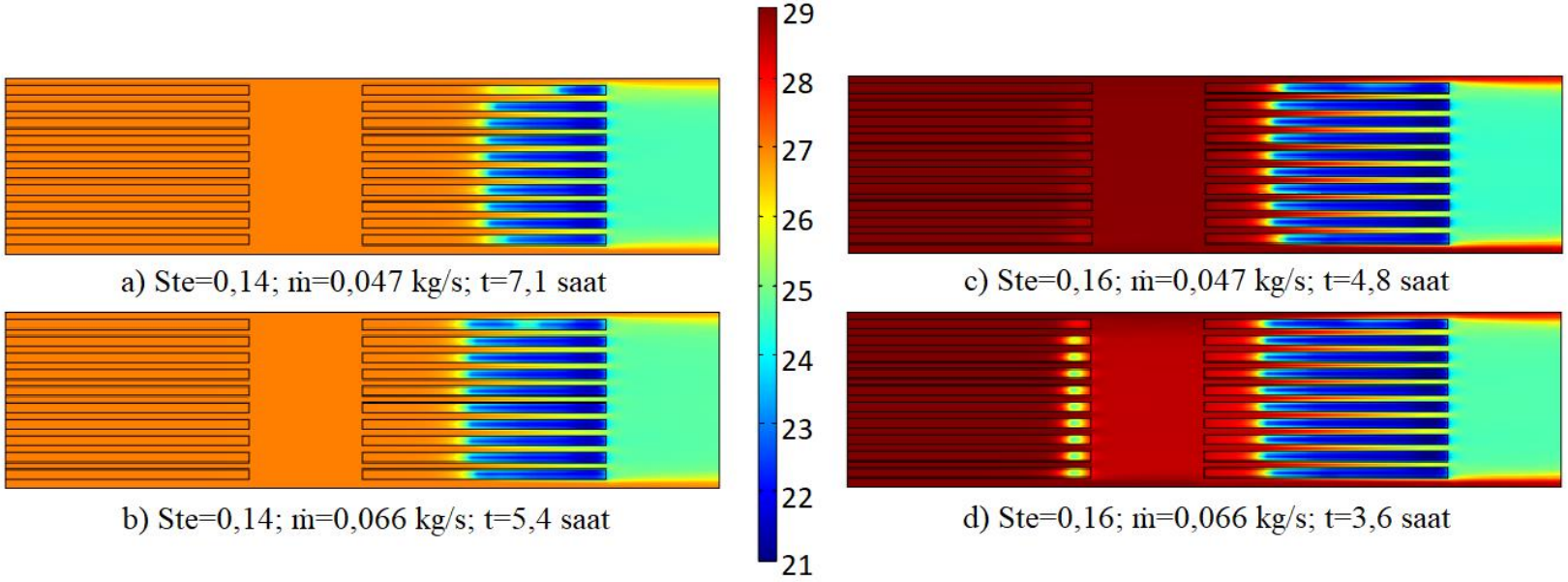
Ste=0,14 ṁ=0,047 kg/s	Ste=0,14 ṁ=0,066 kg/s	Ste=0,16 ṁ=0,047 kg/s	Ste=0,16 ṁ=0,066 kg/s
0,33	0,30	0,40	0,37

Bu kısımda, L_g değerinin etkisi incelenmektedir. Şekil 4.65'te $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları Durum1 olarak verilmektedir. Şekil 4.56 ile kıyaslandığında, L_g mesafesinin artmasıyla, istenilen çıkış sıcaklığına erişme süresinin uzadığı ve erime oranının arttığı görülmektedir.

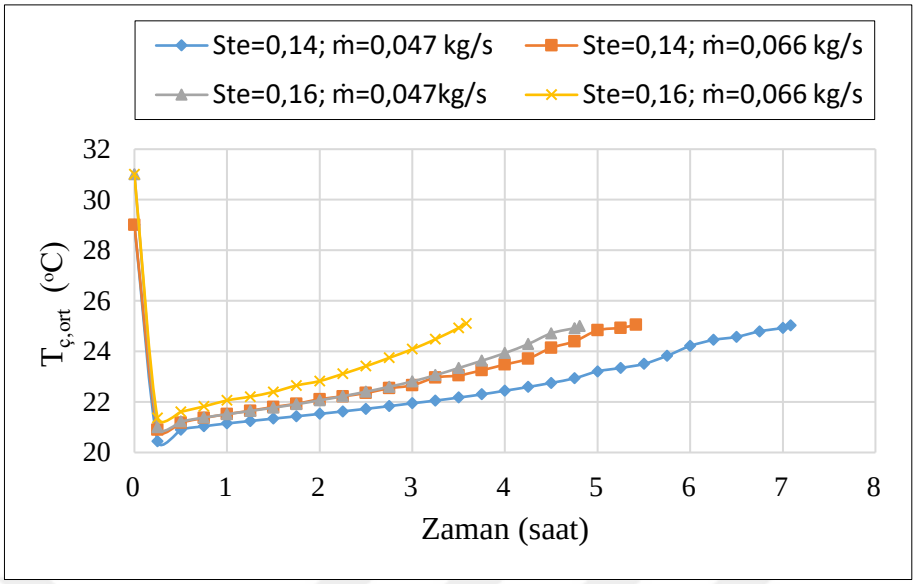
Şekil 4.66'da $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.67'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Önceki durum ile karşılaştırıldığında, erime sürelerinin 12-24 dk arasında değişen sürelerde arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.65. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

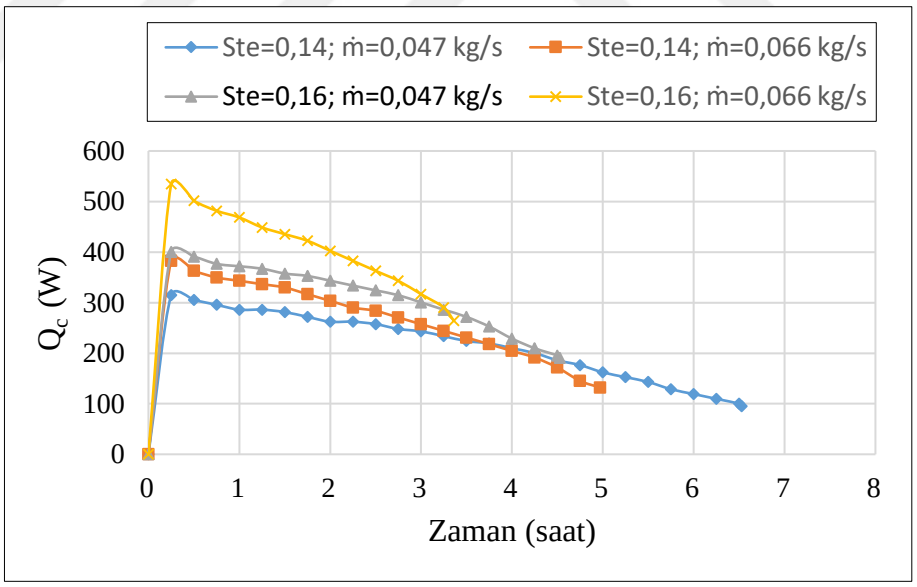


Şekil 4.66. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum1.

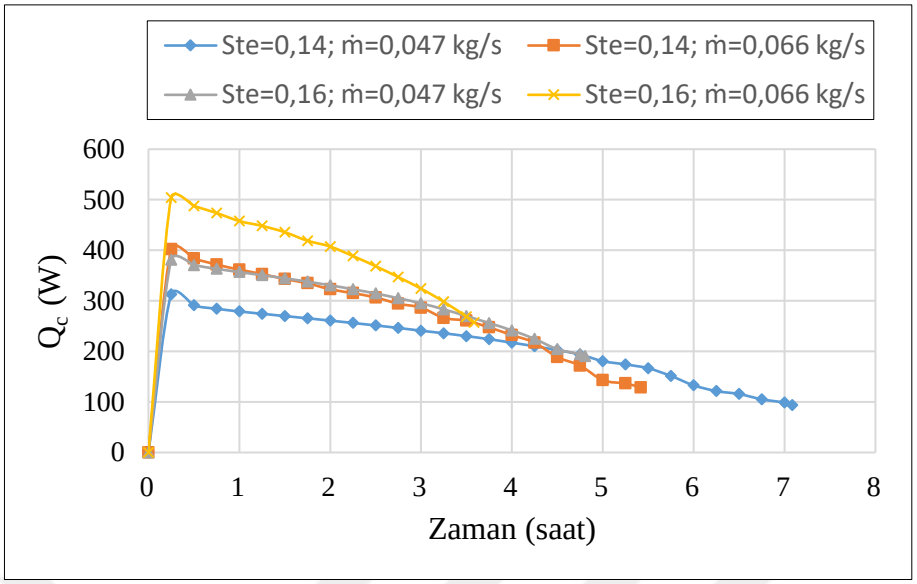


Şekil 4.67. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.68'de $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.69'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g=0 durumuna göre soğutma gücünde çok fazla olmasa da bir artış gözlemlenmiştir.

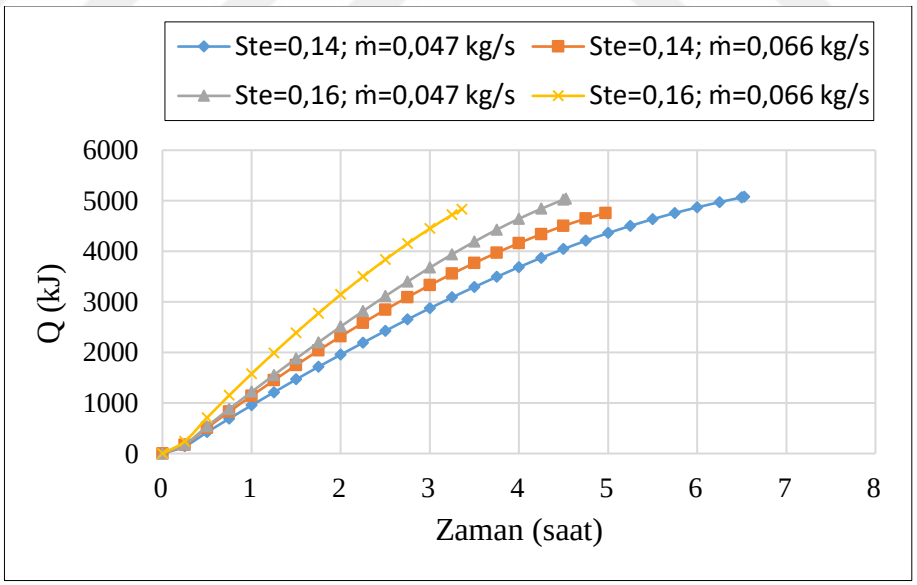


Şekil 4.68. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.

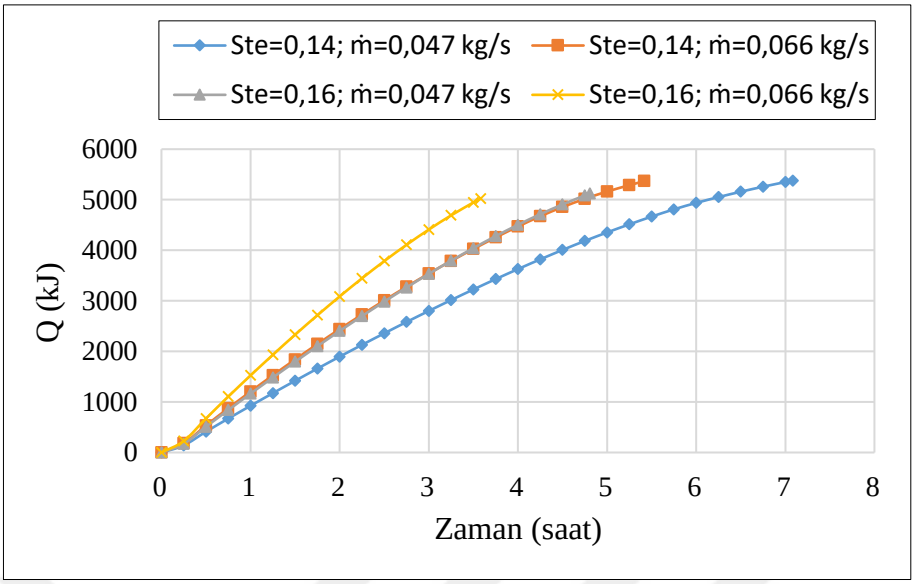


Şekil 4.69. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Şekil 4.70'te $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.71'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, süreç sonunda absorbe edilen toplam ısı miktarlarının 4 durumda da birbirlerine yakın değerlerde olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.70. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



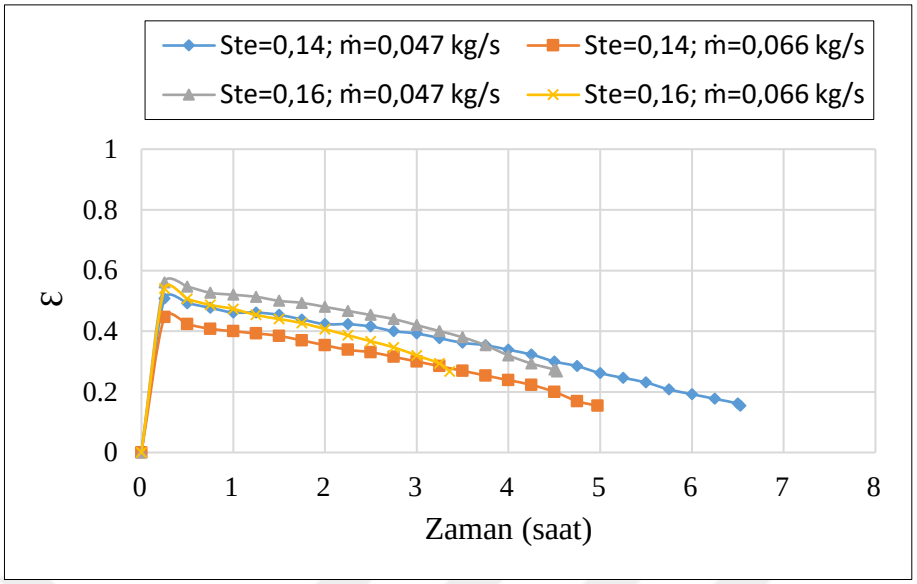
Şekil 4.71. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Önceki duruma kıyasla, L_g mesafesindeki artışla beraber FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının arttığı görülmektedir. Her iki durum için bu değerler ve artış oranları Çizelge 4.12'de verilmektedir.

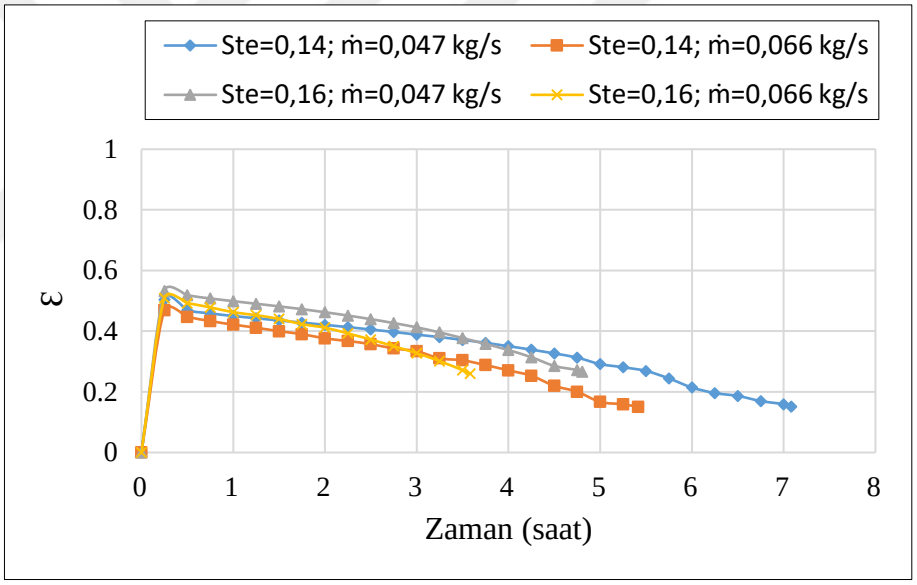
Çizelge 4.12. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları, Durum1 [kJ].

Durum	Q (kJ), (L_g=0 m/L_g=0,2 m)	Artış (%)
Ste=0,14; ṁ=0,047 kg/s	4630 / 5076	%9,6
Ste=0,14; ṁ=0,066 kg/s	4423 / 4755	%7,5
Ste=0,16; ṁ=0,047 kg/s	4497 / 5042	%12,1
Ste=0,16; ṁ=0,066 kg/s	4453 / 4832	%8,5

Şekil 4.72'de $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.73'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Önceki duruma kıyasla, L_g mesafesindeki artışın, ortalama etkenliğin çok az bir miktar artmasına neden olduğu görülmektedir.

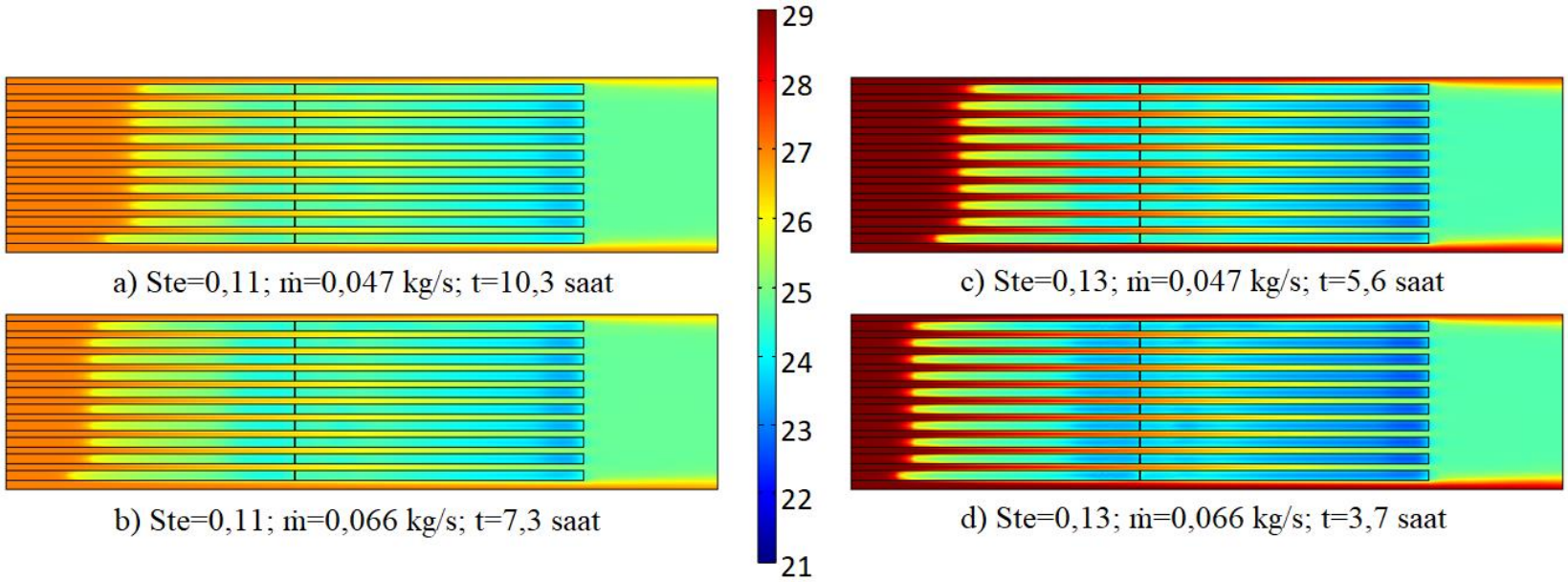


Şekil 4.72. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum1.



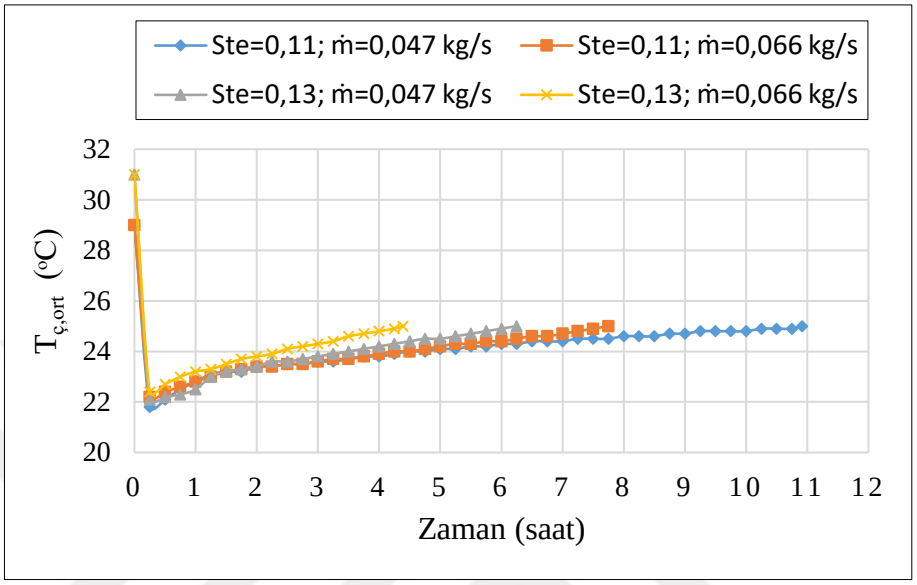
Şekil 4.73. $T_{b,FDM}$=14°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum1.

Bu kısımda, L_g değerinin etkisi Durum2 için incelenmektedir. Şekil 4.74'te $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları verilmektedir. Sabit Ste sayısında debinin azalması ile malzemelerin erime oranının arttığı görülmektedir.

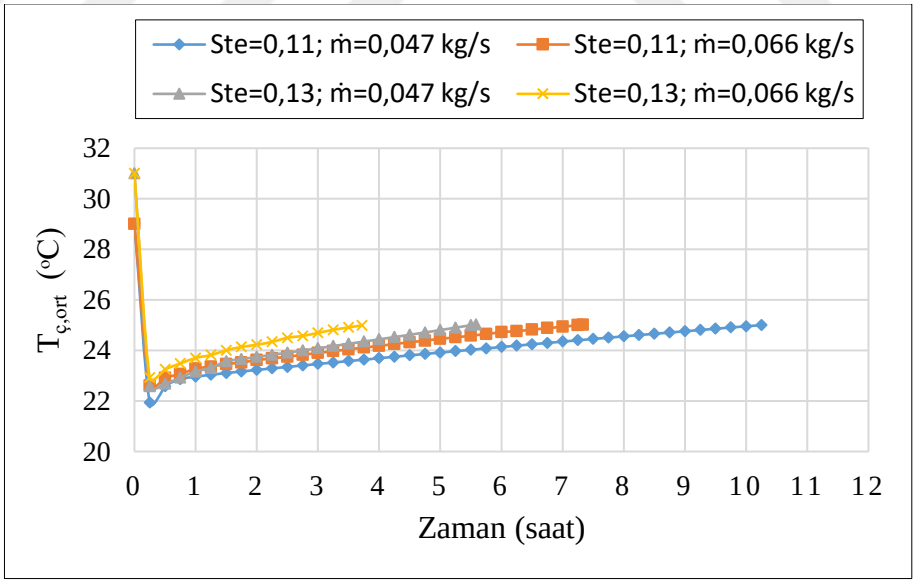


Şekil 4.74. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2.

Şekil 4.75'te $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.76'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Ste sayısının ve debinin artması ortalama çıkış sıcaklığına erişme süresini %43 oranında azaltmaktadır.

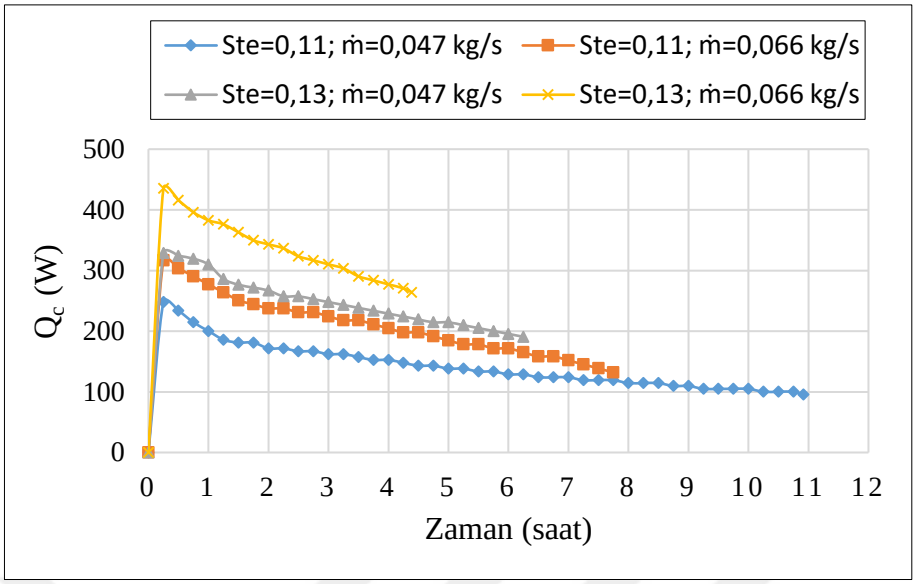


Şekil 4.75. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

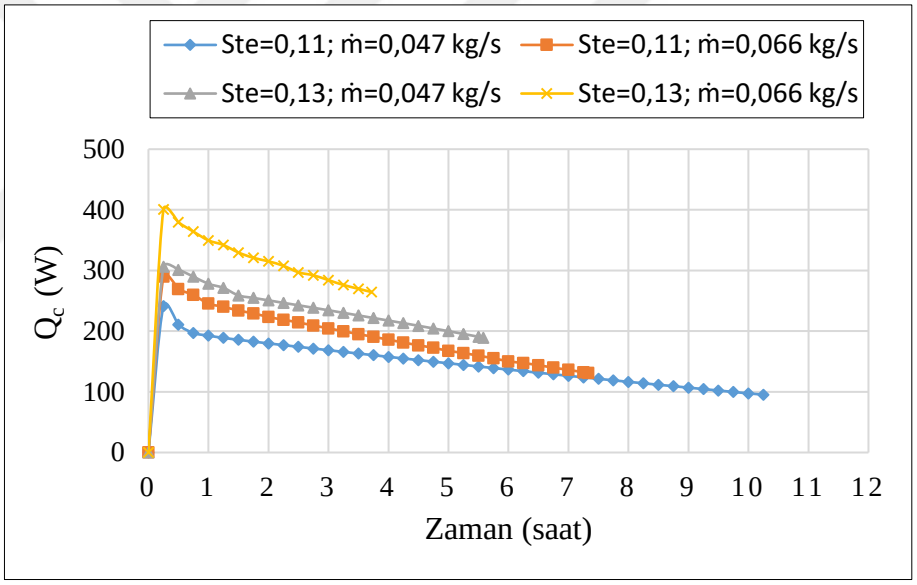


Şekil 4.76. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.77'de $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.78'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Ste sayısı ve debinin artması ile soğutma gücünün arttığı görülmektedir.

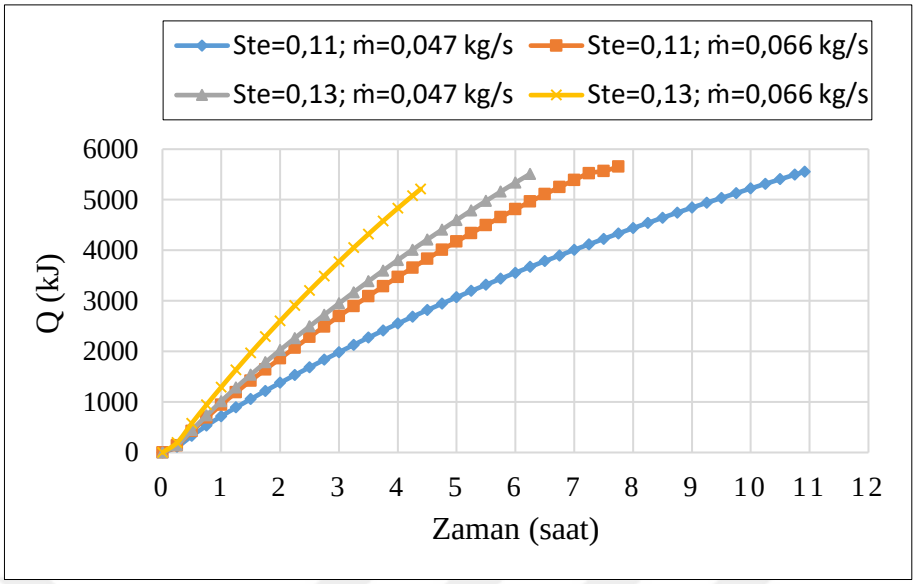


Şekil 4.77. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

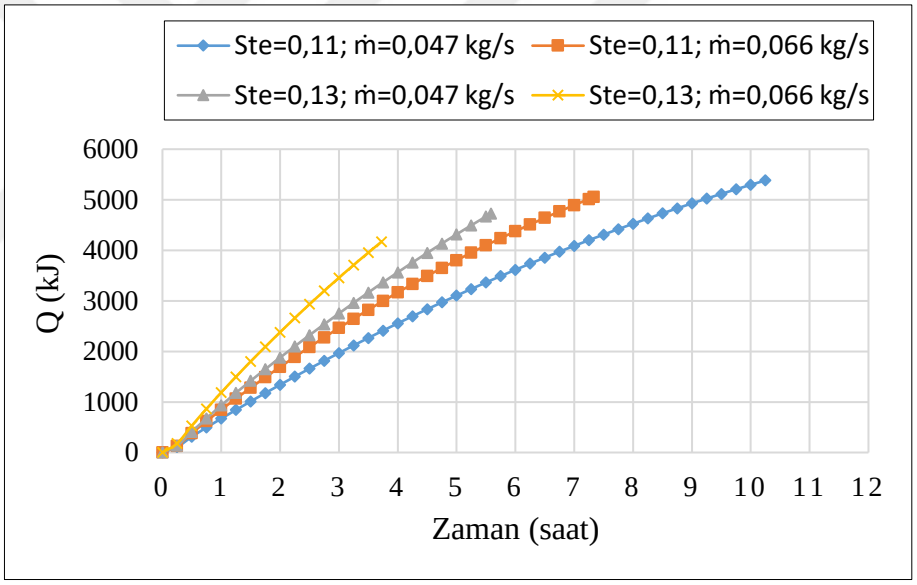


Şekil 4.78. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.79'da $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.80'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonunda, absorbe edilen toplam ısı miktarlarının, her durumda birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.79. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



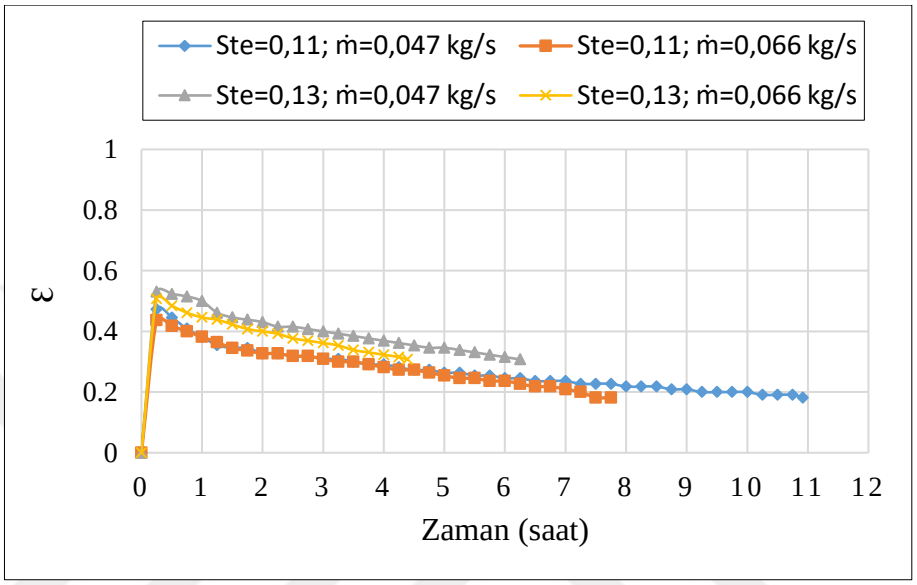
Şekil 4.80. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Çizelge 4.13'te verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM'nin ortamdan çektiği toplam ısı miktarları verilmektedir.

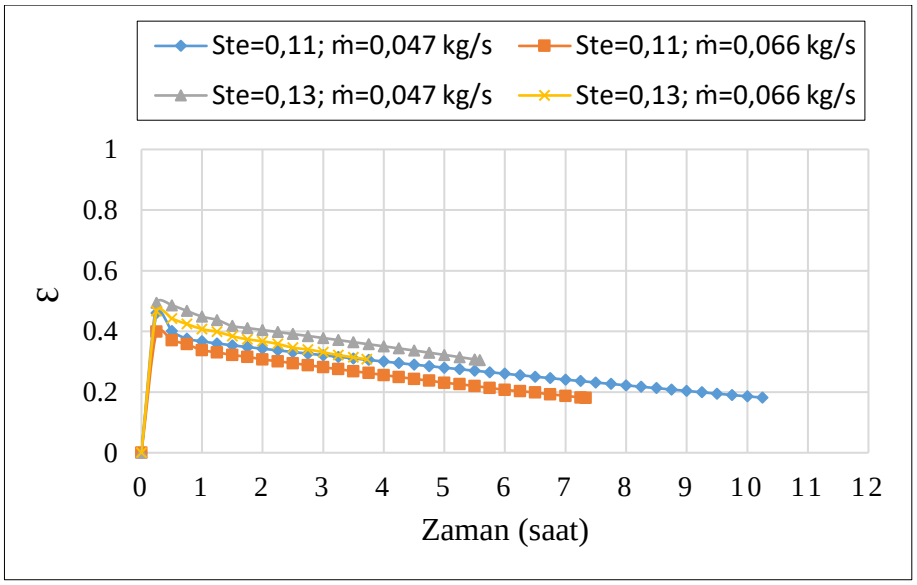
Çizelge 4.13. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ].

Ste=0,11 ṁ=0,047 kg/s (t=4,4 sa/11,0 sa)	Ste=0,11 ṁ=0,066 kg/s (t=4,4 sa/7,8 sa)	Ste=0,13 ṁ=0,047 kg/s (t=4,4 sa/6,3 sa)	Ste=0,13 ṁ=0,066 kg/s (t=4,4 sa)
Q_{ks}=2762/Q_t=5554	Q_{ks}=3759/Q_t=5774	Q_{ks}=4130/Q_t=5511	Q_t=5211

Şekil 4.81'de $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.82'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Sabit Ste sayısında debiyi düşürmenin ve sabit debide Ste sayısını artırmanın ortalama etkenliği artırdığı görülmektedir. Çizelge 4.14'te verilen durumlar için ortalama etkenlik değerleri görülmektedir.



Şekil 4.81. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



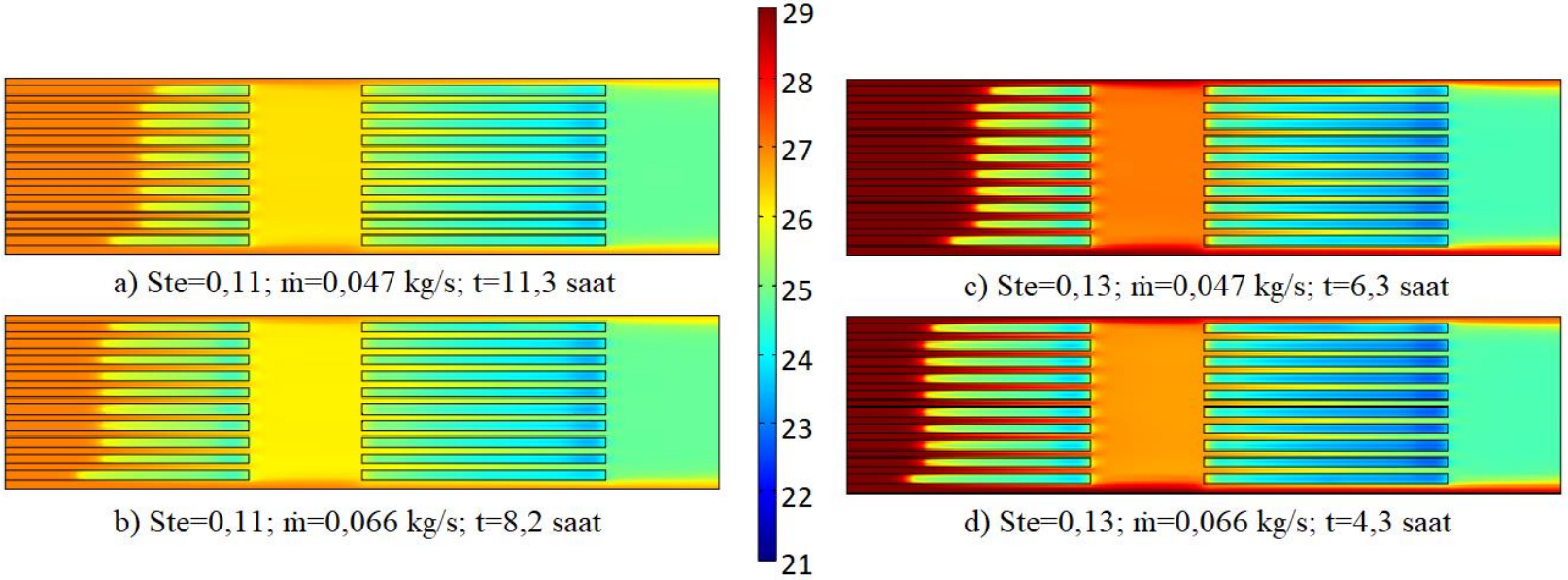
Şekil 4.82. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Çizelge 4.14. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri, Durum2.

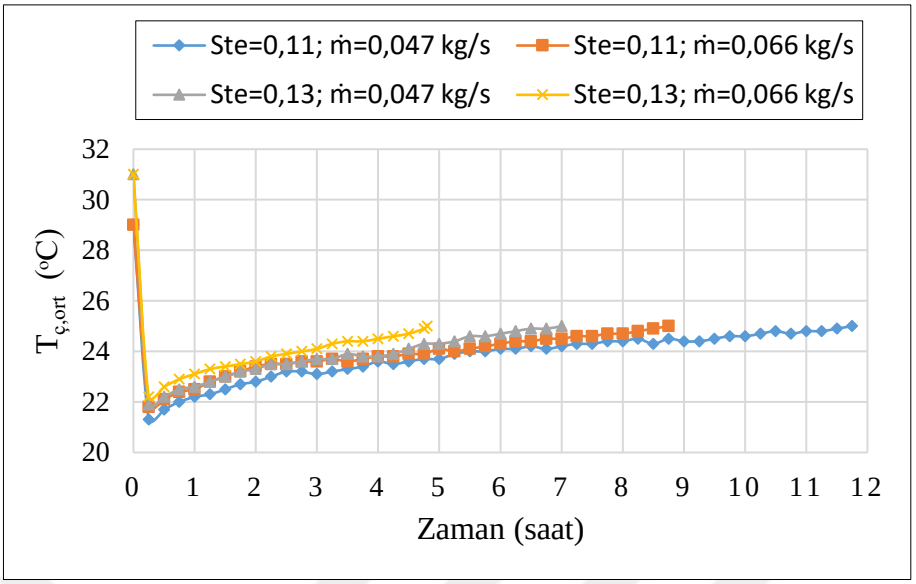
Ste=0,11 ṁ=0,047 kg/s	Ste=0,11 ṁ=0,066 kg/s	Ste=0,13 ṁ=0,047 kg/s	Ste=0,13 ṁ=0,066 kg/s
0,28	0,26	0,39	0,37

Bu kısımda, Lg değerinin Durum2 üzerindeki etkisi incelenecektir. Şekil 4.83'te $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları verilmektedir. Şekil 4.74 ile kıyaslandığında, L_g mesafesinin artmasıyla, erime süresinin ve erime oranının arttığı görülmektedir.

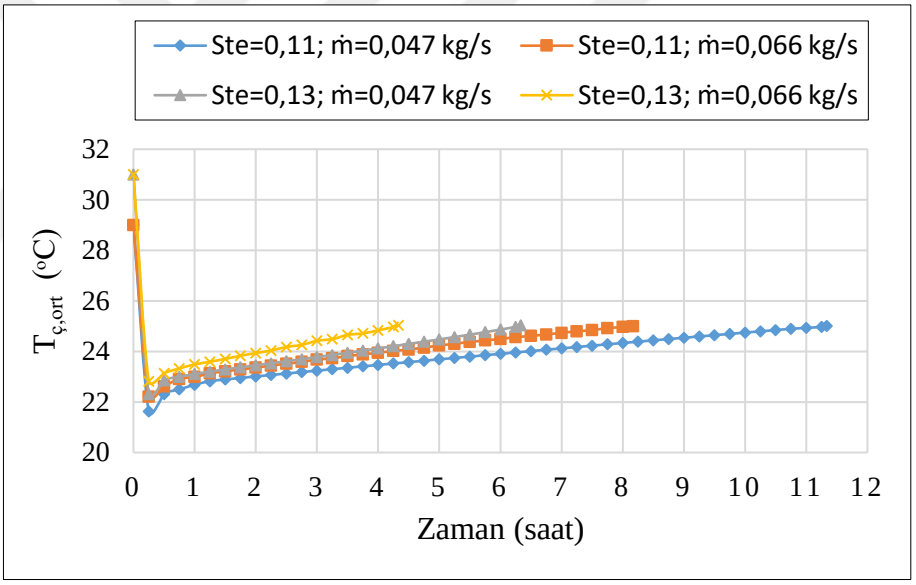
Şekil 4.84'te $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.85'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Önceki durum ile karşılaştırıldığında, erime sürelerinin 24-60 dk arasında değişen sürelerde arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.83. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum2.

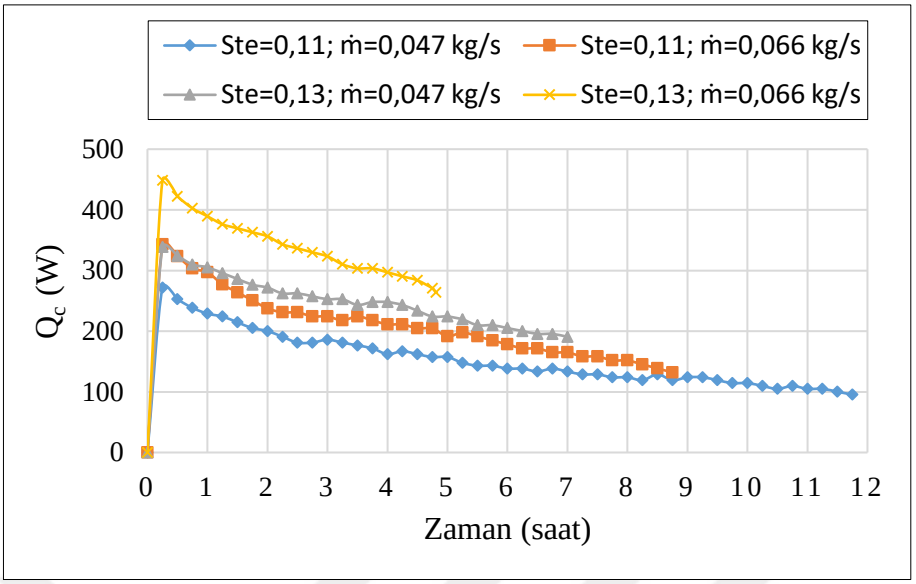


Şekil 4.84. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

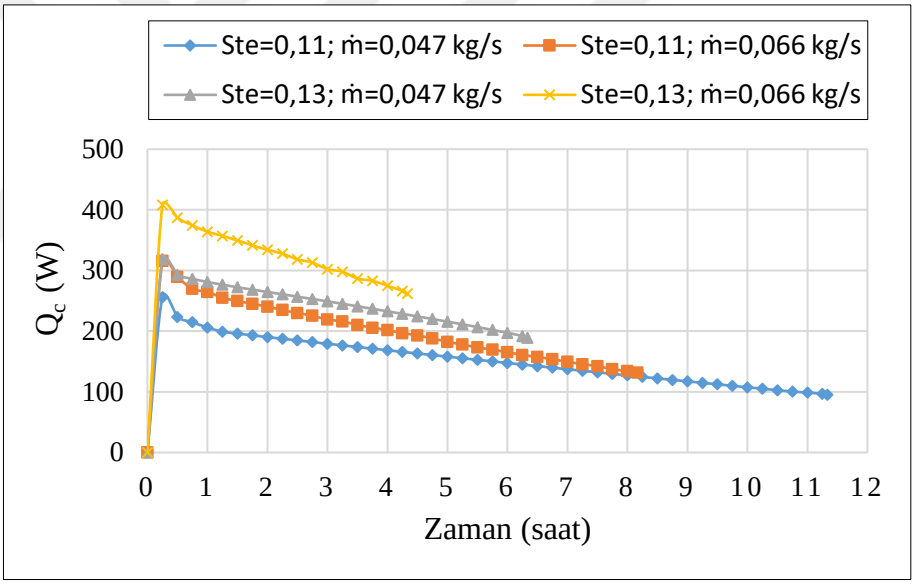


Şekil 4.85. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.86'da $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.87'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g=0 m durumuna göre soğutma gücünde pek bir artış gözlemlenmemiştir.

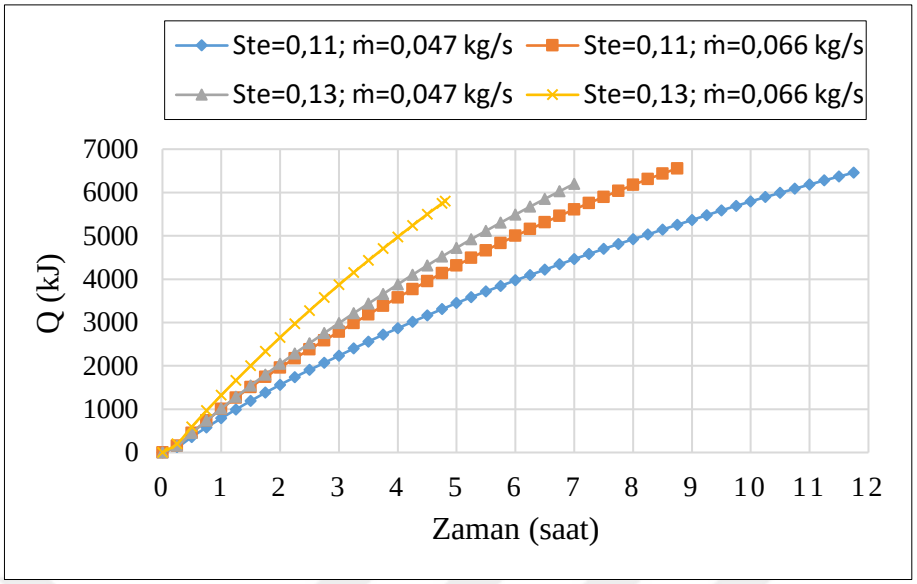


Şekil 4.86. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

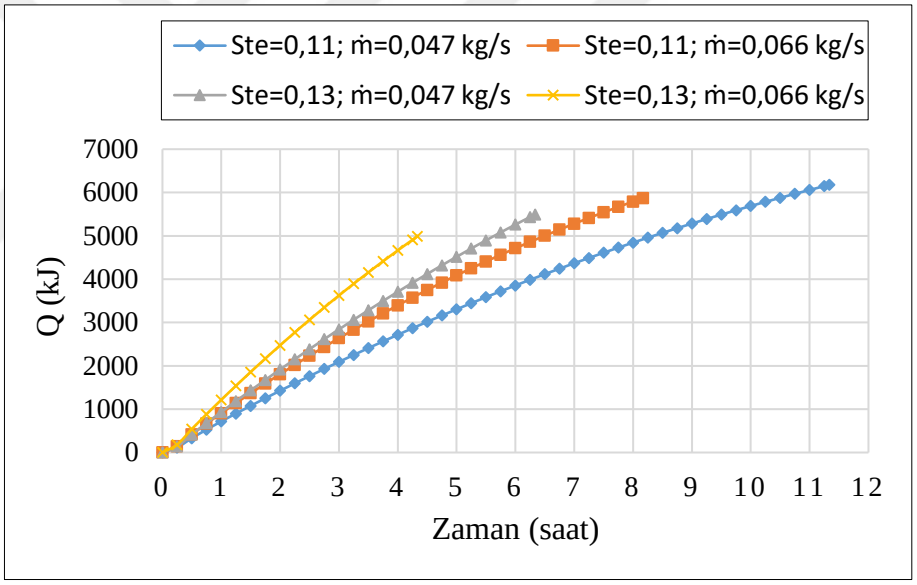


Şekil 4.87. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Şekil 4.88'de $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.89'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Süreç sonunda, absorbe edilen toplam ısı miktarlarının, bütün durumlarda birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.88. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.



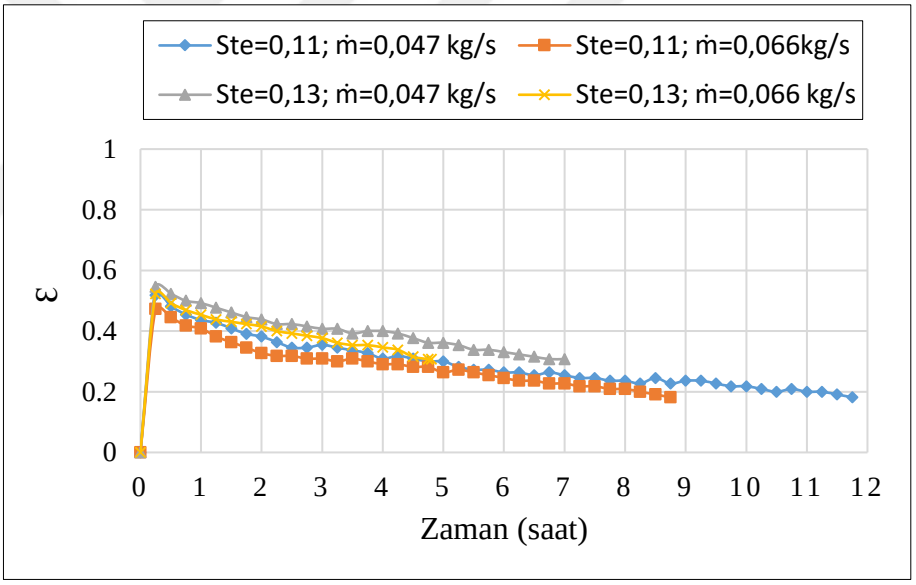
Şekil 4.89. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

Bir önceki duruma kıyasla, L_g mesafesinin artmasının FDM tarafından çekilen toplam ısı miktarının artışına neden olduğu görülmektedir. Her iki durum için bu değerler ve artış oranları Çizelge 4.15'te verilmektedir.

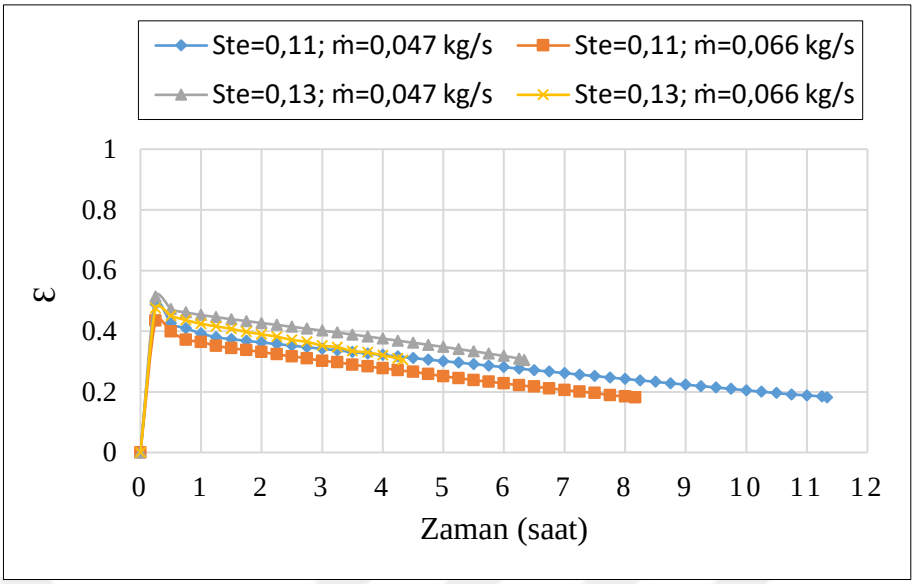
Çizelge 4.15. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları, Durum2 [kJ].

Durum	Q (kJ), (L_g=0 m/L_g=0,2 m)	Artış (%)
Ste=0,11; ṁ=0,047 kg/s	5554 / 6556	%18,0
Ste=0,11; ṁ=0,066 kg/s	5774 / 6457	%11,8
Ste=0,13; ṁ=0,047 kg/s	5511 / 6202	%12,5
Ste=0,13; ṁ=0,066 kg/s	5211 / 5800	%11,3

Şekil 4.90'da $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.91'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Bir önceki duruma kıyasla, L_g mesafesindeki artışın, ortalama etkenliğin çok az miktar artmasına neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.90. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum2.

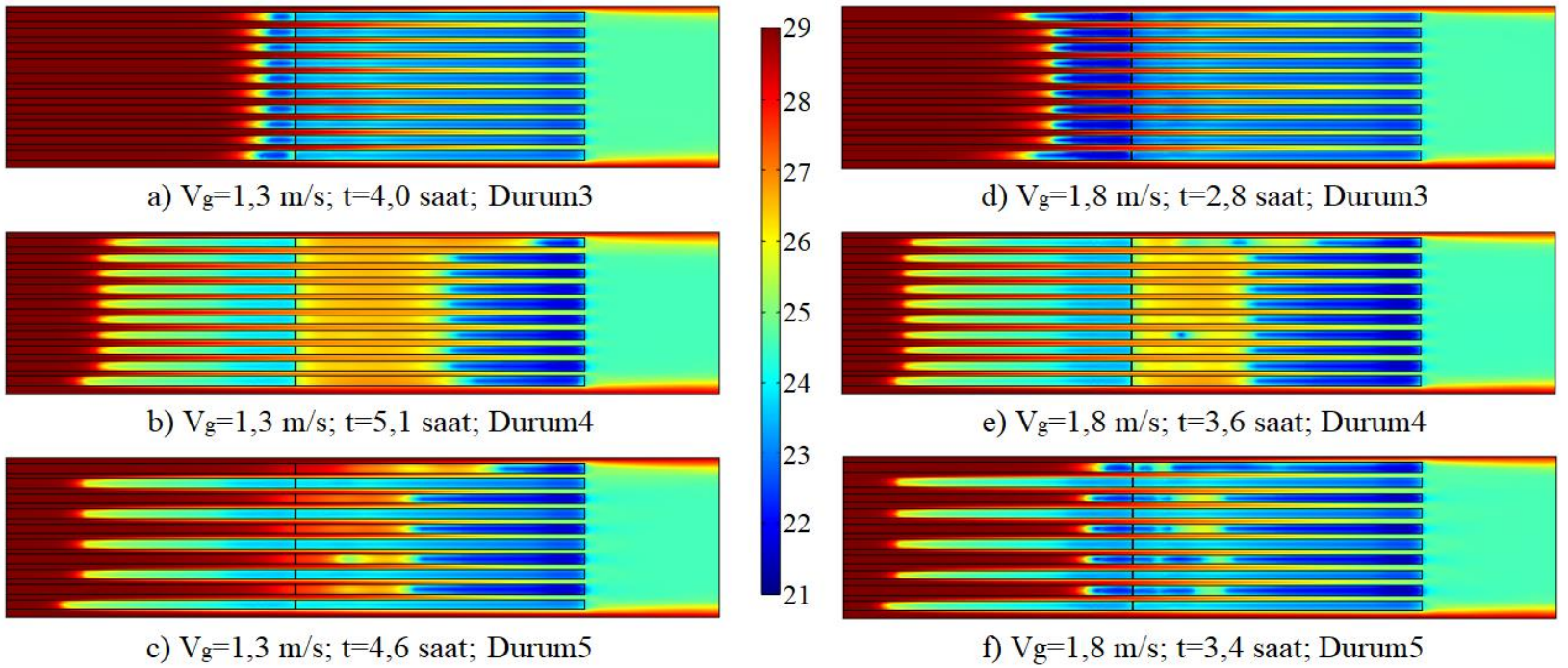


Şekil 4.91. $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum2.

4.7. Kombinasyonların Etkisi

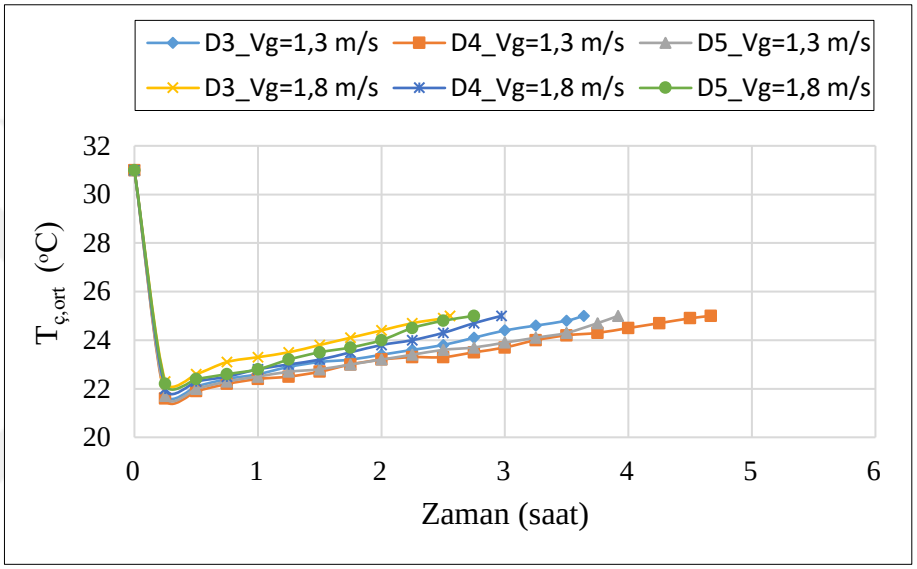
Bu bölümde 3 farklı kombinasyona sahip faz değiştiren malzemelerin; kanal çıkış sıcaklığı, FHID'nin soğutma gücü ve etkenliği ile FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı üzerindeki etkileri, Durum3, Durum4 ve Durum5 için, sıcaklık dağılımlarının yardımıyla her iki L_g değerleri için deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. FDM başlangıç sıcaklığı 16°C, kanal giriş sıcaklığı 29°C, giriş hızları 1,3 m/s ve 1,8 m/s olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.92'de $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için, sıcaklık konturları her 3 durumda verilmektedir. Süreç sonunda, her iki hava giriş hızları dikkate alındığında, Durum3'ün erime oranının diğerlerine göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, faz değişim sıcaklık aralığı düşük olan RT22HC'nin kanal giriş kısmına yakın yerde bulunmasıdır.

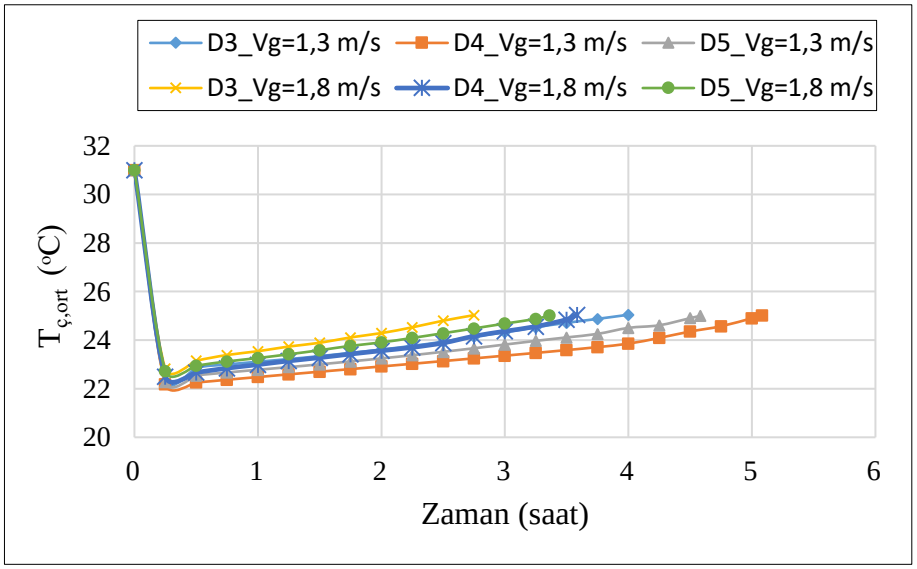


Şekil 4.92. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için sıcaklık konturları, Durum3-Durum4-Durum5.

Şekil 4.93'te T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.94'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. En kısa sürenin her iki hava giriş hızlarında da Durum3'te, en uzun sürenin ise her iki hava giriş hızlarında Durum4'te olduğu görülmektedir. Bu süre hava giriş hızının artması ile daha da kısalmaktadır. Durum 4'ün en uzun süre olmasının nedeni, düşük hava giriş hızında, havanın daha çok sistemde kalması ve bu nedenle ısı transfer miktarının yüksek hava giriş hızlı sisteme göre az olması ve kanal giriş kısmında faz değişim sıcaklık aralığı yüksek olan malzemenin bulunmasıdır.

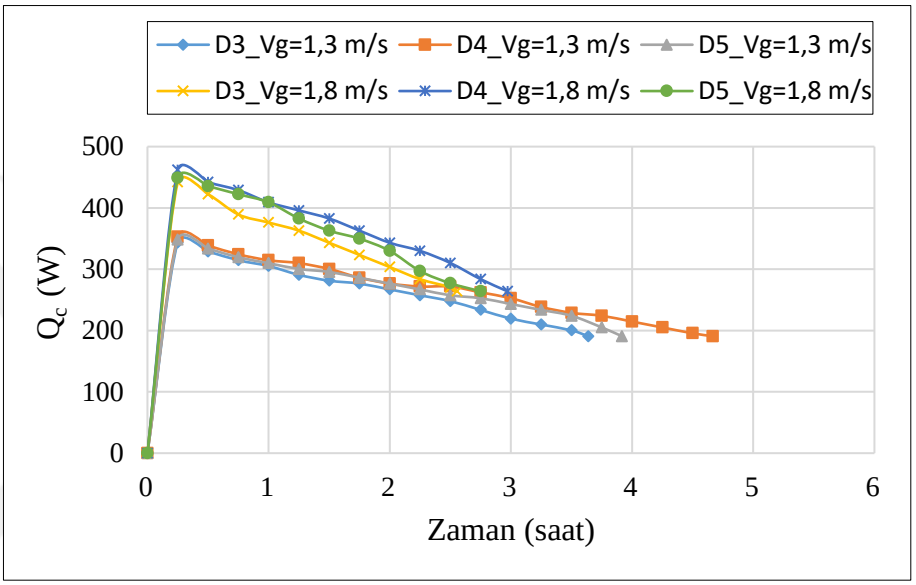


Şekil 4.93. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

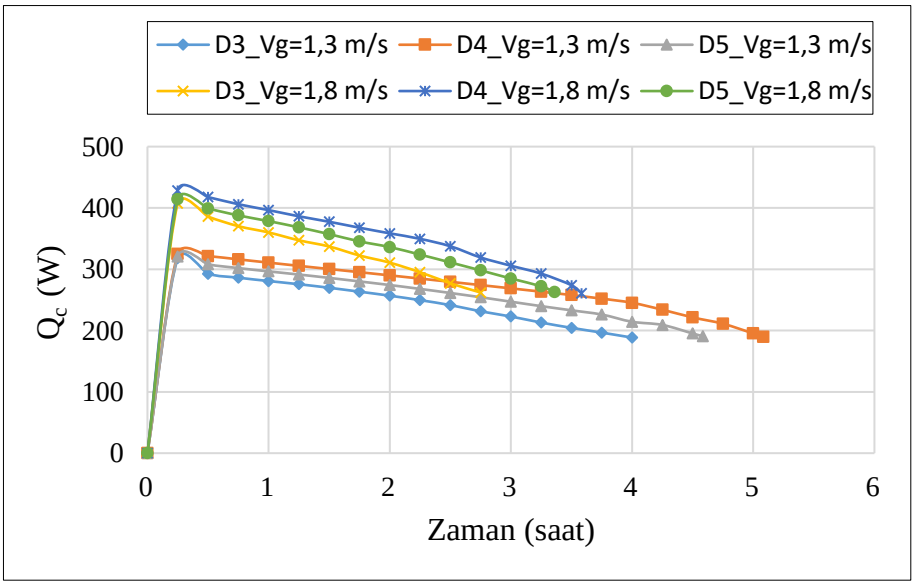


Şekil 4.94. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

Şekil 4.95'te T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.96'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Yüksek hava giriş hızının olduğu sistemlerde, soğutma gücünün daha yüksek seviyelerde bulunduğu görülmektedir. Durum5'te, RT22HC ve RT25HC parafinleri yanyana dizildiğinden dolayı gerek deşarj süresinde gerekse soğutma gücü, absorbe edilen toplam ısı miktarı ve ortalama etkenlik değerlerinde Durum5, Durum3 ile Durum4 arasında bir yerde bulunmaktadır.

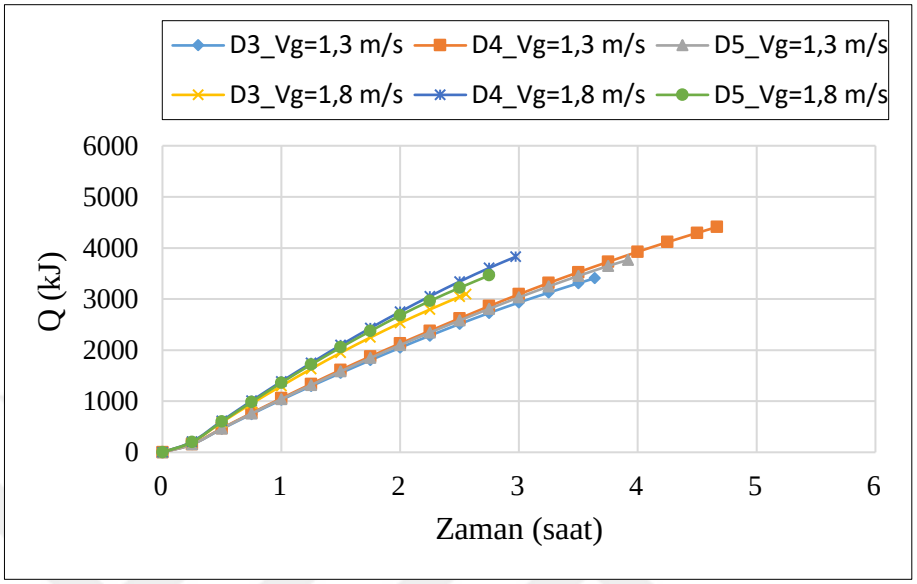


Şekil 4.95. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

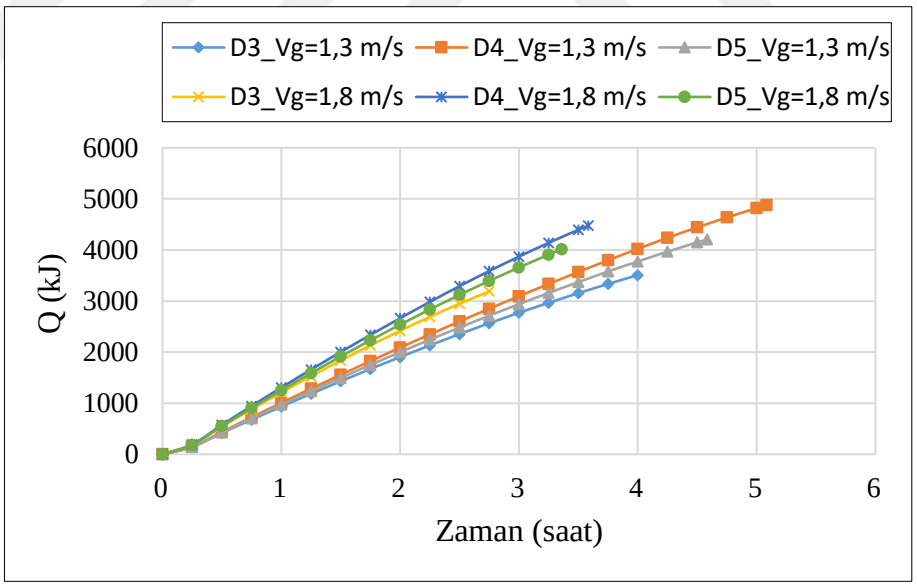


Şekil 4.96. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

Şekil 4.97'de T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.98'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir.



Şekil 4.97. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.



Şekil 4.98. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen ısı miktarının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

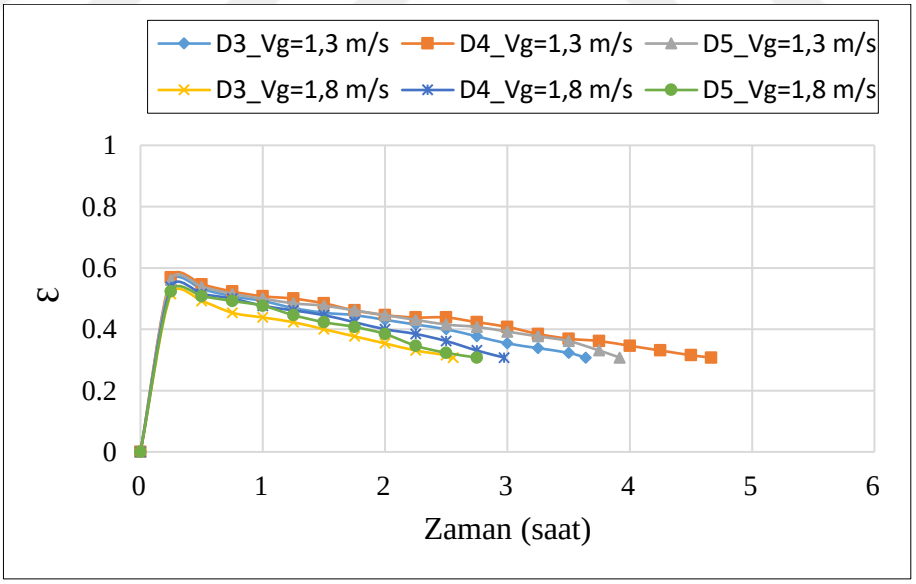
Bu değerin en fazla olduğu ünite, Durum4'te Vg=1,3 m/s olduğu giriş hızında gerçekleştiği görülmüştür. Kısa süreli zaman içerisinde (2,6 saat), Şekil 4.97'de en düşük süre dikkate alındığında, Durum4'te V_g=1,8 m/s olduğu giriş hızında bu ısının fazla

olduğu görülmüştür. Çizelge 4.16'da verilen durumlar için, süreç sonunda ve kısa süreli kullanım durumunda FDM tarafından çekilen toplam ısı miktarları verilmektedir.

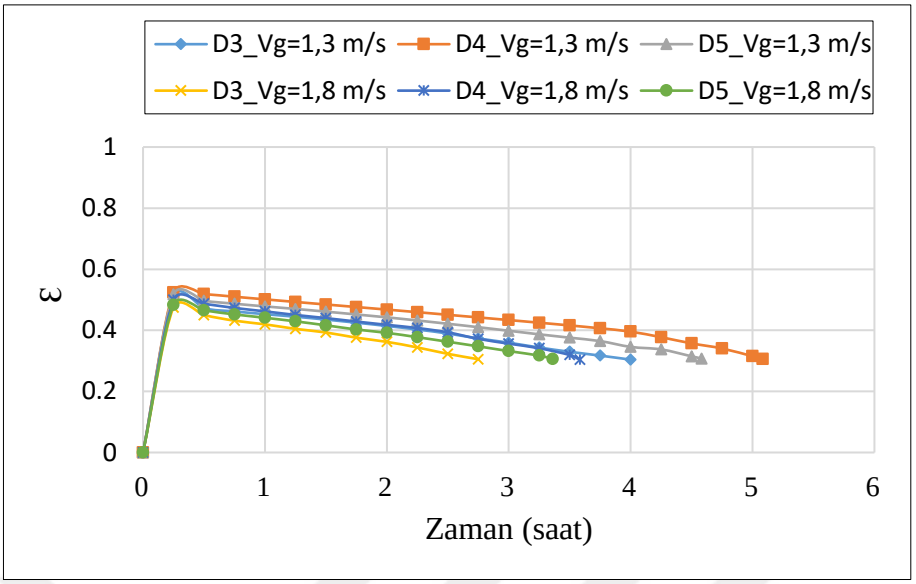
Çizelge 4.16. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için FDM'nin çektiği toplam ısı miktarları [kJ].

Hız değerleri	Durum3	Durum4	Durum5
V_g=1,3 m/s	Q_t=3406 (3,6 saat)	Q_t=4409 (4,7 saat)	Q_t=3764 (3,9 saat)
	Q_{ks}=2597 (2,6 saat)	Q_{ks}=2716 (2,6 saat)	Q_{ks}=2670 (2,6 saat)
V_g=1,8 m/s	Q_t=3097 (2,6 saat)	Q_t=3827 (3,0 saat)	Q_t=3462 (2,8 saat)
		Q_{ks}=3447 (2,6 saat)	Q_{ks}=3316 (2,6 saat)

Şekil 4.99'da T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.100'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. Ortalama etkenliğin düşük hava giriş hızlarında biraz daha yüksek değerlerde olduğu, görülmektedir.



Şekil 4.99. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.



Şekil 4.100. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

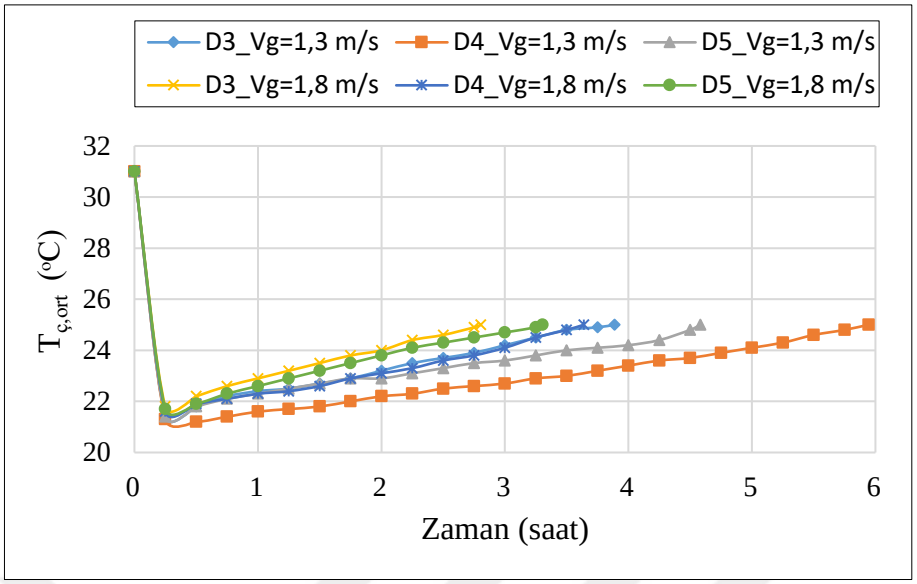
Çizelge 4.17'de verilen durumlar için ortalama etkenlik değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.17. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0 m durumları için ortalama etkenlik değerleri.

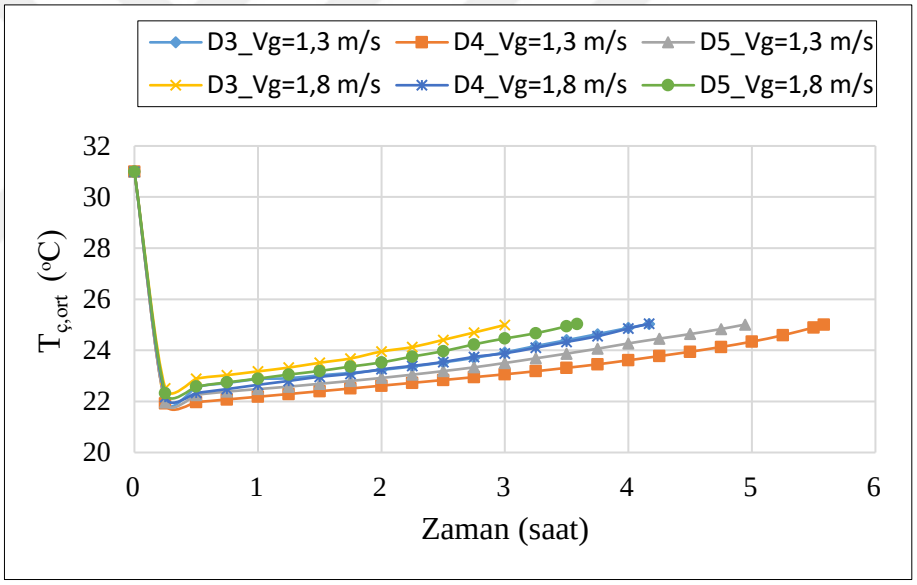
Hız değerleri	Durum3	Durum4	Durum5
V_g=1,3 m/s	0,41	0,41	0,41
V_g=1,8 m/s	0,37	0,40	0,39

Bu kısımda, aynı şartlar altında L_g=0,2 m mesafesindeki FDM'nin, faz değişim süreçleri incelenmektedir. Şekil 4.101'de $T_{b,FDM}$=16°C, T_g=29°C durumları için, sıcaklık konturları her 3 durumda verilmektedir. L_g=0 m konumuna kıyasla, erime sürelerinin arttığı görülmektedir. Aradaki mesafenin artması, yeni bir sınır tabaka oluşturup ısı transferini artıracağından dolayı, erime oranlarının da artmasına neden olmaktadır.

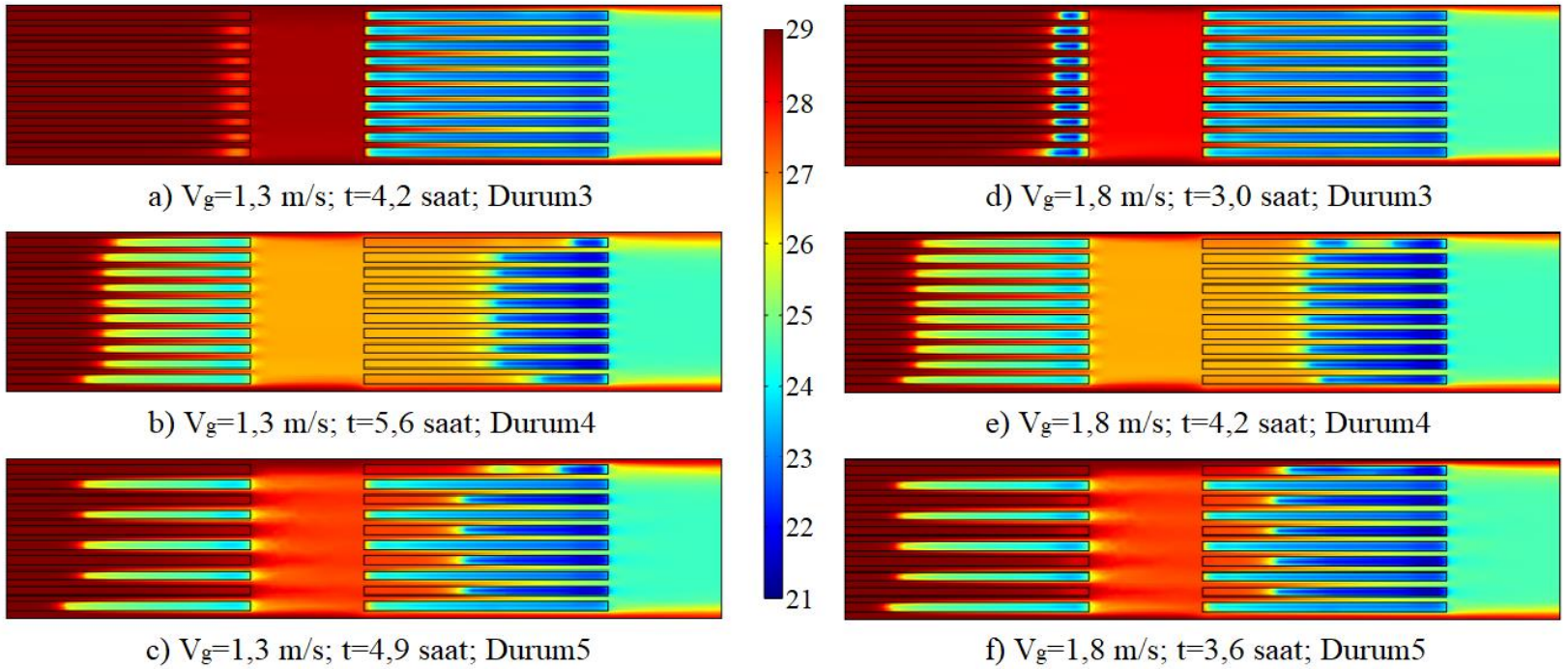
Şekil 4.102'de T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.103'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g değerinin artması ile istenen çıkış sıcaklığına erişme süresinin 12-72 dk aralıklarında arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.101. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

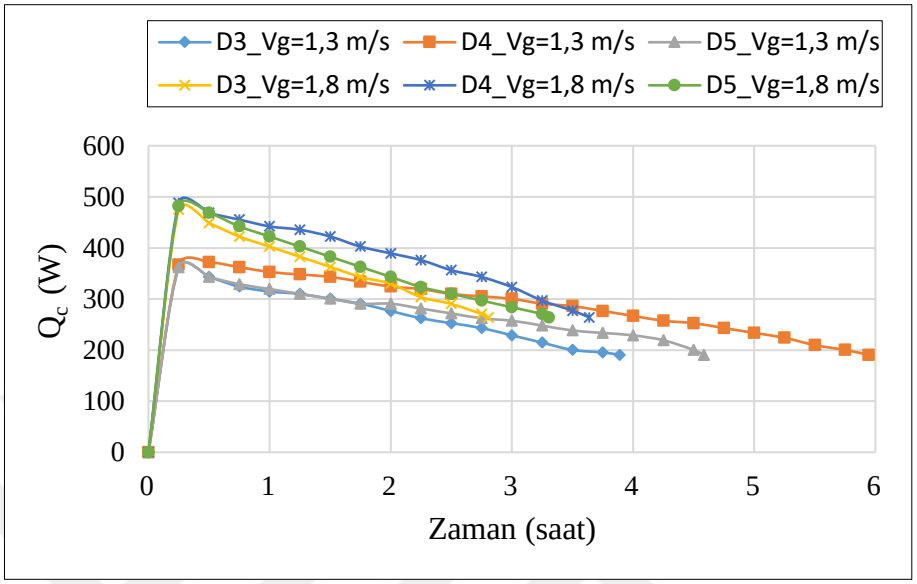


Şekil 4.102. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama çıkış sıcaklığının zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

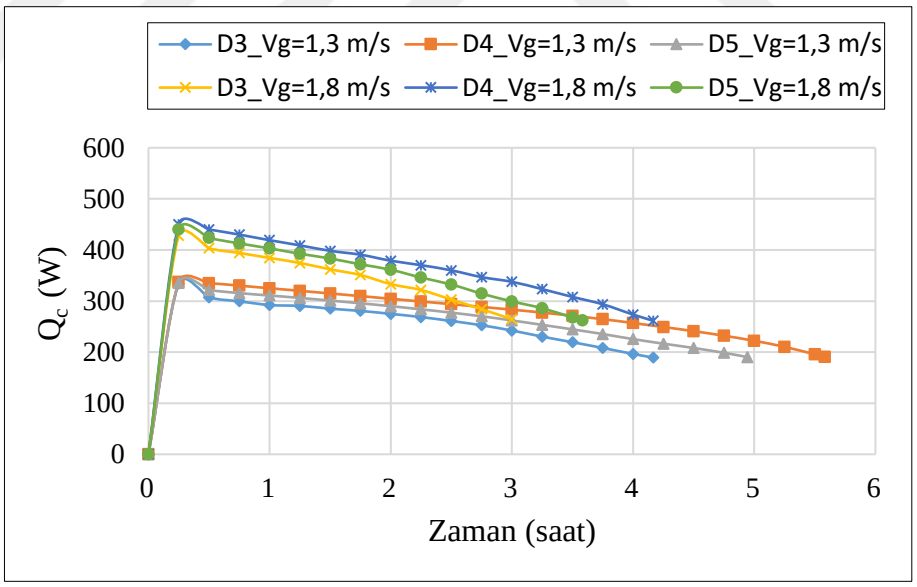


Şekil 4.103. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için sıcaklık konturları, Durum3-Durum4-Durum5.

Şekil 4.104'te T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.105'te ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g mesafesinin artması ile ortalama soğutma gücünün bir miktar arttığı görülmektedir.



Şekil 4.104. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.



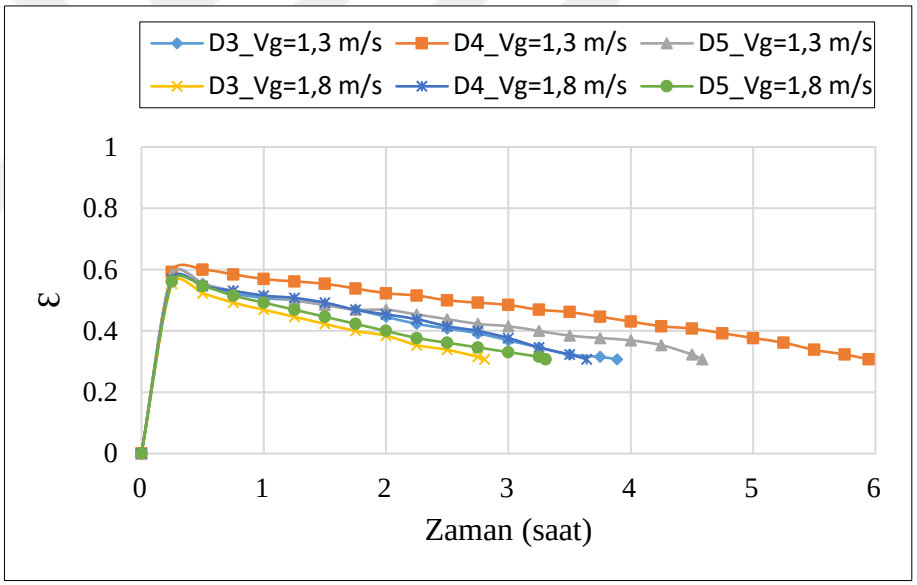
Şekil 4.105. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için soğutma gücünün zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

Şekil 4.106'da T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.107'de ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g=0 m ve L_g=0,2 m konumlarına ait toplam ısı miktarlarının karşılaştırılması Çizelge 4.18'de verilmektedir.

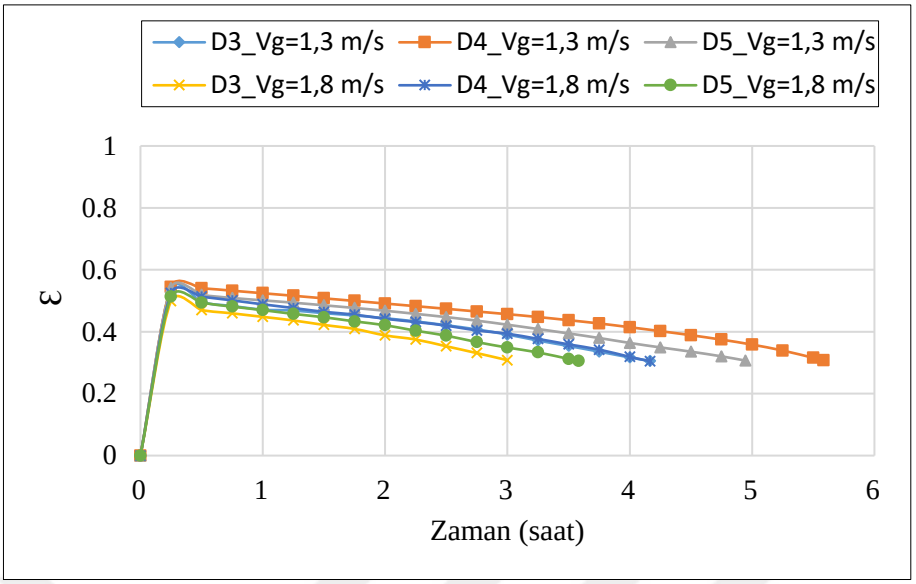
Çizelge 4.18. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C sıcaklıklarında, L_g=0 m ve L_g=0,2 m durumları için absorbe edilen toplam ısı miktarları [kJ].

Hız değerleri	Durum3 (0 m / 0,2 m)	Durum4 (0 m / 0,2 m)	Durum5 (0 m / 0,2 m)
V_g=1,3 m/s	3406 / 3716 (%9,1)	4409 / 6146 (%39,4)	3764 / 4457 (%18,4)
V_g=1,8 m/s	3097 / 3560 (%14,9)	3827 / 4940 (%29)	3462 / 4243 (%22,6)

Şekil 4.108'de T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak ve Şekil 4.109'da ise nümerik olarak değişimi verilmektedir. L_g mesafesinin artmasının, ortalama etkenliğin artmasına neden olduğu görülmektedir. Çizelge 4.18'de verilen durumlar için ortalama etkenlik değerleri görülmektedir.



Şekil 4.106. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla deneysel olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.



Şekil 4.107. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için etkenliğin zamanla nümerik olarak değişimi, Durum3-Durum4-Durum5.

Çizelge 4.19. T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, L_g=0,2 m durumları için ortalama etkenlik değerleri.

Hız değerleri	Durum3	Durum4	Durum5
V_g=1,3 m/s	0,42	0,45	0,42
V_g=1,8 m/s	0,39	0,43	0,40

BÖLÜM 5

DEĞERLENDİRME

Çalışmanın amacı, FDM-Hava ünitesinin termal performansını araştırmaktır. Yapılan bu çalışmada, hava giriş sıcaklık ve hızı ile sistemin başlangıç sıcaklığı ve FDM'nin kanal içerisindeki farklı kombinasyonları parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin FHID'nin çıkış sıcaklığı, soğutma gücü ve etkenliği ile FDM'nin absorbe ettiği toplam ısı miktarları üzerindeki sonuçları tartışılmıştır. FDM-Hava ünitesinden elde edilen deneysel sonuçların, nümerik sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür. Çalışmanın temel sonuçları aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Pasif soğutma sistemlerinde, FDM seçiminde faz değişim sıcaklık aralığının yanı sıra erime gizli ısısının da uygun bir şekilde seçilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Faz değiştiren malzemelerde, soğutma gücünün ve malzemelerin absorbe ettiği ısının fazla olabilmesi için, $T_{b,FDM}$ ile T_g sıcaklıkları arasındaki farkın büyük olması gerekmektedir. Çizelge 5.1'de tekli FDM dizilimleri için, RT22HC ve RT25HC'nin süreç sonunda erime süreleri, havadan çektikleri ısının en fazla olduğu durum ve ortalama etkenlik değerleri verilmektedir:

Çizelge 5.1. Durum1 ve Durum2'nin T_g=27°C, V_g=1,3 m/s, L_g=0,2 m durumları için; erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması.

Malzeme	Erime Süresi (sa)	Q (kJ)	ε_{ort}
RT22HC (D1) $T_{b,FDM}$=14°C	6,5	5076	0,34
RT25HC (D2) $T_{b,FDM}$=16°C	11,8	6556	0,29

Erime süresi bakımından Durum1, Durum2'ye göre süreci 5,3 saat erken tamamlamıştır ve ortalama etkenlik olarak %17 daha fazladır. Buna rağmen absorbe ettiği toplam ısı miktarı olarak %23 daha azdır. Eğer her iki durum 6,5 saat çalışmış olsaydı, bu süre sonunda RT25HC 4220 kJ'lük ısı depolayacaktı ve ortalama etkenliği de eşitlenecekti.

Hava giriş sıcaklıkları ve hızları, bir FHID ünitesinin termal performansını belirlemede bir görev üstlenmektedir. Bu parametrelerin erime sürecinde etkili olduğu ve optimizasyon çalışmalarında dikkate alınması gerektiği önem taşımaktadır.

Giriş sıcaklığını artırmak, faz değiştiren malzemelerin erime sürelerini azaltmaktadır. Giriş sıcaklığının artmasıyla soğutma gücü ve FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı artmaktadır. Ayrıca süreç sonunda ortalama etkenliğin artmasına neden olmaktadır.

Hava giriş hızındaki artış ile süreç sonunda sistemin erime oranı azalmakla beraber deşarj süresi de doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Giriş hızının artması soğutma gücünün yukarı seviyelerde olmasına ve süreç sonunda FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarının artmasına da neden olmaktadır. Kütle akış hızının artırılması çıkış sıcaklığını artırmakta bu ise giriş ve çıkış kısımlarındaki sıcaklık farkını azaltmaktadır. Çünkü yüksek kütle akış hızı sıcak hava ile soğuk FDM panelleri arasındaki daha kısa temas süresi nedeniyle daha yüksek hava çıkış sıcaklığına izin vermektedir. Böyle olunca bir ortamın ısınması hızlanmaktadır. Düşük hava hızlarında çıkış sıcaklığı düşük olacağı için giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark büyük olacaktır. Bu ise etkenliği artırmaktadır.

Deşarj süresi, daha yüksek hava giriş sıcaklığında, hava giriş hızı azaltılarak belirli bir süre uzatılabilir. Bu nedenle istenilen deşarj süresine ulaşmak için hava giriş hızını dengelemek önem taşımaktadır.

Sabit hava giriş sıcaklık ve hızlarında, sistemin başlangıç sıcaklığının 2°C artması/azalması erime oranlarına pek bir etki göstermemiştir. Benzer şekilde sistemin soğutma gücü ve etkenliğine de pek bir katkı sağlamamıştır. Sonuçlar, bu etkinin ancak hava giriş sıcaklık ve hızının artırılıp/azaltılması ile daha etkili bir şekilde olacağını göstermiştir.

Ste sayısının artması erime oranını, soğutma gücünü ve çıkış havası sıcaklığını artırmaktadır. Daha düşük kütle debisi ve daha düşük Ste sayısına sahip FDM içeren ünite süreç sonunda daha çok ısıyı absorbe etmektedir. Sabit Ste sayısında daha düşük kütle akış hızı ısı değiştiricisinin performansını artırmaktadır. Buna rağmen soğutma gücünü azaltmaktadır. Kısa süreli kullanımda, soğutma gücünü artırmanın yolu Ste sayısını ya da kütle akış hızını artırmak ile olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çizelge 5.2'de Durum1 için hız ve giriş sıcaklığının sırasıyla 0,5 m/s ve 2°C artmasının termal performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 5.2. Durum1'in $T_{b,FDM}$=16°C ve L_g=0 m durumları için erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması.

RT22HC (D1)	Erime Süresi (sa)	Q (kJ)	ε_{ort}
T_g=27°C V_g=1,3 m/s	5,9	4437	0,38
T_g=29°C V_g=1,8 m/s	2,8	3516	0,39

Burada hız ve sıcaklığın artması erime süresini %53 ve Q değerini %21 azaltmıştır. Ortalama etkenlikte artış olmasına rağmen, pek fazla değildir (%2,6).

Çizelge 5.3'te Durum2 için hız ve giriş sıcaklığının sırasıyla 0,5 m/s ve 2°C artmasının termal performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Durum2 için hız ve giriş sıcaklığının sırasıyla 0,5 m/s ve 2°C artmasının termal performansı üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

RT25HC (D2)	Erime Süresi (sa)	Q (kJ)	ε_{ort}
T_g=27°C V_g=1,3 m/s	9,3	5227	0,36
T_g=29°C V_g=1,8 m/s	3,8	4198	0,41

Burada hız ve sıcaklığın artması erime süresini %60 ve Q değerini %20 azaltmıştır. Ortalama etkenlikte artış ise %14'tür.

Çoklu FDM konfigürasyonunun termal performansını belirleyen faktörler, faz değişim sıcaklık aralığı ve erime gizli ısısıdır. Bunun uygun bir şekilde seçimi tekli konfigürasyona göre termal performans açısından da üstünlük sağlamaktadır. Çoklu FDM konfigürasyonları içerisinde, faz değişim sıcaklık aralığı yüksek malzemenin kanal

girişine yakın yerde olduğu durumda etkenlik ve soğutma gücü fazla olmaktadır. Kanal çıkışına yakın yerde bulunan ve faz değişim sıcaklık aralığı düşük olan FDM'nin erime gizli ısısının diğer malzemeye göre daha yüksek olması da bu değerleri daha da artıracaktır.

Tekli ve çoklu FDM dizilimleri için Çizelge 5.3'te süreç sonunda, maksimum absorbe edilen ısı miktarları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.4. Durum3-Durum4 ve Durum5 kombinasyonlarının T_g=29°C, $T_{b,FDM}$=16°C, V_g=1,3 m/s ve L_g=0,2 m durumları için erime süreleri, absorbe ettikleri maksimum ısı miktarlar ve ortalama etkenliklerinin karşılaştırılması.

Kombinasyon	t (sa)	Q (kJ)	ε_{ort}
RT22HC (D1)	4,1	4303	0,45
RT25HC (D2)	7,0	6202	0,39
RT25HC+RT22HC (D4)	5,9	6146	0,45

Faz değişim sıcaklık aralığı yüksek olan Durum2'nin erime süresi en fazladır. Ayrıca erime ısısı yüksek olduğu için absorbe ettiği ısı miktarı da fazla olmaktadır. Durum1 ve Durum4 ile kıyaslandığında ortalama etkenliği %13 daha azdır. Absorbe edilen ısı miktarı bakımından çoklu FDM ile hemen hemen aynıdır ve Durum1'e göre %44 daha fazladır. Durum4 4,1 saat çalışmış olsaydı Q=4088 kJ ve ε_{ort}=0,43 olacaktı.

Plakaların arasındaki L_g mesafesinin de sistemin termal performansında rolü vardır. Bu mesafenin artması sistemin erime oranını ve istenen çıkış sıcaklığına erişme süresini artırmaktadır. Ayrıca L_g değerinin artması ile sistemin soğutma gücü, FDM tarafından absorbe edilen toplam ısı miktarı ve sistemin etkenliği de artmaktadır. Durum1 ve Durum2 için Lg mesafesinin etkileri Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.5. Durum1 ve Durum2'nin T_g=27°C, V_g=1,3 m/s durumları için erime sürelerinin, maksimum absorbe ettiği toplam ısı miktarlarının ve ortalama etkenliğin karşılaştırılması.

Malzeme	Erime Süresi (sa)	Q (kJ)	ε_{ort}
RT22HC (D1) $T_{b,FDM}$=14°C L_g=0 m	6,1	4630	0,33
RT22HC (D1) $T_{b,FDM}$=14°C L_g=0,2 m	6,5	5076	0,34
RT25HC (D2) $T_{b,FDM}$=16°C L_g=0 m	10,9	5554	0,26
RT25HC (D2) $T_{b,FDM}$=16°C L_g=0,2 m	11,8	6556	0,29

L_g mesafesinin artması ile yeni bir sınır tabaka oluşacağı için, ısı transferinin artarak depolanan enerji miktarının değişimine neden olmaktadır. Bu değişim RT22HC'de %10 ve RT25HC'de %18 artış şeklinde olmuştur. RT22HC'nin erime süresi 0,3 saat artarken, ortalama etkenlik değerinde pek bir değişiklik görülmemiştir. Benzer şekilde RT25HC'nin erime süresi 0,9 saat artarken, ortalama etkenlik %12 artmıştır.

Yapılan çalışma geliştirilip ve ünitenin prototipi üretilerek, bu ünite sıfır enerjili binaların tasarımında önemli bir araç olarak kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, W. A., Jomehzadeh, F., Famileh, I. Z., Calautit, J. K., Hughes, B. R., & Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470-1497.

Akgün, M. (2006). *Parafinle Gizli Isı Depolamada Depo Geometrisi Optimizasyonu Üzerine Deneysel Bir Çalışma*. Karadeniz Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Arkar, C., & Medved, S. (2007). Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, 81, 1078-1087.

Arkar, C., Vidrih, B., & Medved, S. (2007). Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building. *International Journal of Refrigeration*, 30, 134-143.

Aydın, A. A. (2010). *The Synthesis and Thermal Properties of Novel Organic Phase Change Materials*. İstanbul Technical University/Institute of Science and Technology, İstanbul.

BP. (2020). 10.01.2021 tarihinde https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf adresinden erişildi.

Butala, V., & Stritih, U. (2009). Experimental investigation of PCM cold storage. *Energy and Buildings*, 41, 354-359.

Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., Gracia, A., & Fernandez, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675-1695.

Chiu, J. N. W., & Martin, V. (2013). Multistage latent heat cold thermal energy storage design analysis. *Applied Energy*, 112, 1438-1445.

Climator. www.climator.com

COB. (2018). 10.03.2020 tarihinde http://iklim.cob.gov.tr/iklim/Files/Binalar%20Sektoru%20Mevcut%20Durum%20Degerlendirmesi%20Raporu.pdf adresinden erişildi.

Çengel, Y. A. & Cimbala, J. M. (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. İzmir: Güven Kitabevi

Dardir, M., Panchabikesan, K, Haghighat, F., El Mankibi, M., & Yuan, Y. (2019). Opportunities and challenges of PCM-to-air heat exchangers (PAHXs) for building free cooling applications—A comprehensive review. *Journal of Energy Storage*, 22, 157-175.

Darzi, A. A. R., Moosania, S. M., Tan, F. L., & Farhadi, M. (2013). Numerical investigation of free-cooling system using plate type PCM storage. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 48, 155-163.

Dinçer, İ. & Rosen M. A. (2011). *Thermal Energy Storage Systems and Applications* (2. Baskı). Chichester: John Wiley.& Sons

Dolado, P., Mazo, J., Lazaro, A., Marin, J. M., & Zalba, B. (2012). "Experimental validation of a theoretical model: Uncertainty propagation analysis to a PCM-air thermal energy storage unit. *Energy and Buildings*, 45, 124-131.

Dolado, P., Lazaro, A., Marin, J., & Zalba, B. (2011a). Characterization of melting and solidification in a real-scale PCMeair heat exchanger: Experimental results and empirical model. *Renewable Energy*, 36, 2906-2917.

Dolado, P., Lazaro, A., Marin, J., & Zalba, B. (2011b). Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 52, 1890-1907.

EİGM. (2020). 06.03.2020 tarihinde https://www.eigm.gov;DXddv.tr/tr-TR/Denge-Tablolari/Denge-Tablolari?page=1 adresinden erişildi.

EMO. (2020). 25.03.2020 tarihinde http://www.emo.org.tr/ekler/34fc1ee08454a47_ek.pdf?tipi=41&turu=X&sube=0 adresinden erişildi.

Enerji Portalı. (2019). 03.04.2020 tarihinde https://www.enerjiportali.com/2023te-turkiyenin-kurulu-gucu-109-gwi-gececek/ adresinden erişildi.

EPS. Environmental Process Systems Ltd. www.epsltd.co.uk

Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., & Van Dessel, S. (2017). Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1427-1441.

Fang, M., & Chen, G. (2007). Effects of different multiple PCMs on the performance of a latent thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 27, 994-1000.

Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., & Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management,* 45, 1597-1615.

Hasnain, S. M. (1998). Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques. *Energy Convers. Mgmt,* 39 (11), 1127-1138.

Iten, M., Liu, S., & Shukla A. (2016). A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 61, 175-186.

Iten, M., & Liu, S. (2015). Experimental study on the performance of RT 25 to be used as Ambient Energy Storage. *Energy Procedia*, 70, 229-240.

İMSAD. (2014). 10.04.2020 tarihinde https://www.imsad.org/Uploads/Files/imsad_bev_rap_kasim_2014.pdf adresinden erişildi.

İnce, Ş. (2014). *Investigation of thermal Behaviors of Nano Particle-Based Phase Change Materials*. Dokuz Eylül University/Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.

Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150-176.

Kant, K., Shukla, A., & Sharma A. (2017). Advancement in phase change materials for thermal energy storage applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, 82-92.

Konuklu, Y. (2008). Mikrokapsüllenmiş *Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama İle Binalarda Enerji Tasarrufu*. Çukurova Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Kurt, S. (2012). *Yeni Nesil Bina Malzemeleri İçin Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi*. Çukurova Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Kuznik, F., David, D., Johannes, K., & Roux, J. J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 379-391.

Lazaro, A., Dolado, P., Marin, J. M., & Zalba, B. (2009a). PCM–air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes. *Energy Conversion and Management*, 50, 439-443.

Lazaro, A., Dolado, P., Marin, J. M., & Zalba, B. (2009b). PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Empirical model and application to design. *Energy Conversion and Management*, 50, 444-449.

Liu, S., Iten, M., & Shukla, A. (2017). Numerical study on the performance of an air- Multiple PCMs unit for free cooling and ventilation. *Energy and Buildings*, 151, 520-533.

Liu, S., Li, Y., & Zhang, Y. (2014). Mathematical solutions and numerical models employed fort he investigations of PCMs phase transformations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 659-674.

Lopez, J. P. A., Kuznika, F., Baillis, D., & Virgone, J. (2013). Numerical modeling and experimental validation of a PCM to air heat Exchanger. *Energy and Buildings*, 64, 415-422.

Medved, S., & Arkar, C. (2008). Correlation between the local climate and the free-cooling potential of latent heat storage. *Energy and Buildings*, 40, 429-437.

Mehling, H. & Cabeza, L. (2008). *Heat and Cold Storage with PCM*. Berlin: Springer.

Mosaffa, A. H., Ferreira, C. A. I., Talati, F., & Rosen, M. A. (2013). Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Conversion and Management*, 67, 1-7.

MMO. (2018). 12.05.2020 tarihinde https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/EnerjiGorunumu2018_1.pdf adresinden erişildi.

Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.

Okcu, M. (2011). *Faz Değiştiren Maddelerde Erime Ve Katılaşma Sürecinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. Fırat Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Osterman, E., Tyagi, V. V., Butala, V., Rahim, N. A., & Stritih, U. (2012). Review of PCM based cooling techmologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49, 37-49.

Panchabikesan, K., Vellaisamy, K., & Ramalingam, V. (2017). Passive cooling potential in buildings under various climatic conditions in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1236-1252.

Peiro, G., Gasia, J., Miro, L., & Cabeza, L. F. (2015). Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage. *Renewable Energy*, 83, 729-736.

Pielichowska, K., & Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.

Raj, V. A. A., & Velraj, R. (2010). Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2819-2829.

Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246-258.

Revankar, S. T. (2019). Storage and Hybridization of Nuclear Energy. Bindra H. & Revankar S. (Ed.), *Chemical Energy Storage* (s.177-227). London: Elsevier.

Rouault, F., Bruneau, D., Sebastian, P., & Lopez, J. (2013). Numerical modeling of tube bundle thermal energy storage for free-cooling of buildings. *Applied Energy*, 111, 1099-1106.

Rubitherm. Technologies GmbH. www.rubitherm.eu

Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C., & Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193-228.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.

Socaciu, L., Pleşa, A., Ungureşan, P., & Giurgiu, O. (2014). Review on phase change materials for building applications. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 25, 179-194.

Socaciu, L. G. (2012). Thermal Energy Storage with Phase Change Material. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 20, 75-98.

Susantez, Ç., Kahveci, K. & Akyol, E. (2018). *Faz değiştiren malzeme içeren silindirik bir ısıl enerji deposunda kanatçık sayısı, kalınlığı ve üniform olmayan kanatçık dağılımının ısıl enerji depolama karakteristiği üzerindeki etkileri*. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi, 30 (2), 225-237.

Thambidurai, M., Panchabikesan, K., Mohan, K., & Ramalingam, V. (2015). Review on phase change material based free cooling of buildings—The way toward sustainability. *Journal of Energy Storage*, 4, 74-88.

TEİAŞ. (2020a). 10.03.2020 tarihinde https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri adresinden erişildi.

TEİAŞ. (2020b). 23.03.2020 tarihinde https://www.teias.gov.tr/tr-TR/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari adresinden erişildi.

Turnpenny, J. R., Etheridge, D. W., & Reay, D. A. (2000). Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part I: testing and theoretical modelling. *Applied Thermal Engineering*, 20, 1019-1037.

TÜİK. (2020). 07.04.2020 tarihinde http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1019 adresinden erişildi.

Vakilaltojjar, S. M., & Saman, W. (2001). Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering*, 21, 249-263.

Veerakumar, C., & Sreekumar, A. (2016). Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review. *International Journal of Refrigeration*, 67, 271-289.

Waqas, A., & Kumar, S. (2011a). Utilization of Latent Heat Storage Unit for Comfort Ventilation of Buildings in Hot and Dry Climates. *International Journal of Green Energy*, 8, 1-24.

Waqas, A., & Kumar, S. (2011b). Thermal performance of latent heat storage for free cooling of buildings in a dry and hot climate: An experimental study. *Energy and Buildings*, 43, 2621-2630.

Yanbing, K., Yi, J., & Yinping, Z. (2003). Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy and Buildings*, 35, 417-425.

Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2004). Free-cooling of buildings with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 27, 839-849.

Zeinelabdein, R., Omer, S., & Gan, G. (2018). Critical review of latent heat storage systems for free cooling in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2843-2868.

Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92, 593-605.

Zhou, D., & Zhao, C. Y. (2011). Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials. *Applied Thermal Engineering*, 31, 970-977.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2009 yılından beri Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır Evli ve iki çocuk babasıdır.