

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



ENDÜSTRİYEL SOĞUTMA UYGULAMALARINDA ÖTEKTİK
SOĞUTUCULARIN ETÜDÜ VE PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

GÜLENAY ALEVAY KILIÇ

BALIKESİR, OCAK - 2018

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



ENDÜSTRİYEL SOĞUTMA UYGULAMALARINDA ÖTEKTİK
SOĞUTUCULARIN ETÜDÜ VE PARAMETRELERİNİN
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

GÜLENAY ALEVAY KILIÇ

Jüri Üyeleri : Doç. Dr.Enver YALÇIN (Tez Danışmanı)
Doç. Dr. Ahmet Alper AYDIN (Eş Danışman)
Prof. Dr. Bedri YÜKSEL
Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ
Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ
Prof. Dr. Ramazan KÖSE

BALIKESİR, OCAK- 2018

KABUL VE ONAY SAYFASI

Gülenay Alevay KILIÇ tarafından hazırlanan “ENDÜSTRİYEL SOĞUTMA UYGULAMALARINDA ÖTEKTİK SOĞUTUCULARIN ETÜDÜ VE PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 11.01.2018 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Doç.Dr. Enver YALÇIN

Üye
Prof.Dr. Bedri YÜKSEL

Üye
Prof.Dr. Recep YAMANKARADENİZ

Üye
Prof.Dr. Ramazan KÖSE

Üye
Prof.Dr. Hikmet KARAKOÇ


.....

.....

.....

.....

.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

ENDÜSTRİYEL SOĞUTMA UYGULAMALARINDA ÖTEKTİK
SOĞUTUCULARIN ETÜDÜ VE PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

GÜLENAY ALEVAY KILIÇ

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. ENVER YALÇIN)

(EŞ DANIŞMAN: DOÇ.DR. AHMET ALPER AYDIN)

BALIKESİR, OCAK - 2018

Termal enerji depolama sistemlerinden (TED) biri olan gizli ısının depolanması günümüzde soğuk muhafaza uygulamalarında da kullanılmaktadır. Gizli ısı enerjisinin depolanmada birim miktarda depolanan enerji başına daha az hacimle enerji tasarrufu sağladığı için genellikle faz değişim malzemeleri (FDM) kullanılmaktadır. Bu çalışmada endüstriyel tip soğuk hava depo iç yüzeylerine FDM'li makro kapsüller yerleştirilmiştir. Depo, aktif olarak -18°C , 16°C ve -14°C de çalıştırılmıştır. Yapılan deneylerde, yüksüz ve FDM'li kabinlerin rejim sıcaklığına gelmek için harcadığı süreler, kompresör on/off periyodları ve deponun ısınma periyodu mercek altına alınmıştır. Deneyler, üç farklı senaryo ve üç farklı durum için araştırılmıştır. Birinci senaryoda depo, set sıcaklığına soğutulmuş ikinci senaryoda kompresör on/off periyodları 36 saat boyunca incelenmiştir. Üçüncü senaryoda ise mekanik soğutma sistemi kapatılarak deponun ısınma süreci incelenmiştir. FDM'nin erime/donma sıcaklığı $-7,9^{\circ}\text{C}$ / $-14,7^{\circ}\text{C}$ olup ticari amaçlı kullanılan ötektik bir karışımdır. Depo içi sıcaklık, bağıl nem, hava hızı, FDM sıcaklık ve dış ortam sıcaklık değerleri 10 sn aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Deneylerin belirsizlik, maliyet analizleri ve ekonomik boyutu değerlendirilmiştir. FDM'siz kabinin kompresör on/off süreleri incelenmiş ve stabil kaldığı görülmüştür. FDM'li depoda ise kompresör on/off sürelerinde 36 saat boyunca iyileşme görülmüştür. FDM'li deneylerde -18°C ve -16°C 'de FDM'nin termal enerjisi sayesinde sistemin ısı yükündeki kayda değer azalmalar görülmüştür. FDM'li depo FDM'size göre 30 saat sonra kompresör, -18°C set sıcaklığında, 19,44% ve -16°C 'de ise %28,13 daha az çalışmıştır. Böylelikle FDM'li kabin bir günde -18°C 'de 2 saat, -16°C 'de 3 saat 20 dakika daha az enerji tüketerek FDM'nin pozitif etkisi gözlemlenmiştir. Böylelikle FDM'nin erime/donma sıcaklık aralığının neresinde çalışıldığı daha kritik öneme sahip olduğu bu çalışmayla ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELELER: Termal enerji depolama, Faz değişim malzemesi (FDM), enerji, soğuk muhafaza

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ETUDE AND PARAMETERS OF INDUSTRIAL
COOLING APPLICATIONS

PH.D THESIS

GÜLENAY ALEVAY KILIÇ

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. ENVER YALÇIN)

(CO-SUPERVISOR: ASSOC. PROF. AHMET ALPER AYDIN)

BALIKESİR, JANUARY 2018

Storage of latent heat, one of the thermal energy storage systems (TES), is today used in cold storage applications as well. As storage of latent heat provides a lower volume of energy conservation per the unit of stored energy, phase change materials (PCM) are generally used. In this study, a cold storage house has been actively operated at -18°C , -16°C , and -14°C . In the conducted experiments, time periods of neutral cabins with PCM reaching to regime temperature, compressor on/off periods, and heating period of the storage house have been examined. Experiments have been investigated for three different scenarios and three different conditions. In the first scenario, storage room has been cooled to the set temperature; in the second scenario, compressor on/off periods have been monitored for 36 hours. And in the third scenario, mechanical cooling system has been shut down, and heating process of the storage house has been examined. PCM's melting/freezing temperature is $-7,9^{\circ}\text{C}$ / $-14,7^{\circ}\text{C}$, and is a eutectic mixture used for commercial purposes. Storage temperature, relative humidity, air speed, PCM temperature and outdoor temperature values have been recorded at intervals of 10 seconds. Uncertainty, cost analyses, and economic dimension of the experiments have been evaluated. Compressor on/off period of the cabin without PCM has been examined, and it has been observed to remain stable. In the storage with PCM, an improvement for 36 hours has been observed in compressor on/off periods. In the experiments with PCM for three different set values at -18°C and -16°C , considerable decreases in the heat load in the system due to the thermal energy of PCM have been observed. Compared to the storage without PCM, the storage with PCM operated 19,44% less at -18°C compressor set temperature, and 28.13% less at -16°C compressor set temperature. Thus, as the cabin with PCM consumed less energy for 2 hours at -18°C , and for 3 hours 20 minutes at -16°C in a day, positive effect of PCM has been suggested. Therefore, it has been proved with this study that the part of the PCM melting/freezing temperature range within which the work is performed is of a more critical importance.

KEYWORDS: the thermal energy storage, phase change materials (PCM), energy, a cold storage

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR ve SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Termal Enerji Depolama Yöntemleri	2
1.1.1 Duyulur Isı Depolama	2
1.1.2 Gizli Isı Depolama.....	3
1.1.3 FDM'lerin Ana Kullanım Alanları.....	4
1.1.4 Faz Değişim Sıcaklığı.....	4
1.1.5 Faz Değişim Isısı.....	5
1.1.6 FDM'lerin Sınıflandırılması.....	6
1.1.6.1 Organik, İnorganik ve Ötektik FDM'ler	6
1.1.7 FDM'lerin Termal Çevrimlerdeki Kararlılığı	7
1.1.8 FDM'lerin Kapsüllenmesi	7
1.1.9 FDM'nin Temel Termodinamiği	8
1.1.9.1 FDM'lerde Aranılan Özellikler	9
1.2 Frigorifik Araçlarla Sevkiyat ve Uluslararası Alanda Çözümler	10
1.3 Tezin Önemi	11
1.4 Motivasyon ve Amaçları.....	11
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	13
2.1 TED Sistemlerinden FDM Kullanımının Binalarda Uygulanmasıyla İlgili Çalışmalar.....	13
2.2 TED Sistemlerinden FDM Kullanımının Soğutma Uygulamaları ile İlgili Araştırmaları.....	17
2.3 TED Sistemlerinde FDM Kullanımıyla İlgili Sayısal Analiz Çalışmaları.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	31
3.1 Deneysel Prosedür.....	31
3.1.1 Deney Şartları ve Kabuller	31
3.1.2 Soğutma Yüğü Hesabı	36
3.1.3 FDM'nin Termofiziksel Analizleri	37
3.2 Sayısal Çözümleme	40
3.2.1 Sayısal Analizde Kullanılan Yürütücü Denklemler	41
3.2.1.1 Momentum Denklemi	42
3.2.1.2 Enerji Denklemi	43
3.3 Boyut Analizi	47
3.3.1 Belirsizlik Analiz Sonuçları.....	50
3.4 Net Bugünkü Değer (NBD) Analizi	51
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	52
4.1 Deneysel Bulgular	52

4.1.1	Orijinal Boyutlardaki Yalıtımsız FDM'li Makro Kapsül Deneyi	52
4.1.2	Set sıcaklık -18°C Deneyi.....	53
4.1.2.1	Senaryo 1: Deponun Set Değeri -18°C'ye Soğutulması.....	54
4.1.2.2	Senaryo 2: Set -18°C' de Kompresör On/Off Periyodu	55
4.1.2.3	Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu	59
4.1.2.4	FDM'siz ve FDM'li Deponun Set -18°C için Karşılaştırılması	59
4.1.2.1	Set -18 °C için Enerji Analizi	62
4.1.3	Set -16°C Deneyi.....	63
4.1.3.1	Senaryo 1: Deponun Set -16°C'ye Soğutulması	64
4.1.3.2	Senaryo 2: Set -16 °C' de Kompresör On/Off Periyodu	65
4.1.3.3	Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu	67
4.1.3.4	FDM'siz ve FDM'li Deney Verilerinin Set -16°C için Karşılaştırılması	68
4.1.3.1	Set -16 °C için Enerji Analizi	71
4.1.4	Set -14°C Deneyi.....	72
4.1.4.1	Senaryo 1: Deponun Set -14°C'ye Soğutulması	73
4.1.4.1	Senaryo 2: Set değeri -14°C' de Kompresör On/Off Periyodu	73
4.1.4.2	Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu	76
4.1.4.3	FDM'siz ve FDM'li Deney Verilerinin Set -14°C için Karşılaştırılması	76
4.1.4.1	Set -14 °C için Enerji Analizi	79
4.1.5	Boş Makro Kapsüllü Deney: Set-16°C	80
4.2	Sayısal Bulgular	81
4.2.1	Orijinal Boyutlardaki Yalıtımsız FDM'li Makro Kapsülün Sayısal Analizi	81
4.2.2	Orijinal Boyutlardaki Yalıtımlı FDM'li Makro Kapsülün Sayısal Analizi	84
4.3	Boyut Analizi Sonuçları.....	88
4.4	Belirsizlik Analizi Sonuçları.....	89
4.5	Net Bugünkü Değer (NBD) Analiz Sonuçları	90
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	92
6.	KAYNAKLAR.....	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Depolama ortamında duyulur ısıyla bir maddenin soğutulması (Mehling, 2008).....	3
Şekil 1.2: FDM sıcaklık ısı akış dağılımı.	5
Şekil 1.3: FDM'nin x eksenı boyunca sıcaklığa bağlı hal değişimi (Mehling,2008).	6
Şekil 3.1: Makro kapsüllerin geometrik dizilimi a)soğuk hava deposu b)kondanser odası c) evaporatör arka yüzeyi ve tavan d) evaporatörün arkası ve yan yüzeyler e)depo içindeki duyurgaçların konumu.....	34
Şekil 3.2: FDM'nin DSC analizi a) birinci ısıtma b) soğutma ve ikinci ısıtma eğrisi.	38
Şekil 3.3: FDM'nin erime ve donma sıcaklık aralığını ve entalpi değerini gösteren eğri.....	38
Şekil 3.4: Depo sıcaklık set değeri -18 °C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun bir saatlik dağılımı.	39
Şekil 3.5: Diferansiyel üst sıcaklık değerinin yükselmesinin önüne geçmek için sistemde dolaşan akışanın evaporatör girişi öncesine takılan selenoid valfin konumu.	40
Şekil 3.6: Entalpi-sıcaklık ilişkisi a) saf madde b) karışım.	44
Şekil 4.1: FDM'nin -14,7°C sıcaklıktan başlayan erime prosesinin doğal taşınımla yapılan deney fotoğrafları.	53
Şekil 4.2: Depo sıcaklık set değeri -18 °C'ye geliş, 36 saatlik on/off periyodu ve deponun ısınma sürecini gösteren sıcaklık ve bağlı nemin zamana bağlı dağılımı.....	54
Şekil 4.3: a) Depo sıcaklık set değeri -18°C' ye 14,8h'de gelirken FDM, depo içi sıcaklık ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı b) fan kontrollü çalışılan sistemde evaporatör dönüş sıcaklığı >+15°C iken evaporatör fanının devreye girmediğini gösteren hava hız dağılımı.....	55
Şekil 4.4: Depo sıcaklık set değeri -18 °C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun 36 saatlik dağılımı.	56
Şekil 4.5: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18 °C'de kompresör on/off süre salınımları.....	56
Şekil 4.6: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18 °C iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.	58
Şekil 4.7: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18 °C iken 12 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	58
Şekil 4.8: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18 °C iken 6 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	58
Şekil 4.9: Mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla deponun ve FDM 'nin ısınma periyodu.	59
Şekil 4.10: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) set değeri -18°C'ye inme b) deponun ısınma periyodu.....	60
Şekil 4.11: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) 36 saatlik kompresör on/off periyodları b) bir saatlik on/off salınım detayı.....	61

Şekil 4.12: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off süreleri.	62
Şekil 4.13: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de son 6 saat içinde kompresörün harcadığı saatlik enerji verileri.	63
Şekil 4.14: %70 FDM kaplı deponun sıcaklık set değeri -16 °C'ye geliş, 36 saatlik on/off periyodu ve erime sürecini +4°C'ye kadar gösteren dağılım.....	64
Şekil 4.15: Depo sıcaklık set değeri -16°C' ye 11,86 saatte gelirken FDM ile depo içi sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılım.....	65
Şekil 4.16: FDM'nin ve depo sıcaklığının set değeri -16 °C'de kompresör on/off periyodunun sıcaklığa bağlı 36 saatlik dağılım.....	65
Şekil 4.17: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C'de kompresör on/off sürelerinin zamana bağlı salınım.....	66
Şekil 4.18: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	66
Şekil 4.19: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 12 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	67
Şekil 4.20: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 12 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	67
Şekil 4.21: FDM'li kabinin sıcaklık set değeri -16 °C iken mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla FDM'nin ve deponun referans sıcaklığına yükselme periyodu.	68
Şekil 4.22: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) sıcaklık set değeri -16 °C'ya ulaşma b) depo ısınma periyodu.....	69
Şekil 4.23: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) 36 saatlik kompresör on/off periyodları b) bir saatlik on/off salınım detayı.....	70
Şekil 4.24: FDM'siz ve FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 36 saatlik ve son 6 saatlik kompresör on/off süreleri.	71
Şekil 4.25: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -16 °C'de kompresörün saatlik harcadığı enerji verileri.	72
Şekil 4.26: FDM kaplı deponun sıcaklık set değerine iniş, on/off periyodu ve erime sürecini gösteren dağılım.	72
Şekil 4.27: Depo sıcaklık set değeri -14°C'e 7,5 saatte gelirken FDM, depo içi ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı.....	73
Şekil 4.28: Sıcaklık set değeri -14 °C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun 36 saatlik dağılımı.	74
Şekil 4.29: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14 °C iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	74
Şekil 4.30: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14 °C iken 6 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	75
Şekil 4.31: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14 °C iken 6 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.....	75
Şekil 4.32: FDM'li kabinin sıcaklık set değeri -14 °C iken mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla FDM'nin ve deponun referans sıcaklığına ısınma periyodu.	76
Şekil 4.33: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) sıcaklık set değeri -14 °C'ya geliş b) FDM'nin ve deponun ısınma periyodu.....	77
Şekil 4.34: Set -14 °C için FDM'li ve FDM'siz kabinde kompresör on/off süreleri.....	78
Şekil 4.35: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -14 °C'de kompresörün harcadığı enerji verileri.	79

Şekil 4.36: FDM'li deneylerde set -18°C, -16°C ve -14°C için geçen sürelerin dağılımı a) depo sıcaklık b) FDM sıcaklık.....	80
Şekil 4.37: FDM'siz ve boş makro kapsüllü kabinlerde set sıcaklığı -16°C için 36 saatlik on/off periyodu.	81
Şekil 4.38: Pleksiglas malzemeden oluşan orijinal boyutlardaki yalıtımsız makrokapsül içinde bulunan FDM'nin üçer derece farklarla a) sıcaklık b) erime oran dağılımları.	82
Şekil 4.39: Yalıtımsız FDM'nin zamana bağlı deneysel ve sayısal analiz sıcaklık ve erime oran dağılımları.	82
Şekil 4.40: Katı modelin iç ölçüleri baz alınarak a) 3D katı modeli b) simetri yüzeyi c) 2D sonlu eleman ağı.	84
Şekil 4.41: Sayısal analizde doğal ısı taşınım katsayısı 5 W/m ² K olan FDM ve poliüretan köpüğün tanımlanan sınır şartları a) set sıcaklık değeri -18°C b) set sıcaklık değeri -16°C.	85
Şekil 4.42: Depo içindeki -12,8°C ve -14,7°C başlangıç sıcaklıklarındaki FDM'nin zamana bağlı deneysel sıcaklık sonuçlarının dağılımı.....	85
Şekil 4.43: Depo içindeki -12,8°C ve -14,7°C başlangıç sıcaklıklarındaki FDM'nin zamana bağlı sayısal sıcaklık sonuçlarının dağılımı.....	86
Şekil 4.44: Depo içindeki -12,8°C başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları.	86
Şekil 4.45: Depo içindeki -14,7°C başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları.	87
Şekil 4.46: FDM'nin -12,8°C başlangıç sıcaklığından tam erimenin gerçekleştiği +2,1°C'ye kadar birer derece farkla gerçekleşen a) sıcaklık b) hacimsel erime prosesi dağılımı.....	87
Şekil 4.47: Boyut analizindeki FoSte sayısının erime oranına bağlı dağılımı.....	89
Şekil 4.48: Senaryo 2'de üç farklı set sıcaklığı için saatlik enerji ihtiyaçları.	90
Şekil 4.49: Senaryo 2'de üç farklı set sıcaklığı için saatlik enerji ihtiyacı.	90
Şekil 4.50: FDM'li kabinin FDM'siz kabine göre senaryo 2'de sağlanan enerji tasarrufunun yıllara göre dağılımı.	91

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: FDM'lerin kullanım alanları (Konuklu, 2008; Zalba, 2003; Aydın, 2010; Cabeza ve Mehling, 2007; Oro vd.,2012).	4
Tablo 1.2: Organik ve inorganik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Aydın, 2010).....	7
Tablo 1.3: Isıl enerji depolayan malzemelerin genel karşılaştırması (Hasnain, 1998).....	9
Tablo 1.4: FDM'lerde olması gereken özellikler (Aydın, 2010).	9
Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan depo ve ölçü aletlerinin özellikleri.....	34
Tablo 3.2: FDM'nin termofiziksel özellikleri.....	38
Tablo 3.3: Deneyde kullanılan pleksiglastan yapılmış makro kapsülün termofiziksel özellikleri.....	47
Tablo 4.1: Yalıtımsız FDM'nin deney sonuçları.	52
Tablo 4.2: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off süreleri.	62
Tablo 4.3: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off periyodundaki enerji verileri....	63
Tablo 4.4: FDM'siz ve FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 36 saatlik ve son 6 saatlik kompresör on/off süreleri.	70
Tablo 4.5: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -16 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off periyodundaki enerji verileri....	71
Tablo 4.6: Set -14 °C için kompresör on/off süreleri.....	78
Tablo 4.7: Kompresör on/off periyotlarındaki set -14 °C için 36 saat ve son 6 saatteki enerji verileri.	79
Tablo 4.8: Yalıtımsız FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçları.	83
Tablo 4.9: Hesaplanan hata analiz değerleri.	89

KISALTMALAR ve SEMBOL LİSTESİ

A_{mush}	: Peltemsi bölgeye ait sabiti olup düşme genliğini ölçer
C	: Lapa bölge sabiti
C_p	: Sabit basınçta spesifik ısı, J/kgK
H	: Entalpi, J/kg
L	: Gizli ısı, J/kg
P	: Basınç, atm
Q_1	: Döşeme, tavan, kapı ve duvardan geçen ısı, W
Q_2	: Teras, çatı, güneşe bakan kapı ve duvarlardan geçen güneş ısı, W
Q_3	: İş icabı faaliyet gösteren soğuk depo personeli tarafından yayılan ısı, W
Q_4	: Evaporatör fanı, ışıklar, motorlar veya mevcut olabilecek vb. ısı üretim cihaz ve diğer ısı üretim kaynaklarının yaydığı ısı, W
Q_5	: Dışardan sızıntı ile soğuk depoya giren veya ventilasyon için kullanılan taze havayı soğuk depo rejimine getirmek için alınması gerekli ısı, W
Q_6	: Soğuk depoya alınan ürünün muhafaza rejimine getirilmesi için alınması gerekli ısı, W
S	: Isıl kaynak terimi
$T_{soğ}$: Soğutulan hava sıcaklığı, °C
T_{air}	: Havanın sıcaklığı, °C
T_{fg}	: Depo içi sıcaklık, °C
$T_ç$: Çevre sıcaklığı, °C
T_s	: Sıcaklık ölçümünde zaman, s
T_s	: Katı hal sıcaklık, K
T_l	: Sıvı hal sıcaklık, K
T_m	: Tek bir faz için değişim sıcaklığı, K
W	: Belirsizlik miktarı

W_p, W_{cp}	: Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek hata
a_1	: Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan hata
a_2	: Zaman değerlerinin okunması esnasında kaynaklanan hata
b_1	: Dijital termometreden kaynaklanan hata
c_1	: Bağlantı elemanları ve noktaları arasında oluşan hata
c_2	: Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin alınması sırasında yapılabilecek ortalama hata
e_1	: Fan girişinde sıcaklık ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata
l_1	: Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata
v_p	: Katılaşmış malzemenin çekilmesi nedeniyle oluşan katı hızı, m/s
ϵ	: Sıfıra bölünmeyi ortadan kaldırmak için seçilmiş bir küçük sayı
τ	: Tensör
∇	: Laplace sembolü
\vec{v}	: Bağlı hız, m/s
β	: Sıvı hacim fraksiyonu
ρ	: Yoğunluk, kg/m ³
$\partial\rho$: Diferansiyel yoğunluk
∂t	: Diferansiyel zaman
μ	: Dinamik viskozite, Ns/m ²

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında bana her türlü desteği veren ve tecrübeleri ile bana yol gösteren bu günlere gelmemde büyük emek ve payları olan danışmanlarım Doç.Dr. Enver YALÇIN, Doç.Dr. Ahmet Alper AYDIN ve tüm değerli jüri üyelerime, soğuk depo sisteminin kurulumunda destek sağlayan merhum Prof Sabri Savaş'ın kurucusu olduğu Savaşlar Tesisat Taahhüt ve Ticaret Ltd. Şti.'ne, deneysel çalışmalarında fikren ve bedenen gece gündüz yanımda olan Alper GÜNDOĞMUŞ, Sefa BOZOĞLU, Ramazan ASLAN'a, aileme, laboratuvar şartlarında battaniyesi ve yastığıyla benle sabahlamak isteyen yol arkadaşım, dünyam ve kızım Ulus Duru'ya ve yüreğimin eşsiz parçası babam Remzi KILIÇ' a teşekkür ve şükranlarımı bir borç bilirim.

Balıkesir, Ocak 2018

Gülenay Alevay KILIÇ

1. GİRİŞ

Soğuk depolamadaki bilimsel gelişmeler, II. Dünya savaşından sonra ortaya çıkmıştır. Savaş sonrası özellikle üretim ve tüketim arasındaki dengesizlik, depolamanın önemini arttırmıştır. Savaş öncesi suni buz yapılması henüz bilinmemekte ve soğutma için kar ve buz kullanılmaktaydı. Dünya nüfusu arttıkça üretim ve tüketim doğru orantılı olarak artmış ve sonunda 19.yy sonlarında gelişmiş ülkelerde soğuk muhafaza, mekanik sistemlerle soğuk depolarda yapılmaya başlanmıştır. Alınan olumlu sonuçlar soğuk depoculuk için başta ABD olmak üzere Avrupa ülkelerinde hızla yayılmış ve gelişmiştir.

II. Dünya savaşından sonra da soğuk muhafazası gereken her türlü ürünün tüketiciye zamanında ulaştırılması da ayrı bir önem kazanmıştır. Dolayısıyla taşınan bu ürünlerin tüketiciye, soğuk muhafaza şartları (soğuk zincir) bozulmadan sunulması gerekmektedir. Bu yüzden malzemelerin, mevsim şartlarından etkilenmeden sevkinin yapılması, soğuk zincirin en önemli aşamasını oluşturmaktadır. Bu ürünlerin sıcaklığını ve nemini belli bir set aralığında koruyan mekanik soğutma sistemlerin olduğu frigorifik araçlarla yapılmaktadır (Li, Hwang, Radermacher, 2012).

Gizli ısı depolama sistemi, bir malzemenin faz değiştirerek ısıyı gizli ısı olarak depolanması görünür ısı depolamaya göre daha avantajlı olup ısıtma ve soğutma sektöründe sağladığı enerji tasarrufu ve yüksek sistem verimi nedeniyle günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. FDM, maddenin faz değişimi esnasında gözle görülür bir sıcaklık artışı yaşamadan yüksek miktardaki ısıyı bünyesine enerji olarak depolayan malzemelerdir. Madde, faz değiştirmek için büyük miktarda ısı enerjisini ortamdan alıp içine almakta veyahut ortama salmaktadır. Böylelikle birim miktarda depolanan enerji başına daha az hacim gerektirmektedir. Isı enerjisinin depolanmasında FDM'lerin fiziksel özelliklerinden en fazla kullanılan katı-sıvı faz ayrılmasıdır. Bununla birlikte faz değişimli ısı geçişi sırasında meydana gelen dar sıcaklık aralığı nedeniyle de birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. (Abhat,1983;

Zalba vd, 2003; Farid vd, 2004; Aydın, 2010; Dutil vd, 2011). Ayrıca FDM'lerin sınıflandırılması, özellikleri, seçimi, uygulama alanları ve buna ek olarak kullanılan geometri ve matematiksel modeli yapılan genel literatür çalışmaları dikkate değer niteliktedir.

FDM, elektronik aletlerden otomobil endüstrisine, binalardan ısı depolama sistemlerine farklı birçok alanda enerji depolamak ve sıcaklık değişimlerini dengelemek için kullanılmaktadır (Konuklu, 2008; Zalba, 2003; Okçu, Vural ve Fırat, 2014; Regin, Solanki ve Saini, 2009; Kenisarin ve Mahkamov, 2007; Omari, Kousksou ve Guer, 2011) .

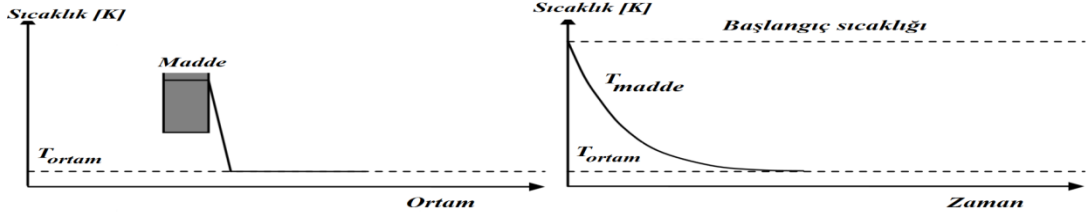
1.1 Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Enerji kaynaklarından daha fazla yüksek fayda sağlayabilmek için termal enerji depolanabilmektedir. Termal enerji depolama (TED), malzeme sıcaklığındaki değişimden faydalanılarak yapılan depolamadır. Depolama, kimyasal veya fiziksel proseslerle yapılmaktadır. Depolanabilecek ısının miktarı; ortamın ısı kapasitesine, sıcaklıktaki değişim miktarına ve depolama materyalinin miktarına bağlıdır. TED sistemleri kullanılarak sürekli olmayan enerji, ihtiyaç duyulduğu zamanlarda kullanılmak üzere kısa (gece/gündüz) veya uzun (mevsimlik/dönemlik) süreli olarak depolanabilmektedir. Kısa süreli depolama, gece/gündüz arasındaki sıcaklık farklılıklarından veya kısa süreli atık ısılardan faydalanarak birçok alanda uygulanabilmektedir. Isı depolamada uygulanan yöntemler; Fiziksel prosesler, duyulur ısı ve gizli ısı depolama olarak ikiye ayrılmaktadır (Abhat, 1983; Dinçer ve Rosen 2002; Zalba ve ark. 2003; Farid ve ark. 2004).

1.1.1 Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama yaşam ortamlarının ısıtılmasında yüzyıllardır kullanılmaktadır. Duyulur ısı depolamada ısı depolama ve geri kazanımı tersinirdir. Yani sistemin ekonomik ömrü boyunca bu maddelerin bu özellikleri değişmez. Duyulur ısı depolamada, depolama sıcaklığı sürekli arttığından ısı kayıpları fazladır. Sistemde yalıtıma ihtiyaç vardır, bu da maliyeti arttırmaktadır. Duyulur ısı

depolamada sistemden ısı geri kazanılırken, depolama sıcaklığı sürekli düştüğünden ısı akış dağılımı gizli ısı depolamaya göre daha kararsız olacaktır. Duyulur ısı depolama, depolama ortamına göre; sıvı ortamda depolama, katı ortamda depolama ve hibrid (katı+sıvı) ortamda depolama şeklinde sınıflandırılabilir (Çengel, 2011; Kılıç vd.,1983).



Şekil 1.1: Depolama ortamında duyulur ısıyla bir maddenin soğutulması (Mehling, 2008).

Şekil 1.1' de gösterilen belirli bir zaman aralığında depolanan ya da depolanabilecek ısı eşitlik (1.1) ifadesinden hesaplanabilir:

$$Q = mC_p(T_1 - T_0) \quad (1.1)$$

Burada Q, depolanan toplam ısı (kWh/m² yıl), T₀ ilk sıcaklık (K), T₁ son sıcaklık(K), m kütle(kg), C_p özgül ısıyı (J/(kgK)) ifade eder.

1.1.2 Gizli Isı Depolama

Gizli ısı, maddenin faz değişimi sırasında aldığı ya da saldıdığı ısıdır. Duyulur ısının depolanması yüksek sıcaklık farklılıkları veya büyük hacimler gerektiğinden termal enerjinin, gizli ısı şeklinde depolanması çok daha avantajlıdır. Gizli ısı depolama katı-sıvı, katı-katı, sıvı-buhar ve buhar-katı dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. (Çengel, 2011; Özönur, 2004; Lane, 1983; Sarı,2000).

Gizli ısı depolamada gereken depo hacmi, duyulur ısıya göre 4–5 kat daha küçüktür. Örneğin suyun gizli ısısının duyulur ısısına oranı 80'dir; bunun anlamı şudur: 1 kg buzun erimesi için gerekli enerji miktarı 1 kg suyun sıcaklığını 1°C artırmak için gerekli ısıdan 80 kat daha fazladır. Bu durum depo tasarımında önemli bir avantaj olup maliyeti de düşürür. FDM, sabit bir sıcaklık aralığında depolama olanağı sağlayarak ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılabilirler (Feldman ve ark., 1986;

Sarı, 2000). Gizli ısı depolama sistemleri temelde iki aşamalı değerlendirilir. Birinci aşamada FDM olarak kullanılacak maddenin seçimi yapılır ve ikinci aşamada da FDM'de depolanan ısının uygulama ortamına aktarımı için ısı değiştirici tasarımı şeklinde özetlenebilir (Öztürk, 1997).

1.1.3 FDM'lerin Ana Kullanım Alanları

Günümüzde termal enerji depolamada kullanılmak üzere yeni maddelerin araştırılması için çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Ancak aynı zamanda mevcut FDM'ler kullanılarak uygulamaya yönelik kullanım alanlarının genişletilmesi için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Tablo 1.1'de FDM'lerin potansiyel kullanım alanları belirtilmiştir.

Tablo 1.1: FDM'lerin kullanım alanları (Konuklu, 2008; Zalba, 2003; Aydın, 2010; Cabeza ve Mehling, 2007; Oro vd.,2012).

Soğutmada kurulu gücün azaltılması
Güneş enerjisinin termal depolanması
Tıbbi uygulamalar: Kan, organ, ilaç, vb. taşınması
İlaç, gıda vb. soğuk muhafaza gereken ürünlerinin soğuk tutulması
Motorların soğutulması: elektrikli ve içten yanmalı motorlardır
Isınma ve kullanma sıcak suyu
Kimyasal reaksiyonlarda ekzotermik piklerin etkisinin azaltılması
Binaların yapı malzemelerinde ısıtma ve soğutma yükünün azaltılması
Yaşam ortamlarında sıcaklığın sabit tutulması
Arabalarda termal konfor
Elektrikli aletlerin termal korunması
Uzay mekiği termal uygulamaları
Sıcak ve soğuk iklim kıyafetler vb. tekstil endüstrisinde
Elektronik cihazların aşırı ısınmasının engellenmesi

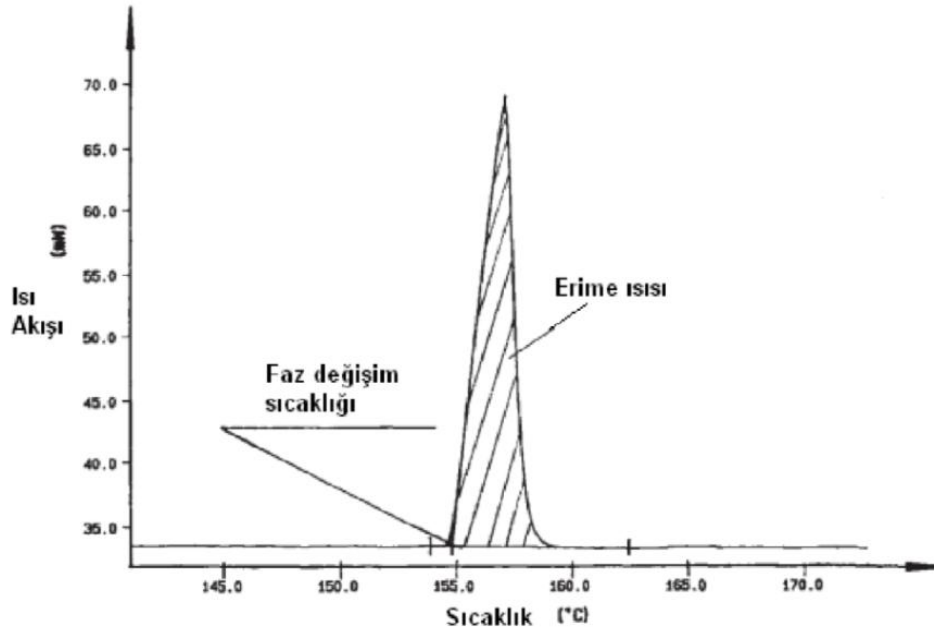
1.1.4 Faz Değişim Sıcaklığı

Uygulamada istenilen sıcaklık aralığı ile FDM'nin sıvı/katı sıcaklığı ile aynı veya yakın olmalıdır. Isıtma veya soğutma uygulamalarında esas önemli başka bir parametre faz dönüşüm sıcaklığı ile sistem sıcaklığının karşılaştırılmasıdır Uygulama

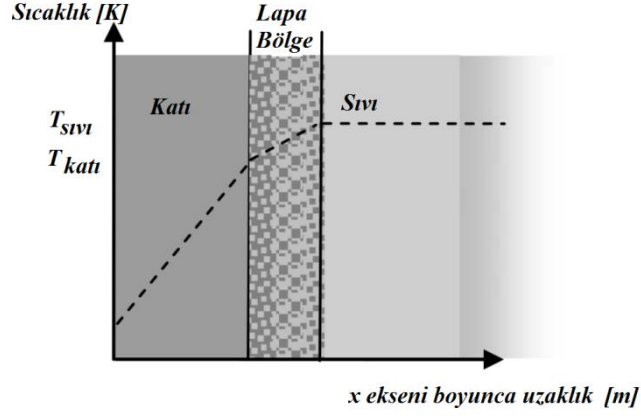
sıcaklığına yakın erime noktasına sahip FDM'ler literatürden veya ticari firmalardan sağlanabilir (Lane,1983;Sarı,2000).

1.1.5 Faz Değişim Isısı

Faz değiştiren maddelerde aranan en önemli özellik yüksek faz dönüşüm ısısına sahip olmalarıdır (Lane,1983). Faz değişim sıcaklık aralığında gizli ısının depolandığı şekil 1.2'deki ısı akışı sıcaklık grafiğinde gösterilmektedir. x eksenini boyunca sıcaklığa bağlı olarak FDM erime/katılma grafiği verilmektedir. Bunlar katı, lapa ve sıvı hal olarak bulunur ve şekil 1.3' de gösterilmektedir.



Şekil 1.2: FDM sıcaklık ısı akış dağılımı.



Şekil 1.3: FDM'nin x eksenine boyunca sıcaklığa bağlı hal değişimi (Mehling,2008).

1.1.6 FDM'lerin Sınıflandırılması

Genellikle organik, inorganik ve ötektik malzemeler olarak ayrılırlar. Organik maddeler yüksek erime entalpilerine sahiptir. Konuldukları kabın malzemesine karşı korozif değildirler (Aydın,2010). İnorganik maddeler, organik maddelere eş erime entalpilerine sahiptirler. Aynı zamanda organik maddeler, yoğunlukları yüksek olduğu için birim hacimde daha yüksek erime entalpilerine sahip olup eş termal yüklerde daha küçük hacim gerektirmektedir. Bu maddelerin başlıca dezavantajı korozif etkilerinin olmasıdır (Farid ve ark.2004; Kenisarin, 2007).

1.1.6.1 Organik, İnorganik ve Ötektik FDM'ler

Organik maddeler arasında yağ asitleri ve parafinler, araştırmacılar tarafından en fazla ilgi gösterilen maddelerdir. Bu maddelerin ana üstünlükleri, termal kararlılıkları ve korozyon yapıcı olmamalarıdır. Termal enerji depolama kapasiteleri yüksek ve erime/donma sonucunda hacim değişimleri azdır (Mazman, 2006).

İnorganik FDM'ler, yüksek ısı depolama kabiliyetleri ve yüksek ısıl iletkenliklerinden ötürü ilgi çekici malzemelerdir. Kararsız yapıları, termal çevrim işlemleri sırasında su kayıpları ve aşırı soğumaları dezavantajlarıdır. Erime/katılma esnasında % 10'lara varan hacimsel değişikliğe uğrarlar (Kenisarin, 2007).. Tablo 1.2' de organik ve inorganik FDM'lerin avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 1.2: Organik ve inorganik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları (Aydın, 2010).

Malzeme	Avantajları	Dezavantajları
Organik	Korozif değiller Düşük veya hiç aşırı soğuma göstermezler. Kimyasal ve termal olarak kararlıdırlar.	Daha düşük faz değiştirme entalpisine sahiptirler. Düşük termal iletkenliğe sahiptirler. Yanıcıdırlar.
İnorganik	Daha büyük faz değiştirme entalpisine sahiptirler.	Aşırı soğumagösterirler. Koroziftirler. Faz ayrışması meydana getirirler.

Ötektik karışımlar organik ve inorganik maddelerle hazırlanabilirler. Elde edilen ötektik karışımlar saf madde gibi sabit bir erime ve donma noktasına sahiptirler. Ötektik bileşimdeki bir karışım saf bir FDM'nin sahip olduğu ısıl özelliklere oldukça benzer bir davranış gösterir. Bu özelliğinden dolayı ötektik karışımlar termal enerji depolama uygulamaları için uygundur. Çok sayıda inorganik ve organik karışımların ötektikleri literatürde bulunmaktadır (Lane,1983; Hasnain,1998).

1.1.7 FDM'lerin Termal Çevrimlerdeki Kararlılığı

İdeal bir FDM'nin genel özelliklerinin yanında FDM, termal çevrim sayısına göre uzun süreli ısıl performansa sahip olmalıdır. Tekrarlanan erime ve donma prosesinde gizli ısı değeri ve faz değişim sıcaklık değişimlerinin en düşük seviyede olması tercih edilmelidir (Sharma vd., 2002).

1.1.8 FDM'lerin Kapsüllenmesi

FDM'nin sıvı faz kaybının engellenmesi ve FDM'nin ortamdaki izole edilmesi için, FDM'lerin kapsüle alınması gerekir. Bu yüzden, kapsülleme işlemindeki tasarım uygulamada önem taşımaktadır. Kapsül yüzeyi, bir ısı aktarım organı olarak görev yapar ve bazı durumlarda bu yüzey malzemenin kararlılığını artırıcı rol oynar. Kapsülleme genellikle makrokapsülleme ve mikrokapsülleme şeklinde olmaktadır.

Prosesle bağlı olarak FDM'nin kapsllenmesindeki ihtiyaçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- i. Korozif dayanıklılık, esneklik ve termal kararlılığa sahip olması;
- ii. FDM'nin çevreyle zararlı temaslara engel görevi yapması;
- iii. Isı aktarımında gereken yüzey alanına sahip olması;
- iv. Piyasada kolayca temin edilebilir olması.

1.1.9 FDM'nin Temel Termodinamiği

FDM sabit sıcaklıktaki faz ayrışması esnasında yüksek miktarda termal enerjiyi depolayabilen malzemelerdir. Gizli ısı depolamaya göre çok daha zayıf olan duyulur ısı depolama, yaşam ortamlarının ısıtılmasında yüzyıllardır kullanılmaktadır. Ancak aynı miktarda ısının depolanması için yüksek sıcaklık farklılıklarının veya büyük hacimlerin gerekmesi, termal enerjinin gizli ısı Şeklinde depolanmasını çok daha etkili yapmaktadır.

Isı enerjisinin depolanması esnasında, FDM öncelikle sıradan bir ısı depolama malzemesi gibi davranarak ısıyı absorbe ettikçe sıcaklığını arttırır. Fakat diğer malzemelerden farklı olarak, faz değişim sıcaklığına ulaŐtıęında çok daha büyük miktarlardaki enerjiyi belirgin bir sıcaklık değişimini göstermeden bünyesine alır. Malzemenin etrafındaki sıcaklık düŐerken de malzeme ters yönde davranarak bünyesindeki gizli ısıyı ortama verir. Bu tarz malzemeler su, tahta, taş vb. sıradan maddelere göre birim kütlesinde çok daha fazla ısıyı depolayabilirler (Hasnain, 1998). Tablo 1.3' de sıradan malzemeler ile FDM'ler arasındaki farklar genel olarak verilmiştir. (Aydın, 2010)

Tablo 1.3: Isıl enerji depolayan malzemelerin genel karşılaştırması (Hasnain, 1998).

Özellik	Taş	Su	Organik FDM	İnorganik FDM
Yoğunluk, kg/m ³	2240	1000	800	1600
Duyulur Isı, kJ/kgK	1	4,2	2	2
Gizli Isı, kJ/kg	-	-	190	230
Gizli Isı, kJ/m ³	-	-	152	368
10 ⁶ J için Depolama, kg	67000	16000	5300	4350
Oransal Depolama Kütle	15	4	1,25	1

1.1.9.1 FDM'lerde Aranılan Özellikler

Bir malzemenin yüksek gizli ısı entalpisine ve kullanılacak sisteme uygun faz değişim sıcaklığına sahip olması tercihen bir FDM için en önemli iki unsurdur. Ancak, bu temel özellikler haricinde bir malzemenin sahip olması gereken diğer özellikler tablo 1.4'de termofiziksel, kimyasal ve ekonomik alt gruplarında sıralanmıştır (Mehling, 2008, Aydın, 2010, Tyagi, 2007; Sharma,2009, Kennisarin, 2007).

Tablo 1.4: FDM'lerde olması gereken özellikler (Aydın, 2010).

Termofiziksel Özellikler
İstenilen sıcaklıkta faz değiştirme Birim hacim/kütle başına yüksek gizli ısı entalpisine Yüksek duyulur ısı katsayısı Yüksek termal iletkenlik Faz değişimi esnasında düşük hacim değişikliği ve buhar baskısı Düzenli faz değiştirme karakteristiği Düşük erime ve donma sıcaklık farkı (Tyagi, 2007; Sharma,2009).
Kimyasal Özellikler
Tersinir donma ve erime döngüsü Yüksek sayıda faz değiştirme döngüsü sonrası kimyasal bozunmaya uğramamak Malzemenin aşındırıcı etkisinin bulunmaması Malzemenin güvenlik sebebiyle zehirli, alev alıcı veya patlayıcı olmaması (Tyagi, 2007).
Ekonomik Özellikler
Düşük fiyat Çevresel ve ekonomik nedenlerden ötürü malzemenin yeniden kullanılabilmesi Malzemenin kolay temin edilebilmesi (Kennisarin, 2007).

1.2 Frigorifik Araçlarla Sevkiyat ve Uluslararası Alanda Çözümler

Gelişmekte olan ülkemizde, 2012 yılına kadar herhangi bir yasal düzenleme olmadığı için üretici firmalar ve ihracatçılar ürünlerini, sağlıklı koşullarda sevk etmekteydiler. Uluslararası taşımacılık yasasına tabi olunmadığı için de üretilen sebze ve meyvenin sadece %5'lik kısmını ihraç etmekte ve araçlar gittikleri ülkenin sınırlarına gelene kadar pek çok kontrole tabi tutulmaktaydı. Türkiye, 10 Mayıs 2012 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan yaklaşık 50 ülkenin taraf olduğu “Bozulabilir Gıda Maddelerinin Uluslararası Taşımacılığı ve Bu Taşımacılık Faaliyetinde Kullanılacak Özel Ekipmana İlişkin Anlaşma (ATP)” mevzuat yürürlüğe girmiştir. ATP mevzuatı derin dondurulmuş, normal dondurulmuş, soğutulmuş ve taşınması esnasında sabit iç ortam sıcaklığı gerektiren gıda maddelerini kapsamaktadır. Et, et ürünleri, süt, süt ürünleri, balık ve diğer deniz ürünleri, taze sebze-meyveler, dondurulmuş hazır gıdalar, sıvı yağlar, margarinler, taze ve konsantre meyve suları vs. içermektedir. Böylelikle gıda ürünlerinin soğuk zincir kırılmadan frigorifik araçla taşınma şartının oluşması, insan sağlığı için çok büyük öneme sahiptir. Bunun yanında da gelişmekte olan ülkemizde soğuk taşımacılık uygulamalarında frigorifik araç kullanım zorunluluğu doğmuştur. Dolayısıyla firmalar ve tüketiciler açısından, üretilen ve ihraç edilen bozulabilir her türlü ürünün pazara erişme maliyeti de yükselmiştir.

Frigorifik taşımacılıkta kullanılan mekanik sistemlerin hiçbir şart altında kapatılmaması, istenilen set aralık değerinin aşılmaması gerekmektedir. Bu yüzden firmalar uzun süren taşımacılık uygulamalarında iki şoför kullanmakta böylelikle araçtan alınan elektrik enerjisi kesilmediği için soğuk zincirin kırılması engellenmektedir. Kısa süren taşımacılık uygulamalarında ise şoförün yemek yeme veya kısa süreli konaklamalarında aracı çalışır vaziyette bırakma zorunluluğu doğmaktadır. Ayrıca frigorifik araca yüksek bir soğutma yükü getirildiği için yakıt tüketimini de arttırmaktadır.

1.3 Tezin Önemi

Yapılan bu tez çalışmasıyla, gizli ısı depolama sisteminin mekanik soğutma grubuyla entegre şekilde çalışarak kompresörün çalışma süresinin azaltılması ve dolayısıyla duruş periyodunun uzatılması amaçlanmıştır. FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesi sayesinde mekanik soğutma gruplarının neden olduğu enerji sarfiyatının önüne geçilecektir. Uygulamada FDM'nin kullanılması durumunda, mekanik soğutma grubunun kesintiye uğraması durumunda soğuk zincirin kırılma riski azalacaktır.

Çalışmayı deneysel olarak gerçekleştirmek üzere, gizli ısı enerjisinin entegre edildiği soğuk hava deposu, Balıkesir Üniversitesinin İklimlendirme Laboratuvarında kurulmuştur. Tezin ilk aşamasında, deponun soğutma kapasitesi belirlenerek, sisteme uygun enerji ihtiyacı sağlayacak FDM'nin boyutlandırılması yapılmıştır. Bu boyutlandırma yapılırken deneylerin aynı şartlar altında yapılabilmesi için laboratuvar ortam sıcaklığının stabil kalabilmesi için gerekli iklimlendirme ekipmanları sağlanmıştır.

Tez çalışmasında ayrıca sistemin sayısal modellenmesi yapılmış olup Ansys Fluent 15.0 programı kullanılmıştır. FDM ve ev tipi soğutucularla kullanımı yurtdışında uygulamaya örnekleri bulunmakta olup endüstriyel boyutlarda çalışılmamıştır.

1.4 Motivasyon ve Amaçları

Binalar, %35'lik bir payla halihazırda enerji tüketiminde lider durumdadır. Mevcut tüketim eğrilerine bakıldığında, binaların enerji talepleri yıldan yıla yükselecektir. Dolayısıyla tüm binalardan gelen doğrudan küresel CO₂ salınımını arttıracaktır. Beyaz eşyalar ve diğer elektronik aletler, son on yılda %43'lük bir artış göstererek, 2010 yılında yaklaşık 2500 TWh elektrik tüketmiştir. Bu rakam, evlerde tüketilen toplam elektriğin yaklaşık olarak yarısına tekabül etmektedir. Büyük ev aletlerine sahip olmak, pek çok ülkede belirli bir doyuma ulaşmış gibi

görülmektedir; ancak halen dünyanın diğer bölgelerinde talep artışıyla ilgili kayda değer bir potansiyel mevcuttur (IEA, 2013).

Endüstriyel tipte bir soğuk hava deposunda TED sisteminin kullanılmasına dayalı bu tür bir çalışmanın literatürde eksikliği hissedilmektedir. Bu tez çalışmasının amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Bir TED sisteminin kurularak gizli ısı depolama sınır şartlarının belirlenmesi
- Kurulacak bu sisteme uygun ve yeter şartlarda FDM'nin temini
- Sistem kapasitesinin tayini
- Sistem bileşenlerinin davranışlarının tayini ve ölçülecek parametrelerin belirlenmesi
- FDM'li makro kapsüllerin uygun dizayn ile soğuk hava deposuna entegre edilmesi
- Deneysel çalışmada ölçülen parametrelerin doğruluğunun belirsizlik analiziyle tayini
- Sayısal analiz bulgularının deneysel çalışma sonuçlarıyla doğrulanması
- Uygulamanın maliyet analizinin yapılması

Çalışmada literatürde uygulama alanı bulmamış, frigorifik araçlarda kullanılan mekanik soğutma grubuna entegre edilmiş ısı depolama ortamı olarak FDM'li bir geometri dizayn edilmiş, elde edilen sonuçların deneysel çalışmalarla doğrulandığı görülmüştür. Böylece firmaların, üretim sistemlerinde teknolojik yenilemeye gittiklerinde, teknolojik değişimin gerektirdiği yatırım maliyetleri artmakla birlikte, bu çalışmada sunulan yeni yöntem, firmanın bir önceki teknolojiye sahip diğer firmalar karşısında rekabet gücünü artırarak, tüketicilerin düşük fiyat taleplerini karşılayacak maliyet avantajı sağlanacaktır.

Frigorifik araçlarda kullanılacak bu yeni yöntemin toplam maliyetteki yaratacağı marjinal etki (maliyet), bu teknolojinin kullanılmasıyla elde edilecek marjinal gelirin altında kalacaktır. Dolayısıyla daha kısa sürede ve düşük maliyetle daha çok mal taşınmasını sağlanacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Enerji kaynaklarından daha fazla yüksek fayda sağlanabilmesi için termal enerji depolanabilmektedir. TED, malzeme sıcaklığındaki değişimden faydalanılarak yapılan depolamadır. Depolanabilecek ısının miktarı; ortamın ısı kapasitesine, sıcaklıktaki değişim miktarına ve depolama materyalinin miktarına bağlıdır.

TED sistemleri kullanılarak sürekli olmayan enerji, ihtiyaç duyulduğu zamanlarda kullanılmak üzere kısa (gece/gündüz) veya uzun (mevsimlik/dönemlik) süreli olarak depolanabilmektedir. Kısa süreli enerji depolama, gece gündüz arasındaki sıcaklık farklılıklarından veya kısa süreli atık ısılardan faydalanarak birçok alanda uygulanabilmektedir (Abhat,1983; Dinçer ve Rosen 2002; Zalba ve ark.2003; Farid ve ark. 2004). Literatürde TED sistemleri içinde FDM kullanımı konusunda yapılmış çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

2.1 TED Sistemlerinden FDM Kullanımının Binalarda Uygulanmasıyla İlgili Çalışmalar

Termal depolamaya ait geliştirilmiş yöntemler, binalarda uygulanan diğer gelişmelere oranla geride kalmış olup enerji tasarrufuna ait bir konudur. Hawes (1991) çalışmalarında bu bu ihtiyacı ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada betonda gizli ısı depolanması üzerine beton yapı malzemeleri seçilmiştir. Bu malzemelerin ısı depolama kapasitesi bakımından iyileştirilmesi için ideal bir aday olarak seçilmiştir. Bu işlem organik FDM'nin beton içerisine eklenmesi ile elde edilmiştir. FDM'ler, seçilen bir sıcaklıkta donma gizli ısısını absorbe ederler veya serbest bırakırlar ve böylece, daha küçük bir sıcaklık aralığı üzerinde emdirilmiş betonun ısı depolama kapasitesini büyük ölçüde artırırlar. Bu ilave malzemelerin kombinasyonu ile binaların ısı depolama performansını optimize etmek ve beton maliyetini azaltmak amacıyla incelenmiştir. Çeşitli üretim prosedürleri de geliştirilmiştir. FDM iki tipinin tatmin edici olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak, beton içerisinde farklı şekillerde

emprenye edilmesi için kullanılan diğer bazı umut verici çeşitli FDM adaylarının performansları da gelecekteki çalışmalar için optimizasyon amacıyla çalışılmış ve betonların FDM'lere uyumluluğunu geliştirmek için modifiye edilmiştir. Toplam dört tip çalışılmış ve bunlar arasından üç tip ön-emprenye için uygun olarak bulunmuştur. Bu araştırmada geliştirilen enerji depolayabilen betonlar, atık ısının, güneş kolektörlerinden gelen veya pik saatleri dışındaki ısının veya düşük maliyetli ısının depolanması için oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olduğuna değinilmiştir. Ayrıca ısı depolama yolu ile brülör ve soğutucu performansını artırmak için, bu ekipmanların çalışma frekansının azaltılması yoluyla da bu malzemelerin kullanılabilmesi açıklanmıştır. Bu malzemeler yakıt maliyetleri yüksek olan ve uygun bir sıcaklık dalgalanmasına sahip olan yerlerde kullanım açısından maliyet etkin olduğu gibi, daha soğuk bölgelerde de kullanılabilmesi ortaya konulmuştur.

Justin ve ark. (2010), soğuk termal enerji depolama teknolojileri ile ilgili bir inceleme sunmuştur. Erime ve katılma işlemi sırasında ortaya çıkardığı yüksek enerji yoğunluğu ve küçük sıcaklık değişim aralığı sağladıkları için FDM'ler ile ilgili çalışmışlardır. Tuzların hidratları katılma sırasında ortaya koydukları yüksek gizli ısı, sağladıkları yüksek ısı iletkenliği, düşük alevlenebilirlik özellikleri sayesinde özellikle ilgi çekicidir ve organik FDM'lere oranla binalarda kullanımı kolaylaştırmaktadırlar. Deneysel çalışmalar, teorik analiz ve gerçek vaka çalışmalarından elde edilen sistem performansına ait incelemeler malzeme ile ilgili bazı sorunları ortaya koymuştur. Maliyet etkinliği sağlayabilmek için tuz hidratları ile gizli ısı depolama alanında gelecekteki çalışmalar, depolama yoğunluğundan ödün vermeksizin uyuşmayan erime ve ardından soğutma sınırlandırması için uygun yöntemlerin bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, soğuk uygulamalarda gizli ısı depolama sistem entegrasyonu, yüksek güç ve depolama kapasitesi için yenilikçi tasarım açısından ve FDM kapsülasyonunun yük için optimize edilmiş şekilde boyutlandırılması, kontrol edilmesi ve ortadan kaldırılması konusunda geliştirilebilir olduğu vurgulanmıştır

Shilei vd (2007) ve Kuznik (2008) yaptığı çalışmada, FDM' ler, hafif yapı malzemelerinin ısı eylemsizlik özelliklerini genişletmenin oldukça etkili bir yolu

olarak tanımlanmıştır. Çalışmada 5 mm kalınlığındaki % 60 mikrokapsüllü parafin FDM'li duvar kaplamasının 8 cm kalınlığındaki betona eşit enerji depoladığını göstermişlerdir. FDM'ne yönelik bu yüksek ilgi çok sayıda değişik firmayı yeni veya iyileştirme uygulamaları için ticari ürünler geliştirme yoluna itmiştir. BASF Micronal firması FDM levhaları, DuPont Energain ve the EBB toprak (kil) ve FDM yapı panoları ve gittikçe artan deneysel ürünler örnek gösterilebilir.

Kuznik vd. (2011) tarafından üçüncü dereceden binaların restorasyonunda destekleyici olarak kullanılan FDM, iki özdeş oda için test edilmiştir. Odalardan birinin yan duvarları ve tavanı FDM'li duvar kaplaması ile donatılırken, diğer oda da herhangi bir işlem yapılmamıştır. Testin sonucunda görülmüştür ki FDM'li duvar kaplaması, duvarların ısı yalıtım etkileri ve hava sıcaklığı dolayısıyla odada oturanların ısı konforunu rahatlığını artırmıştır.

Sharif ve diğerleri (2014), binalarda kullanılan önceden ısıtılmış evsel su için maliyet etkin ve verimli yolun solar (güneş enerjisi ile ısıtılan) evsel sıcak su olduğunu belirtiyorlar. Bu çalışma, bir emici RT82, FDM depolama sistemi içeren tahliye edilmiş güneş kolektöründe FDM' nin erime işlemini incelemektedir. FLUENT 14.0 yazılım programı kullanılarak üç boyutlu sayısal bir model geliştirilmiştir. Literatürde ısı kaybının olmadığı ve doğal ısı taşınımı olduğu kabul edilmiştir. Simülasyon sonuçları FDM'li depolama sisteminde FDM' nin tamamen erime zamanı üzerinde artan solar yoğunluğunun oldukça büyük etkisi olduğunu göstermektedir.

Costa, Buddhi ve Oliva (1996) yaptıkları çalışmada, konutların ısıtılması için kullanılan elektrik enerjisini azaltmak için FDM kullanılmıştır. Sistem, alüminyum FDM kaplar, şeffaf polikarbonat, akışkan geçen tüpler and elektrikli ısıtıcıdan oluşmaktadır. Entalpi oluşumunu ve kapalı sonlu farklar yöntemi kullanılarak ve depolama sisteminin ısı performansını analiz edilmiştir.

Başka bir çalışmada döşemelerin kaplamasında FDM'nin optimize edilmesini önerilmiştir. Sistemin valide edilmiş bir sayısal modelini yaparak, döşeme kalınlığının etkisi, döşemeler arası açıklık ve kütleli akış oranı parametrik bir çalışma yapılarak incelenmiştir (Amin vd. 2009).

Sarı vd. (2007) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada FDM olarak sabit yapıda kompozit elde etmek için genişletilmiş grafitte emdirilmiş uygun miktardaki parafini belirlenmiştir.

Konuklu ve Paksoy (2011) tarafından FDM teknolojisinin bina uygulamalarına yönelik bir araştırma yapılmıştır. Binalardaki faz değişim modelleri duvar, çatı, zemin ve soğutma sistemleri gözden geçirilmiştir.

Patil ve ark. (2012) tarafından aktif bina soğutma için FDM esaslı termik enerji depolama sistemlerinin tasarımı ve analizi çalışılmıştır. FDM olarak kullanılan $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nun donma ısısı gece boyunca soğutma suyu için kullanılmış ve bu soğutulmuş su fan ısı değiştirici ünitesi (FCU) içerisinden sirküle edilmiştir. Fan ısı değiştirici ünitesinden geçen hava, suya verilen ısı aktarımı sayesinde serinleyerek, temiz ve soğutulmuş hava bir oda içerisine doğru gönderilmiştir. İnsan için konforlu olan ve elektronik ekipmanların tolerans aralığı olan 20°C ila 35°C aralığında gizli ısı depolama malzemeleri çok etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Anisur ve ark. (2013) tarafından bir binanın enerji tüketimini azaltmak için, TED sistemi hava ile soğutma - ısıtma uygulaması için alternatif bir çözüm olarak incelenmiştir. Bu uygulama için farklı geometrilere sahip TED sistemi birlikte, faz değiştiren malzemelerin farklı türleri incelenmiştir. Bu çalışmada, hava ile soğutma - ısıtma uygulaması için teorik bir model kullanılmıştır. Çift cidarlı dairesel borunun dış kısmında FDM ile boru içerisinde havanın dolaşımı incelenmiştir. Proseste değişken duvar sıcaklığı ile birlikte laminer zorlanmış konveksiyon dikkate alınmıştır. Borunun iç yarıçapı ve kalınlığının, sistem tasarımında önemli bir parametre olduğu bulunmuştur. Çünkü sistemden çıkış hava sıcaklığındaki değişim iç yarıçapın azaltılması ve borunun kalınlığından dolayıdır. Soğutma için performans katsayıları (COP) 15 mm ve 25 mm iç yarıçapına sahip FDM kabı için sırasıyla 8,79 ve 7,20 olarak bulunmuştur. Sistem, FDM kabının hacminin azaltılması ile optimize edilebildiği belirtilmiştir.

2.2 TED Sistemlerinden FDM Kullanımının Soğutma Uygulamaları ile İlgili Araştırmaları

Soğutucu sistemler, dolap içleri ve/veya diğer aksamalarda yapılacak değişiklikler, buzdolaplarının enerji performanslarını artırabilmektedir. Söz konusu değişiklikler arasında, değişken hızlı/kapasiteli kompresörlerin kullanılması, daha büyük ısı dönüştürücülerin yerleştirilmesi, daha iyi sabit mıknatıslı fan sistemleri, isteğe göre buz çözücü sistemler, oyuk yalıtım panelleri, daha kalın yalıtım, daha iyi sızdırmazlık, mıknatıslar ve kapı contaları ile yeni tip soğutucular bulunmaktadır (Gin vd., 2010). Tek tek veya çoklu değişiklikler ile ulaşılabilecek enerji düzeyi, ortalama olarak %5 - %45 aralığında yer almaktadır. Verimli makinelerin, son kullanıcılar için uygun fiyatlı olmaları gerekmektedir, ancak, bu önemli geliştirmeleri sağlamak da cihaz üreticileri için oldukça zorlu bir iştir.

Buzdolaplarının enerji verimliliklerini artırmak için FDM'lerin kullanılması, geçtiğimiz on yılda ilgi görmüştür. Yakın zamanda birkaç araştırmacı, soğuk depolama cihazları için FDM olasılıklarına ilişkin bir değerlendirme sunmuşlardır. Sıfırın altındaki uygulamalar için, sulu tuzlu çözeltiler temel FDM'lerdendir. Bunların ısı özelliklerini doğru şekilde formüle etmek ve aşırı soğutma, korozyon ve ısı kararlılık problemleriyle uğraşmak, tuzlu çözeltiler konusunda üstesinden gelinmesi gereken zorluklar olduğu kanısına varmışlardır (Oro vd., 2012; Yılmaz ve Paksoy, 2012; Yılmaz vd., 2013). Uygun bir FDM kombinasyonu ve paketleme kullanmak, buzdolabı sistemlerinde büyük tasarım değişiklikleri gerekmeden büyük ölçüde fayda sağlanmasına yol açabilmektedir. Bu faydalar arasında, buzdolabının daha uzun süreli otonomisi, buzdolabında daha homojen bir ısı dağılımı, kompresörün çalışma süresinin optimizasyonu, arıza durumunda dolap içindeki ısının istenilen düzeyde tutulması ve COP artışı bulunmaktadır.

Soğutma döngüsü içinde, FDM buharlaştırıcı tarafına veya yoğunlaştırıcı tarafına konulabilir. Azzouz ve diğerleri (2009) tarafından yapılan nümerik çalışmada, buharlaştırıcı tarafına 5 ila 10 mm kalınlığında bir FDM levhası koymuşlardır. FDM için, -3 °C erime noktasına sahip ötektik karışımı ve suyu test etmişlerdir. 10 mm levha bu süreçte yalnızca kısmen donmuş ve 5 mm levha ile neredeyse aynı etkiyi göstermiştir. Buzdolabındaki düşük ısıyı muhafaza edebilmesi

nedeniyle, ötektik, FDM olarak daha avantajlı bulunmuştur. Bu çalışma, termal yük ve FDM seçimine bağlı olarak, COP'un %10 – 30 aralığında artırılabilirliğini işaret etmektedir. Daha yüksek termal yükler için ise, FDM'nin kısmi erimesi nedeniyle, COP artışı daha düşük olmuştur.

Başka bir çalışmada Cheng vd. (2011), soğutma döngüsünün yoğunlaştırıcı tarafına FDM koyarak yoğunlaştırıcının çıkardığı atık ısıyı depolamayı hedeflemişlerdir. Bu çalışmada, parafin, yüksek yoğunluklu polietilen ve genleşmiş grafit içeren - 0,5 kg sabit şekilli FDM yoğunlaştırıcı tüplerin etrafına sarılmıştır. FDM'nin faz ısısı 25 °C—60 °C aralığında alınmıştır. Yoğunlaştırma ısısı ve ısı yayılma yükleri düşmüş, bu da hem daha yüksek buharlaşma ısısına hem de %12 enerji tasarrufuna neden olmuştur. Sisteme FDM eklenmesi, homojen bir ısı dağılımını korumaya yardımcı olmaktadır. Sıcaklık, dolabın kapısının açılması ve/veya dolabın içindeki termal yükten kaynaklanmaktadır. Bu da, kullanılabilir dolap içi hacminin azalması ile FDM paketlerini yeniden dondurmak için daha fazla enerji tüketilmesine yol açmaktadır. Diğer taraftan, FDM'ler tarafından muhafaza edilen daha homojen ısılar da, kompresörün çalışma süresinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu da, FDM'nin yeniden dondurulması için kullanılan ekstra enerjiyi telafi ederek, daha fazla enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Marques ve diğerleri (2014) tarafından yapılan çalışmada, 5 mm kalınlığında dikdörtgen bir levhanın FDM olarak 1 kg saf su konularak buzdolabına yerleştirilmesi, termal yüke bağlı olarak ısının 3-5 saat istenilen düzeyde tutulmasını sağlamıştır.

Gholap ve ark. (2007), FDM'leri cihazlarda ısı değiştiricilerle birlikte de kullanmışlardır. Uygulanan ısı değiştirici öncelikle enerji tüketimini azaltıcı etki yaparak ve ısı depolama kapasitesi yükselmiştir. Isı değiştirici soğutucuda evaporatör ve kompresör gibi enerji verimini etkilemiştir. Yapılan çalışmada deneysel ile simülasyon arasındaki bir günlük enerji ölçümünde % 5,95 lik bir fark gözlenmiştir.

Marques ve diğerleri (2010) tarafından yapılan diğer bir çalışmada FDM kullanımının kompresörün performansındaki etkilerini nümerik olarak incelemişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki, daha fazla soğutma

kapasitesini saklamak için FDM kullanımına olanak sağlayan daha büyük yer değiştirmeli kompresörler daha verimlidir. Ayrıca, FDM, daha büyük kompresörlerle daha hızlı soğutmaktadır. Buzdolabının kullanılabilir hacminin önemli ölçüde azaltılmamasını ve aynı zamanda kompresörün çalışma süresinin optimize edilmesini sağlamak için 5mm'den daha ince olan FDM levhalarının kullanılması önerilmektedir.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2007), soğutucu sistemlerinde FDM kullanımı ile enerji tasarrufu elde edilmeye çalışılmıştır. Çeşitli ötektik karışımlar kullanılarak soğutucu sistemde yaklaşık %8 enerji tasarrufu elde edilmiştir. Sistemin performans katsayısının (COP) ise yaklaşık %6 arttığı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada FDM buzdolabı sisteminde pasif olarak uygulanmıştır. Buzdolabının soğutma sistemi içine FDM konulmamıştır. FDM olarak ötektik karışımlardan yararlanılmıştır.

Gin ve diğerleri (2010), buz çözme ve kapıların açılması esnasındaki enerji tüketiminin azaltılabileceğini göstermek amacıyla dondurucunun iç duvarlarına FDM panelleri yerleştirmiştir. Dolap içinde FDM'nin kullanılması, elektrik kesintilerinde dolap içindeki ısının uzun sürelerce istenen düzeyde tutulmasında da faydalı olacaktır.

Klimes ve ark. (2012) tarafından FDM'lerin stabil ısı depolama ve bir çok olası uygulamada iyi bir yöntem olduğunu belirtilmiştir. Çalışmalarında ısı kapasite metodu ve diferansiyel tarama kalorimetre teknikleriyle güneş kolektörü kullanarak soğuk depolama etkisini deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma sonuçlarını da sayısal metod kullanılarak karşılaştırılmıştır. Güneş hava kolektörü kullanımı sırasında kullanılan ayrı iki teknikte malzeme özelliklerindeki belirsizlik ve simulasyon ortamında da ortak sorunlarla karşılaşıldığına değinilmiştir.

Mehling ve Cabeza (2008) yaptıkları çalışmada; sıcaklığın korunması ile ilgili olarak taşıma kutularında, ilaç endüstrisinde, kan taşınmasında, elektronik devrelerde, pişmiş yiyeceklerin korunmasında, biyomedikal taşımada ve daha birçok alanda geliştirilen FDM uygulamalarını incelemiştirlerdir. İlaç endüstrisi ve diğer

hassas sıcaklıklarda çalışılan ürünlerin taşınması için ticari olarak bulunan FDM ürünleri hakkında bilgi verilmiştir.

Mondieig ve ark. (2003) çalışmalarında moleküler alaşımların biyomedikal ürünlerin taşınmasında uygulamıştır. Moleküler alaşımların yüksek ısı kapasitesine sahip olmaları için farklı maddelerin karışımları hazırlanmıştır. Bileşenlerinin moleküler yapıları birbirine çok yakın olan karışımlara moleküler alaşım denilmektedir. Böylece çok farklı sıcaklık aralıklarında çalışabilen FDM'ler elde edebilmiştir. Yine n-alkanlar kullanılarak -50°C den 100°C ye kadar geniş bir aralık yakalayabileceğini belirtmişlerdir. Böylelikle 10°C'nin altındaki bir sıcaklıkta 6 saat boyunca biyomateryal muhafazası sağlanmışlardır.

Ventola ve ark., (2005), çalışmalarında çeşitli FDM'lerin sabit bir erime noktasından ziyade erime aralığı olması farklı alanlarda özellikle istenen bir durum olduğunu belirtmiştir. Termal enerji depolama ve sıcaklığın belirli bir aralıkta sabit tutulmasında moleküler alaşımlarla da çalışılmıştır. Özellikle organik sınıfa giren n-alkanlar moleküler alaşım hazırlanmasında kullanılmış ve elde edilen 69 °C ile 85 °C sıcaklık yemek sektörü gibi çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olduğu açıklanmıştır.

Tyagi ve ark. (2011), TED için tipik bir FDM' nin aşırı soğutma ve pH davranışlarına ait deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, tipik bir FDM'nin aşırı-soğutulma davranışı ile bu olaya pH değerinin etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışma ile elde edilen sonuçlar, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yoluyla elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve birbirleri ile iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

Li ve ark. (2012), sıfırın altındaki uygulamalar için soğuk depo malzemelerine ait son gelişmeleri depolama ortamının tipine ve kullanılan depolama ortamı şekline bağlı olarak, FDM depolaması ve soğurma depolaması ayrı ayrı işlemişlerdir. Ötektik tuzlu su çözeltileri ile ötektik olmayan tuzlu su çözeltilerinden oluşan FDM'ler, füzyon ısı, ısı iletkenlik, faz ayrılması, aşırı soğuma, korozyon, alevlenme ve benzerleri gibi ısı ve fizikokimyasal özellikler açısından tartışılmıştır.

Bu tür FDM'ler ile ilgili sorunlar ve bunlarla çözümler ortaya konulmuştur. Mikroskobik mesafelerde kısıtlı faz ayrılması nedeniyle mükemmel döngü stabilitesine sahip olan ve kapsül hacmi başına geniş bir yüzey alanı nedeniyle ortama doğru mükemmel bir ısı transferi performansı sergileyen mikro kapsül haline getirilmiş FDM'ler tanıtılmıştır. Daha iyi depolama işlemi için daha yüksek ısı iletkenliğe sahip oldukları için nanoparçacık katkı maddeleri içeren FDM'ler de tartışılmıştır.

He (2004), soğuk ısı depolama sistemleri, yalnızca elektrik üretim ve talebi arasındaki dengesizliğin birincil çözümlerden biri olma potansiyeline sahip olmadığı, aynı zamanda yoğun dönemlere soğutma enerjisi kullanımını yoğun talep saatleri dışına çekerek yoğun talep ücretlerini önlemektedir. Bu sistemler soğutma üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve atık ısı kullanımı olanaklarını artırmaktadır. Buna ek olarak, soğuk depolama alanında, ısı güdümlü soğutmanın CHP ile birleştirilmesi sağlandığında kombine ısı ve güç (CHP) üretim verimliliğini artırabilir. Bunun ardından, soğuk depolama soğutma üretimi için ısı talep yoğun saatlerini önleyebilir ve bu ise CHP'nin çoğu zaman tasarım koşullarında çalışabileceği anlamına gelir. Farklı soğutma sistemlerinde pik tüketiminin azaltılması için FDM depolamasının kullanılma potansiyeli gösterilmiştir. Hızlı faz dengesi hesaplanması için bir bilgisayar modeli geliştirilmiştir. Soğuk depolama sisteminin tasarımında faz dengesi verilerinin kullanımı, genel bir metodoloji olarak sunulmuştur.

Kılıçaslan ve Koyun (2013) tarafından iklimlendirme uygulamaları için mevcut soğuk depolama malzemelerindeki son gelişmeler incelenmiştir. Ayrıca depolama malzemelerinin ticari yönü de tartışılmıştır.

Sönmez vd. (2009), içerisinde FDM olarak su bulunan dikdörtgenel geometriye sahip bir soğuk depolama tankı üzerine farklı sayı ve konumda yerleştirilen yarım çember şekilli kanatçıkların katılma süreci üzerine etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, kanatçıkların geometri üzerindeki konumunun ve sayısının ısı transferi hızını ve katılma oranını önemli ölçüde arttırdığı göstermiştir.

Cheralathan ve ark. (2006) çalışmalarında FDM ile dolu silindirik depolama tankını soğuk depolama sistemde faz değişimlerindeki davranışını incelemişlerdir. Ayrıca bir simulasyon programı ile ısı transfer sıvısının sarj süresi boyunca herhangi bir yerde faz değişim sıcaklık aralıklarının değerlendirilmesini yapmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde Stanton, Stefan ve Peclet sayı aralıklarındaki FDM gözenek yapıları da karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmalarında, Stanton sayısının 0,7-1,0 aralığında olması halinde daha yüksek enerji depolama kapasitesi ve daha hızlı sarj süreleri elde edilebildiğini sonucuna ulaşmışlardır.

Fertelli ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada bir soğuk depolama tankı içerisinde bulunan tek ve iki silindirin tank içerisine farklı pozisyonlarda yerleştirilmesinin buz oluşumuna olan etkileri incelenmiştir. Sıcaklık dağılımları, sıvı oranları ve katılaşma oranları elde edilmiştir. Tankın alt bölgesinde farklı pozisyonlarda ($h=d$ ve $h=2d$) tek silindir yerleştirilmesi durumunda elde edilen katılaşma oranlarının tamamen aynı olduğu, silindirlerin tankın üst bölgesine yakın yerleştirilmesiyle ($h=8d$ ve $h=9d$) katılaşma oranlarının arttığı görülmektedir. Tank içerisindeki silindir sayısının iki olması ve tankın alt bölgesinde bulunması durumunda ($h=d$ ve $h=2d$) katılaşma oranlarının aynı olduğu, her iki silindirin üst bölgeye yakın yerleştirilmesi durumunda tek silindirde olduğu gibi en fazla katılaşma oranlarının elde edildiği görülmektedir.

Choi ve ark. (1995) çalışmalarında ısı geri kazanım basamağında tuzhidratları kullanılan düşük sıcaklık gizli ısı depolama sistemlerinde ısı aktarım karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada, düşük sıcaklıkta gizli ısı depolama sisteminin ısı transfer özellikleri, bir FDM olarak sodyum asetat trihidrat kullanarak, kanatçıklı (finli) ve kanatçıksız dairesel borular için belirlenmiştir. Isı geri kazanım aşamasında, kanatçıklı boru sistemindeki FDM'nin aşırı- soğutulması kanatçıksız boru sistemine gözlenenden daha büyüktür. FDM ile ısı transfer borusu yüzeyi arasındaki ısı transfer katsayısı, bir kısım aşırı soğutma ile birlikte donma işleminin başlangıcı hariç olmak üzere yatışkın durum ısı iletimi denkleminde tahmin edilebildiğini belirtmişlerdir. Isı aktarımı kanatçığına sahip boru sisteminde, FDM büzülmesinin ardından ortaya çıkan tamamen boş boşluklar nedeniyle azalır.

Kanatçksız boruya oranla ince kanatçıklı boru ile ısı transferinde meydana gelen artışın önemsiz olduğu bulunmuştur. Kalın kanatçıklı boru sisteminde ısı transfer katsayısı kanatçksız boru sistemine oranla yaklaşık iki kat daha fazladır. Kanatçksız boru ve kalın kanatçıklı boru sistemleri için ısı transfer katsayılarının sırasıyla 45 ~ 150 W/m²-K ve 90 ~ 250 W/m²-K olduğu bulunmuştur. Üç farklı boru sistemi için termal performansların, yalnızca ısı transfer sıvısının akış hızı ile değil giriş sıcaklığı ile de etkilendiği bulunmuştur. Kazanılan ısı miktarı Fourier, Stefan ve Reynolds sayıları ile ifade edilerek bunlarla ilişkili olarak bulunmuştur.

Zalba vd. (2004), yaptıkları çalışmada serbest soğutma sistemlerinde FDM'nin uygulanması için çalışmışlardır. İstatistiksel analiz, kapsüllemenin kalınlığı, iç hava sıcaklığı, hava akımı ve kalınlık ve sıcaklığın etkileşiminin katılma prosesi üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Ravikumar vd. (2005), FDM kullanarak değişken azami yük için kullanılabilir soğuk depolama sistemi önermişlerdir.

Ryu ve ark. (1991), soğuk termal depolama sistemlerinin ısı aktarımı karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. Dolum periyodu sırasında soğuk termal depolama ünitelerinin ısı aktarım karakteristikleri faz değişim materyali olarak sulu çözelti içerisinde kütlece %2'lik sodyum sülfat dekahidratın kullanılması ile çalışılmıştır. Isı aktarım hızı, performans katsayısı ve faz değişim materyalinin aşırı soğutma durumu açısından düşey ve yatay boru sistemleri karşılaştırılmıştır. Düşey borularda konveks daireler içerisine doğru büyürken, FDM kristallerinin yatay borularda eş eksenli dairelerin içerisine doğru büyüdüğu bulunmuştur. Düşey borular için kristal büyüme şekilleri, boruları saran ısı aktarım akışkanının termoklini nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucu olarak, düşey boru sistemi, yatay boru sistemine oranla daha iyi bir termal performansa sahip olmuştur. Soğuk termal enerji depolama sistemi için boru tiplerinin tasarımında kullanılmak üzere temel verileri oluşturmak amacıyla depolanan toplam enerji miktarı Fourier, Stefan, ve Reynolds sayıları cinsinden korole etmişlerdir.

Klima uygulamaları için Hasnain (1998), ticari olarak mevcut olan yaygın olarak kullanılan TED teknolojisinin doğal olarak ortaya çıkan artıları ve eksilerini

(bir başka deyişle soğuk su ve buz depolama) açıklamaktadır. Soğuk ısı depolama ile ilgili vaka çalışmaları yalnızca enerji ve diğer işletme ve bakım maliyetlerinde bir tasarruf değil aynı zamanda başlangıç sermayesi maliyetinde de önemli ölçüde tasarruf ortaya koymuştur. Bu makale aynı zamanda olumlu bir şekilde verimliliği artırabilecek olan gaz türbini giriş havası soğutması için soğuk termal depolama ekipmanlarının kullanımını da incelemektedir. TED uygulamalarının Kuzey Amerika'da ağırlıklı olarak ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Ancak, 1990'lı yılların ortalarında Asya, Avustralya, Avrupa ve Güney Amerika'da uygulamalar ortaya çıkmaya başlamıştır. Son olarak, Suudi Arabistan'da elektrik yükü yönetimi için TED teknolojilerinden beklentiler de ortaya konmuştur.

Gowreesunker ve Tassou (2013) tarafından, yaz aylarında klimasız alanlarda, azami kapalı mekan sıcaklığını düşüren FDM olarak kullanılan toprak duvar kaplamalarının etkinliğini değerlendirmede, hesaplanabilir akıcı dinamik simülasyon kullanılmıştır.

Gu vd. (2004) yaptıkları çalışmada, klima sisteminin çıkardığı ısıyı geri kazanarak sisteme FDM entegre edip konutlarda kullanım suyuna yönelik düşük dereceli sıcak su üreten bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışmalarında klima sisteminin çıkardığı ısının ortamı da ısıtabileceğini ortaya koymaktadır.

Farrell ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada FDM' ler metal boru, levha veya gövdeleri ile doğrudan temas halinde bulduklarından ötürü termal enerji depolama ortamındaki sistemi olumsuz etkileyen parametreler incelenmiştir. Klima sektöründe ısı değiştiriciler içerisinde kullanılan alüminyum alaşımları ve bakır için korozyon hızları, korozyon testlerinin ardından metalografik muayene gerçekleştirilerek ölçmüşlerdir. Bu tür FDM kullanımında bakır ve alüminyum için korozyon önleme yöntemleri tartışılmıştır.

Mondal (2008), akıllı sıcaklık regüle eden tekstiller için uygulamalar ile FDM'lerin çalışma prensibi hakkında bir inceleme yapmışlardır. Son zamanlarda, termo-regüle eden akıllı tekstilleri yapmak için kaplama veya kapsülleme yolu ile FDM'lerin tekstil içerisine katılması ile ilgili konularda araştırmalara olan ilgi

büyümüştür. Çok sayıda farklı faz değiştiren malzemeler tanıtılarak, tekstil yapısı içine FDM'nin yerleştirilmesi ile ilgili konular özetlenmiştir. Isıl konfor, soğuk bir ortam için giyim, faz değiştiren malzemeler ve giyim konforu kavramı bu inceleme makalesinde tartişılmıştır. FDM eklenmiş tekstiller ile ilgili bazı yeni uygulamalar belirtilmiştir. Son olarak, tekstil alanında FDM pazarı ve bazı zorluklar belirtilmiştir.

2.3 TED Sistemlerinde FDM Kullanımıyla İlgili Sayısal Analiz alışmaları

Hesaraki (2011) tarafından yapılan çalışmada termal yikleme işlemi suresince FDM'nin ısı transfer davranışları, mobilize edilmiştir. Termal enerjisinin depolanması zerine HAD modellemesi yoluyla yapılmış önceki çalışmanın metodunun kullanılması ile simule edilmiştir. Isının FDM de depolandığı durumda geçici iki boyutlu ısı transfer problemleri Fluent yazılım yardımıyla simule edilerek çözülmüştür. Faz değişimini, faz değiştiren malzemelerde simule edebilmek için, Volume of Fluid (VOF) (akışkanın hacmi) metodu enerji koruma yoluyla genişletilerek malzemedeki ısı için çözülmüştür. Zamanın bir fonksiyonu olan akışkan bölümü başarılmış ve toplam erime zamanı tahmin edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ısı enerjisini depolama sisteminin ısı performansının daha doğru şekilde tahmin edilmesine yönelik gelecek çalışmalara alt yapı sunmaktadır.

Erek ve Acar, (2003) alışmalarında radyal kanatlı bir boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanmasını kontrol hacmi sonlu farklar yaklaşımı ve yarı kapalı özc (SIS algoritması) kullanarak incelemiştir. Kanat parametreleri (kanat aralığı, kalınlığı, çapı) değiştirilerek ve farklı yüzey sıcaklıkları için sayısal özlemeler elde edilmiştir.

Ismail ve Henriquez (2000) yaptıkları çalışmada içi FDM ile doldurulmuş olan küresel bir kap sayısal yöntem kullanılarak analiz edilmiştir. Sayısal yöntemde sonlu farklar ve hareketli çözüm ağı ile problem çözülmüştür. Dış ortam sıcaklığı ve ısı taşınımı sınır koşulu olarak göz önüne alınmıştır. Küresel kabin boyutu, kalınlığı, malzemesi ve dış ortam sıcaklığının katılaşma zamanına etkisi incelenmiştir.

Bilir ve Ilken (2005) tarafından yapılan çalışmada silindirik ve küresel kap içerisinde bulunan FDM'nin içe doğru katılaşması, üçüncü çeşit sınır koşulu altında sayısal olarak entalpi yöntemi kullanarak incelenmiştir. Stefan sayısı, Biot sayısı ve ergime sıcaklığının toplam katılaşma zamanına etkisi ile ilgili korelasyon yapılmıştır. Bu çalışmada küresel kapsülün içinde bulunan FDM, entalpi yöntemi sıcaklık dönüşüm metodu ile çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlar daha önceden yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Ardından problem ile ilgili parametrik bir çalışma yapılmıştır. Küresel kapsülün çapı ve soğutucu akışkan sıcaklığının toplam katılaşma süresine etkisi incelenmiştir. Elde ettiği sonuçları kullanarak FDM'nin toplam katılaşma süresini hesaplayan korelasyon elde etmiştir.

Pedroso ve Domoto (1973) tarafından yapılan çalışmada küresel koordinatlarda katılaşma sürecini pertürbasyon yöntemini kullanarak incelenmiştir.

Fortunato ve ark.(2012), FDM ile termal depolama için basit matematiksel model geliştirmişlerdir. Çalışmada amaçlanan parafin kökenli bir FDM, gizli ısısına dayalı bir ısı depolama sisteminin termodinamiğini karakterize etmek olmuştur. Isı aktarma sıvısı ile FDM arasındaki ısı değişimi ile faz değişimi incelenmiştir. Basitleştirici varsayımlar altında, ısı transfer sıvısı, duvar ve FDM için yazılmış olan üç adet enerjinin korunumu denkliğinin hâkim olan eşitlik olduğu gösterilmiştir. FDM enerji korunumu denklemi entalpi terimleri cinsinden yazılmıştır. Her üç parabolik diferansiyel denklem sayısal olarak MATLAB dilinde uygulanan bir sonlu farklar yaklaşımına göre çözülmüştür. Simülasyonlar, FDM içindeki sıcaklık profillerini elde etmek ve FDM'nin erimesini tamamlamak için gerekli olan zamanı tahmin etmek için yapılmaktadır. Isı aktarım akışkanının giriş sıcaklığının değiştirildiği farklı simülasyon denemeleri gerçekleştirilmiştir. Termal depolama sisteminin daha dikkatli bir şekilde çalışması için kılavuz olarak ve sonraki analizlerde optimizasyon işlemleri için kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır.

Behunek ve ark. (2007), faz değişiminin sayısal simülasyonu üzerine çalışmışlardır. Makale, aktif zorlanmış konveksiyonlu soğutma sistemleri için bir alternatif olarak entegre devrelerin ısı yönetimi için FDM uygulanması ile ilgilidir.

Erime ve donma süreci hakkında analitik bir açıklama getirilerek, maddenin faz değişimi ile ilgili olarak bir boyutlu analitik çözümü ve faz değişimine ait sayısal model sonuçlarını sunmaktadır. Sayısal model termal alan ile malzeme faz değişimi esas alınarak hava akımını birleştirmektedir. Bu sayısal model ANSYS yazılımında ana yöntem olarak uygulanan sonlu elemanlar yöntemi (SEM) ve sonlu hacim yönteminin (SHY) kombine edilmesi ile elde edilmiştir.

Riley vd. (1974), kürenin yüzey sıcaklığı ve FDM'nin termofiziksel özellikleri sabit olarak alınmıştır. Bazı çalışmalarda küçük Stefan sayıları için eşsıcaklık koşulu altında silindirik ve küresel geometri için içe doğru katılma probleminin pertürbasyon yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Asker ve Çoban (2013), çalışmalarında küresel kapsül içindeki FDM' nin ısı taşınımı etkisiyle dıştan içe doğru faz değiştirme (katılma veya ergime) problemine uygulanması sayısal olarak modellemişlerdir. Boyutsuz enerji denklemi kapalı entalpi ve sonlu hacimler yöntemleri kullanmışlardır. Sistemin çözülmesi için Tomas algoritması uygulanmışlardır.

Tao (1967), çalışmasında silindirik ve küresel koordinatlarda, üçüncü çeşit sınır koşulunda bir silindirik veya küresel kap içerisindeki içe doğru katılma hareketli ara yüzey probleminde sonlu elemanlar yöntemi kullanmışlardır.

Hwang ve Shih (1975), silindirik ve küresel koordinatlarda üçüncü çeşit sınır koşulunda silindirik ve küresel kaplarda doygun bir sıvının içe ve dışa doğru katılmasında pertürbasyon yöntemi kullanılarak çözülmüştür.

Prud'homme vd. (1989) çalışmalarında kartezyen koordinatlarda, başlangıçta donma sıcaklığında olan küresel, silindirik ve düzlemsel geometri için katılma problemini pertürbasyon yöntemini kullanarak çözmüşlerdir.

Uzun ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada kartezyen koordinatlardaki bir boyutlu faz değişim problemi için iki farklı sayısal çözüm yöntemi kullanmışlardır. Entalpi metodu ve sıcaklık dönüşüm metodu kullanılarak katılma sırasındaki faz

değişim süreci analitik yöntem ile karşılaştırılmıştır. Belirlenen sınır koşullara göre, sıcaklığın düğüm sayısına ve katı-sıvı ara yüzey konumunun zamana göre değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düğüm sayısındaki artış sayısal yöntemlerin doğruluğunu arttırmıştır. Karşılaştırmalı sonuçlara göre yüzdesel hatanın en fazla olduğu konum faz değişiminin gerçekleştiği alan olduğunu belirtmişlerdir. Sayısal yöntemlerin karşılaştırılması ile doğruluk ve çözüm zamanı açısından sıcaklık dönüşüm metodu diğer yöntemlere göre daha doğru sonuç verdiğini bulmuşlardır.

Voller ve Swaminathan (1991) çalışmalarında entalpi hesaplamasında kullanılan old-source (Shamsundar ve Rooz, 1988) ve new-source (Furzeland, 1980) yöntemlerini karşılaştırmıştır. Doğruluğu ve çözüm hızı açısından new-source yönteminin daha fazla yakınsadığını belirtmişlerdir.

Ismail ve ark. (2003) çalışmalarında kapsül içi katılaşma problemini sonlu farklar yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemiş ve deneysel sonuçlarla doğrulamışlardır. Küresel kapta suyun katılaşmasını sayısal olarak incelemişlerdir. FDM olarak su alınmıştır. Kürenin yüzey sıcaklığı, başlangıç sıcaklığı ve boyut değişiminin kütesel katılaşma oranını incelemişlerdir. Ayrıca dış ortam sıcaklığı ve başlangıç sıcaklığının toplam katılaşma miktarına etkisi incelenmiştir.

Cao ve Faghri (1990) tarafından yapılan bir çalışmada sıcaklık dönüşüm metodu, zaman ve boyut sınırlamalarını çözmek amacı ile geliştirilmiştir. Sıcaklık dönüşüm metodunun en önemli avantajı, enerji denkleminin doğrusal olmayan tek bağımlı değişken olan sıcaklık cinsinden yazılması olmuştur.

Cao ve Faghri (1991) tarafından yapılan diğer çalışmada ise öncelikle bir boyutlu koordinatlarda yöntemin doğruluğunu analitik yöntemle karşılaştırılarak kanıtlamış ve iki boyutlu koordinatlarda sıcaklık dönüşüm yöntemini doğal taşınımı dahil ederek başarı ile uygulamıştır. Ayrıca iki boyutlu silindirik koordinatlarda FDM içerisinde zorlanmış taşınım ile ısı transferini sıcaklık dönüşüm yöntemi ile sayısal olarak elde etmiştir.

Sharifi ve ark. (2011) çalışmalarında FDM içeren içten kanatlı kapalı metal hacmin erime sırasındaki sayısal modelini geliştirmiştir. Sonlu hacimler yöntemi ve sonlu farklar yöntemi kullanarak kanatlar üzerinde ve boşluktaki birleşik ısı transferini tahmin etmiştir. Farklı kanat uzunlukları, sayısı, kalınlığı kullanarak FDM'nin erime davranışını incelemiştir. Analitik korelasyonlar elde ederek kanatlı kapalı hacmin erime oranını hesaplayarak sayısal verilerle doğrulamıştır.

Okçu ve ark. (2014), dikey bir geometride ve kapalı bir sistem içerisinde bulunan parafin mumunun katılma süreci sayısal olarak incelemiştir. Çalışma, dikey bir geometride sabit duvar sıcaklığında, 5 ve 10 kanatçıklı ve kanatçık olmayan modeller kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar, geçici faz değişim sürecinin sistemin geometrik yapısına, ortamın termal şartlarına ve kullanılan malzemenin özelliklerine bağlı olduğunu göstermiştir.

Dubovsky vd. (2008) tarafından yapılan bir çalışmada dikey eksenli bir silindirde FDM'nin katılma sürecini sayısal olarak incelenmiştir. FDM olarak kullanılan madde parafin RT27 (Rubitherm GmbH) maddesidir. Çalışmada, kullanılan silindirik geometrinin farklı çaplarda kullanılması ve katılma sürecine etkisi ele alınmıştır.

Trelles ve Duffy (2003) yaptığı çalışmada farklı gözenekli alüminyum matris koşulları altında termoelektrik soğutma için gizli gözenekli potansiyel termal enerji depolama cihazına sayısal bir simülasyon önermiştir. Gözenekli alüminyum matris sistemin performansını yükseltmenin bir yolu olarak kullanmış ve depolanan enerjiyi büyük ölçüde düşürmeden ısı koşullarını genişletmiştir.

Shatikian ve diğerleri (2003) yaptıkları bir simülasyonda, bir kutunun tabanı ısıtılabilir veya soğutulabilir. Kutunun iç alanı kutunun tabanına bağlanmış (iliştirilmiş-eklenmiş) iletken dikey plakalarla bölünmüştür. Böylece (dolayısıyla), ısının FDM'ye doğru veya FDM'den iletken dikey tabakalara doğru transferi sağlanmıştır. Geçici (kısa süreli) iki boyutlu sayısal simülasyon FLUENT 6.0 yazılımı kullanılarak yürütülmüştür (uygulanmıştır). Simülasyonlar, zamanın bir

fonksiyonu sistemde detaylı sıcaklık ve aşamalı alanlar sunarak eriyen/katılaşılan FDM'nin sistemdeki gelişimini gösteriyor.

Azeem ve Shine (2013) yaptıkları çalışmada, FDM temelli ısı çöküntü analizi yapmışlardır. Sayısal analiz FLUENT 14.0 program kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma FDM'li kanatlı ısı değiştiricilerinin çeşitli yapılandırmalarının termal analizini içermektedir. Yapılandırmalarda, FDM' li ve FDM' siz kanatlısı çöküntü yüzgeç uçlu kenara doğru yarı doldurulmuş FDM' ler ve sürekli işleyen sistemler için basınçlı taşınım içeren vakalar dikkate alınmıştır.

Assis ve ark. (2009) yaptıkları çalışmada yuvarlak dış kaplamada sayısal ve deneysel olarak FDM'nin katılma sürecini incelemişlerdir. Başlangıçta, dış kaplamanın %98,5'i sıvı FDM'den oluşmaktadır. Üst bölümdeki %1,5'lük kısım hava içermekte olup katılma işlemi gerçekleşirken içeri akmaktadır. Yapılan deneyde halihazırda ticari olarak piyasada satılan parafin mum kullanılmıştır. Özellikleri sayısal simülasyonda sunulmuştur. Sayısal model deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Assis ve ark. (2007) yılında ise silindirik kabuk içinde bulunan organik FDM'nin katılma sürecini boyut analiziyle beraber deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir.

Dolado, Lazano ve Zalba (2010) çalışmalarında, seçilen bir FDM'nin laboratuarda deneysel olarak ısı davranışları test edilmiş ve teorik modellerle simüle edilmiştir. Bütün doğrulamalardan sonra uygun sayısal model seçilerek deneysel ve sayısal analizlerin birbiriyle uyduğu gözlemlenmiştir..

Dubovski ve diğerleri (2008) tarafından dikey eksenli silindirik dış kaplamalarda FDM'nin katılma işlemini sayısal olarak incelenmiştir. Simülasyonda temel olarak potansiyel (durgun) ısı temelli ısı depolama sistemlerinde kullanılmak için üretilmiş ticari olarak satılan parafin mum malzeme olarak simülasyonda kullanılmıştır. Sistemin başlangıç ısı tekdüze olup, malzemenin erime noktasının bir kaç derece üzerindedir. Sonuçların boyutsal analizi FDM'nin erime bölümleri olarak Fourier ve Stefan numaralarının uygun kombinasyonları sunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Mühendislik Fakültesi, İklimlendirme ve Soğutma laboratuvarında bulunan 2105x1120x2185mm ebatlarındaki panel tip soğuk hava deposunda gerçekleştirilmiştir. Depo dış cidarı poliüretan panel ve ekstrude polistiren köpükten oluşmakta olup toplam kalınlığı 160 mm'dir. Çalışma, iki ana kısımda gerçekleştirilmiş olup bunlar deneysel prosedür ve sayısal çözümleme altında toplanmıştır.

3.1 Deneysel Prosedür

3.1.1 Deney Şartları ve Kabuller

Endüstriyel bir soğuk hava deposuna, TED sistemi entegre edilerek mekanik soğutma grubunun elektrik enerjisi sarfiyatı üzerine çalışılmıştır. Sisteme entegre edilen FDM'ler, depo iç yüzeyinin %70'i oranında kaplanacak şekilde 310 adet makro kapsül tedarik edilmiştir (Şekil 2.1). Makro kapsüller depo cidarında ayrıca bir direnç etkisi de göstermektedir. Ayrıca akışkanın katılma sürecinde genişlemesinden ötürü makro kapsüller %85 doluluktadır. FDM yüklü depoda, mekanik soğutma grubunun davranışları farklı depolama sıcaklıkları için incelenmiş olup yüksüz halde sergilediği davranışları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler ortam sıcaklığı + 24°C/+26°C sıcaklıklar arasında bulunan laboratuvar şartları altında yapılmıştır.

Çalışma kapsamında üç farklı deney üzerinde yoğunlaşmıştır. Nedenleri;

- Deneyler sınır ve kabul şartlarını belirleyebilmek için bazı ön çalışma deneyleri yapılmıştır. DSC analizinde (Şekil 3.2) görüldüğü üzere FDM'nin en yüksek kapasitede gizli ısıyı depoladığı erime/donma sıcaklık aralığı -14/-18 °C'dir. Bu yüzden deneyler -18/-15, -16/-13 ile -14/-11 sıcaklıkları

arasında yapılmıştır. Bu rejim sıcaklıklarından ötürü mekanik soğutma grubu da alçak dönüş basınçlı (Low Back Pressure (LBP)) tip olarak seçilmiştir.

- Kompresör davranışının izleme süresinin tayini için kabin içi sıcaklığın rejime gelmesi yeter şart olmamaktadır. Çünkü FDM'nin de kendi bünyesinde kararlı hale gelmesi gerekmektedir. Ön çalışma deneyleri sonucunda kabin rejime girdikten ~ 16 saat sonra FDM donma sıcaklığına gelmektedir. Dolayısıyla belirsizlik analiz sonuçlarının artmaması için FDM'nin kompresör on/off periyodlarındaki davranışı 2 gündüz 1 gece olacak şekilde (36 saat) izlenmesi yeter şart kabul edilmiştir. Aynı zamanda kabinin rejime geliş süresi, kompresör on/off periyod süresi ve mekanik soğutma grubunun kapatıldıktan sonraki ısınma süresi de dikkate alındığında söz konusu deneylerin her biri minimum 220 saat sürmektedir. Dolayısıyla mevsim şartları da dikkate alındığında deneyler aylarca sürecek 7/24 gözlem gerektiren ciddi ve yorucu bir mesai gerektirmektedir.
- Her bir deney bittikten sonra soğuk hava deposunun cidarlarında da kalan termal yüklerin kalkması kısacası laboratuvar şartları ile termal dengeye gelmesi için yeni bir deneye başlamak için en az 48 saat beklenmiştir.
- Deneylerin her biri kendi içinde 3 farklı senaryo adı altında incelenmiştir. Bu senaryolardan ilki deponun ortam sıcaklığından rejim sıcaklığına geliş, ikincisi kompresörün on/off periyodlarının 36 saat izlenmesi ve üçüncüsü mekanik soğutma grubunun kapatılarak depo iç sıcaklığının +4°C 'ye kadar ısınma sürecinin gözlenmesidir.

Mekanik soğutma sisteminde otomatik kontrol paneli CARELL markadır. Kompresör on/off periyoduna, kabin içindeki kontrol panelinin sıcaklık sensörüne bağlı olarak girmektedir. Kompresör, off periyoduna girdiğinde evaporatör fanı çalışmaya devam edecek şekilde ayarlanmıştır. Bunun nedeni, kompresör durduğunda evaporatör fanı da durursa depo içinde farklı sıcaklık katmanları oluşacaktır. Kabin içinde homojen olmayan sıcaklık dağılımı ise kabinde depolanacak ürünler için istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla kondenser, şebekeden elektrik enerjisi çekmese bile off periyodunda evaporatör fanı ~0,25A'lık akım çekmeye devam etmektedir. Deneylerde FDM, depo cidar, evaporatör ve dış

ortam sıcaklıkları, depo içi hava hızı ve bağıl nem kayıt altına alınmıştır (şekil 2.1.c). Deney verileri, kalibrasyon sertifikaları yenilenmiş datalogger ve sensörlerle 10 saniye aralıklarla kayıt altına alınmıştır.



Dış ortam sıcaklık duyurgacı

(a)



Kondanser odası

(b)

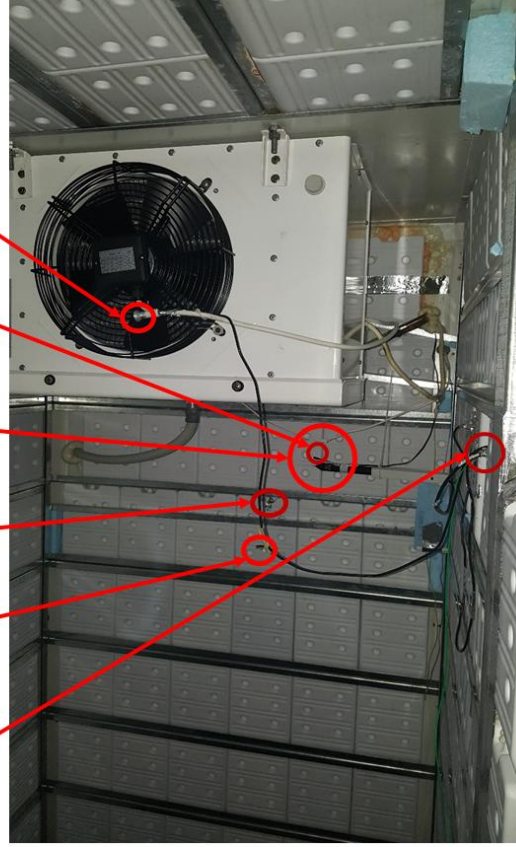


(c)



(d)

Fan hava çıkış sıcaklığı
 Küresel duyargac (Nem, hava hızı, sıcaklık)
 Kompresör duyargacı (Sıcaklık)
 FDM iç sıcaklığı
 FDM yüzey sıcaklığı
 Kabin iç duvar yüzey sıcaklığı



(c)

Şekil 3.1: Makro kapsüllerin geometrik dizilimi a)soğuk hava deposu b)kondanser odası c) evaporatör arka yüzeyi ve tavan d) evaporatörün arkası ve yan yüzeyler e)depo içindeki duyargaçların konumu.

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan depo ve ölçü aletlerinin özellikleri.

Depo ve Ölçü Aletleri	Teknik Özellikleri
Depo dış kabuğu	160 mm poliüretan + 1 mm sandviç panel metal yüzey
Depo hacmi	4730 litre
Evaporatör	1632 W ; -20/+40°C; kanatlı borulu; model DA-130AE10-B01
Evaporatör fanı	Aksiyel fan; -45/+50 °C
Isıtıcı	5 Pcs x 0.420 kW; Toplam güç 2,1 kW; Çalışma basıncı 27/1 Bar
Kompresör	1,5 HP; R404A
Kondanser	Hava soğutmalı
Kondanser fanı	Ø 30 EBM fan
Genleşme valfi	TEX2 (R22) Danfoss

Depolama Sıcaklığı	-18/-15°C; -16/-13 °C; -14/-11 °C	
Ölçüm Parametreleri	Teknik Özellikleri	
Sıcaklık	Depo iç sıcaklığı [°C]	
	Depo iç yüzey sıcaklığı [°C]	
	FDM kapsül yüzey sıcaklık [°C]	
	FDM iç sıcaklığı [°C]	
	Dış ortam sıcaklığı [°C]	
	Depo içi hava hızı [m/s]	
	Depo içi bağıl nem [%rH]	
	Depo içi özgül nem [g/kg]	
Ölçü Aletleri	Teknik Özellikleri	
TESTO 176 T4 4 kanallı sıcaklık veri kayıt cihazı Harici sensör bağlantıları (TC-T tipi, K tipi, J tipi)	Duyargan tipi	Termokupıl (T,K,J tipi)
	Ölçüm aralığı	-200...+400°C(T tipi) 195...+1000°C (K tipi) 100...+750°C(J tipi)
	Hassasiyet	1%ölç de(-200...+100,1°C) 0,3 °C (-100...+70°C) 0,5%ölç de (+70,1...+1000°C)
	Çözünürlük	0,1°C
	Çalışma sıcaklığı	-20...+70°C
	Saklama sıcaklığı	-40...+85°C
	Pil tipi	1x Lityum
	Koruma sınıfı	IP 65
	Ölçüm sıklığı	1 saniye-24 saat
	Hafıza	2 milyon veri
	Esnek termokupıl, PTFE	Ölçüm aralığı: -50 ile +250°C arasında L=1500 mm, Ø=1.5 mm, tepki süresi: 5 sn
	Metal yüzeylerde ölçümler için manyetik sıcaklık duyurucu, yapışma gücü yaklaşık 20 N	-50 ile +170°C arasında - L=35 mm, prob ucu Ø=20 mm
TESTO 175 T1 tek kanallı sıcaklık veri kayıt cihazı 1 adet dahili	Duyargan tipi	Termokupıl (Dijital)
	Ölçüm aralığı	-35...+55°C
	Hassasiyet	±0,5% (-35...+55°C)
	Çözünürlük	0,1°C
	Çalışma sıcaklığı, Saklama sıcaklığı	-35...+55°C, -35...+55°C

	Pil tipi	3xAlMn AAA tipi ya da Energizer
	Koruma sınıfı; Standartlar	IP 65 ; EN 12830
	Ölçüm hızı	10 sn-24 saat
	Hafıza	1 milyon veri
Ölçü Aletleri	Teknik Özellikleri	
TESTO 454/350 3 kanallı sıcaklık veri kayıt cihazı	Duyargan tipi	Termokupıl (NTC duyarga)
	Sıcaklık ölçüm aralığı	-20...+80°C
	Nem Ölçüm Aralığı	0-100%rH
	Hava Hızı Ölçüm Aralığı	0-10 m/s
	Saklama sıcaklığı	-20...+50°C
	Pil tipi	4 AA Batarya, batarya ömrü 8 h
	Ölçüm sıklığı/ Hafıza	1 saniye-24 saat/250 bin veri

3.1.2 Soğutma Yüğü Hesabı

Soğutma yükleri eşitlik (3.1)'de belirtilen şekilde hesaplanmış olup güneş radyasyonu (Q_2), çalışan işçi sayısı (Q_3), ve depoda ürün olmamasından ötürü iç soğutma yükü (Q_6) ihmal edilmiştir.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (3.1)$$

$$Q_1=205 \text{ W}$$

$$Q_4=75 \text{ W}$$

$$Q_5 \cong 30 \text{ W}$$

$$Q = 205+Q_2+Q_3+75+30+Q_6=310 \text{ W}$$

$$Q_{\text{komp}} \cong 440 \times 0,7 \cong 310 \text{ W}$$

Q_1 : Döşeme, tavan, kapı ve duvardan geçen ısı, W

Q_2 : Teras, çatı, güneşe bakan kapı ve duvarlardan geçen güneş ısı, W

Q_3 : İş icabı faaliyet gösteren soğuk depo personeli tarafından yayılan ısı, W

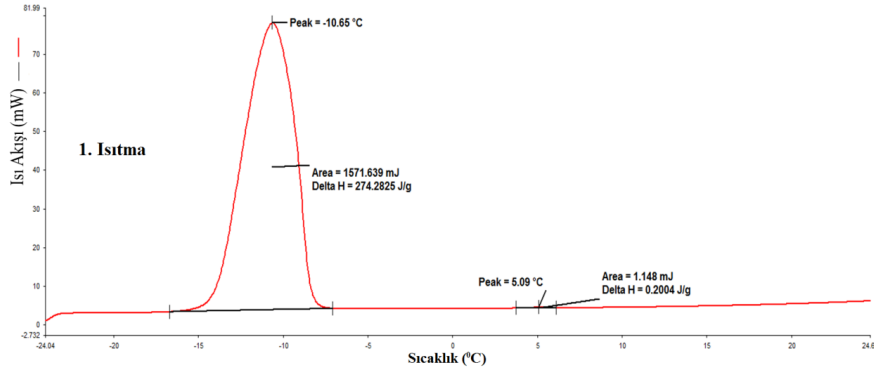
Q_4 : Evaporatör fanı, ışıklar, motorlar veya mevcut olabilecek vb. ısı üretim cihaz ve diğer ısı üretim kaynaklarının yaydığı ısı, W

Q_5 : Dışardan sızıntı ile soğuk depoya giren veya ventilasyon için kullanılan taze havayı soğuk depo rejimine getirmek için alınması gerekli ısı, W

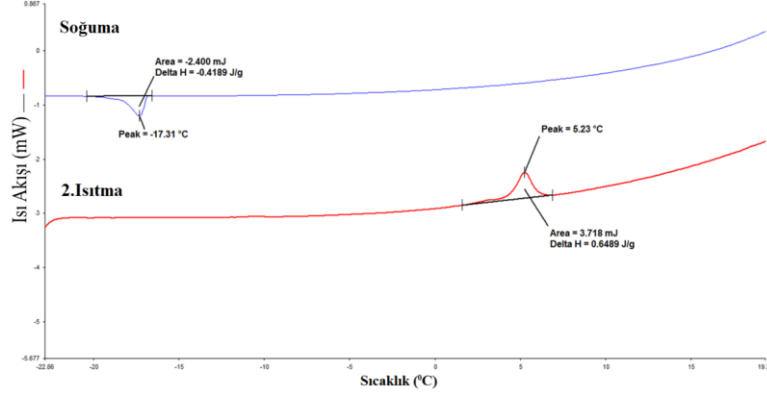
Q_6 : Soğuk depoya alınan ürünün muhafaza rejimine getirilmesi için alınması gerekli ısı, W

3.1.3 FDM'nin Termofiziksel Analizleri

Kullanılan FDM ticari kullanımda ötektik bir karışım olup termofiziksel fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Bu karışımın termal özelliklerinden entalpi değeri ve faz değişim sıcaklık aralıklarının tespiti içinde DSC (Differential Scanning Calorimeter) analizleri yapılmıştır (Şekil 3.2).



(a)

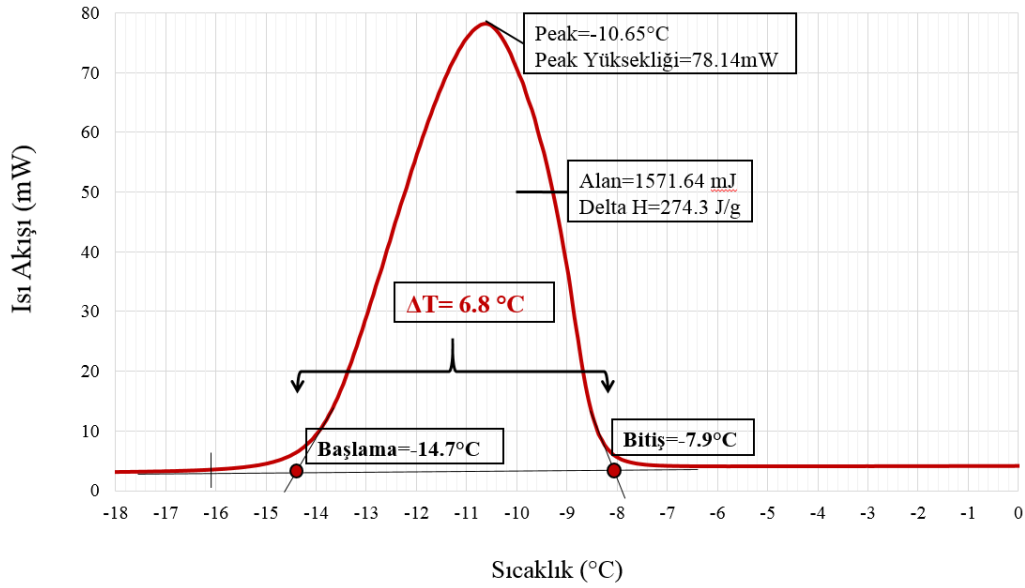


(b)

Şekil 3.2: FDM'nin DSC analizi a) birinci ısıtma b) soğutma ve ikinci ısıtma eğrisi.

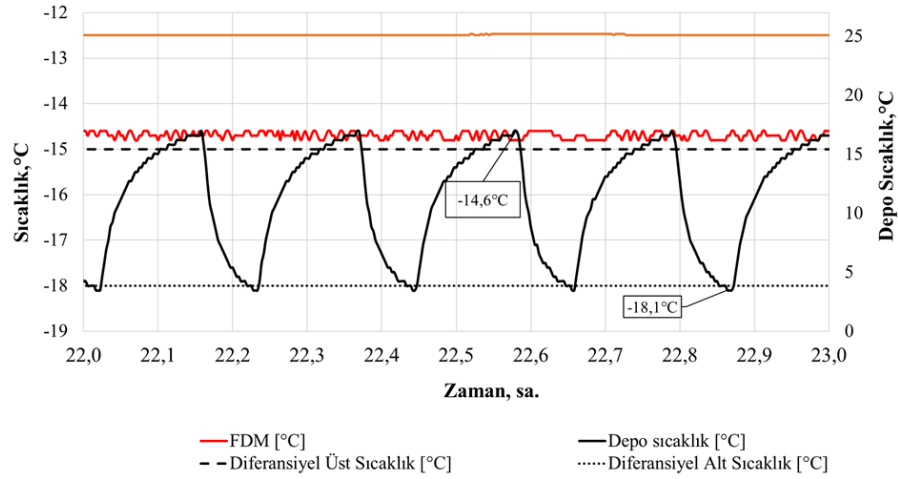
Tablo 3.2: FDM'nin termofiziksel özellikleri.

Özellikler, Birim	Değer
Erime/Donma sıcaklığı, °C	-14,7/-7,9
Dinamik viskozite, kg/m.s (25 °C)	$5,5 \times 10^{-4}$
Yoğunluk, kg/m ³ (25 °C)	1040
Entalpi, kJ/kg	274,3
Spesifik ısı (kJ/kgK)	3,408
Isı transfer katsayısı (W/mK)	0,547



Şekil 3.3: FDM'nin erime ve donma sıcaklık aralığını ve entalpi değerini gösteren eğri.

DSC analizi sonucu çıkan birinci ısınma eğrisi (Şekil 3.2.a) detaylandırıldığında FDM'nin katı/sıvı sıcaklık aralığı $-14,7^{\circ}\text{C}/-7,9^{\circ}\text{C}$ olup sıcaklık aralığı (ΔT) $6,8^{\circ}\text{C}$ 'dir (Şekil 3.3). Dolayısıyla soğuk hava deposunda yapılacak deneylerde kabin set sıcaklığı seçilirken FDM'nin faz değişim sıcaklık aralığında olması hedeflenmiştir (Sarı, 2000). Deneylerde FDM'nin yalıtım veya iletim görevini yaptığı katı/sıvı faz değişim sıcaklık aralıkları kademeli olarak incelenmiştir.



Şekil 3.4: Depo sıcaklık set değeri -18°C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun bir saatlik dağılımı.

Mekanik soğutma ve diğer ekipmanlar arasındaki uyumun gözlenmesi amaçlı yapılan ön çalışma deneylerinde kabin set sıcaklık aralıkları için tanımlanan üst ve alt diferansiyel değerlerde sapmalar olduğu görülmüştür (Şekil 3.4). Üst sıcaklık set değerindeki sapma, kondenser off periyodundan çıkıp kompresörün ilk kalkışında depo sıcaklığı bir anda $\sim 2^{\circ}\text{C}$ 'lik bir artış göstermiştir. Bu yükselişin nedeni araştırıldığında, kompresör off durumunda iken kondenserle evaporatör arasındaki basıncın dengelenmesi için genişleme valfinden soğutucu akışkanın geçmeye devam etmesi ve evaporatör ve kondenser arasındaki 2 metrelik uzaklıktan ötürü bakır borulardaki soğutucu akışkanın bir miktar ısınmadan olduğu anlaşılmıştır. Diğer bir deyişle, kompresör çalışmaya başladığında ilk önce ara mesafede bulunan ısınmış soğutucu akışkan çevrime girerek evaporatör üfleme sıcaklığını yükseltmektedir.

Üst diferansiyel değer artışının önüne geçmek için kabine yakın bir yerde evaporatör dönüş borusuna selanoid valf yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Böylelikle kompresör kapalıyken soğutucu akışkanın genleşme valfine doğru ilerlemesinin önüne geçilmiştir. Bu sayede üst diferansiyel değerdeki 2°C'lik artış 0,4°C'ye kadar düşürülmüştür. Alt diferansiyel sıcaklığın daha düşük okunmasının sebebi ise fan kontrollü çalışılan sistemde evaporatör fan üfleme (ortalama 1,07 m/s) ve emiş hızından kaynaklanan rüzgârın soğutmaya etkisi olduğu anlaşılmakta ve eşitlik (3.2) ile hesaplanmaktadır (Şahin vd.2006).

$$T_{soğ} = 35,74 + 0,6215 \times T_{air} - 35,75 \times v^{0,16} + 0,4274 \times T_{air} \times v^{0,16} \quad (3.2)$$



Şekil 3.5: Diferansiyel üst sıcaklık değerinin yükselmesinin önüne geçmek için sistemde dolaşan akışkanın evaporatör girişi öncesine takılan selanoid valfin konumu.

3.2 Sayısal Çözümleme

Faz değişim problemleri “faz değişimi” veya “hareketli sınır” problemleri olarak adlandırılan, erime veya katılaşma süreçlerini içeren geçici ısı aktarım problemleridir. Faz değişim problemleri, buz yapımı, döküm esnasında metallerin katılaşması, ergimiş kayaçların büyük miktarlarda soğuması, ısıl enerji depolama, kimyasal maddelerin ve plastiklerin işlenmesi, kristal büyümesi, aerodinamik ısı çekimi, metallerin ve alaşımlarının dökümü ve kaynak işlemleri ve daha birçok mühendislik uygulamasında önemli yer tutar. Bu tür problemlerin çözümü, gizli ısı soğuruldukça veya salındıkça katı ve sıvı fazların arasındaki

arayüz hareket ettiği için oldukça zordur ve bunun sonucu olarak çözümden önce katı-sıvı arayüzün konumu belirlenemez ve çözümünün bir parçası olmak durumunda kalır. Su gibi saf maddelerin katılaştırken, katılma işlemi belirli bir sıcaklıkta gerçekleşir ve katı ile sıvı fazları birbirlerinden keskin ve hareketli bir arayüz ile ayrılırlar. Bununla birlikte karışımların, alaşımların veya saf olmayan malzemelerin katılması durumunda, katılma işlemi daha geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleşir ve katı ve sıvı fazlar iki fazlı hareket eden bir bölge tarafından birbirlerinden ayrılırlar.

Faz değişim problemi, matematiksel bir model olarak ele alındığında, faz değiştiren bölge sınırlarının hareketli olmasından ötürü doğrusal olmayan özellik göstermekte ve çözümleri güçleşmektedir. Katı ve sıvı bölgeler içindeki sıcaklık dağılımları ve bu bölgeleri birbirinden ayıran ara yüzey konumu bilinmeyenleri oluşturmaktadır. Birbirlerine bağlı olan ve değerleri zamanla değişen bu bilinmeyenlerin ortaya çıkarılması, ait oldukları diferansiyel denklemlerin eşzamanlı çözümlerine bağlıdır (Özışık, 1978; İlken ve Günerhan, 1996). Bu çalışmada FDM, depo sıcaklığının bağımlı bir değişkeni olup sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir bilgisayar yazılımıyla sayısal analizleri yapılmıştır.

3.2.1 Sayısal Analizde Kullanılan Yürütücü Denklemler

Katılma ve erime problemleri için süreklilik, momentum ve enerji korunumu denklemlerine sıcaklığa bağlı entalpi-porozite yöntemi Navier-Stokes denklemlerine uygulanarak indirgenir (Brent, 1987, Ansys Fluent 15.0). Süreklilik denklemi, kapalı hacmin kinematiği olup eşitlik (3.3) ile hesaplanır.

$$\underbrace{\partial \rho / \partial t}_I + \underbrace{\nabla \rho \vec{v}}_{II} = 0 \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3) için her bir terimin ifadesi;

I.Terim : Herhangi bir zamandaki yoğunluk değişimi,

II.Terim : Momentum miktarı.

3.2.1.1 Momentum Denklemi

Kapalı hacmin dinamiği olup eşitlik (3.4) ile hesaplanır. Nümerik analizde momentum eşitliği hesaplanırken ANSYS/Fluent 15 yazılımı, faz değişim problemini çözerken entalpi-porozite yöntemini kullanmaktadır. Entalpi-porozite yöntemi, kısmen katılaşmış peltemsi bölgeyi bir poröz (gözenekli) ortamı gibi ele alınmaktadır. Her bir hücredeki porozite, bu hücre içerisindeki sıvı fraksiyonuna eşit olmaktadır. Tam olarak katılaşmış bölgelerde, bu bölgelerdeki hızları sıfır yapacak şekilde poroziteleri de sıfıra eşitlenmektedir. Peltemsi bölge içinde indirgenmiş porozite nedeniyle ortaya çıkan momentum birikimi eşitlik (3.4)' de verilmektedir.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v})}_{\text{I.}} = \underbrace{-\nabla(\rho \vec{v} \vec{v})}_{\text{II.}} - \underbrace{\nabla P}_{\text{III.}} + \underbrace{\nabla \bar{\tau}}_{\text{IV.}} + \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{V.}} + \underbrace{S_i}_{\text{VI.}} \quad (3.4)$$

Eşitlik (3.4) için her bir terimin ifadesi;

- I.Terim : Herhangi sabit bir noktadaki momentumun zamana göre değişimi,
- II.Terim : Belli bir hacimde limit durumdaki maddenin değişimini gösteren madde akışıdır. Giren çıkan momentum miktarını gösterir.
- III.Terim : Birim hacim başına etkiyen basınç kuvveti,
- IV.Terim : Birim hacme tesir eden viskoz kuvvetler,
- V.Terim : Birim elemana tesir eden alan kuvveti,
- VI.Terim : Momentum birikim terimi.

$$S_i = \frac{C(1 - \beta)^2}{\beta^3 + \varepsilon} A_{mush}(\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (3.5)$$

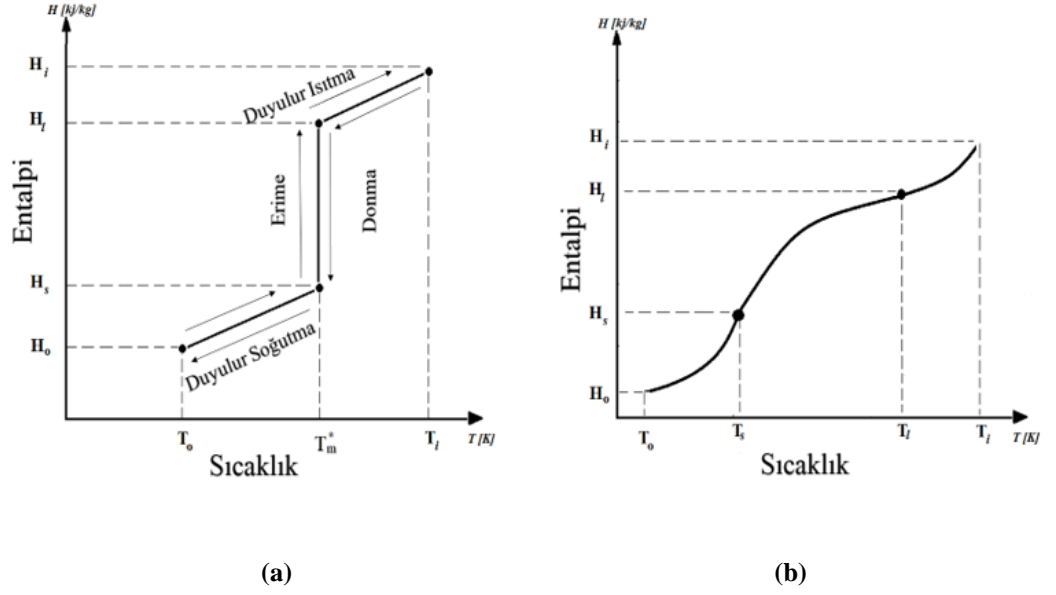
$$\Delta H = \beta L \quad (3.6)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{ise} & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{ise} & T_s < T < T_l \\ 1 & \text{ise} & T > T_l \end{cases} \quad (3.7)$$

τ tensör olup dinamik viskoziteyi gösterir. C lapa bölge sabitidir (genellikle $1.0 \times 10^4 - 1.0 \times 10^7$). β sıvı hacim ve eşitlik 2.5' e göre hesaplanır, ε sıfıra bölünmeyi ortadan kaldırmak için seçilmiş bir küçük sayıdır (örneğin 0,001), ν_p katılaşmış malzemenin çekilmesi nedeniyle oluşan katı hızı, A_{mush} peltemsi bölgeye ait sabiti olup düşme genliğini ölçer, yani; bu değer yüksek olması malzeme katılaşırken malzemenin hızının sıfıra doğru daha keskin bir şekilde geçişi anlamına gelir. T_s katı hal sıcaklık [K], T_l sıvı hal sıcaklık [K]. (Shah 1979; Shur vd.1999,2008; Ansys 15 Theory, 2015; Özışık, 1993). Radyasyon, sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle doğru orantılı olup ihmal edilmiştir.

3.2.1.2 Enerji Denklemi

Kapalı hacmin ısı nitelikleri olup faz değişim problemlerinde, sıcaklık tek başına bağımlı bir değişken olarak ele alındığı için katı ve sıvı fazlar için enerji denklemi eşitlik (3.4) ayrı ayrı yazılır ve sıcaklıklar, arayüz enerji dengesine uygun eşleştirilir. Bu tür bir formülasyon, hareket eden arayüzün takip edilmesi zorunluluğunu doğurup problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Şekil 3.5'de entalpi-sıcaklık ilişkisi diyagram halinde sunulmaktadır. Alternatif bir yaklaşım olarak sıcaklık ile birlikte enerji denkleminin entalpi formu (eşitlik 3.6) kullanılarak her iki faz içinde tek bir enerji denklemi (eşitlik 3.8) yazılabilmektedir. Bu nedenle sonlu farklar veya sonlu elemanlar metodu gibi herhangi bir sayısal yöntemle çözüme gidilebilmektedir. Ayrıca tek bir faz değişimi sıcaklığı yanında geniş bir faz değişim sıcaklık aralığında da uygulanabilir.



Şekil 3.6: Entalpi-sıcaklık ilişkisi a) saf madde b) karışım.

Madde sıvı ve katı formlarda ve T sıcaklığında iken madde birim kütlesi başına T_m^* referans sıcaklığında $C_p(T-T_m^*)$ kadar hissedilir ısıya sahiptir. Katı-sıvı formda ise hissedilir ısıya ek olarak birim kütlesi başına gizli ısı (L) ihtiva eder ve $C_p(T-T_m^*)+L$ şeklinde gerçekleşir. Saf maddelerde faz değişimleri belli bir sıcaklıkta ($T_s=T_l$) gerçekleştiği için gizli ısı L ile ilişkilendirilmektedir. Bu nedenle tek bir erime/donma sıcaklığında sıçrama süreksizliği meydana gelerek $\partial H/\partial t$ sonsuz olur ve bu noktada enerji denklemini anlamsız hale getirir. Karışımlarda faz değişimi geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleşmesi nedeniyle, tek bir erime/donma sıcaklığı mevcut değildir. $H(T)$ ve T arasındaki bu ilişki deneysel ve standart fiziksel özellik tablolarından elde edilmektedir (Shamsunder ve Sparrow 1976; Özışık 1993). (Shah, 1979; Shur vd 1999; Shur vd. 2008; Ansys FluentTheory Guide,2015). Enerji denklemi (3.8) ile gösterilmektedir.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho \left(u + \frac{v^2}{2} \right) \right\}}_{\text{I.}} + \underbrace{\nabla \cdot \left\{ \rho \vec{v} \left(u + \frac{v^2}{2} \right) \right\}}_{\text{II.}} = \underbrace{-\nabla \cdot \vec{q}}_{\text{III.}} + \underbrace{\nabla \cdot \vec{\tau}}_{\text{IV.}} \underbrace{\vec{v}}_{\text{V.}} - \underbrace{\nabla \cdot (P\vec{v})}_{\text{VI.}} + \underbrace{\rho \vec{g} \cdot \vec{v}}_{\text{VI.}} \quad (3.8)$$

I.Terim : Birim zamanda birim hacimde biriken enerji ifadesi

II.Terim : Konveksiyonla birim zamanda birim hacme giren enerji miktarı

- III.Terim : Kondüksiyonla birim zamanda birim hacme giren enerji miktarı
- IV.Terim : Birim zamanda sistemin birim elemanı üzerinde viskoz kuvvetler tarafından yapılan iş
- V.Terim : Birim zamanda sistemin birim hacmi üzerinde basınç kuvvetleri tarafından yapılan iş
- VI.Terim : Birim zamanda sistemin birim hacmi üzerinde yerçekim (gravitasyonel) kuvveti tarafından yapılan iş

Faz değişimi problemlerinde enerji denkleminde de entalpi-porozite yöntemi kullanılarak lapa (peltemsi) arayüzü açık olarak takip edilmeyip bunun yerine sıvı formdaki hücre hacmi kesrini ifade eden sıvı fraksiyonu olarak adlandırılan büyüklük (β), model içerisindeki her bir hücre ile ilişkilendirilir.

- Sıvı fraksiyonu, entalpi denkliği kurularak her bir iterasyon için hesaplanır.
- Lapa bölge, sıvı fraksiyonunun 0 ile 1 arasında azaldığı 'sözde poröz' ortam olarak modellenir. Malzemenin bir hücre içinde tam olarak katılaştığı durumda, porozite sıfır haline gelir ve böylece hızlar da sıfıra düşer.

Bu yöntemde sıcaklık için çözüm, enerji denklemi (3.9) ile eşitlik (3.12) arasındaki bir iterasyona dayanmaktadır. Eşitlik (3.13), sıvı fraksiyonunun güncellenmesi için Voller ve Swaminathan (1991) tarafından önerilen yöntem kullanılmaktadır. Bu nedenle entalpi porozite yöntemi geniş bir sıcaklık aralığında gerçekleşen faz değişim problemlerinin çözümü için uygulanabilir bir yöntemdir. Tek fazlı karışımlar için de Voller ve Prakash (1987) tarafından verilmiş olan spesifik ısıyı esas alan yöntem kullanılır (eşitlik 3.7). (Ansys Fluent Theory Guide, 2015).

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho H)}_{\text{I.}} + \underbrace{\nabla(\rho \vec{v} H)}_{\text{II.}} = \underbrace{\nabla(k \nabla T)}_{\text{III.}} + \underbrace{S}_{\text{IV.}} \quad (3.9)$$

- I.Terim : Herhangi bir noktada sıcaklığa bağlı entalpi ve yoğunluğun zamana göre değişimi.
- II.Terim : Birim hacim başına etkiyen entalpinin momentumla değişimi.

III.Terim : Birim hacim başına etkiyen sıcaklığın zamana göre değişimi.

IV.Terim : Isıl kaynak terimi.

$$H = h + \Delta H \quad (3.10)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (3.11)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (3.12)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{ise} & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{ise} & T_s < T < T_l \\ 1 & \text{ise} & T > T_l \end{cases} \quad (3.13)$$

$$S = -\delta H \frac{\partial g}{\partial t} \quad (3.14)$$

H bir malzemenin toplam entalpisi [J/kg] olup h hissedilir entalpinin [J/kg] ve L gizli ısının [J/kg] toplamıdır. h_{ref} referans entalpi [J/kg], T sıcaklık [K], T_{ref} referans sıcaklık [K], c_p sabit basınçta spesifik ısı [J/kgK], ΔH , βL boyunca entalpi değişimi [J/kg], β sıvı fraksiyonu, T_s katı hal sıcaklık [K], T_l sıvı hal sıcaklık [K], T_m tek bir faz değişim sıcaklığı [K], k ısı iletkenlik katsayısı [W/mK], g yerçekimi ivmesi [m²/s].

Sayısal analizde 3D modelin basitleştirilmesi için simetri kuralına başvurulmuştur. Simetri kuralı, eğer söz konusu geometride bir takım simetriler varsa, problemde görüş faktörlerinin bulunmasında daha ileri basitleştirmeler yapılabilmesi için kullanılır. Bu sebeple bir problemde görüş faktörlerini doğrudan bulmaya girişmeden önce herhangi bir simetri olup olmadığına bakmak gerekir. Kısacası bir üçüncü yüzey civarında simetriye sahip iki veya daha fazla yüzey, o yüzeye göre aynı görüş faktörlerine sahip olacaklardır. Eğer j ve k yüzeyleri, I yüzeyi civarında simetrik iseler bu durumda $F_{(i \rightarrow j)} = F_{(i \rightarrow k)}$ şeklinde de ifade

edilebilir. Karşılıklılık kuralı uygulanarak bu durum için $F_{(j \rightarrow i)} = F_{(k \rightarrow i)}$ 'nin doğruluğu da gösterilebilir. Dolayısıyla çalışmamızda simetri yüzeyin olması çözüm zamanını daha verimli kullanabilmek adına ek bir avantaj sağlamaktadır. Sayısal sonuçların karşılaştırılabilmesi için FDM'li makro kapsül deneyi, simetri yüzey baz alınarak gerçekleştirilmektedir. Deneyde kullanılan makro kapsülün termofiziksel özellikleri tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3: Deneyde kullanılan pleksiglastan yapılmış makro kapsülün termofiziksel özellikleri.

Özellik	Birim	Değer
Isı transfer katsayısı	W/mK	0,19
Spesifik ısı	J/kgK	1465
Yoğunluk	kg/m ³	1190
Cidar kalınlığı	m	0,003

3.3 Boyut Analizi

Bu çalışma kapsamında, yalıtımsız FDM'nin erime sürecini etkileyen faktörler, boyutsuz gruplar halinde araştırılmıştır. Boyutsuz gruplar için kullanılan yürütücü denklemler sırasıyla Biot (Bi), Grashof (Gr), Prandtl (Pr), Fourier (Fo) ve Stefan (Ste) sayılarıdır.

Biot sayısı, bir cismin ısıl direncinin sınır tabaka ısıl direncine oranı olup boyutsuz ısı transfer katsayısıdır. $Bi \gg 0,1$ cismin iç direncinin zayıf olup iç sıcaklığın uniform olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda Bi değeri sayesinde bir cismin ısınma veya soğuma süreleri tayin edilebilmektedir. Bu durumda yığık sistem çözümlemesi kullanılamamaktadır.

$$Bi = \frac{hl}{k} \quad (3.15)$$

$$b = \frac{h}{\rho c_p l_c} \quad (3.16)$$

$$\frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt} \quad (3.17)$$

burada h ısı taşınım katsayısı (W/m²K), k ısı iletim katsayısı (W/mK), t zaman (s), ρ yoğunluk (kg/m³), c_p spesifik ısı (J/kgK), l_c karakteristik uzunluk (m), b yığık sistem sayısı (s⁻¹), $T(t)$ t zaman sonraki sıcaklık (°C), T_∞ ortam sıcaklığı (°C), T_i akışkanın ilk sıcaklığı (°C) olarak ifade edilir.

Faz değişimi boyunca doğal konveksiyona katkı sağlayan Grashof sayısı (Gr) incelenmiştir (Eşitlik 3.18). Gr , hız sınır tabakasındaki kaldırma kuvvetlerinin, sürtünme kuvvetlerine oranının bir ölçüsüdür.

$$Gr = \frac{g\rho^2\beta\Delta T l^3}{\mu^2} \quad (3.18)$$

Prandtl sayısı (Pr), momentumun ısı yayılım katsayılarına oranı olup ısıl ve viskoz sınır tabakalarının bağıl kalınlıklarını belirlememize yarar (Eşitlik 3.19). Pr değerinin küçük çıkması ısıl sınır tabaka kalınlığının ince olduğunu dolayısıyla sınır tabakada ısıl iletkenliğin önemini belirtir.

$$Pr = \frac{c_p\mu}{k} \quad (3.19)$$

burada l akışkan kalınlığı (m), L gizli ısıyı (J/kg), β hacimsel genleşme katsayısı (1/K), μ dinamik viskoziteyi (kg/m s) ifade eder.

Fo değeri, t zamanda iletilen ısı miktarının depolanan ısı miktarına oranıdır (Eşitlik 3.20).

$$Fo = \frac{k}{\rho c_p} \frac{t}{l^2} \quad (3.20)$$

$$Fo = \frac{\text{Katı cismin } l \text{ uzunluğu boyunca iletilen ısı miktarı veya hızının}}{\text{Katı cisimde depolanan ısı miktarı veya hızı}} = \frac{\dot{Q}_{iletlen}}{\dot{Q}_{depolanan}}$$

Faz değişimi ve hareketli bir faz ara yüzeyi içeren ısı iletiminde boyutsuz ifadelerden biri olan stefan sayısı (*Ste*) faz değişim süreci ile ilişkilidir ve önemi büyüktür (Çengel, 2011; Slattery ve Mhetar, 1997; Özışık, 1993). *Ste*, duyulur ısının gizli ısıyla ilişkisinin önemini belirtir ve eşitlik 3.21 ile hesaplanır. Sıvı faz için eşitlik 3.22, katı faz içinse eşitlik 3.23 kullanılmaktadır. Stefan sayısı 0,1 den düşükse, faz değişimi sırasında ara yüzden yayılan veya emilen ısı vasıtasıyla, malzemenin hissedilir ısı içeriği gizli ısı yayma esnasında çok az etkilenir. Örneğin alüminyum, bakır, demir, kurşun, nikel, kalay malzemeleri için, erime sıcaklığı ve oda sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkına göre stefan sayısı 1-3 arasında değişir. Çok daha küçük sıcaklık farkları ile gerçekleşen erime veya katılaşma süreçleri için, stefan sayısı çok küçüktür. Örneğin, termal enerji depolamayla ilgili faz değişim problemlerinde ısı farkları çok az olduğu için *Ste* değeri genellikle 0,1'den daha küçüktür (Çengel, 2011).

$$Ste = \left\{ \frac{c_p(T_m - T_0)}{L} \right\} \quad (3.21)$$

$$Ste_l = \left\{ \frac{c_l(T_m - T_\infty)}{L} \right\} \quad (3.22)$$

$$Ste_s = \left\{ \frac{c_s(T_m - T_\infty)}{L} \right\} \quad (3.23)$$

Yapılan bu çalışmada *Ste* ve *Fo* değerlerine bağlı olarak erime oranı dağılımları da incelenmiştir. *FoSte* sayısı, bir akışkandaki ısı iletiminin ısı enerjisi depolama hızına oranı (boyutsuz zaman) ile hissedilir ısının gizli ısıya oranı ile çarpımıdır (Eşitlik 3.24). Diğer bir deyişle, *FoSte* sayısının küçük olması akışkanın kütle miktarı arttıkça, gizli ısını yayma hızının düşük olacağı anlamını taşımaktadır.

$$FoSte = \frac{kt}{\rho l^2 L} \quad (3.24)$$

3.3.1 Belirsizlik Analiz Sonuçları

Deneyel Hata Tipleri genel olarak ikiye ayrılır:

- a. Deney setinin ve ölçü araçlarının yapısından kaynaklanan hatalar
- b. Deneyi yapan kişiden kaynaklanan hatalar

Birinci tür hatalar, deneysel çalışma sonuçlarının belirsizliğini etkileyen hatalardır ve üç ana grupta toplanır (Holman, 1971). Bunlar;

1. Deneyde kullanılan araç ve gereçlerin imalatından kaynaklanan hatalar,
2. Aynı büyüklüğün tekrar okunması sırasında ortaya çıkan sabit hatalar,
3. Rastgele olan hatalar; elektronik salınımlardan, sürtünme etkilerinden vs. kaynaklanmaktadır.

Sabit hatalar ile rastgele hataları birbirinden ayırt etmek zordur (Holman, 1971). Sabit hatalar, deney sırasında okunan her değer için aynıdır ve uygun bir kalibrasyon ve düzeltme ile ortadan kaldırılabılır.

$$W_{Tfg} = \sqrt{[(a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (e1)^2]} \quad (3.25)$$

$$W_{Tç} = \sqrt{[(a1)^2 + (b1)^2 + (c1)^2 + (11)^2]} \quad (3.26)$$

$$W_{ts} = \sqrt{[(a2)^2 + (c2)^2]} \quad (3.27)$$

W: Belirsizlik miktarı

W_p , W_{cp} Fiziksel özelliklerin tablo değerlerinin okunmasında ortaya çıkabilecek hata

Tfg: Depo içi sıcaklık, °C

Tç: Çevre sıcaklığı, °C

Ts: Sıcaklık ölçümünde zaman, saniye

a1: Termoeleman çiftlerinden kaynaklanan hata

b1: Dijital termometreden kaynaklanan hata

c1:Bağlantı elemanları ve noktaları arasında oluşan hata

e1: Fan girişinde sıcaklık ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata

l1: Çevre ya da deney ortamı sıcaklığının ölçülmesinde yapılabilecek ortalama hata

a2: Zaman değerlerinin okunması esnasında kaynaklanan hata

c2: Periyodik olarak sıcaklık değerlerinin alınması sırasında yapılabilecek ortalama hata

3.4 Net Bugünkü Değer (NBD) Analizi

NBD, bir işletmenin yeni bir projeye başlamadan önce ilk yatırım maliyeti ve işletme giderleriyle beraber her yıl sağlanan nakit akışının zamana bağlı olarak değerlendirilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemle işletmenin yatırım maliyeti, risk ve zaman parametreleri gözetilerek eşitlik 3.28 ile hesaplanmasıyla bulunmaktadır. $-C_0$ değeri, ilk yatırım maliyeti olup nakit kaynağından çıkmasından ötürü negatif bir sayı olarak ele alınır. Bu sayede ilk yatırım maliyetinin geri ödeme süresi de bu yöntemle bulunabilmektedir (financeformulas.net). Formüllerde sanayi tip elektrik enerji birim fiyatının 2016, 2017 ve 2018 yılı verileri baz alınarak 2009 ve sonrası enflasyon oranı %8 kabul edilmiştir.

$$NBD = -C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{C_T}{(1+r)^T} \quad (3.28)$$

$-C_0$: İlk yatırım maliyeti

C_1 : Yatırım sonrası geçen ilk yıl nakit akışı

C_2 : Yatırım sonrası geçen ikinci yıl nakit akışı

r : Enflasyon oranı

T : Zaman (yıl)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneyler, üç farklı depo sıcaklık set değeri olan -18°C , -16°C ve -14°C için yapılmış olup bulgular, grafik ve tablolar halinde sunulmuştur. Yapılan deneylerin her biri, üç senaryo için veri kaydına ara verilmeden arka arkaya izlenmiştir. Her bir deney sonunda depo cidarında bulunan statik yükün atılabilmesi için 24 saat beklenilmiş ve tüm deneyler yaklaşık aynı saatlerde başlanmıştır.

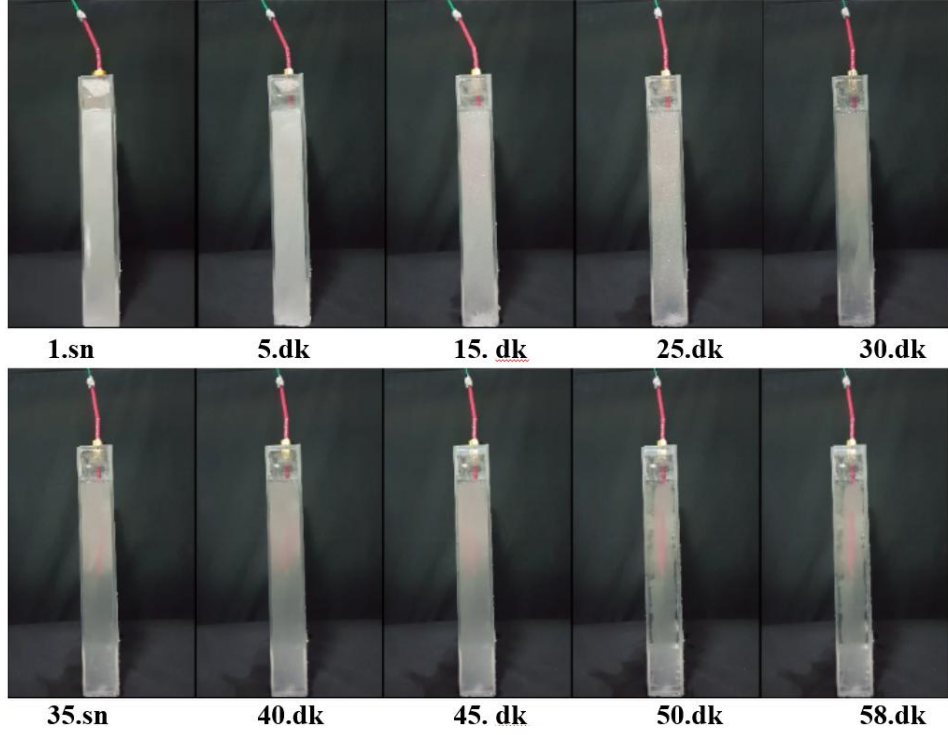
4.1 Deneysel Bulgular

4.1.1 Orijinal Boyutlardaki Yalıtımsız FDM'li Makro Kapsül Deneyi

Sayısal analiz için kurulan algoritmalar ve nümerik sonuçların yakınsaklığını ortaya koyabilmek için ilk önce FDM orijinal boyutlarda şeffaf pleksiglastan oluşan bir makro kapsülle aynı laboratuvar şartlarında ve dış ortam 25°C iken yapılmıştır. Sıcaklık verileri, katı-sıvı faz ayrılma hareketleri ile %100 erimenin olduğu sıcaklık görsel olarak kayıt altına alınmıştır. Bu deneyde depo sıcaklık set -18°C iken gözlemlenebilen en düşük FDM erime sıcaklığı değeri $-14,7^{\circ}\text{C}$ alınmıştır. Sıcaklık verileri 10 saniye aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Şekil 4.1'de FDM'nin her beş dakikada bir çekilen fotoğrafları görülmektedir. Deneysel çalışmada FDM'nin ~ 3500 saniyede tam eridiği ve sıcaklığın $+2,1^{\circ}\text{C}$ olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 4.2).

Tablo 4.1: Yalıtımsız FDM'nin deney sonuçları.

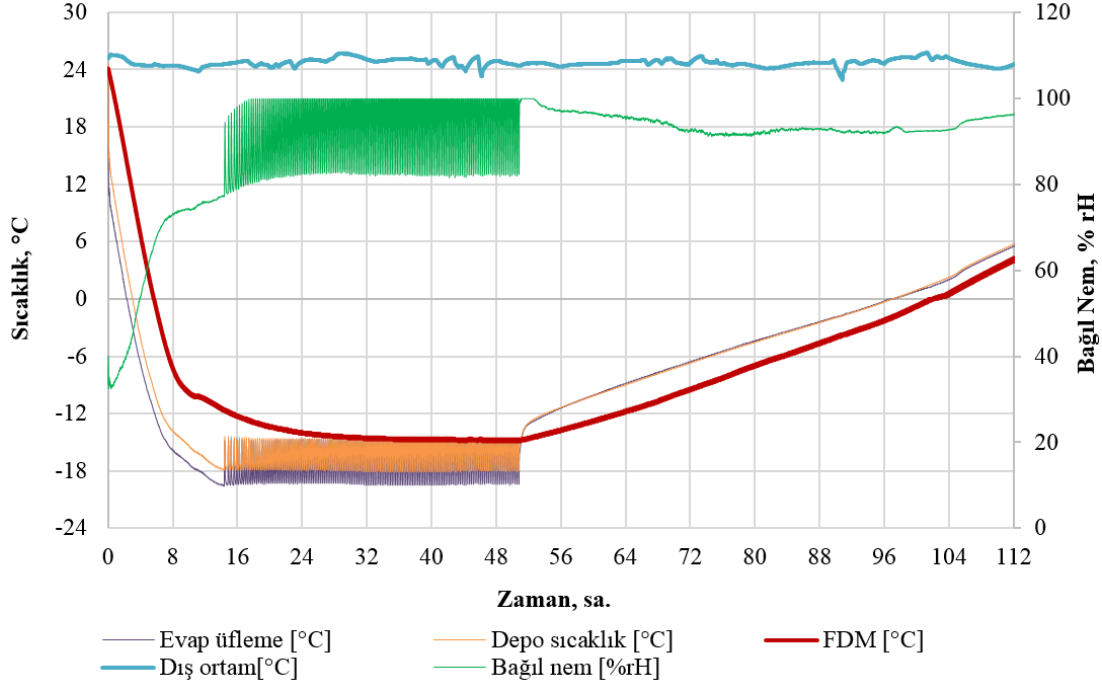
Süre (s)	1	260	550	840	1110	1300	1560	1850	2080	2330	2590	2800	3000	3160	3290	3410	3470	3500
FDM ($^{\circ}\text{C}$)	-14,7	-13,7	-12,7	-11,7	-10,7	-9,7	-8,7	-7,7	-6,7	-5,7	-4,7	-3,7	-2,7	-1,7	-0,7	0,7	1,7	2,1



Şekil 4.1: FDM'nin -14,7°C sıcaklıktan başlayan erime prosesinin doğal taşınımıyla yapılan deney fotoğrafları.

4.1.2 Set sıcaklık -18°C Deneyi

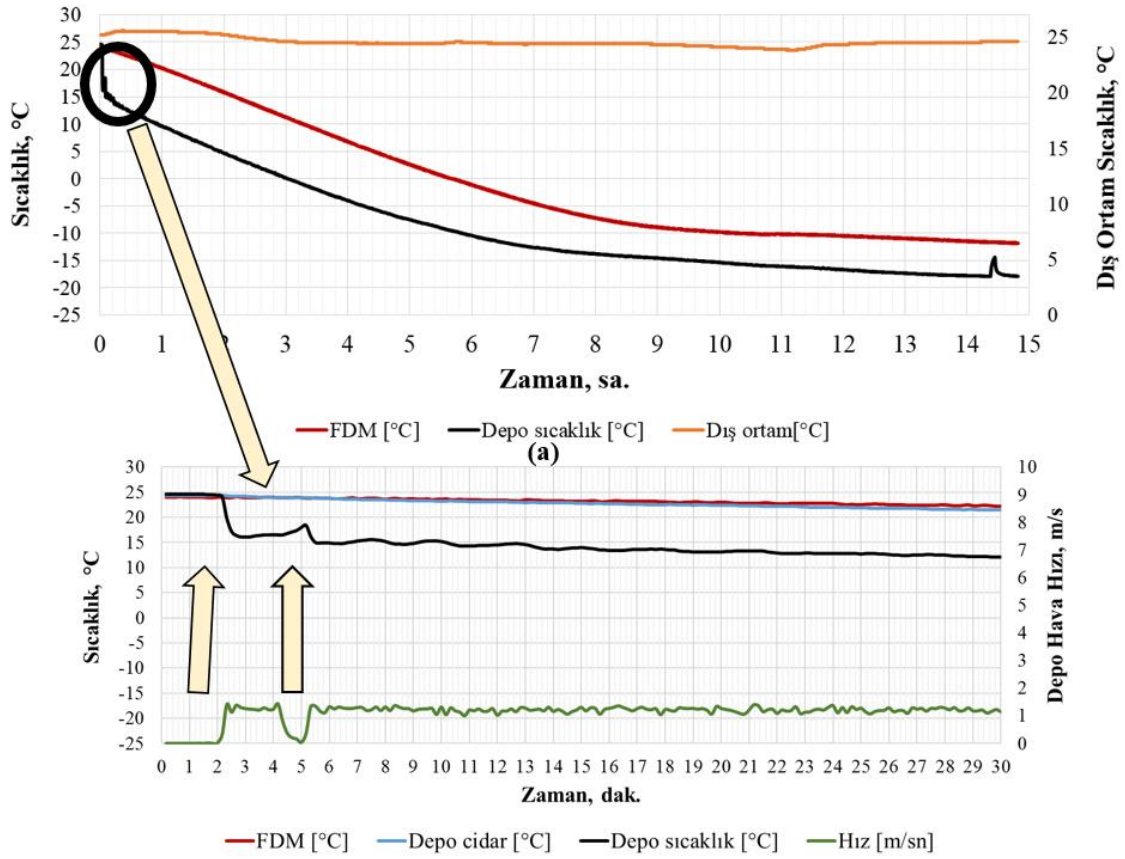
Soğuk hava deposundaki mekanik soğutma grubunun, FDM'nin erime/donma sıcaklık aralığında çalışabilmesi için depo sıcaklık set değeri -18°C ve ΔT 3°C seçilmiştir. Şekil (4.2)' de görüleceği üzere senaryo 1'de set sıcaklık değeri -18 °C'ye iniş olup, senaryo 2'de 36 saatlik on/off periyodu ve senaryo 3'de deponun +4°C'ye kadar ısınma sürecini içermektedir. Şekil 4.2' de evaporatör üfleme, depo sıcaklık, FDM, dış ortam sıcaklıkları ve bağıl nem değerleri verilmiştir.



Şekil 4.2: Depo sıcaklık set değeri -18 °C'ye geliş, 36 saatlik on/off periyodu ve deponun ısınma sürecini gösteren sıcaklık ve bağıl nemin zamana bağlı dağılımı.

4.1.2.1 Senaryo 1: Deponun Set Değeri -18°C'ye Soğutulması

Depo sıcaklık set değeri -18°C' ye 14,8 saatte gelirken FDM, depo içi sıcaklık ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı şekil 4.3(a)'da verilmiştir. Soğuk hava deposu fan kontrollü çalıştırılmıştır. Evaporatör dönüş sıcaklığı +15°C'den büyük olduğu zaman fan devreden çıkartılmıştır. Böylelikle evaporatör fanı devamlı devrede kalarak depo içinde sıcaklık katmanlarının oluşması ve evaporatördeki kapasite düşüşünün önüne geçilmiştir. Şekil 4.3(b)'de görüleceği üzere deney başlatıldıktan ilk 5 dakika içinde evaporatör dönüş sıcaklığı sadece iki kez +15°C'nin üstünde kalmıştır.

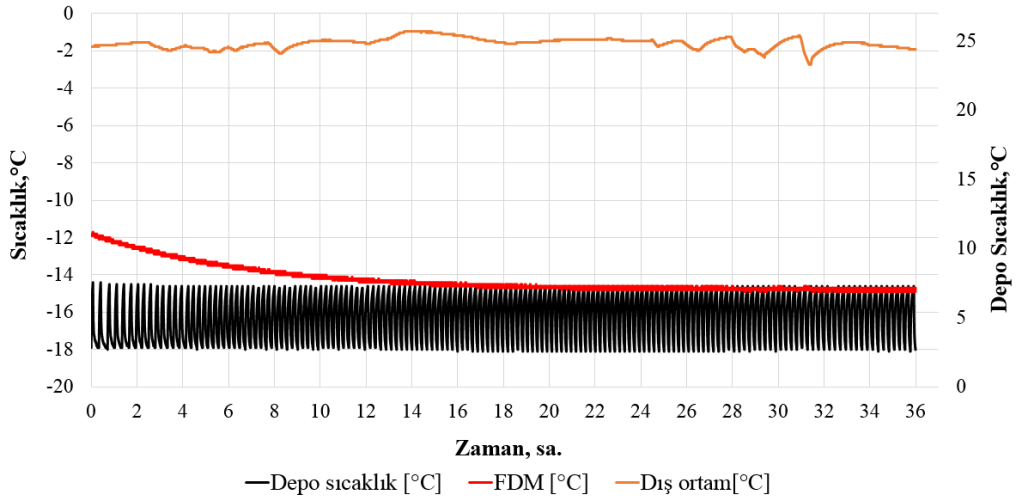


(b)

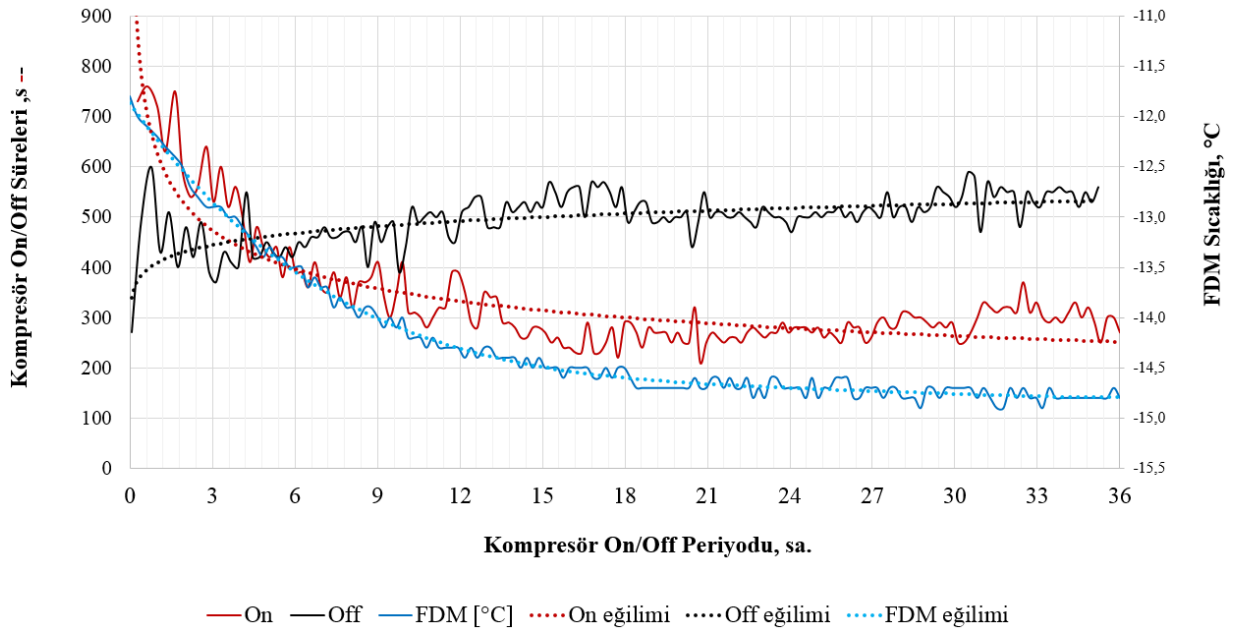
Şekil 4.3: a) Depo sıcaklık set değeri -18°C 'ye 14,8h'de gelirken FDM, depo içi sıcaklık ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı b) fan kontrollü çalışılan sistemde evaporatör dönüş sıcaklığı $>+15^{\circ}\text{C}$ iken evaporatör fanının devreye girmediğini gösteren hava hız dağılımı.

4.1.2.2 Senaryo 2: Set -18°C ' de Kompresör On/Off Periyodu

Depo içi sıcaklık rejimdeyken senaryo 2'de (ΔT) 3°C iken FDM sıcaklığı, kabin içi ve dış ortam sıcaklıkları zamana bağlı olarak 36 saat izlenmiş kompresör on/off periyodu şekil 4.4'de verilmiştir.



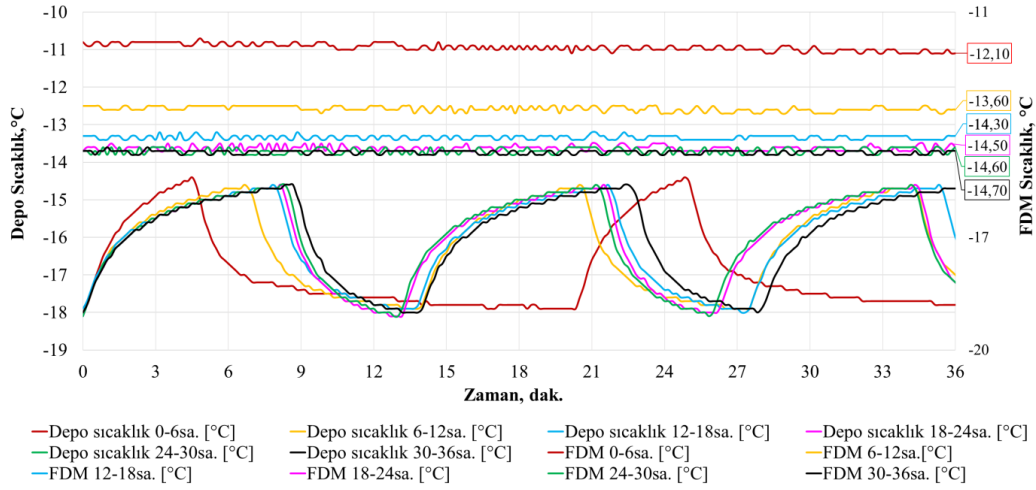
Şekil 4.4: Depo sıcaklık set değeri -18 °C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun 36 saatlik dağılımı.



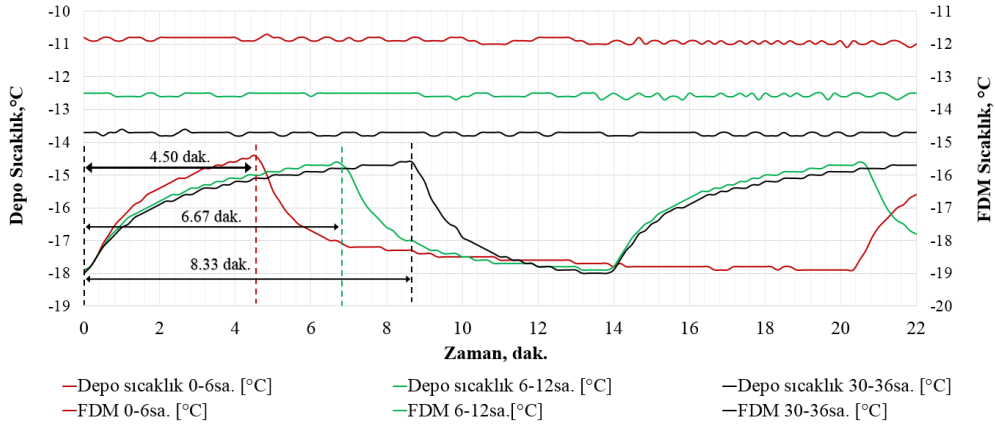
Şekil 4.5: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18 °C'de kompresör on/off süre salınımları.

FDM'li deponun sıcaklık set değeri -18°C'de kompresör on/off süre salınımları saatlik bazda incelendiğinde FDM'nin son 18 saat içinde sıcaklığının değişmediği neredeyse aynı salındığı şekil 4.5'de verilmiştir. Bu incelemeler neticesinde FDM'nin senaryo 2'ye girdiği sıcaklık -12,10 °C'den 36 saat içinde kompresör periyodlarında on süresinin azalıp off süresinde ciddi bir artış olduğu

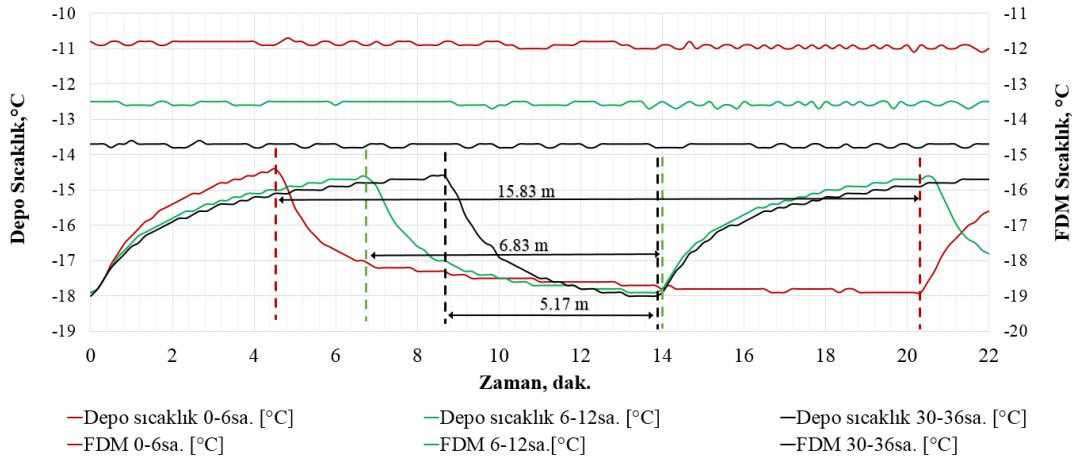
bulunmuştur. Bu durum FDM'nin de kendi içinde rejime geldiğini dolayısıyla bu 36 saatlik dağılım 12'şer saatlik kısımlara ayrılarak saniye saniye incelenmiştir (Şekil 4.6). Senaryo 2'deki son 18 saatte FDM sıcaklığı $-14,5^{\circ}\text{C}$ ile $-14,7^{\circ}\text{C}$ arasında seyrederek FDM sıcaklığının kararlı halde kaldığı ve dış ortam sıcaklığı ile depo cidarında yalıtım etkisi gösterdiği Şekil 4.6'de görülmektedir. Böylelikle kompresörün duruş süresinin 4,50 dakikadan 8,33 dakikaya çıkmış kısacası % 85 oranında bir artış olmaktadır (Şekil 4.7). Şekil 4.8'de kompresör çalışma süresi incelendiğinde 15,83 dakikadan 5,17 dakikaya düşmüştür. Diğer bir deyişle mekanik soğutma grubunun şebekeden çektiği elektrik enerjisi ilk duruma göre % 67 oranında azalmıştır.



Şekil 4.6: FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.



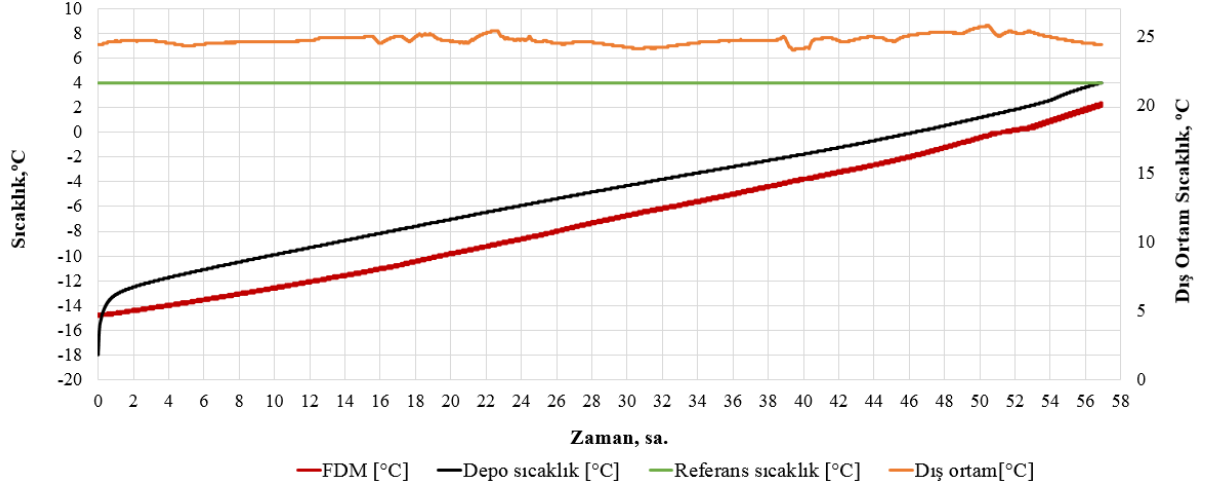
Şekil 4.7: FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 12 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.8: FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 6 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

4.1.2.3 Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu

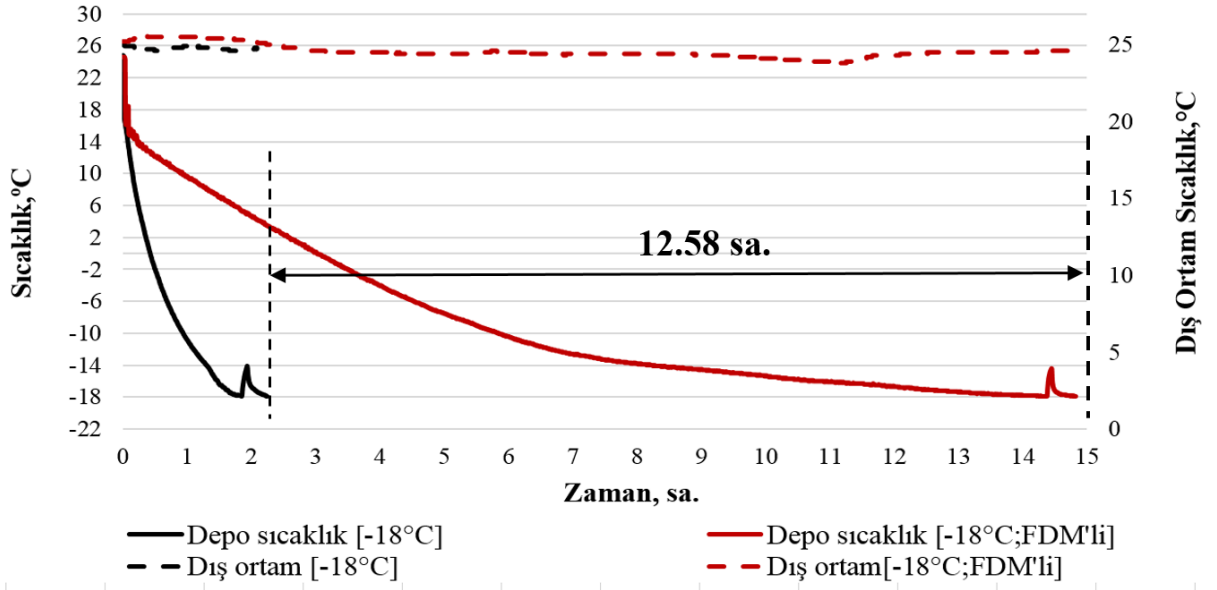
Mekanik soğutma grubunun herhangi bir sebeple kapandığı varsayıldığında soğuk hava deposundaki ticari değeri olan ürünün belirsiz bir süre için risk altında kaldığı varsayımıyla senaryo 3 referans sıcaklığına kadar izlenmiştir. Depo sıcaklığının -18°C 'den $+4^{\circ}\text{C}$ 'ye 57 saatte ısınmıştır (Şekil 4.9).



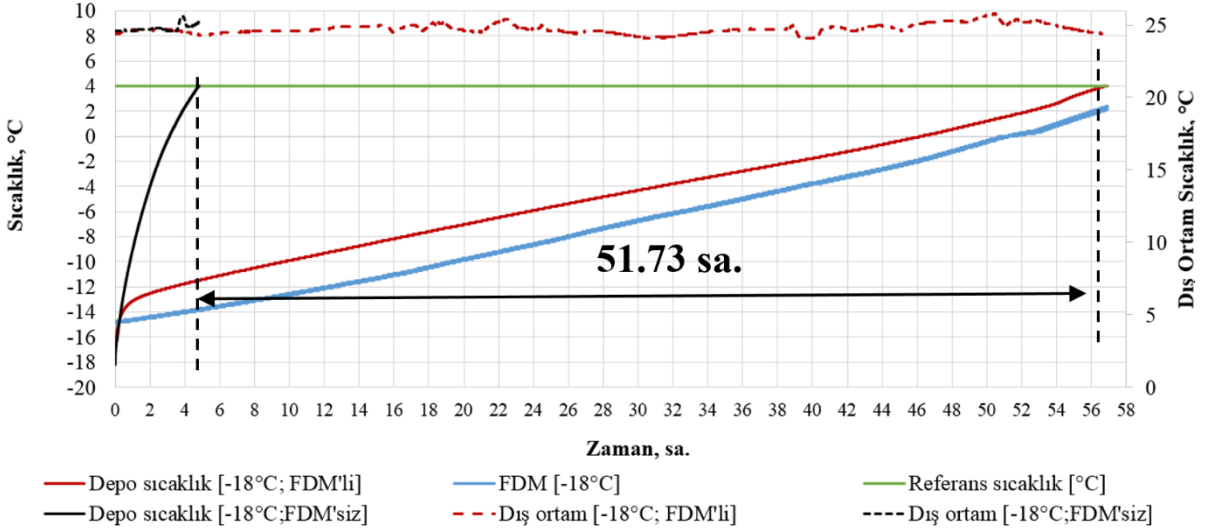
Şekil 4.9: Mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla deponun ve FDM 'nin ısınma periyodu.

4.1.2.4 FDM'siz ve FDM'li Deponun Set -18°C için Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında FDM'nin pozitif ve/veya negatif etkisini ortaya koyabilmek adına ısı enerji depolama sistemi olmayan bir depo ile FDM'li bir deponun sıcaklık verileri aynı sınır şartları için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.10(a)'da senaryo 1 için kompresör, FDM'li deponun rejime gelmek için 12,58 saat daha fazla çalışmıştır. Senaryo 3'te ise FDM'li kabin 51,73 saat daha fazla sürede referans sıcaklığına yükselmiş ve soğuk zincirin kırılma riski azalmıştır (Şekil 4.10b).

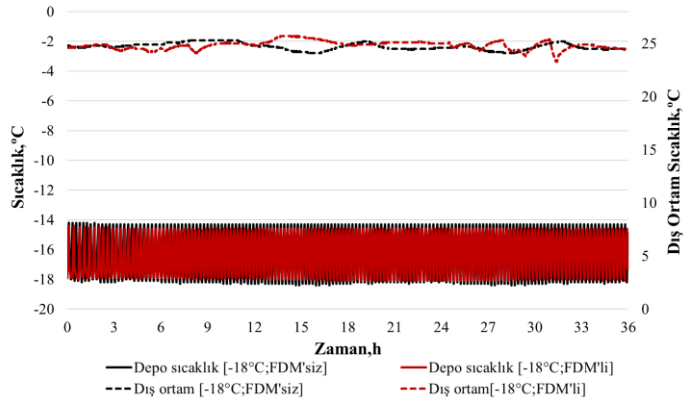


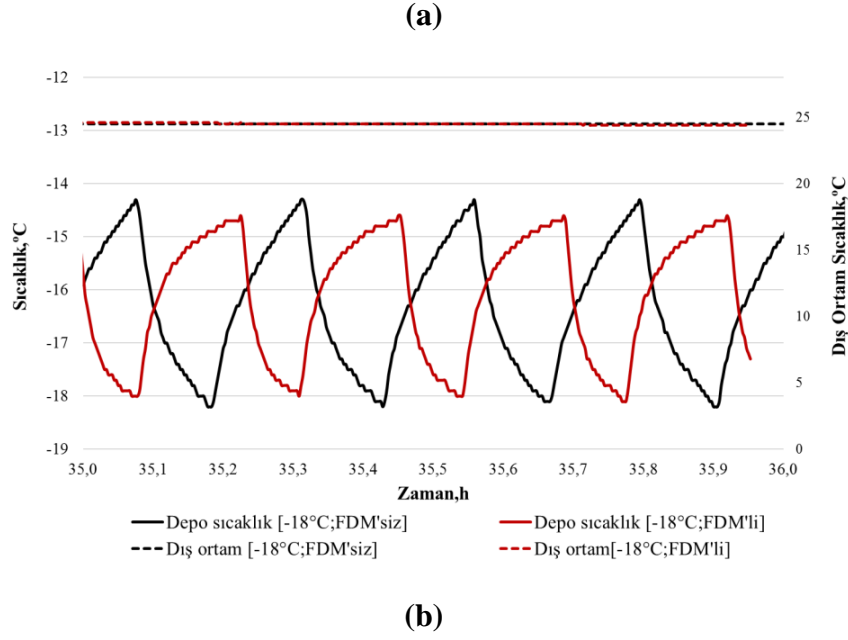
(a)



(b)

Şekil 4.10: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) set değeri -18°C'ye inme b) deponun ısınma periyodu.





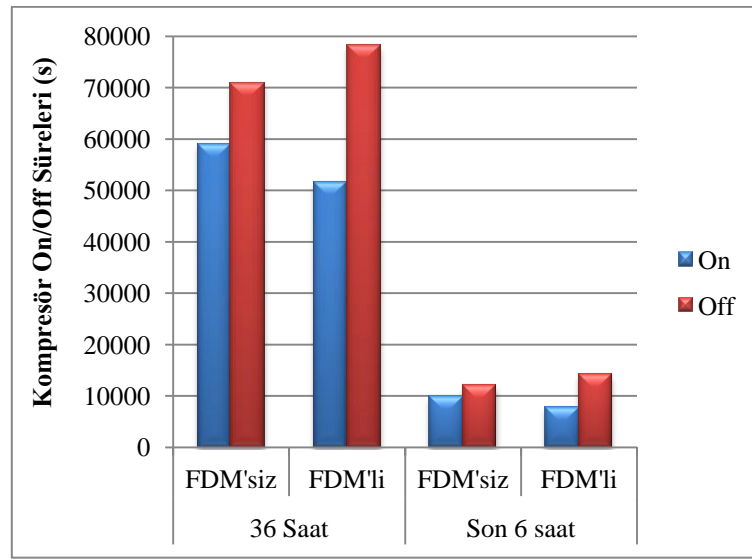
Şekil 4.11: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) 36 saatlik kompresör on/off periyodları b) bir saatlik on/off salınım detayı.

Şekil 4.11(a)'da, FDM'siz ve FDM'li durumdaki 36 saatlik kompresör on/off periyodları incelenirse kompresör periyod sayıları çok yakın olup sırasıyla 158 ve 157 adettir. Çalışma/durma salınımlarına saatlik bazda da bakıldığında her iki eğride de periyod sayıları eşittir (Şekil 4.11b).

FDM'li ve FDM'siz kabinde 36 saat ve son 6 saat içindeki enerji verileri güç analizörü kullanılarak her bir saniye için kayıt altına alınmıştır. FDM'siz ve FDM'li durumlarda çalışan kompresörün on/off süreleri 36 saat ve son 6 saatlik tablo 4.2 ve şekil 4.12'de sunulmuştur. Sistemde fan kontrollü çalışıldığı için kompresör durduğunda bile evaporatör fanı çalışmaktadır. Bu yüzden mekanik soğutma grubunda en az elektrik tüketen elemanlardan biri olan evaporatör fanı şebekeden 0,25 A akım çekmeye devam etmektedir. Tablo 4.2' de görüleceği üzere FDM'nin ve deponun rejime geldiği son 6 saat dikkate alındığında FDM'siz deponun FDM'liye göre %20,73 oranında daha fazla çalıştığını göstermektedir. Keza kompresörün duruş süresi de FDM'siz deponun FDM'ye göre %16,98 daha az olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum şekil 4.12'de FDM'nin mekanik soğutma grubuna hatırı sayılır ölçüde olumlu katkısı olduğunu gözler önüne sermektedir.

Tablo 4.2: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off süreleri.

SET -18°C	36 Saat			Son 6 saat			Toplam 36h On/Off Sayısı		
	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)
On süresi (s)	59020	51430	-12,86	9890	7840	<u>-20,73</u>	158	157	-0,63
Off süresi (s)	70660	78140	10,59	12070	14120	<u>16,98</u>			



Şekil 4.12: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off süreleri.

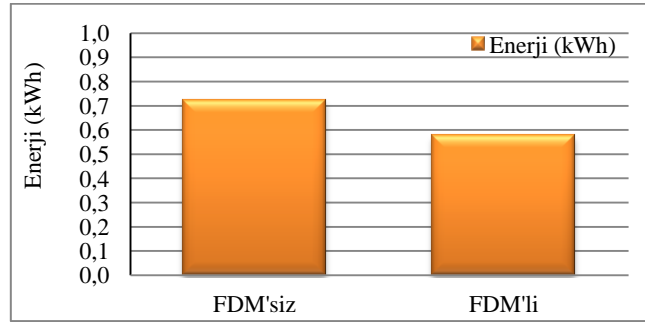
4.1.2.1 Set -18 °C için Enerji Analizi

Güç analizöründen elde edilen enerji verileri tablo 4.3 ve şekil 4.13'de yüksüz ve yüklü depo için verilmektedir. Tablo 4.3' de sunulan FDM ve kabin değerlerinin rejime gelmesiyle beraber son 6 saat referans alınmıştır. On/off periyodlarının toplamı saatlik hesaplandığında, FDM'siz durum FDM'li duruma göre %19,44 daha fazla enerji harcanmaktadır. Bu durum FDM'nin sistemdeki pozitif etkisini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.3: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off periyodundaki enerji verileri.

SET -18°C		Süre (36h)	Süre (6h)	Gerilim [V]	Toplam Akım [A]	Dış Ünite Akım (Kond+Komp)	İç Ünite Akım (Evap Fanı)	Görünür Güç, S [VA]	Reaktif Güç, Q [Var]	Aktif Güç, P [kW]	P [kW] (36h)	P [kW] (6h)
FDM'siz	ON	16,39	2,75	229,00	7,01	6,76	0,25	1388,42	590,04	1,49	24,48	<u>4,10</u>
	OFF	19,63	3,35	234,00	0,26	0,00	0,26	57,24	14,79	0,06	1,16	<u>0,20*</u>
FDM'li	ON	14,29	2,18	226,00	6,97	6,73	0,24	1391,86	537,42	1,48	21,15	<u>3,22</u>
	OFF	21,71	3,92	227,00	0,26	0,00	0,26	56,68	11,74	0,06	1,26	<u>0,23*</u>

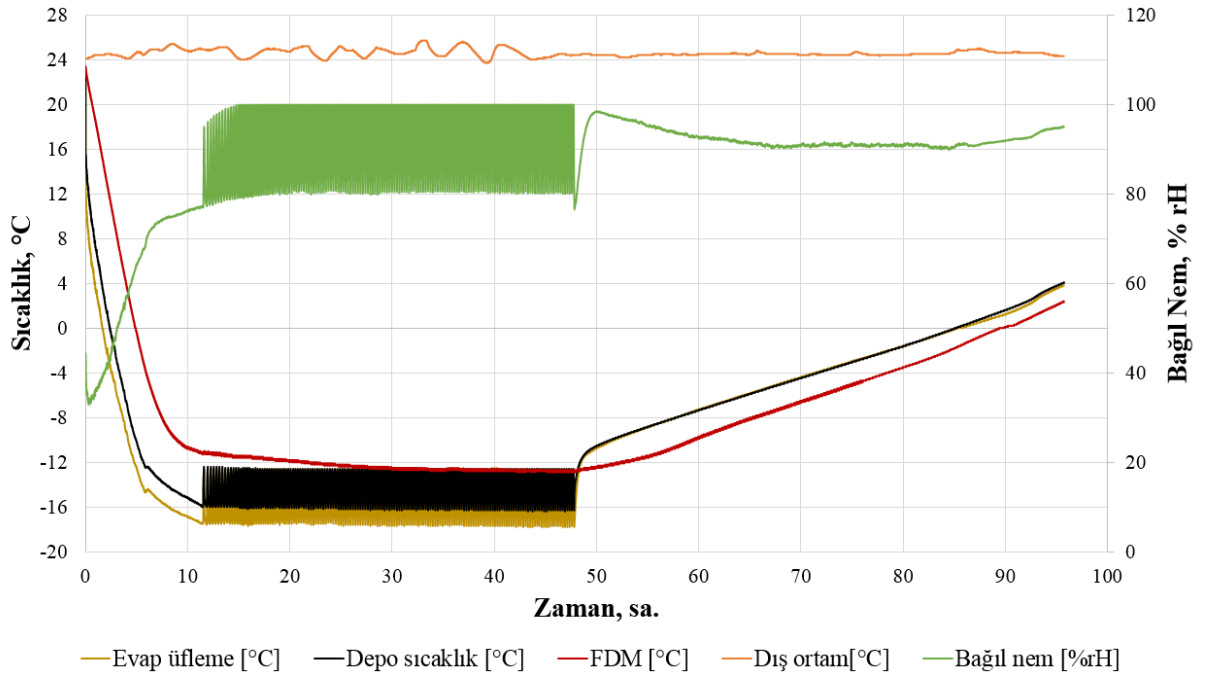
* Kompresör off periyodundayken evaporatör fanı çalışmakta ve şebekeden ~0,22A akım çekmektedir.



Şekil 4.13: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -18 °C'de son 6 saat içinde kompresörün harcadığı saatlik enerji verileri.

4.1.3 Set -16°C Deneyi

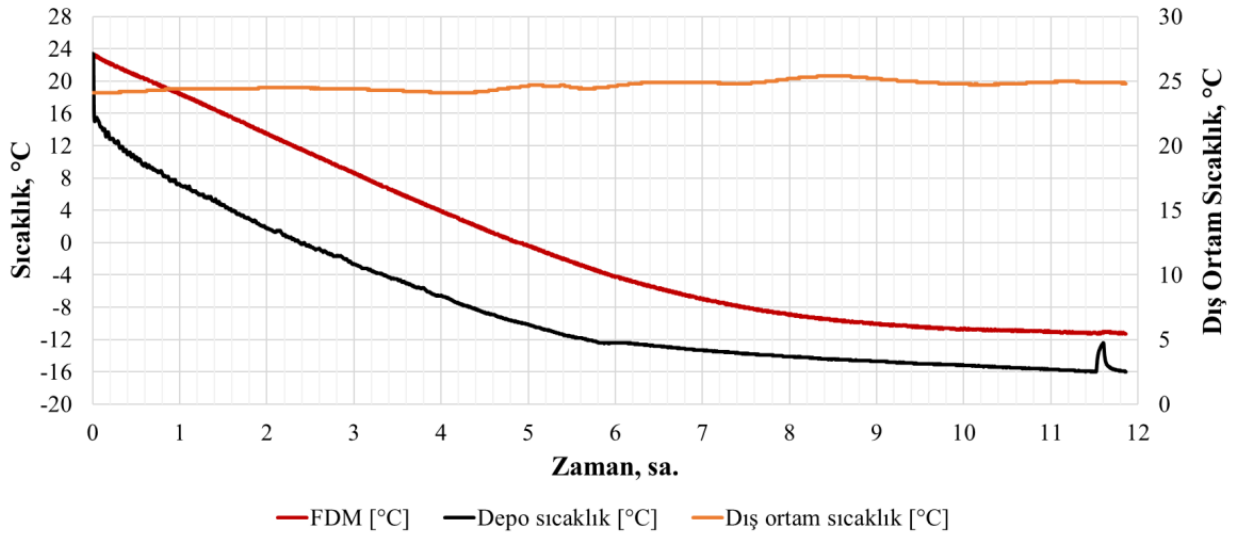
FDM'nin katı/sıvı sıcaklığına inilebilmesi için depo sıcaklık set değeri -16°C/-13°C seçilmiştir. Şekil (4.14)' de görüleceği üzere evaporatör üfleme, depo sıcaklık, FDM, dış ortam sıcaklıkları ve bağıl nemi zaman bağılı gösteren dağılım verilmektedir.



Şekil 4.14: %70 FDM kaplı deponun sıcaklık set değeri -16°C 'ye geliş, 36 saatlik on/off periyodu ve erime sürecini $+4^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar gösteren dağılım.

4.1.3.1 Senaryo 1: Deponun Set -16°C 'ye Soğutulması

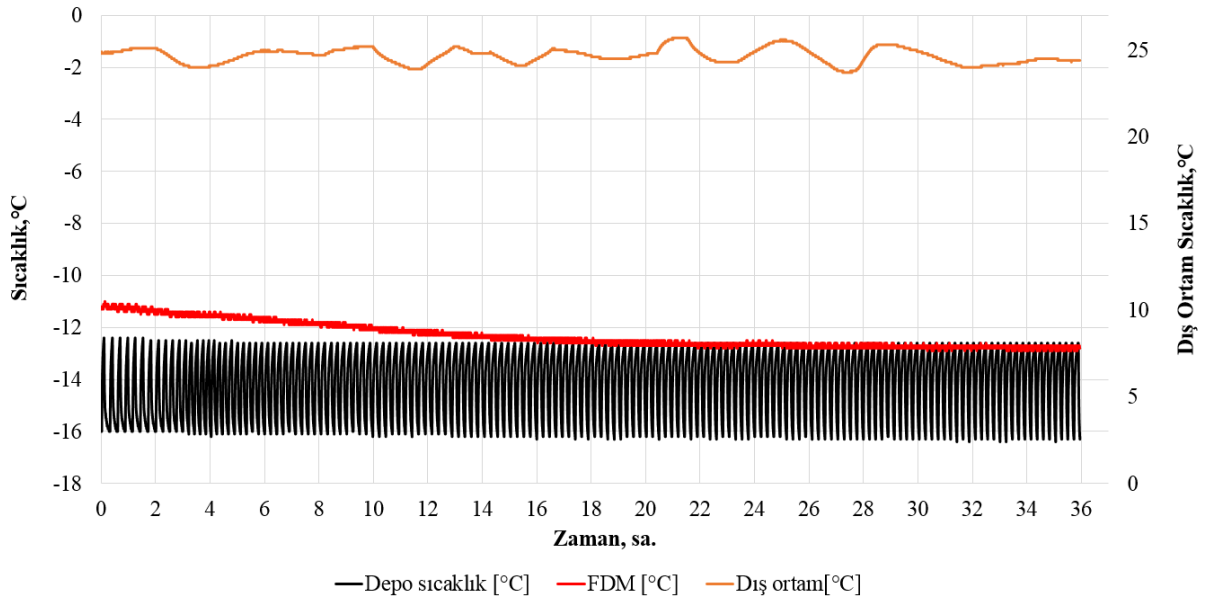
Depo sıcaklık set değeri -16°C 'ye ~ 12 saatte gelmiş olup FDM, depo içi sıcaklık ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı şekil 4.15'de verilmiştir. Depo rejime geldiği sırada FDM'nin de -11°C 'lere inebildiği görülmüştür.



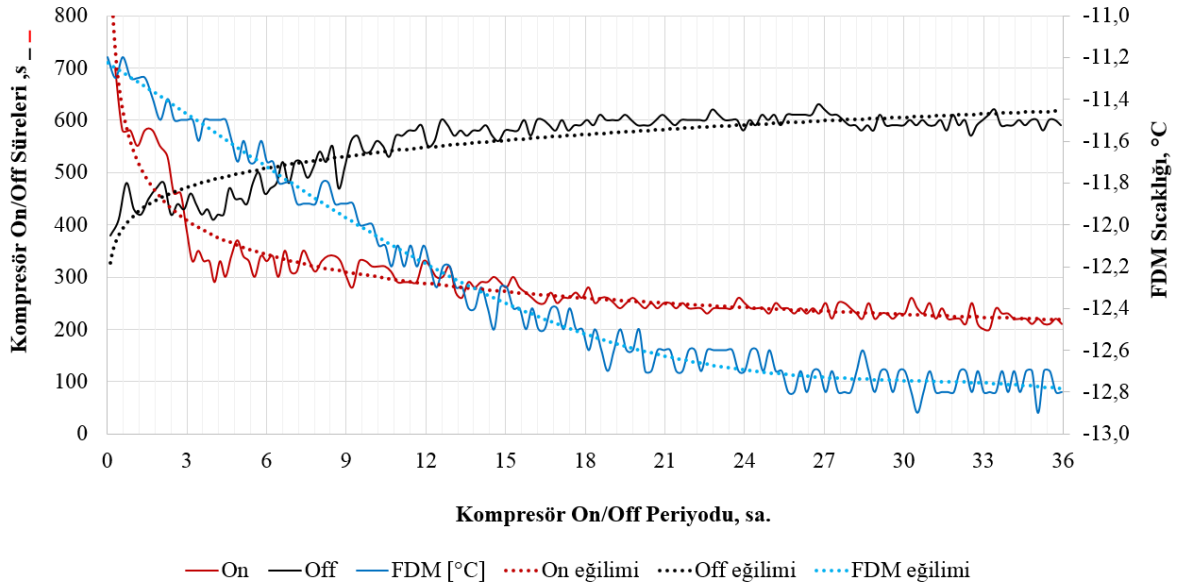
Şekil 4.15: Depo sıcaklık set değeri -16°C 'ye 11,86 saatte gelirken FDM ile depo içi sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılım.

4.1.3.2 Senaryo 2: Set -16°C 'de Kompresör On/Off Periyodu

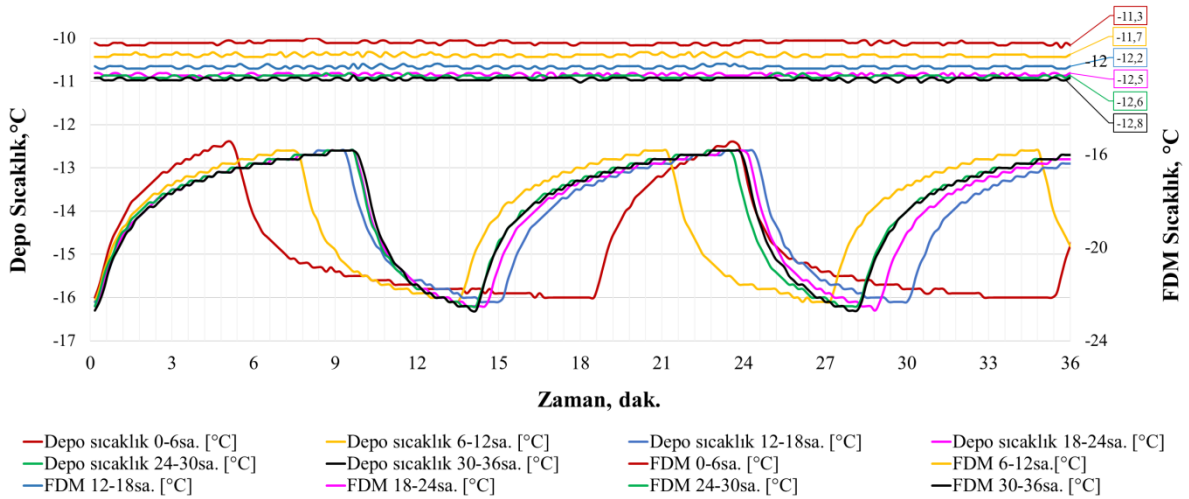
Senaryo 2'de diferansiyel aralık 3°C olacak şekilde FDM, kabin içi, dış ortam sıcaklıkları zamana bağlı olarak 36 saat izlenmiş kompresör on/off periyodu şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: FDM'nin ve depo sıcaklığının set değeri -16°C 'de kompresör on/off periyodunun sıcaklığa bağlı 36 saatlik dağılım.



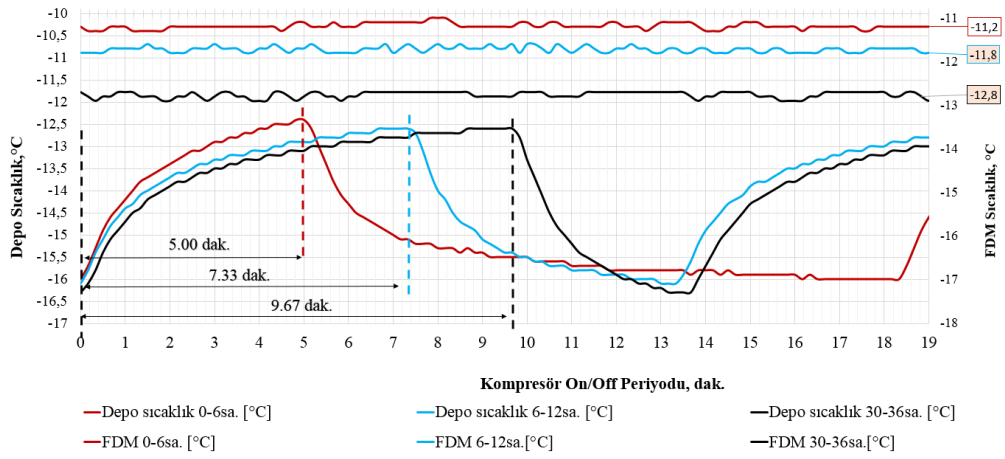
Şekil 4.17: FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kompresör on/off sürelerinin zamana bağlı salınım.



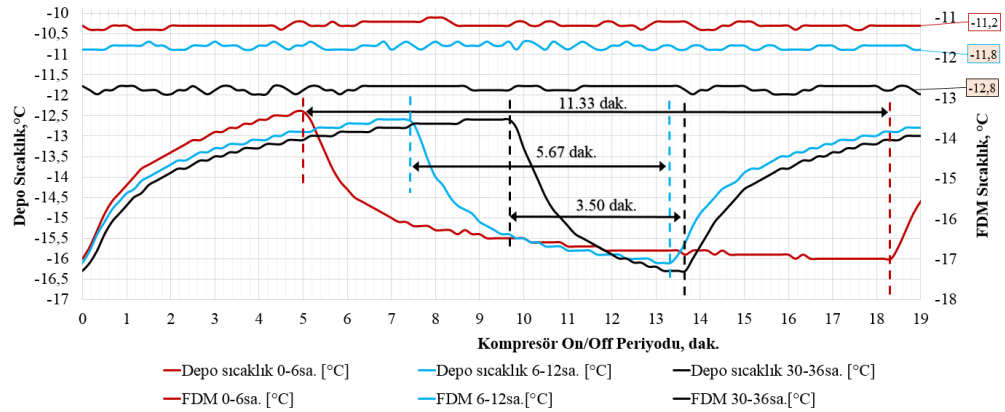
Şekil 4.18: FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

FDM'li deponun sıcaklık set değeri $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kompresör on/off süre salınımları saatlik bazda incelendiğinde (Şekil 4.17) FDM'nin set $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ deneyinde olduğu gibi FDM'nin katı hacim oranının fazlaştığı eğilim çizgilerinden anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle son 18 saatte FDM sıcaklığının $-12,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kararlı halde kaldığı Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.19'da 36 saatlik periyod 12 saatlik eşit dağılımlar halinde ayrılmıştır. Böylelikle kompresörün duruş süresi 5,00 dakikadan 9,67 dakikaya çıkarak %93 oranında bir artış görülmektedir. Şekil 4.20'den

anlaşılacağı üzere kompresör 11,33 dakika çalışırken 3,50 dakikada set sıcaklığına erişmektedir. Kısacası mekanik soğutma grubunun şebekeden çektiği elektrik enerjisi ilk duruma göre % 69 oranında azalmıştır.



Şekil 4.19: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 12 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

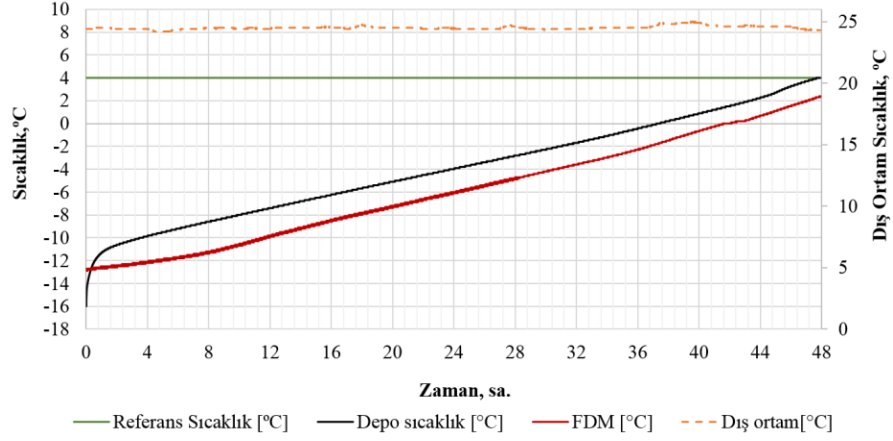


Şekil 4.20: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 12 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

4.1.3.3 Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu

Depo ve FDM sıcaklığının zamana ve dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı şekil 4.21'de sunulmuştur. Mekanik soğutma grubu kapatılmasıyla kabin sıcaklığı,

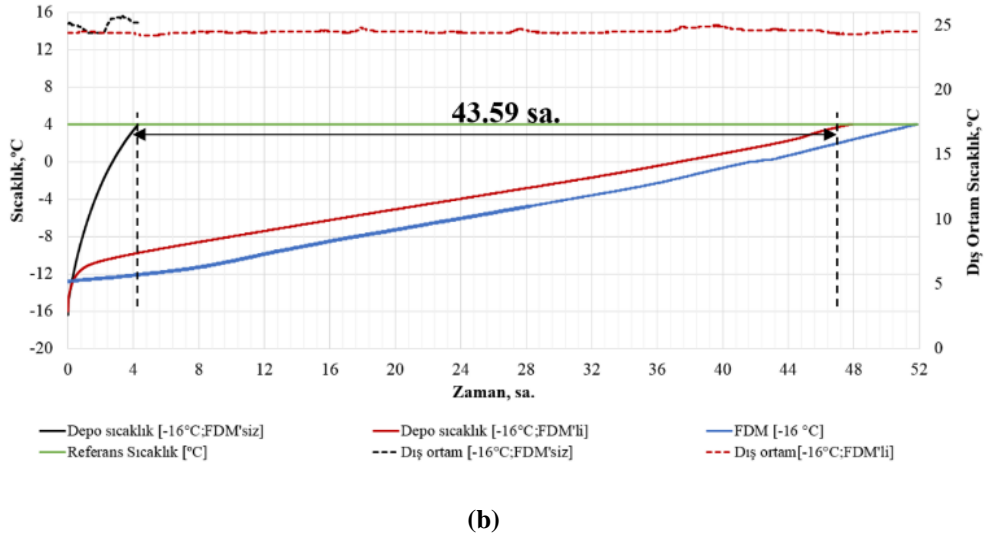
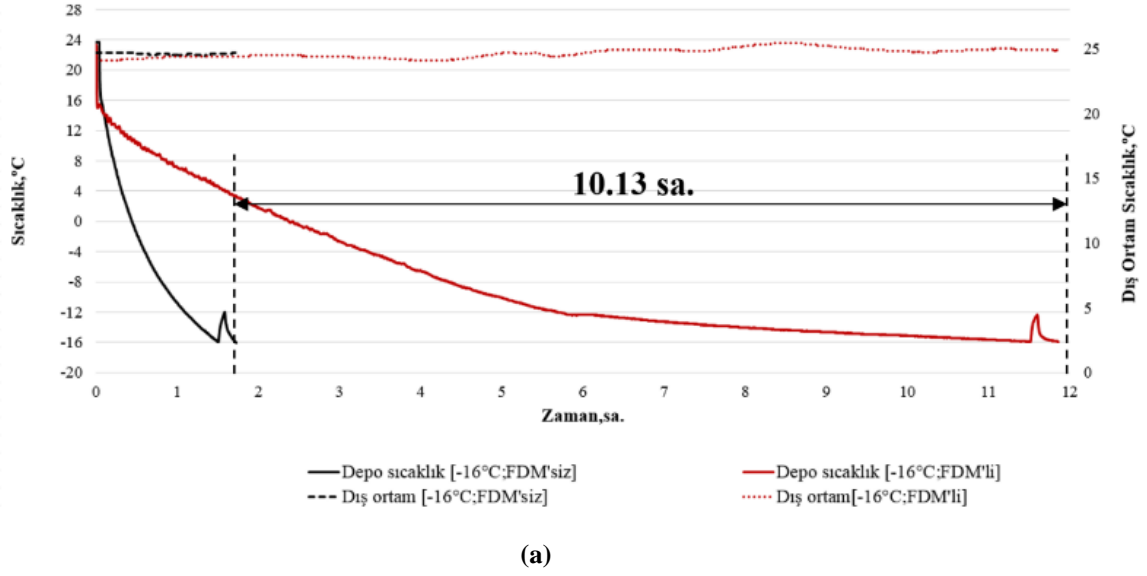
+4°C olan referans sıcaklığına ~48 saatte ulaşılmıştır. Bu durum deponun ısınma sürecini geciktirerek soğuk depoculuk sektöründe olası aksaklıkların getirdiği negatif etkileri azaltmaktadır. Hatta bir kaç saatlik bir elektrik kesintisinin depoda saklanan ürünlerin bozulma ihtimalini de ortadan kaldırıcı etkiye sahiptir.



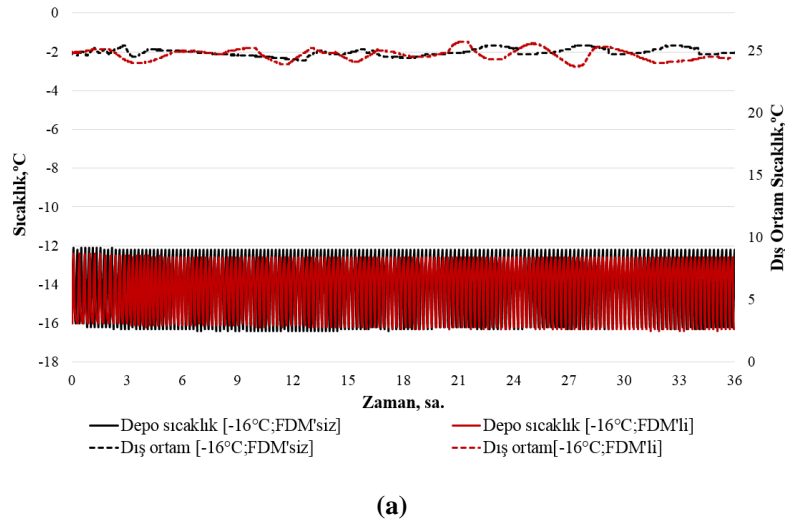
Şekil 4.21: FDM'li kabinin sıcaklık set değeri -16 °C iken mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla FDM'nin ve deponun referans sıcaklığına yükselme periyodu.

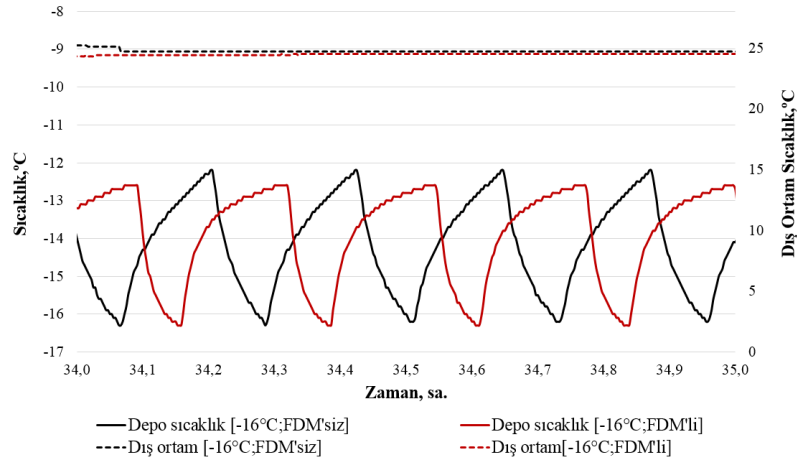
4.1.3.4 FDM'siz ve FDM'li Deney Verilerinin Set -16°C için Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında FDM'nin pozitif ve/veya negatif etkisini ortaya koyabilmek adına ısı enerjisi depolama sistemi olmayan bir depo ile FDM'li bir deponun sıcaklık verileri aynı sınır şartları için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.22 (a)'da senaryo 1 için kompresör, FDM'li depoda rejime gelmek için 10,13 saat daha fazla çalışmıştır. Senaryo 3'te ise FDM'li kabin 43,59 saat daha fazla sürede referans sıcaklığına yükselmiş ve soğuk zincirin kırılma riski azalmıştır (Şekil 4.22b).



Şekil 4.22: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) sıcaklık set değeri -16 °C'ya ulaşma b) depo ısınma periyodu.





(b)

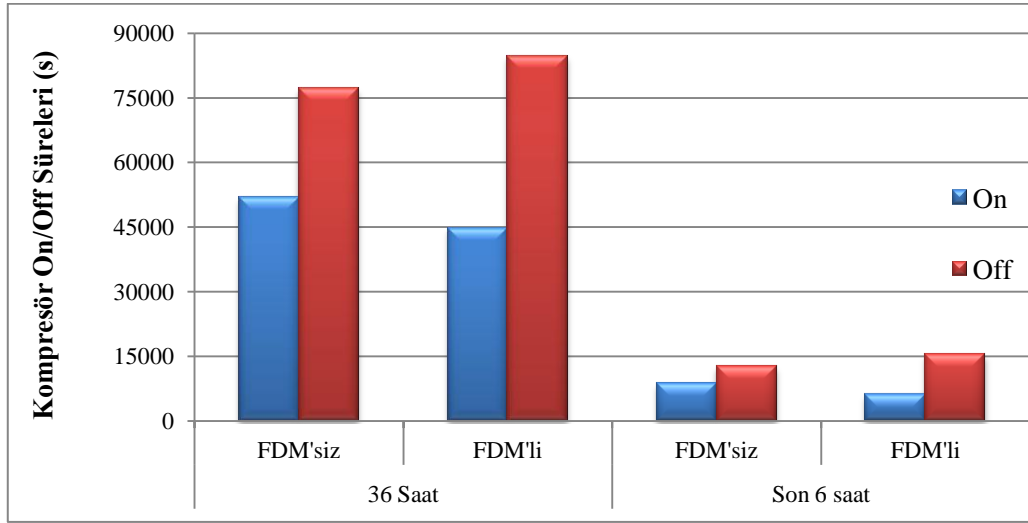
Şekil 4.23: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) 36 saatlik kompresör on/off periyodları b) bir saatlik on/off salınım detayı.

Şekil 4.23(a)'da, FDM'siz ve FDM'li durumdaki 36 saatlik kompresör on/off periyod sayıları çok yakın olup sırasıyla 169 ve 154 adettir. Çalışma/durma salınımlarına saatlik bazda da bakıldığında her iki eğride de periyod sayıları eşittir (Şekil 4.23b).

FDM'siz ve FDM'li durumlarda çalışan kompresörün on/off süreleri 36 saat, son 6 saat halinde tablo 4.4 ve şekil 4.24'de sunulmuştur. Tablo 4.4' de görüleceği üzere FDM'nin ve deponun rejime geldiği son 6 saat dikkate alındığında FDM'siz deponun FDM'liye göre %30,09 oranında daha fazla çalıştığı görülmüştür. Keza kompresörün duruş süresi de FDM'siz deponun FDM'ye göre %21,64 daha az olduğu ortaya konulmuştur. Bu durum FDM'nin, entegre edilen soğuk hava deposuna pozitif katkısını ortaya koymaktadır.

Tablo 4.4: FDM'siz ve FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 36 saatlik ve son 6 saatlik kompresör on/off süreleri.

SET -16°C	36 saat			Son 6 saat			Toplam 36 saat On/Off Sayısı		
	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)
On süresi (s)	51920	44820	-13,67	8740	6110	-30,09	169	154	-8,88
Off süresi (s)	77080	84650	9,82	12660	15400	21,64			



Şekil 4.24: FDM'siz ve FDM'li deponun sıcaklık set değeri -16 °C iken 36 saatlik ve son 6 saatlik kompresör on/off süreleri.

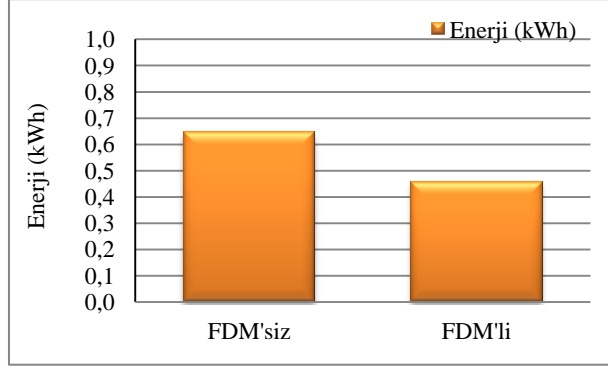
4.1.3.1 Set -16 °C için Enerji Analizi

Güç analizöründen elde edilen veriler tablo 4.5 ve şekil 4.25'de yüksüz ve yüklü depo için verilmektedir. Tablo 4.5' de sunulan FDM ve kabin değerlerinin rejime gelmesiyle beraber son 6 saat referans alınmaktadır. On/off periyodlarının toplamı hesaplandığında, FDM'siz durum FDM'li duruma göre %28,13 daha fazla enerji sarfiyatına neden olmaktadır. Bu durum FDM'nin -18°C'ye göre set -16°C'nin daha fazla pozitif etkisi olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.5: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -16 °C'de 36 saat ve son 6 saat içindeki kompresör on/off periyodundaki enerji verileri.

SET -16°C		Süre (36h)	Süre (6h)	Gerilim [V]	Toplam Akım [A]	Dış Ünite Akım (Kond+Komp)	İç Ünite Akım (Evap Fanı)	Görünür Güç, S [VA]	Reaktif Güç, Q [Var]	Aktif Güç, P [kW]	P [kW] (36h)	P [kW] (6h)
FDM'siz	ON	14,42	2,43	229	7,01	6,76	0,25	1388,42	590,04	1,49	21,53	3,62
	OFF	21,41	3,52	234	0,26	0	0,26	57,24	14,79	0,06	1,26	0,25*
FDM'li	ON	12,45	1,70	226	6,97	6,73	0,24	1362,41	578,99	1,46	18,24	2,49
	OFF	23,51	4,28	227	0,26	0	0,26	55,53	14,35	0,06	1,35	0,25*

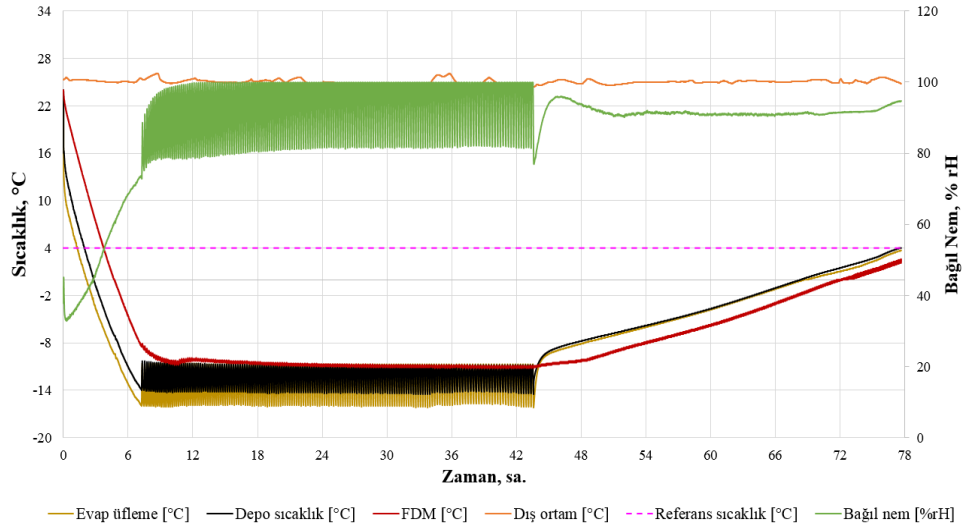
* Kompresör off periyodundayken evaporatör fanı çalışmakta ve şebekeden ~0,23A akım çekmektedir.



Şekil 4.25: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -16 °C'de kompresörün saatlik harcadığı enerji verileri.

4.1.4 Set -14°C Deneyi

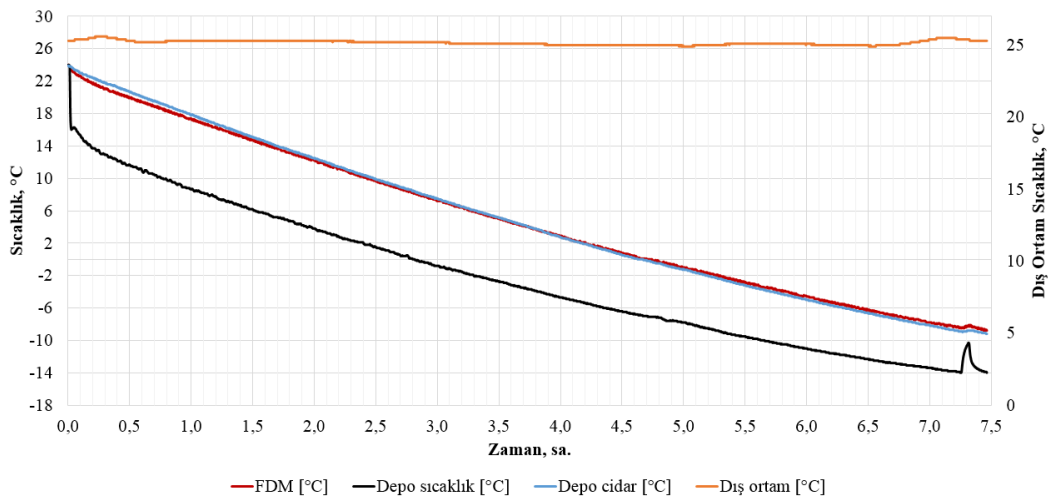
FDM'nin katı/sıvı sıcaklığına inilebilmesi için depo sıcaklık set değeri -14°C/-11°C seçilmiştir. Şekil 4.26' da görüleceği üzere evaporatör üfleme, depo sıcaklık, FDM, dış ortam sıcaklıkları ve bağıl nemi zaman bağı gösteren dağılım Şekilde görüleceği üzere FDM kaplı deponun sıcaklık set değeri -14 °C'ye gelişi, 36 saatlik on/off periyodu ve deponun ısınma süreci bulunmaktadır.



Şekil 4.26: FDM kaplı deponun sıcaklık set değerine iniş, on/off periyodu ve erime sürecini gösteren dağılım.

4.1.4.1 Senaryo 1: Deponun Set -14°C'ye Soğutulması

Depo, sıcaklık set değeri -14°C' ye ~7,5 saatte gelmiş olup FDM, depo içi sıcaklık ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı şekil 4.27'de verilmiştir. FDM sıcaklığı deponun rejime geldiği esnada -9 °C'ye gelebildiği dolayısıyla FDM'nin katı/sıvı fraksiyonunda sıvı hacim oranının daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu durum FDM'nin ısı tutunum kapasitesitesinin yeter seviyelerde olmadığını anlatmaktadır.



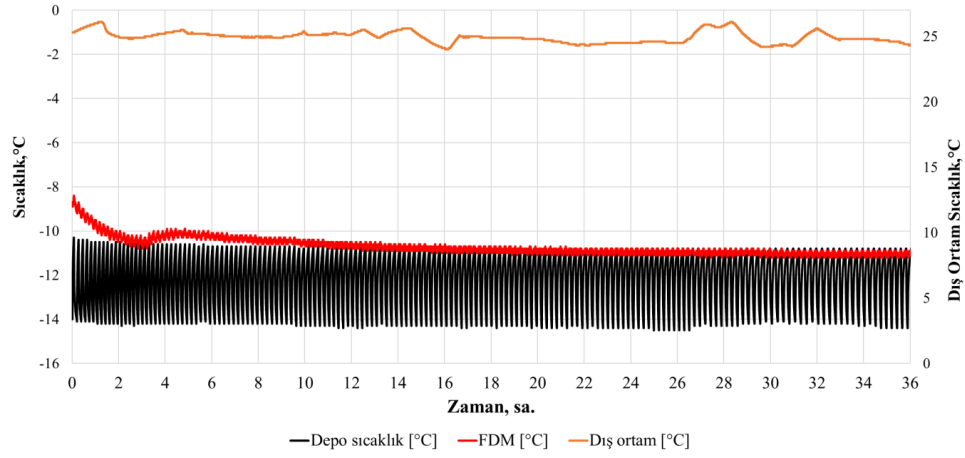
Şekil 4.27: Depo sıcaklık set değeri -14°C'e 7,5 saatte gelirken FDM, depo içi ve depo cidar sıcaklığının dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı.

4.1.4.1 Senaryo 2: Set değeri -14°C' de Kompresör On/Off Periyodu

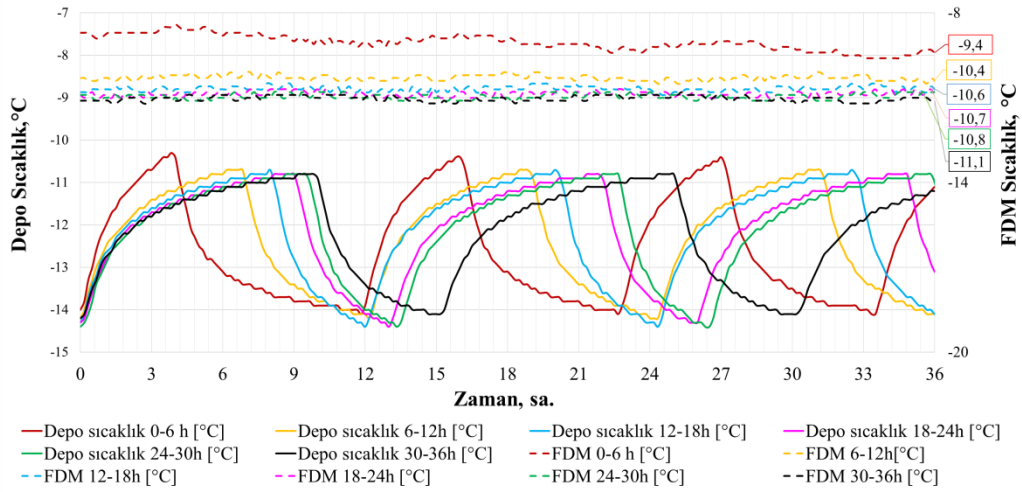
Senaryo 2'de diferansiyel aralık 3°C olacak şekilde FDM, kabin içi, dış ortam sıcaklıkları zamana bağlı olarak 36 saat izlenmiş kompresör on/off periyodu şekil 4.28'de verilmiştir. Kompresörün on/off yaptığı 2nci ve 8inci saat aralığında FDM'nin dıştan içe doğru katılırken sensörün bir buz tabakasına tutunduğu ve sensörü kapsül yüzeyine doğru ittiği anlaşılmaktadır. Daha sonra gizli ısının depolanmasıyla kapsülde homojen sıcaklık dağılımı sağlanmıştır.

Kabin set -18°C veya -16°C'deki deneylerde gözlemlendiği gibi FDM'nin -12°C'lere inemediği diğer bir deyişle donma sürecinden çok uzakta olduğu

anlaşılmaktadır. Kısacası seçilen kabin set sıcaklığı, FDM'nin yeter seviyede katı hacim oranına sahip olamadığını göstermektedir.



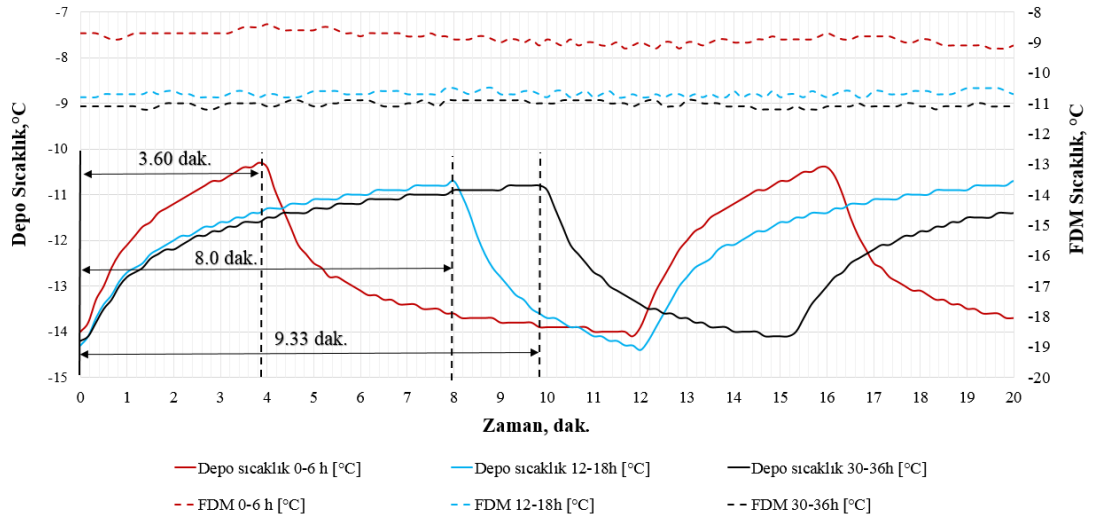
Şekil 4.28: Sıcaklık set değeri -14 °C iken dış ortam sıcaklığına bağlı kompresör on/off periyodunun 36 saatlik dağılımı.



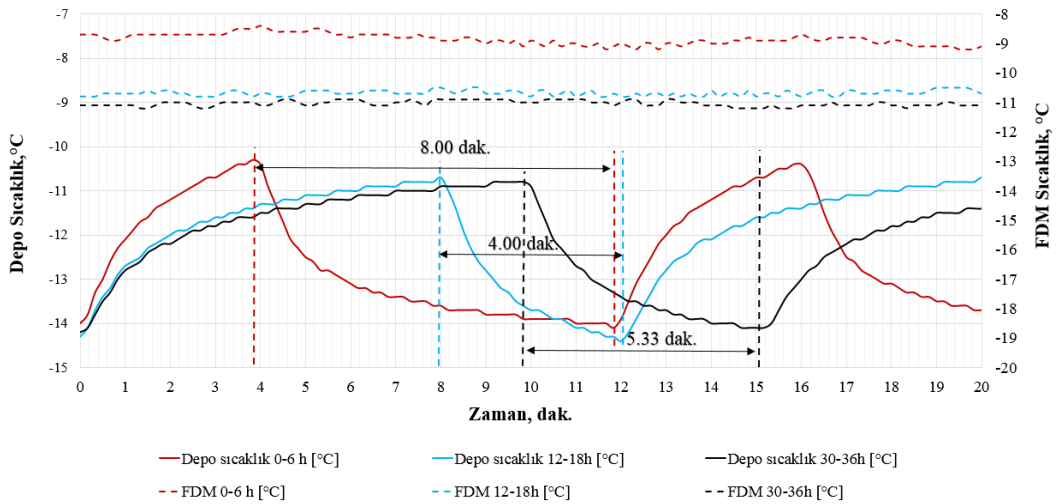
Şekil 4.29: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14 °C iken 6 saat aralıklarla on/off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

Şekil 4.29'da 36 saatlik periyod 12 saatlik eşit dağılımlar halinde ayrılmıştır. Senaryo 2'de FDM'nin -9,4 °C'den -11,1°C'ye gelerek stabil kaldığı görülmüştür (Şekil 4.29). Bu durumda kompresör, 3,6 dakikadan 9,33 dakikaya çıkarak 2,59 kat daha fazla durmuştur (Şekil 4.30). Şekil 4.31'de ise kompresör on süresi incelendiğinde 8 dakikadan 4 dakikaya indiği sonra tekrar 5,33 dakikaya çıktığı

görülmektedir. Bu durum FDM'nin katı/sıvı faz oranında sıvı fazın bazen fazla bazen de az olmasından kaynaklanmaktadır. Bu kararsız hal, sıcaklık set değeri -14°C 'nin sisteme negatif yönde tesirini göstermektedir. Diğer bir deyişle, FDM'nin, diğer deneylerin aksine kararsız ve iletken bir davranış sergilediği anlaşılmıştır.



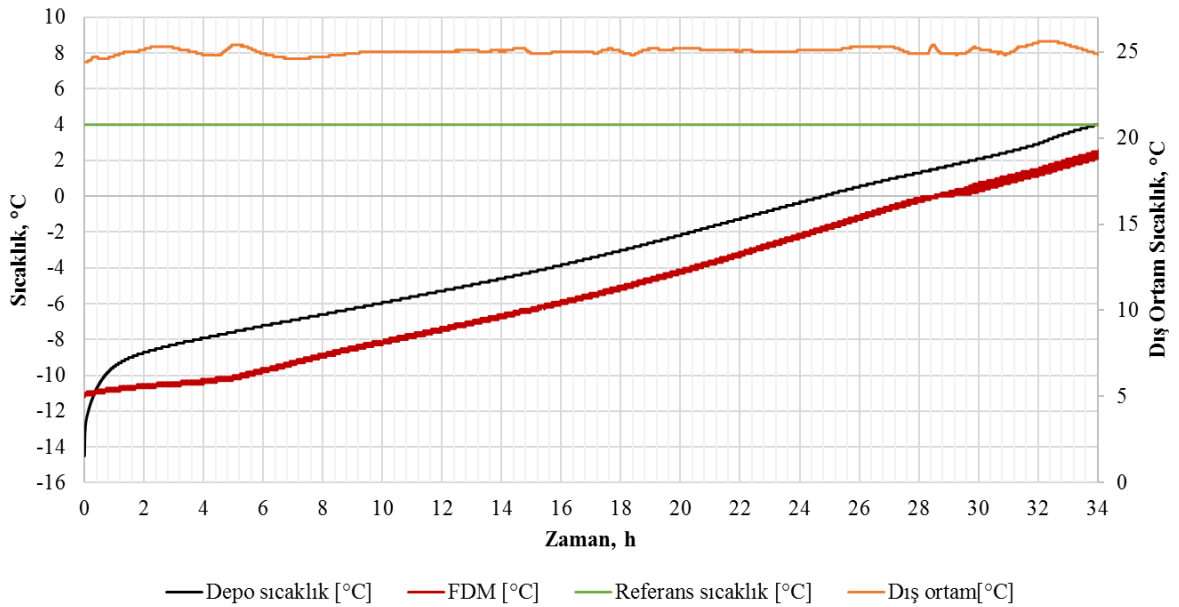
Şekil 4.30: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14°C iken 6 saat aralıklarla off sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.31: FDM'li deponun sıcaklık set değeri -14°C iken 6 saat aralıklarla on sürelerinin FDM sıcaklığına bağlı değişimleri.

4.1.4.2 Senaryo 3: Soğuk Hava Deposunun Isınma Periyodu

Mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla senaryo 3 referans sıcaklığına kadar izlenmiş olup şekil 4.32'de dış ortam sıcaklığına bağlı dağılımı verilmiştir. . Mekanik soğutma grubu kapatılmasıyla kabin, referans sıcaklığına 34 saatte ısınmıştır. Bu durum FDM'nin mekanik soğutma grubu olmadan frigorifik taşımacılıkta rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle mevsim şartlarının soğuk yaşandığı kuzey yerleşim bölgelerinde FDM frigorifik araçlarda daha aktif kullanılabilir.

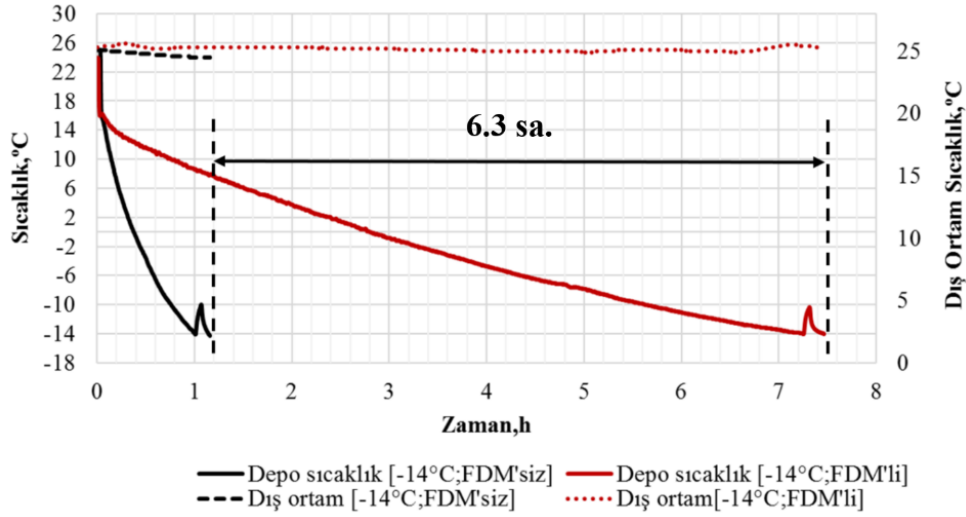


Şekil 4.32: FDM'li kabinin sıcaklık set değeri -14 °C iken mekanik soğutma grubunun kapatılmasıyla FDM'nin ve deponun referans sıcaklığına ısınma periyodu.

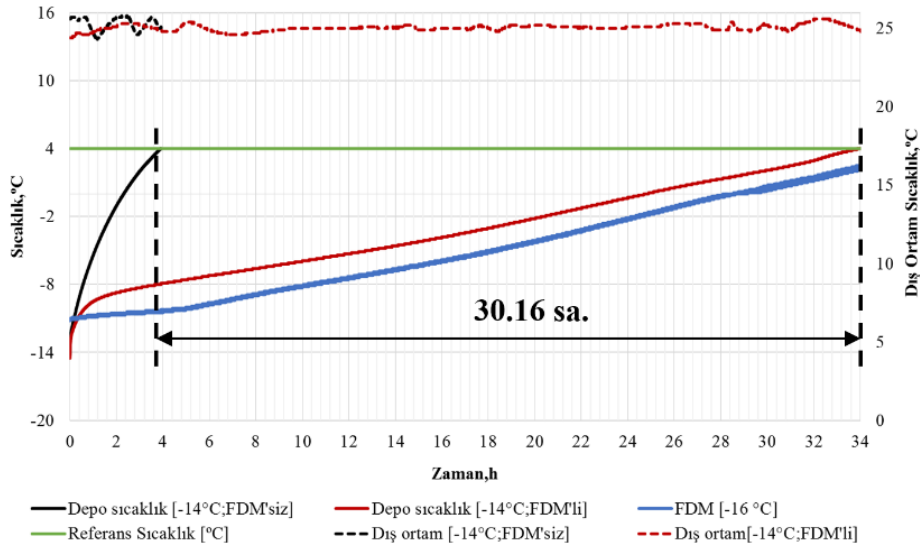
4.1.4.3 FDM'siz ve FDM'li Deney Verilerinin Set -14°C için Karşılaştırılması

Bu çalışma kapsamında FDM'nin pozitif ve/veya negatif etkisini ortaya koyabilmek adına ısı enerjisi depolama sistemi olmayan bir depo ile FDM'li bir deponun sıcaklık verileri aynı sınır şartları için karşılaştırılmıştır. Şekil 4.33 (a)'da senaryo 1 için kompresör, FDM'li depoda rejime gelmek için 6,3 saat daha fazla

çalışmıştır. Senaryo 1 için FDM sisteme artı yük getirmiştir. Senaryo 3'te ise FDM'li kabin 28,13 saat daha fazla sürede referans sıcaklığına yükselmiş ve soğuk zincirin kırılma riski azalmıştır (Şekil 4.33b).



(a)



(b)

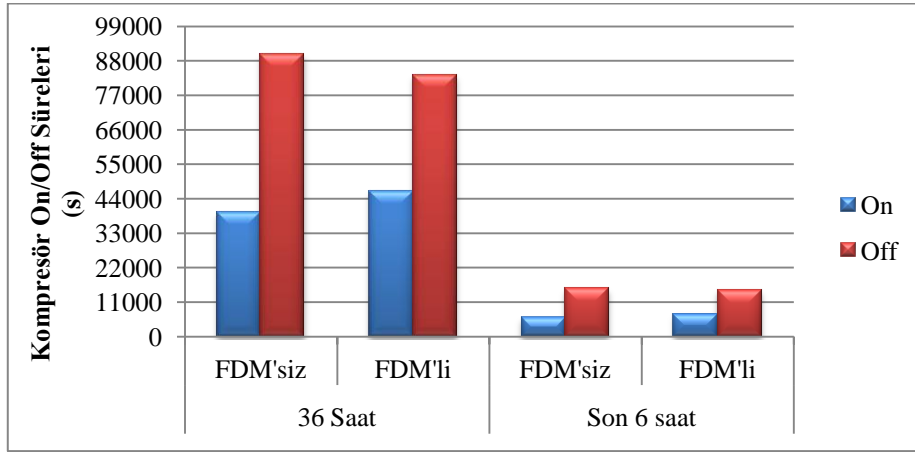
Şekil 4.33: FDM'siz ve FDM'li kabinlerde a) sıcaklık set değeri -14 °C'ya geliş b) FDM'nin ve deponun ısınma periyodu.

FDM'siz ve FDM'li durumlarda çalışan kompresörün on/off süreleri 36 saat ve son 6 saat için tablo 4.6'da sunulmuştur. FDM, katı faza geçmek için depodaki

soğuk havayı absorbe etmekte ve bu yüzden kompresöre ek yük getirmektedir. Bu durum FDM'li depoda kompresörün on periyodunda %19,83 daha fazla çalışıp off periyodunda ise %3,69 daha az kalmaktadır (Tablo 4.6). Bu durum -14°C set sıcaklığı için kullanılan FDM'nin doğru malzeme olmadığını göstermektedir (Şekil 4.34).

Tablo 4.6: Set -14 °C için kompresör on/off süreleri.

SET -14°C	36 Saat			Son 6 saat			Toplam 36h On/Off Sayısı		
	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)
On süresi (s)	39620	46340	16,96	6050	7250	<u>19,83</u>	197	171	-13,20
Off süresi (s)	90130	83570	-7,28	15430	14860	<u>-3,69</u>			



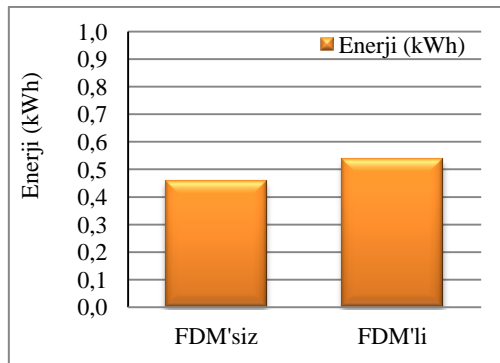
Şekil 4.34: Set -14 °C için FDM'li ve FDM'siz kabinde kompresör on/off süreleri.

4.1.4.1 Set -14 °C için Enerji Analizi

Güç analizöründen elde edilen veriler tablo 4.7'de yüksüz ve yüklü depo için verilmektedir. Tablo 4.7' de sunulan toplam enerji verileri hesaplandığında, FDM'li depo FDM'siz duruma göre %17,39 daha fazla enerji tüketmiştir. Şekil 4.35'de görüleceği üzere -14°C set sıcaklığı için FDM'nin sisteme olumsuz etkisini göstermektedir.

Tablo 4.7: Kompresör on/off periyotlarındaki set -14 °C için 36 saat ve son 6 saatteki enerji verileri.

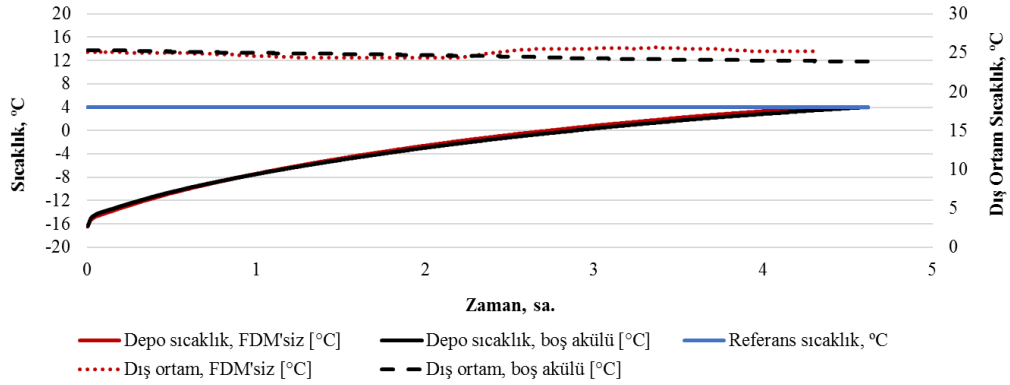
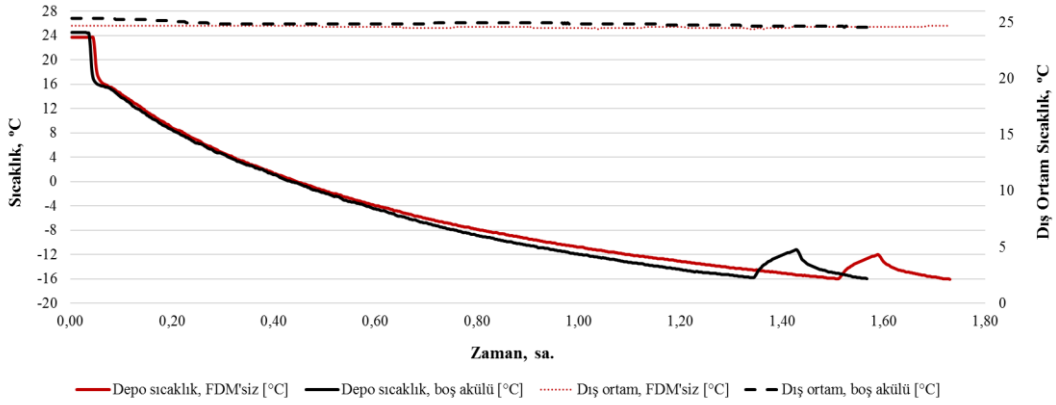
SET -14°C		Süre (36h)	Süre (6h)	Gerilim [V]	Toplam Akım [A]	Dış Ünite Akım (Kond+Komp)	İç Ünite Akım (Evap Fanı)	Görünür Güç, S [VA]	Reaktif Güç, Q [Var]	Aktif Güç, P [kW]	P [kW] (36h)	P [kW] (6h)
FDM'siz	ON	11,01	1,68	229	7,01	6,76	0,25	1388,42	590,04	1,49	16,43	<u>2,51</u>
	OFF	25,04	4,29	234	0,26	0,00	0,26	57,24	14,79	0,06	1,48	<u>0,25*</u>
FDM'li	ON	12,87	2,01	226	6,97	6,73	0,24	1391,86	537,42	1,48	19,06	<u>2,98</u>
	OFF	23,21	4,13	227	0,26	0,00	0,26	56,68	11,74	0,06	1,34	0,24*



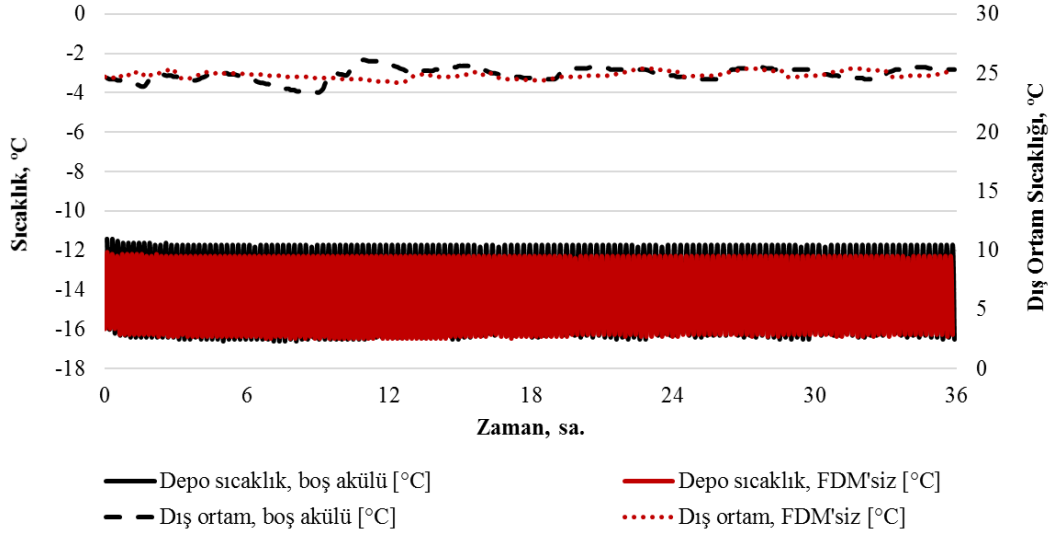
Şekil 4.35: FDM'li ve FDM'siz kabinde sıcaklık set değeri -14 °C'de kompresörün harcadığı enerji verileri.

4.1.5 Boş Makro Kapsüllü Deney: Set-16°C

Kapsül içinde bulunan havanın da yalıtım etkisi görüp görmediğinin anlaşılabilmesi için 310 adet makro kapsülün içinde bulunan hava miktarları hesaplanarak 46 adet boş kapsülle en verimli çalışılan set -16°C deneyi tekrarlanmıştır. Eldeki veriler ışığında FDM'siz ve içinde hava bulunan makro kapsüllü deneyler arasında anlamlı bir fark kaydedilmemiştir (Şekil 4.36 ve şekil 4.37).



Şekil 4.36: FDM'li deneylerde set -18°C, -16°C ve -14°C için geçen sürelerin dağılımı a) depo sıcaklık b) FDM sıcaklık.

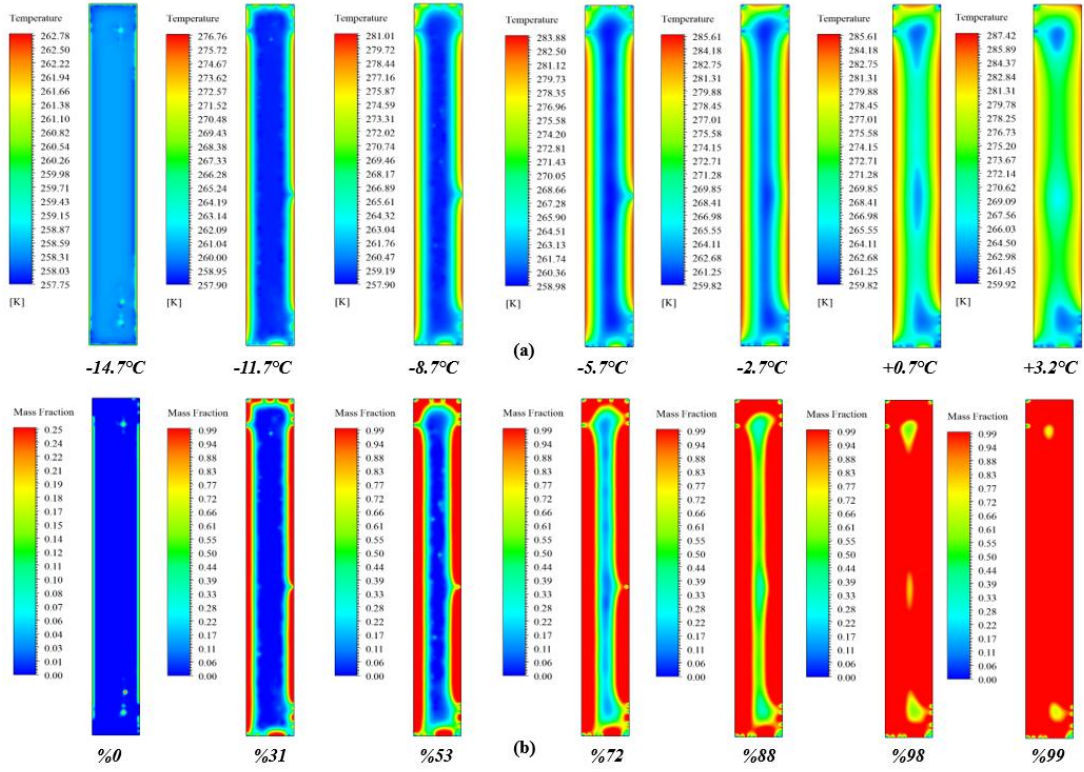


Şekil 4.37: FDM'siz ve boş makro kapsüllü kabinlerde set sıcaklığı -16°C için 36 saatlik on/off periyodu.

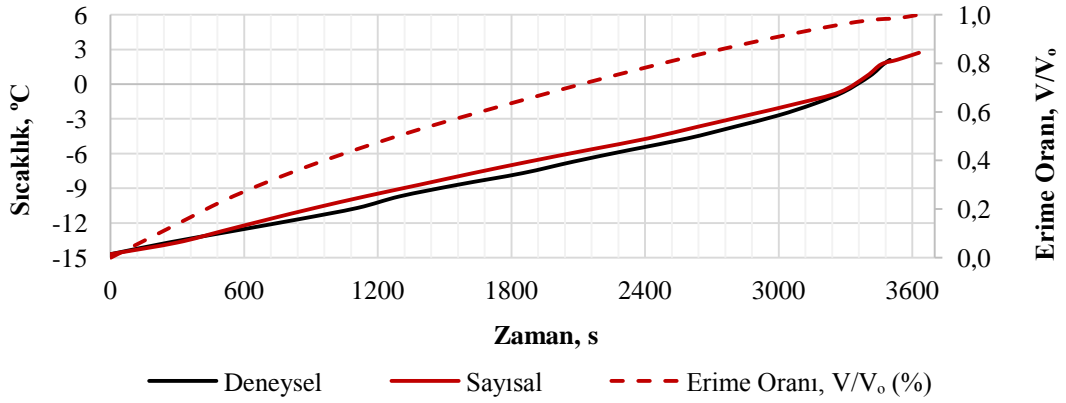
4.2 Sayısal Bulgular

4.2.1 Orijinal Boyutlardaki Yalıtımsız FDM'li Makro Kapsülün Sayısal Analizi

Pleksiglas malzemeden oluşan orijinal boyutlardaki yalıtımsız makrokapsül içinde bulunan FDM'nin sıcaklık ve erime oranı dağılımları üçer derece farkla Şekil 4.38'de verilmiştir. Deneysel ve sayısal analiz verilerinin yakınsama oranları birer derece farkla adımlar arası %5,52, gözlemlenebilen tam erimenin gerçekleştiği toplam süre arasındaki fark ise %3,71 olmuştur (Tablo 4.8). Bu yakınsama oranı da kabul edilebilir sınırlar arasında olup nümerik çalışmanın yüksek doğrulukta olduğunu göstermektedir (Şekil 4.39).



Şekil 4.38: Pleksiglas malzemeden oluşan orijinal boyutlardaki yalıtımsız makrokapsül içinde bulunan FDM'nin üzer derece farklarla a) sıcaklık b) erime oran dağılımları.

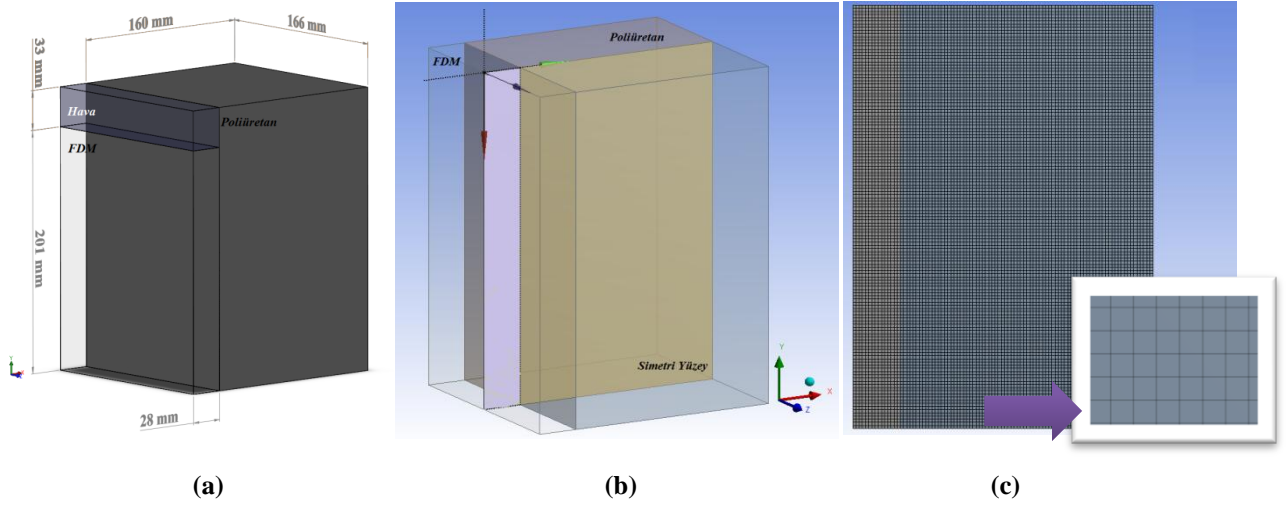


Şekil 4.39: Yalıtımsız FDM'nin zamana bağlı deneysel ve sayısal analiz sıcaklık ve erime oran dağılımları.

Tablo 4.8: Yalıtımsız FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçları.

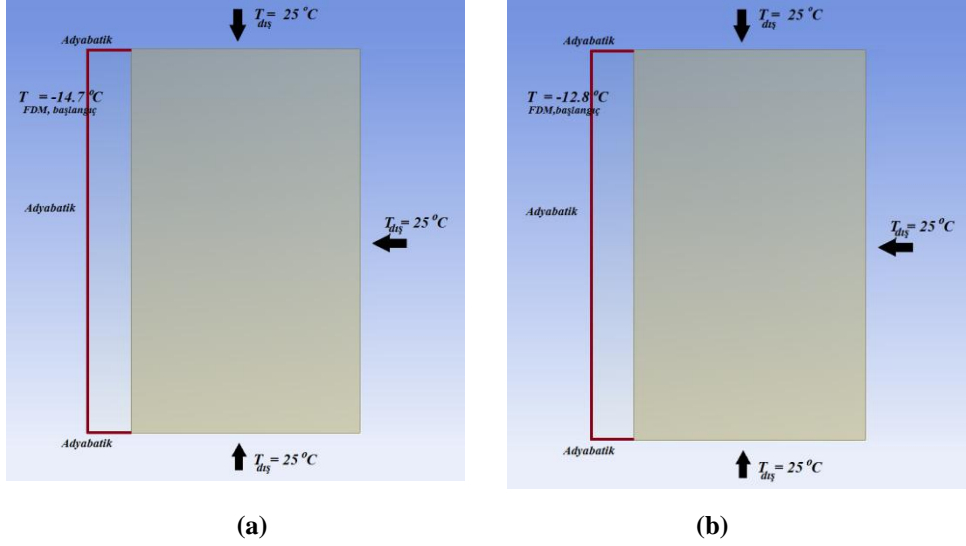
Deneysel		Sayısal		
FDM (°C)	Süre (s)	Sıcaklık (°C)	Süre (s)	Erime Oranı, V/V _o (%)
-14,7	1	-14,7	1	0,00
-13,7	260	-13,7	299	0,14
-12,7	550	-12,7	503	0,23
-11,7	840	-11,7	707	0,31
-10,7	1110	-10,7	919	0,39
-9,6	1300	-9,6	1146	0,46
-8,6	1560	-8,6	1388	0,53
-7,7	1850	-7,7	1628	0,59
-6,7	2080	-6,7	1879	0,66
-5,7	2330	-5,7	2144	0,72
-4,7	2590	-4,7	2413	0,78
-3,7	2800	-3,7	2635	0,83
-2,7	3000	-2,7	2860	0,88
-1,7	3160	-1,7	3080	0,92
-0,7	3290	-0,7	3274	0,96
0,7	3410	0,7	3396	0,98
1,7	3470	1,7	3429	0,98
2,1	3500	2,1	3533	0,99
		2,7	3630	1

4.2.2 Orijinal Boyutlardaki Yalıtımlı FDM'li Makro Kapsülün Sayısal Analizi

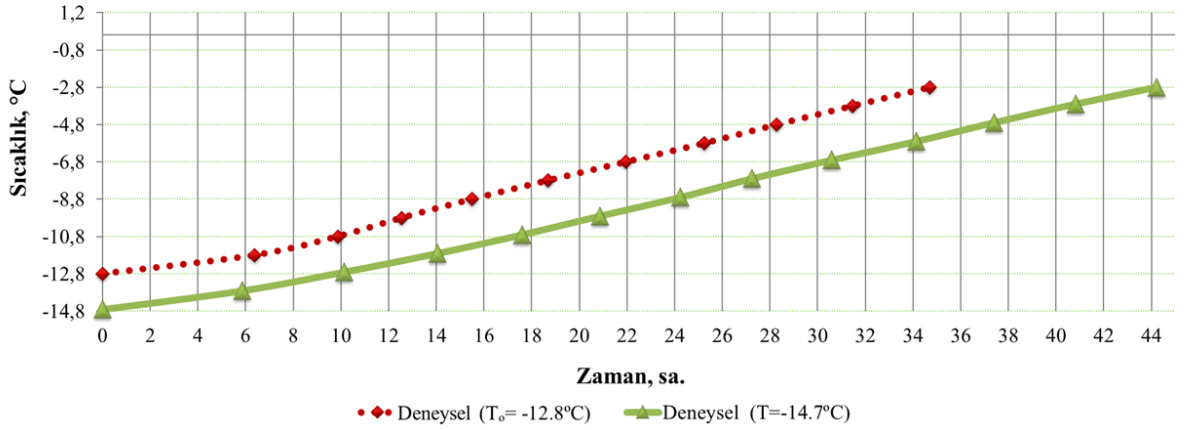


Şekil 4.40: Katı modelin iç ölçüleri baz alınarak a) 3D katı modeli b) simetri yüzeyi c) 2D sonlu eleman ağı.

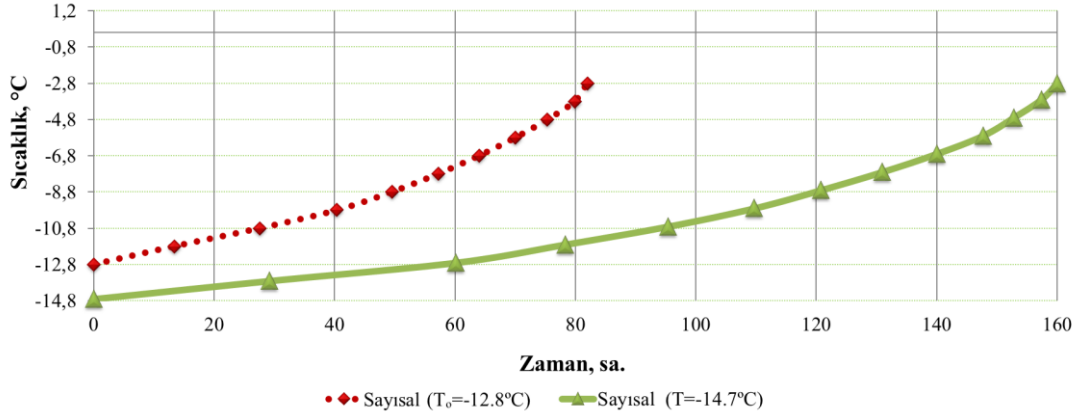
Şekil 4.40'da FDM, hava, HDPE malzemedan yapılmış makrokapsül ve depo yalıtım malzemesi poliüretan köpüğün modelin üç boyutlu (3D) katı modeli, simetri yüzeyi ve iki boyuta (2D) indirgenmiş halinin sonlu eleman ağı görülmektedir. Şekil 4.41'de ise nümerik uzaya tanımlanan sınır şartları gösterilmektedir. FDM'nin poliüretana temas eden yüzeyi hariç diğer yüzeyleri adyabatik tanımlanmış olup yalıtım malzemesi doğal konveksiyona maruz bırakılarak ısı taşınım katsayısı 7 W/m^2 alınmıştır. Model iki farklı FDM sıcaklığı için yapılmıştır. İlk olarak depo sıcaklık set değeri -18°C olan depodaki mekanik soğutma grubu kapandığında FDM'nin yalıtımlı bir depodaki erime sürecine bakılmıştır. Şekil 4.42' de Depo içi başlangıç sıcaklığı $-12,8^\circ\text{C}$ ' den ve $-14,7^\circ\text{C}$ 'den $-2,8^\circ\text{C}$ ' ye sırasıyla ~ 35 saat ve ~ 44 saatte gelmiştir. Depo içindeki $-12,8^\circ\text{C}$ ve $-14,7^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklıklarındaki FDM'nin zamana bağlı sayısal sıcaklık sonuçlarının dağılımı da şekil 4.43' de ayrıca sunulmuştur. Şekil 4.44'de depo içindeki $-12,8^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları görülmektedir. Kabinde $-14,7^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları şekil 4.45'de sunulmuştur. Şekil 4.46' da ise FDM'nin $-12,8^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığından tam erimenin gerçekleştiği $+2,1^\circ\text{C}$ 'ye kadar birer derece farkla gerçekleşen sıcaklık ve hacimsel erime prosesi dağılımları verilmiştir.



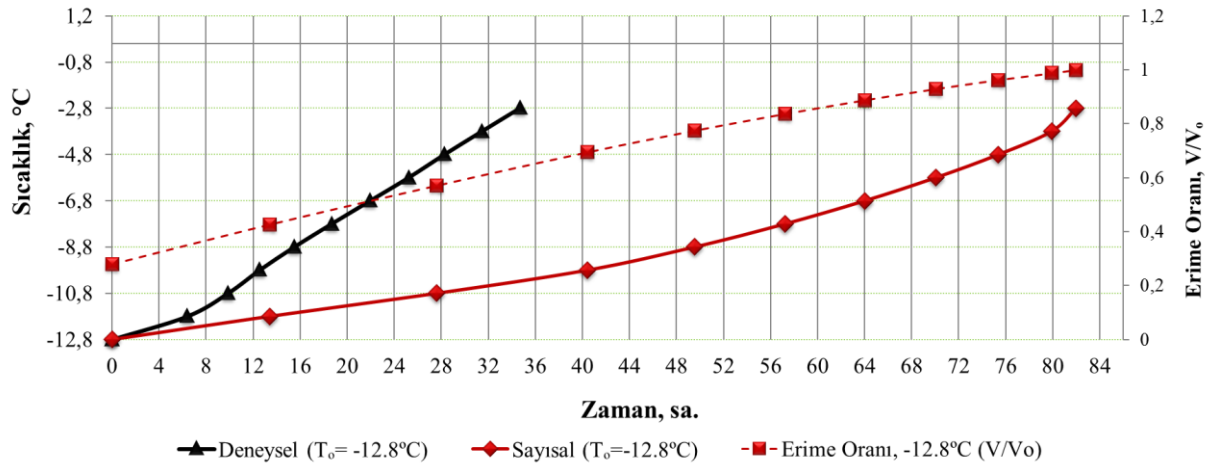
Şekil 4.41: Sayısal analizde doğal ısı taşınım katsayısı $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ olan FDM ve poliüretan köpüğün tanımlanan sınır şartları a) set sıcaklık değeri -18°C b) set sıcaklık değeri -16°C .



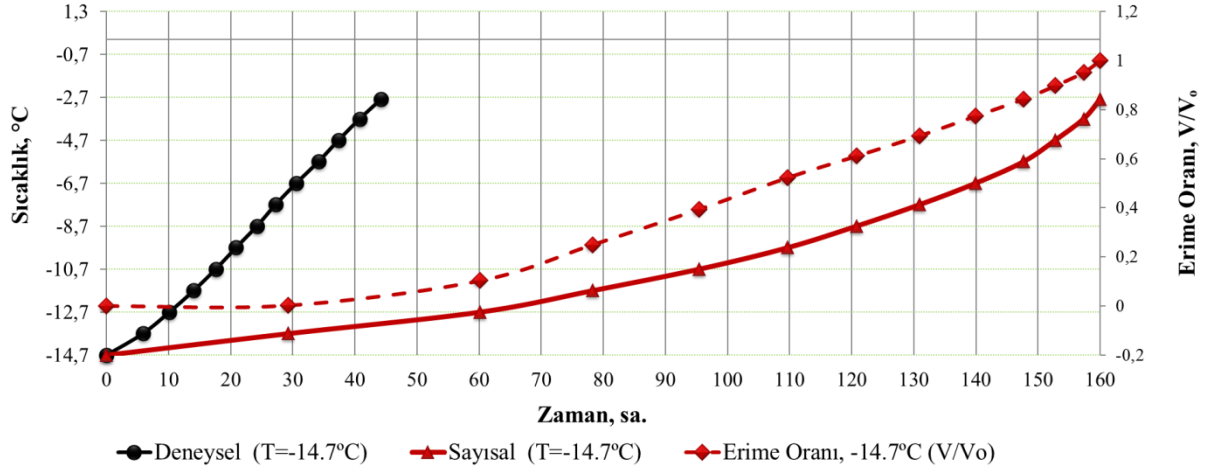
Şekil 4.42: Depo içindeki -12.8°C ve -14.7°C başlangıç sıcaklıklarındaki FDM'nin zamana bağlı deneysel sıcaklık sonuçlarının dağılımı.



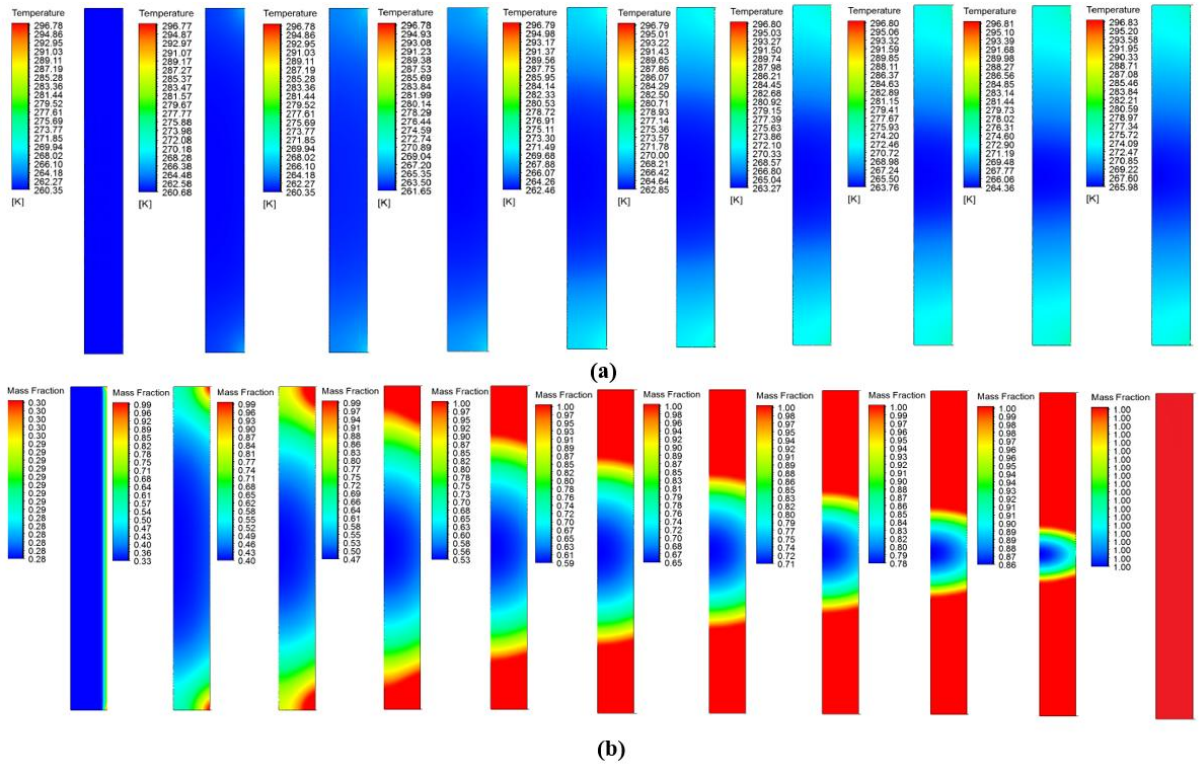
Şekil 4.43: Depo içindeki -12,8°C ve -14,7°C başlangıç sıcaklıklarındaki FDM'nin zamana bağlı sayısal sıcaklık sonuçlarının dağılımı.



Şekil 4.44: Depo içindeki -12,8°C başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları.



Şekil 4.45: Depo içindeki -14,7°C başlangıç sıcaklığındaki FDM'nin deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının zamana bağlı sıcaklık ve erime dağılımları.



Şekil 4.46: FDM'nin -12,8°C başlangıç sıcaklığından tam erimenin gerçekleştiği +2,1°C'ye kadar birer derece farkla gerçekleşen a) sıcaklık b) hacimsel erime prosesi dağılımı.

4.3 Boyut Analizi Sonuçları

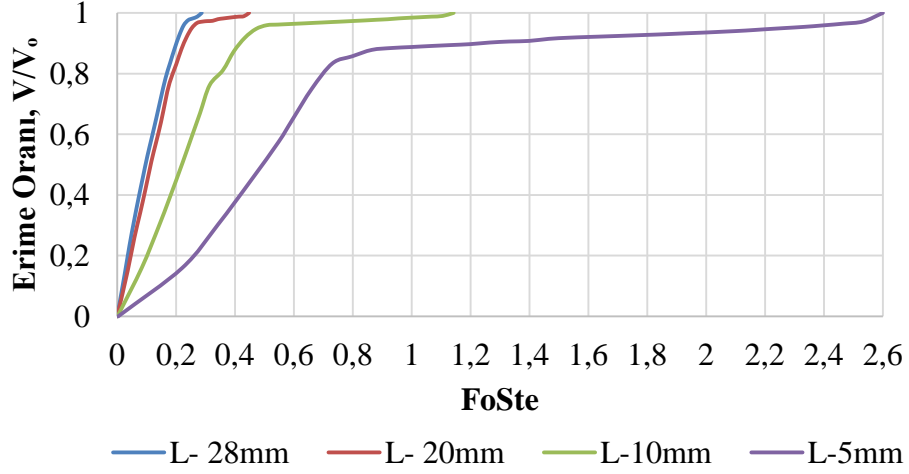
Sayısal analizde, doğal taşınım için Grashof sayısının faz değişim sürecine önemli bir katkısının olmadığı görülmüştür ($Gr < 10^8$). Şöyle ki, analizde erimenin başladığı sırada akış hızının, 1mm/s hızı geçmemiştir. Faz değişiminin gerçekleşirken de hızın 0.1 mm/s'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla bu durum, Viskanta ve Gau'nun (1982) sonuçlarıyla tutarlı olup Gr değeri analizlerde ihmal edilmiştir.

Biot sayısı bu çalışmada 0,1'den çok büyük olmaması yığık sistem çözümlenmesiyle kabaca bir süre tayini yapılabilir (Çengel,2011). Denklem takımları kullanılarak yalıtımsız makro kapsüldeki akışkanın yaklaşık tam erimesi için geçmesi gereken süre için ~ 3614 saniye hesaplanmıştır.

Yüksek Pr değeri ise sınır tabakada ısının yavaş ilerlediğini gösterir ($Pr \gg 1$). Bu çalışmada Pr değeri 3,43 olarak bulunmuştur.

Büyük Fo değeri, ısının cismin içinde hızlı ilerlediğini bu yüzden ısının daha az depolandığını gösterir ($Fo \gg 0,28$). Bu çalışmada Fo değeri faz değişim sıcaklık aralığında 0,28'den küçük çıkmıştır. Bu değer FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesinin ısı iletim kapasitesinden yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Stefan sayısı, mevcut çalışma için faz değişim sıcaklık aralığında 0,1'in altında kalmıştır ($Ste \leq 0,1$).

Analiz sonuçları, akışkanın faz değişimi esnasında konveksiyon yerine kondüksiyonun etkin olduğunu göstermiştir şekil 4.47'de verilmektedir. Ayrıca erime oranı ve $FoSte$ değeri arasında da korelasyonların kurulabileceği literatürde bulunmakta ve Shamsundar ve Sparrow (1975) ve Assis vd. (2007) çalışmalarıyla da tutarlılık göstermektedir. Bu çalışmayla FDM'nin verimli kullanılmasını etkileyen en önemli parametrelerin, FDM hacmi ve akışkanın dış ortamla arasındaki sıcaklık farkı olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla FDM'nin hacmi ve sıcaklık farkı, ortamdaki çekilecek ısıyla doğru orantılıdır denilebilir.



Şekil 4.47: Boyut analizindeki FoSte sayısının erime oranına bağlı dağılımı.

4.4 Belirsizlik Analizi Sonuçları

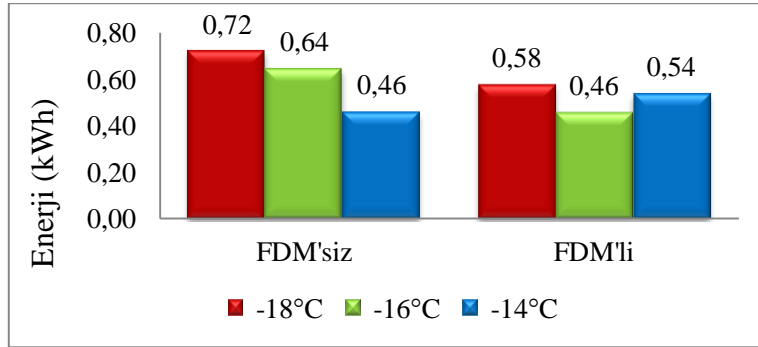
Bu çalışmada hesaplanan sıcaklık ölçümündeki toplam hata 0,1 ile $\pm 0,756$ °C arasında değişmiştir. Tablo 4.9' da görüleceği üzere hesaplanan hata analiz değerleri, bu çalışma için kabul edilebilir sınırlardadır (Akpınar, 2005).

Tablo 4.9: Hesaplanan hata analiz değerleri.

Hata Oluşturan Parametreler	Birim	Toplam Hata
Sıcaklık ölçümündeki toplam hata		
$W_{T_{fg}}$	°C	$\pm 0,503$
$W_{T_{\check{c}}}$	°C	$\pm 0,756$
Zaman ölçümündeki toplam hata		
W_{ts}	dakika	$\pm 0,1$
Diğer hatalar		
$W_{\rho}=W_{c_p}=\dots$	%	$\pm 0,1-0,2$

4.5 Net Bugünkü Değer (NBD) Analiz Sonuçları

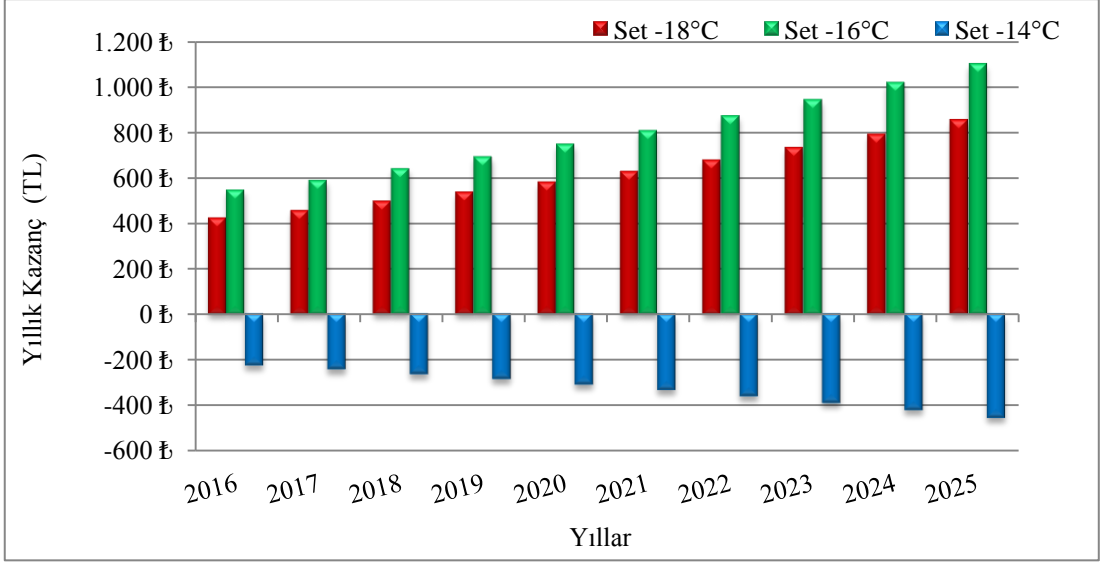
FDM'li makrokapsüllerin 2016 yılı itibariyle birim fiyatı 9,89 TL olup 310 adet maliyeti 3.065,90 TL'dir. FDM'siz ve FDM'li depoda son 6 saatlik veriler referans alınarak saatlik tüketilen enerji değerleri (off periyodları dahil) şekil 4.48'de sunulmuştur. Deneyle elektrk enerjisi tüketiminde FDM'li durumun FDM'siz duruma göre -18°C, -16°C için sırasıyla %19,44, %28,13 daha avantajlı olduğu görülmüştür (Şekil 4.49). Set -14°C'de ise senaryo 2 için sisteme %17,39'lık bir dezavantaj getirmiştir (Şekil 4.49). NBD yöntemi kullanılarak ilk yatırım maliyetinin geri ödeme sürelerine bakıldığında set -18°C için 5 yıl 10 ayda, set -16°C için ise 4 yıl 9 ayda karşılanmaktadır (Şekil 4.50). Bu veriler ışığında set -16°C'daki enerji tasarrufu set -18°C'den daha fazla olmuştur.



Şekil 4.48: Senaryo 2'de üç farklı set sıcaklığı için saatlik enerji ihtiyaçları.

Sıcaklık	Enerji (kWh)		
	FDM'siz	FDM'li	Fark (%)
-18°C	0,71	0,56	19,44%
-16°C	0,63	0,44	28,13%
-14°C	0,44	0,52	-17,39%

Şekil 4.49: Senaryo 2'de üç farklı set sıcaklığı için saatlik enerji ihtiyacı.



Şekil 4.50: FDM'li kabinin FDM'siz kabine göre senaryo 2'de sağlanan enerji tasarrufunun yıllara göre dağılımı.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada bir endüstriyel soğuk hava deposu, yüksüz halde ve depo yüzeylerine entegre edilmiş içinde FDM bulunan makro kapsüllerle yüklü halde üç farklı set sıcaklık değeri için üç farklı senaryo incelenmiştir. Bu üç farklı donmuş muhafaza sıcaklık değerleri; $-18^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$, $-16^{\circ}\text{C}/-13^{\circ}\text{C}$ ve $-14^{\circ}\text{C}/-11^{\circ}\text{C}$ 'dir. İlk senaryo FDM'siz ve FDM'li depoların set değerine geliş süreleri kontrol edilip ikinci senaryoda da kompresör on/off periyodları 36 saat boyunca izlenmiştir. Üçüncü senaryoda ise mekanik soğutma grubu kapatılarak yüksüz ve yüklü depoların ısınma süreçleri referans sıcaklık $+4^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kayıt altına alınmıştır. Deneylerde FDM, depo cidar, evaporatör ve dış ortam sıcaklıkları, depo içi hava hızı ve bağıl nem değerleri 10 saniye aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Deneyler dış ortam sıcaklığı $+24^{\circ}\text{C}/+26^{\circ}\text{C}$ olup laboratuvar şartları altında yapılmıştır.

1. Senaryo 1'de FDM'li FDM'size göre depo içi sıcaklık set değerlerine;

- a.** -18°C için ~6,61 kat,
- b.** -16°C için ~6,85 kat,
- c.** -14°C için ~6,43 kat

daha fazla sürede inilmiştir. Bu durum FDM'nin gizli ısı enerjisini salmasından dolayı set değerine iniş süresini arttırmıştır.

2. Senaryo 2'de FDM'siz ve FDM'li durumlarda kompresör on/off süreleri 36 saatlik periyotlar için sırasıyla karşılaştırılmıştır.

- a.** Set -18°C için on süreleri sırasıyla 16,39 ve 14,29 saat olup FDM'li depoda kompresör %12,86 oranında daha az çalışmıştır.
- b.** Set -18°C için off süreleri sırasıyla 19,63 ve 21,71 saat olup FDM'li depoda kompresör %10,59 oranında daha fazla durmuştur.
- c.** Set -16°C için on süreleri sırasıyla 14,42 ve 12,45 saat olup FDM'li depoda kompresör %13,67 oranında daha az çalışmıştır.

- d.** Set -16 °C için off süreleri sırasıyla 21,41 ve 23,51 saat olup FDM'li depoda kompresör %9,82 oranında daha fazla durmuştur.
- e.** Set -14 °C için on süreleri sırasıyla 11,01 ve 12,87 saat olup FDM'li depoda kompresör %13,67 oranında daha fazla çalışmıştır.
- f.** Set -14 °C için off süreleri sırasıyla 25,04 ve 23,21 saat olup FDM'li depoda kompresör %13,97 oranında daha az durmuştur.

3. Senaryo 2 için on/off süreleri FDM'nin sıcaklığının stabil kaldığı son 12 saatin son 6 saati dikkate alınarak veriler FDM'siz ve FDM'li olarak sırasıyla karşılaştırılmıştır.

- a.** Set -18 °C için on süreleri sırasıyla 2,75 ve 2,18 saat olup FDM'li depoda kompresör %20,73 oranında daha az çalışmıştır.
- b.** Set -18 °C için off süreleri sırasıyla 3,35 ve 3,92 saat olup FDM'li depoda kompresör %16,98 oranında daha fazla durmuştur.
- c.** Set -16 °C için on süreleri sırasıyla 2,43 ve 1,70 saat olup FDM'li depoda kompresör %30,09 oranında daha az çalışmıştır.
- d.** Set -16 °C için off süreleri sırasıyla 3,52 ve 4,28 saat olup FDM'li depoda kompresör %21,64 oranında daha fazla durmuştur.
- e.** Set -14 °C için on süreleri sırasıyla 1,68 ve 2,01 saat olup FDM'li depoda kompresör %19,83 oranında daha fazla çalışmıştır.
- f.** Set -14 °C için off süreleri sırasıyla 4,29 ve 4,13 saat olup FDM'li depoda kompresör %3,69 oranında daha az durmuştur.

4. Senaryo 2 için FDM sıcaklığının stabil kaldığı son 12 saatin son 6 saati dikkate alınarak harcanan enerji verileri FDM'siz ve FDM'li olarak sırasıyla karşılaştırılmıştır.

- a.** Set -18 °C için FDM'li depoda kompresör %19,44 oranda daha az enerji harcanmıştır.
- b.** Set -16 °C için FDM'li depoda kompresör %28,13 oranda daha az enerji harcanmıştır.
- c.** Set -14 °C için FDM'li depoda kompresör %17,39 oranda daha fazla enerji harcanmıştır.

5. Bir endüstriyel soğuk hava deposunun FDM'siz ve FDM'li şartlar altında çalıştığına yıllık bazda 2016 yılında harcanacak elektrik maliyetleri;

a. Set $-18^{\circ}\text{C}/-15^{\circ}\text{C}$ için yılda 2.151,45 TL'den 1.744,42TL' ye düşecek olup %18,92 oranında tasarruf sağlanacaktır.

b. Set $-16^{\circ}\text{C}/-13^{\circ}\text{C}$ için yılda 1.918,86 TL'den 1.395,53 TL' ye düşecek olup %27,27 oranında maddi tasarruf sağlanacaktır.

c. Set $-14^{\circ}\text{C}/-11^{\circ}\text{C}$ için yılda 1.688,00 TL'den 1.947,46 TL' ye çıkacak olup %17,09 oranında zararı olacaktır.

Bu veriler 2017 ve 2018 yılları da baz alınarak 2019 ve sonrası dail olmak üzere 10 yıllık hesaplanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki FDM'li durumda 10 yıl kullanıldığı takdirde -18°C , -16°C sırasıyla yapılacak tasarruf bedelleri; 6.196,27 TL, 7.956,57 TL'dir. Deneylede kullanılan kabin 4730 litre olup bu sistemin endüstriyel çapta kullanılması halinde çok ciddi ülke ekonomisine katkı sağlanacaktır.

6. FDM'nin sisteme getirdiği ek soğutma yükünden ötürü senaryo 1'lerde enerji sarfiyatı artmaktadır. Bu olumsuz şart set -18°C ve -16°C değerlerinde çalışan depolarda sağlanacak enerji tasarrufu sayesinde birkaç gün içinde tolere edilmektedir. Böylelikle sistemde oluşan negatif etki başa baş noktalarından sonra pozitif yönde seyretmektedir.

7. Deneylede kullanılan FDM inorganik bir bileşen olup verimli kullanılan erime/donma çevrim sayısı 1000 adettir (Aydın,2010). Endüstriyel işletmelerde soğuk hava depoları ilk çalıştırıldıktan sonra yılda bakım ve/veya arıza olması durumunda ortalama 5 kez kapatılmaktadır. Dolayısıyla FDM yılda en fazla 5 kez termal çevrimi tamamlayacaktır. Böylelikle FDM'li makro kapsüllerin etkin kullanım ömrünün çok uzun yıllar alacağı söylenebilmektedir.

8. Deneysel veriler, FDM'nin 36 saatlik kompresör on/off periyodları dikkate alındığında bile set -18° ve set -16° için FDM'li kabinin yüksüz duruma göre daha verimli olduğu anlaşılmıştır.

a. Set -18°C için FDM'li depo FDM'siz depoya göre kompresör %12,86 daha az çalışmıştır.

b. Set -16°C için FDM'li depo FDM'siz depoya göre kompresör %13,67 daha az çalışmıştır.

c. Set -14°C için FDM'li depo FDM'siz depoya göre kompresör %13,97 daha fazla çalışmıştır.

9. Soğuk hava deposunda kullanılan 308 kg'lık FDM'li makro kapsüller 2016 tarihi itibarıyla birim maliyeti 9,89 TL olup toplam maliyeti 3.065,90 TL'dir. Bu şartlar altında ilk yatırım maliyeti -18°C için 5 yıl 10 ayda, -16°C için 4 yıl 9 ayda yılda karşılanabilmektedir. Bu deneyler için katlanılan ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasının birkaç nedeni bulunmaktadır. Bunlar; kullanılan makro kapsüller plastik sanayiine özel yaptırılmamış dolayısıyla depo iç yüzeylerinde maksimum alanın kullanılabilmesi adına küçük ebatlar tercih edilmiştir. Şayet makrokapsül ebatları, soğuk hava deposunun iç yüzeyleri için özel olarak yaptırılsa hammadde ve işçilik miktarı düşecektir. İlk yatırım maliyetini arttırıcı diğer bir etken ise TED sistemleri endüstriyel ölçekte son 10 yılda etkin kullanılmaktadır. Dolayısıyla işletmelerin FDM kullanımındaki talep artışı kimya sektöründeki arzı tetikleyerek ilk yatırım maliyetlerini düşürecektir.

10. Endüstriyel soğuk hava depoları birkaç farklı amaçla kurulabilmektedir. Bunlar kendi ürünlerini muhafaza etme amaçlı veya hammaddeyi bir bedel karşılığı emaneten soğuk zincir şartlarında muhafaza etme amaçlı kurulan işletmelerdir. Bu işletmelerde, mekanik veya elektrik kesintilerinden dolayı depolanan ürünlerde soğuk zincir kırılmakta ve işletmeler çok ciddi ekonomik kayıplar yaşamaktadır. Bu çalışmada senaryo 3'ün sonuçları göstermiştir ki, yaşanabilecek bu sorunlarda set -18°C ve -16°C ' de çalışan depolarda referans sıcaklığına sırasıyla 51,73 saat ve 43,59 saat farkla daha uzun ulaşılmaktadır. Diğer bir deyişle set sıcaklığı -18°C ve -16°C 'deki FDM'li deponun FDM'siz depoya göre ~11 kat daha fazla zaman işletmeye kazandırmaktadır. Bu durum soğuk hava depolarına entegre edilen TED sistemlerinin diğer bir artısının soğuk zincirin korunmasına ciddi bir katkı sağladığını da ortaya koymaktadır.

11. Sektörde kullanılan frigorifik taşımacılıktaki uygulamalar genellikle mekanik soğutma sistemiyle yapılmaktadır. TED sistemleri, frigorifik kasalara entegre

edilerek kullanılmaktadır. Soğuk muhafaza şartlarında taşımacılık yapan firmalar ürünlerin sevkini yaparken birkaç farklı amaç gözetmektedir. Bunlardan birincisi, ürünleri soğuk zincir kırılmadan teslim etmektir. İkinci amacı ise söz konusu ürünü, sevkiyat sırasında geçen süre dikkate alınarak donmuş muhafaza sıcaklığından ($<0^{\circ}\text{C}$) soğuk muhafaza sıcaklığına ($>0^{\circ}\text{C}$) indirerek ürünleri teslim etmektir. Bu çalışmada incelenen senaryo 3 bu iki amaç dikkate alınarak veriler değerlendirilmiştir. Senaryo 3, 2012 yılında yürürlüğe giren “Bozulabilir Gıda Maddelerinin Uluslararası Taşımacılığı ve Bu Taşımacılık Faaliyetinde Kullanılacak Özel Ekipmana İlişkin Anlaşma (ATTP)” ve TS 4855 “Soğuk Depoculukta Soğutma Tesisatı Proje Esasları” mevzuatlarındaki esaslar dikkate alınarak referans sıcaklığı $+4^{\circ}\text{C}$ alınmış ve FDM'li depoların ısınma periyodları izlenmiştir.

12. FDM'ler genellikle inorganik veya organik karışımlar kullanılmasına rağmen donmuş muhafaza sıcaklıklarında çalışan karışım çeşitliliği az miktardadır. Deneylerde kullanılan FDM, geniş bir çalışma sıcaklık aralığında olup donmuş muhafaza şartlarında da çalışıyor olması da bu çalışmanın diğer bir artısını oluşturmaktadır.

13. Sayısal analiz için yapılan modelleme ve algoritmaların doğruluğunun tespiti için laboratuvar şartlarında ($T_{\text{dış}}=25^{\circ}\text{C}$) yalıtım malzemesiz FDM'li makro kapsülle bir erime deneyi yapılmış ve veriler 10 sn aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Kapsül yüzeyine doğal konveksiyonla ısı taşınımı sağlanmış ve deneysel ve sayısal analiz verileri karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada FDM'nde $-14,7^{\circ}\text{C}$ 'den $+2,1^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına kadar erimenin tamamlandığı gözlemlenmiştir. Sayısal analizde ise akışkan $+2,7^{\circ}\text{C}$ 'de %100 erime tamamlanmıştır. Her iki veri sonucunda ise birer derece farkla süreler incelenmiş olup bu derceler arasında geçen sürelerde %5,52 ile sayısal analiz önde ilerlemiştir. Toplam erime sürelerinde ise deneysel ve sayısal sonuçlar sırasıyla 3500s ve 3630 s olup %3,71'lik sapmayla sonuçların uyduğu görülmüştür.

14. Yalıtımsız FDM için yapılan analizin doğruluğu neticesinde makro kapsülün poliüretan köpükle yalıtılmış halinin nümerik analizi yapılmış ve deneysel verilerle (senaryo 3) aynı sınır şartları için karşılaştırılmıştır. Problemler, iki farklı FDM

başlangıç sıcaklığı için çözülmüştür. Bu sıcaklıklar $-12,8^{\circ}\text{C}/-14,7^{\circ}\text{C}$ olarak seçilmiş ve sıcaklık/erime dağılımları zaman bağı olarak incelenmiştir. Söz konusu yalıtımlı FDM'nin nümerik sonuçları deneysel verilerle farklılık göstermiştir. Bunun nedeni FDM'nin poliüretan malzemeyle temas etmeyen yüzeylerinin adyabatik tanımlanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca poliüretan köpüğün üst, alt ve FDM ile temas etmeyen yüzeyi sabit 25°C ve sabit ısı taşınım katsayısı $7 \text{ W/m}^2\text{K}$ olan havaya maruz bırakılmıştır.

15. Bu çalışmada yalıtımsız FDM'nin sayısal deneyi için *Bi*, *Gr*, *Pr*, *Fo*, *Ste* ve *FoSte* sayıları için boyut analizi de yapılmıştır. *Bi* değeri 0,34 bulunmuş olup doğal taşınımına karşı cismin ısı direncinin fazla olduğu anlaşılmıştır. Bunun yanında faz değişimi esnasında akışkan hızının çok düşük olduğu dolayısıyla doğal taşınım için *Gr*'un bu süreçte önemli bir katkısı yoktur. Yüksek *Pr* değerinin bulunması da sınır tabakada ısının cisme yavaş nüfus ettiğini göstermektedir. *Fo* değeri değişim sıcaklık aralığında 0,28'in altında olup ısı, cismin içinde yavaş ilerlemektedir. *Ste* değeri, 0,49'in altında kalıp faz değişim sürecinde cismin hissedilir ısı, gizli ısı yayma esnasında çok az etkilenmektedir. *FoSte* değeri de faz değişim sıcaklık aralığında 0,11'in altında kalarak akışkanın kütle miktarının gizli ısı yayma hızının düşük olduğu anlaşılmaktadır.

16. Deneylerde kullanılan HDPE cidar kalınlığı 1 mm olup makro kapsül genişliği 30 mm'dir. *FoSte* ve erime oranı dağılımlarıyla ilişkisi incelendiğinde akışkanın kütle miktarı ve genişliği azaldıkça gizli ısısının yayma hızının arttığı grafiklerle belirtilmiştir. Bu durum makrokapsül genişliğinin 30mm yerine 20mm seçilmesinin deney sonuçlarında ciddi bir fark oluşturmayacağını dolayısıyla soğuk muhafaza uygulamaları için maliyetin daha da düşürülebileceği anlaşılmaktadır.

17. FDM'lerin soğutma endüstrisinde kullanımı literatürde belirtildiği üzere genellikle mekanik soğutma grubu olmadan çalışan sistemlere entegre edilip tüketiciler ve lojistik uygulamalara (ilaç, buz, gıda saklama taşıma vb.) dönük yapılmıştır. Yapılan bu çalışmayla endüstriyel bir soğuk hava deposunda termal enerji depolama için kullanılan FDM'nin geniş bir faz değişim sıcaklık aralığına sahip olmasının yanında dış ortam sıcaklığına bağı olarak depo set ve diferansiyel

sıcaklıklarının doğru seçilmesi gerekmektedir. Bu durumda FDM'nin katı faz bölgesine yakın sıcaklıklarda çalışılması gerekliliği ortaya konulmuştur.

6. KAYNAKLAR

Ansys Fluent 15.0 (2015), *Theory Guide*, Vol.8, pp.601-608.

Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials, *Solar Energy*, 30, 313-332.

Akpınar, E.K., "Deneysel Çalışmalardaki Hata Analizine Bir Örnek: Kurutma Deneylemlerindeki Hata Analizi", *Mühendis ve Makine*, Cilt: 46 Sayı: 540, (2005).

Amin, N. A. M., Belusko, M., Bruno, F. (2009). Optimisation of a phase change thermal storage system. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 56.

Anisur, M.R., Kibria, M.A., Mahfuz, M.H., Saidur, R. and Metselaar, I.H.S.C. (2013). Analysis of a thermal energy storage system for air cooling–heating application through cylindrical tube. *Journal of Energy Conversion and Management* 76 , 732–737.

Asker M. ve Çoban, T. (2013). Küresel kapsülde depolanmış FDM'sinin kapalı entalpi yöntemi ile analizi ve modellenmesi. ULIBTK'13 19. *Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Samsun, 406-410.

Assis, E., Ktasman, L., Ziskind, G., Letan, R. (2007). Numerical and experimental study of melting in a spherical shell. *International Journal of Heat Transfer*, Vol.50, 1790-1804.

Assis, E., Ziskind, G., Letan, R. (2009). Numerical and Experimental Study of Solidification in a Spherical Shell. *Journal of Heat Transfer*, 131.

Aydın, A.A. (2010). The synthesis and thermal properties of novel organic phase change materials. Phd.Thesis, *Istanbul Technical University Institute Of Science And Technology, Department of Chemical Engineering*, İstanbul.

Aydın, A.A. (2010). *FDM'ler ve ısı enerjisi depolanması*. İstanbul Sanayi Odası ve İstanbul Teknik Üniversitesi Doktora Tezi Sanayi Desteği Projesi.

Azeem, A., Shine, K.(2013). Transient thermal analysis of phase change material based heat sinks. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, eISSN: 2319-1163 | pISSN: 2321-7308.

Azzouz, K., Leducq, D., & Gobin, D. (2009). Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: an experimental investigation. *International Journal of Refrigeration*, 32(7), 1634-1644.

Behunek, I., Bachorec, T. and Fiala P. (2007). Properties and numerical simulation of $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ phase change. *Progress In Electromagnetics Research Symposium*, Beijing, China.

Bilir, I. and İlken, Z. (2005). Total solidification time of a liquid phase change material enclosed in cylindrical/spherical containers. *Applied Thermal Engineering*, 25, 1488–1502.

Brent, A. D., Voller, V. R. and Reid, K. J. (1987). Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal. *Numerical Heat Transfer*, volume 13, Issue 3, 297-318.

Cabeza L. and Mehling H. (2007). Temperature Control with Phase Change Materials, Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption and Fundamentals, Case Studies and Design, Editor, NATO Science Series, II. Mathematics, *Physics and Chemistry*, Vol 234, 251 – 257.

Cao, Y. and Faghri A.A. (1990). Numerical analysis of phase change problems including natural convection. *Journal of Heat Transfer*, 112, 812-816.

Cao Y. and Faghri A.A. (1991). A PCM/Forced convection conjugate transient analysis of energy storage systems with annular and counter current flows. *Journal of Heat Transfer*, 113, 37-42.

Cheng, W. L., Mei, B. J., Liu, Y. N., Huang, Y. H., & Yuan, X. D. (2011). A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. *Energy*, 36(10), 5797-5804.

Cheralathan M., Velraj R. and Renganarayanan S. (2006). Heat transfer and parametric studies of an encapsulated phase change material based cool thermal energy storage system. *Journal of Zhejiang University Science, A*, ISSN 1886-1895.

Choi, C., J., Kim, S.D. and Han, G.Y. (1995). Heat transfer characteristics in low-temperature latent heat storage systems using salt-hydrates at heat recovery stage. *Koan Journal of Chem. Eng.*, 12(2), 258-263.

Costa, M., Buddhi D. and Oliva, A. (1996). Laboratori de Termotecnia I Energetica, Department de Maquines i Motors Termics, *ETSEIT*, E-08222, Terrassa, Barcelona, Spain.

Çengel Y.A. (2011). Isı ve Kütle Transferi, ISBN:978-975-6240-41-0, 219-237.

Dincer, I., and Rosen, M. A., (2002). Thermal Energy Storage, Systems and Applications. *John Wiley and Sons*, Chichester, UK.

Dolado, P. Lázaro, A. Zalba, B. Marín J.M. (2010). Numerical simulation of the thermal behaviour of an energy storage unit with phase change materials for air conditioning applications between 17°C and 40°C. *Thermal Engineering Division Department of Mechanical Engineering University of Zaragoza Ed. Agustín de Betancourt, c/María de Luna s/n 50018 Zaragoza, Spain.*

Dubovsky, V., Assis, E., Kochavi, E., Ziskind, G., ve Letan, R. (2008). Study of solidification in vertical cylindrical shells. *Proceedings of the Fifth European Thermal Sciences Conference, Eindhoven, The Netherlands.*

Dutil, Y., Rousse, D. R. , Salah, N. B., Lassue, S. and Zalewski, L. (2011). A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (1), 112-130.

Erek, A. ve Acar, M. A. (2003). Radyal kanatlı boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5, 61-71.

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

Farrell, A.J., Norton, B. and Kennedy, D.M. (2006). Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper. *Journal of Materials Processing Technology*, 175, 198-205.

Feldman D., Shapiro M. M. ,Banu D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials*, 13, 1-10.

Fertelli, A., Buyruk, E. ve Günhan, G. (2013). Bir soğuk depolama tankı içerisindeki silindir pozisyonlarının buz oluşumuna etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *11.Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 169-176.

Fortunato, B., Camporeale, S.M., Torresi, M. and Albano, M. (2012). Simple mathematical model of a thermal storage with FDM. *AASRI Procedia*, 2, 241-248.

Furzeland, R. M. (1980). A comparative study of numerical methods for moving boundary problems. *J. Inst. Math. Applic.* 26, 411-429.

Gholap A.K. and Khan J.A. (2007). Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators. *Applied Energy*,1226-1239.

Gin, B., Farid, M.M., Bansal, P.K. (2010). Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698e2706. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.005>.

Gowreesunker, B. L. and Tassou, S. A. (2013). Effectiveness of CFD simulation for the performance prediction of phase change building boards in the thermal environment control of indoor spaces. *Building and Environment*, 59, 612–625.

Gu, Z., Liu, H., Li, Y. (2004). Thermal energy recovery heat recovery system calculation and phase change material development. *Applied Thermal Engineering*, 24, 2511–2426.

Hasnain, S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: cool thermal storage . *Energy Conversations Management* , 39(11), 1139-1153.

Hawes, D.W. (1991). Latent heat storage in concrete. Phd.Thesis, *Concordia University*, Montreal, Quebec, Canada.

He, B. (2004). High-capacity cool thermal energy storage for peak shaving a solution for energy challenges in the 21st century. PhD Thesis, *Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes KTH*, Stockholm, Sweden.

Hesaraki, A. (2011). CFD modeling of heat charging process in a direct-contact container for mobilized thermal energy storage. *phD Malardalen University Sweden*.

Holman, J.P. (1971), *Experimental Methods for Engineers*. New York : McGraw-Hill.

Hwang, C.L. and Shih, Y.P. (1975). *International Journal of Heat Mass Transfer* 18, 689-695.

IEA (International Energy Agency) (2013). World Energy Outlook, www.iea.org/publication/freepublications/publication/WEO2013.pdf

Ilken, Z., Günerhan, H. (1996). An investigation about the relations between the results of heat conduction problems with and without phase change, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, 23(6), 899-905.

Ismail, K.A.R. and Henriquez, J. R. (2000). Solidification of PCM inside a spherical capsule. *Energy Conversion and Management*, 41, 173–187.

Ismail, K.A.R., Henríquez, J.R. and Silva, T.M. (2003). A parametric study on ice formation inside a spherical capsule. *International Journal of Thermal Sciences*, 881–887.

Justin Ning-Wei Chiu, Martin, V. and Setterwall, F. (2010). A review of thermal energy storage systems with salt hydrate phase change materials for comfort cooling. *KTH Department of Energy Technology*, Brinellvägen 68, SE-100 44, Sweden.

Kenisarin, M., Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (9), 1913-1965.

Kılıç, A., ÖZTÜRK, A. (1983). *Güneş Enerjisi*. Çağaloğlu-İstanbul-Türkiye, Kipaş.

Kılıçaslan, L. ve Koyun, T. (2013). İklimlendirme uygulamaları için soğuk depolama malzemelerinin araştırılması. *11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 763-777.

Klimes, L., Charvat, P. and Ostry, M. (2012). Challenges in the computer modeling of phase change materials. *Materials and Technology*, ISSN 1580-2949, 46:4, 335-338.

Konuklu, Y. (2008). Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştirilen Maddelerde Termal Enerji Depolama İle Binalarda Enerji Tasarrufu, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.

Konuklu, Y. ve Paksoy, H.Ö. (2011). Faz Değiştiren Maddeler ile Binalarda Enerji Verimliliği. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Nisan 2011, İzmir, 919-929.

Kuznik, F., Virgone, J., Noel, J. (2008). Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering* .29, 1291-1298.

Kuznik, F., Virgone, J. and Johannes, K. (2011). Insitute study of thermal comfort enhancement in a renovated building equipped with phase change material wallboard,” *Renewable Energy*, 36, 5, 1458–1462.

Lane G. A., (1983). *Solar energy latent heat material*. Volume I, CRC Pres Inc.

Li, G., Hwang, Y. and Radermacher, R. (2012). Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of Refrigeration*, 35, 2053-2077.

Marques, C, Davies, G, Maidment, G, et al. (2010). Application of phase change materials to domestic refrigerators. *In: Proceedings of IIR 9th International Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*, Sofia, Bulgaria.

Marques, A.C., Davies, G.F., Maidment, G.G., Evans, J.A., Wood, I.D. (2014). Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage. *Apply Thermal Engineering*, 63, 511e519. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.043>

Mazman M. (2006). Gizli ısı depolaması ve uygulamaları. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Mehling, H. and Cabeza L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Springer, Berlin, Germany.

Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles: an overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536–1550.

Mondieig, D., Rajabalee, F., Laprie, A., Onk, H.A.J., Calvet T. and Cuevas Diarte M.A. (2003). *Transfusion and Apheresis Science*, 28, 143- 148.

Okcu, M., Varol, Y. ve Fırat M. (2014). Kanatçık sayısının faz değıştiren maddelerin katılma süreci üzerine etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Termodinamik*, 266.

Omari, K. E., Kousksou, T., Guer, Y. L. (2011). Impact of shape of container on natural convection and melting inside enclosures used for passive cooling of electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 31, 3022-3035.

Oro E., De Gracia A., Castell A., Farid M.M., Cabeza L.F. (2012). Review on Phase Change Materials (PCMs) for Cold Thermal Energy Storage Applications, *Applied Energy*, 99, 513–533.

Ozışık, M.N. (1978). *Journal of Heat Transfer*, OOC, 370-371.

Ozışık, M.N. (1993). Heat Conduction. A Wiley Interscience Publication John Wiley and Sons Inc., ISBN 0-471-53256-8, 392-435.

Özonur, Y. (2004). Düşük sıcaklıkta termal enerji depolamasına uygun faz değıştiren maddelerin mikrokapsüllenmesi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi, , Adana.

Öztürk H. (1997). Sera ısıtma için güneş enerjisinin faz değıştiren maddelerde depolanması üzerine bir araştırma. Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü, Adana.

Patil, N.D., Raison, G. H. and Karale, S.R. (2012). Design and analysis of PCMs based thermal energy storage for active building cooling a review. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, ISSN, 4(6).

Pedroso, R.I. and Domoto, G.A. (1973). Perturbation solutions for spherical solidification of saturated liquids. *Journal of Heat Transfer*, 95, 42-46.

Prud'homme, M., Nguyen, T. H. and Nguyen, D.L. (1989). A heat transfer analysis for solidification of slabs, cylinders and spheres. *Journal of Heat Transfer*, 111, 699–705.

Ravikumar, M. and Srinivasan, P.S. (2005). Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 503-512.

Regin, F., Solanki, S.C. and Saini, J.S. (2009). An analysis of a packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation. *Renewable Energy*, 34, 1765–1773.

Riley, D. S., Smith, F. T., and Poots, G. (1974). The inward solidification of spheres and circular cylinders. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 17, 1507–1516.

Ryu, H.W., Hong, S.A., Shin, B.C. and Kim, S.D. (1991). Heat transfer characteristics of cool-thermal storage systems. *Energy*, 16(4),727-737, Great Britain.

Sahin, A.D., Dincer, I and Rosen M.A. thermodynamic analysis of wind energy. *International Journal of Energy Research*, 30, 8, 553-566 (2006).

Sarı A. (2000). Bazı yağ asitleri ve ötektik karışımlarının enerji depolayıcı madde olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. Doktora Tezi, *Gaziosman Paşa Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü*, Tokat.

Sarı, A. (2003). Thermal reliability test of some fatty acids as PCMs used for solar thermal latent heat storage applications. *Energy Conversion and Management*, 44, 2277-2287.

Sarı, A., Karaipekli, A. (2007). Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material. *Applied Thermal Engineering*, 27, 8-9, 2007, 1271-1277.

Shamsundar, N. and Sparrow, E.M. (1975). Effects of density change on multidimensional conduction phase change. *ASME Journal of Heat Transfer*, 98, 550-557.

Shamsundar and Roosz, E. (1988). *Numerical methods for moving boundary problem*. Handbook of Numerical Heat Transfer, New York: Wiley.

Shah, N. G. A.(1979). New method of computation of radiant heat transfer in combustion chambers. *PhD thesis. Imperial College of Science and Technology, London, England.*

Sharif, N., Bergman T.L. and Faghri, A. (2011). Enhancement of PCM melting in enclosures with horizontally-finned internal surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4182-4192.

Sharif, M.K.A., Sopian, M., Rosli, M.A.M., Sopian, K., Sulaiman, A. M.Y., Al-abidi, A. (2014). Numerical study of pcm melting in evacuated solar collector storage system. *Computer Applications in Environmental Sciences and Renewable Energy*, ISBN: 978-960-474-370-4.

Sharma, A., Singh, S.B., Panjwani, U., Ya- dav, D.K., Amitabh, K., Singh, S. & Selvamurthy, W. (2002). Effect of car- bohydrate supplement on feeding behaviour an exercise in rats expo- sed to hypobaric hypoxia. *Appetite*, 39, 127-135.

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

Shatikian, V., Dubovsky, V., Ziskind G. and Letan, R. (2003). Simulation of PCM melting and solidification in a partitioned storage unit. *ASME 2003 Heat Transfer Summer Conference Heat Transfer*. Las Vegas, Nevada, USA, July 21–23.

Shilei, L., Guohui, F., Neng, Z., Li, D. (2007). Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards. *Energy and Buildings* 39(2007): pp 1088 -1091.

Shur, M., Spalart, P. R., Strelets, M. and Travin, A. (1999). Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack. *In 4th Int. Symposium on Eng.Turb. Modeling and Experiments*, Corsica, France.

Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.K. And Travin, A.K. (2008). A hybrid rans-les approach with delayed- des and wall-modelled les capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29:6, 1638-1649.

Slattery, J.C and Mhetar V.R., (1997). Unsteady-state evaporation and the measurement of a binary diffusion coefficient, *Chemical Engineering Science*, 52(9), 1511-1515.

Sönmez, N., Fertelli, A., Buyruk, E. (2009). Numerical investigation for solidification around various cylinder geometries. *Journal of Science & Industrial Research*, 68, 122-129.

Tao, L.C. (1967), Generalized numerical solutions of freezing a saturated liquid in cylinders and spheres. *AIChE Journal*, Volume 13, Issue 1, 165–169.

TBMM, Bozulabilir gıda maddelerinin uluslararası taşımacılığı ve bu taşımacılık faaliyetinde kullanılacak özel ekipmana ilişkin anlaşma (ATP) mevzuatı 10 Mayıs 2012 tarihli Resmi Gazete. Ankara.

Trelles, J.P., Duffy, J.P. (2003). Numerical simulation of porous latent heat thermal energy storage for thermoelectric cooling. *Applied Thermal Engineering*, 23, 1647–1664.

Tyagi, V. V., Buddhi, D. (2007). PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art. *Renewable and Sustainable Energy Review. Energy*, 11, 1146 - 1166.

Tyagi, V.V., Kaushik, S.C., Pandey, A.K. and Tyagi, S.K. (2011). Experimental study of supercooling and pH behaviour of a typical phase change material for thermal energy storage. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 49, 117-125.

Uzun M., Ezan M.A. ve Erek A. (2013). Bir boyutlu faz değişimi probleminin sayısal incelenmesi. *ULIBTK'13 19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Samsun, 637-642.

Ventola L., Cuevas Diarte M.A., Calvet T., Angulo I., Vivanco M., Bernar M. et al. (2005). Molecular alloys as phase change materials for energy storage and thermal protection at temperatures from 70°C to 85°C. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1668-1674.

Viskanta, R. and Gau, C. (1982). Inward solidification of superheat liquid in a cooled horizontal tube, *Waerme-Stoffuebertrag Thermo and Fluid Dynamics*, 17(1), 39-46.

Voller, V.R. and Prakash, C. (1987). "A Fixed-Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems". *International Journal Heat Mass Transfer*, 30. 1709–1720.

Voller, V.R. and Swaminathan, C. R. (1991). Generalized source-based method for solidification phase change. *Numerical Heat Transfer*, 19(2), 175–189.

Wang F., Maidment G., Missenden J. and Tozer R. (2007). The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 1: *Experimental investigation. Applied Thermal Engineering*, 1-9.

www.financeformulas.net/Net_Present_Value.html (2018).

Yilmaz, S. ve Paksoy, H.O. (2012). Subcooling in phase change materials used for cooling. In: *Proceedingd of Innostock. 13th International Conference on Eney Storage*, Lleida, Spain.

Yılmaz , S., Altunbas, S., E., Kardas, G. ve Paksoy, H.O. (2013). A new approach for testingcorrosion behaviour of various metals in contact with phase change materials. *Proceedings of 2nd International Conference on Sustainable Energy Storage*, Dublin, Ireland.

Zalba, B, Marin J. M. Cabeza L. F. and Mehling H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283.

Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2004). Freecooling of building with phase change materials. *International Journal of Refrigeration*, 27 (2004) 839.

Bu tez çalışması kapsamında yayınlanan uluslararası yayınlar:

- 1.** Experimental analysis of a cold store integrated with phase change material: a case study. Bulgarian Chemical Communications, Volume 48, Special Issue E (pp. 195 - 198) 2016.
- 2.** Analysis of a cold store with phase change material, Institute for Sustainable Energy, University Of Malta Sustainable Energy, The ISE Annual Conference, University of Malta, Malta ISBN 978-99957-853-1-4a, 2016.
- 3.** Analysis of a cold store integrated with phase change material: experimental and numerical evaluations, 9 th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection, Erciyes University, September 2016.