

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN
ISIL ENERJİ DEPOLAMA AMACIYLA
YAPI ELEMANLARINDA KULLANILMASI

Ayça TOKUÇ

Ocak, 2013
İZMİR

**FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN
ISIL ENERJİ DEPOLAMA AMACIYLA
YAPI ELEMANI ÜRETİMİNDE KULLANILMASI**

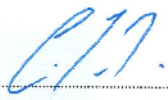
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı**

Ayça TOKUÇ

**Ocak, 2013
İZMİR**

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

AYÇA TOKUÇ tarafından DOÇ. DR. S. CENGİZ YESÜGEY yönetiminde hazırlanan “FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN ISIL ENERJİ DEPOLAMA AMACIYLA YAPI ELEMANLARINDA KULLANILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.


Doç. Dr. S. Cengiz YESÜGEY

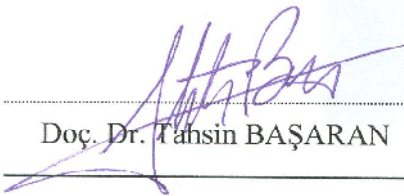
Yönetici

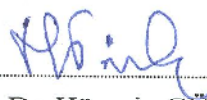

Doç. Dr. Halit YAZICI


Yrd. Doç. Dr. Abdullah SÖNMEZ

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Tez İzleme Komitesi Üyesi


Doç. Dr. Tansin BAŞARAN


Doç. Dr. Hüseyin GÜNERHAN

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi


Doç. Dr. Aytunç EREK


Yrd. Doç. Dr. Müjde ALTIN

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Gerek bu çalışmayı hazırlamam sırasında bana zaman ayırıp yardım elini uzatan insanlara gerekse eğitim hayatımda emeği geçmiş ve yaptıkları çalışmalarla yol göstericim olmuş tüm akademisyen ve araştırmacılara teşekkür etmek istiyorum.

Değerli fikir, destek ve katkıları için danışmanlarım Sn. Doç. Dr. Cengiz Yesügey, Doç. Dr. Tahsin Başaran, ve Prof. Dr. H. Çetin Türkçü'ye, tez izleme komitem, Sn. Doç. Dr. Halit Yazıcı ve Yrd. Doç. Dr. Abdullah Sönmez'e ve tez jüri üyelerim Sn. Doç. Dr. Aytunç Erek ve Doç. Dr. Hüseyin Günerhan'a,

Çalışmamı 2010.KB.FEN.01 (2009/49) numaralı proje ile destekleyen Dokuz Eylül Üniversitesi'ne ve gösterdikleri ilgi ve anlayışları için beraber çalıştığım hocalarıma, çalışma arkadaşlarıma ve tüm DEÜ Mimarlık Fakültesi görevlilerine,

Çalışmam sırasında desteğini esirgemeyen Sn. Prof. Dr. Halime Paksoy, Dr. Özgül Gök, Berkay Eriş ile Ege KALMEM çalışanlarına, Sn. Hakan Kılıç, Mehmet Alkan, Burhan Cömert, Şener Demirel, Meryem Gemicioğlu, Tarık Öztürk, Ali Osman Keser, Filiz Gürsan'a ve adını sayamadıklarına,

Çalışmanın bu noktaya gelmesinde benimle beraber zaman ve emek katkısı koyan Sn. Dr. Gülден Köktürk, Dr. Mehmet Akif Ezan, Seval Erdem ve Ebru Yıldızber'e,

Sınırsız moral destekleri ile beni yalnız bırakmayan sevgili arkadaşlarıma,

Her zaman yanımda olan annem Zeyneb Tokuç ve babam Özcan Tokuç'a,
Ve üstün emekleriyle kardeşim A. Aylin Tokuç'a,

Sonsuz teşekkürlerimle...

Ayça Tokuç

FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİNİN ISIL ENERJİ DEPOLAMA AMACIYLA YAPI ELEMANLARINDA KULLANILMASI

ÖZ

Günümüzde, yapıların yaşam döngüsü boyunca harcadıkları enerjinin büyük kısmı ısıtma ve soğutma sistemlerinde kullanılmaktadır. Ancak, sadece pasif sistemlerin kullanılmasıyla yapıların yılın büyük kısmında iç ortam konfor koşullarına ulaşılabilmesi olanaklı değildir. Bu amaçla, arasında faz değişim malzemelerinin (FDM) de olduğu, yeni malzeme ve yapı bileşenlerinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, FDM'lerin yeni yapı malzemesi olarak ısı depolama amacıyla yapı bileşeni üretiminde ve dolayısıyla yapı mimarisinde kullanımının getirebileceği olası enerji kazanımını irdelenebilecek bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Başlangıçta sorun tanımı, çalışmanın amacı, kapsamı ve yöntemi açıklanmıştır. Daha sonra; ısı depolama (IED) ve FDM ile ilgili temel kavram ve terimler aktarılmıştır. Buna ek olarak FDM'lerin seçim ölçütleri, FDM kullanılarak tasarlanmış yapı elemanları ve mimari uygulamaları ile ilgili çalışmalar verilmiştir.

Bunu takiben, kurgulanan yaklaşım açıklanmıştır. Yaklaşım dört adımdan oluşmaktadır. Bunlar:

- (1) Kullanılacak FDM ve yapı elemanı detayının belirlenmesi,
- (2) FDM'nin ve FDM içeren yapı bileşeninin ısı depolama davranışını ölçmek amacıyla kurgulanan deneysel çalışma,
- (3) Ticari bir modelleme programı yardımıyla elemanın ısı davranışının değerlendirilmesi için yapılan sayısal çalışma, ve
- (4) Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ışığında yapı elemanı kullanımının sağladığı enerji tasarrufunun hesaplanması ile sonucun değerlendirilmesidir.

Kurgulanan yöntem bir örnek üzerinde uygulanarak tartışılmıştır. Seçilen örnek, gizli ısı depolama sistemine sahip FDM'li bir düz çatının ülkemizdeki dört farklı

iklim bölgesinde, sabit sıcaklık kontrollü binaların soğutma yükünü azaltmak amacına ne derecede katkıda bulunabileceğinin incelenmesidir.

Sonuçta, FDM ile geliştirilen yeni yapı bileşenlerinin mimaride kullanımına yardımcı olabilecek aktarılan yöntemin sonuçları, çizilen kavramsal çerçeveye ve örnek uygulamalarından elde edilen verilere dayanarak tartışılmış ve konu ile ilgili daha sonraki araştırmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar sözcükler: Faz değişim malzemesi (FDM), enerji depolama, ısı enerji depolama (IED), gizli ısı depolama, enerji performansı.

USE OF PHASE CHANGE MATERIALS IN BUILDING ELEMENTS FOR THERMAL ENERGY STORAGE

ABSTRACT

For most of the year, only the use of only passive systems is not usually enough to achieve indoor comfort conditions, therefore most of the energy that is consumed throughout the life cycle of buildings is consumed by heating and cooling systems. The development of new materials -including phase change materials (PCM)- and building elements, show promise in reaching better indoor comfort with less energy. This study aims to develop a methodology that can be used to evaluate possible energy gains from the incorporation of PCM into new building elements.

First the problem, purpose, limits and methodology are described. Later, the main concepts and literature that deal with thermal energy storage (TES) and PCM are presented. Later the methodology, which consists of four main steps, is proposed:

- (1) Determination of the PCM and building element detailing,
- (2) The experimental work that is constructed to measure the thermal behavior of both the PCM and the building element containing PCM,
- (3) The validation of numerical work with experimental data, and
- (4) Calculation of energy savings in light of simulations and evaluation of results.

Afterwards, the proposed methodology is used on an example. The example discusses to what degree can a PCM incorporated flat roof with latent energy storage contribute to reducing the cooling load of thermostatically controlled buildings in four climatic regions of Turkey.

In conclusion, the results from the example are discussed within the plotted conceptual framework. Also suggestions on further studies are given.

Keywords: Phase change material (PCM), energy storage, thermal energy storage (TES), latent heat storage, energy performance.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	vi

BÖLÜM BİR- GİRİŞ 1

1.1 Sorun Tanımı	1
1.2 Çalışmanın Amacı	3
1.3 Çalışmanın Kapsamı	4
1.4 Çalışmanın Yöntemi	4

BÖLÜM İKİ- FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE BİNALARDA UYGULANMALARI 7

2.1 Isıl Enerji Depolamaya İlişkin Kavramsal Çerçeve	8
2.1.1 Duyulur Isı Depolama	9
2.1.2 Kimyasal Isı Depolama	9
2.1.3 Gizli Isı Depolama	10
2.2 Yapıda Kullanılabilecek Faz Değişim Malzemeleri	11
2.2.1 Faz Değişimi	11
2.2.2 Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri	12
2.2.3 Yapı Elemanlarında Kullanım İçin Seçim Kriterleri	13
2.3 Faz Değişim Malzemelerinin Yapı Elemanı Üretiminde Kullanılması	16
2.3.1 Doğrudan Birleştirme	16
2.3.2 Daldırma	17
2.3.3 Kapsülleme	17
2.4 Faz Değişim Malzemelerinin Mimari Uygulamaları	18
2.4.1 Yapı Kabuğu Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar	19
2.4.2 İç Mekanlar Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar	27

BÖLÜM ÜÇ- YAPI ELEMANLARINDA ISIL DEPOLAMA İÇİN FDM KULLANIMINA BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ 35

3.1 Birinci Adım- Yapı Elemanı Tasarımı	35
3.2 İkinci Adım- Deneysel Çalışma	37
3.3 Üçüncü Adım- Sayısal Modelleme	40
3.4 Dördüncü Adım- Enerji Tasarrufu Belirlenmesi	41

BÖLÜM DÖRT- YÖNTEMİN BİR ÖRNEKLEMDE UYGULANMASI 43

4.1 Birinci Adım: Yapı Elemanı Tasarımı	43
4.1.1 Yapı Elemanı Detaylandırılması	44
4.1.2 FDM Seçimi	47
4.2 İkinci Adım: Deneysel Çalışma.....	48
4.2.1 Deneysel Düzenek	48
4.2.1.1 Deneysel Hücre	50
4.2.1.2 Akışkan Dolaşımı	52
4.2.1.3 Sabit Sıcaklık Banyoları	54
4.2.1.4 Ölçüm Ve Gözlem Sistemi	55
4.2.1.5 Yapı Elemanı	58
4.2.2 FDM'siz Çalışma	63
4.2.2.1 FDM'siz 1. Deney	64
4.2.2.2 FDM'siz 2. Deney	68
4.2.3 FDM'li Çalışma	69
4.2.3.1 FDM'li 50 °C 1. Deney	69
4.2.3.2 FDM'li 50 °C 2. Deney	73
4.2.3.3 FDM'li 40 °C 1. Deney	75
4.2.3.4 FDM'li 40 °C 2. Deney	77
4.2.3.5 FDM'li 60 °C 1. Deney	79
4.2.3.6 FDM'li 60 °C 2. Deney	81
4.3 Üçüncü Adım: Sayısal Çalışma	84
4.3.1 Sayısal Modelleme	84
4.3.2 Fluent'le Sayısal Modelleme	84

4.3.3 FDM'siz Çözümler	89
4.3.3.1 FDM'siz 1. Deney	90
4.3.3.2 FDM'siz 2. Deney	90
4.3.4 FDM'li Çözümler	91
4.3.4.1 FDM'li 50 °C 1. Deney	91
4.3.4.2 FDM'li 50 °C 2. Deney	93
4.3.5 Sayısal Modelin Değerlendirilmesi	93
4.4 Dördüncü Adım: Enerji Tasarrufunun Belirlenmesi	95
4.4.1 Simülasyon Ve Hesap Yöntemi	95
4.4.2 1. Bölge: İzmir	97
4.4.3 2. Bölge: İstanbul	105
4.4.4 3. Bölge: Ankara	109
4.4.5 4. Bölge: Erzurum	113
BÖLÜM BEŞ- SONUÇ	117
KAYNAKLAR	124
EKLER	133
EK I Kullanılan Simgeler	133
EK II Binalarda Kullanılabilecek Faz Değişim Malzemeleri	135
EK III Kalibrasyon Eğrileri	147
EK IV Deneysel Çalışma Grafikleri	185
EK V Sayısal Çalışma ile Deneysel Çalışma Uyum Grafikleri	216
EK VI Simülasyon Faz Değişim Grafikleri.....	228

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

1.1 Sorun Tanımı

Günümüzde, sürdürülebilir binalar tasarlanması ve uygulanması konusunda, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de bir eğilim oluşmuştur. Sürdürülebilirliği sağlamakta uygulanabilecek en önemli stratejiler; enerjiyi mümkün olduğunca az düzeyde ve verimli tüketmek, gerekli enerjiyi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak yapının bünyesinde üretmek ve yerel yapı elemanlarını kullanmaktır.

Bu çerçevede, yenilenebilir enerji kaynaklarının yapıda ve yapı elemanında kullanımı ile güneş enerjisinden yararlanılarak binaların ısıtılması ve soğutulması sağlanabilmektedir. Güneş enerjili sistemlerde, bina yapımında kullanılan yapı bileşen ve/veya elemanları yapıya alınan enerjinin yönlendirilmesinde ve değerlendirilmesinde rol oynamaktadır. Güneş enerjisinin kullanımında en büyük sorun, elde edilen enerjinin süreksiz olması ve depolanmasına dönük problemlerdir. Bu yüzden, faz değişim malzemelerinin (FDM'lerin) yapı elemanlarına eklenmesi ile güneş enerjili sistemlerdeki bu sorunun çözümüne dönük bir alternatif geliştirilebilmektedir. Aynı zamanda binanın ısıl kapasitesinin artırılması ile iç ortam sıcaklık dalgalanmalarının azaltılarak insan konforunun da artırılması sağlanacaktır.

Yapının ısıl gereksinimlerini sadece mimari elemanları kullanarak karşılamak günümüzde mümkün değildir. Tamamen pasif yapıların tasarlanabilmesi ve uygulanabilmesi, ancak yapı malzemeleri ve bir araya geliş özellikleri üzerine yapılan araştırmaların artırılması ile olasıdır. Pasif yapılarda iç ortam sıcaklığı, başka değişkenlerin yanında iklim ve yapı elemanlarının ısıl kapasite değişkenlerine de bağlıdır. Bu noktada malzeme teknolojilerinde ortaya çıkan yenilikler, yapı elemanlarında gerek kullanılan malzemelerde gerekse elemanların detaylandırılmasında çeşitliliği ve yeni olanakları beraberinde getirmektedir. Bunların arasında yaygın olarak kullanılmamakla birlikte yapıda kullanımı ile yapının ısıl konforunu artıracak FDM'ler de bulunmaktadır. FDM'ler; sabit bir

sıcaklık aralığında eriyip katılaşılarak, belirli bir sıcaklık aralığında geleneksel yapı malzemelerinin beş ila yirmi dört katı enerji depolayabilirler.

1970'lerden beri inşaat sektörü üzerine yapılan çalışmalar ile daha kullanılabilir hale getirilen FDM'ler sahip oldukları potansiyele rağmen, halen yaygın yapı malzemeleri olarak kullanılmamaktadır (Harland ve ark., 2010). Bunun nedenleri arasında teknolojinin gelişmekte olmasıyla beraber uygulamada FDM'nin hatalı seçimi veya detaylandırılması durumlarında FDM'nin kullanım amacına ve potansiyeline ulaşılamaması, ve dolayısıyla binada arzulanan konfor artımı veya ekonomik beklentinin karşılanamaması yer almaktadır. FDM'nin yapıya eklenmesinin getireceği katkı;

- İklima,
- Yapının kullanım gereksinimlerine,
- FDM'nin enerji depolama kapasitesine,
- FDM hal değişim sıcaklığına,
- FDM kullanılan yapı elemanının tasarımına ve
- FDM kullanılan ortamın güneşe yönelimine bağlıdır.

Yapıda FDM kullanımı ile en fazla katkının sağlanabilmesi, söz edilen bu değişkenlerin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile olasıdır. Bu amaçla bazı araştırmacılar tarafından FDM'ler ve kullanıldıkları yapı elemanlarının özellik, davranış ve başarımlarının değerlendirilmesi ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır ve pek çoğu da devam etmektedir. Bunların arasında, binaların tasarım aşamasında, FDM'li yapı elemanının yapıya getirebileceği katkının bilgisayar modellenmesi yapı uygulamalarında ve tasarımında önemli bir yol göstericidir. Ancak yapılan çalışmalar, binalarda FDM kullanımını incelemek amacıyla geliştirilen çeşitli modelleme sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçlarının örtüşmediğini göstermektedir (Castell, 2009a). Buradan modellerin halen geliştirilme aşamasında olduğu görülmektedir. Ayrıca FDM'nin yararlarının belirlenmesi için genellikle kullanımı uzmanlık gerektiren analizler yapılması ve FDM'lerin yapılarda daha yaygın

kullanılabilmesi için bu gibi sorunları azaltmak gerekmektedir. FDM'lerin mimari uygulamalarıyla ilgili çalışmalara Bölüm 2'de detaylı olarak değinilmiştir.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, yapıların ısı performansını artıracığı düşünülen FDM'li yapı elemanlarının binalarda kullanımı ile, mimari tasarım aşamasında kullanılacak bir değerlendirme modelinin ortaya konulmasıdır. Nasıl ısı yalıtım malzemelerinin yapı elemanlarındaki davranışı matematiksel olarak değerlendirilebiliyorsa, bu model ile de herhangi bir iklim bölgesinde FDM'li yapı elemanları ve bunlara ilişkin detayların nasıl oluşturulabileceği ve hesaplama yöntemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

FDM'ler herhangi bir yapı elemanı detayında ve dolayısıyla binada uygulanma potansiyeline sahiptir. Ancak herhangi bir FDM'nin binalarda uygulanabilmesi için o malzemenin ısı davranışının teorik ve deneysel olarak incelenmesi gerekmektedir. Böylece, farklı sınır koşulları için sayısal modellemenin katkısıyla da; beraber kullanıldığı yapı elemanının değişik detaylar ve pratik kullanımlardaki davranışı modellenebilir. Bu nedenle çalışma sırasında;

- FDM'nin seçilen detaydaki katmanlar arasındaki yerinin saptanması,
- FDM'li elemanın ısı davranışı ve ısı depolama kapasitesinin deneysel çalışma ile belirlenmesi,
- Sayısal modelleme geliştirilip deneysel çalışma ile doğrulanması, ve
- Geliştirilen modelin, örneklem üzerinde, parametrik olarak irdelenmesi

hedeflenmektedir.

Bu modelin, binalarda FDM'li yapı elemanı kullanımında tasarımcı tarafından eleman ve detay seçiminde yardımcı olması amaçlanmıştır.

1.3 Çalışmanın Kapsamı

Yapı elemanlarının yapıda kullanılan enerji gereksinimine etkilerinin belirlenmesi geniş kapsamlı bir konudur. FDM'li yapı elemanları söz konusu olduğunda FDM'lerin ısı davranışlarının incelenmesi de gündeme gelmektedir. Bu çalışmada, sözü geçen konuların teorisi üzerine önermelerde bulunulmamıştır. Bunun yanı sıra FDM'li elemanın yapının herhangi bir bölümünde oluşturulması mümkündür. Ancak yapı genelinde iç ve dış ortam arasında ısı transferi öncelikle yapı kabuğu yoluyla olduğundan bu çalışmada yapı kabuğundaki elemanların FDM ile birlikte çalışma özelliklerinin incelenmesi tercih edilmiştir. Çalışma; FDM kullanılan yapı elemanının tasarlanmasını ve başarımının irdelenmesini kapsamaktadır.

Ortaya konan model, farklı yöntemlerin bir arada uygulanması ve karşılaştırılması sonucunda elde edilen verilerin yapı tasarımcısının kolay kullanabileceği bir biçime dönüştürülmesini içermektedir. Ancak herhangi bir yapı detayında pratik olarak uygulanabilme ve yaygınlaştırılabilme önemlidir. Bu bağlamda, FDM'nin termofiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı genel geçer detayların çözümlenmesi gereklidir. Bu tezde, bu tip teknik çözümlere ilişkin yaklaşımlar kapsam dışı bırakılmış ve çalışmaya özgü bir detay çözümü kullanılmıştır.

Sistem yapılarda uygulanacağı için, yapıya getirdiği başarımların artışı, FDM kullanmadan ve FDM kullanılarak tasarlanmış bir yapı elemanının kullanıldığı bir ortamın karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Ancak, FDM'ler ve yapıda kullanımları henüz geliştirilme aşamasında oldukları için ilk yatırım maliyetleri, malzemelerin maliyet analizi ve mali geri dönüşüm analizleri çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur.

1.4 Çalışmanın Yöntemi

FDM'li yapı elemanları mimaride yeni kullanılmaya başlanmıştır. Halen gelişim aşamasında olan elemanlar, binalarda yaygın olarak kullanılmamaktadır. İlk aşamada FDM ve ısı enerji depolama ile ilgili ana kavramlar, FDM kullanımının avantajları

ve dezavantajları ve FDM kullanılarak üretilen yapı bileşenleri ile ilgili yapılmış çalışmalar aktarılmıştır.

Bu tezde; FDM eklenerek oluşturulan yapı bileşenlerinin mimari kullanımı ile, iklimlendirme enerjisi açısından sağladığı katkının değerlendirilmesi için önerilen modelde deneysel çalışmaya, sayısal modellemeye ve simülasyona dayalı yöntemler bir arada kullanılmıştır. Bu model yapı kabuğunun birçok kısmında kullanılabilir olmasına rağmen bu çalışmada klasik bir üzerinde yürünen teras çatı, yapı bileşeni olarak seçilmiştir.

Yaklaşımın ilk adımında, FDM uygulaması için seçilen yapı elemanının detaylandırılması gerçekleştirilirken yapı tipi ve parametrik verilerden yola çıkılarak hal değişim sıcaklığı ve kullanılabilir FDM seçimi gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada; kullanılacak yapı elemanının fiziksel karakteristikleri, FDM'nin kullanım amacı ve hal değişim sıcaklığı göz önüne alınarak, çizilen grafikler üzerinden detay kesitinde FDM'nin yerleştirilebileceği bölge belirlenerek eleman detayı kesinleştirilmiştir.

Yaklaşımın ikinci adımında, yapı elemanının ve kullanılan FDM'nin ısıl davranışı deneysel olarak ölçülmekte ve gözlemlenmektedir. Yapı elemanını ortamdan bağımsız inceleyebilmek için bir deneysel düzenek kurularak yapı elemanına, gerçekte karşılaşacağı iç ve dış ortam koşulları uygulanmıştır. Düzenek önce seçilen standart yapı elemanı detayı için çalıştırılmış, detayın duyulur ısı kapasitesi ve sistem kayıpları ölçülmüştür. Sonra düzeneğe FDM yerleştirilerek gizli ısı depolama kapasitesi gözlenmiştir. Sıcaklık ölçümleri ile beraber gözleme ve fotoğraflama ile irdelenen yapı elemanının ısıl davranışı, hesaplar ve grafikler yardımıyla elde edilmiştir.

Yaklaşımın üçüncü adımında, seçilen yapı elemanı ticari bir bilgisayar programı ile sayısal ortamda modellenmiştir. FDM'lere ilişkin bilgisayar modelleri tam olarak geliştirilmediği için kullanılan modelin doğruluğu deneysel çalışmadan elde edilen veriler ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

Yaklaşımın son adımında, kullanımı önerilen yapı elemanının hem beklenen enerji kullanımına hem de ortamdaki ısı konfora olası katkılarının hesaplanması için, bir önceki adımda geliştirilen model kullanılmıştır. Bu model yardımıyla, yaz koşullarında yapı elemanında FDM kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için dış ortamdan mekana giren ısı akısı hesaplanmıştır. Bu modelden yola çıkılarak, sağlanan olası enerji ve bundan kaynaklanan ekonomik getiriler değerlendirilmiştir.

Bu amaçla; ülkemizdeki dört farklı iklim bölgesinde uygulanan gizli ısı depolama sistemine sahip klasik bir düz çatının, konutların soğutma yükünü azaltmaya ne derecede katkıda bulunabileceğini saptamak için bir örnekleme çalışması yapılmıştır. Örneklemede, yapı elemanında farklı FDM kalınlıkları kullanılarak detaylandırmada en olumlu tasarım ortaya konulmuştur.

BÖLÜM İKİ

FAZ DEĞİŞİM MALZEMELERİ VE

BİNALARDA UYGULANMALARI

Binalar, insanların korunma ve barınma gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarlanır. Tarih boyunca barınaklar, olumsuz iklim koşullarına karşı korunaklı ortamlar sağlayacak şekilde oluşturulmuşlardır. Geleneksel binalarda, kış aylarında yapıyı ısıtmak, yaz aylarında ise serin tutmak için çeşitli yöntemler vardır. Günümüzde; modern dönem mimarlığında iklimlendirme sorunu, çoğunlukla büyük miktarda enerji tüketen mekanik ısıtma ve soğutma sistemlerine dayanmaktadır.

Zamanla yakıt tüketimindeki artış ile artan karbondioksit salınımı, küresel ısınma sorununu doğurmuştur. Çeşitli ekonomik, çevresel ve sosyal zorunluluklar, enerji kaynaklarının korunması, tasarruflu kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisinin kullanımı, geleneksel bina ısıtma ve soğutma yöntemlerine sürdürülebilir bir alternatif olarak giderek önem kazanmaktadır. Fakat güneş enerjisi kullanımında karşılaşılan kaynağın sürekli olmaması sorunu uygulamada zorluklara neden olmaktadır. Bu sorunun ortadan kaldırılması için güneş varken enerjisinin depolanması, ihtiyaç duyulduğunda ise kullanılması gerekmektedir. Faz değişim malzemeleri (FDM) ile ısı enerjisi depolama, bu amaçla kullanılacak araçlardan biridir.

Bu bölümde; ısı enerjisi depolama (IED), faz değişimi, FDM'lerin özellikleri ve FDM'lerin yapı elemanı üretiminde kullanılması amacıyla seçim ölçütleri açıklanmaktadır. Ayrıca FDM kullanılarak tasarlanmış yapı elemanları, mimari uygulamalardaki kullanımları ve bu uygulamaların değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar ve erişilen sonuç bulgular özetlenmektedir.

2.1 Isıl Enerji Depolamaya İlişkin Kavramsal Çerçeve

Isıl enerji bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Isıl enerji maddenin iç enerjisindeki değişme ile duyulur ısı, tepkime ısı, gizli ısı, ya da tüm bunların birleşimi olarak ortaya çıkar. Bunların bir arada kullanılması da mümkündür.

Isıl enerji depolama (IED), çevresel sorunlarla baş edebilmede ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanımında önemli rol oynamaktadır. IED kullanımı ile günümüz toplumu; daha etkin, çevreye zararsız, sürdürülebilir ve ekonomik enerji kullanım ihtiyacını karşılama potansiyeline sahiptir (Dinçer, 2006). Bu düşünceyle, bu kavram üzerine pek çok sektörde çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bunlardan birisi de IED'nin yapılarda kullanımınıdır.

IED; enerjiyi sonradan kullanmak amacıyla, bir hazinede depolayan teknolojiler olarak tanımlanabilir. Isıl enerji depolamanın yararları şu şekilde sıralanabilir:

- IED, her çeşit mekan ısıtma ve soğutma teknoloji ve stratejilerinin enerji sarfiyatını azaltmakta kullanılabilir,
- Isıl gereksinimle örtüşmeyen zamanlarda var olduğu halde kullanılmayan düşük sarfiyatlı veya bedava enerjinin gerektiğinde kullanılmasına olanak verir.
- Enerji talebinin en yüksek olduğu zamanlarda gereken enerji, istemin daha az olduğu zamanda elde edilip saklanarak ihtiyaç olduğunda kullanılabilir. Böylece talebin en fazla olduğu zamanlardaki istem miktarını düşürebilir ve üretim ile tüketim arasında dengeyi kurabilir (Hawes ve ark., 1990),
- IED ile, fosil yakıt tüketimi azaltılarak yeni güç santralleri ihtiyacı ve sera gazları yayılımları düşürülebilir (Dinçer, 2006).

2.1.1 Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı, bir madde tarafından faz değişimi olmadan sıcaklık değişimi sırasında emilen veya dışarı verilen ısıdır. Bu yöntemle ısı depolamada, ısının depolanması ve geri kazanılması süresince depolama malzemesinin sıcaklığı değişir. Eşitlik 2.1'e bakıldığında bir yapı elemanının veya bileşeninin kayda değer duyulur ısı depolama kapasitesine ulaşması için büyük bir sıcaklık değişimi veya genelde kullanılanlardan daha fazla yapısal kütleye ihtiyaç olduğu görülmektedir (Chunyan, 1993; Zalba ve ark., 2003).

$$Q_d = m_d \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Eşitlik 2.1})$$

Bu eşitlikte;

Q_d : depolanan duyulur ısı [kJ],

m_d : duyulur ısı depolama malzemesinin kütlesi [kg],

c : malzemenin özgül ısısı [kJ/kg K], ve

ΔT : sıcaklık değişimi [K]'ni

gösterir.

Çok sayıda ısı depolama ve geri kazanma çevriminin gerçekleştirilebilmesi, duyulur ısı depolama yönteminin en çekici özelliklerinden biridir. Duyulur ısı depolama yöntemi, kullanılan ısı depolama malzemesine bağlı olarak; sıvı, katı, ve sıvı ile katı malzemelerin birlikte kullanımı şeklinde incelenebilir (Öztürk, 1997).

2.1.2 Kimyasal Isı Depolama

Isı enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek uzun süre depolanabilir. Kimyasal ısı depolama; ekzotermik olarak tepkimeye girebilen iki veya daha fazla kimyasal bileşikte tersinir tepkimeler süresince kimyasal bağlarda ısı depolanması esasına dayanır. Depolama sisteminin ömrü teorikte sınırsızdır (Öztürk, 1997; Gök, 2005).

Kimyasal yöntemle ısı depolayan sistemler, gizli ısı depolama sistemlerinden daha karmaşıktır. Sistemdeki bileşenlerin kendi aralarındaki olası etkileşimleri önemlidir.

Yöntemin en önemli özelliği seçilen tepkimenin tersinir olmasıdır. Kimyasal bağların tersinir olarak ayrışma ve birleşmesi sırasında, ısı değeri yüksek olan kimyasal tepkimeler gerçekleştiğinden, ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir (Azpiazu ve ark., 1994).

2.1.3 Gizli Isı Depolama

Gizli ısı, malzemede fiziksel hal değişimi meydana gelirken, malzeme tarafından emilen veya yayılan tipik enerji miktarıdır. Bir malzeme katı halden sıvı hale dönüşürken, katıyı oluşturan parçacıkların moleküler çekimini yenmek için enerji gereklidir. Bu enerji dışarıdan, genelde ısı olarak sağlanır ve sıcaklıkta bir değişim meydana getirmez. Eğer ısı sıvı halden katı hale geçişte açığa çıkıyorsa füzyon ısısı, gaz halden sıvı hale geçişte açığa çıkıyorsa buharlaşma ısısı olarak adlandırılır ve maddenin sıvı ve katı ana moleküler kinetik enerji farkına eşittir. Yüksek füzyon ısılarına sahip malzemeler, erime ve katılaşma sıcaklıklarında, sıcaklıkta değişim gerçekleşmeden, geniş miktarda enerji depolayabilir veya açığa çıkarabilirler. Faz değişimi sırasında malzeme tarafından emilen gizli ısıyı depolamak için kullanılan malzeme “Faz Değişim Malzemesi” olarak adlandırılmaktadır (Chunyan, 1993; Zalba ve ark., 2003). Birim kütle başına faz değişimi ile emilen veya açığa çıkan ısı enerjisinin, sıcaklığının arttırılmasıyla depolanan enerjiden çok daha fazla olduğu görülmektedir (Eşitlik 2.1, Eşitlik 2.2).

$$Q_g = m_{FDM} \cdot H \quad (\text{Eşitlik 2.2})$$

Burada;

Q_g : depolanan gizli ısı [kJ],

m_{FDM} : FDM'nin kütlesi [kg], ve

H : FDM'nin gizli ısısı [kJ/kg]'nı gösterir.

Gizli ısı depolamanın diğer IED tekniklerine göre üstün yönleri şu şekilde sıralanabilir:

- Duyulur ısı depolamaya göre ısı depolama kapasitesi yüksektir ve ısı deposu hacmi daha küçüktür,
- FDM olarak kullanılan malzemelerin birim kütlelerinin ısı depolama kapasiteleri yüksektir,
- FDM'lerin faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur,
- Gizli ısı depolama yöntemi, sabit sıcaklıkta ısı gerektiren uygulamalar için uygundur (Gök, 2005).

Gizli ısı depolama yönteminin kullanımı, birçok uygulamada göze çarpmaktadır. Bu yöntemle ısı enerjisi depolama, duyulur ısı depolama yöntemine göre, daha küçük sıcaklık değişimleriyle daha yüksek enerji depolama kapasitesi sağlar. Ancak, pratik uygulamalarda FDM'lerin bazı özelliklerinden dolayı güçlüklerle karşılaşmaktadır (Farid ve ark., 2004).

2.2 Yapıda Kullanılabilecek Faz Değişim Malzemeleri

2.2.1 Faz Değişimi

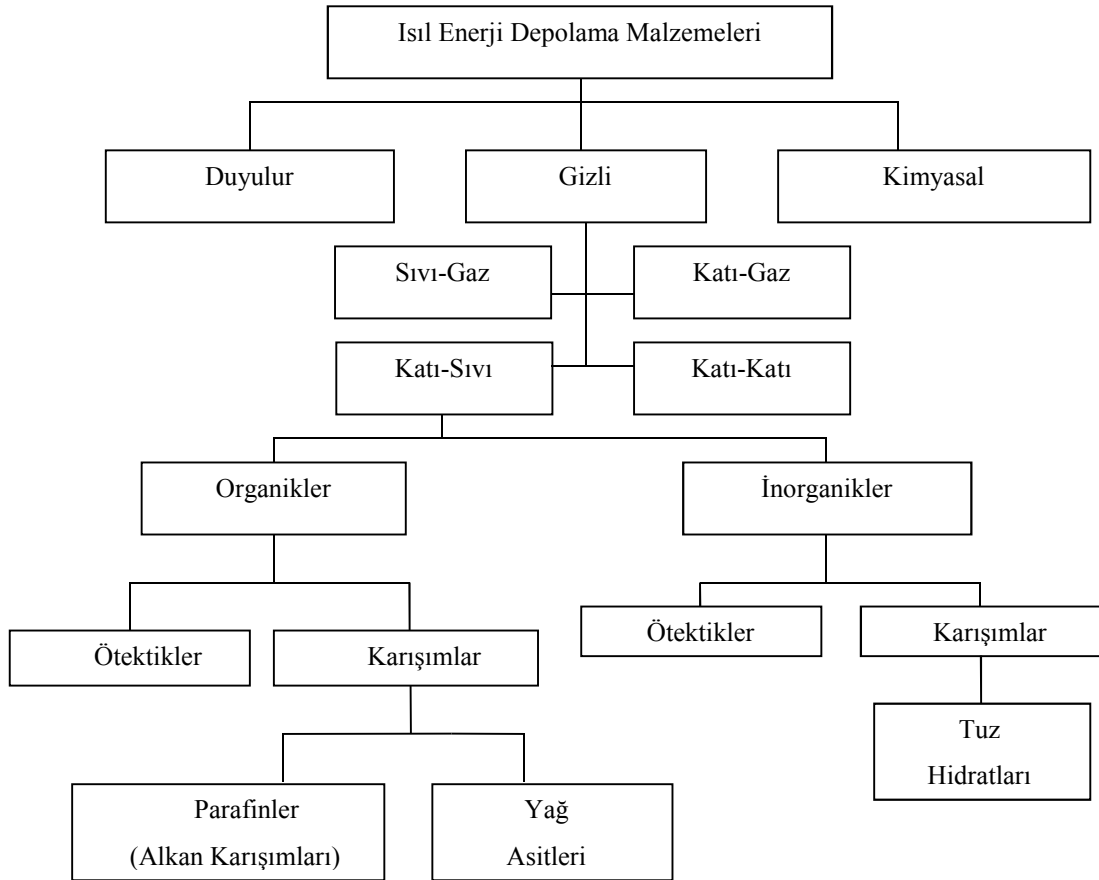
Bir malzemede faz değişimi; katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz şeklinde gerçekleşebilir. FDM kullanılarak gerçekleştirilen farklı uygulamalara bakıldığında, buharlaşmanın (sıvı-gaz veya katı-gaz) genelde yüksek entalpiye sahip bir faz değişimi olduğu görülmektedir. Ancak buharlaşma süreci sınır koşullarına bağlıdır. Sabit hacimde buharlaşma büyük bir ısı ve basınç değişimi meydana getirir ve teknik nedenlerden dolayı kullanılması çok zordur. Sadece su için sınırlı kullanımı vardır (Zalba ve ark., 2003).

Katı durumdaki bir malzeme kristalleşerek diğer bir katı faza dönüştüğünde (katı-katı değişimi) ısı depolanır. Malzeme ilk durumdaki katı fazına yeniden

dönüştüğünde, faz değişimi sırasında depolanan ısı da geri kazanılır. Katı-katı faz değişimi sırasında açığa çıkan faz değişim entalpisi genelde azdır. Erime (katı-sıvı) ise uygun madde seçildiğinde yüksek entalpiye sahip bir faz değişimidir. Erime ve katılaşma sırasında katı-gaz ve sıvı-gaz faz değişimlerine oranla daha az hacim değişimi gerçekleşir. Depolama malzemesinin erimesi ve donması sabit sıcaklıkta gerçekleştiğinde, bu durum yapı uygulamaları için uygun olabilmektedir (Öztürk, 1997).

2.2.2 Faz Değişim Malzemelerinin Özellikleri

Isıl enerji depolama yöntemlerinde kullanılan malzemelerin sınıflandırılması Abhat tarafından (1983) Şekil 2.1'deki gibi verilmiştir. FDM'ler organik ve inorganik olarak iki ana bölüme ayrılır. Her FDM, yapıda kullanıma uygun değildir.



Şekil 2.1 Isıl enerji depolama maddelerinin sınıflandırılması (Abhat, 1983).

Yapı uygulamalarında, sadece insan konfor sıcaklığına yakın faz değişim sıcaklığı olanlar kullanılabilir. FDM'lerin yapı uygulamalarındaki kullanımının pratik hale getirilmesi için yanıtlanması gereken ana sorular; kullanılacak malzemenin konsantrasyonu ve değişik iklimlerde hangi malzemenin ne kadar uygun başarımlar göstereceğidir (Zhang ve ark., 2007).

FDM üzerine yapılan ilk çalışmalarda, düşük maliyetli ve yüksek füzyon katılma enerjisi ile gelecek vaat eden malzemeler olan hazır tuz hidratları kullanılmıştır. Ancak önemli ilerlemeler kaydetmekle beraber, faz değişimi sırasında süper soğuma ve farklı erime nedeniyle katmanlaşma eğilimi göstererek pratik depolama sistemlerinde güvenilir kullanımın önünde engel oluşturmuştur. Bazı FDM'lerde yeniden katılma sorunu yaşanmıştır (Tyagi ve Buddhi, 2007). Genelde bu malzemelerin içindeki kimyasallar sıvı halde ayrılıp katmanlaşma eğilimindedir ve sıcaklık düştüğünde tamamen katılmayarak gizli ısı depolama kapasitelerini azaltırlar. Bu sorunlar, malzemeleri ince ya da sıg kaplarda ambalajlayarak ve malzemelere topaklanma ajanları ekleyerek giderilmeye çalışılmıştır.

İnorganik FDM'lerin sorunlarından kaçınmak için parafinler, yağ asitleri ve polietilen glikol gibi az uçucu susuz organik malzemelere doğru bir yönelim olmuştur. Başlangıçta daha pahalı ve birim hacim başına daha düşük ısı depolama kapasitesine sahip oldukları için bir kenara itilen bu malzemeler; fiziksel ve kimyasal kararlılık, iyi ısıl davranış ve ayarlanabilir geçiş sıcaklıkları gibi avantajlara sahiptir. Organik ve inorganik FDM'lerin yapı elemanları üretiminde kullanımına yönelik avantaj ve dezavantajları Tablo 2.1'de verilmiştir (Pasupathy ve ark., 2008).

2.2.3 Yapı Elemanlarında Kullanım İçin Seçim Kriterleri

Günümüze kadar yapılmış olan araştırmalarda gizli ısı depolama amacıyla, yaklaşık 20.000 adet bileşik veya bunların karışımları araştırılmıştır. Gizli ısı depolamaya uygun malzeme olarak, 200'den fazla organik ve inorganik bileşik ile bunların ötektik karışımları laboratuvar testlerinden geçirilmiştir (Farid ve ark., 2004).

Tablo 2.1 Organik ve inorganik faz değişim malzemelerinin avantaj ve dezavantajları (Pasupathy ve ark., 2008'den revize edilmiştir).

	<i>Organik</i>	<i>İnorganik</i>
<i>Avantajlar</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geniş bir sıcaklık aralığı içinde bulunabilirlik 2. Süper soğumanın olmaması 3. Her noktada aynı karakterde erimesi 4. Kendinden çekirdeklenmesi 5. Geleneksel inşaat malzemeleri ile uyumluluk 6. Katmanlaşma olmaması 7. Kimyasal kararlılık 8. Yüksek füzyon ısısı 9. Güvenli olması ve tepkimeye girmemesi 10. Yeniden kullanılabilirlik 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Yüksek hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi 2. Düşük maliyet ve kolay kullanılabilirlik 3. Kesin erime noktası 4. Yüksek ısıl iletkenlik 5. Yüksek füzyon ısısı 6. Düşük hacim değişiklik 7. Alev almazlık
<i>Dezavantajlar</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Katı halde düşük ısı iletkenliği, donma döngüsü sırasında yüksek ısı transfer oranları gerekliliği 2. Hacimsel gizli ısı depolama kapasitesi düşüklüğü 3. Yanıcılık (Bu uygun bir kap ile kolayca azaltılabilir) 4. Maliyeti nedeniyle sadece parafin karışımları ve rafine yağ kullanılabilirlik 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Çok yüksek hacim değişimi 2. Katı-sıvı geçiş sırasında süper soğuma 3. Tekrarlanan döngülerde çekirdekleşme için yardımcı ajan gerekliliği

Bu bileşiklerden, yapı elemanlarında ısıl depolama amacıyla kullanılacaklar (15-30°C), termofiziksel özellikleri ve alınan kaynaklarla birlikte EK 1'de verilmiştir (IEA, 2005).

Çalışılan birçok FDM'den çok azı ticari olarak üretilmiştir. Günümüzde, FDM ile ısı ve soğu depolanması pazarındaki ana şirketler; Cristopia (Fransa), TEAP Energy (Avustralya), Rubitherm GmbH (Almanya), EPS Ltd. (İngiltere), PCM Thermal Solutions (ABD), Climator (İsveç) ve Mitsubishi Chemical (Japonya)'dır (Kenisarin ve Mahkamov, 2007). Çeşitli firmalar tarafından üretilen ticari FDM'lerden, yapı elemanlarında ısıl depolama amacıyla kullanılacak olanlar (15-30°C), termofiziksel özellikleriyle birlikte EK 2'de gösterilmiştir (IEA, 2005).

Binalarda kullanım amacıyla FDM seçiminde FDM'nin faz değişim sıcaklığı önemlidir. Eğer faz değişim sıcaklığı çok yüksekse, FDM tarafından depolanan güneş enerjisi gündüz saatlerinde daha az olmaktadır. Eğer faz değişim sıcaklığı çok düşükse, gece boyunca iç mekan sıcaklığını sağlamak zorlaşmaktadır. Faz değişim sıcaklığı, yapı elemanının kullanılacağı yapı tipi ve iklim göz önünde bulundurularak seçilmelidir (Zhang ve ark., 2007).

Pasif güneş uygulamalarında kısa dönem ısı depolaması ve direk ısı kazancı için FDM'nin duvarlarda kullanımını ilk öneren Peippo ve ark. (1991a; 1991b), en uygun faz değişim sıcaklığının, oda sıcaklığının 1-3°C üzerinde olması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Pasupathy ve Velraj (2008), kış mevsiminde iç mekan sıcaklık salınımını azaltmak için seçilen FDM'nin yaz mevsiminde tüm aylarda sıvı halde kalacağı ve sistemin gizli ısı etkisini kullanamayacağı gerekçesiyle belirli bir bölgede her türlü hava koşuluna uygun FDM seçiminin mümkün olmadığını savunmuşlardır. Ayrıca, yaz ve kış dönemleri için çatıda farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip çift FDM katmanı kullanılmasını önermişlerdir.

Uygun FDM seçimi; fiziksel, ısıl, kimyasal, kinetik, ekonomik ve çevresel gerekliliklere bağlıdır. FDM'lerin yapı bileşeni üretiminde kullanılması için sahip olması gereken özellikler Mehling ve Cabeza'ya göre (2007) şu şekilde sıralanabilir:

Fiziksel özellikler;

- Uygun hal değişim sıcaklığı ile ısıl depolamanın ve ısı atımının sabit sıcaklık aralığında olmasının sağlanması.
- Yüksek hal değişim entalpisi ile duyulur ısı depolamaya göre yüksek depolama yoğunluğuna ulaşılablması.
- Yüksek ısıl iletkenlik ile geniş ısıl dalgalanmada, depolanmış gerekli ısıyı verebilmesi veya alabilmesi.
- Hal değişiminin tekrarlanması ile depolama malzemesinin defalarca kullanılabilmesi.
- Düşük aşırı soğuma ile ergime ve katılaşmanın aynı sıcaklıkta olmasını sağlaması.

Teknik özellikler;

- Düşük hacim değişimi ile malzemeyi içeren ortamın mekanik dayanım gereksinimini azaltılabilmesi.

- Kimyasal ve fiziksel kararlılık ile malzemenin uzun ömürlülüğünün sağlanabilmesi.
- Diğer malzemelerle uyumluluk ile sızıntı durumunda malzemeyi içeren ortamın uzun ömürlülüğünün sağlanabilmesi.

Ekonomik özellikler;

- Düşük fiyat ile ısı depolamasında diğer seçeneklerle yarışabilmesi.
- Çevre ve güvenlik nedenler yüzünden toksik olmaması.
- Malzemenin yeniden kullanılabilmesi dolayısıyla çevresel ve ekonomik kazançlar (Mehling ve Cabeza, 2007).

2.3 Faz Değişim Malzemelerinin Yapı Elemanı Üretiminde Kullanılması

Son otuz yıl boyunca aktif ve pasif güneş uygulamaları için değişik kapsüllenmiş FDM'ler ve FDM'li yapı elemanları piyasaya sürülmüştür. Ancak çoğu, gerek düşük ısı iletim katsayısı gerekse yetersiz yüzey alanı gibi nedenlerden dolayı beklenen ısısal performansı göstermemiştir (Khudhair ve Farid, 2004). FDM'leri kendi başına kullanmanın yanında (Zhang ve ark., 2007), yapı malzemesiyle birleştirme yöntemleri Hawes ve ark. (1990)'na göre; doğrudan birleştirme, daldırma ve kapsüllemedir.

2.3.1 Doğrudan birleştirme

Yapı malzemesi üretimi sırasında sıvı veya toz halindeki FDM yapı malzemesine karıştırılabilir. Uygulamada az donanım kullanılması yöntemin ekonomikliğini artırmaktadır, ancak düzgün yayılımın sağlanamaması ve FDM'nin erime fazında malzemedan dışarı sızması gibi sorunları vardır.

2.3.2 *Daldırma*

Bu yöntemde boşluklu yapı malzemesi sıcak ergimiş FDM içine daldırılır. Böylece kapiler hareketle FDM, malzemenin gözeneklerine nüfuz eder. Boşluklu malzeme sıvı FDM'den çıkarılarak soğumaya bırakıldığında FDM yapı malzemesinin gözeneklerinde kalır. Bu yöntemin en önemli avantajı sıradan bir yapı elemanının istendiğinde FDM'li elemana çevrilebilmesi ve daldırma işleminin her yerde her zaman yapılabilmesidir (Yinping ve ark. 2007). Bu doğrultuda, Salyer ve ark. (1985), boşluklu yapı bloklarında depolanan enerjiyi arttırmak için daha fazla FDM'nin yapı bloklarına eklenmesi gerektiğini öne sürmüşlerdir. Bu amaçla FDM/eriyik karışımı, FDM/kuru silis tozu ya da FDM/yüksek yoğunluklu polietilen tutma yöntemlerini araştırmışlardır. Salyer ve ark. (1985)'e göre en çok gelecek vaat eden faz değişim malzemesi tutma yöntemleri:

1. Gözenekli malzemeleri faz değişim malzemesi içine daldırma,
2. Faz değişim malzemesini özel ince silikalara emdirme,
3. Faz değişim malzemesini polimerik taşıyıcılara emdirmedir.

2.3.3 *Kapsülleme*

Yapı malzemelerinde, FDM'lerin olumsuz etkilerine maruz kalmadan karışıma FDM eklemek, FDM'leri birleştirme işleminden önce kapsüllemek işlemi ile olasıdır. Kapsüllemeye en yaygın kullanılan iki yöntem, "makrokapsülleme" ve "mikrokapsülleme"dir.

Makrokapsülleme yönteminde FDM, tüp, torba, küre, panel ve benzeri bir yuvaya yerleştirildikten sonra yapı malzemesi ile birleştirilmektedir. Fakat makrokapsüllerin hasardan korunması gerekmektedir, bu nedenle yapı bileşenlerinde kullanımı daha pahalıdır. Bir başka sorun da, sıvı halden ısı alımı gerektiğinde katılaşma sırasında öncelikle malzemelerin dış kısmının donması ve bu nedenle ısı iletiminin daha az etkili olmasıdır (Yinping ve ark., 2007; Khudhair ve Farid, 2004).

Mikrokapsülleme yönteminde FDM parçacıkları, yapı malzemesi ile uyumlu, ince, yüksek moleküler ağırlıklı polimerik filmle kaplanır. Kaplanan malzemeler kapsülleme filmi ile uyumlu herhangi bir matrisle birleştirilebilir. Mikrokapsüller, makrokapsüle göre daha kolay uygulanabilir ve ısı değiştirecek yüzeyin artmasından dolayı ısı transferi daha iyidir. Ancak birleştirildiği yapı malzemesinin mekanik dayanımını etkileyebilir. Hawes ve ark. (1990), çeşitli değişkenlerin mikrokapsüllerin enerji depolama ve ısı verme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Diferansiyel kalorimetre taraması ile elde edilen sonuçlar, sprey kurutma yöntemleriyle hazırlanan mikrokapsüllü FDM'lerin 145–240 kJ/kg civarında ısıl enerji depolama/salma kapasitesi olduğunu göstermiştir. Güneş enerjisi depolama malzemesi olarak mikrokapsüllenmiş parafin mumu kullanarak iyi bir başarımla elde edilmiştir (Yinping ve ark., 2007; Khudhair ve Farid, 2004).

Her iki kapsülleme yönteminin de bazı sorunları vardır. FDM'lerin makrokapsüllemesi pahalı fakat güvenli bir yöntemdir ve yapı elemanının çalışmasını engellemez. Mikrokapsüllenmiş FDM'leri ise yapı malzemesi ile birleştirmek çok etkindir ancak malzemenin mekanik dayanımını etkileyebilir (Cabeza ve ark., 2007).

2.4 Faz Değişim Malzemelerinin Mimari Uygulamaları

FDM'ler ilk defa 1940'larda binalarda uygulanmaya başlanmış ve zamanla kullanım yoğunluğu artmıştır. İlk uygulamalar, daha çok malzemelerin aktif bina ısıtma sistemlerine enerji deposu olarak entegre edilmesidir. Bunun sonucunda FDM kullanılan sistemler başarılı görülmüş ve 1980'lerden beri çeşitli biçimlerde kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, bu ilk ticari FDM ürünleri, küçük yüzey alanları nedeniyle doğrudan güneş ışınımı ile pasif binaların ısıtılmasında yetersiz kalmıştır (Khudhair ve Farid, 2004). Oysa yapı kabuğu ve duvarları, pasif ısı transferi için geniş alan sağlamaktadır.

Değişik araştırmacılar, FDM'li yapı elemanları geliştirmek amacıyla; yapı elemanlarının ısıl özelliklerinin belirlenmesi, yapı elemanları kullanılarak test

hücreleri oluşturup iklimsel değişimlere karşı ısı davranışlarının ölçülmesi, bu ısı davranışların modelleme aracılığıyla tahmin edilmesi ve benzeri yöntemleri kullanmaktadır. Tamamen yeni yapı elemanları geliştirmek yerine inşaatlarda yaygın kullanılan yapı elemanlarının ısı depolama kapasitesini arttırmak daha çok tercih edilmektedirler. Bu çalışmalar, yapıdaki kullanım yerine göre; yapı kabuğunda ve iç mekanlarda olmak üzere iki ana başlıkta sınıflandırılabilir.

2.4.1 Yapı Kabuğu Üzerine Gerçekleştirilen Çalışmalar

Yapı kabuğu üzerine yapılan ilk çalışmalardan biri Faruk ve Guceri tarafından 1979 yılında gerçekleştirilmiştir (Tyagi ve Buddhi, 2007). Bir konutu gece ısıtmak amacıyla, duvarda FDM olarak Glauber tuzu karışımı ve Sunoco P-116 balmumu kullanılmıştır. Daha sonra, 1980 yılında, Bourdeau, faz değişim noktası 29°C olan kalsiyum klorür heksahidrat kullanılmış iki pasif toplayıcı duvarı test ederek 8,1 cm kalınlığındaki faz değişim duvarının yaklaşık 40 cm kalınlığındaki taş duvar kadar ısı başarımlarını gösterdiğini bulmuştur (Tyagi ve Buddhi, 2007).

Yapı kabuğu üzerine geliştirilen diğer bir çalışmada, dolaylı kazanç yaklaşımının önemli örneklerinden, Trombe duvarı kullanılmıştır. Bu sistemde, masif bir güney duvarının önüne cam getirilerek arada kalan hava sera etkisiyle ısıtılmaktadır. Isıtılan hava, duvarın altına ve üstüne açılan delikler yardımıyla mekana dağıtılmaktadır. Swet, 1980, Chandra ve ark., 1985, ve Ghoneim ve ark., 1991, Trombe duvarında FDM kullanılmasını araştırmışlardır (Tyagi ve Buddhi, 2007). Bu çalışmalarda, Trombe duvarındaki gizli ısı depolama incelenerek, FDM’li daha ince bir Trombe duvarının, geleneksel karkas Trombe duvarına kıyasla daha uygun olduğu gösterilmiştir. Knowler (1983) çalışması ile Trombe duvarının genel iletkenliği ve verimini arttırmak için parafine metalik katkı maddeleri eklemiştir.

Stritih ve Novak (1996), ısı depolama aracı olarak 25-30°C faz değişim aralığına sahip siyah parafin içeren bir “güneş duvarı” tasarlamıştır. Depolanan ısının bir evin ısıtma ve havalandırmasında kullanıldığında sistemin emilim verimliliği % 79’dur. Güneş enerjisinin gizli ısıya çevrimi ile çevreye ışınlım ve taşınım ile ısı kayıpları

engellenmekte, aynı zamanda iletim kayıpları azalmakta ve elemanın ısı yalıtım özelliği de iyileştirilmektedir. Modelleme sonuçlarına göre, FDM'nin depoladığı enerji ve malzemenin faz değişim noktası iç mekan sıcaklığını etkilemektedir. Isıtma sezonu için analiz yaparak, FDM için en uygun kalınlık ve faz değişim noktası araştırılmıştır. İdeal faz değişim sıcaklığı oda sıcaklığının birkaç derece üzerinde bulunmuştur.

Kara, Arslantürk ve Kurnuç Çırakman (2010), dış yüzeyinde ortada prizmatik kesimli güneş yönlendirme camı bulunan, üç camlı şeffaf yalıtım ünitesi yerleştirilmiş FDM'li bir Trombe duvarı tasarlamıştır. Duvarda standart dış sıva harcına agreganın kütleli olarak % 33'ü oranında granüler FDM katılarak elde edilen 2,5 cm kalınlığında ve 40 cm x 40 cm boyutlarında FDM içeren sıva levhaları kullanılmıştır. Levhalarda ve test odasında iki farklı faz değişim sıcaklığına (35 ve 41) sahip FDM kullanılmıştır. Erzurum'da bir deney odasında duvarın ısıtma dönemi başarımını, 20 °C'ye ayarlanan termostat kumandalı ısıtıcıların elektrik tüketimini inceleyerek değerlendirmiştir. Kullanılan şeffaf yalıtım ünitesinin güneş geçirme oranı mevsimsel değişiklik göstermektedir. Ekim-Mart ayları arasında % 45 – % 55 oranında güneş geçiren elemanın Nisan – Eylül döneminde % 20 - % 25'e düştüğü gözlemlenmiştir. İncelenen Ekim -Mayıs döneminde test odasının ısıtma ihtiyacını karşılama oranı sırasıyla % 70,4, % 40,8, % 14,2, % 9,4, % 11,3, % 4,3, % 0,0, % 0,0 ve % 0,0 olarak belirlenmiştir. Faz değişim sıcaklığı 35°C olan duvarın verimi % 25 - % 40, 41°C olanın ise % 20 - % 35 aralığında değişmiştir.

Chahroudi (1976), uygun FDM'nin beton matrisi ile birleştirilmesi için potansiyel uygulama alanlarını araştırmıştır (Tyagi ve Buddhi, 2007). Bu sayede neredeyse izotermal depolamaya ulaşabilen blokların çalışması, başarımı ve çeşitli uygulamalarda getireceği enerji tasarrufu ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Collier ve Grimmer (1979) ise, yığma yapı bloklarına makrokapsüllenmiş FDM ekleyerek blok başarımında beton hacmine eşdeğer artış olduğunu göstermiştir (Tyagi ve Buddhi, 2007).

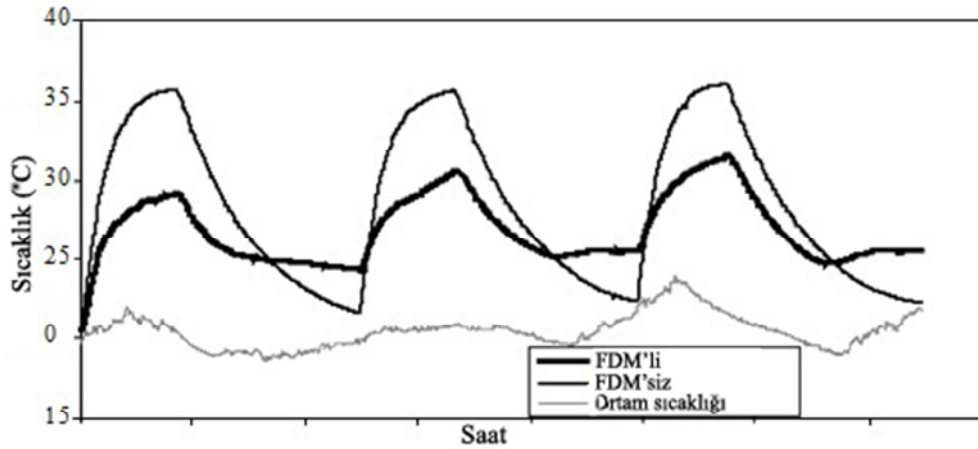
Hawes, Banu, ve Feldman, (1990) ve Hawes ve Feldman (1992) butil stearat, dodecanol, parafin ve tetradecanol maddelerinin farklı beton blok tiplerinin ısı başarımına etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında; beton alkalinitesi, sıcaklık, daldırma süresi ve FDM seyreltisinin emme işlemine etkisi ele alınmıştır. Emilim mekanizmalarını ve betonda istenilen enerji depolama kapasitesine ulaşmanın yollarını araştırarak, kullandıkları yeni tekniklerle betonun ısı depolamasında % 300'e kadar artış sağlamışlardır.

Lee ve ark. (2000), normal beton blok ile iki tür FDM olan butil stearat ve ticari parafin emdirilmiş beton blokların ısı depolama başarımını karşılaştırmak için testler gerçekleştirmiştir. Çalışmada, Portland çimentosundan yapılmış normal blok ile Portland çimentosu ve silikadan oluşan otoklavlanmış bloklar test edilmiştir. Erimiş FDM dolu bir banyoya, ısıtılmış beton blok yerleştirilerek blok gerekli miktar olan kütleli olarak (% 3,9-8,4) emilime ulaşana kadar bekletilmiştir. Sonuçta, beton blokların FDM sayesinde daha yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olduğu gösterilmiştir.

Hadjieva, Stoykov, ve Filipova (2000), Lee ve ark. (2000)'nın kullandığı emdirme tekniğini sodyum tiyosülfat penta hidrat FDM ile uygulamışlardır. Bu uygulama ile beton gözenek ve kılcal alanların % 60'ı doldurulmuş, otoklavlanmış gözenekli betonun FDM için iyi bir matris olarak hizmet verdiği gösterilmiş ve yapısal kararlılığa olumsuz etkisi olmadığı sonuçlarına varılmıştır. Araştırılan sistemin ısı kapasitesi yüksektir ve faz değişim aralığı 10°C alınmıştır. Böylece, mikrokapsülleme ile ucuz tuz hidratlarının FDM olarak kullanımındaki süper soğuma ve faz ayrışması gibi sorunların giderilmesinde etkili olabileceği gösterilmiştir.

Farid ve Kong (2001), birinin içerisinde küreler içine kapsüllenmiş FDM bulunan iki beton plak inşa etmiştir. Üretim sırasında etraftan gelebilecek zararlı gerilmeleri önlemek için sert plastik küreler kullanmıştır. Kalsiyum klorid heksahidrat (faz değişim sıcaklığı 29°C), FDM içeren kürelerde, erime sırasındaki hacim genişlemesini karşılamak için yaklaşık % 10 boşluk bırakılmıştır. Beton plakların başarımı deneysel olarak test edilerek karşılaştırılmıştır. Betona FDM kürelerin

eklenmesiyle betonun ısı kütlesi önemli ölçüde artmıştır (Şekil 2.2). Normal beton plak depoladığı ısıyı bir kaç saat içinde kaybederken, FDM'li beton plak ile sadece 8 saatlik elektrikle yerden ısıtma ile tüm gün için mekanda konfor koşulları sağlanmıştır. Fakat uygulamanın gerçekleştirilebilmesi için önce kürelerin betonun mekanik gücüne etkilerini değerlendirmek gerekmektedir.



Şekil 2.2 FDM'li betonlu yerden ısıtma sistemi ile FDM'siz sistemin başarımının karşılaştırılması (Farid ve Kong, 2001).

Ibanez ve ark. (2005), TRNSYS modelleme programı ile duvar/tavan/zeminde FDM kullanımının tüm binanın enerji dengesine, özellikle soğutma üzerine, etkilerini araştırmıştır. Sıcaklığın tepe değeri ve buna bağlantılı olarak mekanik tesisat maliyeti düşürülebilir. Bu değerlerle doğrudan etkin olan FDM miktarını azaltmak için;

- (1) FDM'nin odanın tavanında veya batı duvarında yer alması,
- (2) Odanın hava sıcaklığını düşürmek için panellerin depolama kapasitesinin 15.000 ile 37.500 kJ/m³ civarında olması ve
- (3) Ele alınan Akdeniz iklim koşulu için seçilen faz değişim sıcaklık aralığının 25-27,5°C olması önerilmektedir.

Bu öneriler dikkate alınarak yapılan modellemede ortalama en yüksek ortam sıcaklığının 3°C azaldığı görülmüştür.

Zhang ve ark. (2005), konut yapılarında havalandırma yüklerini azaltmak amacıyla bir karkas duvar sistemi önermiştir. Bu çalışmada, içinde makrokapsüllü

kristalize parafin kullanılan duvar test edilerek değerlendirilmiştir. Sonuçlar, duvarın en üst sınırdaki ısı akısını % 38'e kadar azalttığını göstermektedir. Bu durum, binanın iç hava sıcaklığı görece sabit tutulurken, mekanik havalandırma gereksiniminin azalması ve ısı yükünün bir kısmının günün diğer zamanlarına kayması anlamına gelmektedir. Kış şartlarında mekanik tesisat kaynaklı ısı, duvarda depolanarak mekana geri kazandırılıp tesisatın etkinliği ve ömrü artırılmaktadır.

Castellón ve ark. (2009a), geleneksel sandviç panellere mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesi ile panellerin ısı ataletini artırarak yapıların enerji gereksinimlerinin azaltılması için üç farklı üretim yöntemini araştırmışlardır. Bunlar:

(1) Standart üretim sırasında mikrokapsüllenmiş FDM'nin sıvı yapı malzemelerinden biri ile karıştırılması,

(2) Mikrokapsüllerin poliüretan eklenmeden önce üretime eklenmesi, ve

(3) Mikrokapsülleri poliüretan eklendikten sonra üretim sürecine eklenmesi şeklindedir. Üretilen FDM katkılı sandviç panellerin özellikleri araştırılırken FDM dağılımı stereoskopla incelenmiş, metal levhalar ile poliüretanın yapışma testi ve ısı performans testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta birinci üretim yönteminde istenilen doğrultuda kabul edilebilir sonuçlar elde edilmiş, ikinci ve üçüncü yöntem kullanımında ise sonuçların iyileştirilmesi için sürecin endüstrileşmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Cabeza ve ark. (2007), betonun ana özelliklerini kaybetmeden ticari mikrokapsüllenmiş FDM kullanılarak oluşturulduğu bir hücre inşa etmişlerdir. İçten içe 2,4 m x 2,4 m x 2,4 m boyutlarındaki bu hücrenin yanına, referans olarak kullanılmak üzere aynı boyutlarda ancak normal betondan bir başka hücre daha inşa edilmiştir. Sonuçta, 2005'ten 2008'e kadar her iki hücrenin de davranışı ölçülerek, hücrelerin sıcaklık salınımları arasında 4°C'ye kadar fark olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra hücrelere gölgelik elemanı eklenmiştir ve bu durumda, güney duvarı sıcaklığının daha da azaldığı görülmüştür (Castellón ve ark., 2009b). Pencereler açıkken hem FDM'li hem de normal hücreler gölgelendirildiğinde, güney duvarında en yüksek ve en düşük sıcaklıkların 5°C ile 6°C, batı duvarında 4°C ile 1,5°C ve çatıda 11°C ile 1°C azaldığı gözlemlenmiştir. Pencereler kapalı konumdayken en yüksek

sıcaklıklarda 5-6°C'lik, en düşük sıcaklıklarda ise 1,5°C'lik bir azalma tespit edilmiştir.

Castell ve ark. (2009b), bu hücrenin yanına Akdeniz iklim Bölgesinde kullanılan tipik yalıtım, yapım malzemeleri ve tipik yapım biçimleri kullanılarak aynı boyutlarda başka pek çok hücre daha inşa etmişler ve bu hücrelerin zaman içindeki ısı performanslarını ölçmüşlerdir (bakınız Şekil 2.3). Hücrelerde ısıtma/soğutma sistemi olarak ısı pompası kullanılmış ve kullanılan enerji gözlemlenmiştir. İklimlendirme sistemi yaz ayında 20°C'den yükseğe ayarlandığında FDM'li hücrede normal hücreden daha az enerji harcanmıştır. Ancak 20°C'den daha düşük sıcaklıklara ayarlandığında FDM düzgün eremediğinden, etkinliği azalmıştır. Benzer şekilde kışın, iklimlendirme kullanılmadığında, FDM'li hücrelerde daha iyi iç ortam sıcaklıklarına ulaşılmıştır.



Şekil 2.3 Puigverd de Lleida'daki hücreler (Castell ve ark., 2009b).

Konuklu ve Paksoy (2009), yapı kabuğuna doğrudan mikrokapsüllenmiş FDM uygulamasının ısıtma soğutma yükünü azaltmada ne kadar etkili olduğunu araştırmıştır. Adana ilindeki 4 m²'lik prefabrik bir kulübeye (Şekil 2. 4) 35 x 30 cm boyutlarında 5 cm kalınlığında alüminyum folyo makro paketler içinde faz değişim sıcaklığı 23°C olan Micronal 5008 ve faz değişim sıcaklığı 26°C olan Micronal 5001 yerleştirilmiştir. Temmuz ayı boyunca hücrenin FDM'siz ve FDM'li olarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. “Stat ease design pro” programı ile yapılan istatistiksel

analizler sonucu FDM'siz kulübe ile karşılaştırıldığında, mikrokapsüllenmiş FDM'lerin yazın soğutma yüküne %5-10; kışın ısıtma yüküne ise % 10-20 arası katkı sağladığını belirlemiştir.



Şekil 2.4 İç kaplama performans değerlendirmesi için inşa edilen hücreler (Konuklu ve Paksoy, 2009).

Kumar ve ark. (2009) sıcak tropik iklimlerde, iklimlendirilmeyen binalarda ve araçlarda kullanılmak üzere çift yağ asidi (Palmitik - laurik asit) kullanan yeni bir FDM geliştirmişlerdir. Diferansiyel taramalı kalorimetri sonuçları 36-38°C'de gizli ısı değişim piki gerçekleştiğini ve 38-40°C'de ikinci bir faz değişiminin olduğunu göstermiştir. Dış duvarları yonga levhadan yapılmış bir prototip hücre inşa ederek içini sözü geçen FDM ile dolu alüminyum panellerle kaplayan araştırmacılar, hücrenin dış ve iç yüzey sıcaklıklarını tüm yaz boyunca kızılötesi termometre kullanarak ölçmüşlerdir. Sonuçlar, hücrede tepe sıcaklıklarının 10-15°C düşürüldüğünü ve yaz boyunca FDM'nin erime-donma döngüsünün sağlandığını göstermiştir.

Buddhi ve Sharma (1999), bir FDM'nin (stearik asit) güneş ışınımı geçirgenliğini farklı sıcaklık ve kalınlıklar için ölçmüştür. Çalışmanın sonucunda, stearik asidin geçirgenliği aynı kalınlıkta camdan daha yüksek bulunmuş ve böylece malzemenin pencerelerde ve duvarlarda şeffaf yalıtım malzemesi olarak uygulanabileceğini göstermişlerdir.

Ismail ve Henriquez (2001), FDM'nin hareketli bir perde olarak kullanıldığı, ısıl etkin çift tabakalı bir pencere sistemi geliştirmişlerdir. Pencerenin alt kısmındaki iki delik vasıtasıyla FDM plastik boru ile bir tanka bağlanmıştır. Sıcaklık önceden belirlenmiş bir değere ulaştığında pompa çalışmakta ve cam arasındaki boşluğu tanktan gelen sıvı FDM ile doldurmaktadır. Bu durumda, dış yüzeydeki düşük sıcaklık, FDM'nin zaman içinde donmasını sağlamaktadır ve dolayısıyla iç ortamın sıcaklık kaybetmesini engelleyen bir tabaka oluşturmaktadır. FDM'li sistem iyi tasarlandığında, FDM katılaşmasını tam bitirmeden dış sıcaklık artmaya başlayacaktır. FDM ile doldurulmuş çift cam pencere, hava ile dolu aynı pencereden hem ısı kazançlarını veya ısı kayıplarını, hem de güneş ışınım kazançlarını azaltmada daha etkilidir.

Benard ve ark. (1981), Peru'da bir köyde kuluçka tavuk için kullanılan bir yapıya izotermale yakın koşulları sağlayan FDM'li çatı elemanlarını yerleştirmişlerdir. Hava sızdırmaz bir cam çatının altına iki yarı-dairesel FDM dolu (her biri 42 kg parafin içeren) tanklar yerleştirmiş, geceleri cam çatı ile parafin tanklar arasına kalın poliüretan yalıtım yerleştirerek mekanın sıcaklığını 22°C ile 30°C arasında sabit tutmuşlardır.

Pasupathy ve Velraj (2008), bir konut yapısının çatısında FDM kullanılmasını hem sayısal hem de deneysel olarak araştırmıştır. Sayısal çalışmada sonlu hacim yöntemi kullanarak FDM'nin ısıl davranışını tahmin etmeye yönelik bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, geliştirilen model ile iki ay süresince izlenen iki test hücresinde gerçekleştirilen deneysel çalışma karşılaştırılmıştır. Modelin geçerliliği onaylandıktan sonra değişik koşullar için modellemeler yapılarak başlangıçta önerilen FDM'nin kış mevsimi için uygun olduğu, yaz mevsiminde ise aşırı ısınmaya neden olduğu bulunmuştur. Bu durum yaz mevsimi için etkili ikinci bir FDM katmanı gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

2.4.2 İç Mekanlar Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışmalar

Bir binanın inşaatı veya yenilenmesi sırasında normal duvar kaplaması yerine FDM emdirilmiş duvar paneli monte edilebilir. Bu elemanın kullanımı ile bina içinde ısı depolama dağıtılabilir. Özellikle alçı paneller dünyanın her yerinde kullanılmaktadır ve hacminin yaklaşık % 41'i hava boşluğuyla dolu olup yapısal matrisi FDM için ideal bir ortam yaratır. Faz değişimli duvar panelleri üzerine analitik çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, elemanların ısı dinamiğiyle ilgili bazı ana kurallar belirlenebilmiştir (Shapiro ve ark., 1987; Rudd, 1993; Kedl ve Stovall, 1989; Salyer ve Sircar, 1990; Peippo ve ark., 1991a; 1991b; Hawes ve Feldman, 1992; Stovall ve Tomlinson, 1995; Athienitis ve ark., 1997; Feustel ve Stetiu, 1997).

Shapiro ve ark. (1987), alçı panel ve diğer mimari bileşenlere FDM ekleme yöntemlerini araştırmışlardır. Florida ikliminde, ısı depolama uygulamaları için alçı duvar panellerine eklenmesi mümkün FDM türlerini ve özelliklerini tanımlamışlardır. Araştırılan malzemeler, nispeten yüksek gizli ısı kapasitesine sahiptir. Fakat, faz değişim sıcaklık aralıkları sıcak iklimli binalarda ısı depolama için gerekli konfor aralığında olmadığı için daha uygun malzemelerin belirlenmesi ve test edilmesi gerekliliği sonucuna varmışlardır.

Chandra (1989), kapsamlı bir kaynak taraması ile ticari hindistan cevizi yağ asitlerinin Shapiro tarafından test edilen malzemelerden daha uygun erime/donma sıcaklık aralıkları olduğunu iddia etmiş ve ispatlamıştır (Rudd, 1993). Küçük ölçekli diferansiyel taramalı kalorimetre testleri ile oda ölçekli testler arasında sadece % 8,7'lik bir fark gözlemlemiştir. Bu nedenle, FDM'nin büyük ölçekli uygulamasına gerek kalmadan diferansiyel taramalı kalorimetre kullanılarak duvar ısı performansının kestirilebileceği belirtilmektedir. FDM duvarının, 11°C sıcaklık değişimi süresince geleneksel duvara oranla 2,1 kat daha fazla ısı depolama kapasitesine sahip olduğunu bulunmuştur.

Kedl ve Stovall (1989), FDM'li duvar panellerinin yangın dayanımına ilişkin araştırmalar yapmışlardır. Testlerde % 15 ila % 20 oranında FDM uygulaması

sonrasında çözünmeyen bir yangın geciktirici ilavesinin alevlenme riskini en aza indirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, uygulama analitik bir model ile de irdelenmiştir. Analiz sonuçları, daldırma yönteminin, üretim sırasında duvar paneline mum dolu granül eklemekten daha yüksek depolama kapasitesi elde etme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Salyer ve Sircar (1990), alçı panellerde görülebilen sızıntı, erime ve donma sırasında hacim genişlemesi sorunlarını ortadan kaldırmak için petrol türevlerinden elde edilen düşük maliyetli bir doğrusal alkil hidrokarbon FDM tanımlamışlardır. Başarılı bir şekilde küçük boyutlu örneklerde tam boyutlu alçı panellere mum emdirme işlemini, hem üretim sonrası FDM'ye daldırma yöntemi ile hem de üretimin ıslak kısmında FDM ekleme yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Küçük ölçekli testlerde 10 dakikadan az sürede FDM bileşik ağırlığının % 30 kadarı emdirilmiştir. Laboratuvar deneyleri sonucunda, enerji depolama kapasitesinden en az kayıpla yapı elemanlarının yangına dayanıklı hale getirilmesi için elemana emdirilen FDM miktarının azaltılmasını veya FDM'ye yangın geciktirici emdirilmesini önermişlerdir.

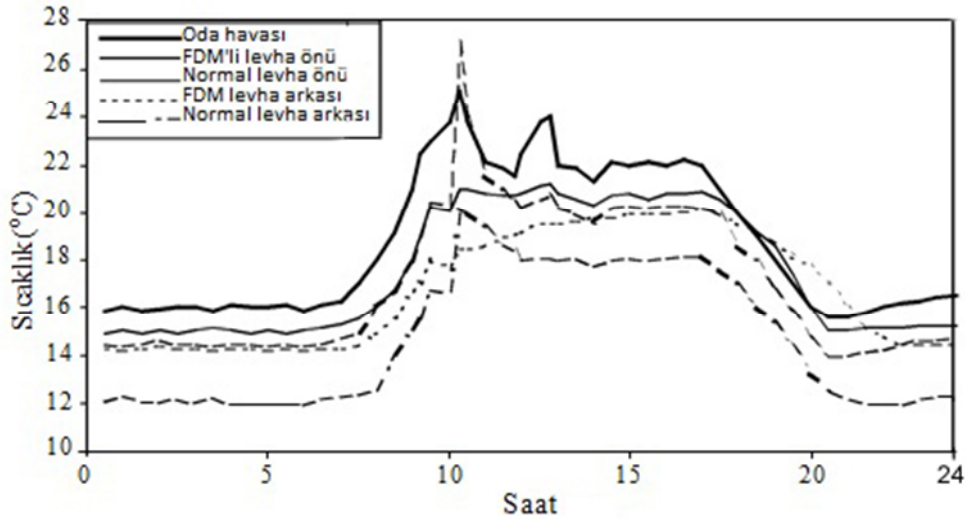
Feldman ve ark. (1991), gizli ısı depolama için organik bileşiklerin kullanımı ve kararlılığı üzerine kapsamlı bir araştırma yürütmüştür. FDM'lerin özellikleri yanında, faz değişim emicileri olarak adlandırdıkları; beton, alçı ve farklı türde yapı malzemelerinin özelliklerini de araştırmışlardır. FDM olarak 16-20,8°C faz değişimi sıcaklık aralığına sahip butil stearat kullanarak alçı panel üretip ısıl özelliklerini diferansiyel kalorimetre taraması ile ölçmüşlerdir. Geleneksel alçı panel üretiminin karıştırma sürecinde, panele % 21-22'lik ticari butil stearat eklenmesi, standart alçı panellere kıyasla, enerji depolama ve boşaltma kapasitesinde on kat artış sağlamıştır.

Peippo ve ark. (1991a; 1991b), 120 m²'lik pasif bir güneş evinde FDM emdirilmiş alçı panel kullanımını incelemiştir. İyi yalıtılmış ve güneşe bakan geniş cam yüzeyi olan konut, Madison, Wisconsin, ABD'dedir. Konutta yılda 3 GJ veya yıllık enerji ihtiyacının % 15'i kadar enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca, sadece doğrudan güneş ışınımı ile ısıtmada, günlük ısı depolama için en uygun FDM

çalışma sıcaklığının ortalama oda sıcaklığının 1-3°C üzerinde olması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Başka bir çalışmada, Hawes ve Feldman (1992), FDM'li alçı panelleri pasif binalarda kullanarak aşırı oda ısınmasının ne kadar azaltılabileceğini ve ne kadar enerji tasarrufu sağlanabileceğini araştırmıştır. Stovall ve Tomlinson (1995), ısıtma ve soğutma yüklerini elektrik kullanımının en az olduğu zamana kaymasını incelemiş, ancak en uygun FDM özelliklerine dair genel sonuçlara ulaşamamışlardır.

Athienitis ve ark. (1997), iç mekanında FDM'li alçı paneli duvar içi kaplama olarak kullanan tam ölçekli bir test hücresinde, kapsamlı deneysel ve tek boyutlu doğrusal olmayan sayısal modelleme gerçekleştirmiştir. Alçıpan duvar ağırlığının yaklaşık % 25'i bitül stereat içermektedir. Duvardaki ısı transferini simüle etmek için sonlu farklar yöntemini kullanan bir model geliştirilmiştir. Şekil 2.5'ten görüldüğü gibi, gerçekleştirilen modelleme ve deney sonuçları kabul edilebilir örtüşme göstermiştir. Sonuçta panelin kullanımı ile ölçülen en yüksek gündüz oda sıcaklığı, 30°C'den 26°C'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Bu FDM'li panellerin pasif güneş binalarındaki aşırı ısınma sorununda kayda değer azalma sağlayabileceğini göstermiştir. Ayrıca 7-11 saat arasında gerçekleşen donma sürecinde 20 m²'lik duvardan odaya yaklaşık toplam ısıtma yükünün % 15'i kadar ısı transferi gerçekleşti



Şekil 2.5 Tipik güneşli bir kış günü için deney sonuçları (Athienitis ve ark., 1997).

ği hesaplanmıştır. Böylece FDM'li duvar kullanımı ile gece ısıtma yükünün önemli ölçüde azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Feustel ve Stetiu (1997), FDM'li çift duvar panel ile mekanik soğutma kullanmadan odanın konfor koşullarında tutulması için binanın ısı depolama kapasitesini artırmayı incelemiştir. Sunnyvale için gerçekleştirilen bir odanın modelleme sonuçları, hava sıcaklıklarında kayda değer düşüş göstermiştir. Her ne kadar modellemeler FDM'li duvarların kapasitesini gösterse de araştırmacılar bir odanın kabuğunu soğutmak için hava taşımalarını ısı transferinin çok etkin olmayan bir yolu olarak yorumlamışlardır. Araştırmalara göre, sıcak dönemlerde soğutma amaçlı boşalma kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı depolama kapasitesinin artırılması, ısı transferinin etkin olmaması nedeniyle depolamanın başarısızlığına neden olabilmektedir.

Stetiu ve Feustel, 1998 yılında sonlu farklar yaklaşımı kullanan bir bina modelleme programı kullanarak FDM'li duvar panellerinin gizli ısı depolama performansını değerlendirmiştir (Pasupathy, Velraj, ve Seeniraj, 2008). Gece dış ortam sıcaklığının 18 °C'nin altına düştüğü iklimlerde, FDM'li duvar ile mekanik gece havalandırmasının birlikte kullanılması durumunda mekanik sistemin küçültülebileceğini belirlemişlerdir. Kaliforniya'da bulunan bir bina örneğinde FDM'li duvarın en yüksek soğutma yükünün % 28 azaltılabileceğini göstermişlerdir.

Kissock ve ark. (1998), ağırlığının % 30'u ticari parafin (K18) emdirilmiş duvar panellerinin, basit yapılardaki ısı başarımlarını deney ve modelleme ile araştırmışlardır. Test ve kontrol hücreleri için; güneş ışınımı, ortam sıcaklığı ve hücre iç sıcaklığını on dört gün boyunca takip etmişlerdir. Sonuçlar, güneşli günlerde bile test hücresindeki en yüksek sıcaklığın, kontrol hücresindekinden 1°C ile 10°C daha az olduğunu göstermiştir. Modifiye edilmiş sonlu farklar yöntemi kullanarak yapılan modelleme ile test hücrelerinin, iç duvar sıcaklıklarını makul bir doğruluk oranıyla kestirmişlerdir.

Neeper (2000), direk güneş ışığı almadan günlük sıcaklık değişimi gösteren bir odada, yağ asitleri ve parafin mum emdirilmiş alçı panellerin ısı dinamiğini incelemiştir. FDM'li panellerin günlük döngüde enerji dolma ve boşalma mekanizmalarını etkileyebilecek üç parametreyi araştırmıştır. Bunlar:

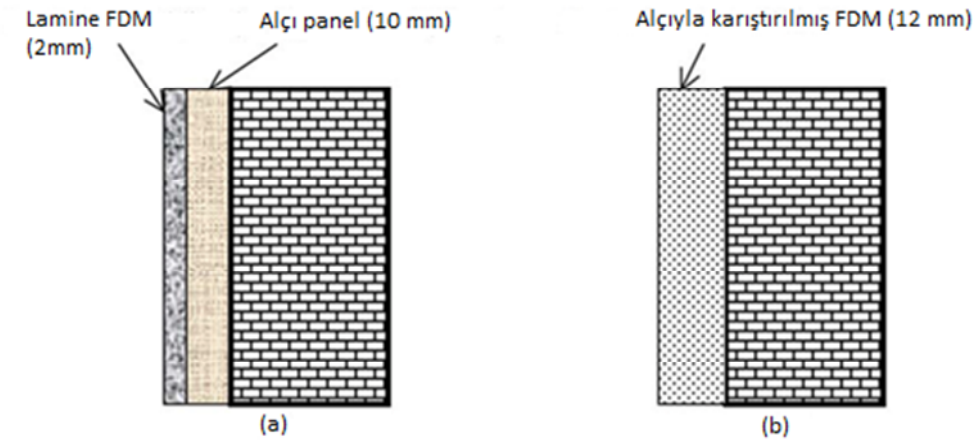
- (1) Faz değişim sıcaklığı,
- (2) Faz değişiminin meydana geldiği sıcaklık aralığı ve
- (3) Birim duvar panel alanı başına gizli ısı kapasite değeri şeklindedir.

Çalışmada, çoğunlukla en fazla enerji depolamanın faz değişim sıcaklığının oda konfor sıcaklığına yakın olduğunda meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durumda, FDM'li duvar paneli tarafından sağlanan günlük enerji depolamasının, mekanı ısıtmaya yeteceği sonucuna varılmıştır.

Kalousck ve Hirs (2002), bir konutun tavan arasında FDM'li duvar paneli kullanımını modellemiştir. Tavan arasında biri geleneksel duvar paneli, diğeri FDM'li duvar paneli kullanılmış iki oda araştırılmıştır. FDM'nin faz değişim sıcaklığı 29°C'dir ve FDM'li duvar paneli, ağırlığının % 30'u kadar FDM barındırmaktadır. Uygulama sonucunda, odanın yüzey sıcaklıklarının 3,5°C, hava sıcaklığının ise 2,5°C azalacağı hesaplanmıştır.

Kim ve Darkwa (2002), Darkwa ve Kim (2004, 2005) ile Darkwa ve O'Callaghan (2006), lamine ve üretim sürecinde FDM karıştırma yöntemi ile üretilen FDM'li duvarların ısı performanslarını, deneysel ve sayısal çalışmalarla araştırmışlardır (Şekil 2.6). Sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- (1) Lamine sistem ile % 17 ısı geri kazanımı elde edilmiştir,
- (2) Lamine sistem ile ısı akısında % 20-50 gelişme sağlanmıştır,
- (3) Lamine sistemle ısı transfer oranı % 7-18 artırılmıştır, ve
- (4) Lamine duvar gece en düşük oda sıcaklığını, karıştırma duvar tipine göre yaklaşık % 17 daha fazla arttırmıştır. Ancak, lamine üretim tekniğinin FDM'li duvarda kullanılabilmesi için FDM'nin kapsüllenmesi gerekmektedir.



Şekil 2.6 (a) lamine FDM sistemi, (b) karıştırılmış FDM sistemi (Darkwa ve O'Callaghan, 2006).

Heim ve Clarke (2004), çok bölgeci, bol camlı ve doğal havalandırılmalı pasif bir bina kabuğunun iç kısımlarında, FDM'li alçı panel kullanımını modellemiştir. ESP-r programı ile gerçekleştirilen modelin sonuçları alçı panelin ısı depolamasının, ısıtma sezonunda gereken enerji miktarının % 90'a kadar azaltılabildiğini göstermektedir.

Zhou ve ark. (2007), karıştırma yöntemi ile elde edilmiş FDM'li alçı plakların ve şekli sabitlenmiş FDM plakaların ısısal başarımlarını Pekin'de pasif bir bina için entalpi yöntemiyle analiz etmiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Deney sonucunda:

- (1) Faz değişim aralığı daha dar olan FDM kompozitlerinin daha iyi ısısal başarımlar sağladığını,
- (2) İç mekan sıcaklık dalgalanmalarının FDM'li alçı panel kullanımı ile % 46, şekli sabitlenmiş FDM plaka kullanımı ile % 56 azaldığını, ve
- (3) Şekli sabitlenmiş FDM plakalarının sıcaklık salınımlarına daha hızlı cevap verdiğini görmüşlerdir.

Mehling ve ark. (2002), ahşap katkılı hafif beton karışımına iki farklı FDM (1-3 mm boyutlarında Rubitherm GR40 veya 0,2-0,6 mm boyutlarında GR50) eklemiştir. Deneysel çalışmada, çimentoya ağırlığının % 15'ini geçmeyen talaş, su ve katkı maddeleri eklenerek oluşturdukları karışımın iç veya dış duvar inşaatında kullanılabileceğini göstermişlerdir. Ayrıca, FDM'nin ahşap katkılı hafif beton ile karıştırılmasının, betonun mekanik özelliklerinde de önemli bir değişikliğe neden

olmadığı görülmüştür. Araştırmacılar, malzemenin avantajları arasında iyi ısı iletkenlik, ses yalıtımı ve yüksek ısı kapasitesini saymaktadırlar.

Zamalloa ve ark. (2009), bileşiminde FDM içeren bir sıva geliştirmişlerdir. Sıvanın ısı özelliklerini belirlemek için faz değişim entalpisi ile faz değişim sıcaklığı ölçülmüş ve mikro strüktür incelenmiştir. Ayrıca “Energy Plus” programı kullanılarak gerçekleştirilen ısı modelleme sonuçları doğrultusunda 2,5 m x 2,5 m x 2,5 m boyutlarında, biri referans olarak kullanılacak iki test hücresi Vitoria’da inşa edilerek bir yıl boyunca gözlemlenmiştir (Şekil 2.7). Sonuçta, duvardaki ısı atalet artışı ile sıcaklığın en yüksek olduğu zamanın 2 saat kaydığı, enerji depolaması ile duvarlardaki en yüksek sıcaklığın 2°C’ye kadar düştüğü, FDM’li sıvanın yapı içindeki ufak ısı dalgalanmalarını yok ettiği ve hücrenin enerji gereksinimini ısıtma için % 10-15, soğutma için ise % 30 azalttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.7 İç sıva performans değerlendirmesi için inşa edilen hücreler (Zamalloa ve ark., 2009).

Stamatiadou ve ark. (2009), Atina’da tipik bir seranın FDM içeren mermer zemin karoları ile kaplanması ile ısı enerji kazanç potansiyelini bir bilgisayar modeli

kullanarak araştırmışlardır. Çalışmada, ana binaya bağlı güneye bakan çift camlı bir serada üç tip karo kullanılmıştır. Bu karolar;

(1) Geleneksel,

(2) Kütlesinin % 10'u kadar FDM içeren, ve

(3) Kütlesinin % 20'si kadar FDM içerecek şekilde tasarılmıştır. Sonuçlar, normal karoya karşın, % 10 FDM içeren karo kullanımı ile % 1,85, % 20 FDM içeren karo kullanımı ile de % 3,75 enerji kazancı sağlanabileceğini göstermiştir.

Bugüne kadar FDM'li yapı elemanları üzerine yapılan çalışmalar, bu elemanların binalara kolayca uygulanabileceğini ve dağılmış ısı depolama etkisinin başarılı olduğunu göstermiştir. Ancak gerekli depolama büyüklüğünü elde etmek için, FDM'li elemanların avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurmak, faz değişim sıcaklık aralığı konfor sıcaklığına yakın ve daha yüksek gizli ısı kapasitesine sahip yeni FDM'ler ve yapı elemanları geliştirmek gerekmektedir (Zhou ve ark., 2007; Farid ve ark., 2004).

BÖLÜM ÜÇ

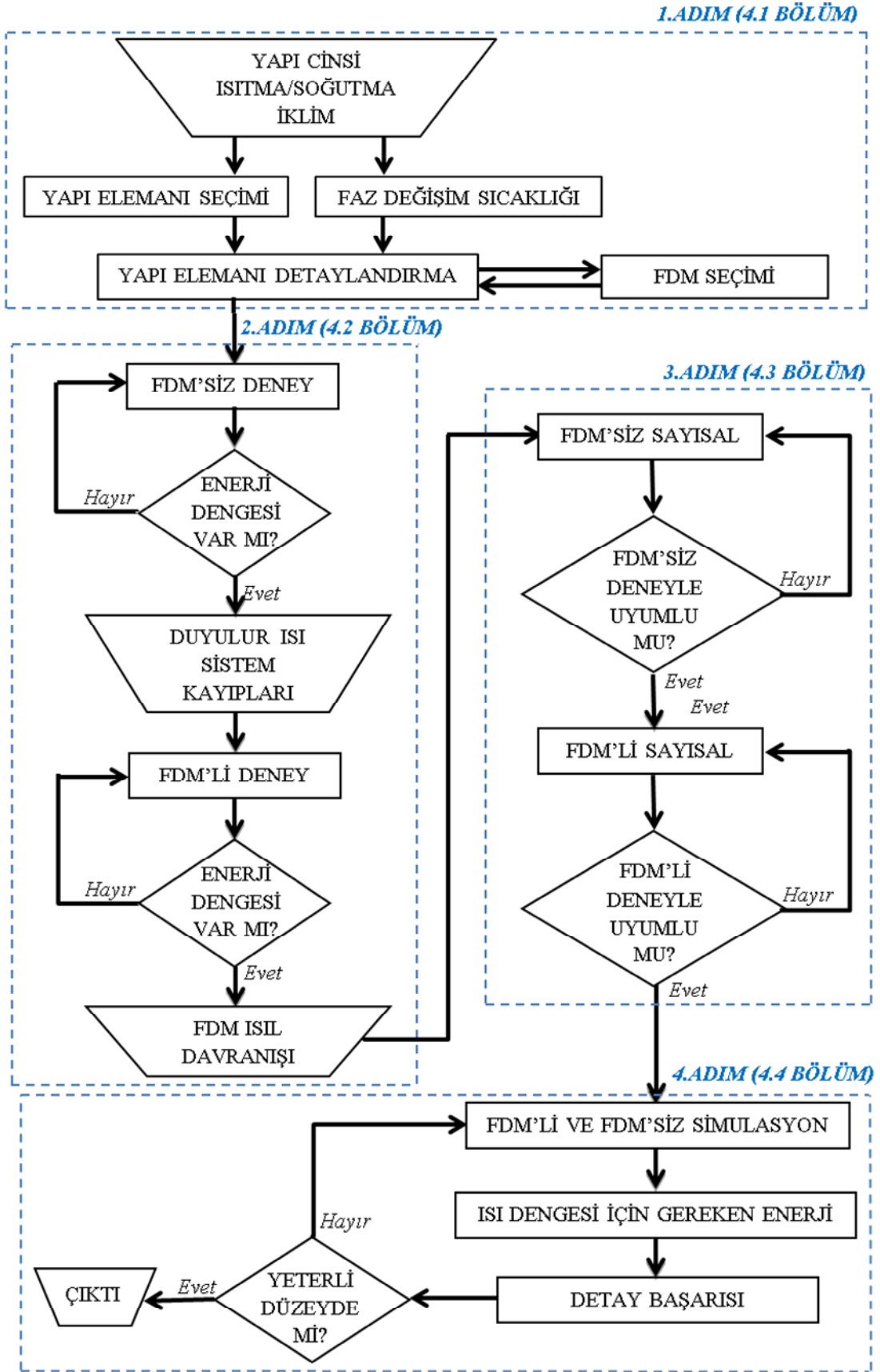
YAPI ELEMANLARINDA ISIL DEPOLAMA İÇİN FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ KULLANIMINA YÖNELİK BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ

İkinci bölümde, faz değişim malzemelerinin (FDM'lerin) bir yapı bileşenine uygulanması için pek çok araştırmacı tarafından yapılan değişik çalışmalar sunulmuştur (Bölüm 2.4). Bu araştırmalar, FDM veya kullanıldığı yapı elemanının özelliklerinin belirlenmesi, modellenmesi veya uygulandığı yapıdaki kazancın ölçülmesi gibi farklı ölçeklerde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ise, FDM kullanılan yapı bileşenlerin yapıya katkısının irdelenebileceği bir yaklaşım önerilmektedir. Aşağıda ana hatlarıyla verilen bu yaklaşım, sonraki bölümlerde bir örnek üzerinden uygulanarak FDM kullanımının yapının enerji performansı üzerine etkisi incelenecek ve sonuçları verilecektir. Kurgulanan yaklaşım dört ana adımdan oluşmaktadır ve yaklaşımın akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.

3.1 Birinci Adım-Yapı Elemanı Tasarımı

Yaklaşımında ilk olarak FDM uygulaması için yapı elemanı seçimi ve detaylandırılması gerçekleştirilmektedir. Bu adımda öncelikle göz önünde bulundurulması gereken ölçütler, yapı elemanının kullanılacağı yapı tipi ve iklimdir. Bu veriler yardımıyla faz değişim sıcaklık aralığı belirlenir ve FDM seçimi gerçekleştirilir. Daha sonra kullanılacak yapı malzemelerinin özellikleri, gerekli iç ortam sıcaklığı ve iklim koşulları göz önüne alınarak yapı elemanının kesiti üzerine malzemelerin ısı iletkenliğine göre belirlenen sıcaklık grafiği çizilerek belirlenir. Bu sayede FDM'nin nereye yerleştirildiğinde daha etkin çalışabileceği bulunur.

Grafik çiziminde, iç ortam sıcaklığı olarak iklime göre belirlenen konfor sıcaklığı alınır. Dış ortam sıcaklığı ise FDM'nin kullanım amacına (ısıtmaya/soğutmaya katkı) göre belirlenen (ortalama sıcaklık ile, ortalamasının on derece altı ve üstü sıcaklıklar için) parametrik bir değerdir. Grafik üzerinde FDM'li yapı elemanı katmanlarının yüzey sıcaklıkları, Mayıs 2008 tarihli TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'nın



Şekil 3.1 Ortaya konulan yaklaşımın akış şeması

"Hesap Metodu" başlığında detayla aktarılan yöntemle hesaplanır. Yapı malzeme ve bileşenlerinin ısı iletkenlik hesap değeri için TS-825 EK E'de verilen değerler kullanılmaktadır.

Bu adımda belirleyici değişkenler şunlardır:

- Yapı cinsi: Yapının gündüz ve gece kullanım profilini belirtir,
- Isıtma/Soğutma: FDM'nin hangi amaçla kullanılacağını gösterir,
- İklim: Konfor koşullarına ulaşmak için ısıtma-soğutma koşullarının oranını ve iç mekanda konfor sıcaklığını belirler,
- Faz değişim sıcaklığı: İç mekan konfor sıcaklığının 1-3°C üzerinde (Peippo ve ark. 1991a; 1991b) olacak şekilde seçilir,

Detay kesinleştirildikten sonra, faz değişim sıcaklığı ve Bölüm 2.2.3'te verilen fiziksel, ısı, kimyasal, kinetik, ekonomik ve çevresel özellikler göz önüne alınarak EK 2'de verilen "Yapıda kullanıma uygun kimyasal bileşikler" veya "Çeşitli firmalar tarafından üretilen ticari FDM'ler" (IEA, 2005) arasından, yapı elemanına eklenebilecek FDM seçimi yapılır.

3.2 İkinci Adım-Deneysel Çalışma

Detayı belirlenen yapı elemanının hem duyulur, hem de gizli ısı olarak depoladığı enerji ve FDM'nin ısı davranışı deneysel olarak ölçülür. Yapı elemanı özelliklerini yansıtabilmek için, seçilen eleman detayı, ortamdan yalıtılarak yapı elemanının karşılaşılabileceği ısı sınır koşulları deneysel ortamda uygulanır. Bu sayede eleman içinde yer alan FDM'nin katılaşması ve erimesi sağlanmaktadır. Böylece, kullanılan FDM cinsi ve miktarı ile yapı elemanı detaylandırılmasındaki değişiklikler başta olmak üzere yapı elemanının farklı durumlarının test edilebileceği esnek bir ortam sağlanır. Sistemin gereken noktalarından sıcaklık, sisteme giren/çıkan akışkanın hacimsel debi ve FDM'yi gözlemleyen kamera verileri bilgisayara aktarılarak yorumlanır. Deney düzeneğinin oluşturulması, sistemdeki veri alınan noktalar ve deney sonuçları bir örneklem üzerinden Bölüm 4.2'de detaylı olarak anlatılmaktadır.

Deneysel düzenek, önce yapı elemanının FDM dışındaki bileşenleri için (FDM'siz durum) çalıştırılır ve bu elemanların sıcaklık değerleri ve verilen enerji ölçülerek duyulur ısı kapasiteleri ile olası sistem kayıpları hesaplanır. Daha sonra deney, FDM yerleştirilerek (FDM'li durum) tekrarlanır. FDM'nin duyulur ve gizli ısı depolama kapasitesi hesaplanır. Fotoğraflama yönteminde ise FDM'nin ısısal davranışı gözlemlenir. Son adımda alınan deneysel veriler, hesaplar ve grafikler yardımıyla değerlendirilir. Deneysel çalışmalar ikişer defa tekrar edilerek kendi içlerindeki uyum karşılaştırılır.

FDM'siz durumda düzenek, yöntemin birinci adımında belirlenen detaya göre çalıştırılır. Buna göre, deney sonucunda;

- seçilen yapı detayının FDM'siz işleyişi gözlemlenmekte,
- düzeneğin çalışması kontrol edilmekte,
- sistemden enerji kayıpları hesaplanmakta ve
- sistemin depoladığı duyulur ısı hesaplanmaktadır.

Deneye FDM tamamen katı haldeyken başlanarak, FDM malzemesi tamamen eriyip enerji dengesi sağlanana kadar devam edilir. Benzer şekilde, deneye FDM tamamen sıvı haldeyken başlanıp FDM malzemesi tamamen katılaşıp ta enerji dengesi sağlanana kadar devam edilmesi de mümkündür.

Sisteme enerji verilmesi ve sistemden enerji alınması sabit sıcaklık banyolarında şartlandırılan taşıyıcı akışkan yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Sisteme verilen ve sistemden alınan enerji miktarları sırasıyla Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de hesaplanmaktadır:

$$Q_{ver} = (m \cdot c_{ak} \cdot \Delta T)_{ver} \quad (\text{Eşitlik 3.1})$$

$$Q_{al} = (m \cdot c_{ak} \cdot \Delta T)_{al} \quad (\text{Eşitlik 3.2})$$

Bu eşitliklerde,

Q_{ver} : akışkan yardımıyla sisteme verilen anlık ısı enerjisi [W],

Q_{al} : akışkan yardımıyla sistemden alınan anlık ısı enerjisi [W],

c_{ak} : akışkanın özgül ısısı [kJ/kg K],

m : kütle akış debisi [kg/s], ve

ΔT : akışkan sıcaklık giriş çıkış farkı [K]'dir.

Deneysel hücredeki sistem kayıp/kazançları ise hücrenin üzerine ve ortama yerleştirilen ısı çift ölçümlerine göre Eşitlik 3.3 ile bulunmaktadır:

$$Q_{kk} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (\text{Eşitlik 3.3})$$

Bu eşitlikte,

Q_{kk} : sistemden ortama kaybedilen anlık ısı enerjisi [W],

h : ortalama ısı taşınım katsayısı [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$],

A_s : kaybın meydana geldiği yüzey alanı [m^2].

T_s : yüzey sıcaklığı [K], ve

T_∞ : ortam sıcaklığı [K]'dir.

Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3'te hesaplanan anlık veriler (Q), on saniyelik ölçüm sıklığı ile çarpılarak toplandığında belirli bir zaman aralığı için sisteme verilen, sistemden alınan ve ortamda kaybedilen enerji miktarı (Q)'nı verir. Bu veriler kullanılarak, deneysel çalışma sırasında yapı elemanında depolanan enerji Eşitlik 3.4'deki gibidir:

$$Q_{ver} = Q_{al} + Q_{depo} + Q_{kk} \quad (\text{Eşitlik 3.4})$$

Bu eşitlikte,

Q_{ver} : sisteme verilen toplam enerji [kJ],

Q_{al} : sistemden alınan toplam enerji [kJ],

Q_{depo} : yapı elemanında depolanan toplam enerji [kJ], ve

Q_{kk} : sistemdeki kayıp toplam enerji [kJ]'dir.

Hesaplamalar sonucunda, sisteme verilen, sistemden alınan, sistemde depolanan ve kayıp/kazanç enerji verileri, zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Sistemin boş çalıştırılması ile hesaplanan “sistemde depolanan enerji” miktarı bu yapı detayının enerji depolama kapasitesini gösterir.

Düzenegin FDM'siz çalıştırılmasının ardından sisteme FDM yerleştirilir ve düzenek FDM'li olarak çalıştırılır. FDM'li çalışma süreci, FDM'siz çalışma süreciyle aynı olarak seçilmiştir. Düzenekte FDM'siz durumdan ayrı olarak FDM kaynaklı veriler de depolanır, işlenir ve yorumlanır. Bunlar faz değişim arayüzü ve depolanan gizli enerji ile ilgili verilerdir. Faz değişim arayüzü zamana bağlı belirlenir ve grafikselleştirilir. Depolanan gizli enerji de benzer şekilde hesaplanır.

3.3 Üçüncü Adım - Sayısal Modelleme

Bu adımda, deneysel olarak ölçülen veriler sayısal olarak incelenir. Ticari bir sonlu hacim yöntemini kullanan akış modeli simülasyon yazılımları kullanılarak sayısal model gerçekleştirilir. Modelleme için öncelikle geometrik biçim, ağ üretimi ve farklı özellikteki bölgeler tanımlanır. Daha sonra yaratılan geometriye, sınır koşulları, malzeme özellikleri ve çözücü parametreleri gibi programa özel koşullar tanımlanarak model çözülür.

Hesaplama süresini kısaltmak amacıyla geometri, iki boyutlu tanımlanır ve sayısal yöntem deneysel veriler için doğrulanır. Geometride deney koşullarını yansıtmak üzere yapı elemanı kesiti kurgulanır. Olası yakınsama sorunlarını çözmek için model oluşturulması adımlarla gerçekleştirilir. Başlangıçta sadece bir boyutlu kararlı iletim yaklaşımı oluşturulur. Modelde verilen sınır koşulları için FDM'li durumdaki, ağ sıklığı, zaman adımı ve yakınsama değişkenlerinin uygunluğu kontrol edilir.

Daha sonra FDM'siz durum için bir boyutlu kararsız iletim yaklaşımı ile elemanda oluşan sıcaklık gradyanı gözlemlenir. Bu yaklaşımın sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak malzemenin termofiziksel özellikleri değerlendirilir.

Bir sonraki adımda, FDM'li durum için bir boyutlu kararlı iletim yaklaşımı oluşturulur. Bu sırada bir boyutlu kararsız iletim yaklaşımı oluşturularak, zamana bağlı çözüm yapılır. Bu adımda girdi olarak deneysel ölçüm sonuçları verilir ve model çıktıları deneysel sonuçlarla karşılaştırılır. Sınır koşulları dış ve iç yüzey sıcaklıklarıdır. Ancak deneyde sabit yüzey sıcaklıkları uygulanamamıştır. Bu yüzden,

başlangıçta sabit sıcaklık sınır koşulları alınmakla beraber yakınsama sorunlarını çözdükten sonra ölçülen dış ve iç yüzey sıcaklıkları sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Sistemin merkezinden alınan sıcaklıklar hem sistemin doğrulanmasında, hem de zamana bağlı yerel sıcaklık dağılımını göstermekte kullanılır.

3.4 Dördüncü Adım - Enerji Tasarrufu Belirlenmesi

Bir mekanda standart yapı elemanı uygulanması ile FDM eklenmiş yapı elemanı uygulanmasının ısı performansını üçüncü adımda tanımlanmış sayısal yöntemle hesaplanır (Bölüm 3.3). Böylece FDM eklenmiş yapı elemanı uygulaması sonucunda yapıda elde edilmesi olası enerji kazançları farklı FDM kalınlıkları göz önüne alınarak irdelenir.

Üçüncü adımda doğrulanan modeli kullanarak zamana bağlı simülasyon yardımıyla, sadece FDM'li yapı elemanının kullanılmasından kaynaklanan ısı etkileri incelemek mümkündür. Hem FDM'siz hem de FDM'li durumlar için problem hesaplanmak istenen zaman aralığında çalıştırılır. Böylece hem yapı elemanı katmanlarının sıcaklıkları ile elemandan geçen enerji belirlenir hem de FDM'nin faz değişim durumu gözlemlenir.

Yapı elemanından geçen ısı akısı, elemanın kullanıldığı mekandaki enerji dengesine olan etkisini belirtir. Farklı yapı elemanlarının başarımları, oluşturdukları ısı yüküne göre Eşitlik 3.5'teki gibi karşılaştırılır.

$$\left((q''_{FDMsiz} - q''_{FDMli}) / q''_{FDMsiz} \right) \cdot 100 = \%Başarım \quad (\text{Eşitlik 3.5})$$

Bu eşitlikte;

q''_{FDMsiz} : FDMsiz yapı elemanında birim yüzey alanından geçen enerji [Wh/m^2],

q''_{FDMli} : FDMli yapı elemanında birim yüzey alanından geçen enerji [Wh/m^2], ve

$\%Başarım$: FDM'li yapı elemanının başarı yüzdesi [%]'ni

ifade etmektedir.

Ortamda istenen ısı konforu ulaşmak için gerekli iklimlendirme farklı araçlarla karşılanabilir. Başarım yüzdesine ek olarak mekana, kullanılan yapı elemanına ve iklimlendirme cihazına bağlı olarak kullanılan enerji miktarı Eşitlik 3.6'ya göre hesaplanır.

$$Q_{kul} = q'' \cdot A_s / COP \quad (\text{Eşitlik 3.6})$$

Bu eşitlikte;

Q_{kul} : cihazın çalışırken kullanacağı enerji [Wh],

q'' : birim yüzey alanından geçen enerji [Wh/m²], ve

COP : cihaz performans katsayısı [-]'dir.

Bu yöntemle, yapı elemanının optimizasyonu için farklı FDM kalınlığı veya elemandaki detay konfigürasyonları gibi değişkenlerin yapı elemanının başarımına etkilerini irdelemek olasıdır. Bunun için yukarıda anlatılan şekilde simülasyon ve Eşitlik 3.5-6 uygulanır.

BÖLÜM DÖRT

YÖNTEMİN BİR ÖRNEKLEMDE UYGULANMASI

Üçüncü bölümde ısı depolama amacıyla faz değişim malzemelerinin (FDM'lerin) bir yapı bileşenine uygulanmasının değerlendirilmesi üzerine bir yaklaşım önerilmiştir. Bu bölümde, ortaya konan yaklaşım bir örnek üzerinde uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, örnekleme ülkemizde geçerli TS-825 standardına göre dört iklim bölgesi için bir konut mekanının çatısına FDM eklenmesi durumu seçilmiştir. Örnekte standartlara uygun bir teras çatıda FDM kullanılması enerji başarımı yönünden incelenmiştir. Sadece FDM'li yapı elemanı olan çatının enerji davranışı değerlendirileceği için, yapının duvar ve tabanı ihmal edilmiştir.

4.1 Birinci Adım: Yapı Elemanı Tasarımı

FDM'nin yapı uygulamalarında, değişik FDM'lerin avantaj ve dezavantajlarını göz önünde bulundurmamak, hal değişim sıcaklığı insan konfor sıcaklığına yakın ve daha yüksek gizli ısı kapasitesi olan malzemeleri kullanım amaçlı detaylandırmak gerekmektedir. FDM içeren yapı elemanları hala gelişim aşamasındadır ve binalarda yaygın kullanımı ile ilgili sorunlar vardır. Bu sorunların içinde FDM'lerin hatalı kullanımı sonucunda beklenen verime ulaşılamaması da bulunmaktadır. Uygun malzeme seçimi ve detaylandırılması ile bu sorunu çözmek olasıdır. Bu amaçla, tezde ortaya konulan yaklaşımın ilk adımında iklim koşullarına göre FDM uygulanabilecek yapı elemanı detaylandırılması için grafiksel bir yöntem önerilmiştir.

Önerilen grafiksel yöntemde, FDM uygulaması için yapı elemanı seçimi ve detaylandırılması aşamasında öncelikle göz önünde bulundurulacak ölçütler; yapı elemanının kullanılacağı yapı tipi ve iklimdir. Başlangıçta, bu veriler yardımıyla, FDM'nin kullanım amacına göre hal değişim sıcaklık aralığı oda sıcaklığının 1-3°C üzerinde (Peippo ve ark. 1991a; 1991b) olacak şekilde belirlenerek FDM seçimi gerçekleştirilmiştir. FDM'nin belirlenmesi sonrasında uygulanması düşünülen yapı

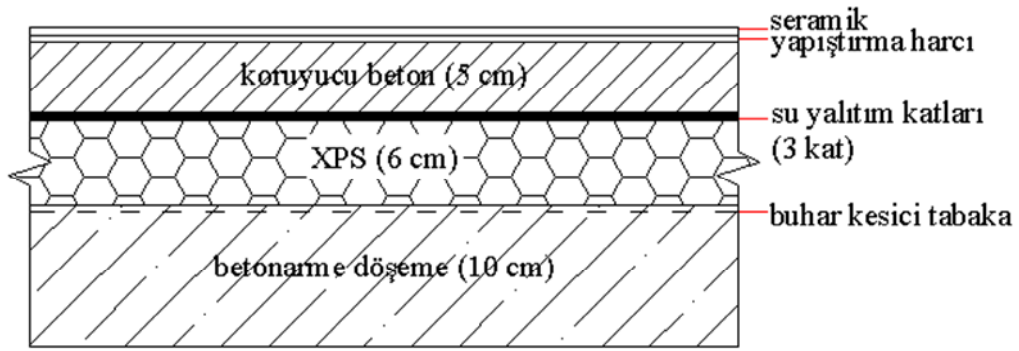
detayı, kullanılacak yapı malzemelerinin özellikleri, gerekli iç ortam sıcaklığı ve iklim koşulları göz önüne alınarak yapı elemanının kesiti üzerine tipik iklim koşulları için yapı elemanlarının ısı iletkenliğine bağlı sıcaklık grafikleri çizimi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle FDM'nin detayın neresine yerleştirilirse etkin çalışabileceği görülebilmektedir.

Verilen örnekte yöntem adım adım izlendiğinde yapı tipinin konut olarak seçilmesi ile yapının günde 24 saate kadar kullanılabilmesi ve gece için de konfor koşullarının sağlanması amaçlanmaktadır. Ancak, örnek mekan TS-825'te belirtilen dört iklim bölgesi için de incelenmektedir. Bu nedenle iklim verileri çok çeşitlilik göstermektedir ve ortak bir detay çözümünde uzlaşmak zorlaşmaktadır. Buradan hareketle gerçek iklim verilerine göre değil, temsili değişkenlere göre hesap yapılması uygun bulunmuştur.

Konfor koşullarına ulaşmak adına soğutma sorununun ısıtmaya göre daha etkili olduğu yaz koşulları için iç ortam konfor sıcaklığı olarak 23°C kabul edilmiş ve buradan hareketle Peippo ve ark., 1991a ve 1991b'e göre seçilecek FDM'nin hal değişim sıcaklığı 24-27°C olarak belirlenmiştir.

4.1.1 Yapı Elemanı Detaylandırılması

Örnekte FDM uygulaması için düz çatı elemanı seçilmiştir. Bunun birincil amacı, düz çatıya gelen güneş ışınımının yönden bağımsız, genelde diğer yüzeylere gelenden daha kontrollü olması ve iklimsel koşullar altında homojen davranış göstermesi sayesinde sorunun basite indirgenebilmesidir. İkincil amaç ise, güneş ışınımı etkilerine açık olan çatının soğutma problemlerinde her yapı için dikkat edilmesi gereken bir bölge özelliği taşımasıdır. Ayrıca mimari olarak yapı kabuğunda cephe elemanındaki malzeme, doluluk boşluk ve yön gibi değişkenler nedeniyle daha fazla kısıtlama yaşanabileceğinden uygulamada çatı elemanı seçilmiştir. Ele alınan klasik düz çatı elemanının kesiti Şekil 4.1'de verilmiştir.

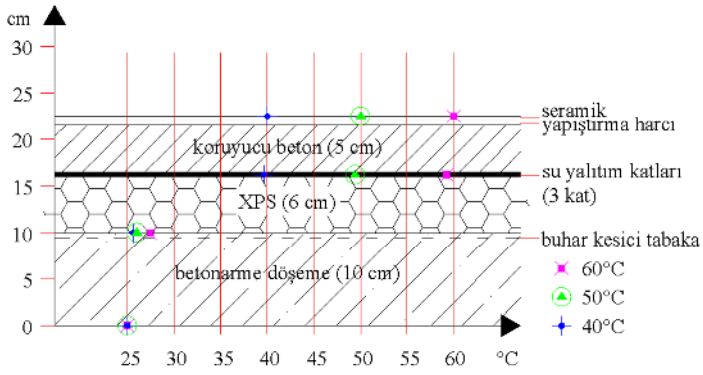


Şekil 4.1 Klasik düz çatı elemanının kesiti

FDM'nin ısı yalıtımına göre yerinin belirlenmesi amaçlı sıcaklık grafikleri, Mayıs 2008 tarihli TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'nın "Hesap Metodu" kısmında anlatılan yöntemle hesaplanarak çizilmiştir. Yapı malzemelerinin ısıl iletkenlik hesap değerleri de TS-825'in EK E'den alınarak kullanılmıştır (Tablo 4.1) (TSE, 2008). Seçilen detayda uygulanacak ısı yalıtımı kalınlığı, 4 farklı iklim bölgesi için, TS-825'te tavsiye edilen u değerlerine göre 1. Bölge için 6 cm, 2. Bölge için 7 cm, 3. Bölge için 9 cm ve 4. Bölge için 11 cm olarak hesaplanmıştır. Grafikte en az yalıtım kalınlığı olan 6 cm kullanılmıştır. İç yüzey sıcaklığı 25 °C, dış yüzey sıcaklığı ise yaz koşullarını temsil için parametrik olarak 40 °C, 50 °C ve 60 °C olarak seçilmiştir. Kararlı durum analizi ile çizilen sıcaklık grafikleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.

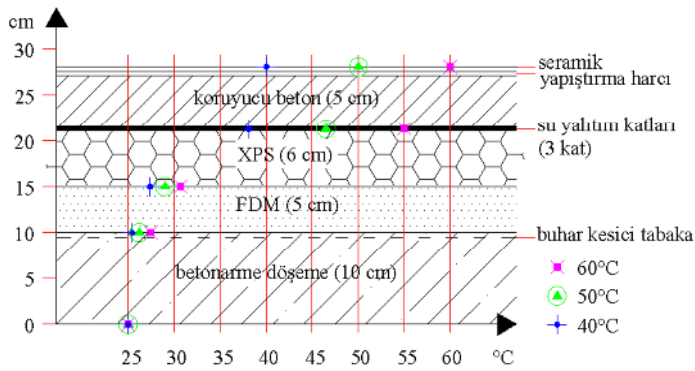
Tablo 4.1 Yapı elemanının malzeme özellikleri

Malzeme veya bileşenin çeşidi	Malzeme Kalınlığı [cm]	Birim hacim kütlesi [kg/m ³]	Isıl iletim katsayısı [W/mK]	Su buharı difüzyon direnç faktörü [μ]
Seramik	0,9	1.750	1,3	40/50
Yapıştırma harcı	0,9	2.000	1,6	13/35
Donatısız beton	5	2.200	1,65	70 / 120
Su yalıtımı	1	1.200	0,19	1400
XPS levha	6	(≥ 25)	0,035	80-250
FDM	5		0,2	
Donatılı beton	10	2.400	2,50	80 - 130



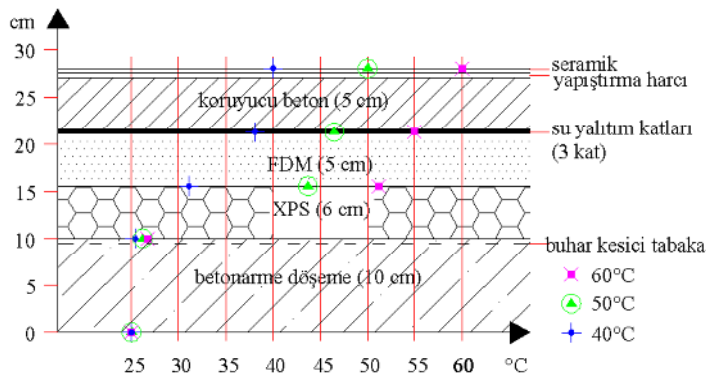
	40	50	60
seramik			
yapıştırma harcı	39,95	49,91	59,87
beton	39,71	49,51	59,31
su yalıtımı	39,29	48,82	58,34
ısı yalıtımı	38,87	48,12	57,37
betonarme döşeme	25,32	25,53	25,74
	25	25	25

a) Normal çatı detayı ve sıcaklık değerleri



	40	50	60
seramik			
yapıştırma harcı	39,95	49,92	59,89
beton	39,74	49,57	59,39
su yalıtımı	39,37	48,95	58,54
ısı yalıtımı	39,00	48,34	57,68
FDM	27,03	28,38	29,73
betonarme döşeme	25,28	25,47	25,65
	25	25	25

b) FDM yalıtımın altında çatı detayı ve sıcaklık değerleri



	40	50	60
seramik			
yapıştırma harcı	39,95	49,92	59,89
beton	39,74	49,57	59,39
su yalıtımı	39,37	48,95	58,54
ısı yalıtımı	39,00	48,34	57,68
FDM	37,26	45,43	53,60
betonarme döşeme	25,28	25,47	25,65
	25	25	25

c) FDM yalıtımın üstünde çatı detayı ve sıcaklık değerleri

Şekil 4.2 Çatı elemanında oluşacak sıcaklıklar

Şekil 4.2’de gündüz koşulları için yüzey sıcaklığının parametrik değiştirilmesiyle FDM’nin sıvılaşma durumu araştırılmıştır. Ancak gece daha düşük yüzey sıcaklıklarıyla FDM’nin katılaşacağı varsayılmıştır. Bu durumda FDM’nin ısı yalıtımının altına yerleştirilmesi durumunda Şekil 4.2b’de görüldüğü üzere üst yüzey sıcaklığı 40 °C iken FDM’de hal değişiminin gerçekleşeceği sıcaklığa ulaşamamaktadır. Yüzey sıcaklığı 50 °C ve 60 °C ise FDM’nin üst kısmında hedef hal değişim sıcaklığı olan 27 °C’nin sırasıyla 1,38 °C ve 2,73 °C üstü sıcaklıklara ulaşılır. FDM’lerin fiziksel davranışları göz önüne alındığında, hal değişimi kısmi olarak gerçekleşmekte ve ısı depolama etkinliği azalmaktadır. FDM’nin ısı yalıtımının üstüne yerleştirilmesi durumunda ise, Şekil 4.2c’den de görüldüğü üzere FDM’de hal değişimi ve dolayısıyla ısıl enerji depolanması gerçekleşebilmektedir. Önerilen yöntemin bir sonraki adımı olan deneysel çalışmada gözlem kolaylığı açısından, detayda FDM kalınlığı 5 cm seçilmiştir.

4.1.2 FDM Seçimi

Detay kesinleştirildikten sonra, faz değişim sıcaklığı 26 °C -28 °C iken ve Tablo EK II.2’de verilen “Çeşitli firmalar tarafından üretilen ticari FDM’ler” arasından, yapı elemanına eklenebilecek FDM seçimi yapılmıştır. Amaç yeni malzeme geliştirmekten çok var olan malzemelerin başarımını ölçmek ve kullanımını yaygınlaştırmak olduğundan, ısı depolaması yaklaşık aynı sıcaklıkta gerçekleşen ticari FDM’ler arasından seçim yapılmıştır. Ayrıca, FDM seçiminde, Bölüm 2.2.3’te verilen fiziksel, ısıl, kimyasal, kinetik, ekonomik ve çevresel özellikler de göz önünde bulundurulmuştur.

Seçim sırasında, öncelikle bol bulunabilirlik, süper soğuma sorunu olmaması, kararlılık, faz değişiminde sürekli başarım ve diğer yapı malzemeleri ile tepkimeye girmeme özellikleri, uygulamada ortaya çıkabilecek sorunları azaltma düşüncesiyle, organik FDM’lerden parafinler tercih edilmiştir. Firmalarla yapılan yazışmalar sonucunda fiyat ve elde edilebilirlik etkenleri de göz önüne alınarak yaz koşulları kullanımı için faz değişim sıcaklığı, fabrika değeri 27 °C verilmiş olan RT27 seçilmiştir. Ürünün katalog özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir (Rubiterm, 2009).

Tablo 4.2 RT27'nin teknik özellikleri (Rubiterm, 2009).

Erime aralığı °C	25 – 28
Tipik erime noktası °C	27
Katılma aralığı °C	28 - 25
Tipik katılma noktası °C	27
Isıl depolama kapasitesi kJ/kg	184
15°C de yoğunluğu (katı) kg/l	0,88
40°C de yoğunluğu (sıvı) kg/l	0,76
Faz değişim aralığında hacim genişlemesi	% 16
Isı iletkenliği W/(m*K)	0,2
Kin. Viskozite (50°C) mm ² /s	26,32
Alevlenme noktası °C	164
Korozyon	Çoğu malzemeyle kimyasal tepkimeye girmez
Su tehlike sınıfı (WGK)	1

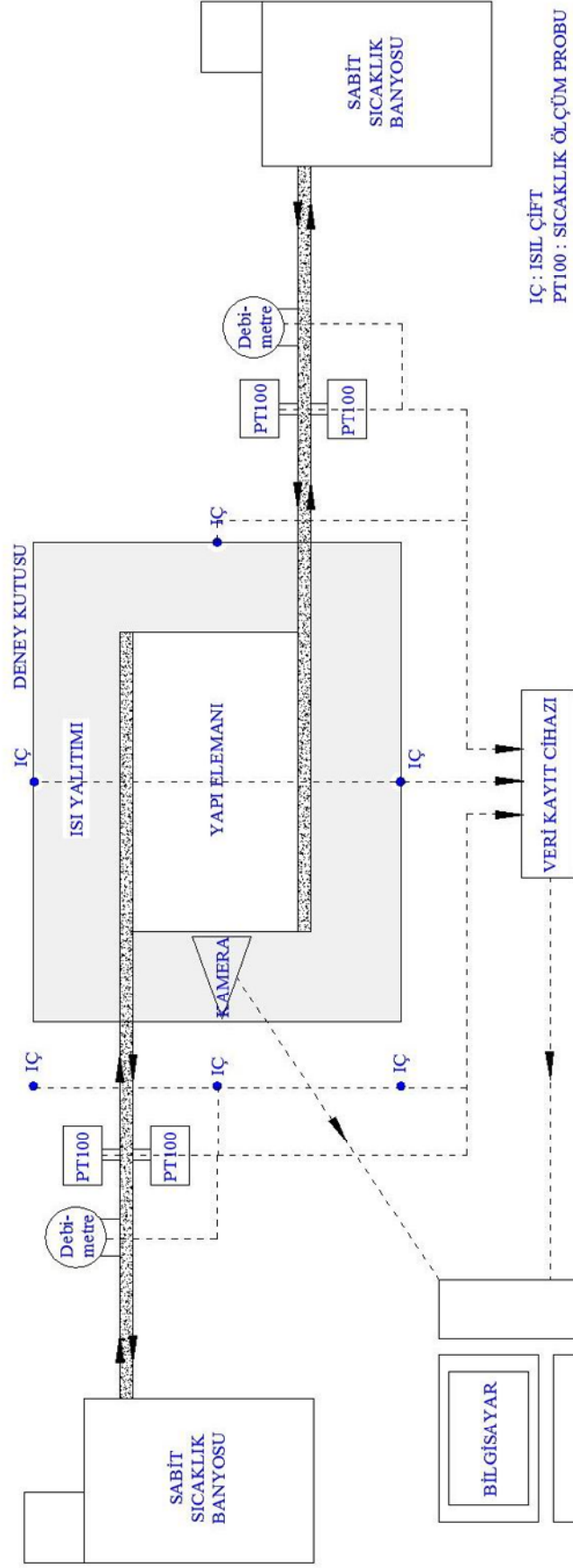
4.2 İkinci Adım: Deneysel Çalışma

Detayı belirlenen yapı elemanının hem duyulur, hem de gizli ısı olarak depoladığı enerji ve FDM'nin ısı davranışı deneysel olarak ölçülür. Bu kısımda, deneysel düzenek, kurulması (Bölüm 4.2.1), FDM'siz deneysel çalışma (Bölüm 4.2.2) ve FDM'li deneysel çalışma (Bölüm 4.2.3) sonuç ve yorumları ile birlikte verilmektedir.

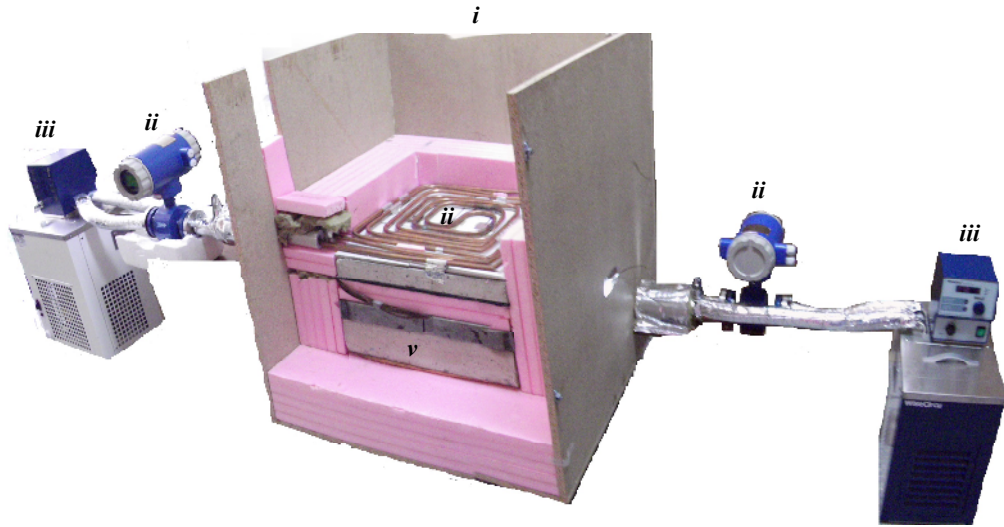
4.2.1 Deneysel Düzenek

Yapı elemanı özelliklerini yansıtabilme için, deneyde 50 cm x 50 cm boyutlarındaki bir detay kullanılmaktadır. Bu detay, ortamdaki yalıtılmış bir hücre içine yerleştirilir ve elemana gerçekte karşılaşılabileceği ısı sınır koşulları deneysel ortamda uygulanır. İki adet sabit sıcaklık banyosunda şartlandırılan su, bakır borular ile yapı elemanına gönderilmektedir. Bu sayede eleman içinde yer alan FDM'nin katılma ve erimesi sağlanmaktadır. Sistemin gereken noktalarından sıcaklık (ısı çift ve dirençsel sıcaklık algılayıcıları -PT 100- ile) ve sisteme giren/çıkan suyun hacimsel debi ölçümleri (debimetre ile) yapılır. Veri toplayıcı ile gelen veriler bilgisayara aktararak depolanır. Benzer şekilde FDM'yi gözlemleyen kamera verileri de bilgisayara aktarılır.

Deneysel düzeneğin şeması Şekil 4.3'te verilmiştir. Uygulama fotoğrafı ise aşağıdaki etiketlenmeye göre Şekil 4'te verilmiştir. Düzenek esas olarak;



- i. Deneysel hücre (Bölüm 4.2.1.1),
 - ii. Akışkan taşıma sistemi (Bölüm 4.2.1.2),
 - iii. Sabit sıcaklık banyoları (Bölüm 4.2.1.3),
 - iv. Ölçüm ve gözlem sistemi (Bölüm 4.2.1.4), ile
 - v. Yapı elemanından (Bölüm 4.2.1.5)
- oluşmaktadır.

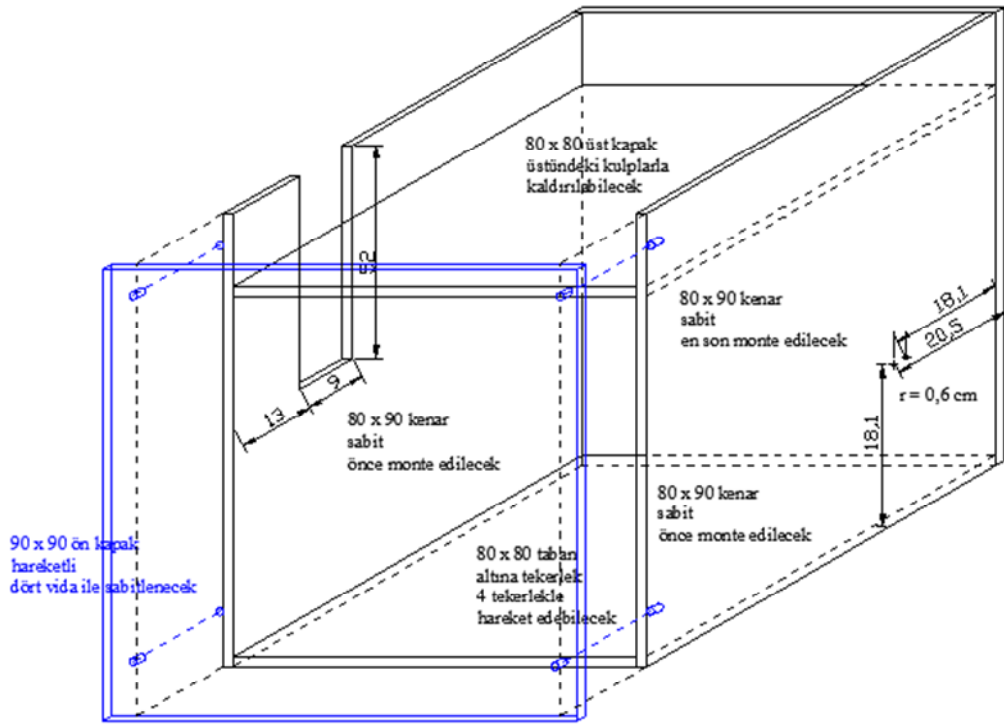


Şekil 4.4 Deneysel düzeneğin fotoğrafı

4.2.1.1 Deneysel Hücre

Seçilen yapı bileşeninin ortam koşullarından bağımsız incelenebilmesi için yalıtılmış bir hücre içerisinde yerleştirilmiştir. Ayrıca akışkan ve sıcaklık problemlerinin sisteme giriş çıkışının sağlanması için de delikler gerekmektedir. Şekil 4.5'te hücrenin imalatı için gerekli bilgiler gösterilmiştir.

Hücre 1,8 cm kalınlığında sıkıştırılmış ahşap levhadan üretilmiştir. Parçalar, her iki kenarından vidayla birleştirilmiş, ön ve üst parça ise düzeneğin esnekliğini sağlamak amacıyla sökülüp takılabilir yapılmıştır. Deney sırasında ön parça dört vida yardımıyla sızdırmaz olarak sabitlenmekte, üst parça ise yukarıdan serbestçe kapatılmaktadır.



Şekil 4.5 Sistemin içinde kurgulandığı hücre

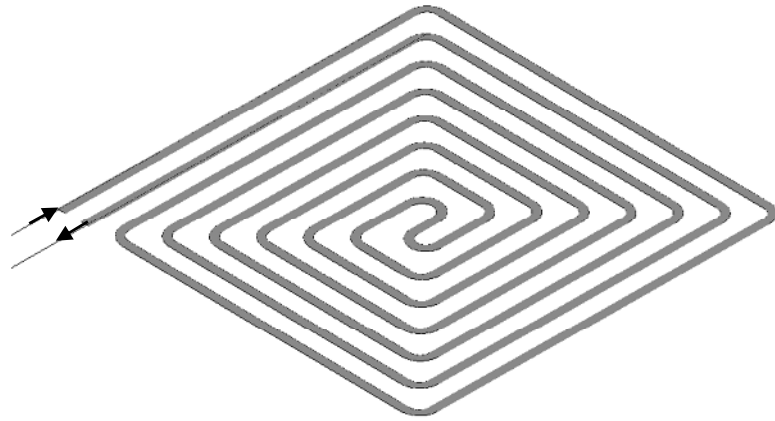
Deney esnasında sistemdeki ısı kaybını azaltmak amacıyla hücrenin tüm yüzeyleri çepeçevre 15 cm kalınlığında (5 adet 30 mm) düz yüzeyli ekstrüde polistren (XPS) sert köpük ile yalıtılmıştır. Yalıtım malzemesinin fiziksel özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3 Ekstrüde polistren sert köpük fiziksel özellikleri

Isı iletkenlik Beyan Değeri W/mK (10 °C, 90. gün) (azami)	0,030
Isı İletkenlik Beyan Değeri W/mK (10 °C'de) (azami) Ek C: 25 Yıllık yaşlandırılmış değerlerin ortalamasına göre λ (90/90)	0,034
Basma Dayanımı (En az) % 10 deformasyonda	≥ 120 kPa CS (10/Y) 100
Yüzelelere Dik Çekme Dayanımı	≥ 100 kPa TR100
Difüzyonla Uzun Sürede Su Emme	WD(V)3
Tam Daldırma İle Uzun Sürede Su Emme	WL(T) 0.7 (\leq % 7)
Belirtilen Basma Yüğü ve Sıcaklık Şartlarında Deformasyon	DLT(1)5 ve DLT(2)5 (\leq % 5)
Donma-Çözülme Dayanımı	FT2 (\leq % 1)
Su Buharı Difüzyon Direnci, μ (en az)	MU100
Yangın Dayanımı (DIN 4102) Sınıfı	B1

4.2.1.2 Akışkan Dolaşımı

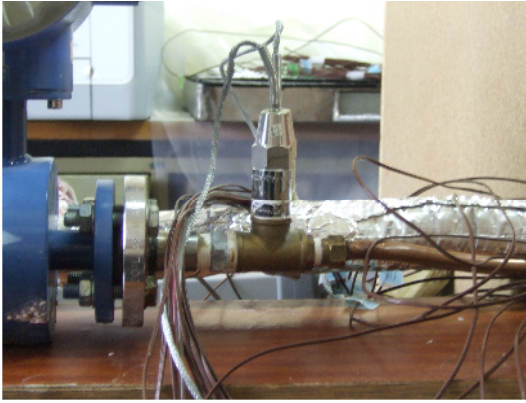
Sabit sıcaklıklı akışkan, incelenen yapı bileşenine ısı iletkenliği yüksek 10 mm iç çapında (et kalınlığı 1,5 mm) bakır borularla taşınmaktadır. Deneylerdeki ısı transfer akışkanı, kullanılacak faz değişim sıcaklığı ve iklim bölgesine göre belirlenir. Bu örnekte, akışkan olarak su kullanılmıştır. Düzeneğe verilen enerjinin yapı elemanı yüzeyine eşit dağılımını sağlamak amacıyla borular, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi serpantin biçimde bükülmüştür.



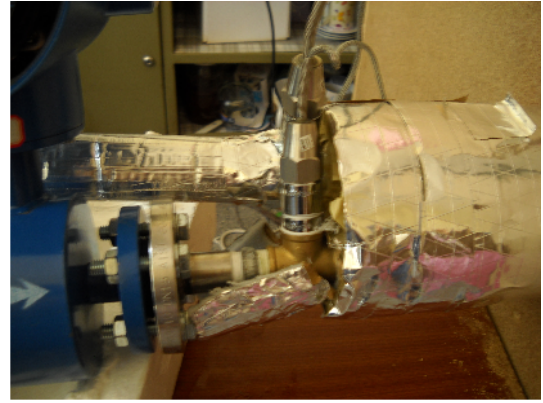
Şekil 4.6 Boruların yüzeye yerleştirildiği serpantin biçimi

Yapı elemanı ile temas etmeyen bakır borular ise 1cm et kalınlığına sahip kauçuk esaslı poliüretan boru kaplaması ile yalıtılmıştır. Ayrıca 4 adet PT-100 tipi prob, ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır.

Rodyum platin/Platin (Pt-Rh/Pt) malzemelerinden yapılmış PT-100'lerin çalışma sıcaklık aralığı -50 ile $+150^{\circ}\text{C}$ ve kablo uzunlukları 3 metredir. Akışı engellemeden borunun içinden geçen sıcaklığı algılayabilmek için daldırma tipi PT-100'ler tercih edilmiştir. Elemanlar ve boru bağlantıları Şekil 4.7'de görülmektedir.



(a) Yalıtımsız PT 100 prob ve boru bağlantısı



(b) Yalıtımlı PT 100 prob ve boru bağlantısı

Şekil 4.7 PT 100 prob ve boru bağlantısı

PT-100'lerden sonra akışın tam gelişmesi için, PT-100'lerin yapı elemanının en az 20 cm yakınına yerleştirilmesi önerilmektedir. Deneysel çalışmada, borulara daha rahat müdahale edebilmek için, PT-100'ler yüzeyden 37-40 cm uzağa yerleştirilmiştir. Akışkanın sıcaklığı ölçüldükten sonra ısı kayıplarını mümkün olduğunca aza indirmek amacıyla, PT-100'lerle deneysel hücre arasında, bakır boruların etrafına 6 cm kalınlığında taşyünü yalıtımı eklenmiştir.

Aynı zamanda alt ve üst yüzeye iletilen akışkan hızı, veri toplayıcı yardımıyla iki kanaldan LD-10 elektronik debimetre yardımıyla ölçülmektedir. Debimetrelerin fotoğrafı Şekil 4.8'de, özellikleri ise Tablo 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.8 Debimetre ve boru bağlantısı

Tablo 4.4 Elektromanyetik debimetrelerin teknik özellikleri

Akış aralığı	0,1-10 m/s (0,02-5000 l/s)
Hassasiyet	%0,5 (0,5-10 m/s okuma aralığında) %1 (0,1-0,5 m/s okuma aralığında)
En fazla akışkan sıcaklığı	130°C
Ortam sıcaklığı	-20 - 70°C
Güç kaynağı	24 V
Güç tüketimi	10 VA
Kaplama	PTFE
Elektrodlar	CrNi (paslanmaz) çelik 1.4571 Hastelloy C276
Ölçüm borusu	1.4201 paslanmaz çelik, boyutları DIN 17457'ye göre
Flanş	Çeli 1.0402 veya üzeri, boyutları DIN 2501, ANSI B 16.5'a göre
Koruma kategorisi	IP67
Çıktılar	0-12 kHz, programlanabilir akış ve fonksiyonuyla 0-50 Hz dalga, programlanabilir hacim, fonksiyon ve dalga genişliğiyle Röleler 100V/0,5 A programlanabilir fonksiyonuyla 4-20 mA, programlanabilir akış ve fonksiyonuyla
Girdi	Programlanabilir fonksiyonuyla dijital girdi
İletişim	RS485, RS232
Gösterilen değerler	Debi (m ³ /h, l/s, US.Gal/dk, kullanıcı) Hacim (m ³ , l, US.Gal, kullanıcı) Pozitif, toplam, negatif ve yardımcı (silinebilir, günlük) hacim
Kontrol	Klavye Manyetik işaretçi RS232 ve RS485
Düşük-akış kesimi	Programlanabilir değer
Zaman sabiti	1-20 saniye aralıkla ayarlanabilir

4.2.1.3 Sabit Sıcaklık Banyoları

FDM'nin erime ve katılaşma döngüleri süresince sistemde dolaşan akışkan, sirkülatörlü su banyosu kullanımı ile sabit sıcaklıkta tutulmaktadır. Deneyde seçilen banyolar; dış ortam sıcaklıklarını temsil etmek için 6 litre hacimli, ısıtma kapasitesi 800 W ve çalışma sıcaklık aralığı -40°C ile 100°C olan WCL-P6 ve iç ortam yüzey sıcaklığını temsil etmek için 8 litre hacimli ve çalışma aralığı -20°C ile 100°C olan WCR-P8 tipi cihazlardır. Birimler, 15 l/dk hacimsel akış sağlamaktadırlar. Banyoların ortak özellikleri Tablo 4.5'te, fotoğrafı ise Şekil 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.5 Sabit sıcaklık banyolarının ortak özellikleri

Gösterge	Dijital, Grafik LCD
Kontrol sistemi	Mikroişlemci kontrollü PDI
Sıcaklık stabilitesi	$\pm 0,05$ °C
Okuma doğruluğu	$\pm 0,5$ °C
Rezervuar tankı	Paslanmaz çelik.
Soğutma Kapasitesi	
20 °C'de	200 W
0 °C'de	140 W
-10 °C'de	100 W
Aşırı sıcaklık koruması	Var
Ayarlanabilir termostat	Var
Besleme gerilimi	220V-50Hz



(a) WCL-P6 banyosu



(b) WCR-P8 banyosu

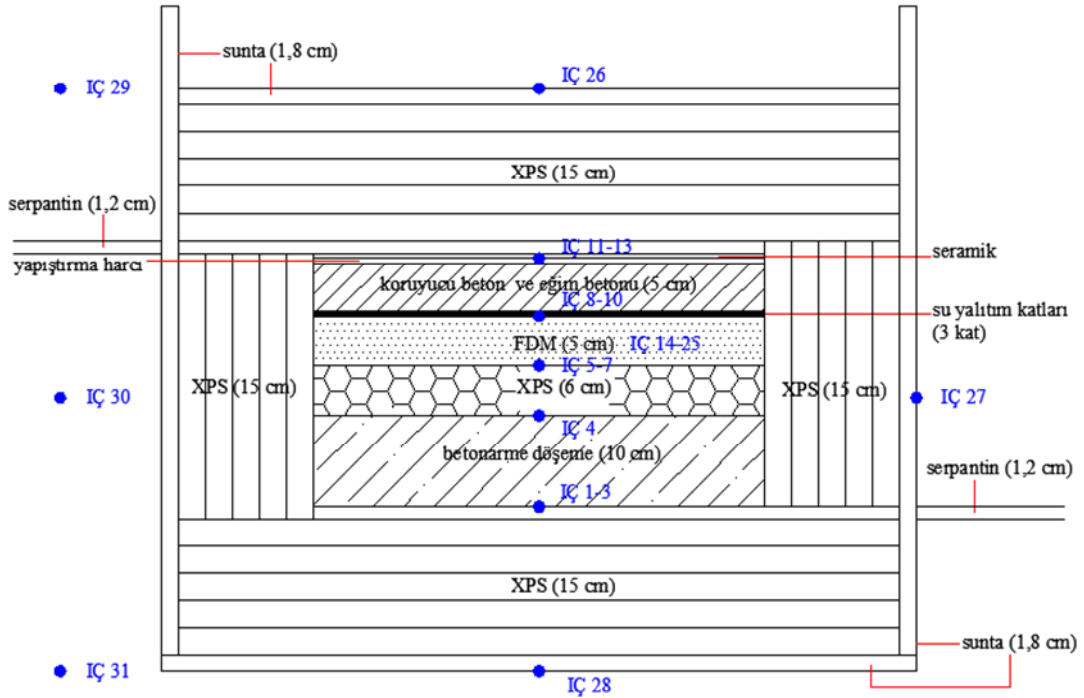
Şekil 4.9 Sabit sıcaklık banyoları

4.2.1.4 Ölçüm Ve Gözlem Sistemi

Sıcaklık ölçüm sistemi, sıcaklık ölçen algılayıcılar (ısıl çiftler ve PT 100 probler) ve veri toplayıcıdan (datalogger) oluşmaktadır. Ayrıca sisteme giren-çıkan akışkanın debisi de, elektromanyetik debimetre yardımı ile ölçülmekte ve veri toplayıcı data logger yardımıyla bilgisayara gönderilmektedir.

Kullanılan tüm ısıl çiftler T tipidir (bakır-konstantina). Isıtma ve/veya soğutma sırasında, hücre içinde simetriyi ölçmek amacıyla, yapı elemanı içindeki ısıl çiftler

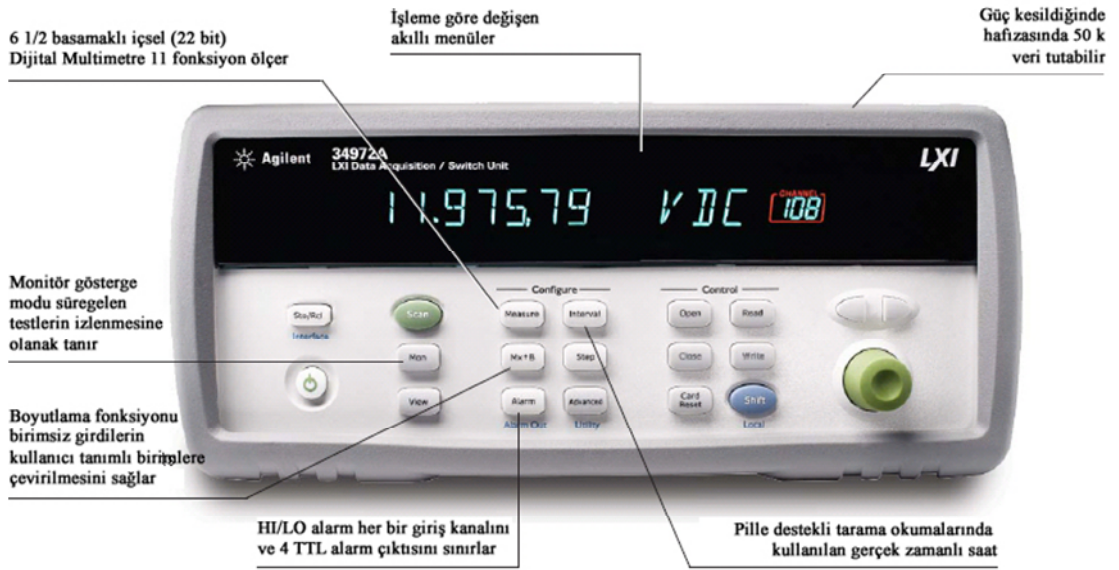
(İÇ) hücrenin ortasından geçen bir düzleme göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Betonarme döşemenin alt yüzeyine 3 (İÇ 1-3), üstü ile ısı yalıtımı arasına 1 (İÇ 4), ısı yalıtımı ile metal kutu arasına 3 (İÇ 5-7), metal kutunun üstü ile su yalıtımı arasına 3 (İÇ 8-10), seramiğin üstüne de 3 (İÇ 11-13) olmak üzere toplam 13 ısı çifti, yapı elemanında meydana gelen sıcaklık değişimlerini okumak amaçlı yerleştirilmiştir. FDM'nin erime ve katılaşma döngülerine ait sıcaklık değerleri 5 mm aralıklarla yerleştirilen ısı çiftleri ile 11 noktadan (İÇ 14-25) okunmaktadır. Bunlara ek olarak deneysel hücrenin yüzey sıcaklıkları üst (İÇ 26), yan (İÇ 27) ve alttan (İÇ 28); ortam sıcaklıkları ise yukarı (İÇ 29), ara (İÇ 30) ve aşağıdan (İÇ 31) ölçülmektedir. Kullanılan toplam 31 adet ısı çiftinin yerleşimi Şekil 4.10'da verilmiştir.



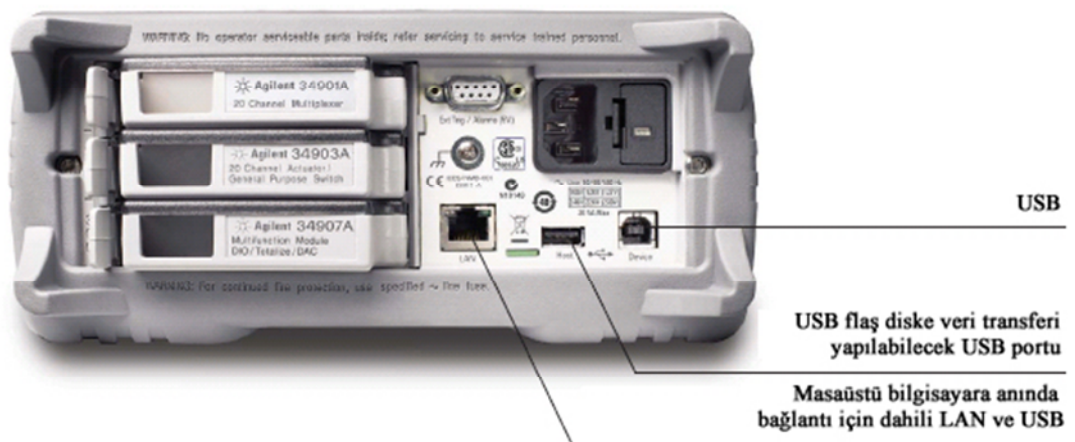
Şekil 4.10 Bitmiş yapı elemanındaki ısı çifti yerleşimleri

Sıcaklık algılayıcılarının kalibrasyonu, kullanılan veri toplayıcı ile beraber TMMOB Makina Mühendisleri Odası Ege Kalibrasyon Laboratuvarı ve Metroloji Eğitim Merkezi laboratuvarında yapılmıştır. Kalibrasyon sırasında, laboratuvarında su banyosu (Eurotherm 2216) belirlenen sıcaklığa getirilerek, sağlanan sıcaklık 4 kanallı PT100 (SAB Brükskes D-viersen LIYY 4 x 0,25 mm²) yardımıyla multimetreden (HP3458A) her on saniyede bir on değer okunmuş ve ortalaması

alınmıştır. Bu işlemle eş zamanda, deneyde kullanılan ısı çift ve termorezistanslar yardımıyla veri depolayıcıdan (34972A) (Şekil 4.11) da aynı sıklıkla okunan on değerlerin ortalaması bulunmuş ve standart sapmaları çizilmiştir. Deneyde alınan ölçümler teknik hesaplama yazılımı MATLAB yardımıyla eğrilere uydurularak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Kalibrasyonun belirsizlik hesabı ve kalibrasyon eğrileri EK-III’te verilmiştir.



(a) Veri toplayıcının ön görünüşü



(b) Veri toplayıcının arka görünüşü

Şekil 4.11 Deneyde kullanılan veri toplayıcı

Sıcaklık algılayıcılarının milivolt cinsinden çıktıları veri toplama sistemi tarafından ölçülmektedir. Bu birim, milivolt girdilerini $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ hassasiyetle santigrat derece cinsine çevirir. Veri toplayıcı PC tipi bilgisayara USB portundan bağlanmakta ve çıktıları veri toplama biriminin üretici firması tarafından hazırlanmış bilgisayar programı yardımıyla hem bilgisayar ekranına aktarılmakta hem de .csv uzantılı (virgülle ayrılmış veri cinsinden) depolanmaktadır. Cihazın özellikleri: LXI, Yuva sayısı (slot) 3, Dijital Multimetre dahili 6,5-digit DMM (22- bit), 1 GB LAN veya USB 2.0 ile bilgisayar bağlantısı, grafik web ara yüzü ve veri kayıt yazılımı şeklindedir. 1 adet 20 kanal çoğullayıcı armatür ve 1 adet 16 kanal çoğullayıcı armatür, veri toplama ve anahtarlama biriminin arkasındaki yuvalara takılmıştır. Bahsi geçen ilk armatür, 20 + 2 (toplam 22) kanalı, ikincisi ise 16 kanalı saniyede 60 kanal hızında tarayabilmektedir. Veriler, tüm deneylerde on saniyede bir alınmıştır.

Katı-sıvı ara yüzeyin davranışını gözlemlemek için bir web kamerasından yararlanılmıştır. Kamera verisi dijital ortamda kaydedilerek, seçilen fotoğraf kareleri erime yüzeyi davranışını gözleme amacıyla kullanılmıştır. Kamera, deney kutusunun hareketli ön kapağında yalıtımın içine gömülmüştür (Şekil 4.12).



(a) Kameranın sistemde FDM'ye göre yeri



(b) Kameraya XPS'te açılan yuva

Şekil 4.12 Kameranın sistemde ve kapaktaki yeri

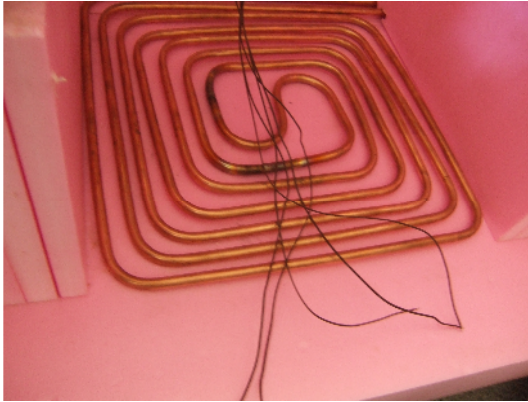
4.2.1.5 Yapı Elemanı

Değerlendirilecek yapı elemanının detaylandırılması Bölüm 4.1'de aktarılmış ve genel çizimi Şekil 4.2b'de verilmiştir. Deney için yapı elemanının, yüzey alanı 50 cm

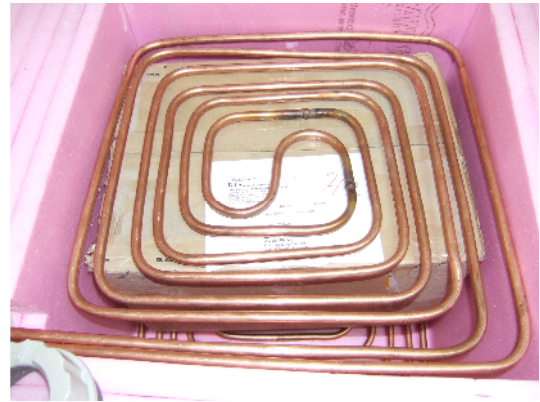
x 50 cm olacak biçimde imal edilmiştir. İmalat aşamaları Şekil 4.13-18 arasında fotoğraflarla gösterilmiştir. Detayda kullanılan ana malzemeler;

- betonarme döşeme,
- XPS,
- FDM,
- su yalıtımı,
- koruyucu beton,
- yapıştırma harcı ve
- seramiktir.

Kutuya ilk ve son olarak içinden hücre içinde sınır koşullarını sağlamak için gerekli akışkanın geçtiği serpantin yerleştirilir (Şekil 4.13).



(a) Alt yüzeydeki serpantin



(b) Alt yüzeydeki serpantin

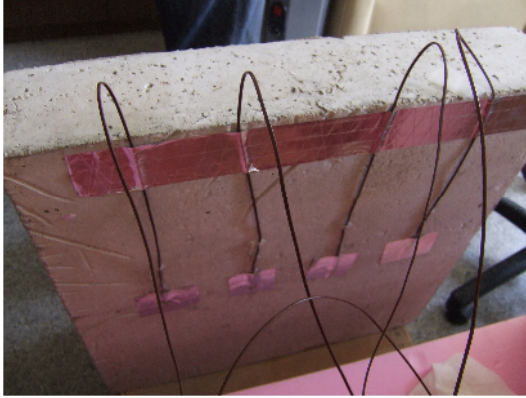
Şekil 4.13 Kutuya serpantin yerleştirilmesi

Betonarme döşeme ve koruyucu beton, DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda C20 standardına uygun olarak dökülmüştür. Denede kullanılan beton karışımı ve özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir. 50 dm³'lük karışım 50 cm x 50 cm x 10 cm ve 50 cm x 50 cm x 5 cm kalıplara dökülmüştür. 50 cm x 50 cm x 5 cm'lik eleman koruyucu beton yerine kullanılmıştır. 50 cm x 50 cm x 10 cm'lik birime – 4 adet 12, 48 cm boyunda donatı yerleştirilerek düzenekte betonarme döşeme olarak kullanılmıştır. Betonarme döşemenin altına ısı çiftleri yerleştirilerek döşeme serpantininin üstüne oturtulmuştur. Sonraki tabakaya geçmeden önce döşemenin üstüne de ısı çifti yerleştirilmiştir (Şekil 4.14).

Tablo 4.6 Deneyde kullanılan beton karışımı ve özellikleri

Malzeme	Miktar	Özgül Ağırlık	Su emme (%)	Ağırlık	
Su	240 kg/m ³	1,0	-	12,4 kg	
Çimento	360 kg/m ³	3,1	-	18 kg	CEMI 42.5R
0-5*	807 kg/m ³	2,59	1,21	40,05 kg	İnce agrega kireçtaşı
5-15*	502 kg/m ³	2,70	0,39	25,04 kg	İri agrega kireçtaşı
15-25*	333 kg/m ³	2,69	0,24	16,64 kg	İri agrega kireçtaşı

* Agregalar KYD (kuru yüzey doymun) halde
Su/çimento=0.67



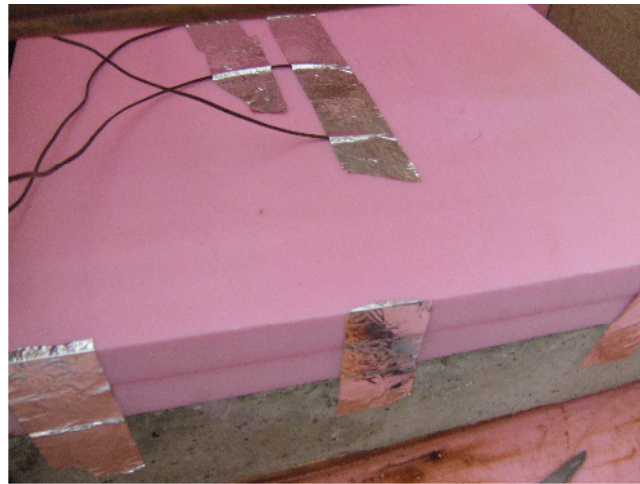
(a) Döşemenin altındaki ısıt çiftler



(b) Döşemenin üstündeki ısıt çift

Şekil 4.14 Betonarme döşeme yerleştirilmesi

Detayda ısı yalıtımı olarak kullanılan XPS, kutu yalıtımı için kullanılan malzeme ile aynıdır ve fiziksel özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Detayda öngörülen 6 cm kalınlığına ulaşmak için betonarme döşemenin üzerine iki kat XPS levha yerleştirilmiştir. Levhaların üzerindeki sıcaklıkları takip edebilmek için de ısıt çiftler yerleştirilmiştir (Şekil 4.15).

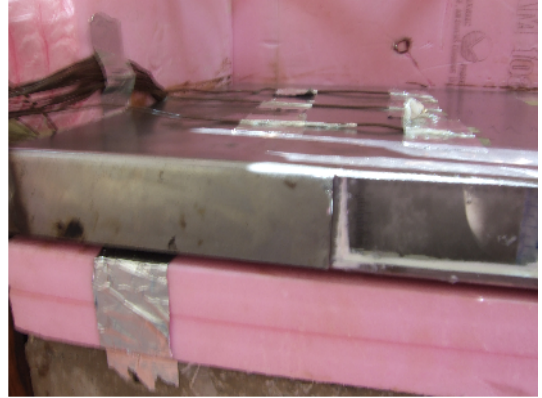


Şekil 4.15 XPS ve üstündeki ısıt çiftler

Seçilen *FDM* olan RT27'nin teknik özellikleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Faz değişimi sırasında %16 hacim değişimi beklendiğinden, *FDM*, deney sırasında şekil değiştirmeyecek metal bir hazne içine yerleştirilmiştir. Metal kutuya *FDM* yerleştirilmeden önce kutunun ortasına 0,5 cm aralıklarla dikey doğrultuda 11 adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Isıl çiftlerin aralıklarının *FDM* yerleştirilirken ve deney sırasında değişmemesi amacıyla ısı çiftleri silindirik plastik esaslı bir kutuya gerekli aralıklarla yerleştirilmiş ve kutunun ortasına daha önceden kaynatılmış 2 cm'lik bir çiviye sabitlenmiştir (Şekil 4.16a).



(a) Isıl çiftlerin yerleştirilmesi

(b) *FDM*'nin önündeki 10 cm cam ve ölçek(c) *FDM*'nin teraziye alınması

(d) Metal kutu üzerindeki ısı çiftleri

Şekil 4.16 Metal kutu yerleştirilmesi ve *FDM* dökümü

Faz değişiminin gözlemlenebilmesi için kutunun ön yüzünün 10 cm'lik bir kısmı kesilerek buraya cam oturtulmuştur. Camın iç yüzüne kağıt ve asetat üzerine çizilmiş ölçekler yerleştirilmiştir (Şekil 4.16b). Deney sırasında *FDM*'nin taşmaması için metal kutu dikkatle teraziye alınmıştır. *FDM* metal kutuya, birer santimetrelilik

katmanlar halinde dökülerek içinde hava kabarcığı kalmamasına dikkat edilmiştir. FDM dökümü sonrasında terazi bir daha kontrol edilmiştir (Şekil 4.16c). Metal kutunun üzerine ısıl çiftler yerleştirilmiştir (Şekil 4.16d). Ayrıca, deneye başlamadan önce FDM üç kere eritilip dondurulmuştur.

Su yalıtımı malzemesi olarak ise, iki yüzeyi PE film kaplı polyester keçe taşıyıcılı 3 mm polimerik modifiye bitüm 3 katman olarak kullanılmıştır. Yalıtımın üzerine önceden bahsedilen koruyucu beton, seramik ve ısıl çiftler yerleştirilerek detay tamamlanmıştır. Detayın üzerine ise serpantin yerleştirilmiş ve kutu deney başlangıcına hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.17).



(a) Su yalıtım malzemesi



(b) Sistemin üstü

Şekil 4.17 Su yalıtımı ve üst katmanların yerleştirilmesi

Bakır serpantininde meydana gelebilecek eğilmelerden ötürü yapı elemanı ile temas yüzeyinin azalması mümkündür. Buna önlem olarak serpantin, üzerine getirilip betona vidalanan bir ahşap sunta elemanı yardımıyla sıkıştırılmıştır. Yapı detayı Şekil 4.18’de verilen biçimde oluşturulmuştur.

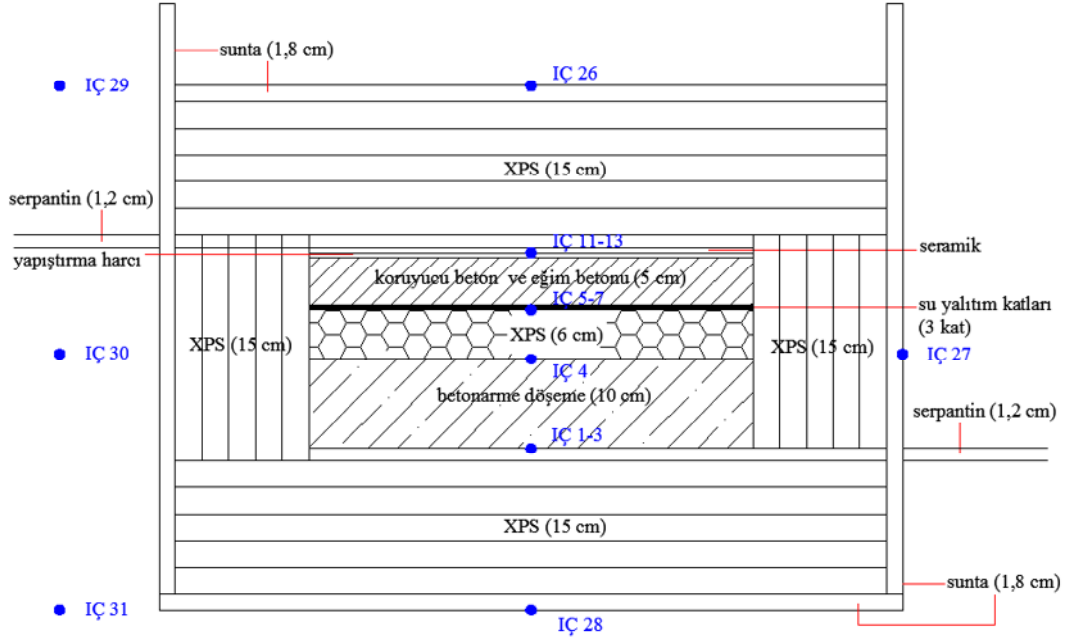


Şekil 4.18 Deneyde kullanılan yapı elemanı

4.2.2 FDM'siz Çalışma

Düzenek Bölüm 4.1.1'de anlatıldığı gibi kurularak FDM'nin davranışı gözlemlenebilir. Ancak bu adımdan önce; düzeneğin çalışma kontrolü yapılması ile sistemden enerji kayıplarının ve sistemin depoladığı duyulur ısının hesaplanması amacıyla düzenek çalıştırılır. Bu aşamada FDM yerleştirilmeden, XPS'in üstüne su yalıtımı ve üst katmanlar yerleştirilerek oluşturulan normal düz çatı elemanı kullanılır. Metal kutu üstüne ve FDM'nin içine yerleştirilen ısı çiftlerinin olmaması dışında toplanan veriler aynıdır (Şekil 4.19). Bu çalışmanın amaçlarından biri sistemin çalışmasında karşılaşılabilecek sorunların kontrolü olduğundan deney iki kere tekrarlanmıştır. FDM'siz deneyde ilerideki sayısal çalışmanın doğrulanmasında kullanılmak üzere sadece üst yüzey sıcaklığının 50 °C olduğu durum çalışılmıştır. Ancak verilerin ilerideki deneylerle de karşılaştırılması düşünülerek deney süresi her deneyde sabit 36 saat ve sıcaklık aralığı 20-65 °C olacak biçimde deney grafikleri çizilmiştir. Bu çalışmada tüm deneyler bitirildikten sonra FDM'siz deneyler

tekrarlanmıştır ve tekrar deneylerinin sonuçları verilmiştir. Ancak yöntemin uygulanmasında öncelikle FDM'siz deneylerin yapılması önerilmektedir.



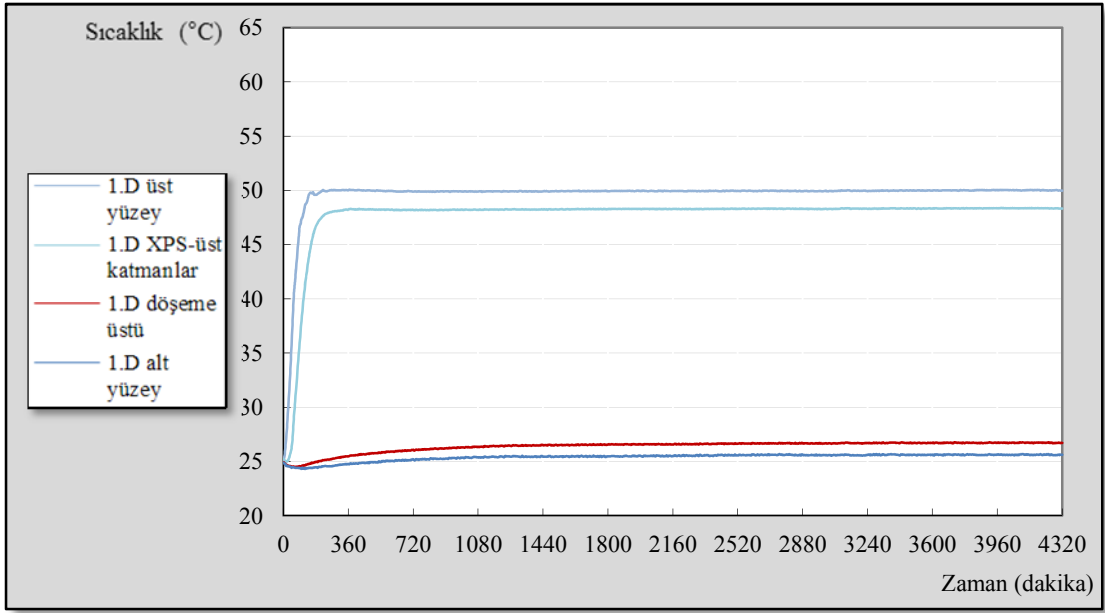
Şekil 4.19 FDM'siz yapı elemanındaki ısı çift yerleşimleri

4.2.2.1 FDM'siz 1. Deney

Deneye 19 Nisan 2012 tarihinde saat 10:07'de başlanmıştır. Deneye başlamadan önce 18 saat boyunca alt ve üst yüzeylerdeki serpantinlerde 25 °C sıcaklığında su gezdirilmiştir. Deney süresince ortam koşulları şu şekildedir;

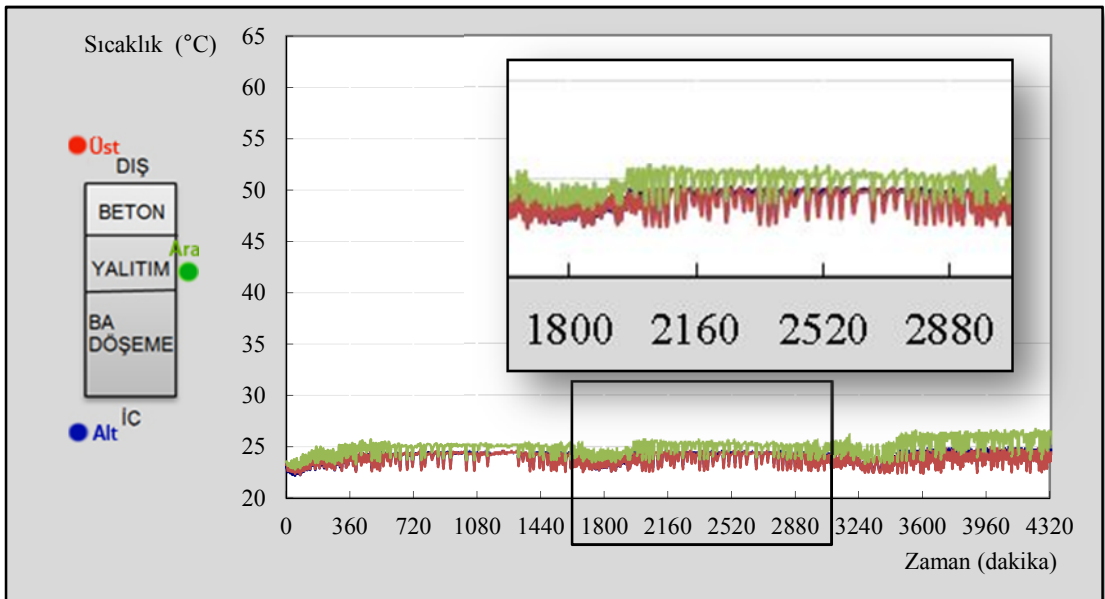
- Mekandaki klima 25 °C'ye ayarlanmıştır,
- İç yüzeye verilen akışkan sıcaklığı 25 °C'de sabit tutulmuştur,
- Dış yüzeye yüzey sıcaklığı hedeflenen 50 °C'ye ulaşacak şekilde değişken sıcaklıkta akışkan verilmiştir.

Deney 72 saat sürmüştür. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 4.20'deki gibidir. Sıcaklık eğrileri Şekil EK IV.1-4'te teker teker verilmiştir. Sonuçta beklendiği üzere, elemanda bir süre sonra denge durumu oluşmuştur.



Şekil 4.20 Yapı elemanı katman sıcaklıkları (FDM'siz 1. deneyde ölçülen)

Deney sırasında, ortam ile ısı alışverişini en aza indirmek için hücre ve borular yalıtılmıştır. Hücre yüzeyinden gerçekleşen ısı kaybı/kazançları Eşitlik 3.3 ile hesaplanmaktadır. Deney sırasında ölçülen ortam sıcaklıkları Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 Ortamdan alınan sıcaklıklar (FDM'siz 1. deneyde ölçülen)

Şekil 4.21'den de görüldüğü üzere ortam sıcaklığı oldukça küçük bir aralıkta değişim göstermektedir. Eşitlik 3.3'teki h değerini bulmak için Eşitlik 4.1 kullanılmaktadır.

$$H = Nu \cdot k / L \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

Bu eşitlikte,

Nu : ortalama Nusselt sayısı [-],

k : ısı iletim [W/mK], ve

L : transfer yüzeyi uzunluğu [m]'dur.

Deney düzeneğinin yan yüzeylerinden olan kayıplar için gerekli Nusselt sayısı Eşitlik 4.2 kullanılarak dikey yüzey için hesaplanmıştır (Incropera ve ark.,).

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra^{1/4}}{[1+(0,4927/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (\text{Eşitlik 4.2})$$

Bu eşitlikte,

Ra : ortalama Rayleigh sayısı [-], ve

Pr : Prandtl sayısı'dır [-].

Nusselt sayısının hesaplanması sırasında deneyin üstü yatay yüzeyde sıcak levha üstü, deneyin altı ise yatay yüzeyde soğuk levha altı olarak düşünülmüştür. Her ikisi için de Nusselt sayısını hesaplamak için Eşitlik 4.3-4 kullanılır.

$$\text{eğer } 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \quad Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad (\text{Eşitlik 4.3})$$

$$\text{eğer } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \quad Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad (\text{Eşitlik 4.4})$$

Nusselt sayısını hesaplayabilmek için önce Rayleigh sayısı Eşitlik 4.5 kullanılarak hesaplanır.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_x) \cdot L^3}{\nu \cdot a} \quad (\text{Eşitlik 4.5})$$

Bu eşitlikte;

g : yerçekimi ivmesi [9,81 m/s²],

β : ısı genleşme katsayısı [1/K],

ν : kinematik viskozite [m²/s], ve

a : ısı yayılım katsayısı [m²/s]'ni

göstermektedir.

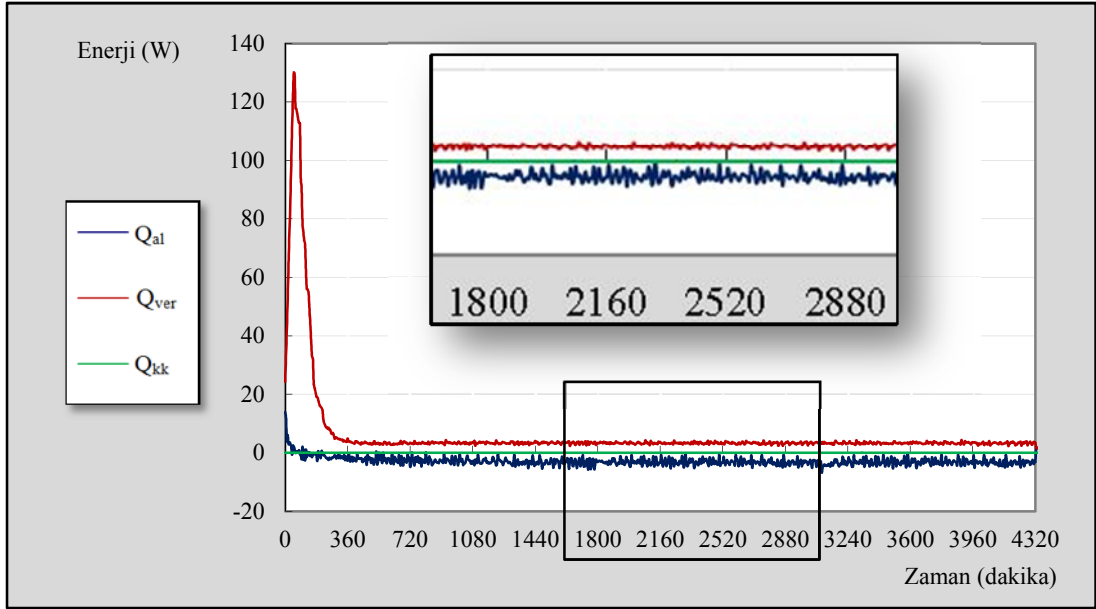
Burada β Eşitlik 4.6'da verildiği gibi hesaplanır:

$$\beta = 1 / T_{film} = 1 / ((T_s + T_\infty) / 2) \quad (\text{Eşitlik 4.6})$$

Bu eşitlikte;

T_{film} : film yüzey sıcaklığı [K]'dır.

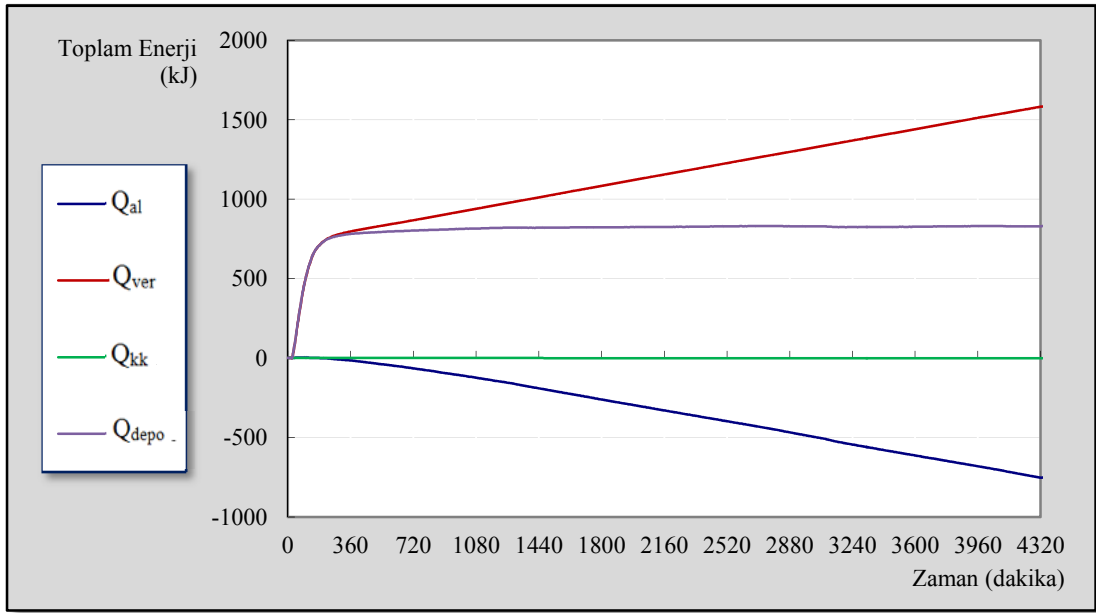
Sisteme verilen ve sistemden alınan enerji Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2 ile hesaplanır. Hesap sonuçları, sistem kayıp/kazanç sonuçları ile beraber Şekil 4.22'de verilmiştir. Buradan da sisteme başlangıçta daha fazla enerji verildiği ve zamanla sistem dengeye geldiğinde alınan enerji miktarı ile verilen enerji miktarının eşitlendiği görülmektedir.



Şekil 4.22 Sistemdeki anlık enerji verileri (FDM'siz 1. deney verileriyle hesaplanan)

Şekil 4.23'te ise sisteme verilen, sistemden alınan ve sistemden kaybedilen/kazanılan toplamı enerji gösterilmiştir. Bu şekilde de bir süre sonra alınan ve kazanılan/kaybedilen enerji ile verilen enerjinin dengeye geldiği görülmektedir. Dengeye gelinceye kadar geçen zamanda sistemde depolanan enerji Eşitlik 3.4 ile

hesaplanmaktadır. Burada, sistem kayıp/kazançlarının %1'den az olduğu hesaplanmıştır.

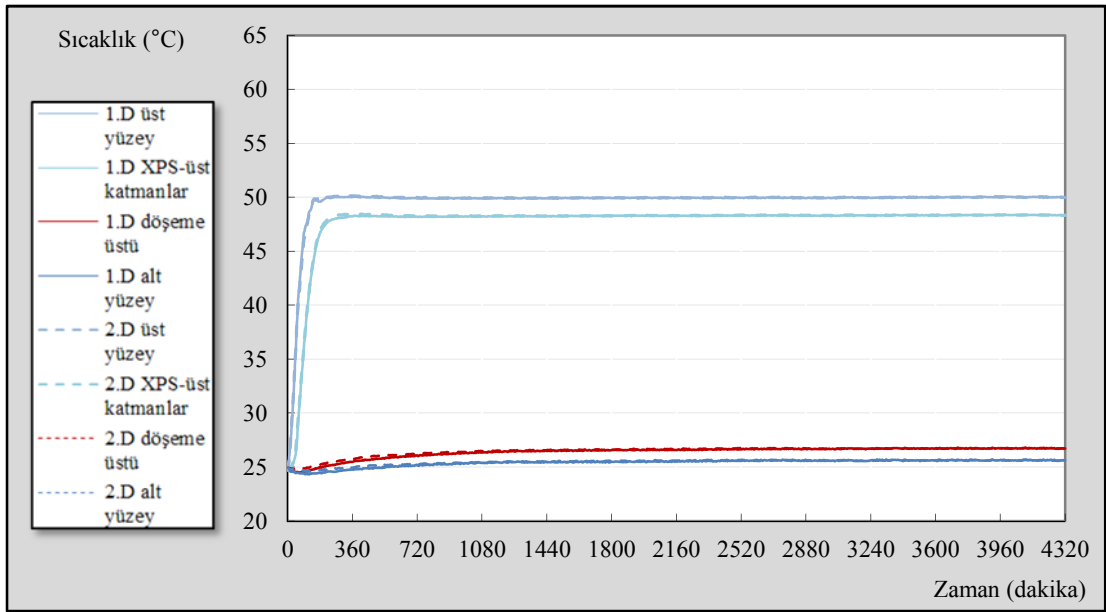


Şekil 4.23 Sistemdeki enerji toplamları (FDM'siz 1. deney verileriyle hesaplanan)

4.2.2.2 FDM'siz 2. Deney

Deneye 23 Nisan 2012 tarihinde saat 10:34'te başlanmıştır. Ortam koşulları FDM'siz 1. deney ile aynıdır. Aynı şekilde deneye başlamadan önce sisteme 18 saat boyunca 25°C sıcaklığında su verilmiştir. Sonuçta FDM'siz 1. deneyde olduğu gibi, beklentiler doğrultusunda, elemanda bir süre sonra denge durumu oluşmuştur. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklar, FDM'siz 1. deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Sıcaklık eğrileri Şekil EK IV.5-8'de detaylandırılmıştır. FDM'siz deneylerde ölçülen sıcaklıklar değerleri karşılaştırıldığında % 0,09 fark bulunmuştur.

Deney sırasında ortam sıcaklığı oldukça küçük bir aralıkta değişim göstermektedir, ölçülen ortam sıcaklıkları Şekil EK IV.9'da verilmiştir. Ölçümlerden yararlanarak hesaplanan anlık enerji verileri Şekil EK IV.10'da gösterilmiştir. Sistem kayıp/kazançlarının % 1'in altındadır. Hesaplanan enerji değerleri için deneyler arasında % 0,79 fark hesaplanmıştır.



Şekil 4.24 Yapı elemanı katman sıcaklıkları (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)

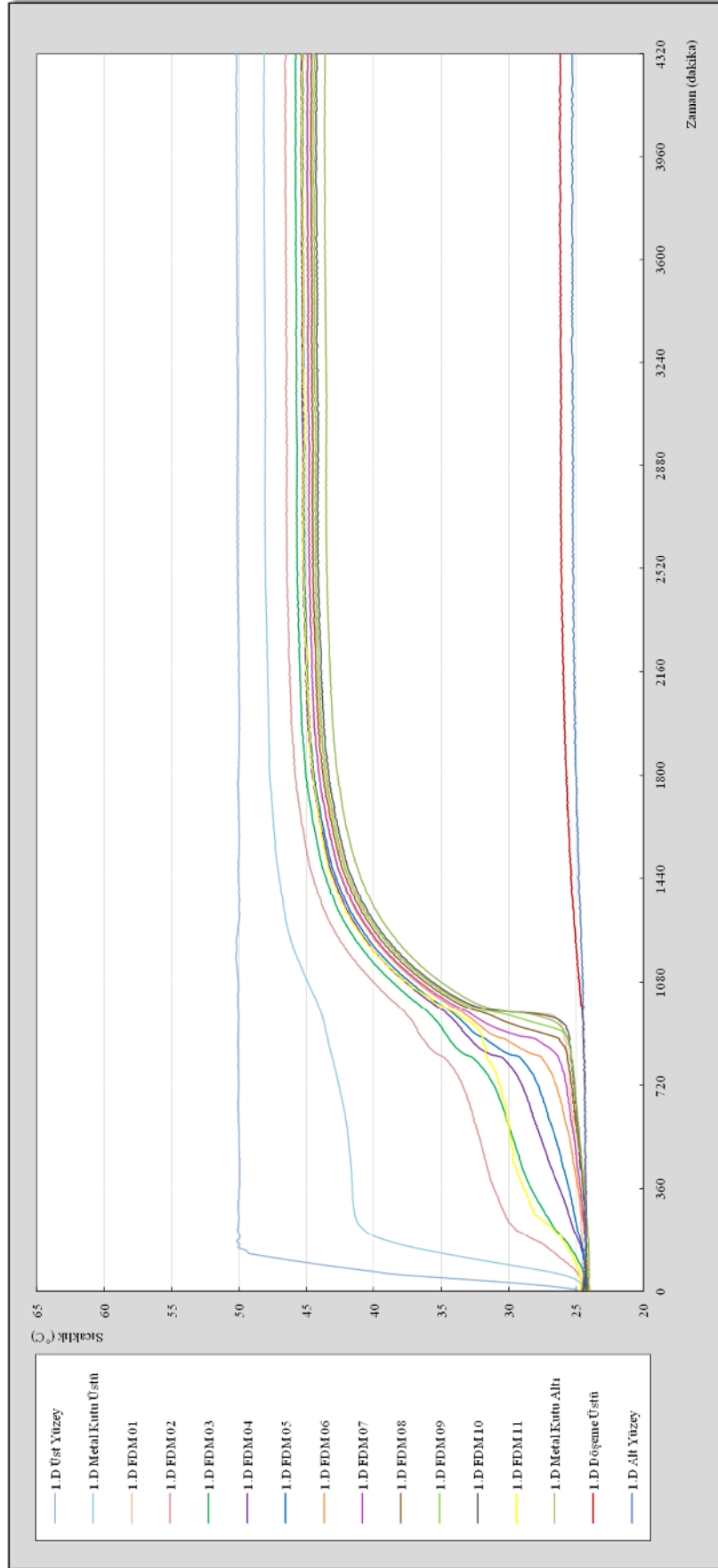
4.2.3 FDM'li Çalışma

4.2.3.1 50 °C 1. Deney

50 °C 1. deneye 16 Şubat 2012 tarihinde saat 9:00'da başlanmıştır. Deneye başlanmadan önce 32 saat boyunca alt ve üst yüzeylerdeki serpantinlerde 25 °C sıcaklığında su gezdirilmiştir. Deney süresince ortam koşulları FDM'siz deneylerle aynıdır:

- Mekandaki klima 25 °C'ye ayarlanmıştır,
- İç yüzeye verilen akışkan sıcaklığı 25 °C'de sabit tutulmuştur,
- Dış yüzeye yüzey sıcaklığı hedeflenen 50 °C'ye ulaşacak şekilde değişken sıcaklıkta akışkan verilmiştir.

Ölçülen alt ve üst yüzey sıcaklıkları ile ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri Şekil 4.25'teki gibidir. Ayrıca sıcaklık eğrileri ayrıntılı olarak Şekil EK IV.11-16'da verilmiştir. Sonuçta beklendiği üzere, FDM erimiş ve elemanda denge durumuna ulaşmak FDM'siz deneylere göre daha uzun sürmüştür.



Şekil 4.25 Yapı elemanındaki zamana bağlı sıcaklık değişimi (50 °C 1. deneyde ölçülen)

Elemanda aşağıdan yukarıya yani 25 °C sıcaklıkta tutulan yüzeyden 50 °C sıcaklıkta tutulan yüzeye doğru katmanların sıcaklıklarının artması beklenmektedir. Ancak Şekil 4.25'ten görüldüğü üzere bazı katmanlardaki ölçümler bu beklentiye ters düşmektedir. Bu katmanlar FDM 1, FDM 11, metal kutu altı sıcaklığı ve metal kutu üstü sıcaklıklarıdır. Bunun olası nedenleri;

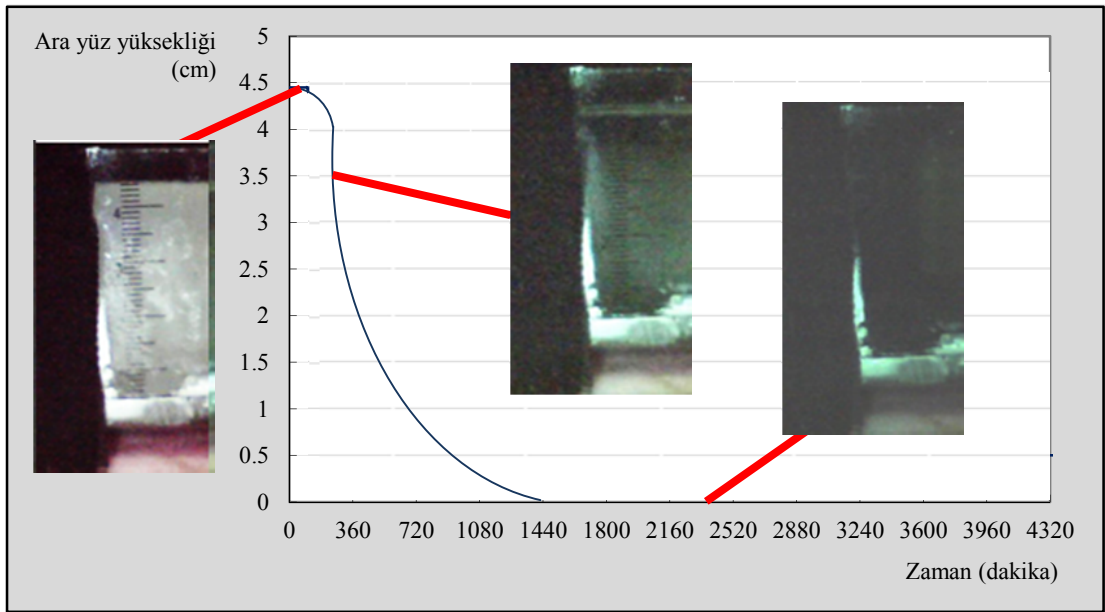
- FDM01'i ölçen ısı çift FDM'nin katı sıvı hal değiştirmesinde etkilenen bölgede bulunmaktadır. Yani deneyin başlangıcından faz değişiminin sonlanmasına kadar metal kutunun içerisindeki havanın sıcaklığını ölçmektedir.
- FDM 11 ölçümünü yapan ısı çift metal kutu ile direk temas etmektedir. Aynı şekilde metal kutu alt ve üst sıcaklıkları da metal kutu ile temas eden ısı çiftler yardımıyla ölçülmüştür. Metalin yüksek termofiziksel özellikleri nedeniyle ısı çift ölçümlerinde hata oluşabilmektedir.

Yukarıda bahsedilen noktalardan alınan ölçümler Şekil 4.25'te verilmiştir. Ancak sağlıklı bulunmadıkları için ölçümlerine rağmen ilerideki deney şekillerinde verilmeyeceklerdir.

Şekil 4.25'teki FDM sıcaklık grafiklerinde FDM'nin birbirini takip eden dört farklı durumu görülmektedir. Öncelikle FDM'nin faz değişim sıcaklığına erişene kadar duyulur enerji depolamaktadır. Bu sırada sıcaklığı da yükselmektedir. Daha sonra faz değiştirme sırasında FDM'nin sıcaklığında daha düşük bir eğimle uzun süreli artış gözlenmektedir. Faz değişimini takiben FDM, kararlı durum sıcaklığına erişene kadar sıcaklığı artar ve duyulur ısı depolamaya devam eder. Bu sırada duyulur ısı depolama Şekil 4.25'te hızla sıcaklık yükselmesiyle beraber görülmektedir. Daha sonra yapı elemanındaki diğer malzemeler gibi FDM de kararlı durum sıcaklığına erişir ve sabit sıcaklıkta devam eder.

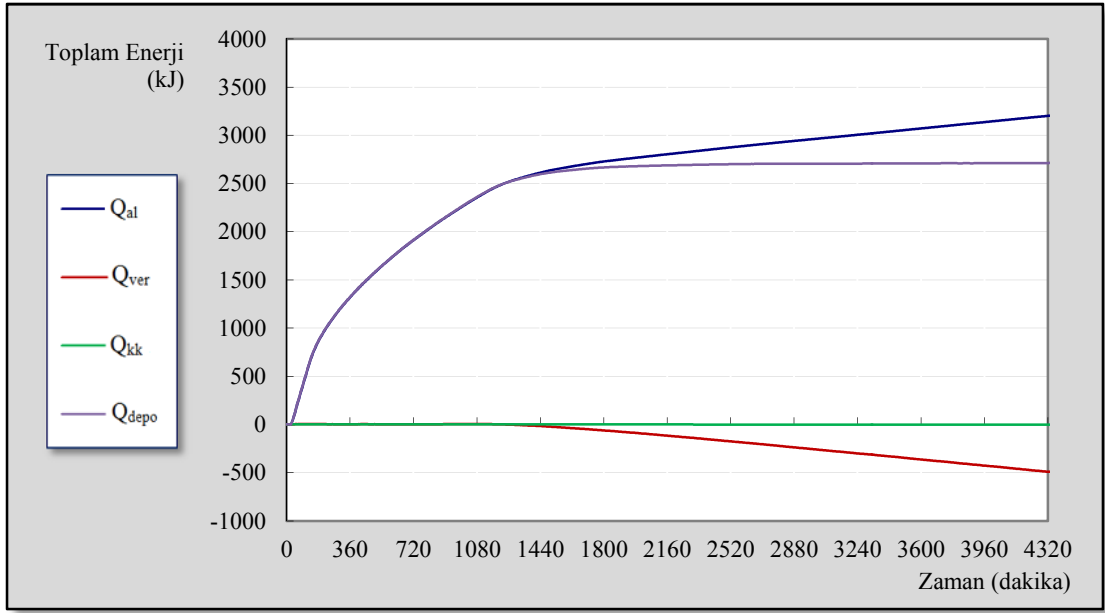
Faz değişim arayüzü kameradan çekilen fotoğrafların gözlenmesiyle Şekil 4.26'daki gibi belirlenmiş ve gözlem fotoğraflarıyla beraber verilmiştir. EK V'te ise

gözlem fotoğrafları yorumlanmadan verilmiştir. Katı FDM 5 cm. kalınlığındaki metal hücrede 4,4 cm. yer kaplamakta ve eridikçe hacmi artarak tüm metal kutu yüksekliği olan 5 cm'e ulaşmaktadır. Bu yüzden deneyin başlangıcında FDM kalınlığı 4,4 cm'dir. FDM erime ara yüzü beklentilerle uyumlu olarak sürekli azalma göstermiştir. Ancak deney sırasınca tüm yüzeyin bir arada hareket etmediği, bunun yerine kenarların daha kısa sürede faz değiştirdiği ve FDM'nin ortaya doğru hafif tümsek yaparak eridiği görülmüştür.



Şekil 4.26 50 °C 1. deney faz değişim ara yüzü

FDM'siz deneydeki gibi hesaplanan enerji verileri Şekil 4.27'de verilmiştir. Bu deneyde enerji dengesi sağlanması için FDM'siz deneylere göre daha uzun süre gerekmiştir ve depolanan enerji miktarı daha fazladır. Aradaki bu fark faz değişimi ve gizli ısıdan kaynaklanmaktadır. Deneyin yapıldığı ortamdan ölçülen sıcaklıklar Şekil EK IV.17'deki gibidir. Aralarında büyük farklılık yoktur. Bunlardan hareketle hesaplanan anlık enerji verileri de Şekil EK IV.18'de verilmiştir.

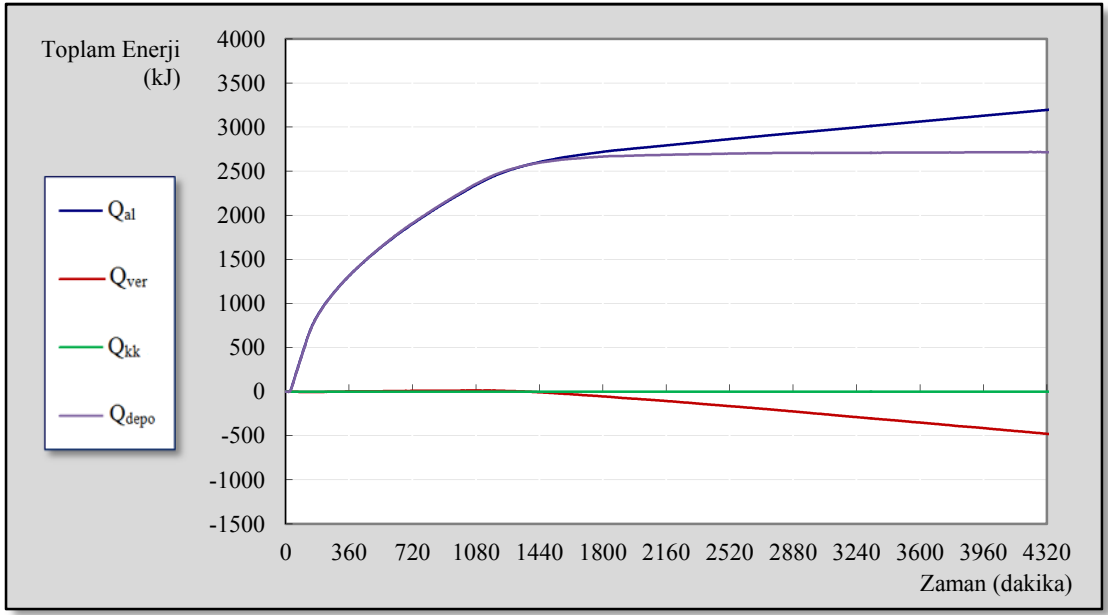


Şekil 4.27 Sistemdeki enerji toplamları (50 °C 1. deney verileriyle hesaplanan)

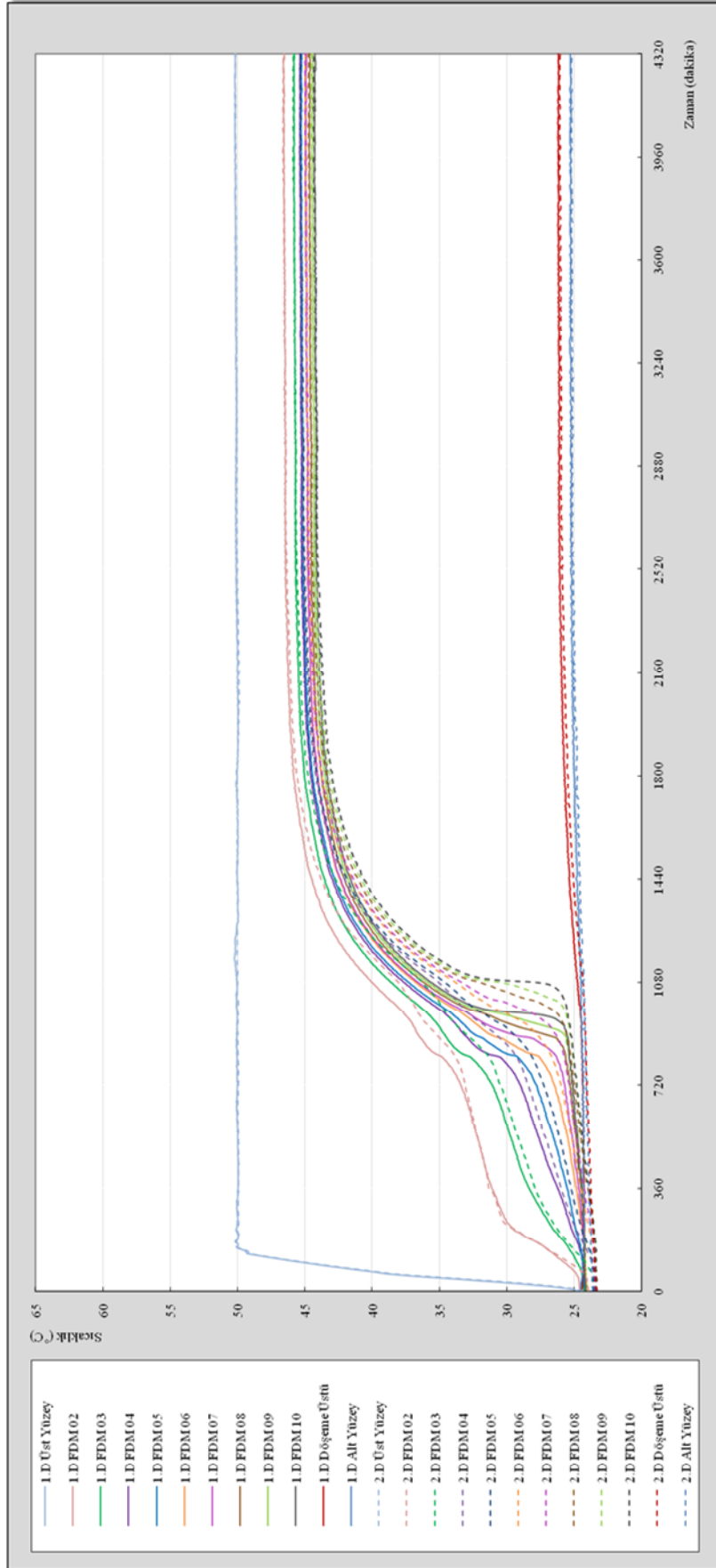
4.2.3.2 50 °C 2. Deney

50 °C 2. deneye 14 Mart 2012 tarihinde saat 09:31'de başlanmıştır. Ortam koşulları 50 °C 1. deney ile aynıdır. Aynı şekilde deneye başlamadan önce sisteme 38 saat boyunca 25 °C sıcaklığında su verilmiştir. Sonuçta 50 °C 1. deneyde olduğu gibi, beklentiler doğrultusunda, FDM'de erime gerçekleşmiş ve elemada bir süre sonra denge durumu oluşmuştur. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. Ölçülen sıcaklıklar, 50 °C 1. deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.29'da verilmiştir. Sıcaklık eğrileri 50 °C 1. deney ile oldukça uyumludur. Aralarındaki sayısal fark % 0,07 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sıcaklıklar Şekil EK IV.19-24'te daha detaylı gösterilmiştir.

Gözlemlenen faz değişimi EK V'te görülmektedir. Deneyin yapıldığı ortamdan ölçülen sıcaklıklar Şekil EK IV.25'deki gibidir. Aralarında farklılık azdır. Bunlar temel alınarak hesaplanan anlık enerji verileri de Şekil EK IV.26'da verilmiştir. Hesaplanan enerji verileri ise Şekil 4.28'de verilmiştir. 50°C 1. deney verileri ile aralarında % 0,33 fark vardır.



Şekil 4.28 Sistemdeki enerji toplamları (50 °C 1. deney verileriyle hesaplanan)

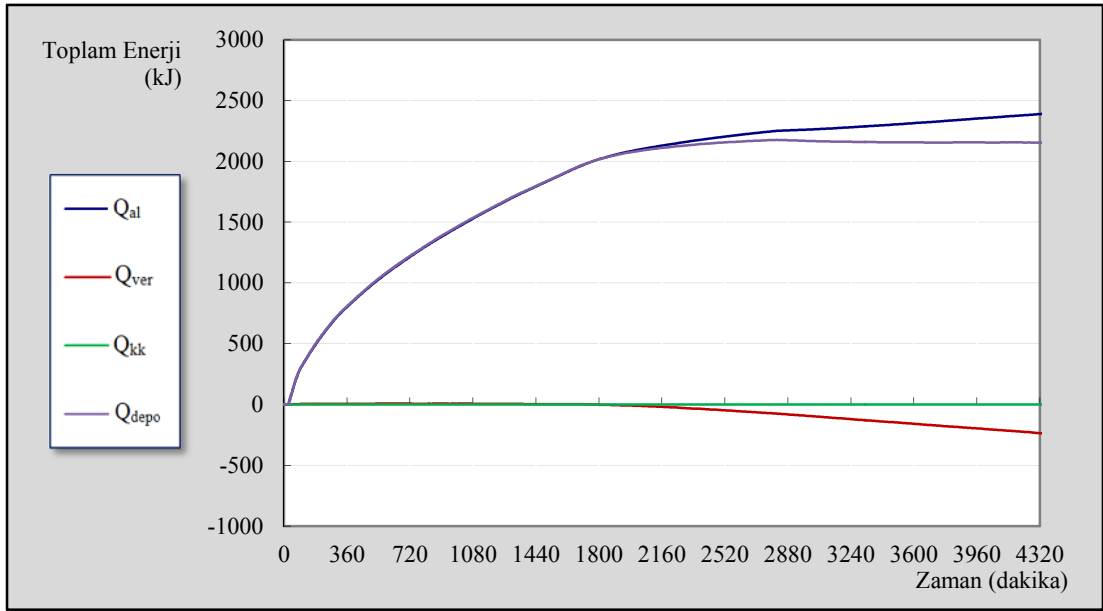


Şekil 4.29 Yapı elemanındaki zamana bağlı sıcaklık değişimi (50 °C 2. deneyde ölçülen)

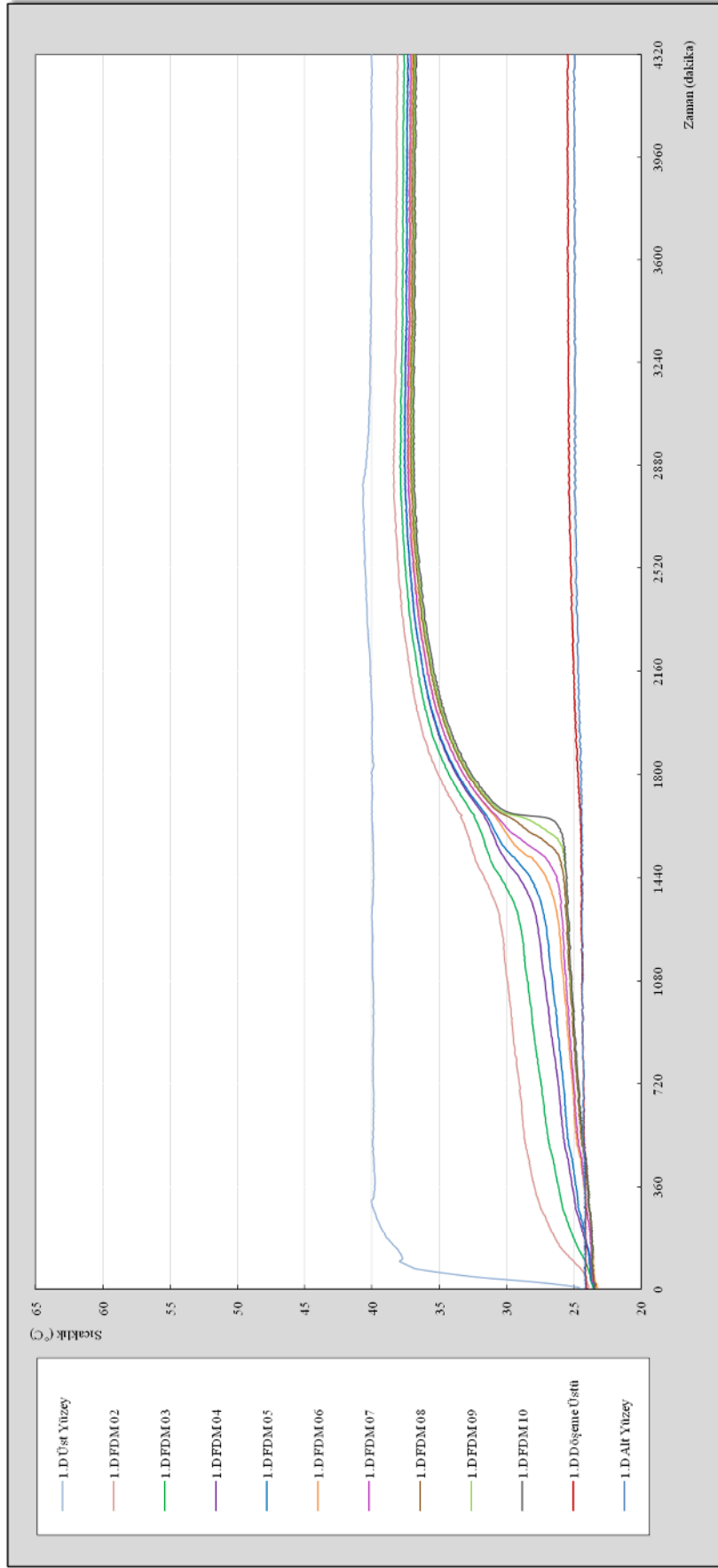
4.2.3.3 40 °C 1. Deney

Deneye 19 Ocak 2012 tarihinde 09:30'da başlanmıştır. Deneye başlamadan önce 40 saat boyunca alt ve üst yüzeylerdeki serpantinlerde 25 °C sıcaklığında su gezdirilmiştir. Deney sırasınca ortam koşulları diğer deneylerde olduğu gibidir. Mekanda klima 25 °C'ye ayarlanmıştır. İç yüzeye 25 °C sıcaklığında akışkan verilmeye devam edilmiş, dış yüzeye ise yüzey sıcaklığı 40 °C'ye ulaşacak şekilde değişken sıcaklıkta akışkan verilmiştir. Elemanda bir süre sonra yeni bir denge durumu oluşmuştur. Deney 72 saat sürmüştür. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri Şekil 4.31'deki gibi ölçülmüştür. Sonuç sıcaklık eğrileri Şekil EK IV.27-32'de ayrıntılı verilmiştir.

Deney sırasında ortam sıcaklığı oldukça küçük bir aralıkta değişim göstermektedir, ölçülen ortam sıcaklıkları Şekil EK IV.33'te verilmiştir. Ölçümlerden yararlanarak hesaplanan anlık enerji verileri Şekil EK IV.34'te gösterilmiştir. Hesaplanan toplam enerji verileri ise Şekil 4.30'da verilmiştir. Sistem kayıp/kazançlarının % 1'in altındadır.



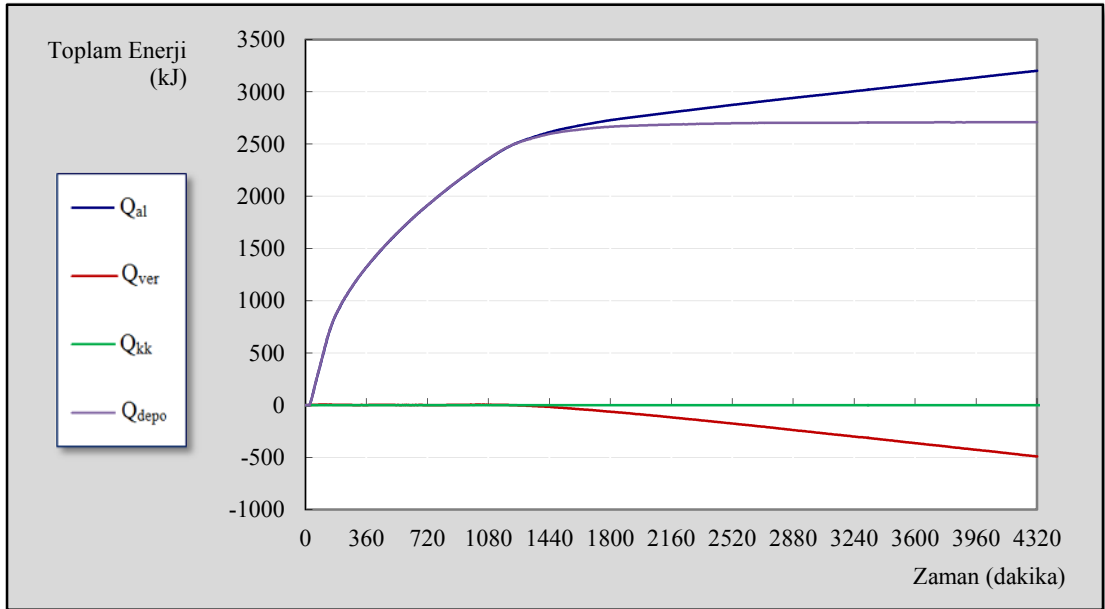
Şekil 4.30 Sistemdeki enerji toplamları (40 °C 1. deney verileriyle hesaplanan)



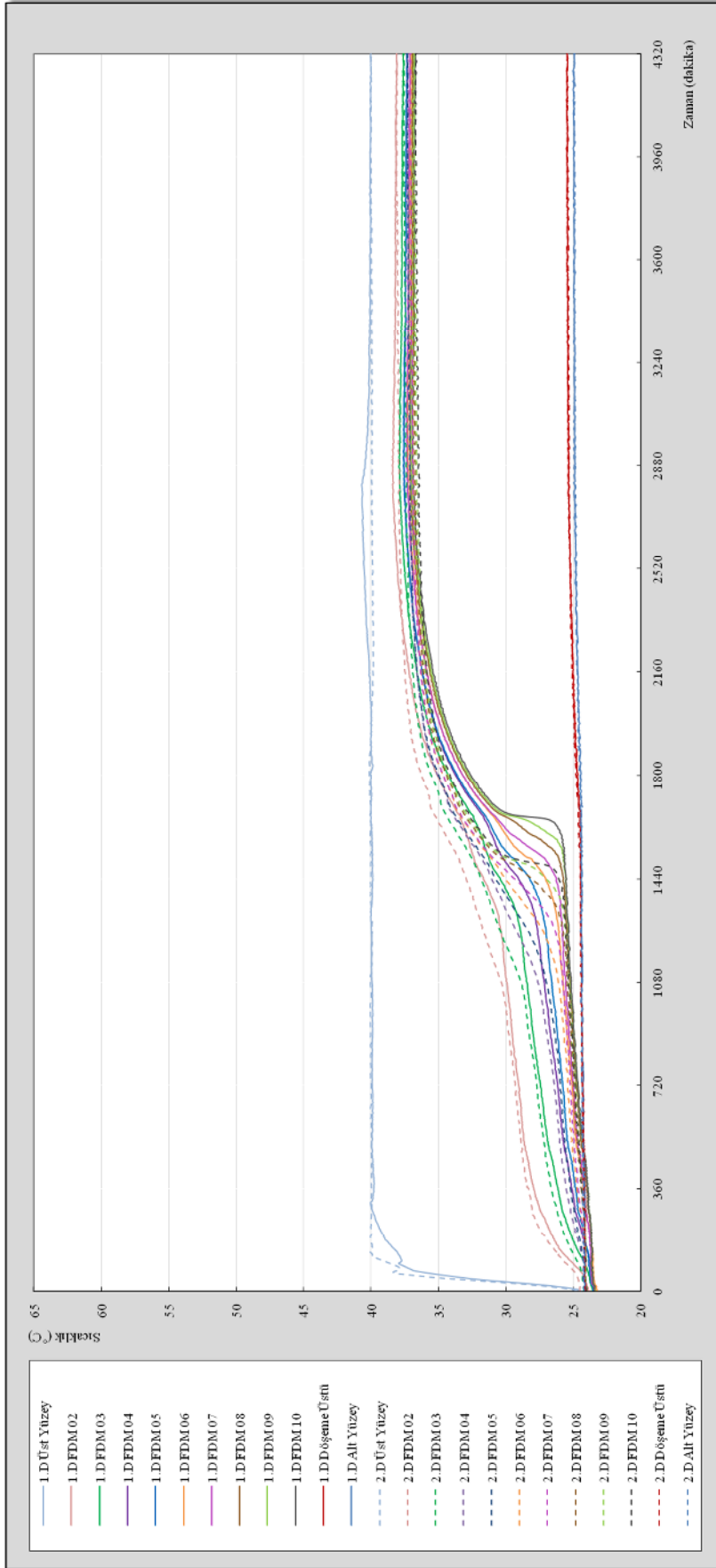
Şekil 4.31 FDM sıcaklıkları (40 °C 1. deneyde ölçülen)

4.2.3.4 40 °C 2. Deney

Deneye 26 Ocak 2012 tarihinde 10:00'da başlanmıştır. Deneye başlamadan önce 40 saat boyunca alt ve üst yüzeylerdeki serpantinlerde 25 °C sıcaklığında su gezdirilmiştir. Deney ortam koşulları ve süresi 40 °C 1. Deneydeki gibidir. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri, 1. Deneyle karşılaştırmalı olarak Şekil 4.33'te verilmiştir. Sonuç sıcaklık eğrileri Şekil EK IV.35-40'te ayrıntılandırılmıştır. Sıcaklık verilerinde 40 °C 1. deney ile arasında % 0,82 fark olduğu hesaplanmıştır. Gözlemlenen faz değişimi EK V'te görülmektedir. Hesaplanan enerji verileri ise Şekil 4.32'de verilmiştir. 40 °C 1. deney verileri ile aralarında % 2,45 fark bulunmuştur.



Şekil 4.32 Sistemdeki enerji toplamları (40 °C 2. deney verileriyle hesaplanan)

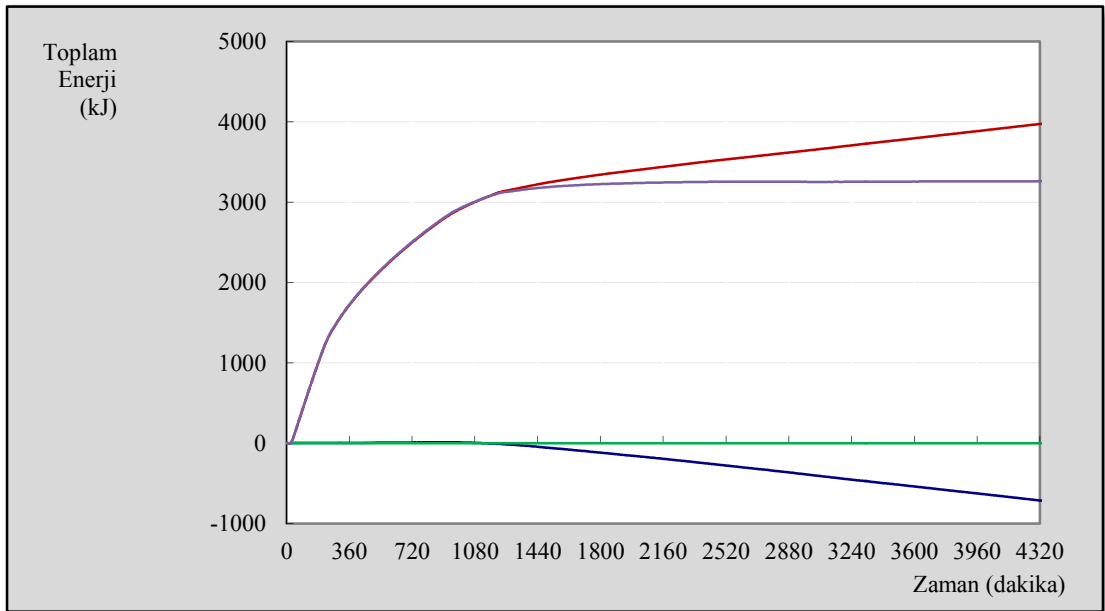


Şekil 4.33 FDM sıcaklıkları (40 °C 2. deneyde ölçülen)

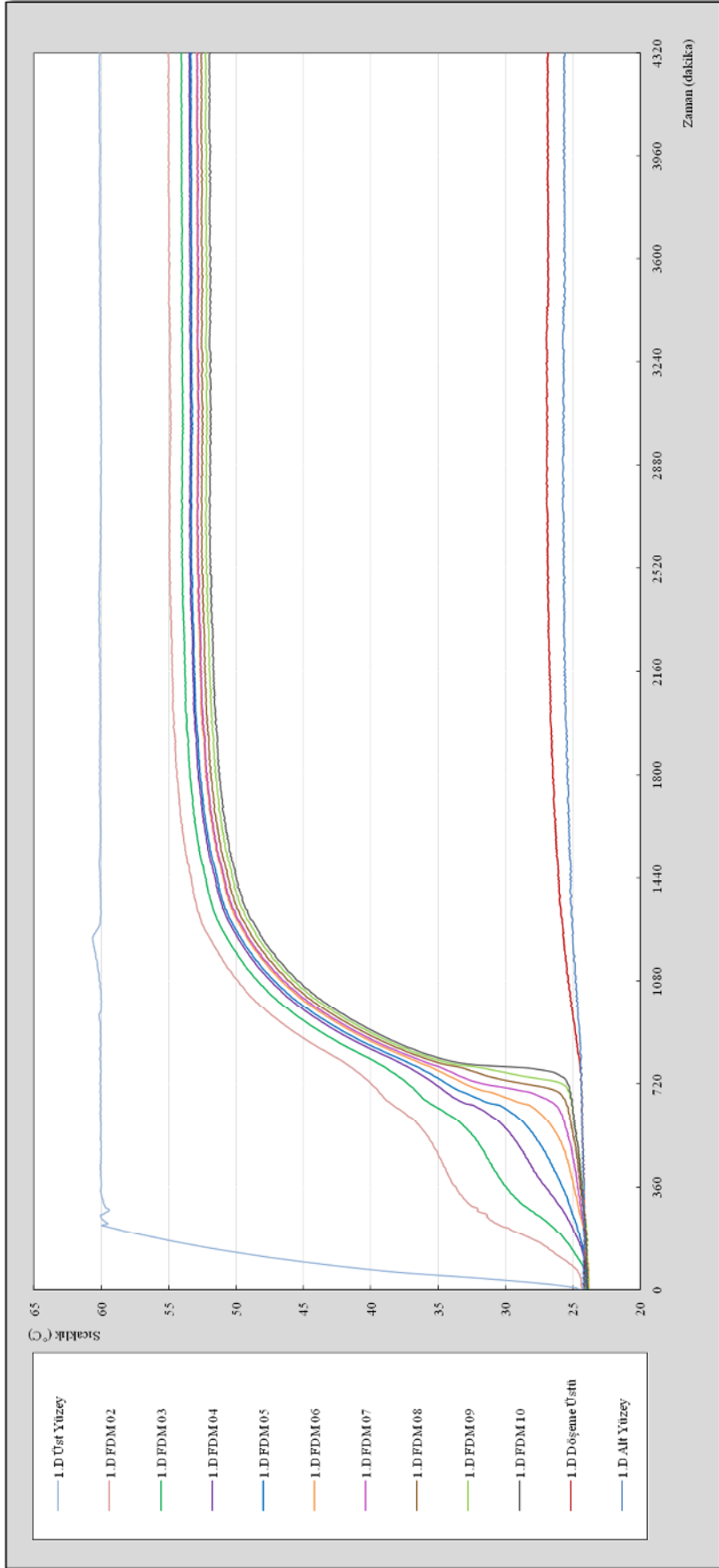
4.2.3.5 60 °C 1. Deney

Deneye 23 Şubat 2012 tarihinde saat 8:57'de başlanmıştır. Deneye başlamadan, 34 saat boyunca alt ve üst yüzeylerdeki serpantinlerde 25°C sıcaklığında su gezdirilmiştir. Deney süresince ortam koşulları diğer deneyler gibi, mekanda klima yardımıyla 25 °C'de, iç yüzeydeki serpantindeki akışkan 25 °C'de, dış yüzey sıcaklığı 60 °C olacak şekilde serpantindeki akışkan değişken sıcaklıklarda tutulmuştur. Katmanlarda ölçülen sıcaklıkları ile ara sıcaklık değişimleri Şekil 4.35'de gösterilmiştir. Ayrıca sıcaklık eğrileri ayrıntılı olarak Şekil EK IV.43-48'deki gibidir.

Gözlemlenen faz değişimi EK V'te, deneyin yapıldığı ortamdan ölçülen sıcaklıklar Şekil EK IV.49'da verilmiştir. Aralarında fark azdır. Bunlar esas alınarak hesaplanan anlık enerji verileri de Şekil EK IV.50'de verilmiştir. Hesaplanan enerji verileri ise Şekil 4.34'teki gibidir.



Şekil 4.34 Sistemdeki enerji toplamları (60 °C 1. deney verileriyle hesaplanan)

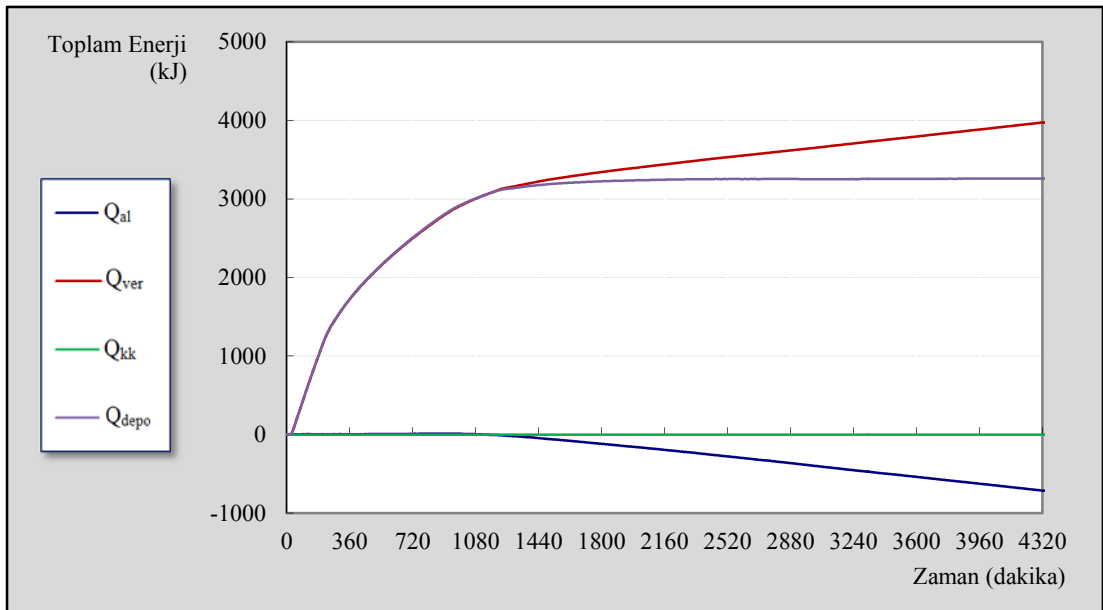


Şekil 4.35 FDM sıcaklıkları (60 °C 1. deneyde ölçülen)

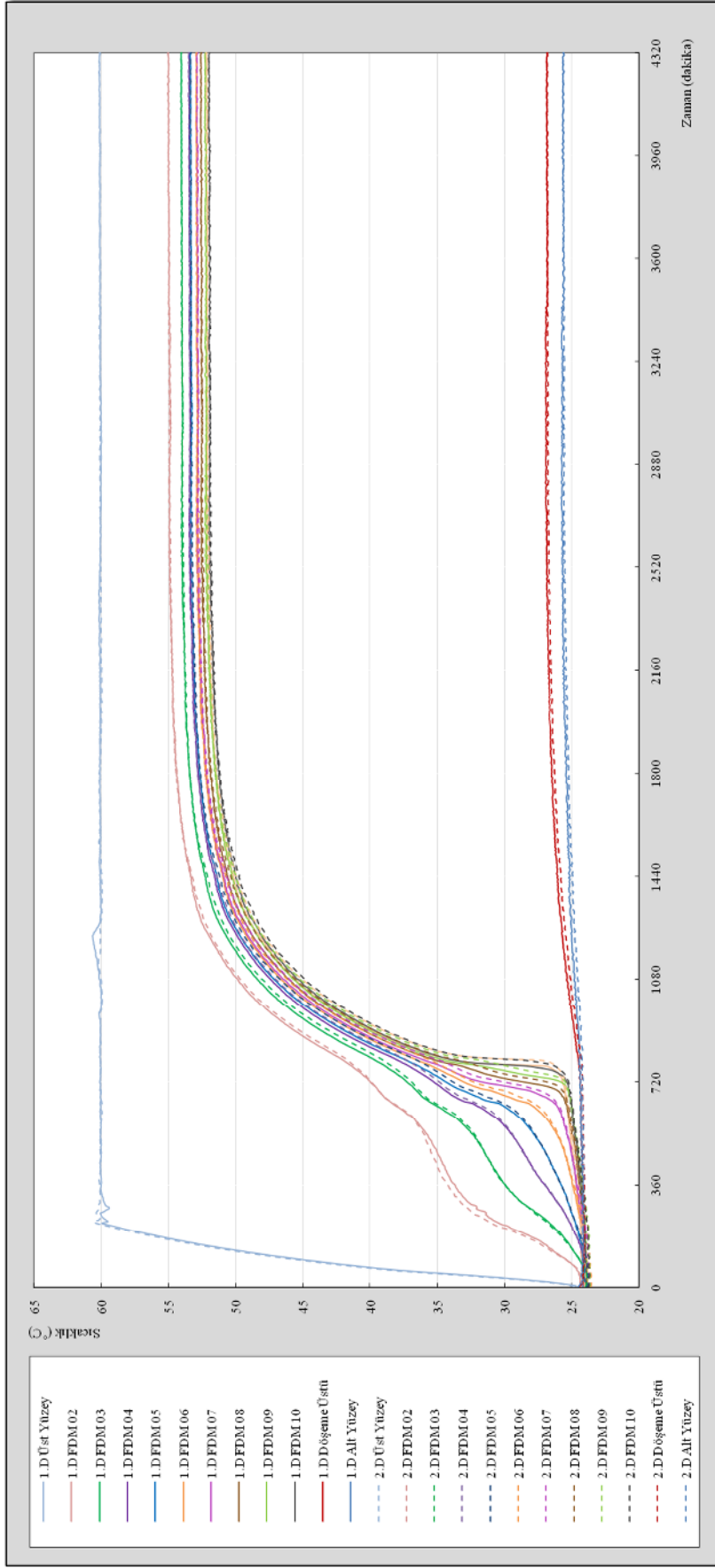
4.2.3.6 60 °C 2. Deney

Deneye 22 Mart 2012 tarihinde saat 09:00'da başlanmıştır. Ortam koşulları 60 °C 1. deney ile aynıdır. Aynı şekilde deneye başlamadan önce sisteme 34 saat boyunca 25 °C sıcaklığında su verilmiştir. Yüzey sıcaklıklarında ve ara katmanlardaki sıcaklık değişimleri ölçülmüştür. 72 saatlik deney sonucunda ölçülen sıcaklıklar, 60 °C 1. deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.37'de verilmiştir. Sıcaklık eğrileri 60 °C 1. deney ile oldukça uyumludur. Aralarındaki sayısal fark % 0,44 olarak hesaplanmıştır. Ölçülen sıcaklıklar Şekil EK IV.51-56'da daha detaylı gösterilmiştir.

Faz değişimi gözlemleri EK V'te verilmiştir. Deneyin yapıldığı ortam sıcaklıkları Şekil EK IV.57'deki gibidir. Aralarında az fark vardır. Bu veriler temel alınarak hesaplanan anlık enerji verileri de Şekil EK IV.58'de, hesaplanan enerji verileri ise Şekil 4.36'da verilmiştir. 60 °C 1. deney verileri ile aralarında % 4,38 fark vardır.



Şekil 4.36 Sistemdeki enerji toplamları (60 °C 2. deney verileriyle hesaplanan)



Şekil 4.37 FDM sıcaklıkları (60 °C 2. deneyde ölçülen)

4.3 Üçüncü Adım: Sayısal Çalışma

Bu adımda, deneysel olarak ölçülen yapı elemanı ısıl davranışının modellenmesi araştırılmaktadır. Sırasıyla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği hakkında genel bilgi verilmekte (Bölüm 4.3.1), Fluent'le sayısal model tanımlanmakta (Bölüm 4.3.2), model FDM'siz deneylere göre çözülmekte (Bölüm 4.3.3) ve FDM'li deneylerle doğrulanmaktadır (Bölüm 4.3.4).

4.3.1 Sayısal Modelleme

Hem faz değişimi, hem de yapı elemanlarında enerji akışı analitik yöntemlerle ve elle çözülmesi çok karmaşık ve uzun zaman alan uygulamalardır. Bu tip problemleri problem bazında çözmek için değişik sayısal yöntem ve algoritmalar geliştirilmiştir (Özışık, 1993; Chung, 2002; Versteeg ve Malalasekera, 2007). Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde, bu yaklaşımları kullanarak, sınır koşulları ile tanımlanan bir problem bilgisayarlar yardımıyla modellenmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, çözümlerin daha hızlı ve doğru olmasını sağlamaktadır.

Tüm hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamalarında problem tanımlanması için sırasıyla;

- Ön işlem aracı ile geometri oluşturulur,
- Hacim ayrık hücrelere bölünür, bir başka deyişle ağ oluşturulur,
- Çözücü ile modellenecek problem tanımlanır,
- Problemin sınırlarındaki akışkan davranışını belirten sınır koşulları tanımlanır, zamana bağlı problemlerde başlangıç koşulları tanımlanır,
- Simülasyon başlar ve eşitlikler iterasyonla çözülür,
- Son işlem aracı ile sonuçlar analiz edilir ve görselleştirilir.

4.3.2 Fluent'le Sayısal Modelleme

Bu çalışmada sonlu hacim yöntemi ile hesap yapan Fluent yazılımı seçilmiştir (Ansys Inc., 2009a). Bu yöntemde tanımlanan geometri, kontrol hacimlerine

bölünerek her bir kontrol hacmini temsil eden denklemler çözülür. Burada sırasıyla ağ içerisinde akışı tanımlayan eşitlikler entegre edilir, integral eşitlikler ayrıştırılarak cebirsel eşitliklere dönüştürülür ve cebirsel eşitlikler iteratif yöntemlerle çözülür. Çözülen temel denklemler kütle, enerji ve momentum korunumunu kapsar (Başyazıcı, 2007).

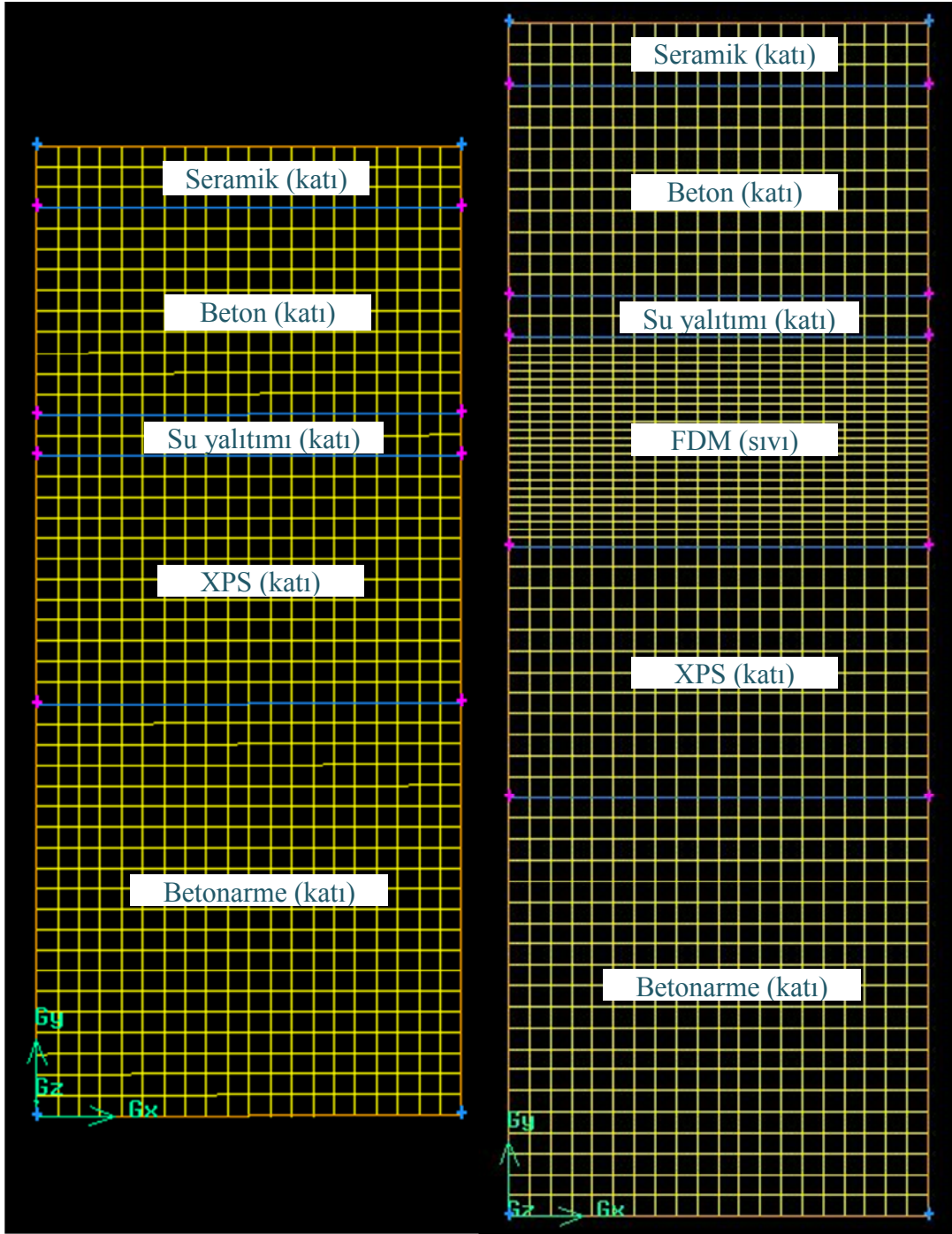
Öncelikle akıllı geometri ve ağ yapım araç kiti (GAMBIT) yardımıyla geometri ve ağ oluşturulur, bölgeler katı ve sıvı olarak tanımlanır, sınır koşulları duvar olarak belirtilir ve Fluent'in okuyabileceği iki boyutlu ağ geometrisi cinsine çevrilir (Şekil 6.1). Yapı kesiti geometride hesapların hızlı yapılabilmesi için yatayda 10 cm genişliğinde, dikeyde FDM'siz durumda 23,5 cm, FDM'li durumlarda ise "23,5 + FDM kalınlığı" cm. alınmıştır. Yukarıdan aşağıya doğru ağdaki oranları koruyarak; seramik ve yapıştırma harcı birlikte toplam 1,5 cm, düzeltme betonu 5 cm, 3 kat su yalıtımı toplam 1 cm, metal kutu içindeki FDM toplam 5 cm, 2 kat XPS toplam 6 cm ve betonarme döşeme 10 cm kalınlığında alınmıştır.

Ağın kalitesi çözümlerin de kalitesini etkilemektedir. Şekil 4.38'de gösterilen ağ FDM dışındaki malzemelerde 0,5 cm x 0,5 cm, FDM'de ise 0,5 cm x 0,2 cm'dir. Ağ boyutlarına karar vermeden üç farklı ağ boyutuyla çalışılmıştır. Ağ boyutları FDM dışındaki malzemelerde 0,25 cm x 0,25 cm, FDM'de ise 0,25 cm x 0,1 cm olduğu durum temel alınmıştır. 2.280 ağ hücresi bulunan bu durumun sonuçları, seçilen 1140 hücreye sahip durumunkinden % 0,63 fark göstermektedir. Ağ boyutları FDM dışındaki malzemelerde 1 cm x 1 cm, FDM'de 1 cm x 0,4 olan 285 hücreli durumun sonuçları ise temel sonuçlardan % 5,23 farklıdır.

FLUENT analizi, bir yüzeyde koşullandırılan, diğer yüzeyde ise ortam koşulları etkisi altında kalan bir levha eleman özelinde gerçekleştirilmektedir. Analizi basitleştirmek amacıyla şu kabuller yapılmıştır:

- Yapı elemanındaki ısı aktarımı tek boyutludur.
- Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri sabittir. Sadece FDM'nin faz değişimi sırasında özgül ısısı değişkenlik göstermektedir.

- Çözüm için sadece iletim kullanılmış ve erime sürecinde FDM'deki doğal taşınım ve donma sürecinde süper soğuma etkisi ihmal edilmiştir.



(a) FDM'siz eleman geometrisi

(b) FDM'li eleman geometrisi

Şekil 4.38 Gambit ile oluşturulan geometri ve ağ yapısı

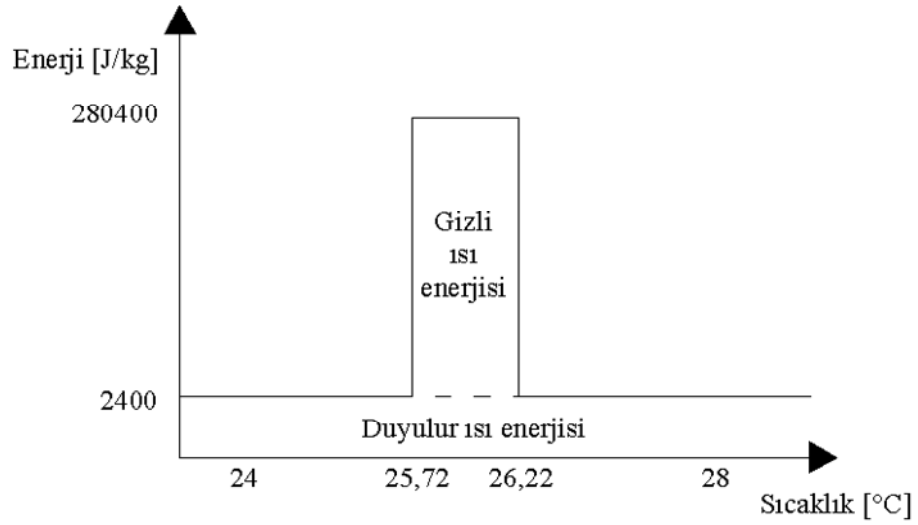
Fluent açılırken iki boyutlu, çift hassasiyetli çözücü seçilmiştir. Ağ programa okutulmuştur. Enerji modülü açılmıştır. Malzeme özellikleri Tablo 4.7'deki gibi tanımlanmıştır. Seramik ve yapıştırma harcı ağ sağlıklılığı için bir arada verilmiştir ve özellikleri bileşen malzeme özelliklerinin ağırlıklı ortalamasıyla belirlenmiştir.

Tablo 4.7 Fluent'e girilen malzeme özellikleri

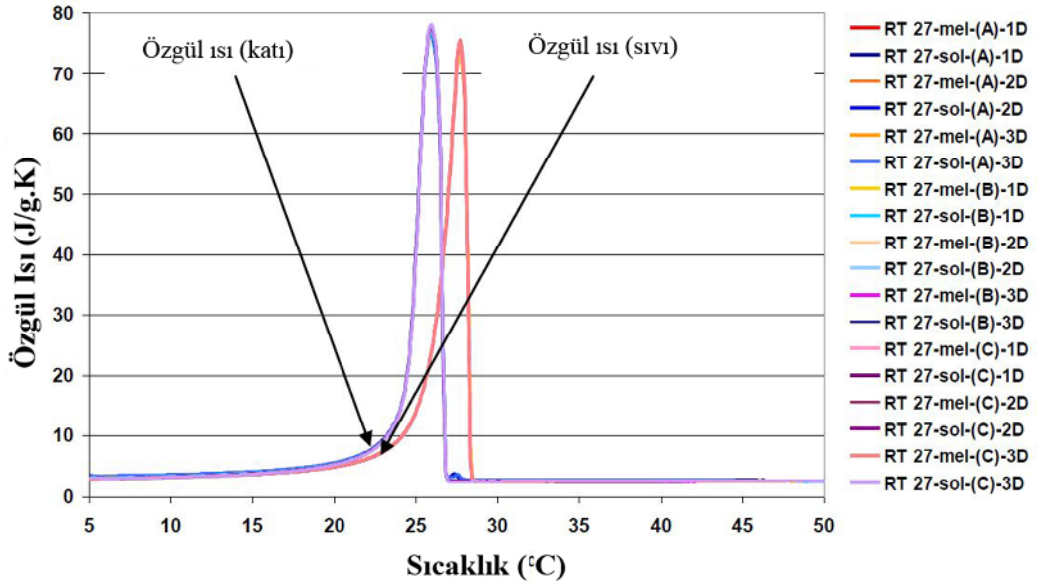
Malzeme veya bileşenin çeşidi	Birim hacim kütlesi [kg/m ³]	Isıl iletim katsayısı [W/mK]	Özgül Isı [J/kgK]	Dinamik viskozite [kg/ms]
Seramik (ve yapıştırma harcı)	1750	1,45	879	
Donatısız beton	2200	1,1	850	
Su yalıtımı (3 kat)	1200	0,19	920	
FDM (katı ve sıvı) FDM (faz değişiminde)	760	0,2	2400 280400*	0,02
XPS levha (2 kat)	25	0,035	1213	
Donatılı beton	2400	1,2	920	

*25,72 °C ile 26,22 °C arasındaki sıcaklıklarda

FDM geometride 5 cm kalınlığında tanımlanmıştır. Bu durumda kütlede değişiklik olmaması için hem katı hem de sıvı durum için üretici firma tarafından sıvı için verilen birim hacim kütle değeri kullanılmıştır. FDM tanımlanırken faz değişiminin 25,72 °C ile 26,22 °C arasındaki 0,5 °C'lik küçük bir aralıkta gerçekleştiği ve gizli ısının sadece bu sıcaklık aralığında etkisi olduğu varsayılmıştır. Alınan gizli ısı değeri 139000 J/kgK'dır, duyulur ısı değeri ise 2400 J/kgK'dır. Bu durumda faz değişiminin meydana geldiği 25,72 °C ile 26,22 °C arasında, Şekil 4.39'da gösterildiği gibi, FDM'ye hem duyulur hem de gizli ısı etki etmektedir. Kullanılan gizli ısı değeri, ticari olarak verilen 184 kJ/kg'dan yaklaşık 45 kJ/kg daha düşüktür, ancak deney ölçümleri ile uyum göstermektedir ve Karathina (2011) tarafından da diferansiyel taramalı kalorimetre ölçümleri ile bulunmuştur (Şekil 4.40). Karathina, üç RT 27 örneğini (A, B, C) üçer kere (1D, 2D, 3D), dakikada 0,5 °C hızla, 5 °C – 50 °C arasında erime-katılaşma (mel, sol) döngüsünden geçirdikten sonra bu sonuca ulaşmıştır. Şekil 4.40'ta erime ve donma döngülerinde FDM'nin farklı davranış gösterdiği ve faz değişim sıcaklıklarının da bundan etkilendiği görülmektedir.



Şekil 4.39 RT27'yi etkileyen ısı enerjisi



Şekil 4.40 RT27'nin A, B ve C örneklemi için özgül ısı-sıcaklık grafiği (Karathina, 2011)

Hücre bölge koşulları katı veya sıvı olarak Gambit'te FDM için sıvı, diğer malzemeleri için ise katı olarak belirtilmiştir. Bölgeleme aynen korunmuştur. Sınır koşulları Gambit'te duvar olarak verilmiştir. Deney düzeneğinin yan yüzeyleri izole edilmiştir. Alt ve üst yüzeylerde ise deneylerde ölçülen sıcaklık değerleri kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak zamana bağlı tanımlanmıştır (ANSYS Inc., 2009b). Zamana

bağlı fonksiyonlar C programlama dilinde yazılmış, kullanıcı tanımlı fonksiyonlardır ve ‘udf’ olarak adlandırılırlar.

Çözüm yöntemlerinden enerji için “QUICK” ayrıştırma şeması ve zamana bağlı formüller “first order implicit” olarak seçilmiştir. Yakınsama ölçütü seçiminde dört durum karşılaştırılmıştır. Yakınsama ölçütü belirtilmeden 300 yineleme yapılarak erişilen sonuçlar esas kabul edilmiştir. Yakınsama değeri 10^{-15} ve 10^{-10} olması durumunda esastan % 1, 10^{-5} 'te ise % 5 fark gerçekleşmektedir. Bu durumda, enerji değerlerindeki 10^{-10} yakınsama seçilmiştir. Çözüm sonuçlarının yorumlanabilmesi için deneyde ölçülen noktaların sıcaklıklarını dosyalara yazacak monitörler tanımlanmıştır.

Bu işlemlerden sonra çözüm başlatılmıştır. Çözüm sırasında zaman adımı sabit kullanılmıştır. Zaman adımı belirlenirken üç değer için simülasyon gerçekleştirilmiştir. 60 saniye zaman adımı ile 150 saniye arasında sonuçlar milyarda 5, 300 saniye arasında ise milyarda 12 fark hesaplanmıştır. Buradan hareketle zaman adımı için 300 saniye kullanılması uygun bulunmuştur.

4.3.3 FDM'siz Çözümler

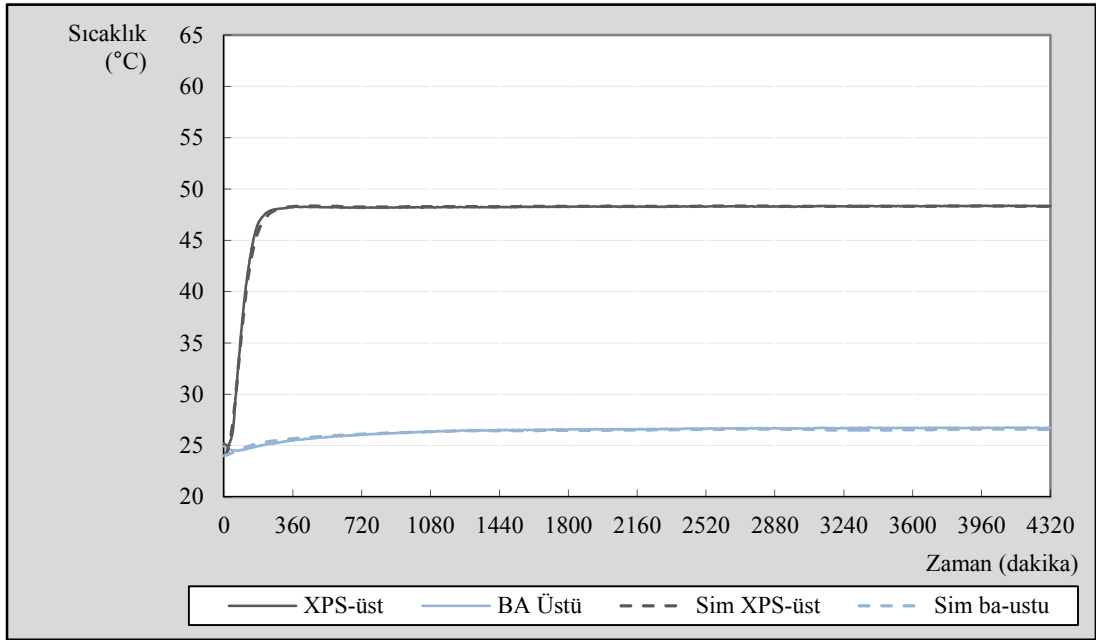
Modelin doğrulanması sırasında sistem geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır koşulları mümkün olduğunca deney koşullarına yakın alınmış ve deneysel sıcaklık ölçümleri ile sayısal yöntemle belirlenen sıcaklık değerleri doğrudan karşılaştırılmıştır. Doğrulama işlemi için Beşinci Bölüm'de aktarılan FDM'siz ve FDM'li durum için 50 °C deneyleri temel alınmıştır. Bu sırada, temel alınan deneylerde ölçülen alt ve üst yüzey sıcaklıkları sınır koşulu olarak girilerek bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak parametrik çalışmalarla FDM'li durumdaki, ağ sıklığı, zaman adımı ve yakınsama değişkenleri belirlenmiştir. Sonuçlar Bölüm 4.3.2'de aktarılmıştır. Daha sonra FDM'siz kararlı durum analizi yapılmıştır. Burada öncelikle deneyden

hesaplanan malzeme özellikleri programa girilmiştir (Tablo 4.7). Bu adımlardan sonra FDM'siz deneylerin simülasyonla uyumu incelenmiştir.

4.3.3.1 FDM'siz 1. Deney

FDM'siz 1. Deney için yapılan simülasyonda, alt ve üst yüzeyde tanımlanan sınır koşulları için zaman adımına göre deneyde ölçülen sıcaklıklar verilmiştir. Sadece duyulur ısının göz önüne alındığı simülasyonun sonuçları beklenen gibidir ve deneyle uyum göstermektedir. 72 saatlik sonuçlarda deney ile simülasyon arasında %0,28 fark hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 4.41'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca katmanlar Şekil EK V.1-2'de ayrı ayrı verilmiştir.

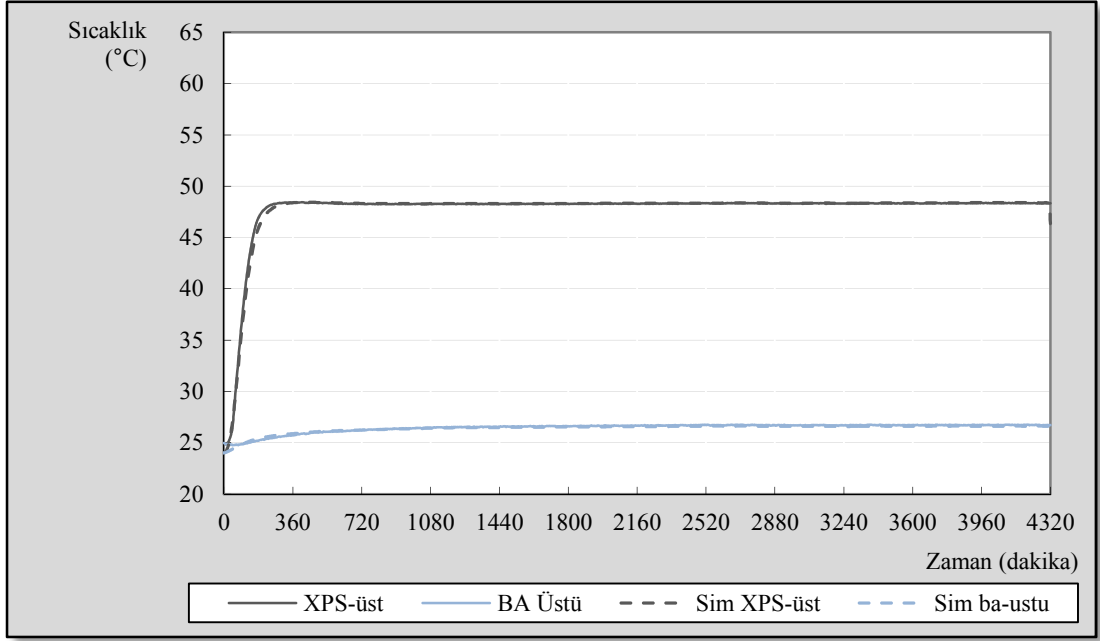


Şekil 4.41 Elemandaki katman sıcaklıkları (FDM'siz 1. Deney-Simülasyon)

4.3.3.2 FDM'siz - 2. Deney

FDM'siz 2. Deney için yapılan simülasyonda da, 1. deney için olanla aynı şekilde alt ve üst yüzeyde tanımlanan sınır koşulları için, zaman adımına göre deneyde ölçülen sıcaklıklar verilmiştir. Simülasyonun sonuçları 72 saat sonunda deney ile

%3,18 fark göstermektedir. Sonuçlar Şekil 4.42’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca katman sıcaklıkları Şekil EK V.3-4’de verilmiştir.



Şekil 4.42 Elemandaki katman sıcaklıkları (FDM’siz 2. Deney-Simülasyon)

4.3.4 FDM’li Çözümler

4.3.4.1 FDM’li 50 °C 1. Deney

50 °C 1. deneyin simülasyon sonuçları ile deney sonuçları arasında uyum gözlenmektedir. 72 saatlik sonuçların karşılaştırılmasında % 4,92 fark hesaplanmıştır. Faz değişiminin gerçekleştiği ilk 24 saat için ise hesaplanan fark ise % 5,46’tür. Sonuçlar Şekil 4.43’te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekle ek olarak katmanların ölçülen ve simüle edilen sıcaklıkları birer birer Şekil EK V.5-15’te verilmiştir.

Betonarme döşeme ile XPS arasında çok iyi uyuşma görülmektedir. Burada daha çok duyulur ısının baskın olduğundan kaynaklanmaktadır (Şekil EK V.5). Diğer katmanlar ise FDM içerir (Şekil EK VI.6-14) veya FDM ile doğrudan temas

halindedir (Şekil EK VI.15). Bu katmanlarda da sıcaklık eğrileri benzerlik göstermekle beraber tam örtüşmemektedir.

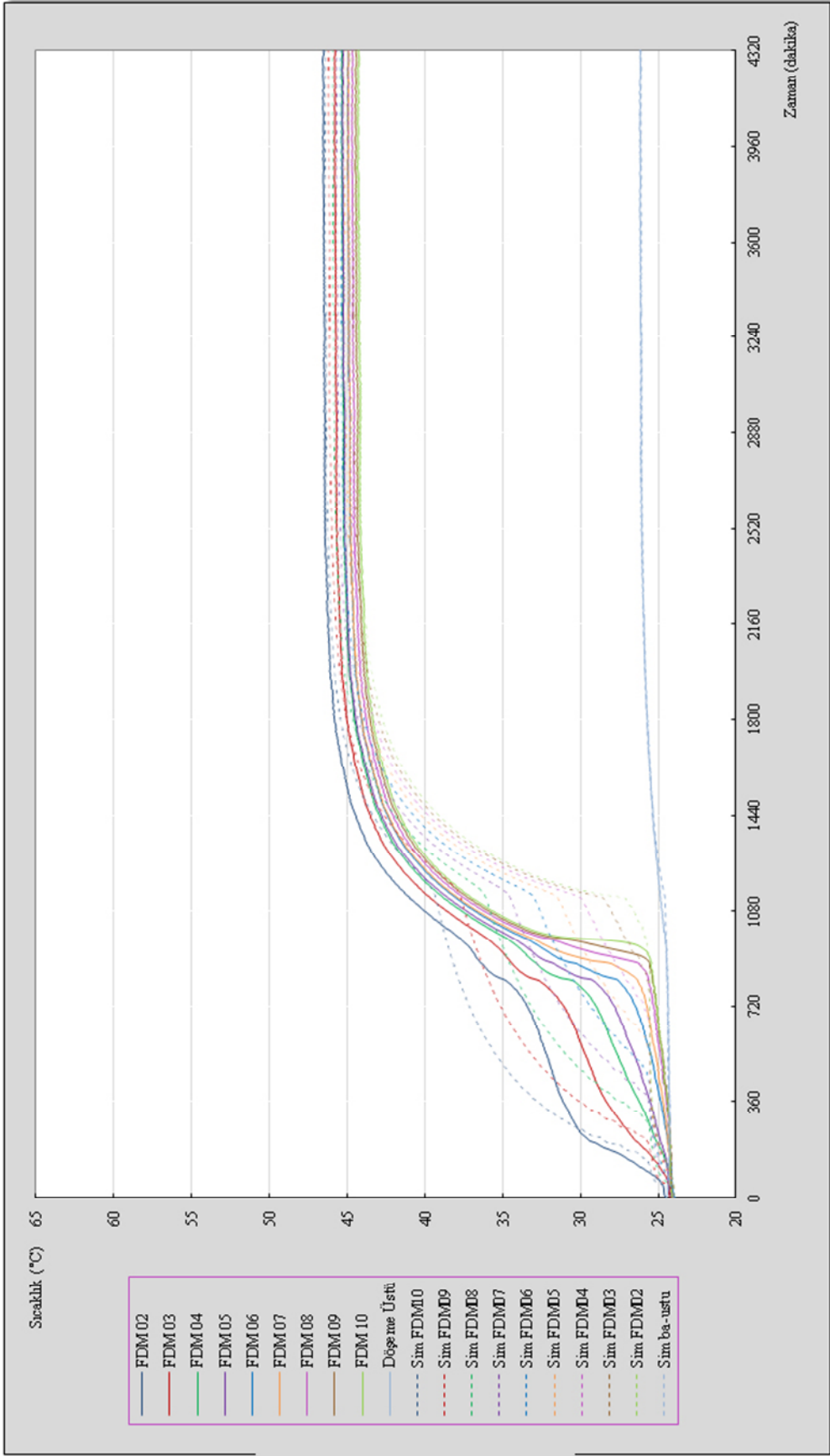
4.3.4.2 50 °C 2. Deney

50 °C 2. deney sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında 72 saat için %5,30 fark hesaplanmıştır. Faz değişiminin gerçekleştiği ilk 24 saat için hesaplanan fark ise %7,64'dir. Sonuçlar Şekil 4.44'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca katmanların ölçülen ve simüle edilen sıcaklıkları birer birer Şekil EK VI.16-26'da verilmiştir.

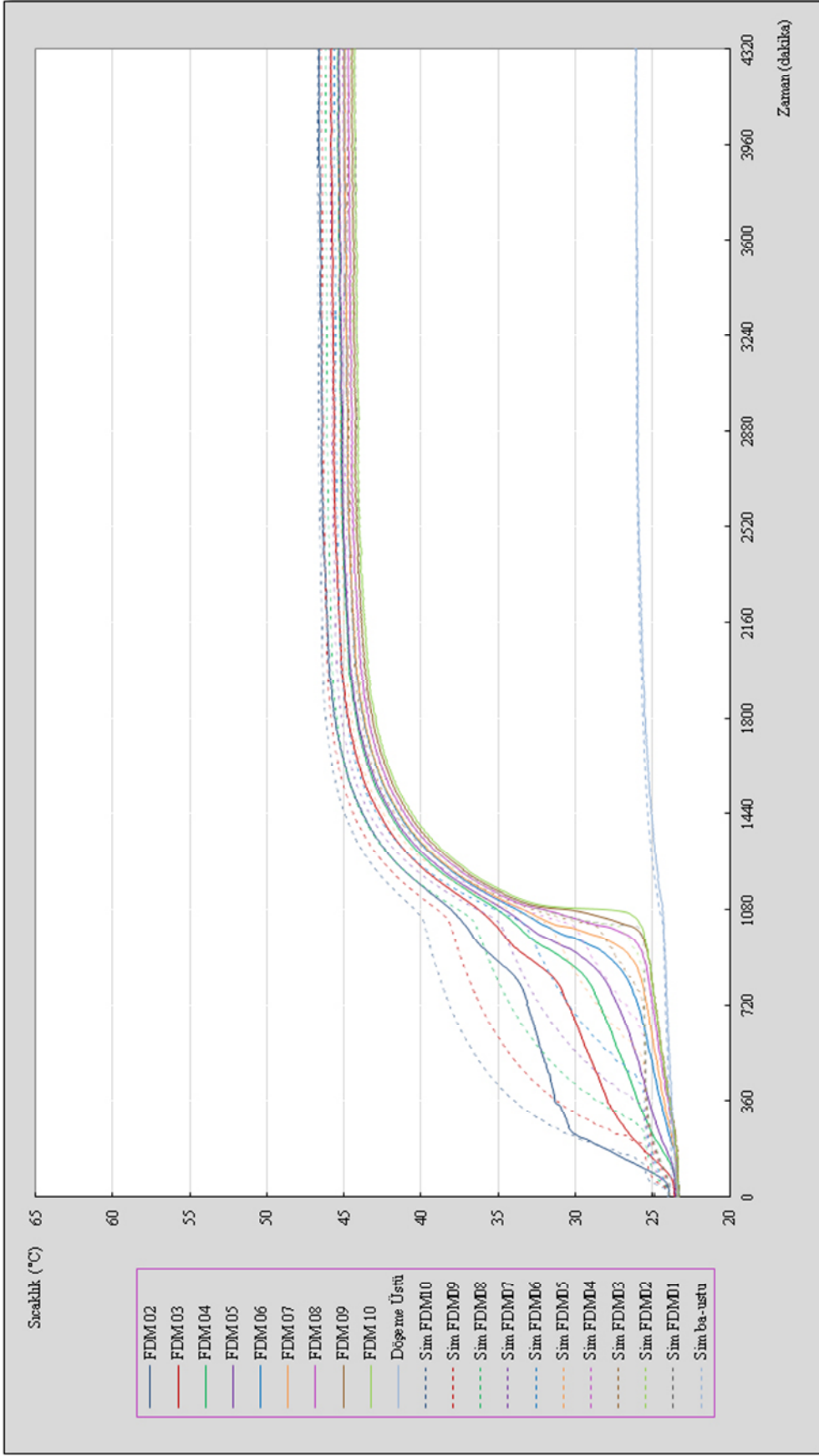
Şekil 4.44'ten görüldüğü gibi 50 °C 2. deney simülasyon sonuçları, 1. deney simülasyonu ile aynı trendi göstermektedir. Betonarme döşeme ile XPS arasında 1. simülasyona benzer şekilde çok iyi uyuşma görülmektedir (Şekil EK V.16). Diğer katmanlarda da benzeşim görülmektedir (Şekil EK V.17-26).

4.3.5 Sayısal Modelin Değerlendirilmesi

Sayısal analiz sonuçları, önerilen Fluent ile modelleme yönteminin doğruluğunu onaylamıştır. Sonuçlar Bölüm 4.3.3-4 ve EK V'te detaylı verilmiştir. Sayısal çalışmada FDM'lerin ulaştıkları son sıcaklıklar ile deneysel ölçümlerde ulaşılan son sıcaklık değerleri arasındaki kısmi farklılıkların olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır; Metal kutu ve hava boşluğunun ısı iletim değerlerinin modelde FDM ısı iletim değerine eklenmesinin tercih edilmesi, Analizin tek boyutlu yapılması, FDM sıvı haldeyken FDM'deki doğal taşınım etkisinin ihmal edilmesi, Malzemelerin termofiziksel özelliklerinden kaynaklanan farklılıklar, Seçilen ağ boyutundan kaynaklanan binde 6.3'lük fark, Uzun hesap sürelerinden kaynaklanan sayısal hatalar, FDM'nin katı ve sıvı halleri arasında meydana gelen hacim değişiminin ihmal edilmesi ve Deney düzeneğinde alınan yalıtım önlemlerine rağmen oluşan olası sistem kayıplarının -çok az olmasına rağmen- modelde ihmal edilmesi sayılır. Ancak bu çalışmanın amacı için yeterli uyum sağlanmaktadır.



Şekil 4.43 Denedeyde ölçülen ve simülasyonda elde edilen sıcaklık verileri (50°C 1. Denedey için)



Şekil 4.44 Denedeyde ölçülen ve simülasyonda elde edilen sıcaklık verileri (50°C 2. Denedey için)

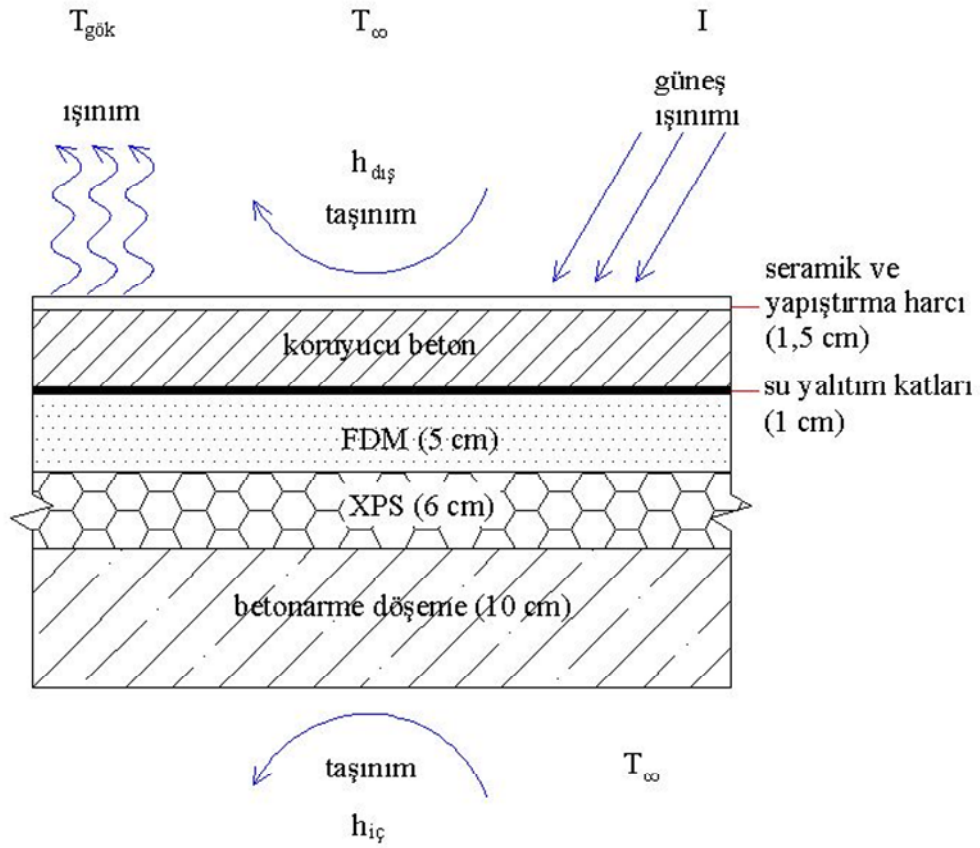
4.4 Dördüncü Adım: Enerji Tasarrufunun Belirlenmesi

Örnekte, bir konut mekanının üzerinde yürünebilen düz çatısında, FDM kullanımı sayesinde soğutma için gereken enerjinin ne kadar azaltılabileceği sorusu somut verilerle cevaplandırılmıştır. Doğrulan model ile yapılan simülasyonda elde edilen veriler, seçilen çeşitli yapı elemanı düzenlerinin mekanda kullanımı ile tasarruf edilebilecek enerji, miktar ve oran cinsinden hesaplanmıştır. Bu adımda, simülasyon ve enerji hesapları anlatılmakta ve elde edilen sonuç verileri incelenmektedir.

Örnek mekan, TS-825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'nda (TSE, 2008) belirtilen dört iklim bölgesi için de incelemiştir. Bu bölgeleri temsil amacıyla seçilen iller; 1. iklim bölgesi için İzmir, 2. iklim bölgesi için İstanbul, 3. iklim bölgesi için Ankara ve 4. iklim bölgesi için Erzurum'dur. İklim verilerinin çeşitliliği, detayda da farklılaşma zorunluluğunu getirmektedir. Değerlendirmelerin sağlıklı olması için sadece ısı yalıtımının kalınlığı farklılaştırılmıştır. Çalışmada "Meteonorm" iklim veri tabanı yazılımından alınan verileri kullanılmıştır; sıcaklık verileri 2000-2009 yılları arasındaki, ışıınım verileri ise 1986-2005 yılları arasındaki hava istasyonu ölçümleri tabanlıdır (Meteonorm, 2012a).

4.4.1 Simülasyon Ve Hesap Yöntemi

Simülasyonun belirli bir soruna uygulanmasında, sayısal modele verilecek sınır koşulları doğru tanımlanmalıdır. Yukarıda belirtilen durumda, dış ortamda, elemanın içindeki iletme ek olarak iklim koşulları için taşınım ve ışıınım etkileri de göz önüne alınmıştır. İç ortamda ise, mekan iklimlendirildiği için sabit sıcaklık olduğu var sayılmakta ve taşınım etkisi tanımlanmakta, ışıınım etkisi ise ihmal edilmektedir. Bu biçimde tanımlanan çatı elemanı Şekil 4.45'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.45 Simülasyon sınır koşulları

Dış yüzey sınır koşulları, iklim koşulları ve yüzey özelliklerini göz önünde bulunduran ve Eşitlik 4.7'de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha I + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{gök}^4) + h_{dış} (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{Eşitlik 4.7})$$

Bu eşitlikte,

α : ısı yutma katsayısı [-],

I : yüzeye gelen güneş ışınımı [W/m^2],

σ : Stefan–Boltzmann sabiti [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}^4$],

ε : yayma oranı [-],

$T_{gök}$: gökyüzü sıcaklığı [K], ve

$h_{dış}$: taşınım katsayısı [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]’dır.

Burada, α ve ε değerleri kaplama yzeyi karakteristikleridir. Yzey sıcaklığı hesaplamasında çatı kaplama malzemesinin emicilik katsayısı için Prado ve Ferreira'nın (2005) lm sonuçları kullanılmıştır.

I , T_{gok} ve T_{∞} iklim koşullarına göre zamana bağlı değişkenlerdir. T_{gok} , T_{∞} ve yoğuşma sıcaklığına (T_y) [K] bağlı olarak, Duffie ve Beckman'da (1991) verilen Eşitlik 4.8 ile hesaplanır:

$$T_{gok} = T_{\infty} \cdot \left(0,8 + \frac{T_y - 273}{250} \right)^{0,25} \quad (\text{Eşitlik 4.8})$$

İklim verileri simülasyona, zamana bağlı kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak girilmektedir. h_{dis} ve h_i için, TS-825'ten düz çatı için verilen sabit değer alınmış ve simülasyona sınır koşulu olarak girilmiştir.

Çatının soğutma yüküne olan etkisinin irdelenmesinde, soğutmanın baskın olduğu Mayıs-Eylül ayları arasındaki 5 ayın simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Çatının başlangıçtaki sıcaklık koşulları Nisan ayının son 3 gününün çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Simülasyonlar FDM'siz ve FDM'nin 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlığında kullanıldığı detaylar için gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen ana çıktılar ise FDM erime ara yüzü ve çatı elemanının alt yüzeyindeki ısı akısıdır. FDM ara yüzü grafikleri FDM'nin etkinlik gösterdiği zamanı ve kalınlığı, ısı akısı hesapları ise dış ortamdan iç mekana çatıdan giren enerjiyi göstermektedir. Isı enerjisi, birim alandan giren enerji [Wh/m²] cinsinden verilmektedir ve farklı çatı konfigürasyonlarından giren enerji Eşitlik 3.5 yardımıyla karşılaştırılmıştır.

4.4.2 1. Bölge: İzmir

Ana karakteristiğiyle sıcak ve nemli olarak adlandırılabilen 1. Bölge illerinde gündüz ve gece sıcaklık farkı çok fazla değildir. Genelde Akdeniz iklimi özelliği gösteren bu bölgede yazlar sıcak ve nemli, kişlar da bol yağışlıdır. Yıl boyunca nem oranı fazladır. Bölgeyi temsil için seçilen İzmir ili 38° 43' enleminde, 27° 17' boylamında ve deniz seviyesinden 25 metre yükseklikte bulunmaktadır. İzmir'de,

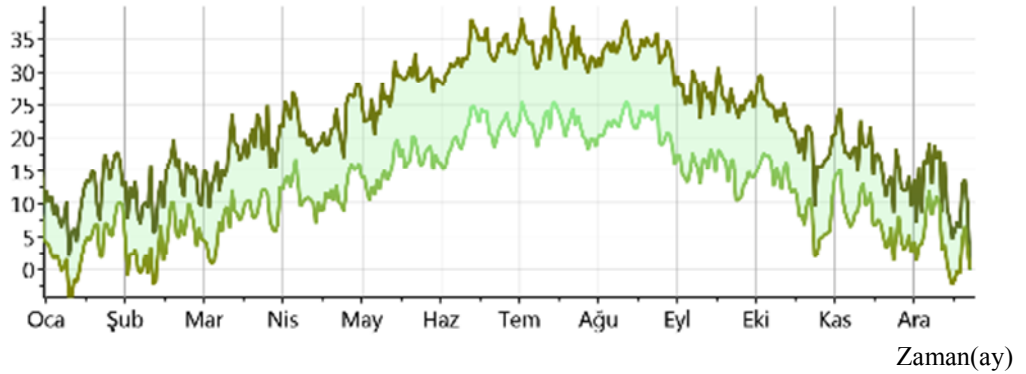
kışları ılık ve bol yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçer (Şekil 4.46-47, Tablo 4.8). İzmir körfez havzasında yaz aylarında kuzey rüzgarları hakimdir (Demirbilek, 1999; Meteonorm, 2012b).

Güneş ışınımı (kWh/m²)



Şekil 4.46 İzmir'e yıl boyunca düşen güneş ışınımı

Sıcaklık (°C)



Şekil 4.47 İzmir'in yıl boyu en yüksek ve en düşük hava sıcaklıkları

Tablo 4.8 İzmir'de ölçülmüş iklim verilerinin uzun yıllar ortalamaları (Meteonorm, 2012b)

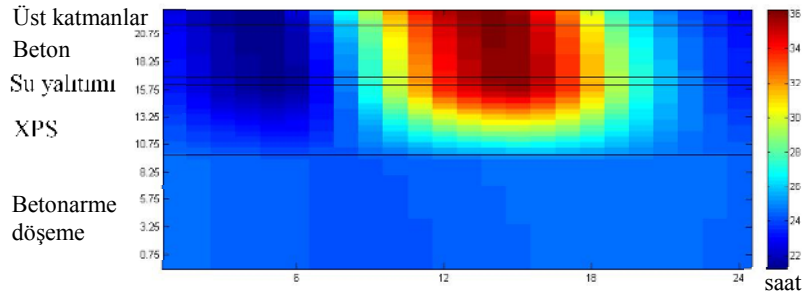
İZMİR	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
Ortalama Sıcaklık (°C)	6,8	8,1	11,9	15,8	21,2	26,4	28,4	27,7	22,5	18,0	12,5	8,2
Ortalama Güneş Işınımı (W/m ²)	107	124	162	247	297	320	340	295	221	155	121	99
Ortalama Nem (%)	73	68	60	57	49	41	41	45	53	61	70	74
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (kg/m ²)	105	102	68	48	21	3	2	2	30	56	127	114
Bulutluluk Oranı (okta)	3	5	5	4	3	2	1	1	3	4	3	4
Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	2,7	3,2	3,2	2,7	2,7	3,4	3,8	3,5	2,8	2,5	2,3	2,6
Hakim Rüzgar Yönü (derece)	181	187	181	224	181	181	181	181	181	187	181	181

Bu iklim verilerini girdi olarak kullanarak Mayıs-Eylül ayları arasında simülasyon gerçekleştirilmiştir. Ancak ay ay sonuçlara geçmeden önce FDM'nin erime-katılma döngüsünün elemanın çalışmasında yarattığı etkiyi gözlemlemek için İzmir'de bir Haziran gününde (17 Haziran) elemana farklı kalınlıklarda FDM eklenmesi değerlendirilmiştir. Bunun için Şekil 4.48'de gün boyunca elemandaki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Şekil 4.48.a'da, FDM'siz yani gün boyunca duyulur ısı depolama yapılan elemandaki sıcaklık değişimi gün boyunca 21,6 °C ile 36 °C arasında değişiklik göstermiştir ve bu sıcaklıklar çatının üst yüzeyinde gözlenmiştir. FDM'li elemanlarda ise (Şekil 4.48.b-d) sıcaklık 22,4 °C ile 34,3 °C arasında değişmiştir.

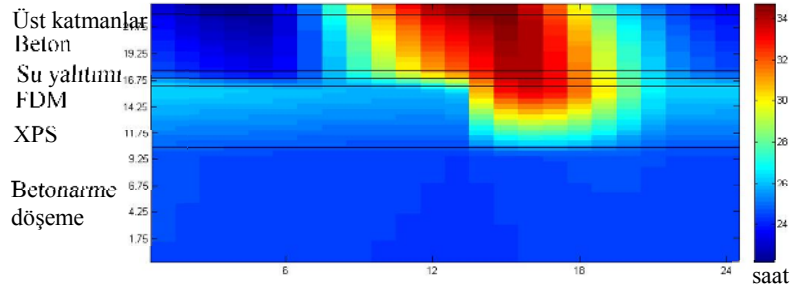
Tüm elemanlarda gece yarısından güneşin sabah 6:00'da doğmaya başlamasına kadar olan zamanda eleman sıcaklıkları düşmüştür, çünkü yapı yüzeyine güneş ışınımı gelmemektedir. Böylece önceki günden depolanan ısı çatının üst yüzeyinden dış ortama atılmaktadır ve çatı üst yüzey sıcaklıkları en az değerlerine ulaşır. FDM'li elemanlarda bu zaman aralığında katılma görülmektedir.

06:00-14:00 saatleri arasında, elemana gelen ışınım sürekli artış gösterir ve buna bağlı olarak eleman sıcaklığı da sürekli artar ve ilerleyen zamanda, saat 16:00 gibi en yüksek sıcaklığa ulaşır. Bu aralıkta FDM erimesi gerçekleşir ve FDM'li elemanda, FDM kalınlığına bağlı olarak bir alt katman olan ısı yalıtımının sıcaklığının artış zamanı ertelenir.

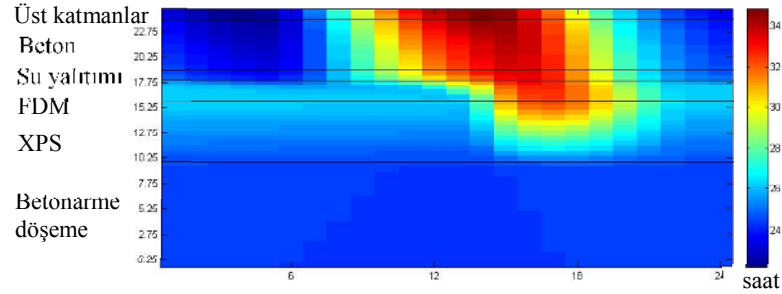
Güneş saat 20'ye kadar gökyüzünde kalıp ışınım vermesine rağmen, saat 16'dan sonra elemanda taşınım etkisinin daha baskın olduğu ve dış ortama ısı kaybedildiği, dolayısıyla üst yüzey sıcaklığının düşmeye başladığı görülmektedir. Güneş battıktan sonra gece yarısına kadar ısı kaybı hızlanmıştır. FDM kalınlığı arttıkça gündüz depolanan enerji daha fazla olduğundan dışa atımı da daha uzun sürede olmaktadır. Buna bağlı olarak gece yeterince ısı atılıp FDM katı hale dönmediği durumda, FDM'nin sadece duyulur ısı etkisinden yararlanılabilmektedir.



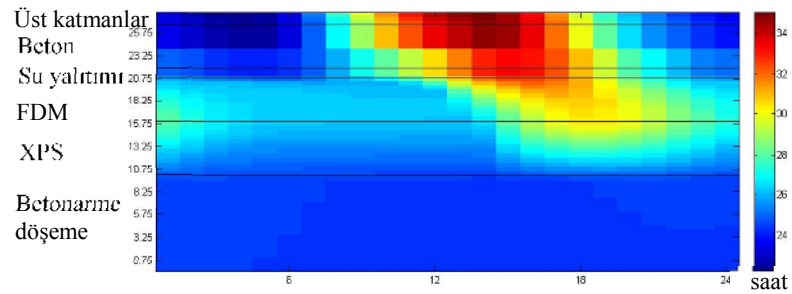
(a) FDM'siz eleman



(b) 1 cm FDM'li eleman



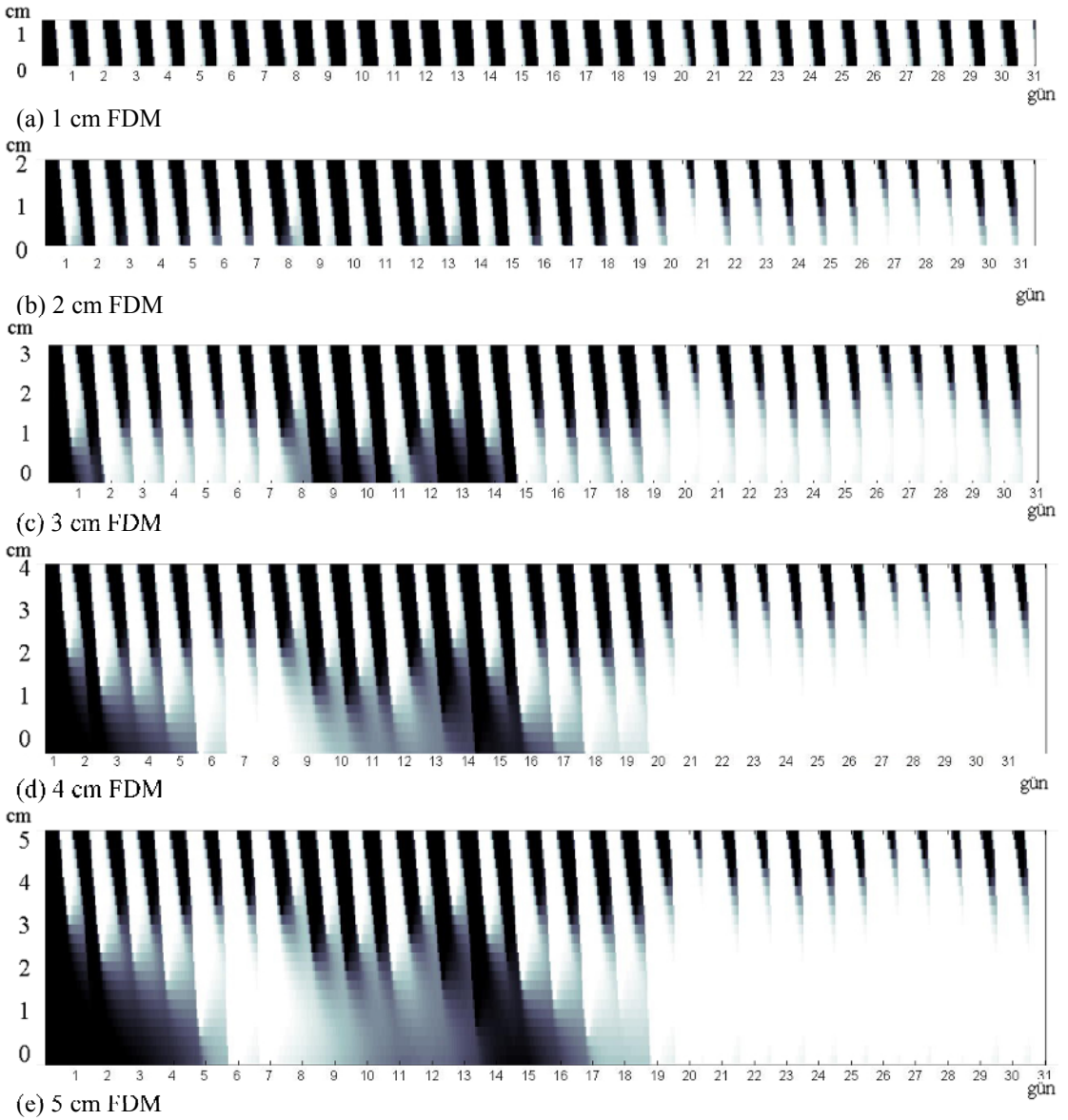
(c) 3 cm FDM'li eleman



(d) 5cm FDM'li eleman

Şekil 4.48 İzmir'de 17 Haziran'da gün boyunca eleman içindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.49'da, farklı FDM kalınlıkları için FDM'nin erime katılaşma döngüsü, İzmir'de Mayıs ayı boyunca yapılan simülasyon sonuçlarına göre verilmiştir. Burada 1 cm kalınlıkta FDM'de her gün erime-katılaşma tamamen gerçekleşirken, 3 cm FDM'de neredeyse ayın yarısından sonra tam katılaşma gerçekleşmediği görülmektedir. 5 cm FDM kullanılan durumda, ayın 18'inden sonra FDM'nin yaklaşık üst 2 cm'lik kısmında erime-donma gerçekleşmekte, kalan kısmı ise sürekli sıvı halde kalmaktadır. Şekil 4.49'da bir aydaki FDM davranışını yorumlamak için 5 cm FDM'li grafiğin tek başına yeterli olduğu görülmüştür.



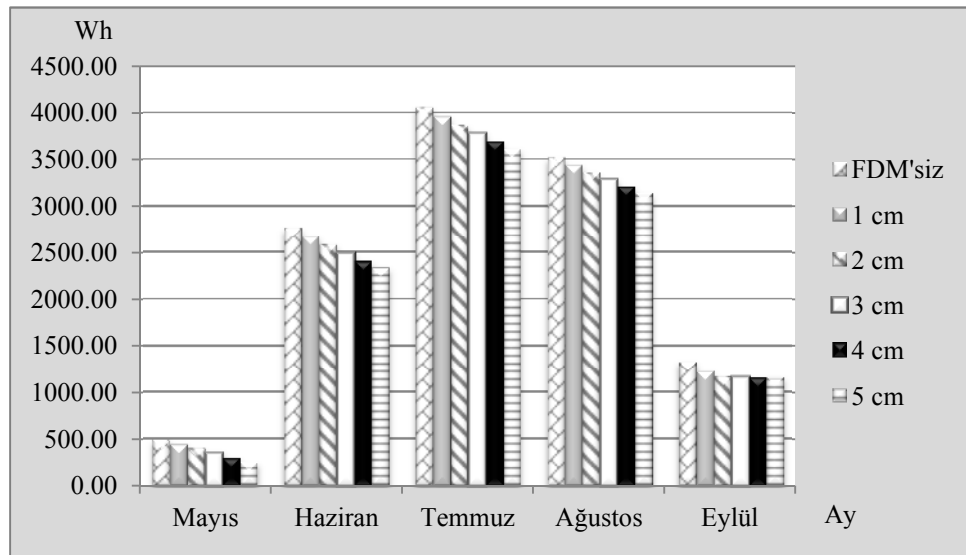
Şekil 4.49 İzmir'de Mayıs ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

İzmir için Haziran-Eylül ayları arasında modellenen FDM'nin erime-katılaşma davranışı Şekil 4.50'de gösterilmiştir. Tablo 4.9'da 5 ay boyunca farklı FDM kalınlıkları için İzmir'de bir m² mekanı soğutmak için gereken enerji miktarı [Wh/ay] verilmiş, Şekil 4.50'de Tablo 4.9'daki veriler görselleştirilmiş ve Tablo 4.10'da FDM kullanımı ile kullanılacak enerjideki ve dolayısıyla sarf maliyetindeki azalımı [%] verilmiştir.

Tablo 4.9 İzmir'de mekanı soğutmak için gereken enerji [Wh/ay]

	<i>FDM'siz</i>	<i>1 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>	<i>5 cm</i>
<i>Mayıs</i>	489,65	443,98	403,88	355,58	300,85	253,68
<i>Haziran</i>	2766,39	2675,41	2582,85	2486,07	2405,63	2337,54
<i>Temmuz</i>	4052,35	3957,35	3864,93	3777,01	3692,86	3611,60
<i>Ağustos</i>	3521,08	3441,70	3362,77	3286,87	3214,11	3144,45
<i>Eylül</i>	1329,45	1227,54	1165,27	1159,96	1159,35	1160,88
<i>TOPLAM</i>	12158,92	11745,98	11379,70	11065,49	10772,80	10508,15



Şekil 4.50 İzmir'de mekanı soğutmaya FDM'nin getirdiği yarar [Wh/ay]

Tablo 4.10 İzmir'de mekanı soğutmaya FDM'nin getirdiği yarar [%]

	<i>FDM'siz</i>	<i>1 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>	<i>5 cm</i>
<i>Mayıs</i>	-	9,33	17,52	27,38	38,56	48,19
<i>Haziran</i>	-	3,29	6,63	10,13	13,04	15,50
<i>Temmuz</i>	-	2,34	4,62	6,79	8,87	10,88
<i>Ağustos</i>	-	2,25	4,50	6,65	8,72	10,70
<i>Eylül</i>	-	7,67	12,35	12,75	12,79	12,68
<i>ORTALAMA</i>	-	3,40	6,41	8,99	11,40	13,58

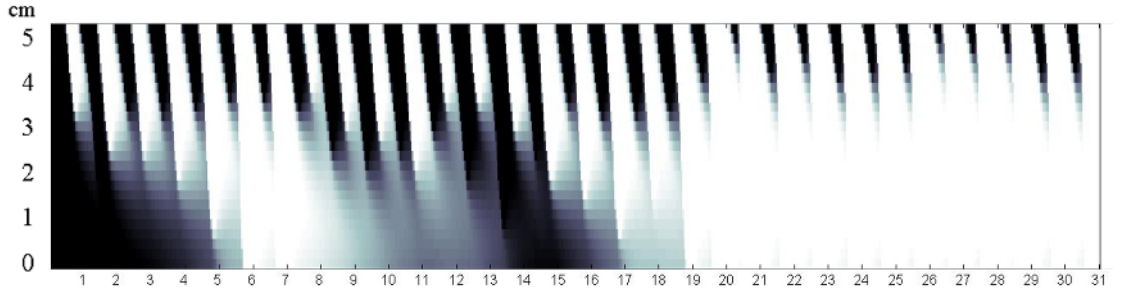
Şekil 4.50-51 ve Tablo 4.9-10 verilerinin birlikte açıklanmasında yarar vardır. Mayıs ayında FDM'siz detayla 489,65 Wh enerji kullanılarak soğutulacak mekanda, 1 cm FDM kullanılması ile % 9,33; 2 cm FDM ile % 17,53; 3 cm FDM ile % 27,38; 4 cm FDM ile % 38,56 ve 5 cm FDM ile % 48,19 soğutma enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır.

Haziran ayının ortalarına kadar yaklaşık 1 cm FDM çalışmakla beraber ayın 18'i ile 25'i arasında FDM'nin neredeyse sürekli katı olduğu görülmektedir. Haziran'da FDM'siz detayla 2766,39 Wh enerji kullanılarak soğutulacak mekanda, 1 cm FDM kullanılması ile % 3,29; 2 cm FDM ile % 6,63; 3 cm FDM ile % 10,13; 4 cm FDM ile % 13,04 ve 5 cm FDM ile % 15,50 soğutma enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır.

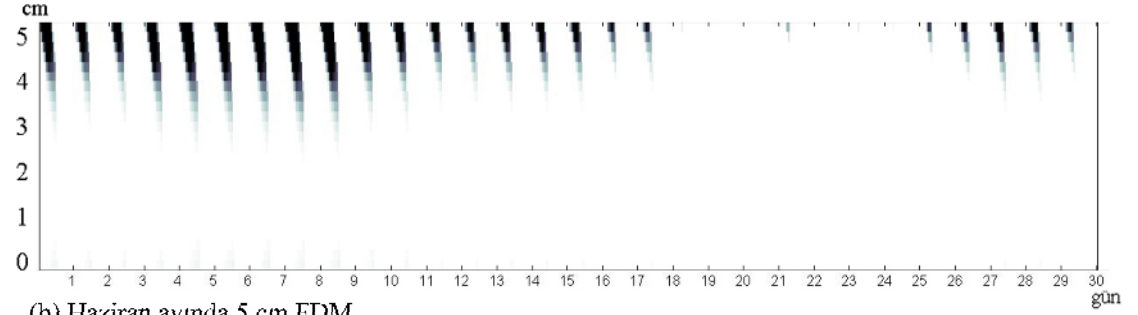
Temmuz ve Ağustos aylarında dış ortam sıcaklığının artmasıyla beraber FDM çoğu zaman sıvı durumdadır ve elde edilen yarar daha çok duyulur ısı depolamadan kaynaklanmaktadır. FDM kullanılmayan elemanda soğutma için gereken enerji sırasıyla 4052,35 ve 3521,08 Wh'e çıkmakla birlikte 1 cm FDM kullanımı % 2,34 ve %2,25; 2 cm FDM kullanımı % 4,62 ve % 4,50; 3 cm FDM kullanımı % 6,79 ve % 6,65; 4 cm FDM kullanımı % 8,87 ve % 8,72; 5 cm FDM kullanımı ise % 10,88 ve 10,70 kazanç sağlamaktadır.

Eylül ayında ise ayın başında az çalışan FDM zamanla daha etkin çalışarak ay sonunda yaklaşık 2 cm'i etkin çalışmaktadır, daha fazla kalınlıklarda ise duyulur ısı etkisi ön planda görülmektedir. Aynı zamanda soğutma enerjisi ihtiyacı 1329,45 Wh'e düşmektedir. 1 cm FDM ile % 7,67; 2 cm FDM ile % 12,35; 3 cm FDM ile % 12,75; 4 cm FDM ile % 12,79 ve 5 cm FDM ile % 12,68 azalmaktadır.

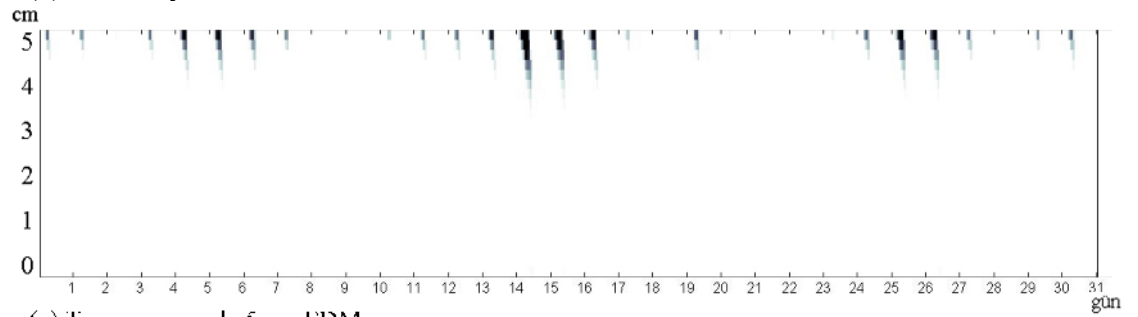
Toplamda ise 5 ayda 1 m² alanda 1 cm FDM için 412,94 Wh; 2 cm FDM için 779,22; 3 cm FDM için 1093,43 Wh; 4 cm için 1386,12; 5 cm için ise 1650,77 Wh tasarruf elde edilmektedir.



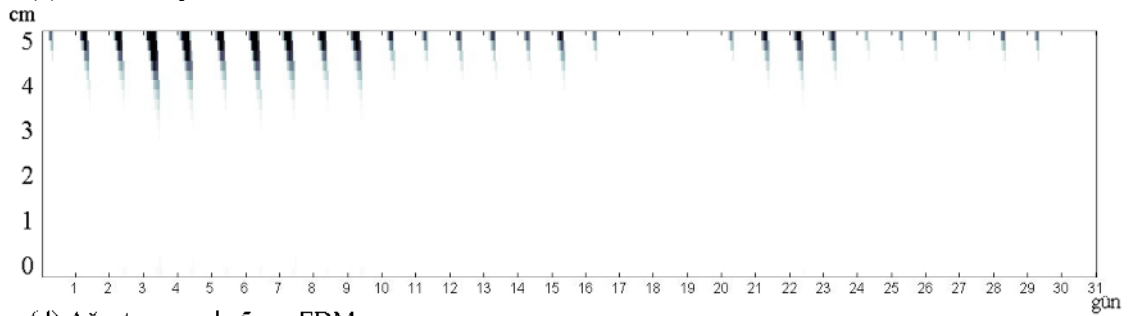
(a) Mayıs ayında 5 cm FDM



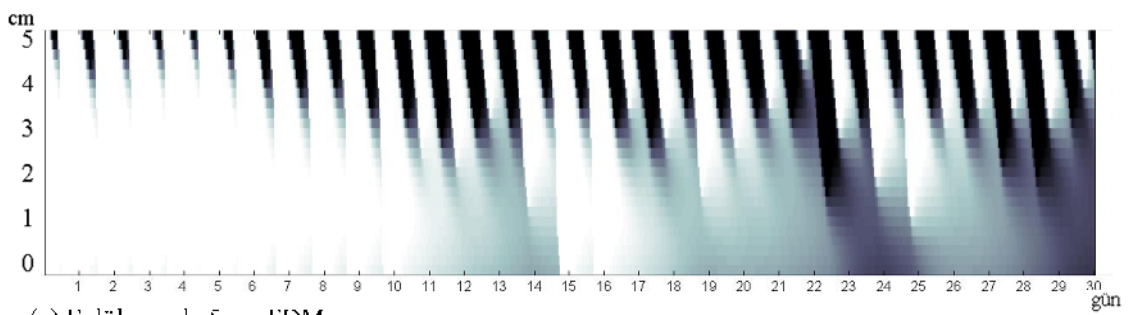
(b) Haziran ayında 5 cm FDM



(c) Temmuz ayında 5 cm FDM



(d) Ağustos ayında 5 cm FDM



(e) Eylül ayında 5 cm FDM

Şekil 4.51 İzmir'de Haziran-Eylül aylarında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

4.4.3 2. Bölge: İstanbul

Genel özellikleri ile ılımlı nemli iklim bölgesi olarak da adlandırılabilen ikinci bölgede, gece ve gündüz sıcaklık farkları çok yüksek olmaktadır. Nem hem yaz hem de kış aylarında boldur ve sonbahar, kış ve ilkbahar ayları bol yağışlıdır. Yaz ayları genellikle sıcak geçer, ancak kış ayları bölgeyi etkisi altına alan sistemlere bağlı olarak fazla soğuk geçmez.

Bu bölgeyi temsil için 41° enlemi, 28,8° boylamı ve 37 m yükseklik koordinatlarındaki İstanbul ili seçilmiştir. İstanbul, Akdeniz ikliminin özelliklerini taşıyor görünse de, Marmara Denizi ve İstanbul Boğazı'nın etkisiyle farklı özellikler taşır. Kış aylarında Karadeniz'den gelen soğuk-kuru hava kütlesi ile Balkanlardan gelen soğuk-yağışlı hava kütesinin özellikle Akdeniz'den gelen ılık ve yağışlı güneyli hava kütlelerinin etkisi altındadır. Bütün ilde Karadeniz' in soğukça yağışlı

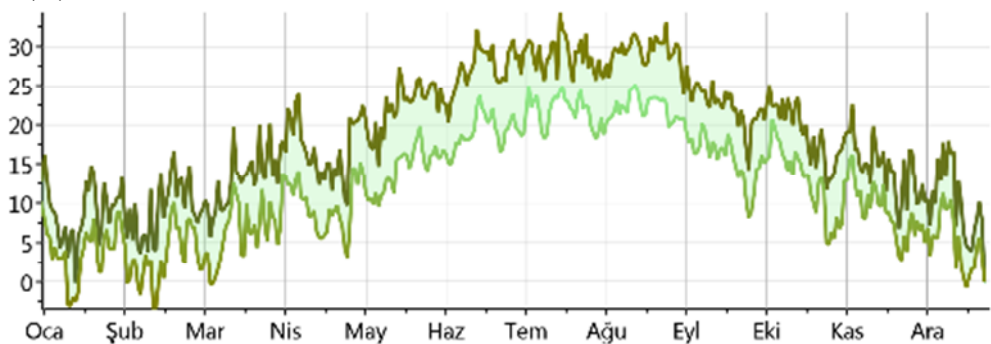
Güneş ışıması (kWh/m²)



Zaman(ay)

Şekil 4.52 İstanbul'a yıl boyunca gelen günlük güneş ışımasını

Sıcaklık (°C)



Zaman(ay)

Şekil 4.53 İstanbul'un yıl boyu en yüksek ve en düşük sıcaklıkları

(poyrazlı) havasıyla, Akdeniz'in ılık (Iodoslu) havası birbirini izler (Şekil 4.52-53, Tablo 4.11) (Meteonorm, 2012c).

Tablo 4.11 İstanbul'da ölçülmüş iklim verilerinin uzun yıllar ortalamaları (Meteonorm, 2012c)

<i>İSTANBUL</i>	<i>Oca</i>	<i>Şub</i>	<i>Mar</i>	<i>Nis</i>	<i>May</i>	<i>Haz</i>	<i>Tem</i>	<i>Ağu</i>	<i>Eyl</i>	<i>Eki</i>	<i>Kas</i>	<i>Ara</i>
Ortalama Sıcaklık (°C)	6,2	6,4	8,9	12,5	17,7	22,7	25,5	25,5	21,2	17,1	12,1	8,2
Ortalama Güneş Işınımı (W/m ²)	60	85	138	206	262	290	284	249	183	117	79	54
Ortalama Nem (%)	74	73	70	65	64	57	58	62	65	71	73	73
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (kg/m ²)	68	76	56	34	16	17	12	26	46	65	70	70
Bulutluluk Oranı (okta)	6	6	5	5	4	4	4	4	4	6	6	6
Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	4,9	5,0	4,6	4,2	4,1	4,3	4,8	4,9	4,4	4,3	4,4	5
Hakim Rüzgar Yönü (derece)	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23

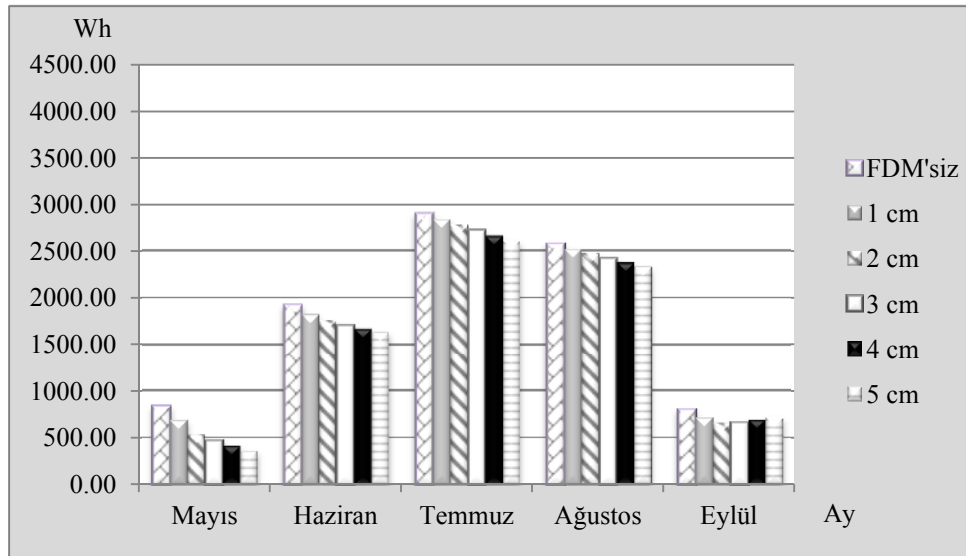
İstanbul için 5 ay süresince gerçekleştirilen simülasyon sonuçları Tablo 12-13 ile Şekil 4.54'te verilmiştir. İstanbul'da iklimdeki farklılığa rağmen FDM erime katılma döngüleri İzmir ile paralellik göstermektedir. Ancak İstanbul'da soğutma için harcanan enerji ve FDM kullanımıyla gelen yarar İzmir'den daha azdır.

Tablo 4.12 İstanbul'da mekanı soğutmak için gereken enerji [Wh/ay]

	<i>FDM'siz</i>	<i>1 cm</i>	<i>2 cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4 cm</i>	<i>5 cm</i>
<i>Mayıs</i>	834,99	686,68	533,56	474,26	419,72	362,56
<i>Haziran</i>	1927,88	1829,19	1758,01	1710,02	1671,76	1635,04
<i>Temmuz</i>	2898,05	2838,15	2777,07	2719,70	2664,23	2610,71
<i>Ağustos</i>	2576,64	2523,25	2473,06	2424,65	2378,03	2333,09
<i>Eylül</i>	801,15	713,23	654,88	668,42	693,01	714,61
<i>TOPLAM</i>	9038,71	8590,51	8196,58	7997,04	7826,75	7656,02

Tablo 4.13 İstanbul'da mekan soğutmasına FDM'nin getirdiği yarar [%]

	<i>FDM'siz</i>	<i>1 cm</i>	<i>2cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4cm</i>	<i>5 cm</i>
<i>Mayıs</i>	-	17,76	36,10	43,20	49,73	56,58
<i>Haziran</i>	-	5,12	8,81	11,30	13,29	15,19
<i>Temmuz</i>	-	2,07	4,17	6,15	8,07	9,91
<i>Ağustos</i>	-	2,07	4,02	5,90	7,71	9,45
<i>Eylül</i>	-	10,97	18,26	16,57	13,50	10,80
<i>ORTALAMA</i>	-	4,96	9,32	11,52	13,41	15,30

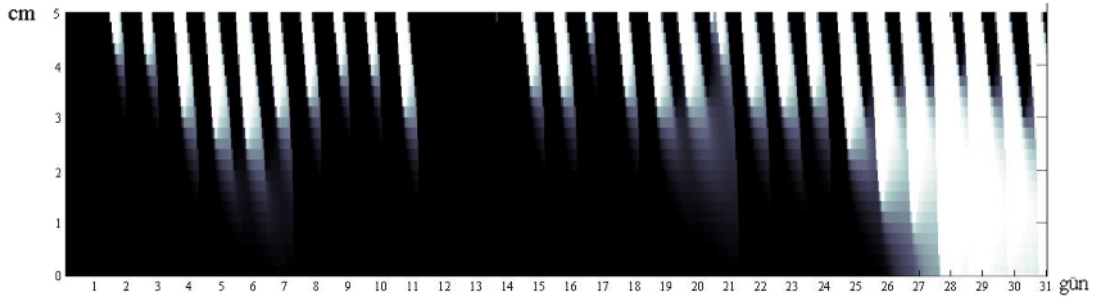


Şekil 4.54 İstanbul'da mekan soğutmasına FDM'nin getirdiği yarar [Wh/ay]

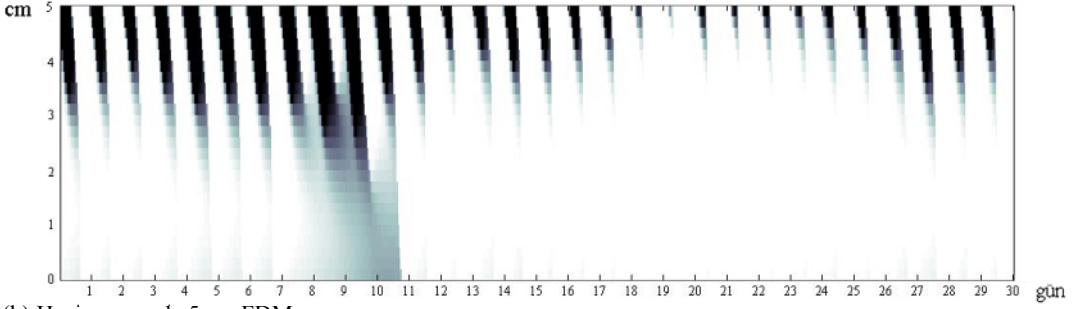
Mayıs ayı boyunca FDM'nin hiç çalışmadığı zamanlar ile tam döngü kurduğu ve değişen oranlarda çalıştığı günler olmaktadır. Sonuçta FDM'siz detayla 834,99 Wh enerji kullanılarak soğutulacak mekanda, 1 cm FDM kullanılması ile % 17,76; 2 cm FDM ile % 36,10; 3 cm FDM ile % 43,20; 4 cm FDM ile % 49,73 ve 5 cm FDM ile % 56,58 soğutma enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır.

Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında dış ortam sıcaklığının artmasıyla beraber FDM çoğu zaman sıvı durumdadır ve elde edilen yarar daha çok duyulur ısı depolamadan kaynaklanmaktadır. Soğutma için gereken enerji sırasıyla 1927,88 Wh; 2898,05 Wh ve 2576,64 Wh'e çıkmaktadır. Bununla birlikte 1 cm FDM kullanımı ile % 5,12; 2,07 ve 2,07; 2 cm FDM kullanımı ile % 8,81; 4,17 ve 4,02; 3 cm FDM kullanımı ile % 11,30; 6,15 ve 5,90; 4 cm FDM kullanımı ile % 13,29; 8,07 ve 7,71; 5 cm FDM kullanımı ile ise % 15,19; 9,91 ve 9,45 kazanç sağlamaktadır.

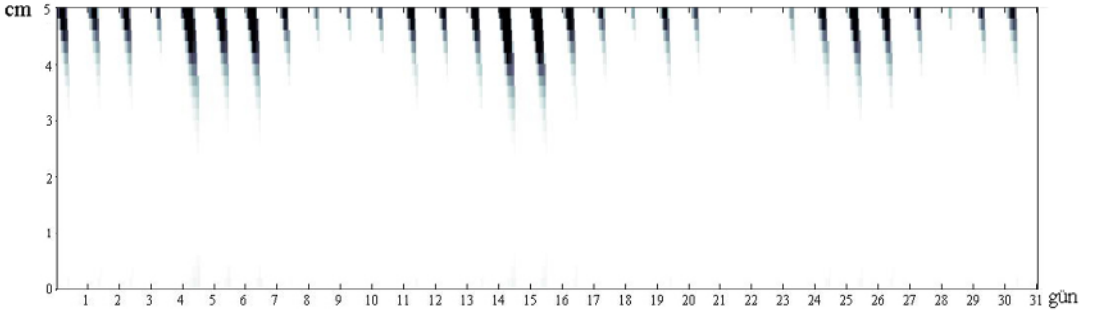
Eylül ayında ise ayın ilk on günü az çalışan FDM, ikinci on günde etkin çalışmakta, son on günde ise katı duruma geçmektedir. En etkin FDM kalınlığının 2 cm'dir. Soğutma enerjisi ihtiyacının 801,15 Wh'e düştüğü ayda 1 cm FDM kullanımı



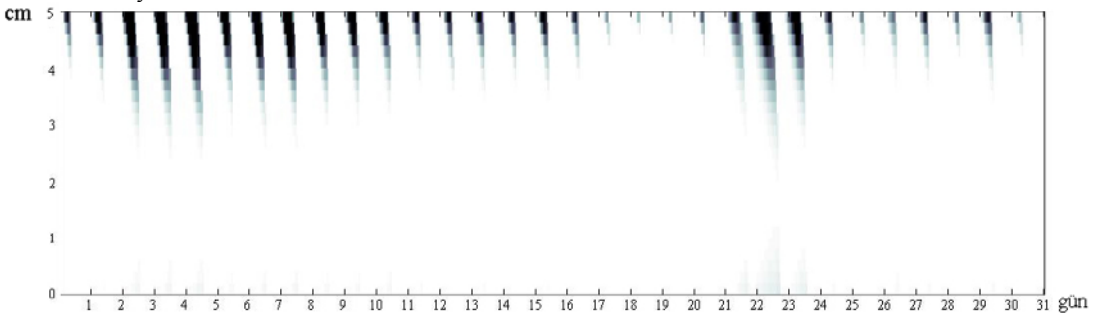
(a) Mayıs ayında 5 cm FDM



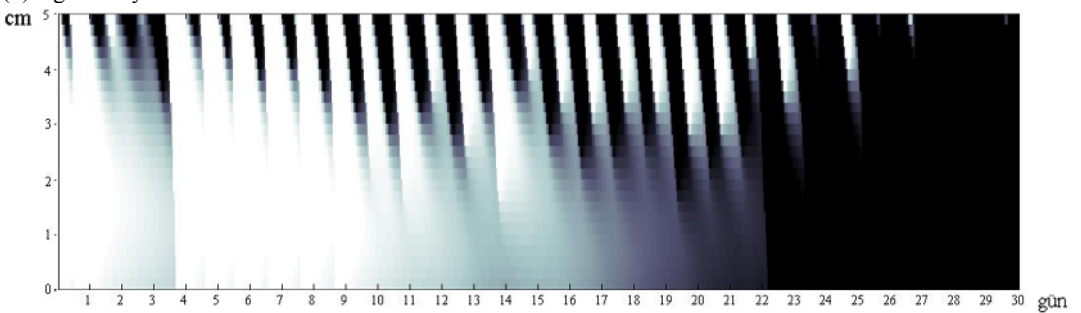
(b) Haziran ayında 5 cm FDM



(c) Temmuz ayında 5 cm FDM



(d) Ağustos ayında 5 cm FDM



(e) Eylül ayında 5 cm FDM

Şekil 4.55 İzmir’de Haziran-Eylül aylarında FDM’nin katı-sıvı* durumu

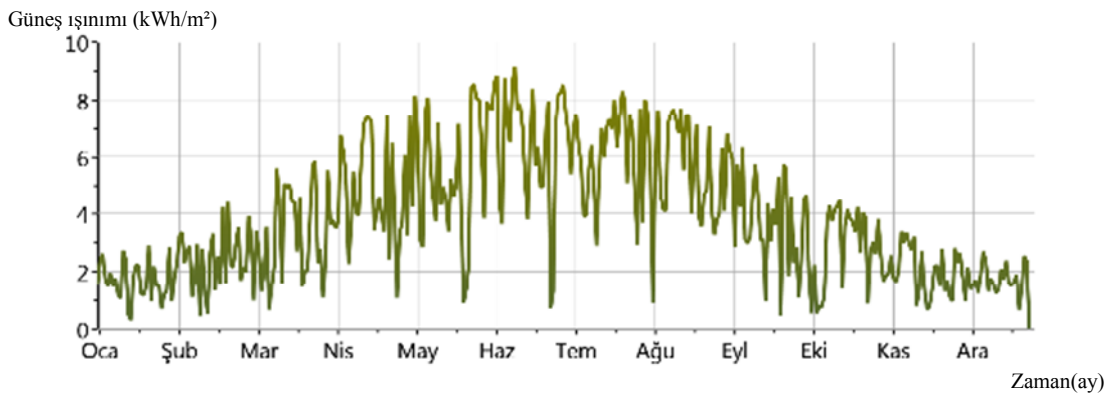
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

ile % 10,97; 2 cm FDM kullanımı ile % 18,26; 3 cm FDM kullanımı ile % 16,57; 4 cm FDM kullanımı ile %13,41 ve 5 cm FDM kullanımı ile % 10,80 azalmaktadır.

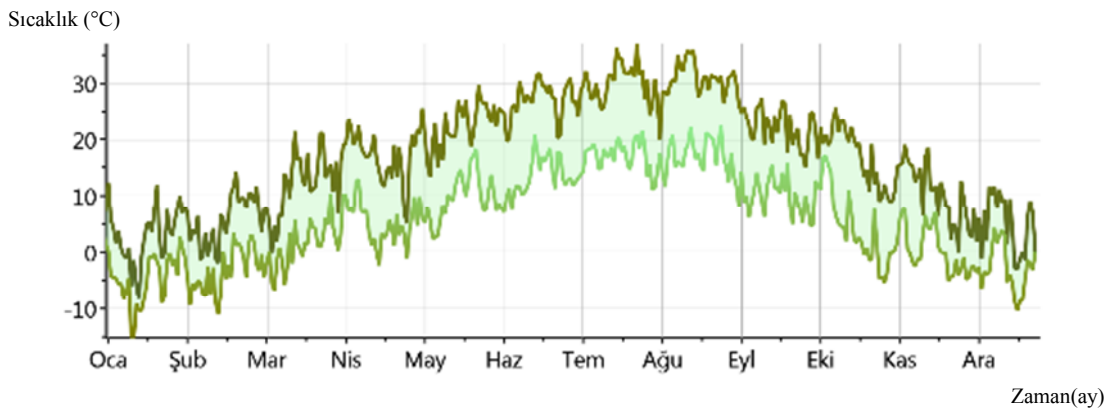
Toplamda 5 ay boyunca 1 cm FDM kullanımından 448,2 Wh; 2 cm FDM kullanımından 842,13 Wh; 3 cm FDM kullanımından 1041,67 Wh; 4 cm FDM kullanımından 1211,96 Wh ve 5 cm FDM kullanımından 1382,69 Wh m² başına soğutma enerjisi tasarrufu sağlamaktadır.

4.4.4 3. Bölge: Ankara

Daha çok, ılımlı kuru iklimin görüldüğü üçüncü bölgede gece ve gündüz sıcaklık farkı çoktur. Ortalama yağış azdır ve sert karasal yayla iklim özellikleri hakimdir. Kışın, yağışlar daha çok kar şeklinde görülür. Bölgeyi temsil için seçilen Ankara, 40° enleminde, 32,9° boylamında ve deniz seviyesinden 902 m. yükseklikte yer alır. Ankara ilinin kışları soğuk ve az yağışlı, yazları ise sıcak ve kuraktır. Genellikle kara ikliminin hüküm sürdüğü Ankara'da farklı iklimler vardır; güneyde step-bozkır iklimi, kuzeyde ise yumuşak ve yağışlı özellik görülür. Ortalama yağış ilçelerde farklıdır (Şekil 4.56-57, Tablo 4.14) (Meteonorm, 2012d).



Şekil 4.56 Ankara'ya yıl boyunca gelen günlük güneş ışınımı



Şekil 4.57 Ankara'nın yıl boyu en yüksek ve en düşük sıcaklıkları

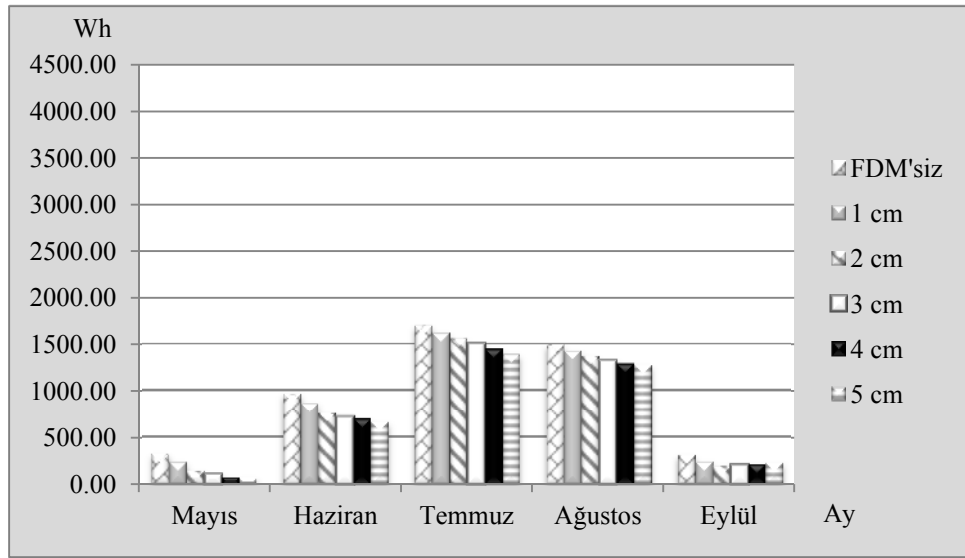
Tablo 4.14 Ankara'da ölçülmüş iklim verilerinin uzun yıllar ortalamaları (Meteonorm, 2012d)

ANKARA	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
Ortalama Sıcaklık (°C)	-1,1	0,9	5,8	10,5	15,5	19,9	23,6	23,6	18,0	12,5	5,8	0,8
Ortalama Güneş Işınımı (W/m ²)	69	98	131	194	220	267	271	237	176	120	91	74
Ortalama Nem (%)	77	70	60	56	52	47	39	39	47	57	71	79
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (kg/m ²)	48	46	33	54	36	27	12	7	20	20	39	49
Bulutluluk Oranı (okta)	6	5	6	5	5	4	3	4	5	5	5	5
Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	1,9	2,3	2,7	2,6	2,4	2,8	3,1	3,0	2,3	2,1	1,7	1,8
Hakim Rüzgar Yönü (derece)	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270

Ankara için 5 ay süresince gerçekleştirilen simülasyon sonuçları Şekil 4.58 ile Tablo 15-16'da verilmiştir. Ankara'da gerek soğutma için harcanan enerji gerekse FDM'li yapı elemanı kullanımıyla hem ve FDM kullanımıyla gelen yarar hem İzmir'den hem de İstanbul'dan daha azdır.

Tablo 4.15 Ankara'da mekanı soğutmak için gereken enerji [Wh/ay]

	FDM'siz	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Mayıs	323,18	237,36	148,82	112,94	79,71	68,75
Haziran	970,32	867,20	759,26	717,40	696,38	664,65
Temmuz	1692,98	1613,75	1557,34	1505,24	1445,87	1387,00
Ağustos	1493,50	1426,43	1371,07	1326,93	1293,65	1274,63
Eylül	310,90	241,88	191,77	205,90	216,37	231,63
TOPLAM	4790,87	4386,62	4028,26	3868,42	3731,99	3626,66



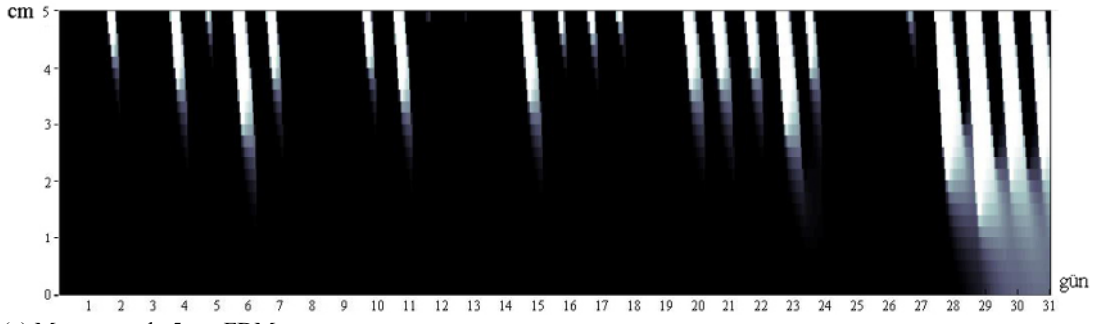
Şekil 4.58 Ankara'da mekan soğutmasına FDM'nin getirdiği yarar [Wh/ay]

Tablo 4.16 Ankara'da mekan soğutmasına FDM'nin getirdiği yarar [%]

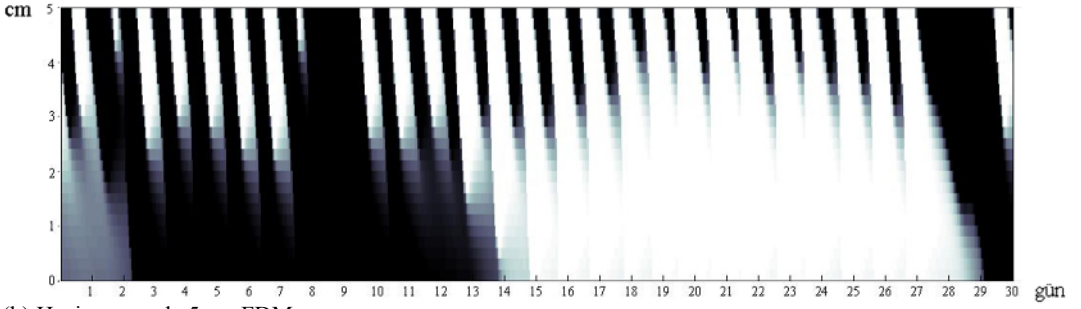
	<i>FDM'siz</i>	<i>1 cm</i>	<i>2cm</i>	<i>3 cm</i>	<i>4cm</i>	<i>5 cm</i>
<i>Mayıs</i>	-	26,56	53,95	65,05	75,33	78,73
<i>Haziran</i>	-	10,63	21,75	26,06	28,23	31,50
<i>Temmuz</i>	-	4,68	8,01	11,09	14,60	18,07
<i>Ağustos</i>	-	4,49	8,20	11,15	13,38	14,65
<i>Eylül</i>	-	22,20	38,32	33,77	30,40	25,50
<i>ORTALAMA</i>	-	8,44	15,92	19,25	22,10	24,30

İstanbul ile paralellik gösteren grafiklerde kullanılan FDM'nin Mayıs ve Eylül aylarında daha çok katı haldedir. Bu aylarda gereken ısıtma enerjisi ihtiyacı 400 Wh'in altındadır. 2 cm FDM kalınlığı, en etkin çalışma kalınlığıdır. Mayıs ayında kalınlık artışı ile duyulur enerjiden soğutmada yararlanılmakla beraber Eylül ayında FDM kalınlaştıkça etkinliği azalmaktadır.

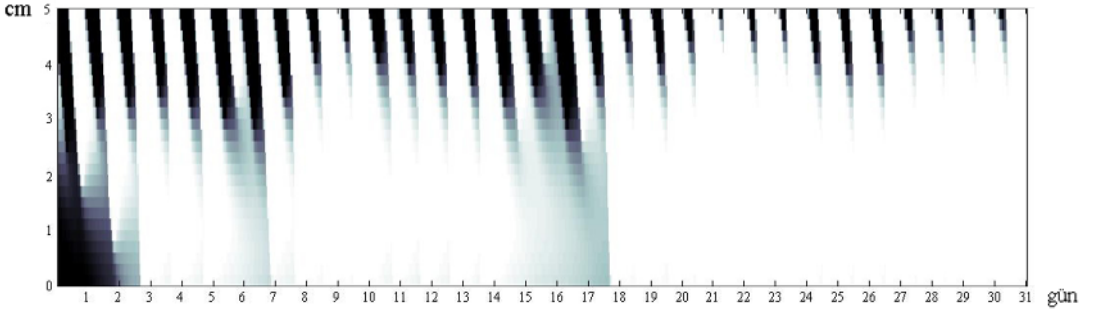
Haziran ayı boyunca FDM'nin hiç çalışmadığı, tam döngü kurduğu ve değişen oranlarda çalıştığı günler gözlenmektedir. Ancak FDM'siz detayla 323,18 Wh enerji kullanılarak soğutulacak mekanda, 1 cm FDM kullanılması ile % 10,63; 2 cm FDM ile % 21,75; 3 cm FDM ile % 26,06; 4 cm FDM kullanılması ile % 28,23 ve 5 cm FDM kullanılması ile % 31,50 soğutma enerjisinden tasarruf sağlanmaktadır.



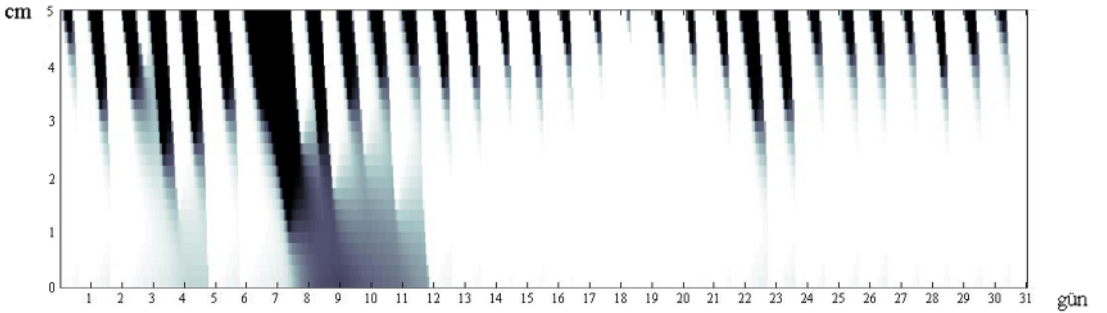
(a) Mayıs ayında 5 cm FDM



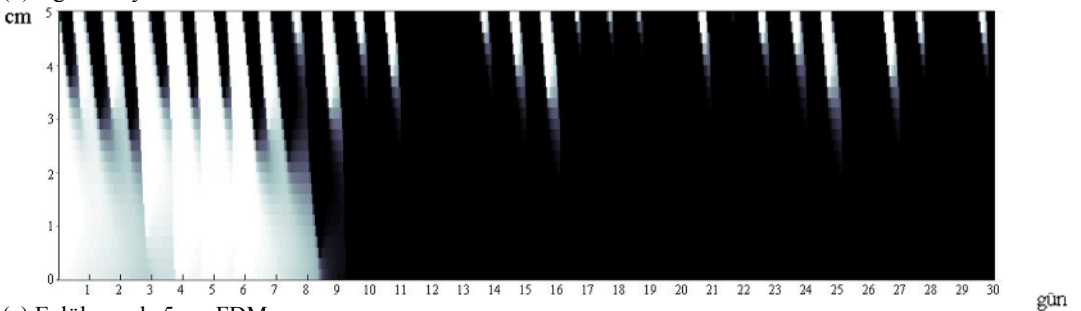
(b) Haziran ayında 5 cm FDM



(c) Temmuz ayında 5 cm FDM



(d) Ağustos ayında 5 cm FDM



(e) Eylül ayında 5 cm FDM

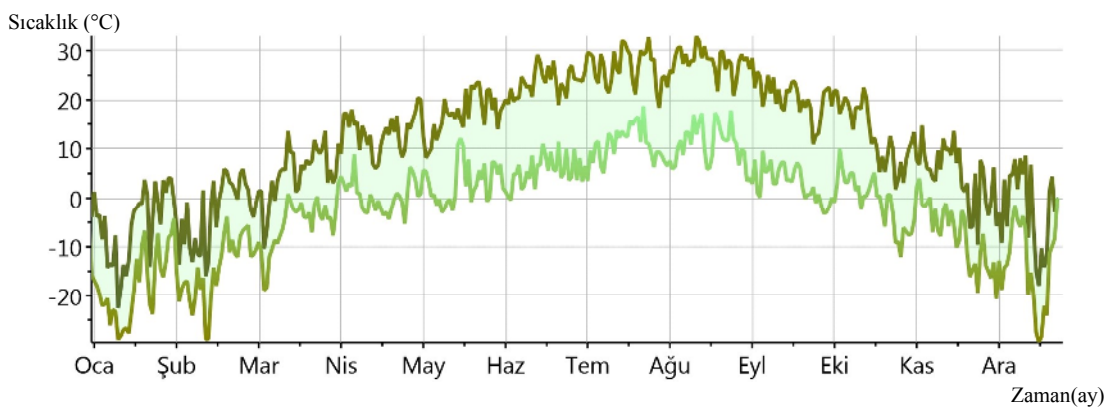
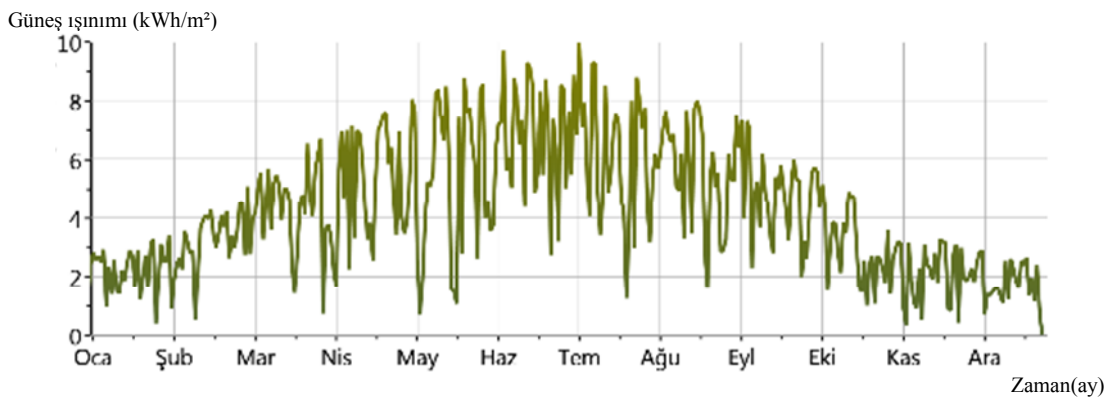
Şekil 4.59 Ankara'da FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

Temmuz ve Ağustos aylarında dış ortam sıcaklığının artmasıyla beraber FDM çoğu zaman sıvı durumdadır ve elde edilen yarar daha çok duyulur ısı depolamadan kaynaklanmaktadır. Soğutma için gereken enerji sırasıyla 1692,98 ve 1493,50 Wh'e çıkmakla birlikte 1 cm FDM kullanımı ile % 4,68 ve 4,49; 2 cm FDM kullanımı ile % 8,01 ve 8,20; 3 cm FDM kullanımı ile % 11,09 ve 11,15; 4 cm FDM kullanımı ile % 14,60 ve 13,38; 5 cm FDM kullanımı ise % 18,07 ve 14,65 kazanç sağlamaktadır.

4.4.5 4. Bölge: Erzurum

39,9° enlemi, 41,3° boylamı ve 1758 m yüksekliği ile Erzurum ili Türkiye'nin en yüksek ve en soğuk illerinden biridir. Erzurum şiddetli karasal Doğu Anadolu iklimi bölgesinde yer alır. Kışlar çok soğuk ve karlı, yazlar çok sıcak ve kurak geçer. Yılın 150 günü karla örtülüdür. Yağış miktarı 460 mm'dir. Eriyen karlar akarsuları besler (Şekil 4.60-61, Tablo 4.17) (Meteonorm, 2012e).



Tablo 4.17 Erzurum’da ölçülmüş iklim verilerinin uzun yıllar ortalamaları (Meteonorm, 2012e)

ERZURUM	Oca	Şub	Mar	Nis	May	Haz	Tem	Ağu	Eyl	Eki	Kas	Ara
Ortalama Sıcaklık (°C)	12,3	-8,8	-1,4	5,3	10,1	14,5	18,8	19,3	14,0	8,0	0,1	-7,9
Ortalama Güneş Işınımı (W/m ²)	93	131	187	206	222	269	268	239	210	139	89	80
Ortalama Nem (%)	82	79	72	63	58	53	48	42	44	59	72	80
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ort. (kg/m ²)	15	22	35	68	65	41	22	18	22	54	26	17
Bulutluluk Oranı (okta)	3	3	3	4	5	5	4	4	4	5	5	5
Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	2,4	2,9	3,7	3,9	3,7	3,5	3,9	4,0	3,3	3,0	2,8	2,3
Hakim Rüzgar Yönü (derece)	42	42	38	40	37	36	36	36	42	44	39	43

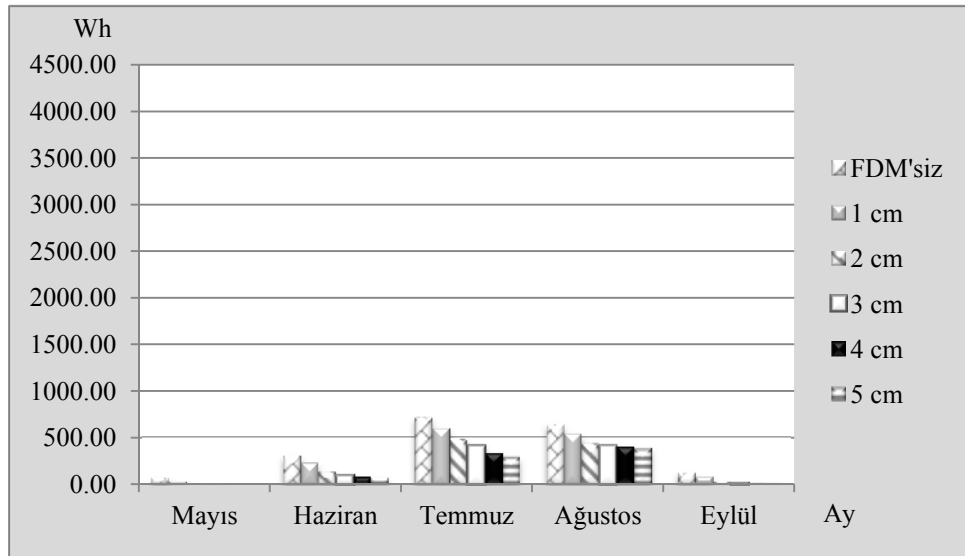
Erzurum için 5 ay süresince gerçekleştirilen simülasyon sonuçları Şekil 4.62 ile Tablo 18-19’da verilmiştir. FDM erime katılaşma döngüleri diğer bölgelerden daha fazla gerçekleşmiştir. Ancak Erzurum’da soğutma ihtiyacı azdır ve buna paralel olarak Erzurum’da FDM’li yapı elemanı kullanımıyla hem soğutma için harcanan enerji hem de FDM kullanımıyla elde edilen yarar diğer bölgelerin hepsinden daha azdır.

Tablo 4.18 Erzurum’da mekanı soğutmak için gereken enerji [Wh/ay]

	FDM'siz	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Mayıs	74,67	35,61	3,17	1,43	0,92	0,88
Haziran	306,36	229,99	134,97	96,87	82,33	75,68
Temmuz	706,70	593,47	480,88	409,46	335,31	294,12
Ağustos	635,72	535,01	431,71	414,31	398,61	385,18
Eylül	122,74	81,16	28,66	16,56	14,98	14,30
TOPLAM	1846,18	1475,23	1079,39	938,62	832,16	770,16

Tablo 4.19 Erzurum’da mekan soğutmasına FDM’nin getirdiği yarar [%]

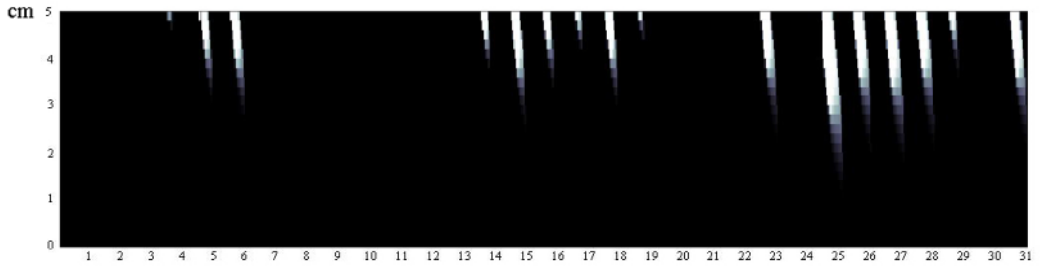
	FDM'siz	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
Mayıs	-	52,31	95,75	98,81	98,77	99,07
Haziran	-	24,93	55,94	68,38	73,12	75,30
Temmuz	-	16,02	31,95	42,06	52,55	58,38
Ağustos	-	15,84	32,09	34,83	37,30	39,41
Eylül	-	33,88	76,65	86,51	87,79	88,35
ORTALAMA	-	20,08	41,53	49,18	54,93	58,34



Şekil 4.62 Erzurum'da mekan soğutmasına FDM'nin getirdiği yarar [Wh/ay]

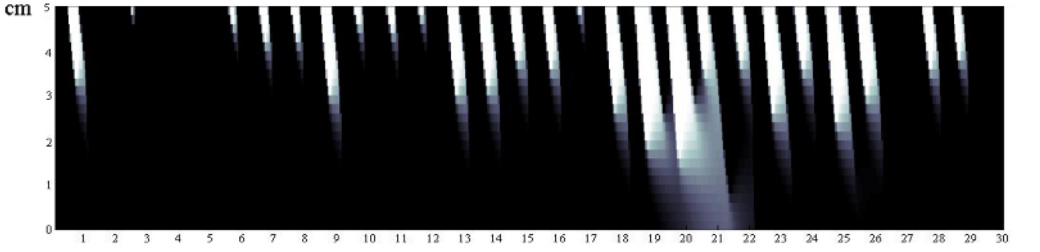
Mayıs ve Eylül aylarında FDM daha çok katı haldedir. Zaten sırasıyla 74,67 Wh ve 122,74 Wh olan soğutma enerjisi 4 ve 5 cm FDM eklenmesi ile Mayıs ayında 1 Wh'in, Eylül ayında ise 25 Wh'in altına düşmüştür. Haziran ayında FDM'nin değişik oranlarda çalıştığı gözlemlenmiştir. En etkin çalışma 3 cm kalınlıkta gerçekleşmiş olup 4 ve 5 cm kalınlıkta ek olarak sadece duyulur ısı etkisi görülmektedir.

Temmuz ve Ağustos aylarında ise FDM'nin erime katılaşma döngüsü aralıklı olarak gerçekleşmektedir. FDM kullanılmayan elemanda soğutma için gereken enerji sırasıyla 706,70 ve 635,72 Wh'e çıkmakla birlikte 1 cm FDM kullanımı % 16,02 ve % 15,84; 2 cm FDM kullanımı % 31,95 ve % 32,09; 3 cm FDM kullanımı % 42,06 ve % 34,83; 4 cm FDM kullanımı % 52,55 ve % 37,30; 5 cm FDM kullanımı ile ise % 58,38 ve % 39,41 kazanç sağlamaktadır. Bununla beraber FDM kullanımı ile 5 ay boyunca 1 m² alanda soğutma enerjisinde sağlanan azalma 1 cm FDM için 370,45 Wh; 2 cm için 766,79 Wh; 3 cm için 907,56 Wh; 4 cm için 1014,02 Wh ve 5 cm için 1076,02 Wh'tir.



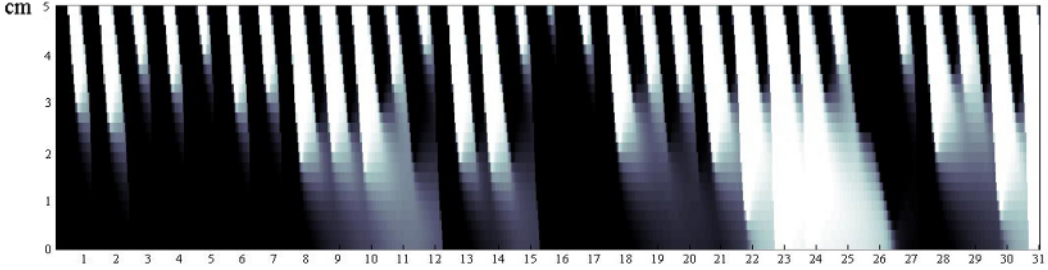
(a) Mayıs ayında 5 cm FDM

gün



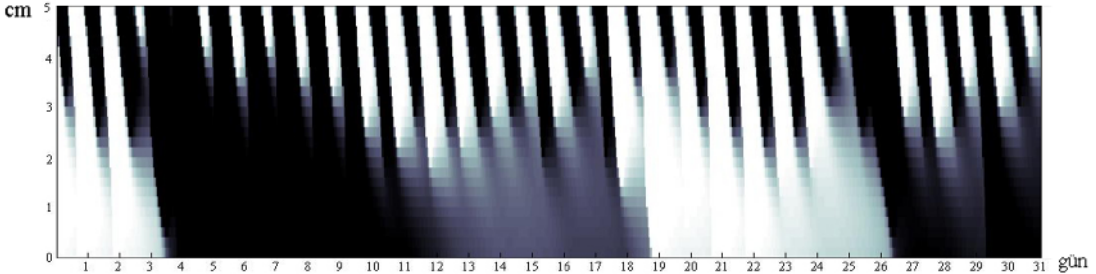
(b) Haziran ayında 5 cm FDM

gün



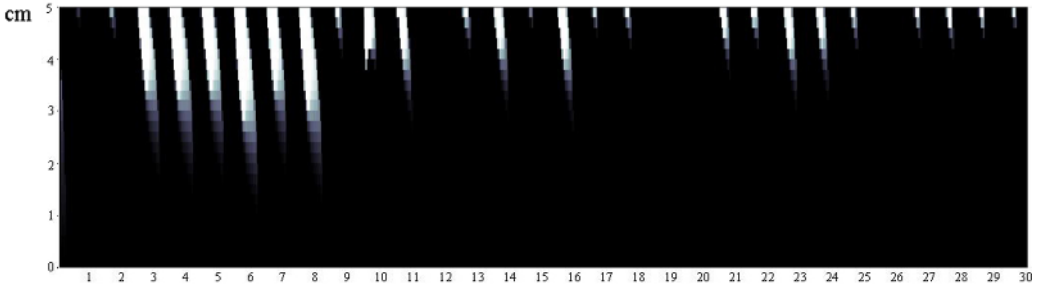
(c) Temmuz ayında 5 cm FDM

gün



(d) Ağustos ayında 5 cm FDM

gün



(e) Eylül ayında 5 cm FDM

gün

Şekil 4.63 Erzurum'da FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Birbirini doğrulamak için yapılan faz değişim malzemesiz (FDM'siz) iki deneyin eleman katmanlarındaki sıcaklık değişimleri karşılaştırıldığında %0,09, enerji hesaplarında ise % 0,79 fark görülmektedir. Hata kabul edilebilir düzeydedir.
2. Birbirini doğrulamak için yapılan FDM'li deneylerin birbiriyle sıcaklık dağılımları farkı 50 °C için % 0,07; 40 °C için % 0,82 ve 60 °C için % 0,44'tür. Enerji farkları ise 50°C için % 0,33; 40 °C için % 2,45 ve 60 °C için ise % 4,38'dir. Farklar kabul edilebilir ölçüdedir.
3. Zamana bağlı yüzeylerdeki sıcaklık değişimi grafikleri ve FDM erime fotoğrafları ile FDM davranışı hakkında yorumda bulunulabilir. FDM, katı halde 4,6 cm, sıvı halde ise 5 cm kalınlığındadır. Üretici firma deneylerde kullanılan FDM'nin tekrarlanan faz değişiminde kararlı performans sergilediğini bildirmiştir. Deneysel gözlemlerde de FDM'lerde bozulma görülmemiştir. Erime ara yüzü beklentilerle uyumlu olarak süreklilik göstermiştir. Tüm yüzey bir arada hareket etmek yerine kenarların daha kısa sürede faz değiştirdiği ve FDM'nin ortaya doğru hafif tümsek yaparak öncelikle kenarlardan erimeye başladığı görülmüştür.
4. Yapı elemanının ısı davranışı sayısal olarak, sonlu hacim yöntemi ile hesap yapan ANSYS Fluent bilgisayar yazılımı ile çözülmektedir. Bu programda, tanımlanan geometri, kontrol hacimlerine bölünerek her bir kontrol hacmini temsil eden denklemler iteratif yöntemlerle çözülmektedir. Analizi basitleştirmek amacıyla yapılan kabuller şu şekildedir:
 - Yapı elemanındaki ısı aktarımı tek boyutludur.
 - Kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri sabittir. Sadece faz değişimi sırasında FDM'nin özgül ısısı değişkenlik göstermektedir.

- Analizde sadece iletim etkisi düşünölmüştür, erime sürecinde FDM'deki doğal taşınım ve donma sürecinde süper soğuma etkisi ihmal edilmiştir.

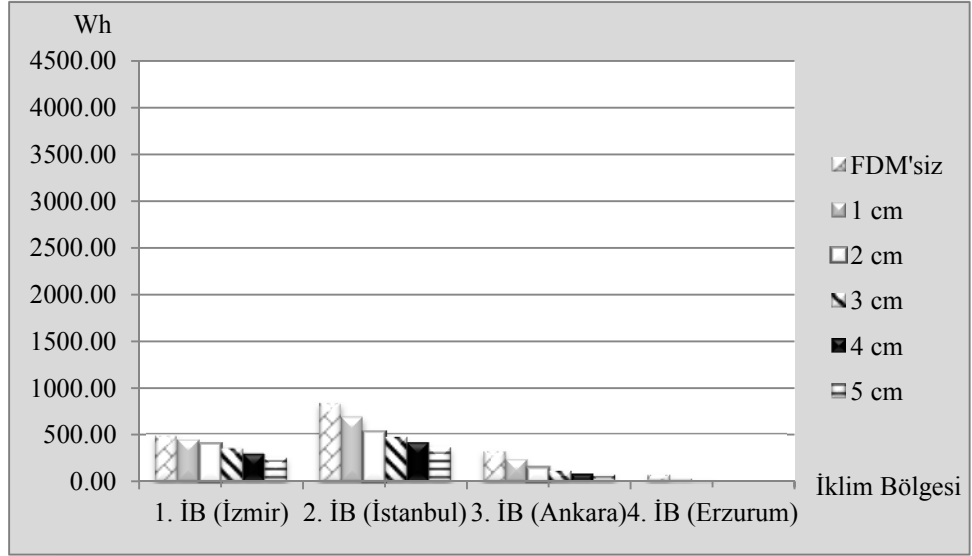
Çözüm sonuçlarını etkileyecek ağ kalitesi, zaman adımı ve yakınsama değişkenleri her biri için üçer alternatif denenerek yapılan çözümler sonucunda belirlenmiştir.

İstatistik analizi ile sayısal modelin deneysel çalışmayla uyuşması incelendiğinde ısı transferine bağlı oluşan sıcaklıklar; simölasyon sonuçları FDM'siz 1. deneyle % 0,28; FDM'siz 2. deneyle % 3,08; 50 °C 1. deneyle % 4,92 ve 50 °C 2. deneyle ise % 5,46 fark göstermektedir. Farklar kabul edilebilir ölçüdedir.

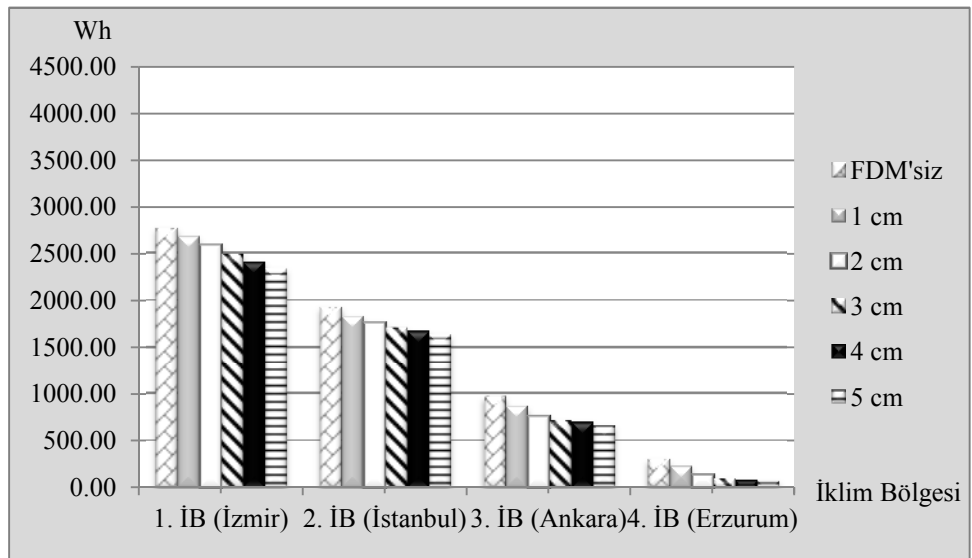
FDM'li deneyle simölasyon sonuçları arasında 72 saat için % 4,92 fark hesaplanmıştır. Faz değişiminin gerçekleştiği ilk 24 saat için hesaplanan fark ise % 5,73'dir. 50 °C 2. deney sonuçları değerlendirildiğinde % 5,46 fark hesaplanmıştır. Faz değişiminin gerçekleştiği ilk 24 saat için hesaplanan fark ise % 6,64'tür.

5. FDM'nin ısı enerjisi depolama kapasitesi, mevcut FDM miktarına bağlıdır. Ancak FDM'nin tümü faz değiştirdiğinde, depolama kapasitesi doyum noktasına ulaşmaktadır. Tüm iklim bölgelerinde FDM erime-katılşma dönemlerinde benzer eğilim görölmüştür. Yaz koşullarında, bir kaç sıcak yaz günü sonrasında, sıvı FDM'de depolanan gizli ısı dış ortama verilmemekte ve tüm FDM'de katılşma sıvılaşma döngüsü gerçekleşmemektedir. Bu nedenle, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında görölen iyileşme daha çok duyulur ısı kapasitesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 5.2-4). Ancak güneş enerjisinin etkin olarak saklandığı mevsimsel geçiş dönemlerinde, yani Mayıs ve Eylül aylarında daha fazla etki görölmektedir (Şekil 5.1, Şekil 5.5). Gece gündüz sıcaklık farkları daha fazla olan iklimlerde FDM'nin daha fazla faz değiştirmesi ve dolayısıyla elemanın daha başarılı olması beklenmekle beraber simölasyon sonuçlarında beklenenin tersine nemli iklime sahip İzmir ve İstanbul illerinde daha fazla maddi kazanç olasılığı görölmektedir. Bunun nedeni İzmir ve İstanbul illerinin daha sıcak olması ve

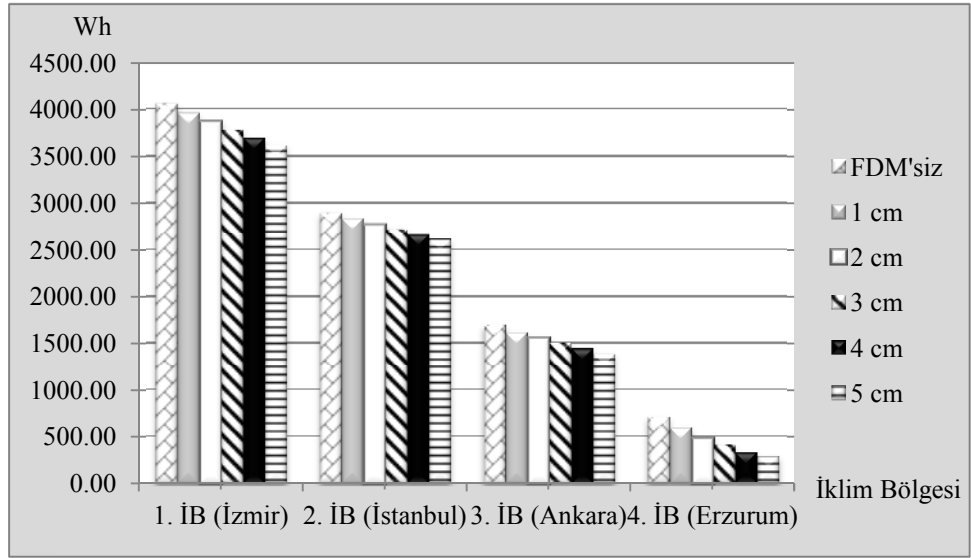
dolayısıyla daha fazla olan enerji ihtiyaçlarındaki azalmanın, maddi sonucu daha fazla etkilemesidir.



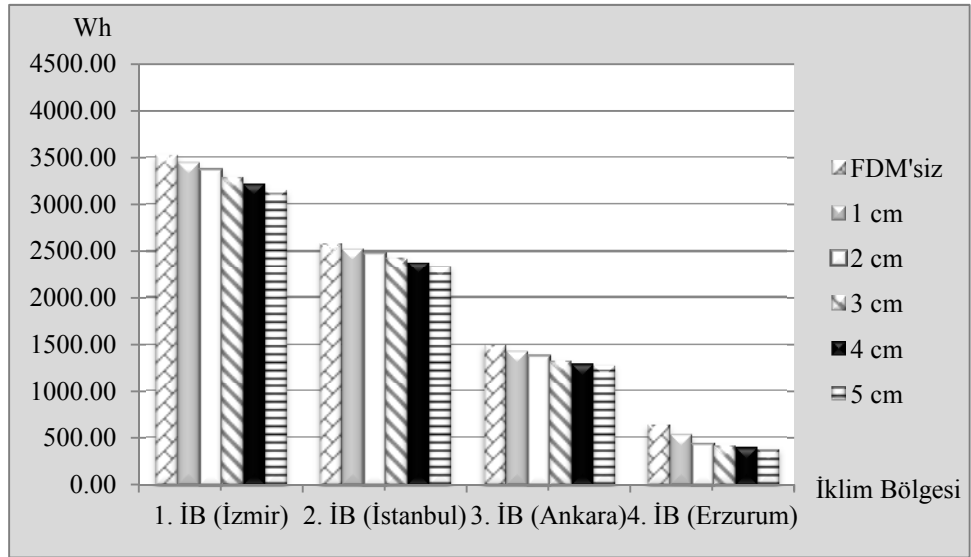
Şekil 5.1 Mayıs ayında illerin



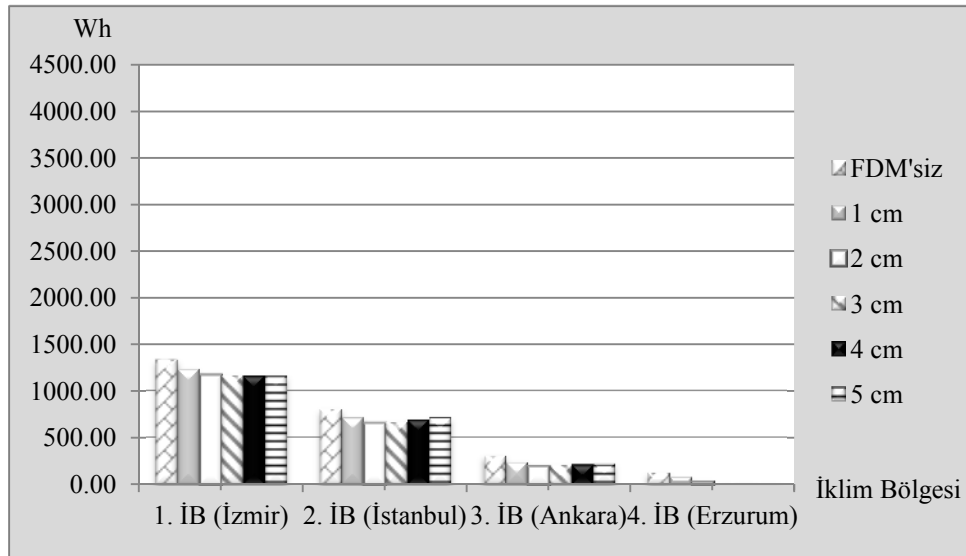
Şekil 5.2 Haziran ayında illerin



Şekil 5.3 Temmuz ayı dört iklim bölgesi verileri



Şekil 5.4 Ağustos ayı dört iklim bölgesi verileri



Şekil 5.5 Eylül ayı dört iklim bölgesi verileri

Simülasyon sonuçlarında, farklı FDM miktarına sahip yapı elemanlarının aylık enerji başarımları 1. iklim bölgesini temsilen İzmir için; 2. iklim bölgesini temsilen İstanbul; 3. iklim bölgesini temsilen Ankara; 4. iklim bölgesini temsilen Erzurum için verilmiştir. Sonuçlara göre FDM'li çatının iklimsel değişimleri sönümleme etkisi FDM'siz çatıdan biraz daha iyidir. FDM miktarı arttıkça, çatının ısı ataletinin arttığı, yani dış ortam koşullarına verdiği tepkinin yavaşladığı görülmüştür. Ancak, gündüzleri gelen güneş enerjisi FDM tarafından emilmekle beraber, esas sönümleme ısı yalıtımının içinde gerçekleşmektedir.

Araştırma sonuçları, şu anda incelenen problem ve detayda seçilen FDM'nin ekonomik olmadığını göstermiştir. Burada malzeme yeterli başarımlı göstermemektedir. Ayrıca kullanılan malzeme, her ne kadar bu çalışma kapsamında üzerinde durulmamışsa da pahalıdır. Bu sonuçlara göre ancak çok geniş çatı yüzeyleri olan binalarda (örneğin fabrika yapıları) soğutma yüklerini azaltmak için FDM kullanılması olasıdır. Ayrıca, FDM kullanımı daha kararlı, istenen ortam sıcaklığına yakın yüzey sıcaklığı yaratarak insan vücudundan ısıyla ışınila olan kazanç/kayıpların azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Bu sayede, ısı konforun sağlanmasına yardımcı olur ve doğrudan ısı kazanç/kayıplardan öte, kararlı ortam sağlanması gereken; laboratuvar, askeriye, fabrika gibi bazı özel

durumlarda avantaj getirebilir. Ancak uygulamada FDM'lerin çatı katmanları arasındaki konumunun çatıdaki konumlanması çok önemlidir. Örneğin, tüm yüzeyi kaplayacak ve FDM'nin katı-sıvı fazlarında doğru çalışmasını sağlayacak ‐hazne detayının‐ çok iyi çözümlenmesi gereklidir. Kapsüllenmiş FDM'lerin kullanımı ile uygulama sorunları azaltılabilir.

6. Bu çalışma, FDM'lerin ve dolayısıyla gizli ısı depolama malzemelerinin yapıya entegrasyonu konusundaki çalışmalara bir katkı koymaktadır. Çalışmada getirilen model, ileride farklı iklim koşullarında yapı kabuğundaki pek çok değişkenin etkisini inceleme amaçlı çalışmalarda kullanılacak esnek bir modeldir. Yapılabilecek çalışmaların içinde;

- çeşitli yapı detaylandırmaları,
- daha ucuz ve kolay bulunan FDM'lerin incelenmesi,
- farklı FDM miktarı,
- kaplama malzemesi özellikleri,
- güneşe yönelme,
- gölgelenme,
- farklı mekan sıcaklıkları,
- çeşitli iklimsel özellikler ve
- gece havalandırması uygulamaları sayılabilir.

7. Deneysel sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmada kullanılan RT27 parafinine yakın kimyasal özelliği olan diğer FDM'lerin de (bakınız EKII) benzer davranış göstereceği söylenebilir. Ancak, sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, FDM seçimi öncesinde yapının yer aldığı iklim bölgesi ile yapı yerinin mikro iklimsel ölçekteki ay ve mevsimlere bağlı ortam özelliklerinin önceden çok iyi irdelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Örnekten seçilen FDM, 1. ve 2. iklim bölgelerini temsil eden illerde (İzmir ve İstanbul) Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında, 3. iklim bölgesini temsil eden ilde (Ankara) ise Temmuz ve Ağustos aylarında sıvı halde kalmaktadır. Bu

nedenle sistemin gizli ısı etkisi istenildiği gibi kullanılmamakta, daha çok duyulur ısıdan kaynaklanan etki görülmektedir. Burada hareketle RT27'nin geçiş aylarında daha başarılı olduğu söylenebilir. Kış aylarında ise 25 °C'nin altındaki dış ortam sıcaklıkları, FDM'nin çoğu zaman katı halde olmasını sağlayacaktır. Dört mevsimi olan bir iklimde, bir FDM'nin her hava koşulu altında başarı göstermesi mümkün değildir. Bu yüzden, bu çalışmanın devamında; yaz, kış ve bahar dönemleri için farklı iki veya üç FDM kullanılmasının potansiyeli araştırılabilir.

8. Buna ek olarak, ilerideki çalışmalarda, bu çalışmanın kapsamı dışında olan; detayın uygulanma sorunları ve yaşam boyu maliyet analizi gibi konuları araştırmak olasıdır. Her ne kadar şu anda ekonomik olmasa da FDM gibi yeni malzemeler ve yapıda kullanımlarıyla ilgili detaylar geliştirildikçe performanslarının artacağı ve gitgide daha ekonomik olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

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

ANSYS Inc. (2009a). *ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide*.

ANSYS Inc. (2009b). *ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual*.

Athienitis, A., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., ve Feldman, D. (1997). Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Build Environ*, 32, 405–10.

Azpiazu, M. N., Morquillas, J. M., ve Vazquez, A. (1994). Performance of the Ca(OH)₂/CaO cycle as a long term heat storage system. *Proceedings of 6th International Conference on Thermal Energy Storage*, s. 469-476. Finlandiya.

Başyazıcı, İ. U. (2007). *İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Benard, C., Gobin, D., ve Gutierrez, M. (1981). Experimental results of a latent heat solar roof used for breeding chickens. *Sol Energy*, 26, 347–54.

Buddhi, D., ve Sharma, S. D. (1999). Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material. *Energy Convers Manage*, 40, 1979–84.

Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., ve Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39, 113–119.

- Castell, A., Medrano, M., Roca, J., Vila, A., ve Cabeza, L. F. (2009a). Experimental study of PCM in mediterranean buildings. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Stokholm, İsveç.
- Castell, A., Medrano, M., Castellón, C., ve Cabeza, L. F. (2009b). Analysis of the simulation models for the use of PCM in building. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*, 14-17 Haziran 2009. Stockholm.
- Castellón, C., Martorell, I., Roca, J., Lázaro, A., Zalba, B., Fernández, I., et al. (2009a). Comparison of manufacturing techniques to use microencapsulated phase change materials in sandwich panels - Experimental study. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Stokholm, İsveç.
- Castellón, C., Nogués, M., Pérez, G., Medrano, M., ve Cabeza, L. (2009b). Use of microencapsulated PCM in buildings and the effect of adding awnings. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Stokholm, İsveç.
- Chung, T. J. (2002). *Computational fluid dynamics*. Cambridge. Cambridge University Press.
- Chunyan, L. (1993). *Thermal performance of a room with wall latent heat storage*. Montreal, Canada: Concordia University.
- Darkwa, J., ve Kim, J. S. (2004). Heat transfer in neuron composite laminated phase-change drywall. *Journal of Power and Energy*, 218, 83–88.
- Darkwa, J., ve Kim, J. S. (2005). Dynamics of energy storage in phase change drywall systems. *Int. J. Energ. Res.*, 29, 335–343.

- Darkwa, K., ve O'Callaghan, P. (2006). Simulation of phase change drywalls in a passive solar building. *Applied Thermal Engineering*, 26, 853–858.
- Demirbilek, N., ve Eryıldız D. I. (1999). Architecture in Turkey, State of the Art. *Proceeding of ISES*, Haziran 1999. Göteborg, İsveç.
- Dinçer, İ. (2006). The role of thermal energy storage systems in sustainable development. *Ecstock 2006*, 31 Mayıs-2 Haziran 2006. New Jersey, ABD.
- Duffy, A. D., ve Beckman, W. A. (1998). *Solar Engineering of thermal processes*. 2. Baskı, John Wiley & Sons.
- Farid, M. M., ve Kong, W. J. (2001). Underfloor heating with latent heat storage. *Proc Instn Mech Engrs*, 601-609.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A., ve Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597–161.
- Feldman, D., Banu, D., Hawes, D., ve Ghanbari, E. (1991). Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. *Sol Energy Mater*, 22, 231–42.
- Feustel, H. E., ve Stetiu, C. (1997). *Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application*. Lawrence Berkeley National laboratory.
- Gök, Ö. (2005). *Faz değıştiren maddelerin destekleyici maddelerde tutuklanması ve termal performansı*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hadjieva, M., Stoykov, R., ve Filipova, T. (2000). Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage. *Renewable Energy*, 111–115.

- Harland, A., Mackay, C., ve Vale, B. (2010). Phase Change Materials in Architecture. *Proceedings: SB10 Wellington - Innovation and Transformation, May 2010*. Wellington, Yeni Zelandada.
- Hawes, D. W., Banu, D., ve Feldman, D. (1990). Latent heat storage in concrete II. *Solar Energy Materials*, 21, 1, Ekim 1990, 61-80.
- Hawes, D., ve Feldman, D. (1992). absorption of phase change materials in concrete. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 27, 91–101.
- Heim, D., ve Clarke, J. A. (2004). Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r. *Energy and Buildings*, 36,795–805.
- Ibanez, M., Lazaro, A., Zalba, B., ve Cabeza, L. (2005). An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering*, 25, 1796–807.
- IEA SHC. (2005). Report C2 from Subtask C. 11 17, 2006 tarihinde Inventory of Phase Change Materials (PCM). *A report of IEA Solar Heating and Cooling Programme – Task 32.* "Advanced storage concepts for solar and low energy buildings": <http://www.iea-shc.org/publications/category.aspx?CategoryID=64> adresinden alındı
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., ve Lavine, A.S. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6. Baskı, Wiley.
- Ismail, K. A., ve Henriquez, J. R. (2001). Thermally effective windows with moving phase change material curtains. *Appl Thermal Eng*, 21, 1909–23.
- Kalousck, M., ve Hirs, J. (2002). Simulation of the summer indoor thermal comfort by using wallboard with phase change material. *Eurosun 2002*. Bologna.

- Kara, Y. A., Arslantürk, C., ve Kurnuç Çırakman, A. (2010), *Şeffaf Yalıtım Malzemesiyle Yalıtılmış, Faz Değiştiren Madde İçeren Bina Güney Duvarına Gizli Isı Şeklinde Güneş Enerjisi Depolanarak Isıtma Amacıyla Kullanımı*, TUBITAK, 107M154, Proje Sonuç Raporu, Erzurum.
- Karathia, F. S. (2011). *Analysis of thermal properties of phase change materials (PCM) using differential scanning calorimeter (DSC)*. Yüksek Lisans Tezi. Lleida: Lleida Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- İmar ve İskan Bakanlığı (1968). *Konut Projeleri Yönünden İklim Özelliklerinin Analiz ve Değerlendirilmesi: İzmir, Ankara*.
- Kedl, R., ve Stovall, T. (1989). *Activities in support of the wax-impregnated wallboard concept*. US Department of energy: thermal energy storage researches activity review. New Orleans, Los Angeles, ABD.
- Kenisarin, M., ve Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1913–1965.
- Khudhair, A. M., ve Farid, M. M. (2004). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 263–275.
- Kim, J. S., ve Darkwa, J. (2002). Enhanced Performance of Laminated PCM Wallboard For Thermal Energy Storage in Buildings. *37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*, s. 647-651.
- Kissock, J. K., Hamming, J. M., Whitney, T. I., ve Drake, M. L. (1998). Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings. *Proceedings of the international solar energy conference 1998*. New York, ABD.

- Knowler, T. (1983). Proportioning composites for efficient-TSWs. *Sol Energy*. 1983, 31-3, 319–26.
- Konuklu, Y., ve Paksoy, H. Ö. (2009), “Phase Change Material Sandwich Panels for Managing Solar Gain in Buildings”, *Journal of Solar Energy Eng.*, 2009, 131, 4
- Kumar, R., Kumar, R., Misra, M. K., Tak, B. B., Sharma, P. K., ve Khatri, P. K. (2009). Passive temperature moderation using multi-transformation phase change materials (MTPCM) in tropical desert climate. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Stockholm, İsveç.
- Lee, T., Hawes, D. W., Banu, D., ve Feldman, D. (2000). Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 62, 217–237.
- Mehling, H., ve Cabeza, L. F. (2007). Thermal energy storage for sustainable energy consumption. H. Ö. Paksoy içinde, *Thermal energy storage for sustainable energy consumption* (s. 257-278). Springer in Cooperation with Nato Public Diplomacy Division.
- Mehling, H., Krippner, R., ve Hauer, A. (2002). Research project on PCM in wood–light weight-concrete. *Proceedings of the second workshop of IEA ECES IA Annex 17*. Ljubljana, Slovenia.
- Neeper, D. A. (2000). Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Sol Energy*, 68, 393–403.
- Özışık, M. N. (1993). *Heat conduction* (2. Baskı). Wiley-Interscience.
- Öztürk, H. H. (1997). *Sera ısıtma için güneş enerjisinin faz değıştiren materyalde (PCM) depolanması üzerine bir araştırma*. Doktora Tezi. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Pasupathy, A., ve Velraj, R. (2008). Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management. *Energy and Buildings*, 40, 193–203.
- Pasupathy, A., Velraj, R., ve Seeniraj, R. (2008). Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 39–64.
- Peippo, K., Kauranen, P., ve Lund, P. D. (1991a). A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings*, 17, 259-270.
- Peippo, K., Kauranen, P., ve Lund, P. D. (1991b). An organic PCM storage system with adjustable melting temperature. *Solar Energy*, 46, 275-278.
- Prado, R. T. A., ve Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37, 4, Nisan 2005, 295–300.
- Rubitherm (2009). *RT27'nin teknik özellikleri*. Ürün Broşürü. 4.3.2009 tarihinde erişildi.
- Rudd, A. F. (1993). Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings. *ASHRAE Transactions*, Volume 99, Part 2, paper #3724.
- Salyer, I. O., ve Sircar, A. K. (1990). Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications. *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—IECEC 90*.
- Salyer, I. O., Sircar, A. K., ve Charlo, R. P. (1985). Advanced phase-change materials for passive solar storage applications. *Proceedings of the Solar Building Conference*. Washington D.C., ABD.

- Shapiro, M. M., Feldman, D., Hawes, D., ve Banu, D. (1987). PCM thermal storage in wallboard. *Proceedings of the 12th passive solar conference*, s. 48–58. Portland.
- Stamatiadou, M., Antonopoulos, K., ve Founti, M. (2009). Energy savings using floor tiles with phase change materials in a south european country. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stockholm, İsveç.
- Stovall, T. K., ve Tomlinson, J. J. (1995). What are the potential benefits of including latent heat storage in common wall board. *Trans ASME*, 117, 318–25.
- Stritih, U., ve Novak, P. (2002). Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation. *Second Workshop: IEA, ECES IEA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Techniques—Feasibility Studies and Demonstration Projects*. Ljubljana: IEA.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2008). *TS 825 Binalarda ısı yalıtım yönetmeliği*.
- Tyagi, V. V., ve Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: a state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1146-1166.
- Versteeg, H. ve Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (2. Baskı). Prentice Hall.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., ve Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23, 251-283.
- Zamalloa, A., Embil, M. J., Zuñiga, J., Zubillaga, O., Cano, F., ve Flores, I. (2009). PCM containing indoor plaster for thermal comfort and energy saving in

buildings. *EFFSTOCK 2009 Proceedings of 10th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stockholm, İsveç.

Zhang, M., Medina, M. A., ve King, J. B. (2005). Development of a thermally enhanced frame wall with phase change materials for on-peak air-conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings. *Int J Energy Res*, 29, 795-809.

Zhang, Y., Zhou, G., Lin, K., Zhang, Q., ve Di, H. (2007). Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook. *Building and Environment*, 42, 2197-2209.

Zhou, G., Zhang, Y., Wang, X., Lin, K., ve Xiao, W. (2007). An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating. *Solar Energy*, 81, 1351–1360.

EKLER

EK I- Kullanılan Simgeler

Semboller

a : ısı yayılım katsayısı [m^2/s]

A : alan [m^2]

c : özgül ısı [$kJ/kg \cdot K$]

COP : cihaz performans katsayısı [-]

g : yerçekimi ivmesi [$9,81 m/s^2$]

h : ortalama ısı taşınım katsayısı [$W/m^2 \cdot K$]

H : gizli ısı [kJ/kg]

I : yüzeye gelen güneş ışınımı [W/m^2]

k : ısı iletim [W/mK]

L : transfer yüzeyi uzunluğu [m]

m : kütle [kg]

\dot{m} : kütle akış debisi [kg/s]

Nu : ortalama Nusselt sayısı [-]

Pr : Prandtl sayısı [-]

Q : ısı enerjisi [kJ]

\dot{Q} : anlık ısı enerjisi [W]

q'' : birim yüzey alanından geçen enerji [kWh/m^2]

Ra : Rayleigh sayısı [-]

T : sıcaklık [K]

Yunan harfleri

α : ısıt yutma katsayısı [-]

β : ısıt genleşme katsayısı [1/K]

Δ : değişim

ε : yayma oranı [-]

ν : kinematik viskozite [m^2/s]

σ : Stefan–Boltzmann sabiti [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$]

Alt indisler

ak : akışkan

al : alınan

d : duyulur

depo : depolanan

dış : dış ortam

FDM : faz değişim malzemesi

film : film tabakası

g : gizli

gök : gökyüzü

iç : iç ortam

kk : kayıp/kazanç

kul : kullanılan

s : yüzey

ver : verilen

y : yoğuşma

∞ : ortam

EK II Binalarda Kullanılabilecek Faz Değişim Malzemeleri

Tablo EK II.1 Yapı elemanlarında ısıl depolama amacıyla kullanılabilecek (15-35 °C) FDM'ler ve termofiziksel özellikleri (IEA, 2005]

<i>FDM</i>	<i>Moleküler Formülü</i>	<i>Diğer moleküler Formülü</i>	<i>Donma noktası [°C]</i>	<i>Füzyon ısı [kJ/kg]</i>	<i>Gizli ısı [MJ/m³]</i>	<i>Yoğunluk [kg/m³]</i>	<i>Özgül ısı (sızt) [KJ/kg, K]</i>	<i>Özgül ısı (kat) [KJ/kg, K]</i>	<i>Isısal İletkenlik [W/m,K]</i>	<i>Kaynak</i>
Sodiumhydroxide		NaOH * 3,5H ₂ O	15							Belton, Ajami: Thermochemistry of salt hydrates Report No NSF/FRANN/SE/G127976/TR/73/4, Philadelphia, (Peensylvania, USA) 1973
Witco 45A/85010-1 (50/50)			15,6	153						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Octadecane/Hexadecane (75/25)			15,8	221,5						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
n-hexadecane		C ₁₆ H ₃₄	16,7	237						Kedl, R.J.; 1991
1-Bromo Octadecane		CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₂ BR	17,2	175,6						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
Dodecanol		CH ₃ (CH ₂) ₁₀ CH ₂ OH	17,5	188,5						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990

n-heksadekaani	C16H38		18	234						Peippo, Kimmo; 1989
	NaCl- Na2SO4-H2O		18							Mehdi N. Bahadori
Sodiumchromate		Na2CrO4.10H 2O	18							Belton, Ajami: Thermochemistry of salt hydrates Report No NSF/FRANN/SE/GI27976/TR/73/4, Philadelphia, (Peensylvania, USA) 1973
Hexadecane	C16H43	CH3- (CH2)14-CH3	18,1	236			2,22	1,75		Choi E., Cho Y. I. & Lorsch H.G., 1992, He B., Gustafsson E. M., Setterwall F., 1998
Hexadecane			18,1	236		770	2,22			Syukri Himran, Aryadi Suwono, 1994
Potassium fluoride tetrahydrate		KF * 4H2O	18,5	231						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.: Energy Buildings 20 (1993) 77-86
Butyl Stearate		CH3(CH2)16 COOC4H9	18,5	126,6						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
Propyl palmitate		CH3(CH2)12 COOC3H7	19	186						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.: Energy Buildings 20 (1993) 77-86
Butyl stearate		CH3(CH2)16 COO(CH2)3C H3	19	140						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.: Energy Buildings 20 (1993) 77-86
capric (61,5 %w)- lauric acid(38,5%w)			19	132						

mixture										
Capric- Lauric 61,5-38,5 %			19,1	132						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
Tech Grade Octadecane			19,2	207						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Butyl Stearate		CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOC ₄ H ₉	19,5	150,5						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
Witco K-61			19,8	199,8						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Acetophenone	C ₆ H ₅ COCH ₃		20							Lane, George A. 1983
Octadecane			20,1	252						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
n-heptadecane		C ₁₇ H ₃₆	20,7	179						Kedl, R.J.; 1991
Octadecane		CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₃	20,7	159,3						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
capric(73,5%w) - myristic(26,5%w) acid mixture			21	152						

45/55 Capric-lauric acid		45% CH ₃ (CH ₂) ₈ C OOH; 55% CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	21	143						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.; 1993
Capric- Myristic 73,5- 26,5 %			21,4	152						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
Heptadecane			21,9	214		775	2,23			Syukri Himran, Aryadi Suwono, 1994
Witco 45-A/85010-1 (75/25)			21,9	155,1						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
capric(75,2%w)- palmitic(24,8%w) acid mixture			22	153						(Kauranen P., Peippo K., and Lund P.D. 1991,
Capric- Palmitic 75,2- 24,8 %			22,1	153						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
Octadecane		CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₃	22,5	205						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
Octadecane		CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₃	24,4	244						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; 1990
	CaCl ₂ - MgCl ₂ -H ₂ O		25	41,7						Mehdi N. Bahadori
	Bu ₄ NF*		25							Lane, George A. 1983

	32H2O									
Magnesium Nitrate Hexahydrate		Mn(NO3)2 * 6H2O	25,8	125,9						Nagano, Muchida, Iwata, Hirujoshi, Domanski: 5th workshop of the IEA ECES Annex 10 , Tsu (Japan) 2000
		LiBO2 * 8H2O	26	289						Peippo, Kimmo; 1989
1-dodecanol		CH3(CH2)11 OH	26	200						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.; 1993
Diphenylmethane	(C6H5)2CH2		26							Lane, George A. 1983
Wittco 45-A 100%			26,3	172,2						Salyer, O. Ival; Sircar, A.K.; 1997
Witco 45-A			26,3	167,2						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Witco 45-A 100%			26,3	167,2						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
n-octadecane		C18H38	26,6	246						Kedl, R.J.; 1991
Capric- Stearic 86,6- 13,4 %			26,8	160						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
Acetamide / urea			27	163						Lane, George A. 1983
capric(86,6%w) - stearic(13,4 %w) acid mixture			27	160						(Kauranen P., Peippo K., and Lund P.D. 1991,

Suolahydraatteja, epäkongruentteja		FeBr3 * 6H2O	27	105						Peippo, Kimmo; 1989
	FeBr3* 6H2O		27							Lane, George A. 1983
n-oktadekaani	C18H40		28	243						Peippo, Kimmo; 1989
Calcium chloride hexahydrate			28	188	318	1500	2,09	1,42	1,085	Kamil Kaygusuz, 1995
Octadecane			28,1	244		779	2,22	1,9		Syukri Himran, Aryadi Suwono, 1994
TH29			29	175-225		1500				www.pcm-solutions.com
	CaCl2 * 6H2O		29	190,8		1562			0,54	Lane: Int.J.Ambient Energy 1(1980) 155-168
	57,8% LiNO3 & 42,2% H2O		29							Lane, George A. 1983
kapriinihappo, tekninen			29,1	160						Kauranen, Pertti, 1989
Calcium chloride hexahydrate		CaCl2 * 6H2O	29,7	171						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.; 1993
Trimethylolethane tetrahydrate	C5H12O3 4H2O	CH3-C-(CH2OH)3	29,8	185		1,12 (10C) 1,09 (50C)	3,58	2,75	0,65(22C) 0,21(56C)	Laugt M et al., powder diffraction, Vol.6, No.4,1991

Lithiumnitrate Trihydrate		LiNO ₃ * 3H ₂ O	30	296						Heckenkamp, Baumann: Latentwärmespeicher Sonderdruck aus Nachrichten 11 (1997), 1075- 1081
STL30 (Trimethylolethane Hydrate)	org.Hydrate		30							
Suolahydraatteja, osittain kongruentteja		CaCl ₂ * 6H ₂ O	30	171	256					Peippo, Kimmo; 1989
capric acid			30	158						Kauranen P., Peippo K., and Lund P.D. 1991,
	Ca(NO ₃) ₂ * 4H ₂ O / Mg(NO ₃) ₂ * 6H ₂ O		30	134						Lane, George A. 1983
	LiNO ₃ * 3H ₂ O		30							Lane, George A. 1983
Capric 100%			30,1	158						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
kapriinihappo, puhdas			30,2	160						Kauranen, Pertti, 1989
n-nonadecane		C ₁₉ H ₄₀	30,4	182						Kedl, R.J.; 1991
Witco LLN/45- A (50/50)			30,5	193						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Wittco LLN/45-A			30,5	192						Salyer, O. Ival; Sircar, A.K.; 1997

(50/50)										
	Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O + 2,5% Na ₂ B ₄ O ₇ * 10H ₂ O		31,6		389					Mehdi N. Bahadori
Sodiumcarbonate Decahydrate		Na ₂ CO ₃ * 10 H ₂ O	32	267	256					Peippo, Kimmo; 1989
Sodiumsulphate decahydrate		Na ₂ SO ₄ *10H ₂ O	32	251		1460	3,26	1,92		A.A. Ghoneim, 1989
Nonadecane			32	222		782	2,3	1,92		Syukri Himran, Aryadi Suwono, 1994
Capric acid (s-l)			32	159						Kaasinen, H; 1991
	Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O		32		389					Mehdi N. Bahadori
Urea/ NH ₄ SCN			32							Lane, George A. 1983
	Na ₂ CO ₃ * 10H ₂ O		32							Lane, George A. 1983
	Na ₂ SO ₄ * 10H ₂ O		32							Lane, George A. 1983
Sodium sulphate	Na ₂ SO ₄ 10H ₂ O	Na ₂ SO ₄ *10H 2O	32,4	254	377	1485		1,93	0,544	Abhat A., 1983
		Na ₂ SO ₄ * 10H ₂ O	32,4	254	377					Peippo, Kimmo; 1989

Sodium sulphate decahydrate		Na ₂ SO ₄ * 10H ₂ O	32,4	254						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.; 1993
Lauric- Myristic 62,6-37,4 %			32,6	156						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
Lauric- Palmitic 64,0-36,0 %			32,8	165						P. Kauranen, K.Peippo, P.D. Lund, 1991
lauric(64 %w) - palmitic(36 %w) acid mixture			33	165						(Kauranen P., Peippo K., and Lund P.D. 1991,
lauric(62,6 %w) - myristic(37,4 %w) acid mixture			33	156						(Kauranen P., Peippo K., and Lund P.D. 1991,
Calciumbromide Hexahydrate	CaBr ₂ * 6H ₂ O		34	115,5		1956(1)/2194(s)				Lane: Int.J.Ambient Energy 1(1980) 155-168
Witco LLN 100%			34,7	214						Salyer, O. Ival; Sircar, A.K.; 1997
Witco LLN			34,7	207,7						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Witco LLN 100%			34,7	205,6						Salyer, O. Ival; Sircar, Anil K.; Chartoff, Richard P.; Miller, Daniel E.; 1985
Sodium ortophospate		Na ₂ HPO ₄ *	35	281						Hawes, D.W.; Feldman, D.; Banu, D.; 1993

dodecahydrate		12H2O								
	Na2HPO4* 12H2O		36	265		1522				Telkes: Proc. Workshop on Solar Energy Storage for the Heating and Cooling of Buildings, Charlottesville (Virginia, USA) 1975
n-eicosane		C20H42	35,2	253						Kedl, R.J.; 1991
TH36			36	175-225		1500				www.pcm-solutions.com
n-eikosaani	C20H42		36	247						Peippo, Kimmo; 1989
kapriinihappo	C10H20O2		36	152						Peippo, Kimmo; 1989
		Zn(NO3)2 * 6H2O	36	147	303					Peippo, Kimmo; 1989
	Zn(NO3)2 * 6H2O		36	130						Lane, George A. 1983
	76% NH4NO3 & 24% CH3CONH2		36							Lane, George A. 1983

Tablo EK II.2 Yapı elemanlarında ısıl depolama amacıyla kullanılacak (15-36 °C) ticari olarak üretilen FDM'ler ve termofiziksel özellikleri (IEA, 2005)

FDM	Tipi	Ergime sıcaklığı °C	H kJ/kg	°C	H kJ/l	Yoğunluk kg/l	°C	Yoğunluk kg/l	°C	Kaynak	İnternet adresi / Referans
<i>RUBITHERM</i> ® RT 36	gizli ısı parafini	36	159	27/42	140	0,88	15	0,76	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
<i>RUBITHERM</i> ® RT 35	gizli ısı parafini	35	157	27/42	138	0,88	15	0,76	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
ClimSel C 32	tuz hidratı	32	302	20/50	438	1,45				Climator	www.climator.com
E32		32	186		272	1,46				EPS Ltd	
<i>RUBITHERM</i> ® RT 32	gizli ısı parafini	31	130	23/38	114	0,88	15	0,76	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
E30		30	201		262	1,3				EPS Ltd	
TH29	tuz hidratı	29	188		290	1,54				TEAP	www.teappcm.com
<i>RUBITHERM</i> ® RT 27	gizli ısı parafini	28	179	19/34	156	0,87	15	0,75	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
<i>RUBITHERM</i> ® GR 27	gizli ısı granülata	28	72	19/34	54	0,75	15			<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com

<i>RUBITHERM®</i> PX 27	gizli ısı tozu	28	112	19/34	72	0,64	15			<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
A28		28	245		193	0,79				EPS Ltd	
S27	tuz hidrati	27	207		304	1,47				Cristopia	
STL27 (Calciumchloride hexahydrate)	tuz hidrati	27	213		232	1,09				Mitsubishi Chemical	
<i>RUBITHERM®</i> RT 26	gizli ısı parafini	25	131	15/30	115	0,88	15	0,76	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
<i>TH 25</i>	tuz hidrati	25	159							<i>TEAP</i>	www.teappcm.com
ClimSel C 24	tuz hidrati	24	216	15/45	320	1,48				Climator	www.climator.com
A22		22	220		171	0,775				EPS Ltd	
<i>RUBITHERM®</i> RT 20	gizli ısı parafini	22	172	11/26	150	0,87	15	0,75	70	<i>RUBITHERM</i> GmbH	www.rubitherm.com
E21		21	150		222	1,48				EPS Ltd	
		20								TEAP	www.teappcm.com
ClimSel C 15		15	130		0	0				Climator	www.climator.com

EK III Kalibrasyon Eğrileri

Kalibrasyon Güvenilirlik Hesabı

Isıl çiftlerin kalibrasyonunda kullanılan güvenilirlik hesabı şu şekildedir (EGEKALMEM, 2011):

%95 Güvenilirlik Hesabı =

$$2 \sqrt{\left(\frac{\text{Ref}_{\text{Pt100}}}{2}\right)^2 + \left(\frac{T_{\text{cc}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\text{Ref}_{\text{mm}}}{2}\right)^2 + \text{St}^2 + \text{B}_{\text{sta}}^2} = \pm 0,035$$

$\text{Ref}_{\text{Pt100}}$ = PT-100 referans değeri = 0°C'ta 0,01, 100°C'de 0,02 (0,02 alındı)
(EGEKALMEM, 2011),

T_{cc} = Test cihazının çözünürlüğü = 0,001 (Agilent, 2009),

Ref_{mm} = Multimetre referans değeri = 0,0024 (EGEKALMEM, 2011),

St = Standart sapma = en fazla 0,01 alındı,

B_{sta} = Banyo stabilitesi = 0,01 (EGEKALMEM, 2011).

Kalibrasyon Eğrileri

Isıl çiftlerin kalibrasyon eğrileri yukarıda verilen %95 güvenilirlik hesabına göre şu şekilde çıkarılmıştır:

C101

% 95 güven aralığında C101 fonksiyonu:

$$f(x) = 3,01E-06 x^3 - 0,000458 x^2 + 1,02 x + 0,877$$

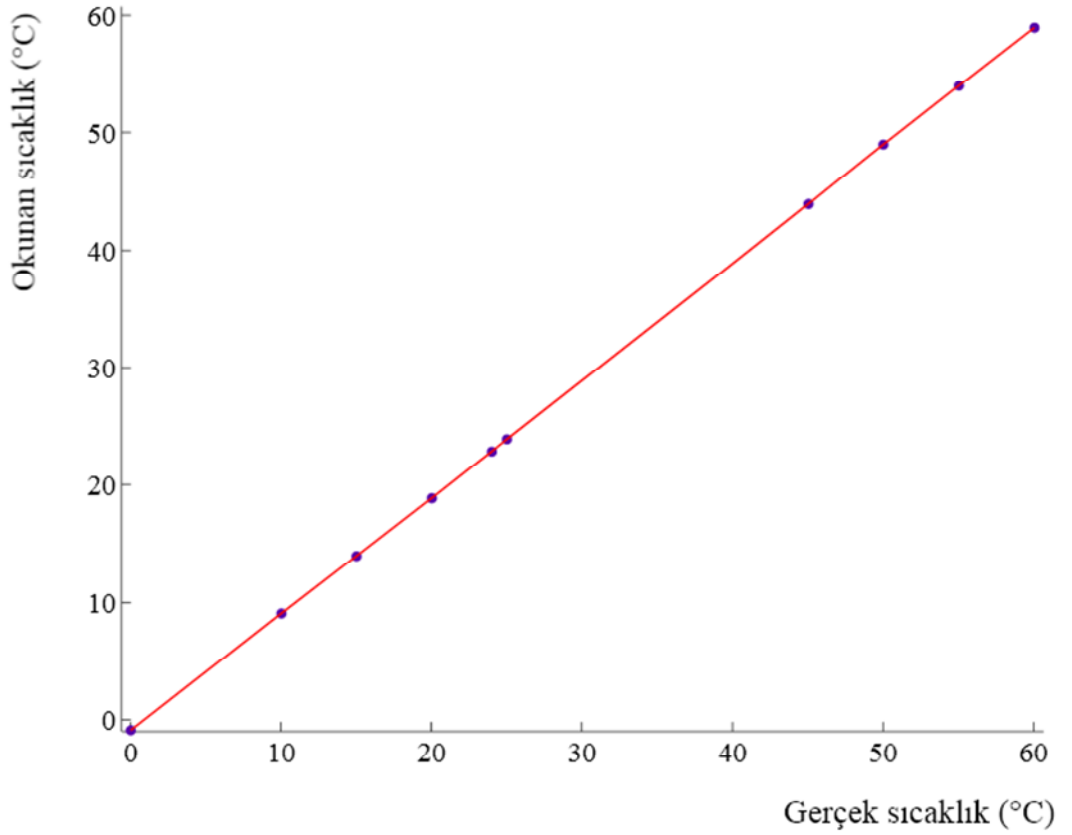
Eğri uyumu:

SSE: 0,01867

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05578



Şekil EK III.1 C101 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C102

% 95 güven aralığında C102 fonksiyonu:

$$f(x) = -1,23E-06 x^3 + 2,77E-05 x^2 + 1,0 x + 0,747$$

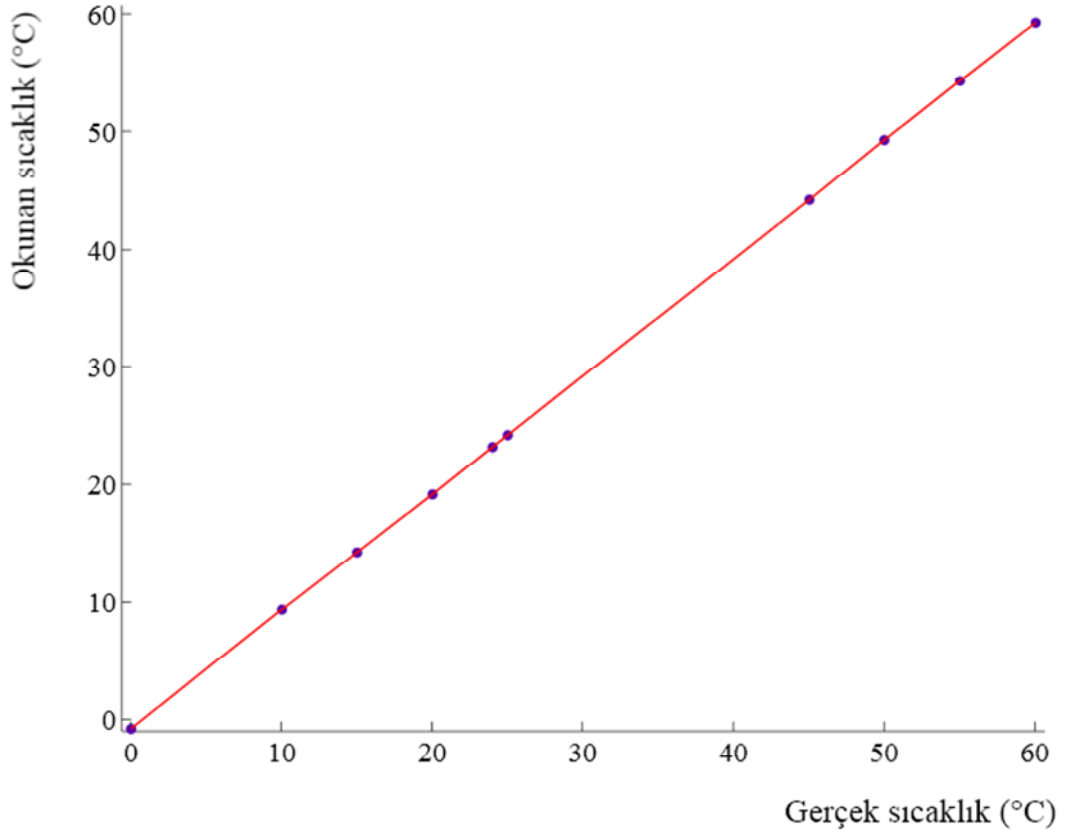
Eğri uyumu:

SSE: 0,02722

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,06735



Şekil EK III.2 C102 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C103

% 95 güven aralığında C103 fonksiyonu:

$$f(x) = -3,54E-06 x^3 + 0,000299 x^2 + 0,993 x + 0,607$$

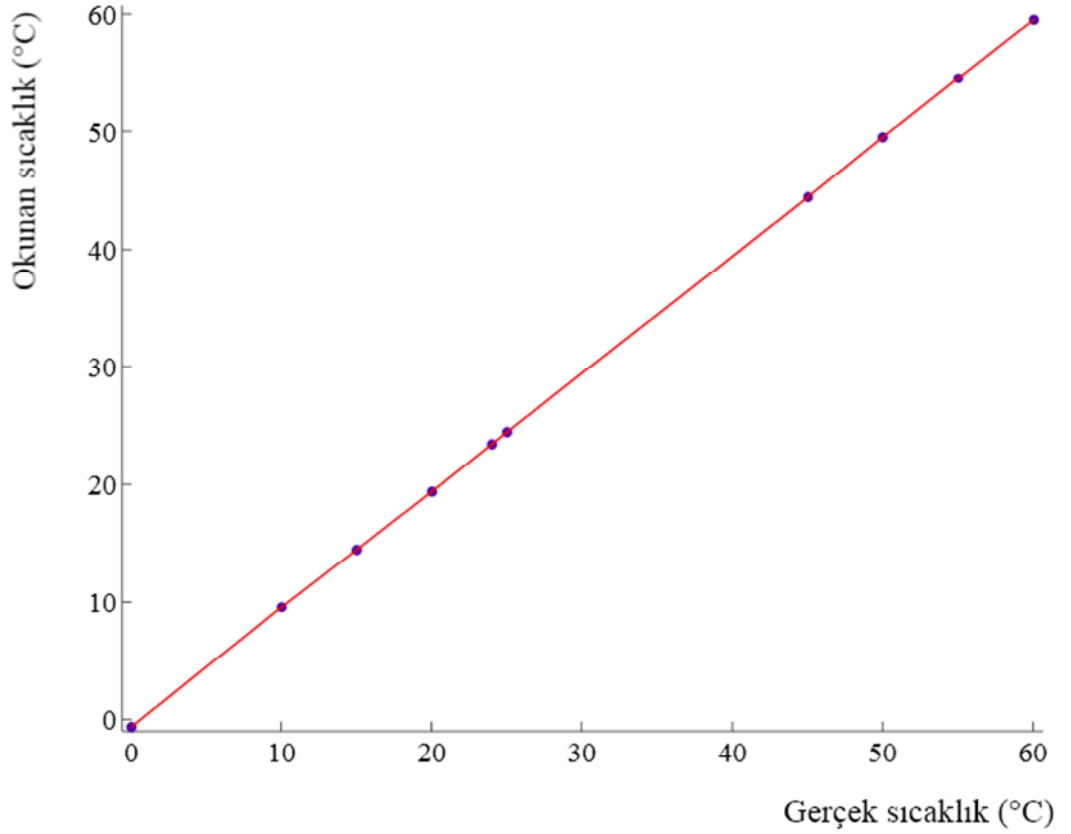
Eğri uyumu:

SSE: 0,02233

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,06101



Şekil EK III.3 C103 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C104

% 95 güven aralığında C104 fonksiyonu:

$$f(x) = -3,22E-06 x^3 + 0,000267 x^2 + 0,994 x + 0,486$$

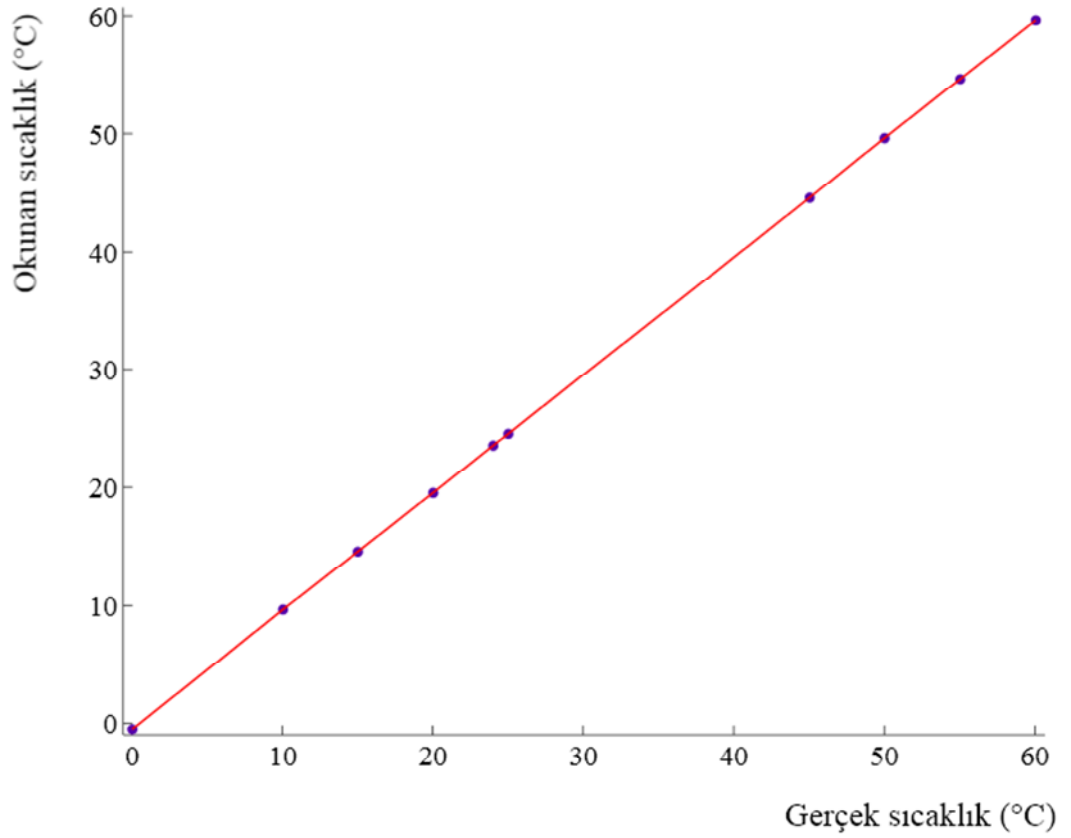
Eğri uyumu:

SSE: 0,01728

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05367



Şekil EK III.4 C104 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C105

% 95 güven aralığında C105 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,39E-06 x^3 + 0,000255 x^2 + 1,01 x - 0,253$$

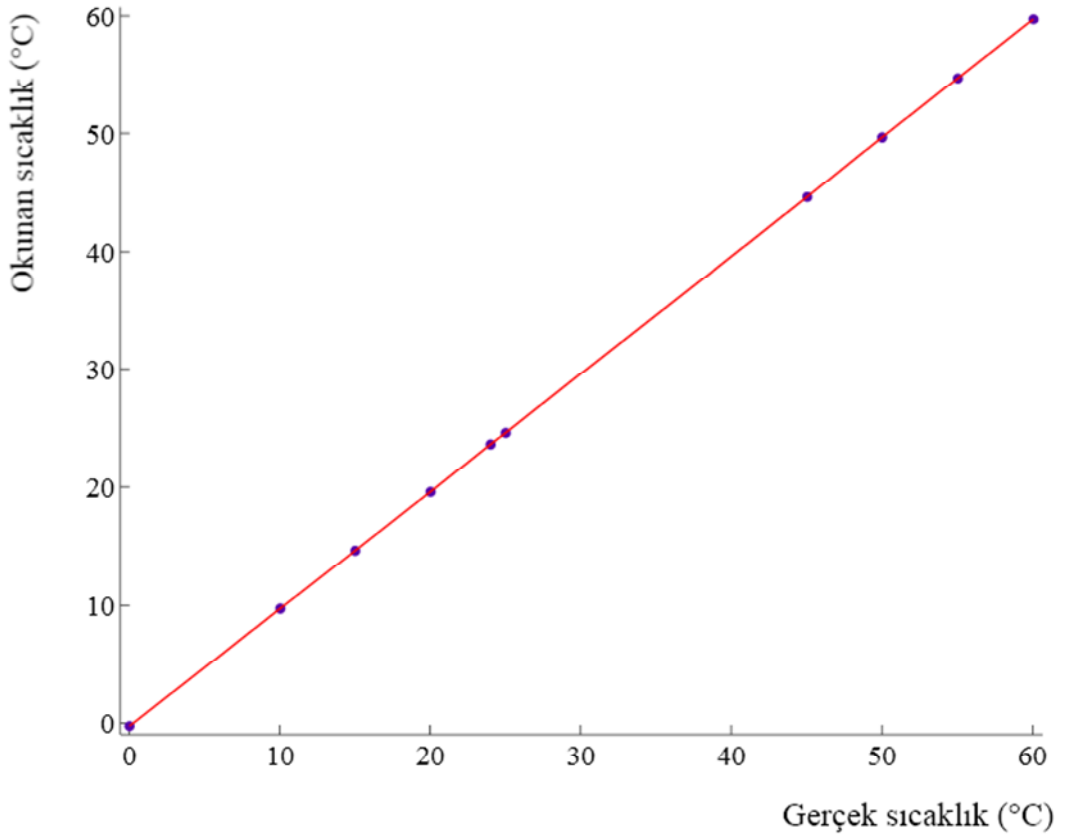
Eğri uyumu:

SSE: 0,005652

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,03069



Şekil EK III.5 C105 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C106

% 95 güven aralığında C106 fonksiyonu:

$$f(x) = -5,11E-06 x^3 - 0,000482 x^2 + 0,987 x - 0,371$$

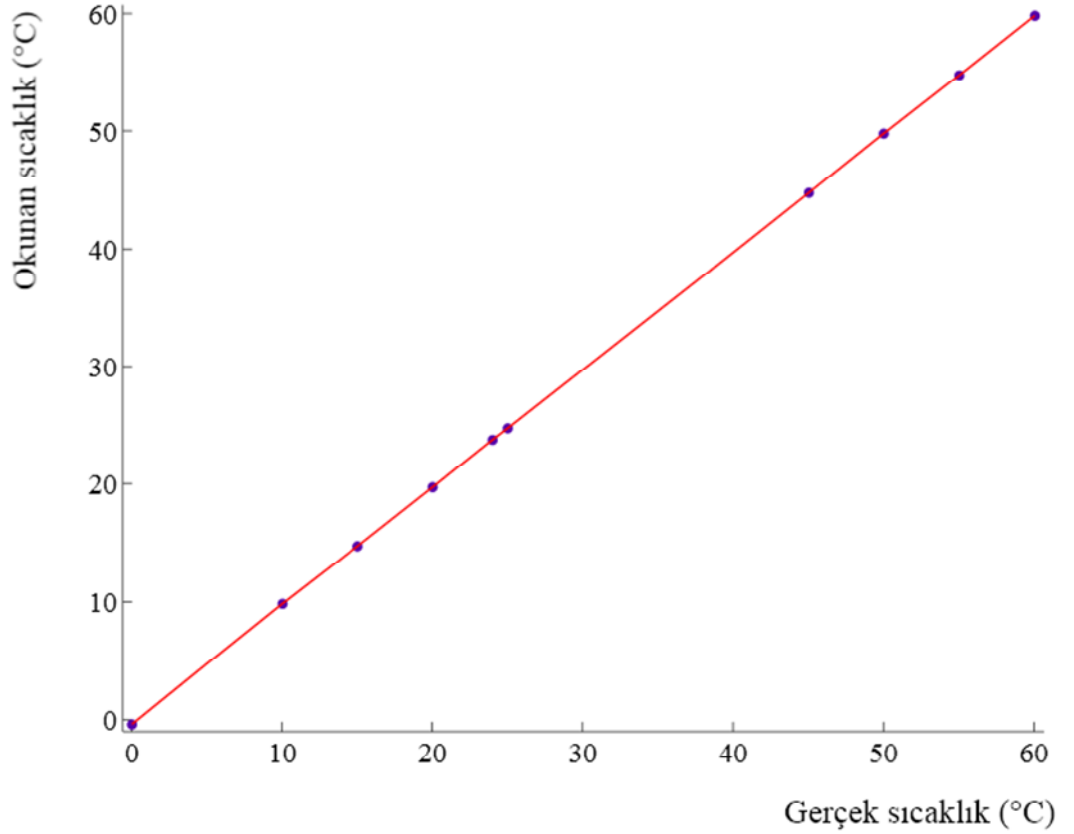
Eğri uyumu:

SSE: 0,01522

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,05036



Şekil EK III.6 C106 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C107

% 95 güven aralığında C107 fonksiyonu:

$$f(x) = -7,96E-06 x^3 - 0,000821 x^2 + 0,975 x - 0,265$$

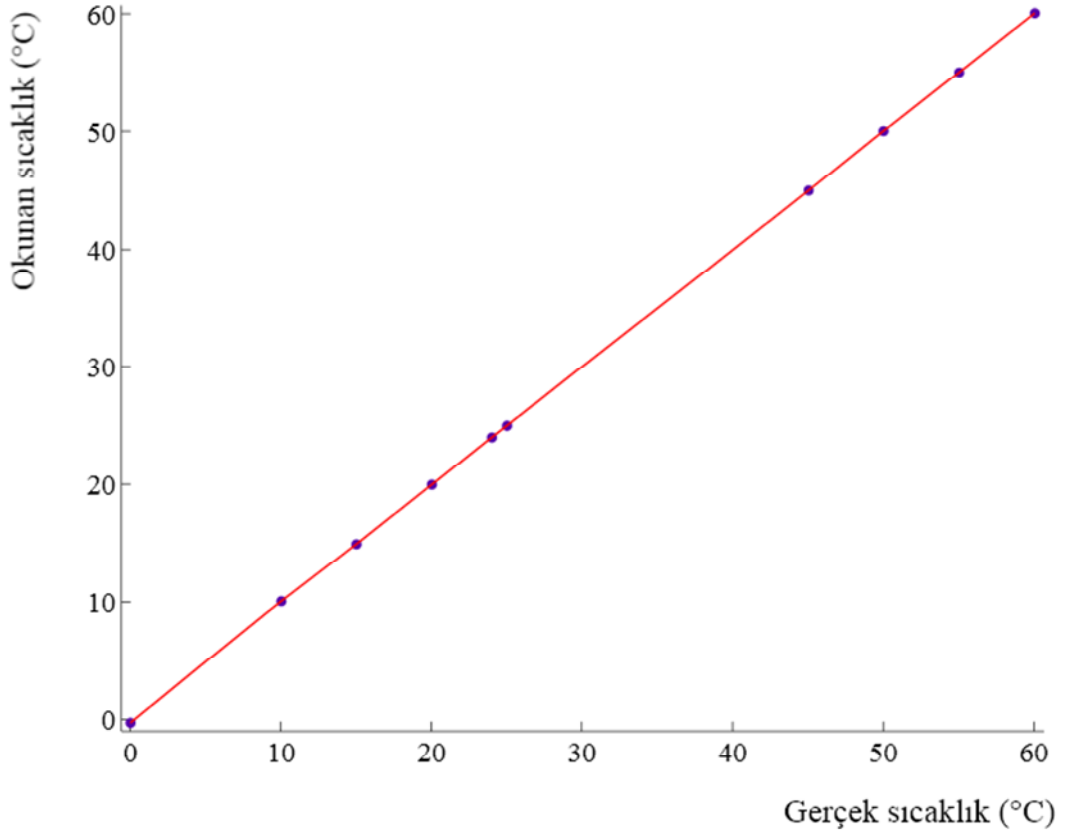
Eğri uyumu:

SSE: 0,02001

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05775



Şekil EK III.7 C107 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C108

% 95 güven aralığında C108 fonksiyonu:

$$f(x) = -8,08E-06 x^3 - 0,000312 x^2 + 1,01 x + 0,331$$

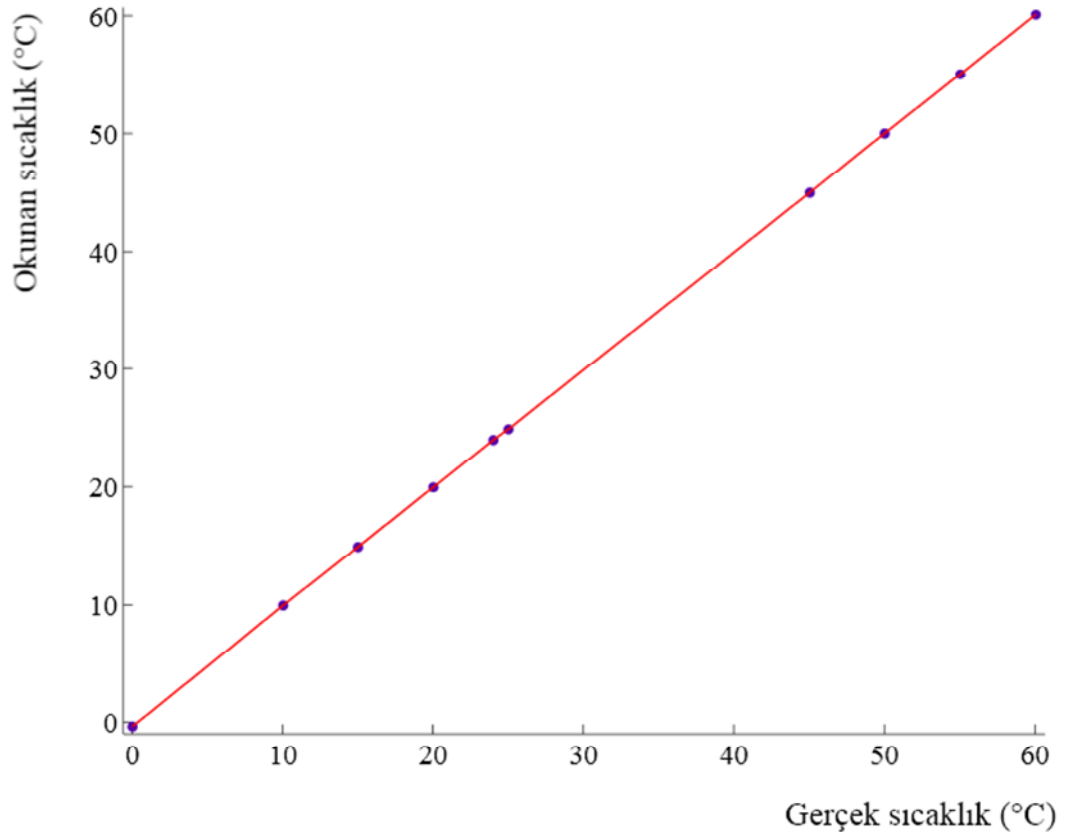
Eğri uyumu:

SSE: 0,02102

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05919



Şekil EK III.8 C108 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C109

% 95 güven aralığında C109 fonksiyonu:

$$f(x) = 2,19E-06 x^3 + 0,000312 x^2 + 1,01 x - 0,184$$

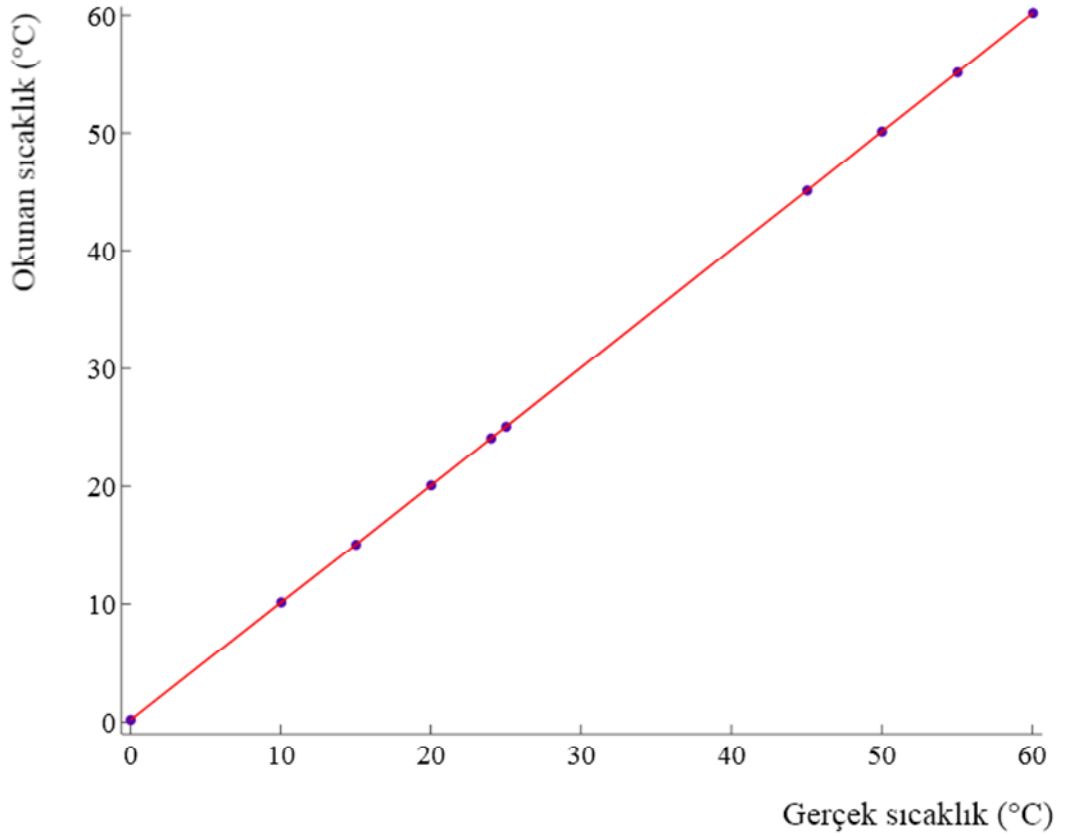
Eğri uyumu:

SSE: 0,006685

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,03338



Şekil EK III.9 C109 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C110

% 95 güven aralığında C110 fonksiyonu:

$$f(x) = -2,13E-06 x^3 - 5,63E-05 x^2 + 1,01 x - 0,0142$$

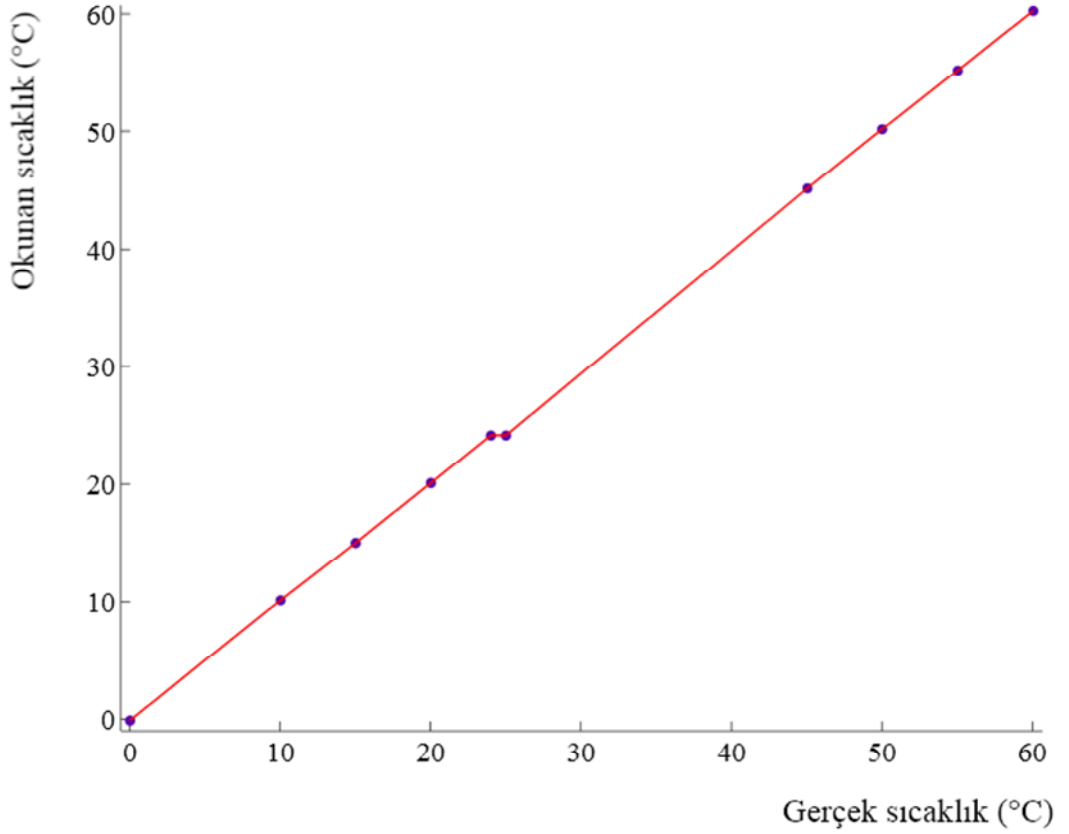
Eğri uyumu:

SSE: 0,7668

R^2 : 0,9998

Ayarlanmış R^2 : 0,9997

RMSE: 0,3575



Şekil EK III.10 C110 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C111

% 95 güven aralığında C111 fonksiyonu:

$$f(x) = -9,63E-06 x^3 + 0,00103 x^2 + 0,965 x + 0,234$$

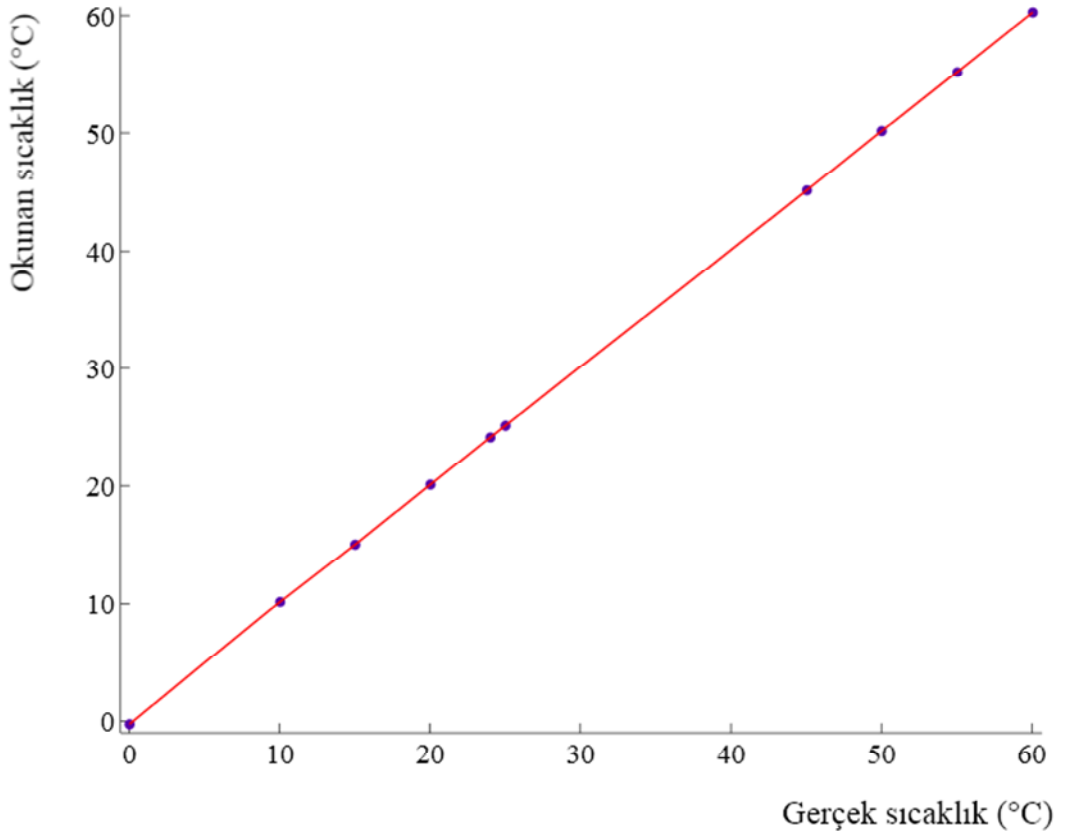
Eğri uyumu:

SSE: 0,01745

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05393



Şekil EK III.11 C111 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C112

% 95 güven aralığında C112 fonksiyonu:

$$f(x) = -1,12E-05 x^3 + 0,00122 x^2 + 0,958 x - 0,349$$

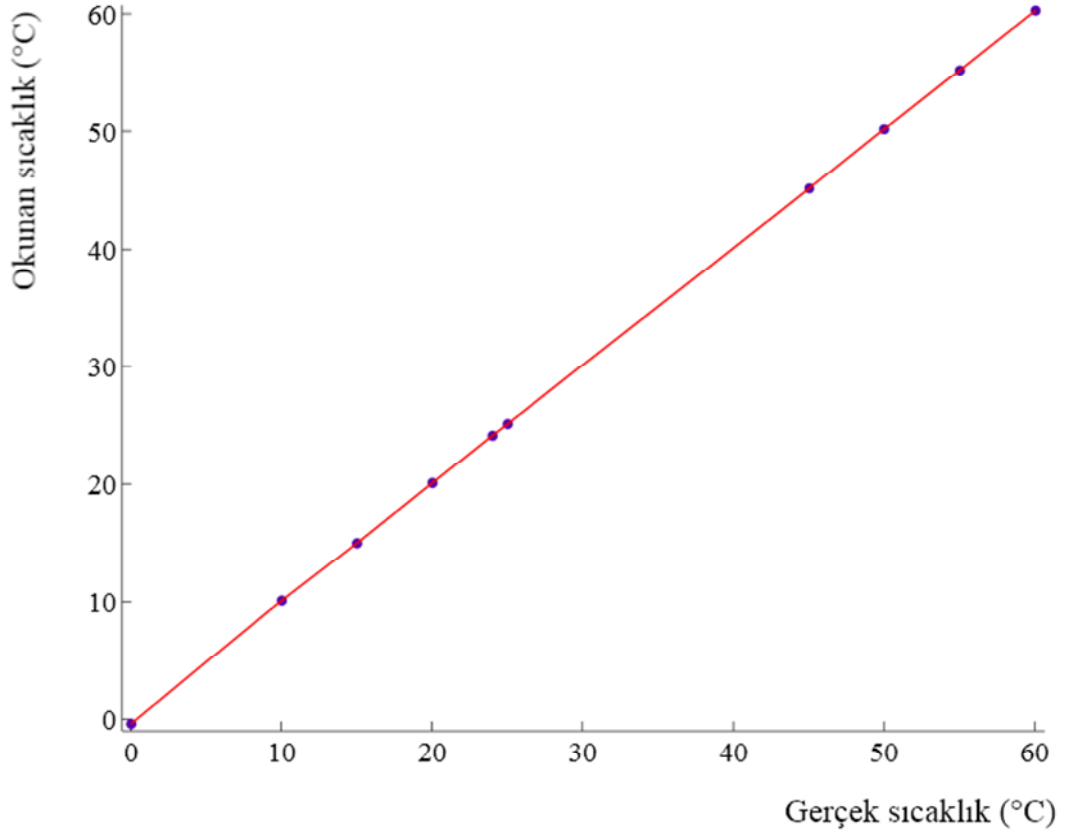
Eğri uyumu:

SSE: 0,02214

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,06074



Şekil EK III.12 C112 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C113

% 95 güven aralığında C113 fonksiyonu:

$$f(x) = -8,91E-06 x^3 + 0,000966 x^2 + 0,967 x + 0,27$$

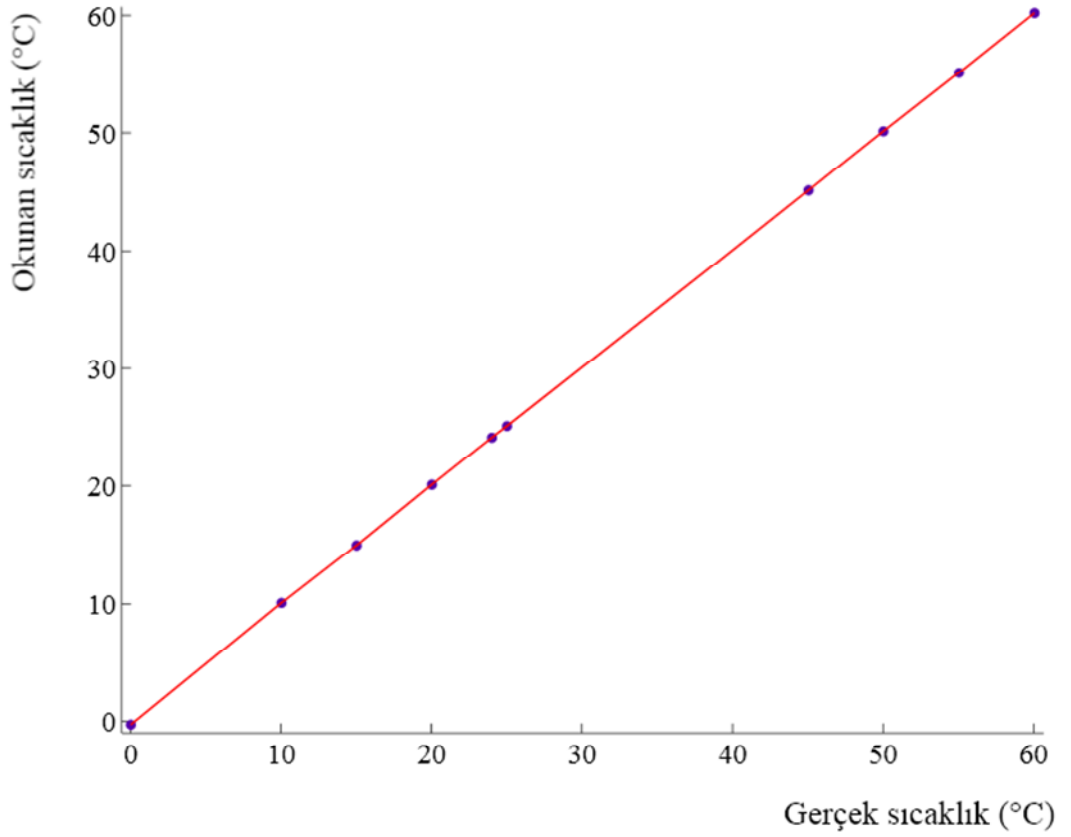
Eğri uyumu:

SSE: 0,01542

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,05069



Şekil EK III.13 C113 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C114

% 95 güven aralığında C114 fonksiyonu:

$$f(x) = -1,17E-05 x^3 - 0,00127 x^2 + 0,954 x + 0,371$$

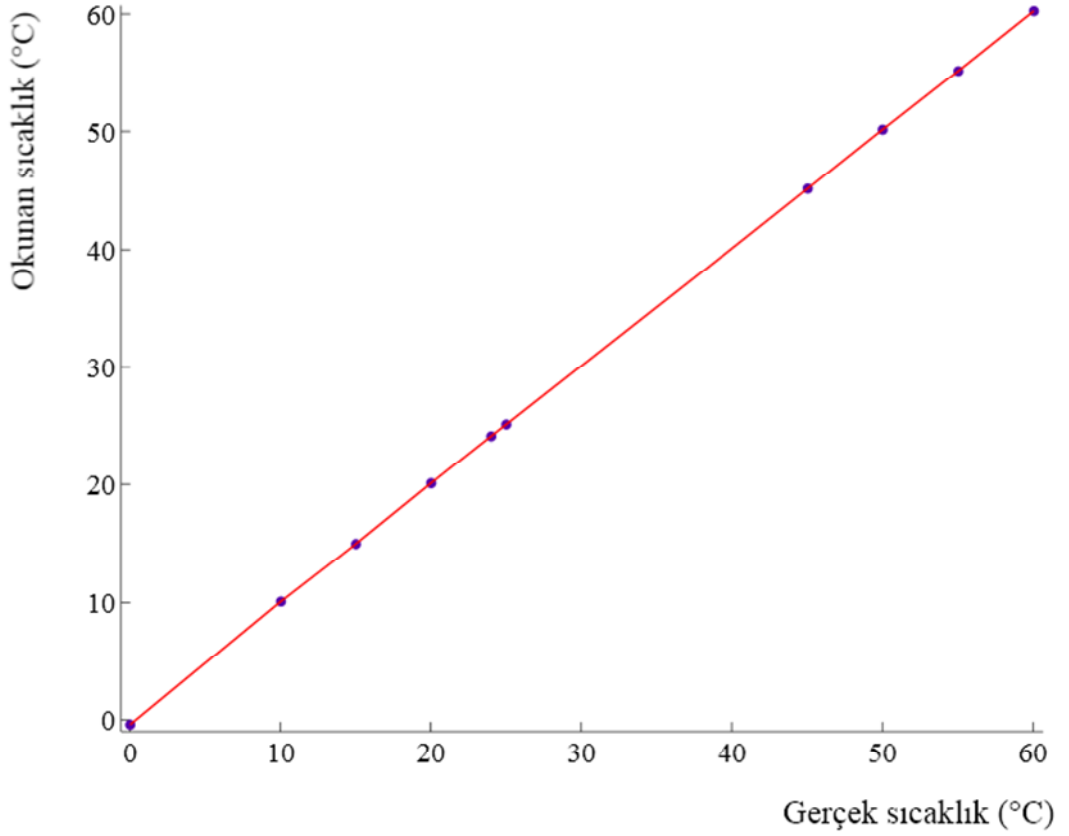
Eğri uyumu:

SSE: 0,02127

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05954



Şekil EK III.14 C114 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C115

% 95 güven aralığında C115 fonksiyonu:

$$f(x) = -1,04E-05 x^3 - 0,00115 x^2 + 0,96 x + 0,335$$

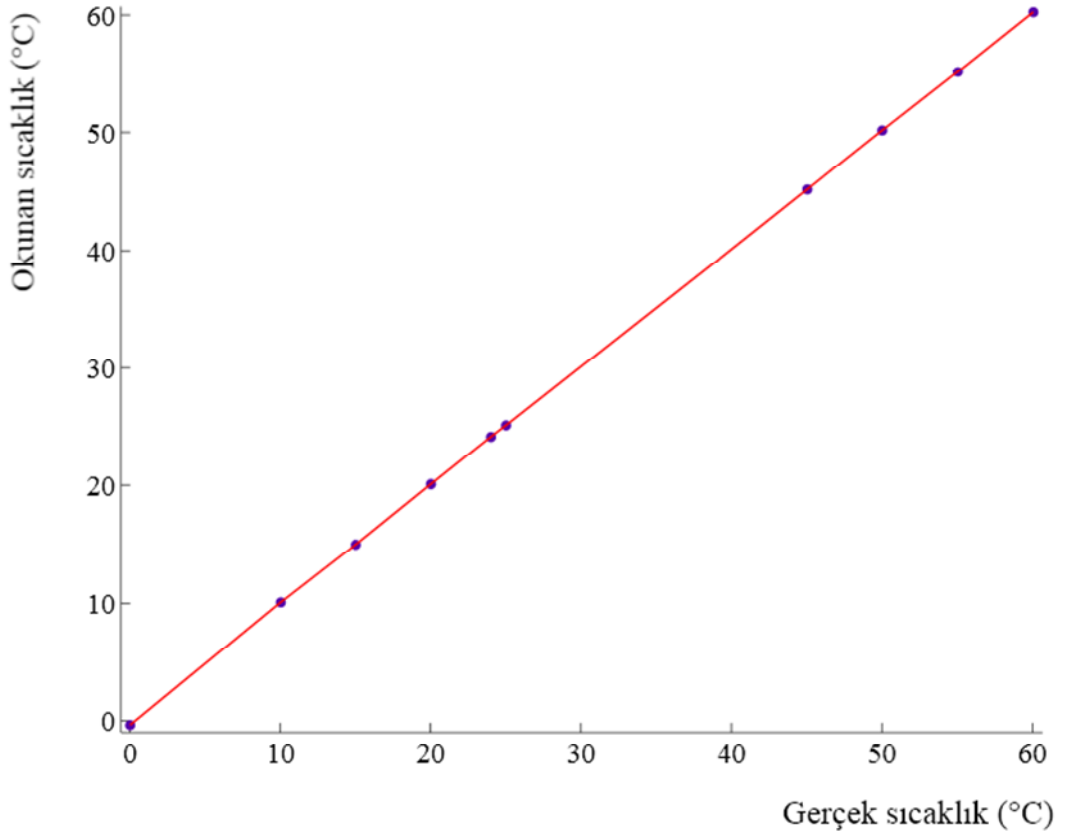
Eğri uyumu:

SSE: 0,01587

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,05144



Şekil EK III.15 C115 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C116

% 95 güven aralığında C116 fonksiyonu:

$$f(x) = -2,95E-06 x^3 - 0,000283 x^2 + 0,99 x + 0,113$$

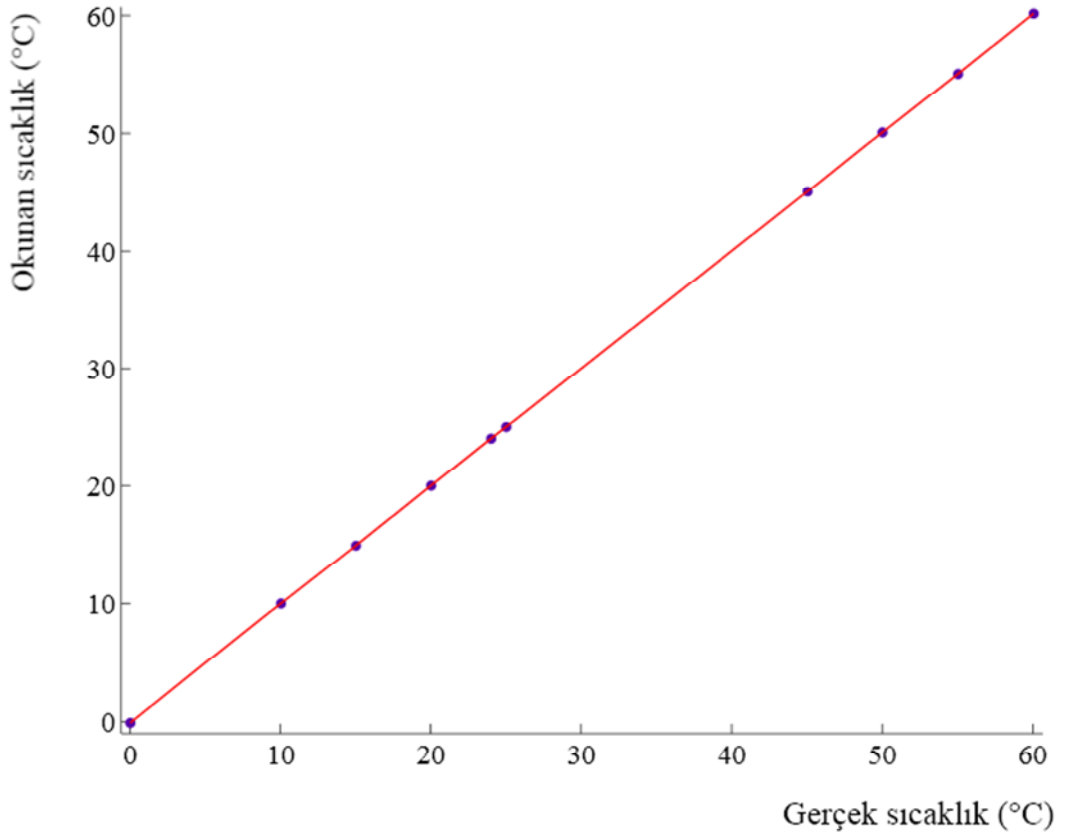
Eğri uyumu:

SSE: 0,00806

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,03665



Şekil EK III.16 C116 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C117

% 95 güven aralığında C117 fonksiyonu:

$$f(x) = 7,1E-07 x^3 - 0,000136 x^2 + 1,0 x + 0,0578$$

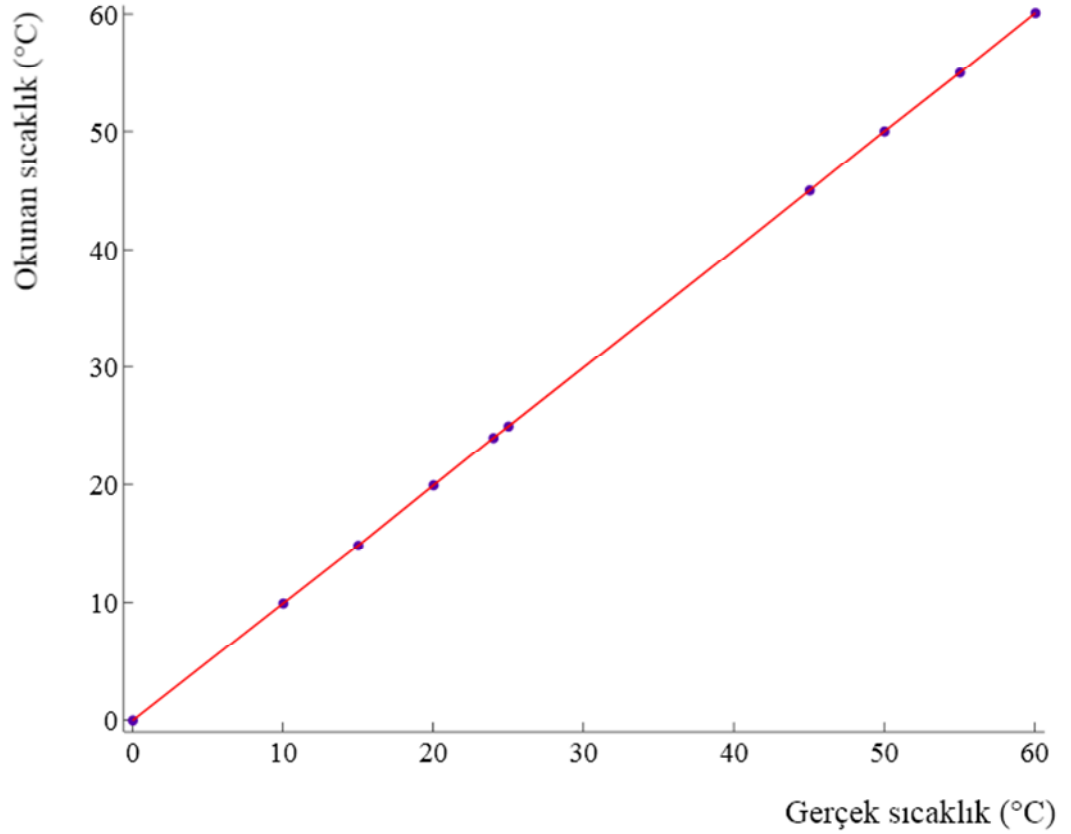
Eğri uyumu:

SSE: 0,008372

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,03735



Şekil EK III.17 C117 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C118

% 95 güven aralığında C118 fonksiyonu:

$$f(x) = -4,55E-06 x^3 + 0,000416 x^2 + 0,988 x - 0,354$$

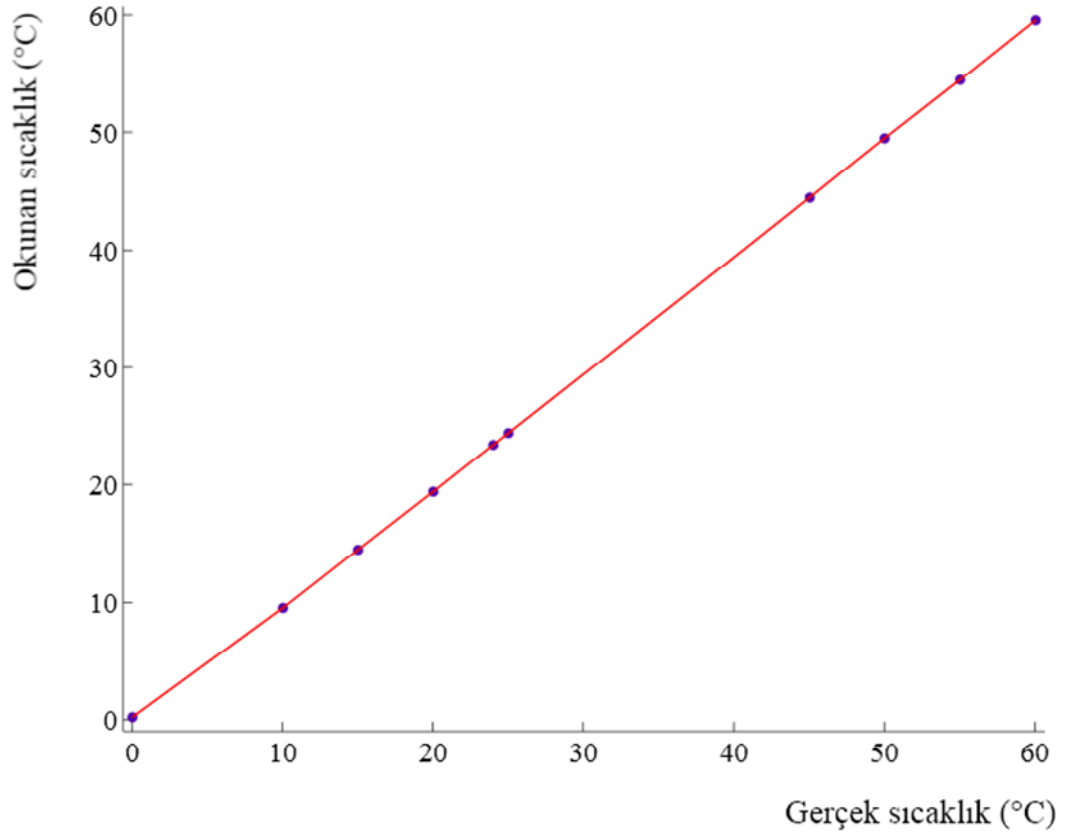
Eğri uyumu:

SSE: 0,00491

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,02861



Şekil EK III.18 C118 ısıtıcı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C119

% 95 güven aralığında C119 fonksiyonu:

$$f(x) = -3,75E-06 x^3 + 0,000277 x^2 + 0,995 x + 0,452$$

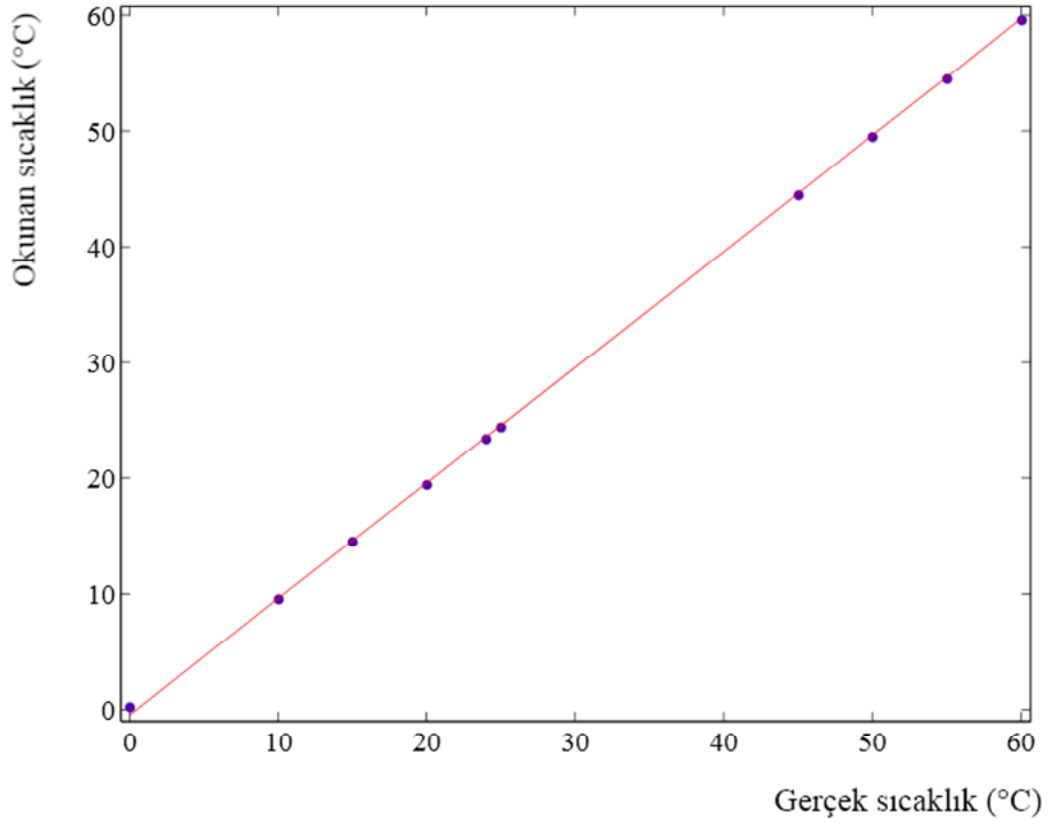
Eğri uyumu:

SSE: 0,004554

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,02755



Şekil EK III.19 C119 ısılı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C120

% 95 güven aralığında C120 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,56E-05 x^3 - 0,00195 x^2 + 1,07 x - 0,172$$

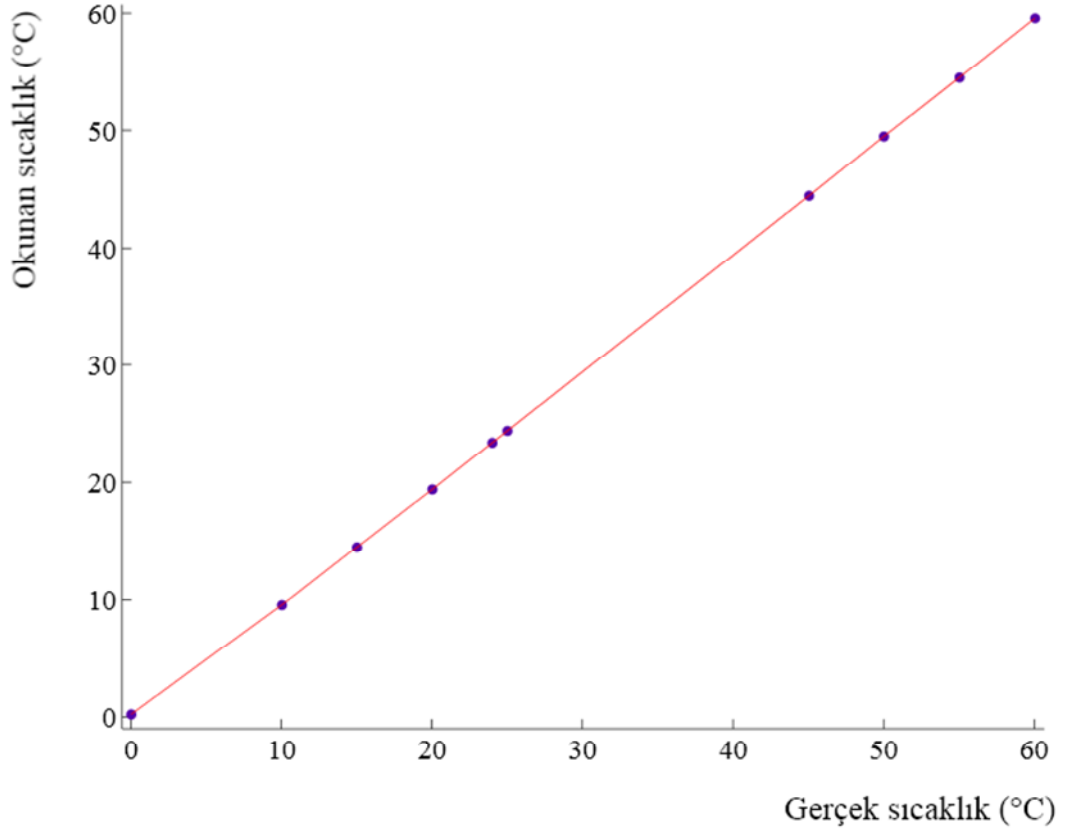
Eğri uyumu:

SSE: 0,02148

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05983



Şekil EK III.20 C120 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C201

% 95 güven aralığında C201 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,83E-05 x^3 - 0,00218 x^2 + 1,08 x - 2,98$$

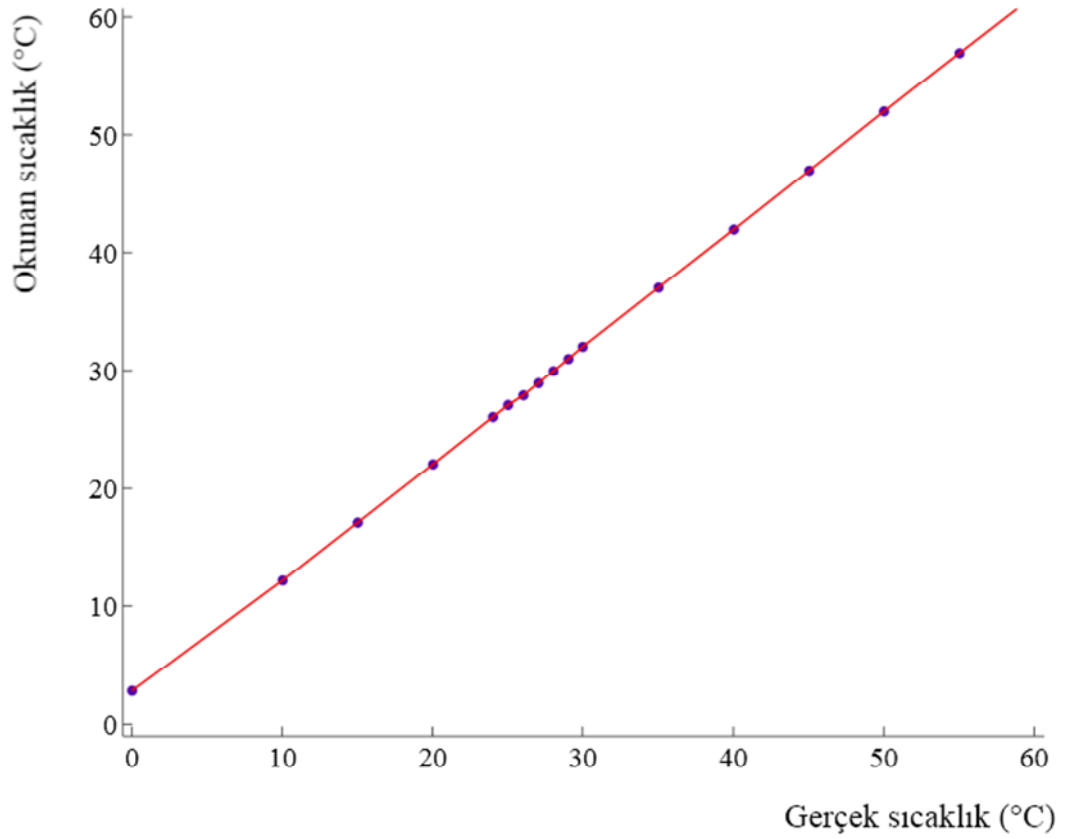
Eğri uyumu:

SSE: 0,05853

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,0671



Şekil EK III.21 C201 ısı direncin kalibrasyon eğrisi

C202

% 95 güven aralığında C202 fonksiyonu:

$$f(x) = 2,21E-05 x^3 + 0,00248 x^2 + 1,09 x - 3,2$$

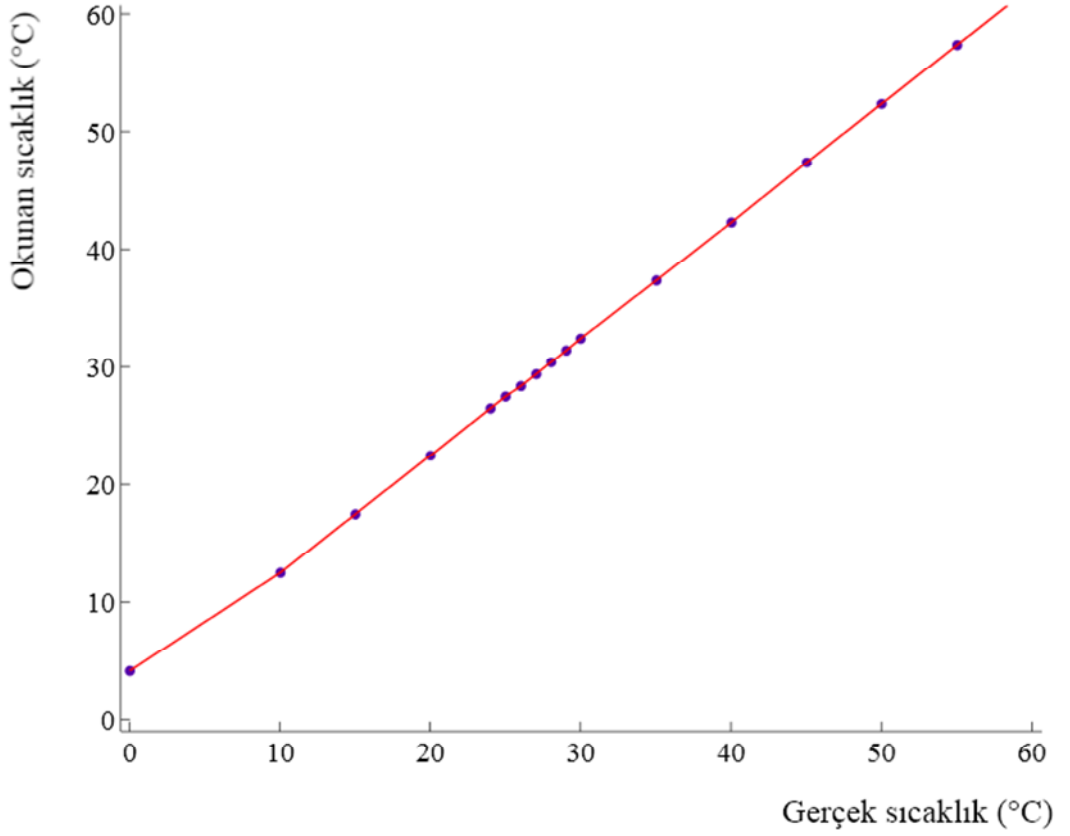
Eğri uyumu:

SSE: 0,305

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,1532



Şekil EK III.22 C202 ısı direncin kalibrasyon eğrisi

C203

% 95 güven aralığında C203 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,98E-05 x^3 - 0,00232 x^2 + 1,08 x - 3,1$$

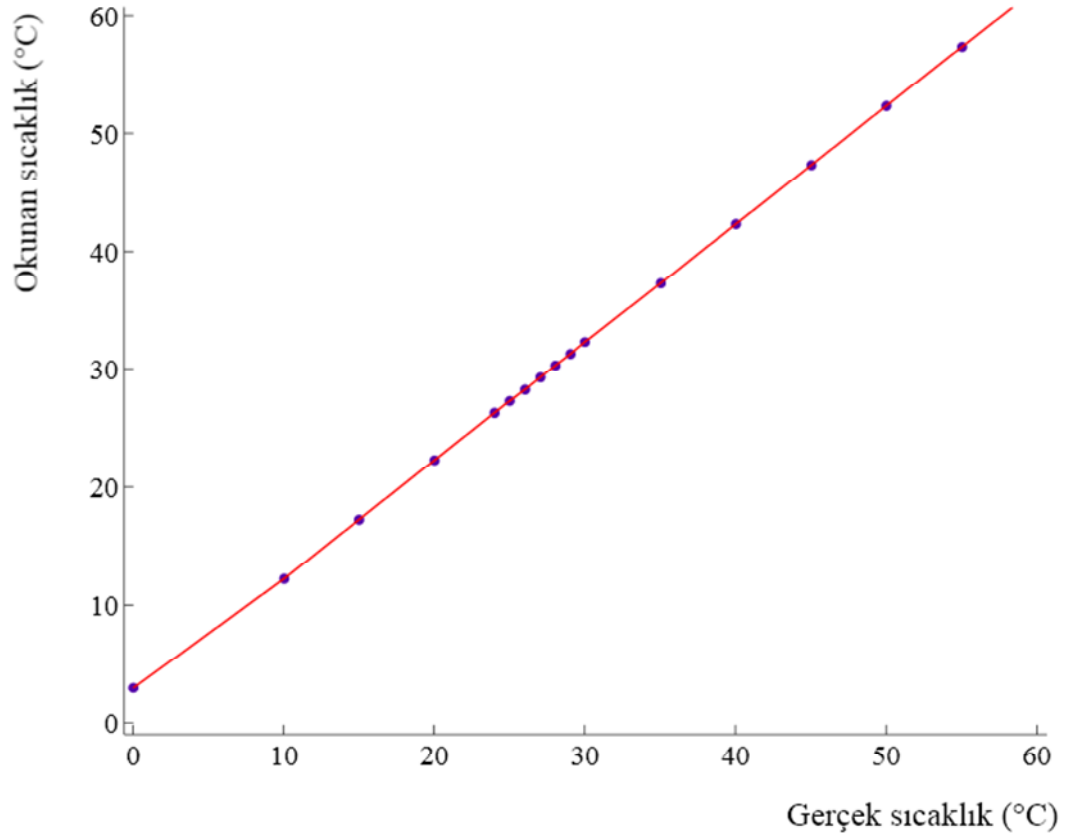
Eğri uyumu:

SSE: 0,07012

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,07344



Şekil EK III.23 C203 ısıl direncin kalibrasyon eğrisi

C204

% 95 güven aralığında C204 fonksiyonu:

$$f(x) = 4,03E-05 x^3 - 0,0049 x^2 + 1,19 x - 4,58$$

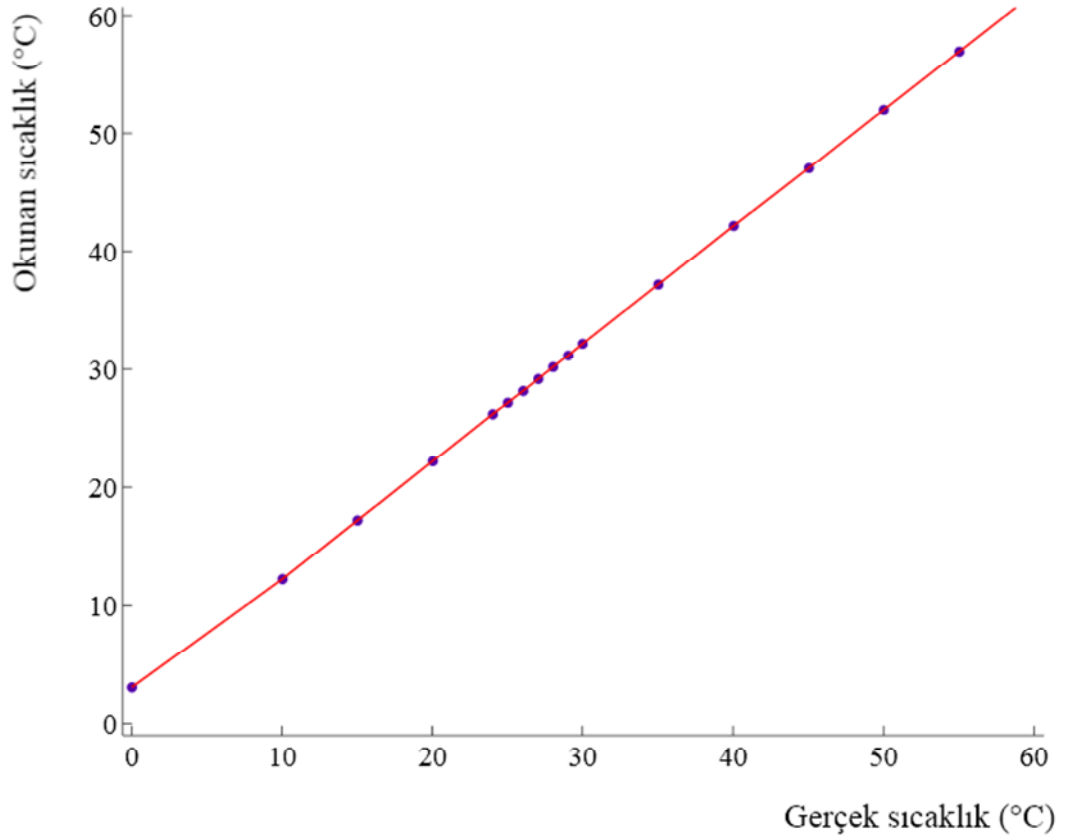
Eğri uyumu:

SSE: 0,08937

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,08292



Şekil EK III.24 C204 ısıl direncin kalibrasyon eğrisi

C205

% 95 güven aralığında C205 fonksiyonu:

$$f(x) = -2,64E-05 x^3 + 0,0028 x^2 + 0,911 x - 0,906$$

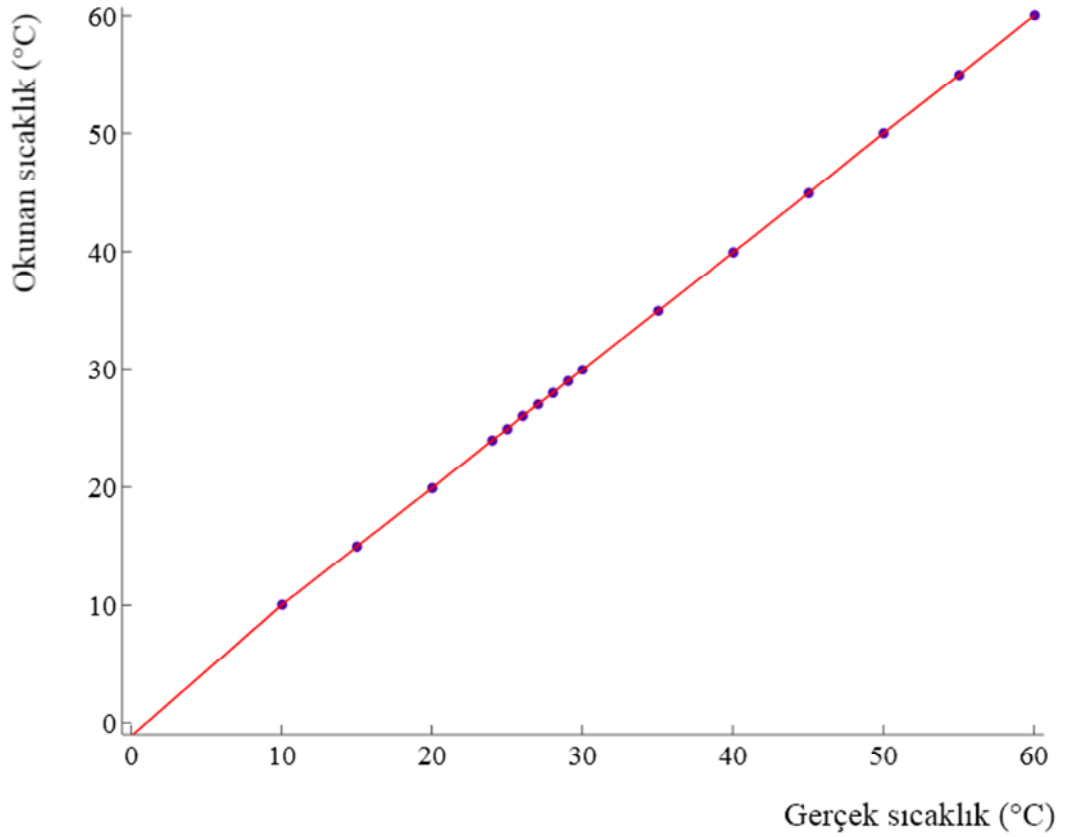
Eğri uyumu:

SSE: 0,1989

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,1237



Şekil EK III.25 C205 ısıtıcı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C206

% 95 güven aralığında C206 fonksiyonu:

$$f(x) = 6,30E-06 x^3 - 0,000785 x^2 + 1,03 x - 0,265$$

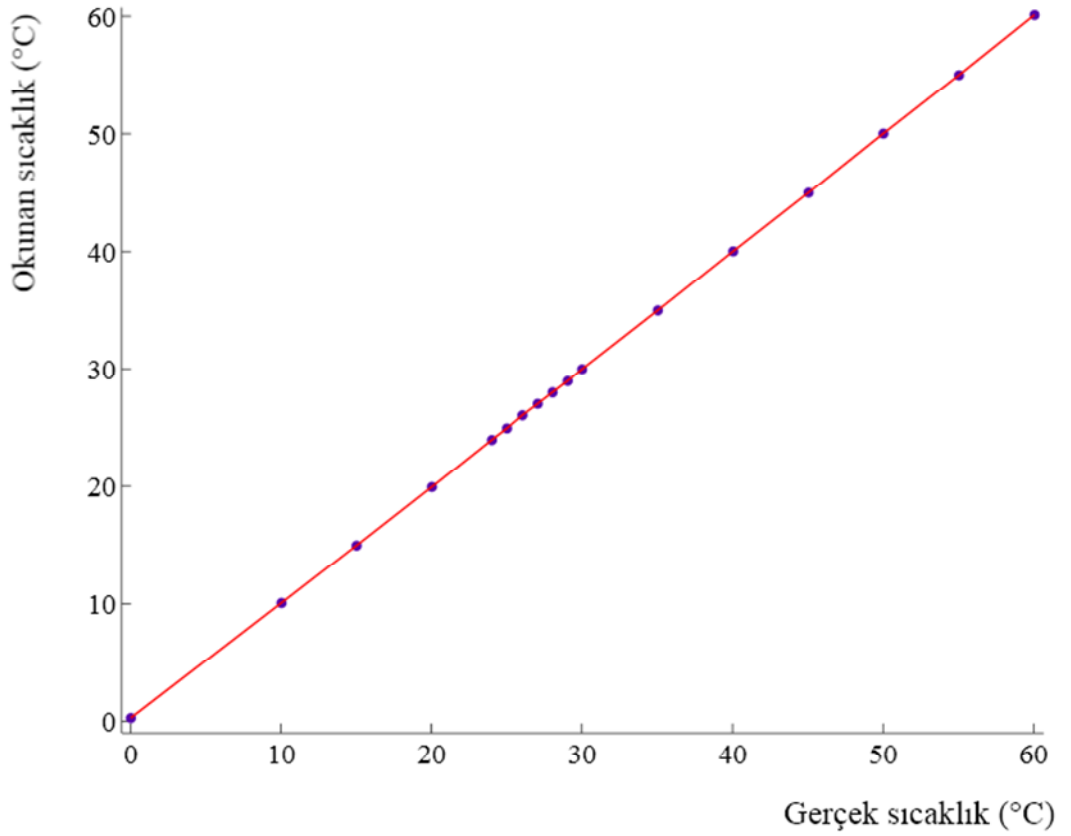
Eğri uyumu:

SSE: 0,02024

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,03946



Şekil EK III.26 C206 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C207

% 95 güven aralığında C207 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,38E-05 x^3 - 0,00167 x^2 + 1,06 x - 0,427$$

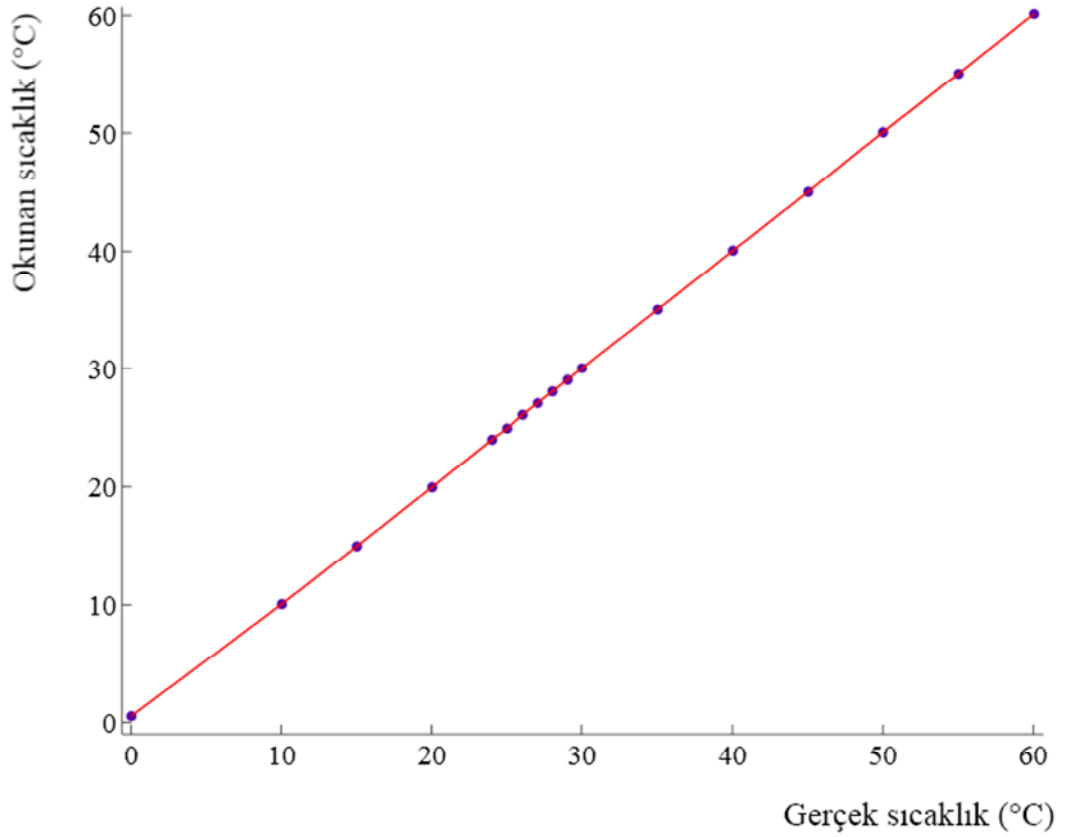
Eğri uyumu:

SSE: 0,05531

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,06523



Şekil EK III.27 C207 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C208

% 95 güven aralığında C208 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,52E-05 x^3 - 0,00167 x^2 + 1,06 x - 0,5978$$

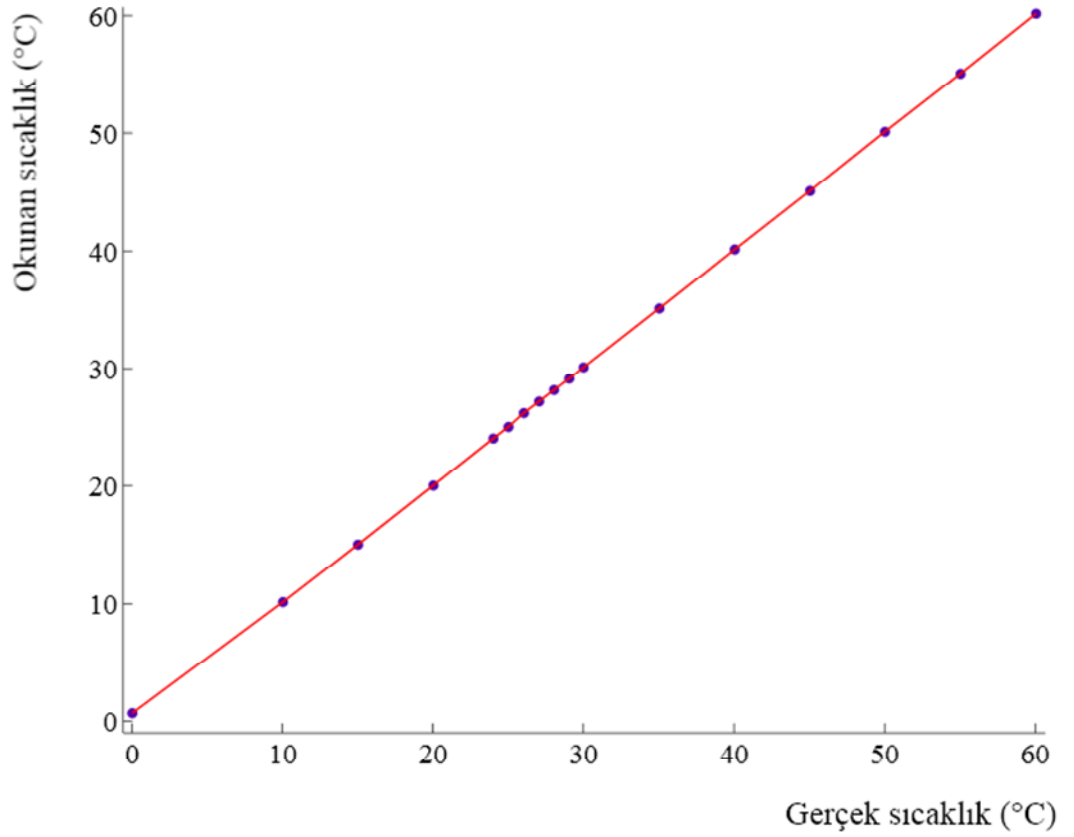
Eğri uyumu:

SSE: 0,08247

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,07965



Şekil EK III.28 C208 ısıtıcı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C209

% 95 güven aralığında C209 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,45E-05 x^3 - 0,00156 x^2 + 1,05 x - 0,329$$

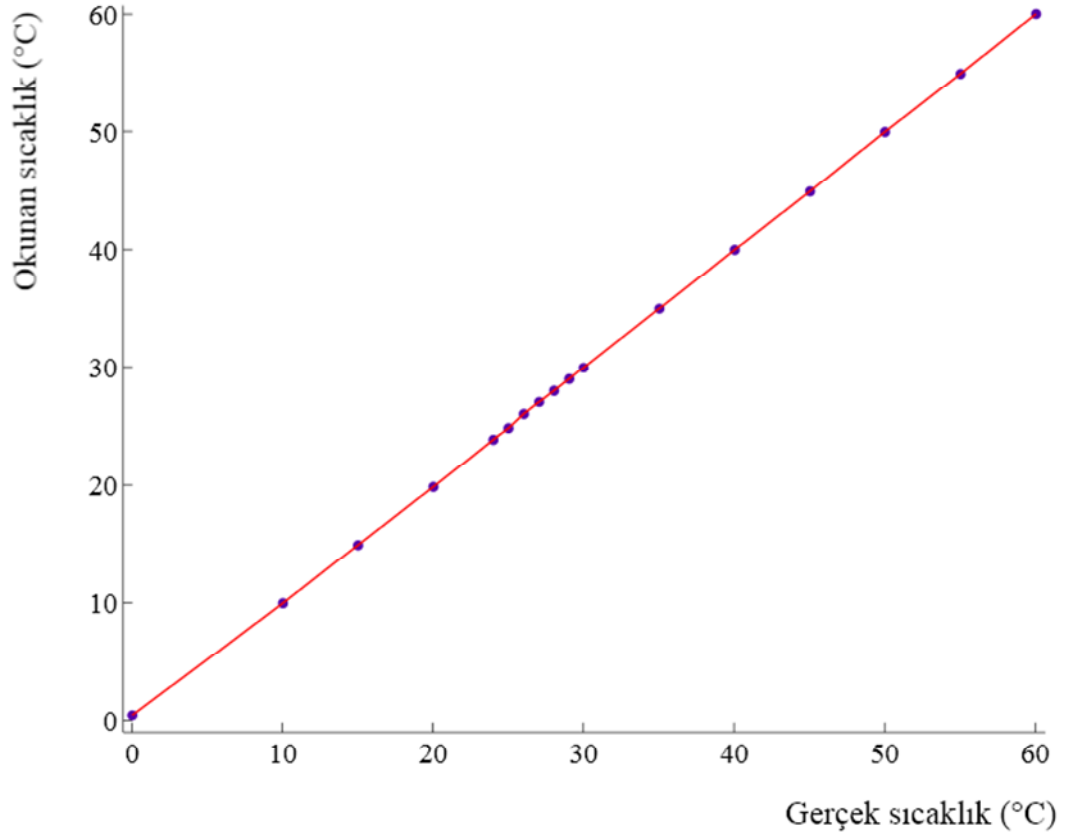
Eğri uyumu:

SSE: 0,08124

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,07905



Şekil EK III.29 C209 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C210

% 95 güven aralığında C210 fonksiyonu:

$$f(x) = 9,23E-06 x^3 - 0,00104 x^2 + 1,03 x - 0,329$$

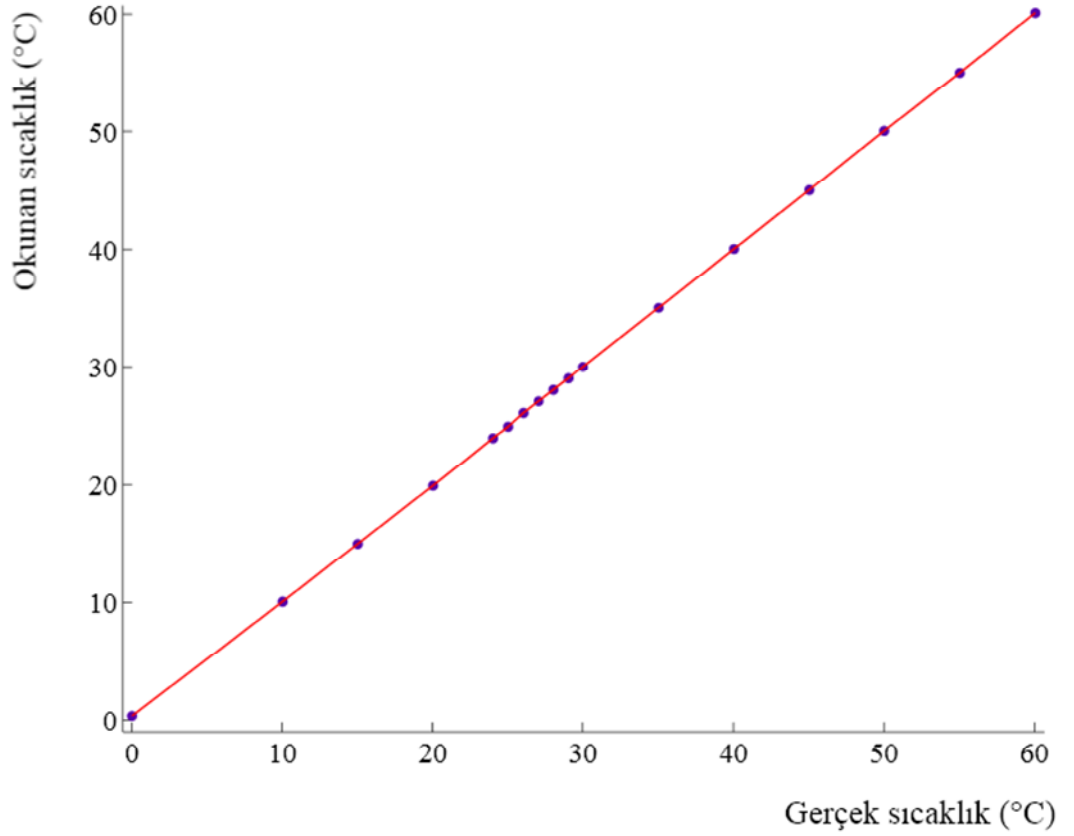
Eğri uyumu:

SSE: 0,04275

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05734



Şekil EK III.30 C210 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C211

% 95 güven aralığında C211 fonksiyonu:

$$f(x) = 6,92E-06 x^3 - 0,000831 x^2 + 1,03 x - 0,0261$$

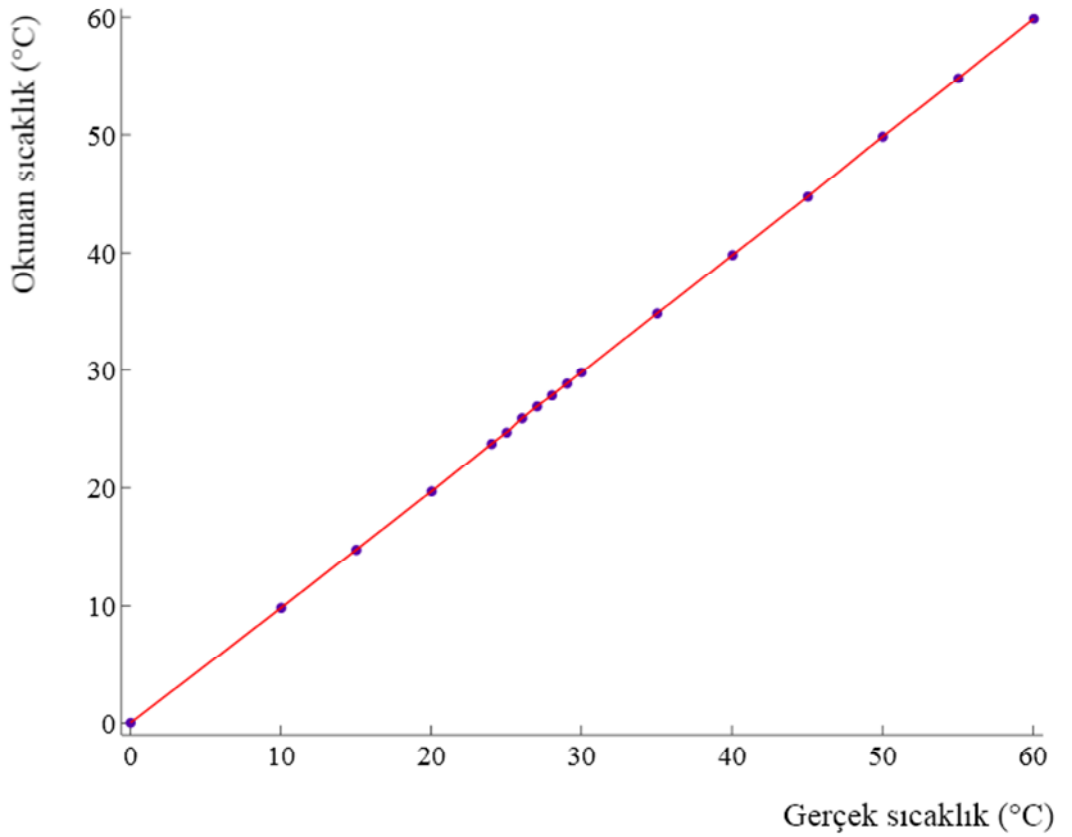
Eğri uyumu:

SSE: 0,05009

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,06207



Şekil EK III.31 C211 ısıl çiftinin kalibrasyon eğrisi

C212

% 95 güven aralığında C212 fonksiyonu:

$$f(x) = 7,25E-06 x^3 - 0,000831 x^2 + 1,03 x - 0,19$$

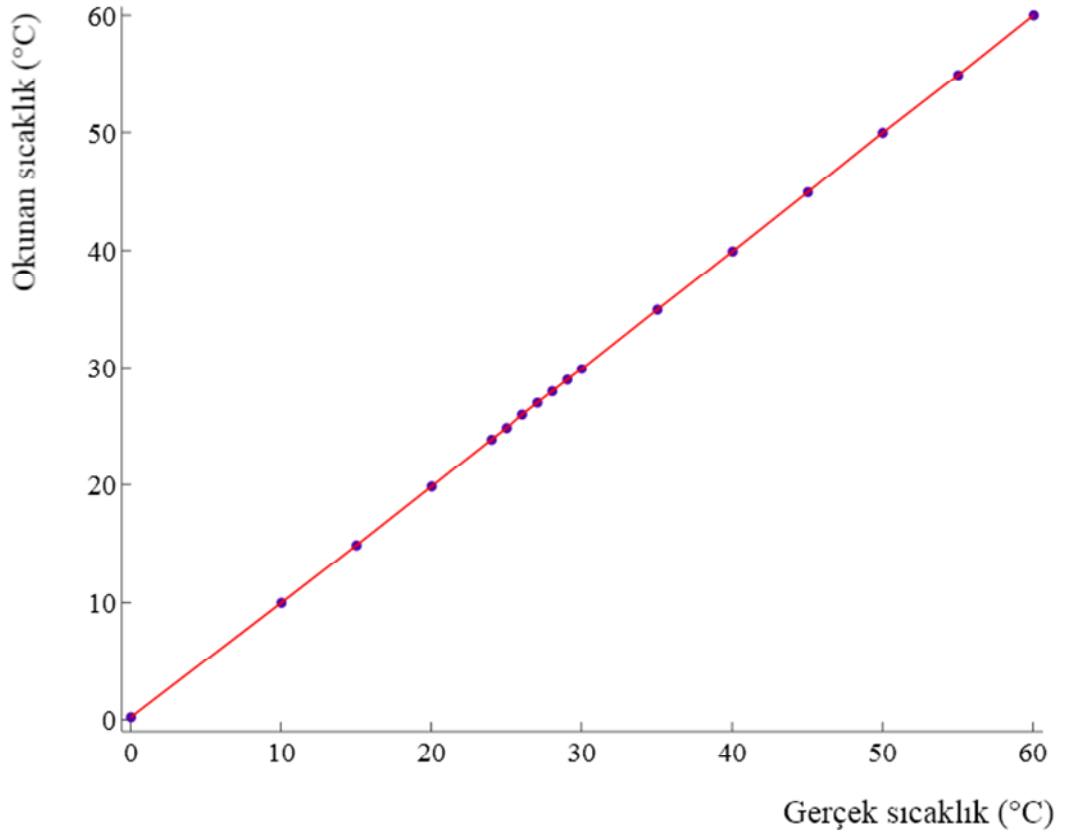
Eğri uyumu:

SSE: 0,03849

R²: 1

Ayarlanmış R²: 1

RMSE: 0,05441



Şekil EK III.32 C212 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C213

% 95 güven aralığında C213 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,46E-05 x^3 - 0,00168 x^2 + 1,06 x - 0,58$$

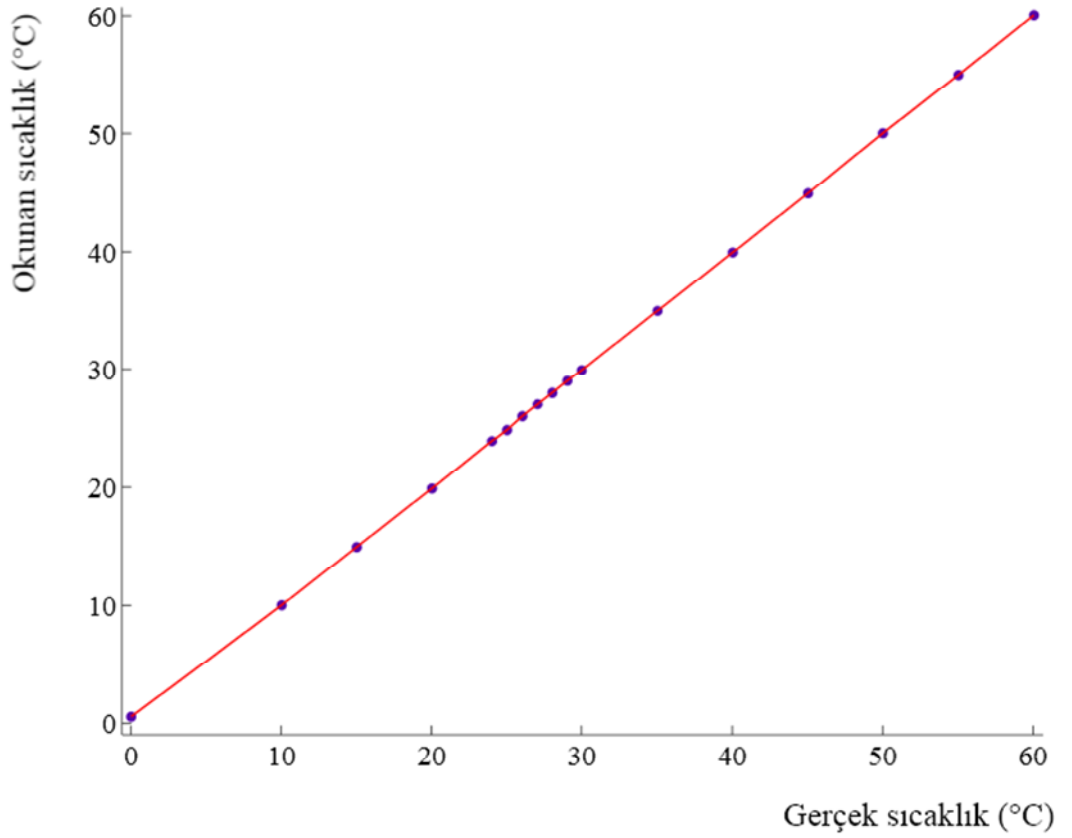
Eğri uyumu:

SSE: 0,05014

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,0621



Şekil EK III.33 C213 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C214

% 95 güven aralığında C214 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,19E-05 x^3 - 0,00147 x^2 + 1,06 x + 0,58$$

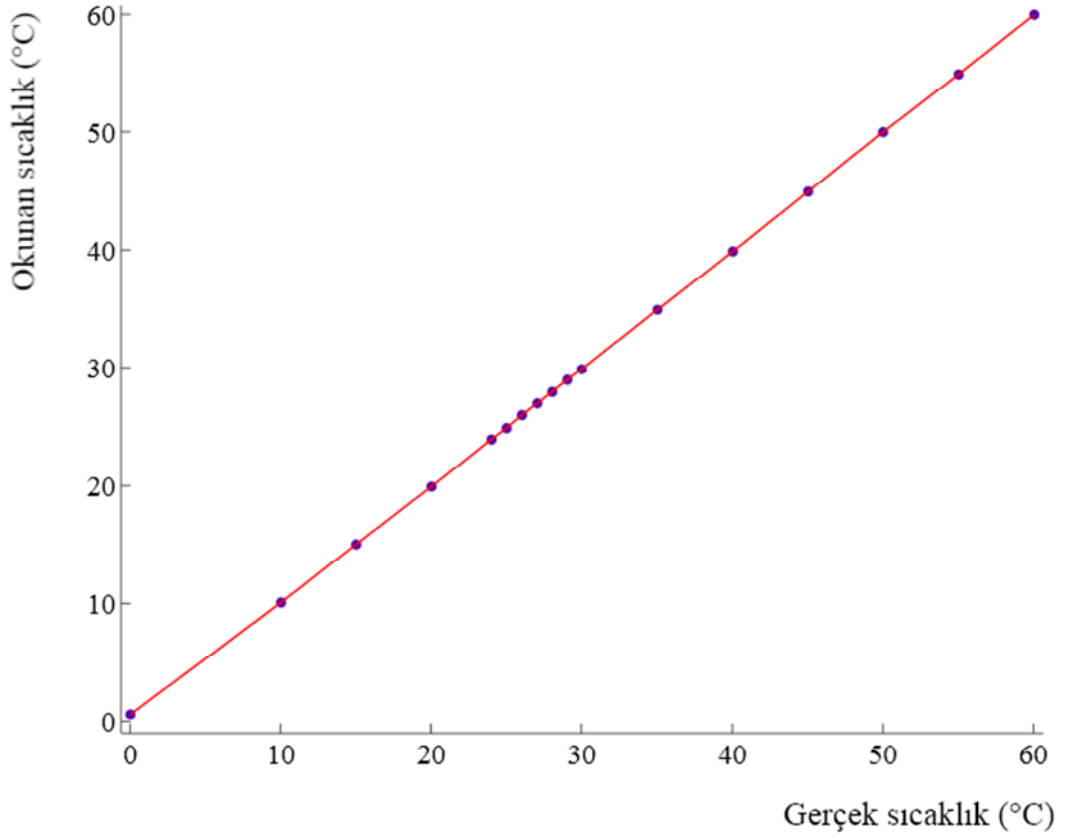
Eğri uyumu:

SSE: 0,02578

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,04454



Şekil EK III.34 C214 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C215

% 95 güven aralığında C215 fonksiyonu:

$$f(x) = -2,14E-05 x^3 + 0,00229 x^2 + 9,27 x - 0,815$$

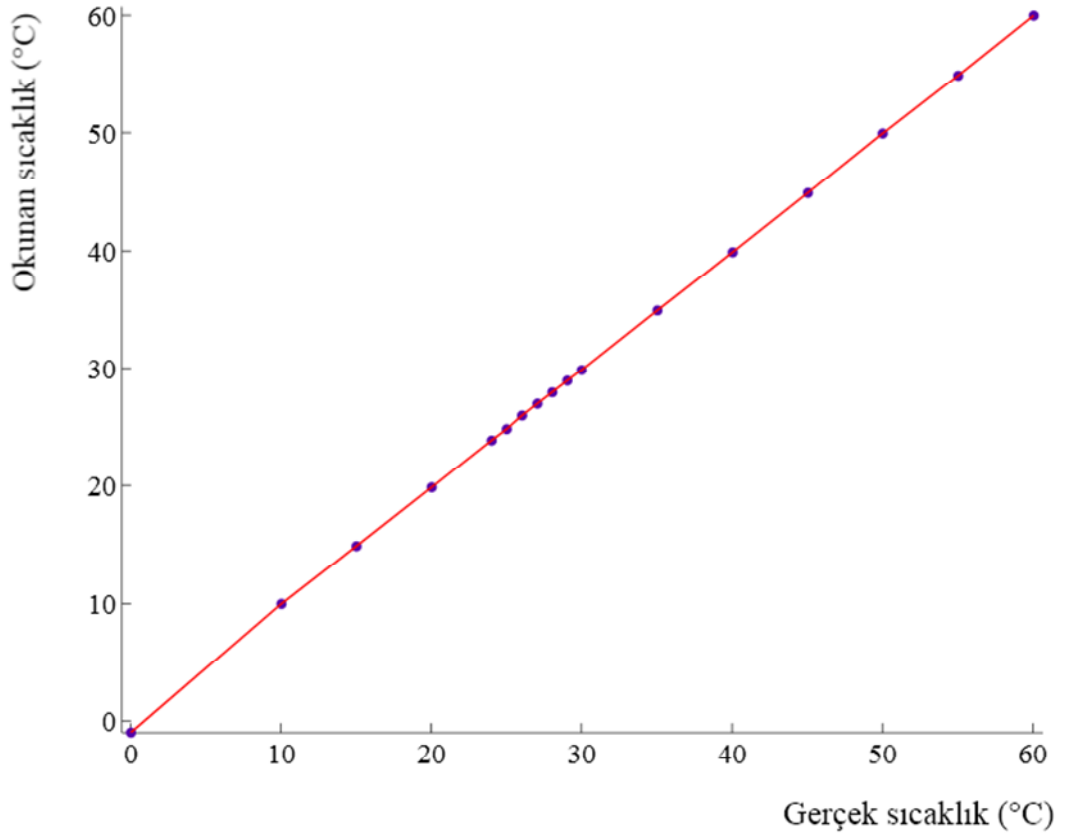
Eğri uyumu:

SSE: 0,1457

R^2 : 1

Ayarlanmış R^2 : 1

RMSE: 0,1059



Şekil EK III.35 C215 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

C216

% 95 güven aralığında C216 fonksiyonu:

$$f(x) = 1,49E-05 x^3 - 0,00233 x^2 + 1,11 x - 1,36$$

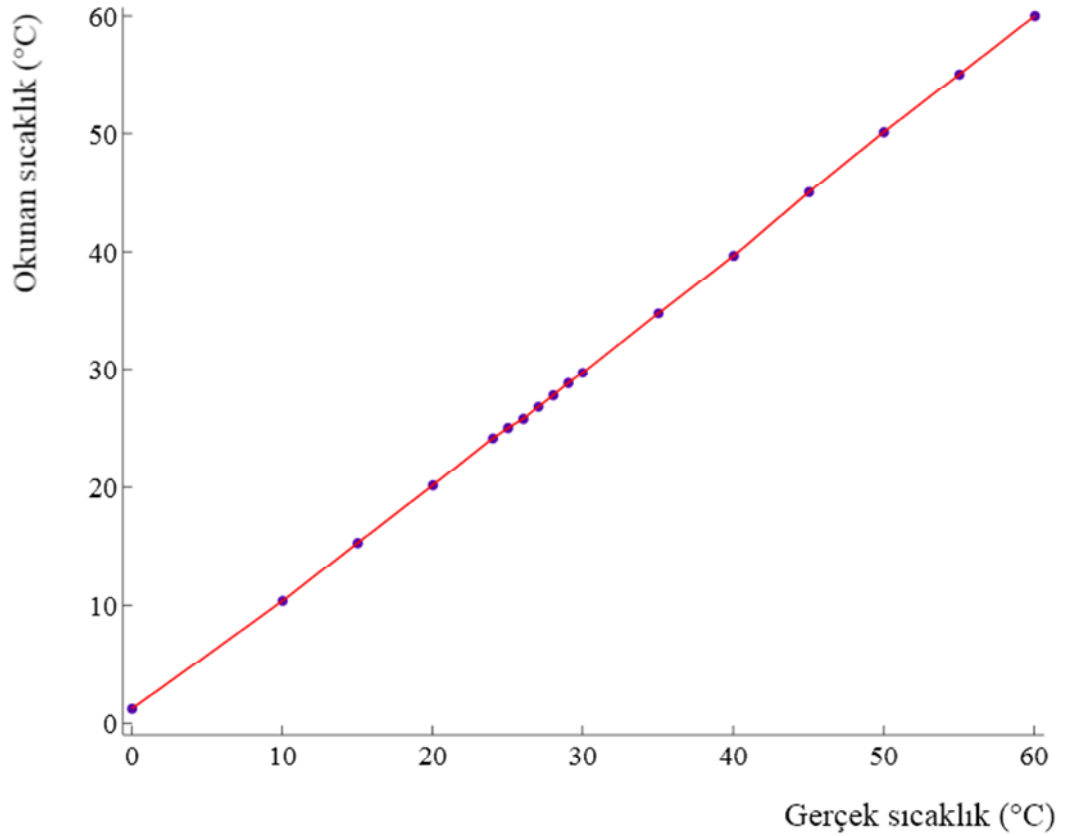
Eğri uyumu:

SSE: 0,2599

R^2 : 0,9999

Ayarlanmış R^2 : 0,9999

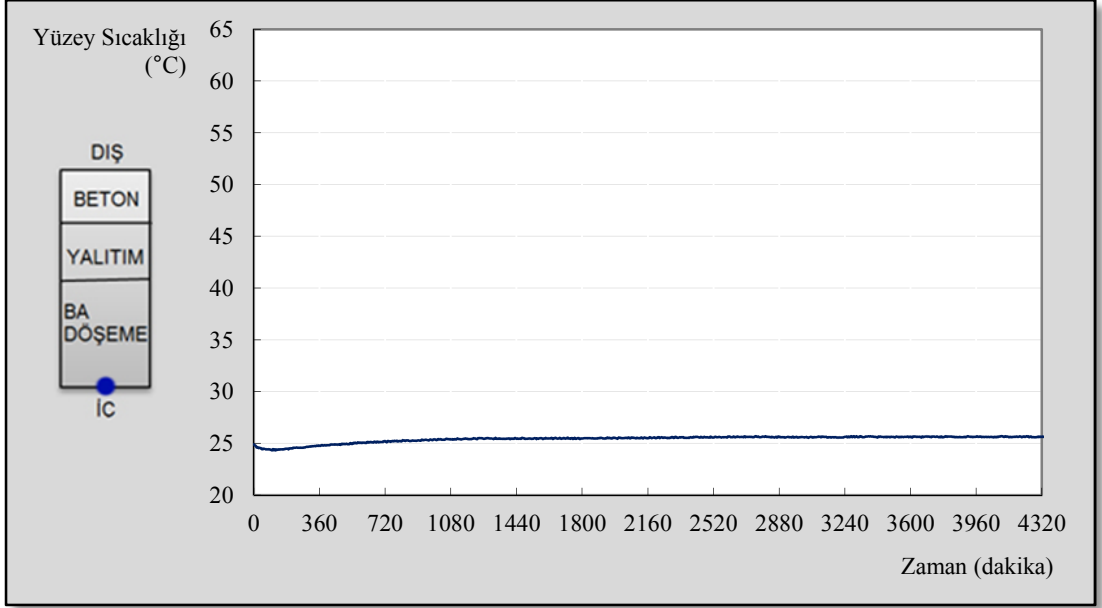
RMSE: 0,1414



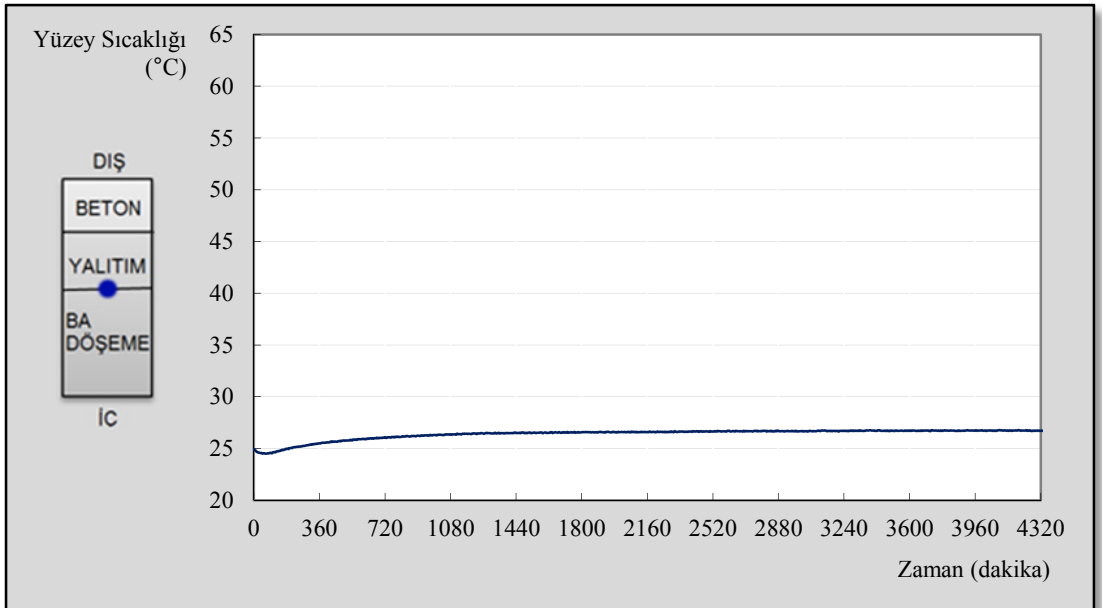
Şekil EK III.36 C216 ısı çiftinin kalibrasyon eğrisi

EK IV Deneysel Çalışma Grafikleri

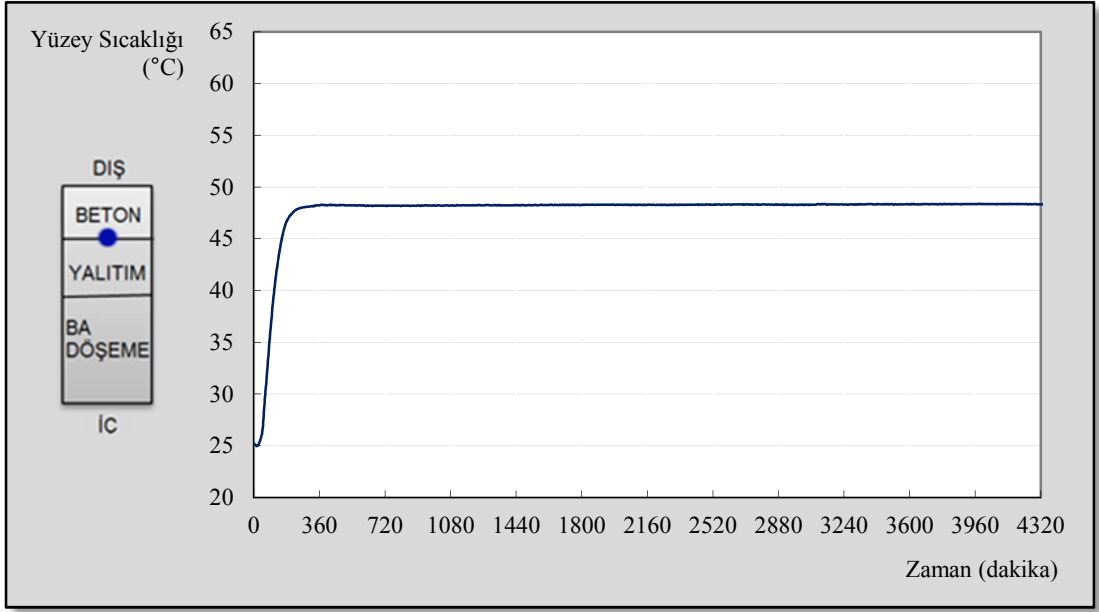
FDM'siz 1. Deney



Şekil EK IV. 1 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 1. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV.2 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (FDM'siz 1. deneyde ölçülen)

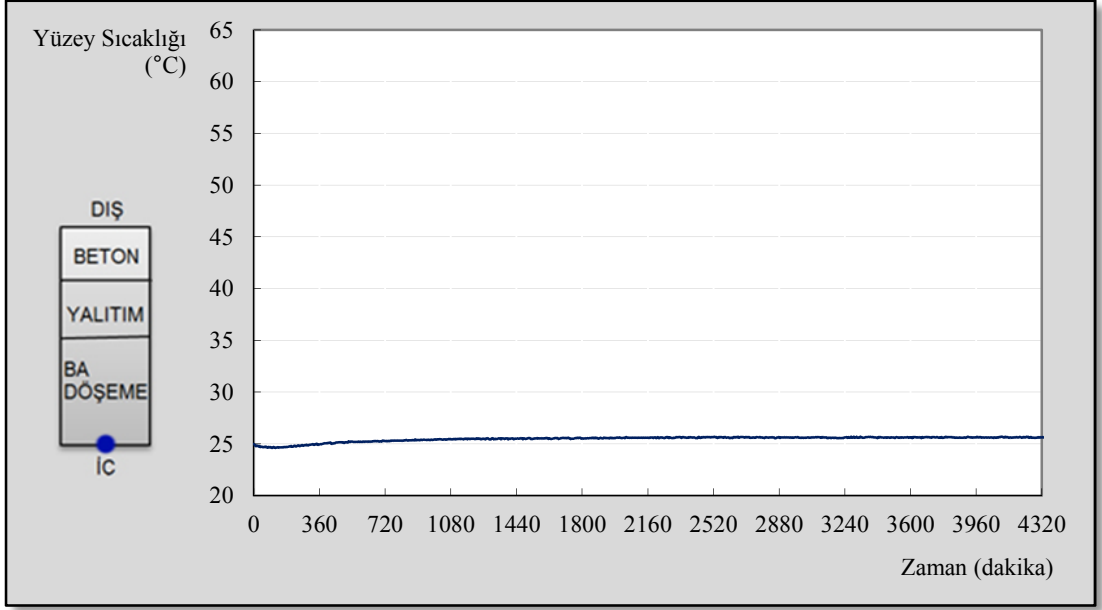


Şekil EK IV. 3 XPS – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (FDM’siz 1. deneyde ölçülen)

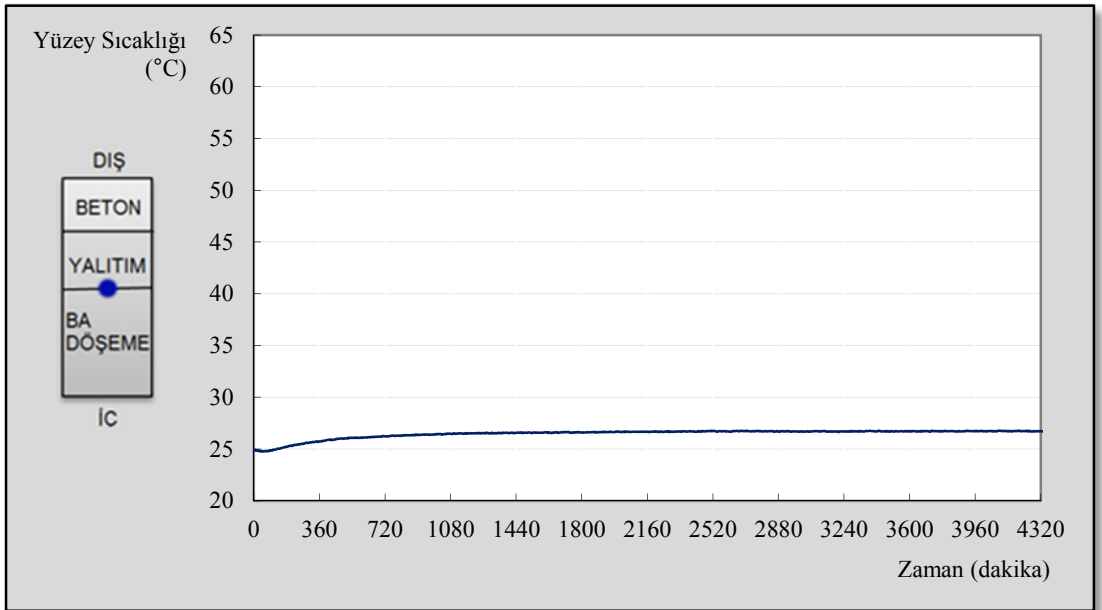


Şekil EK IV. 4 Üst yüzeý sıcaklık ortalamaları (FDM’siz 1. deneyde ölçülen)

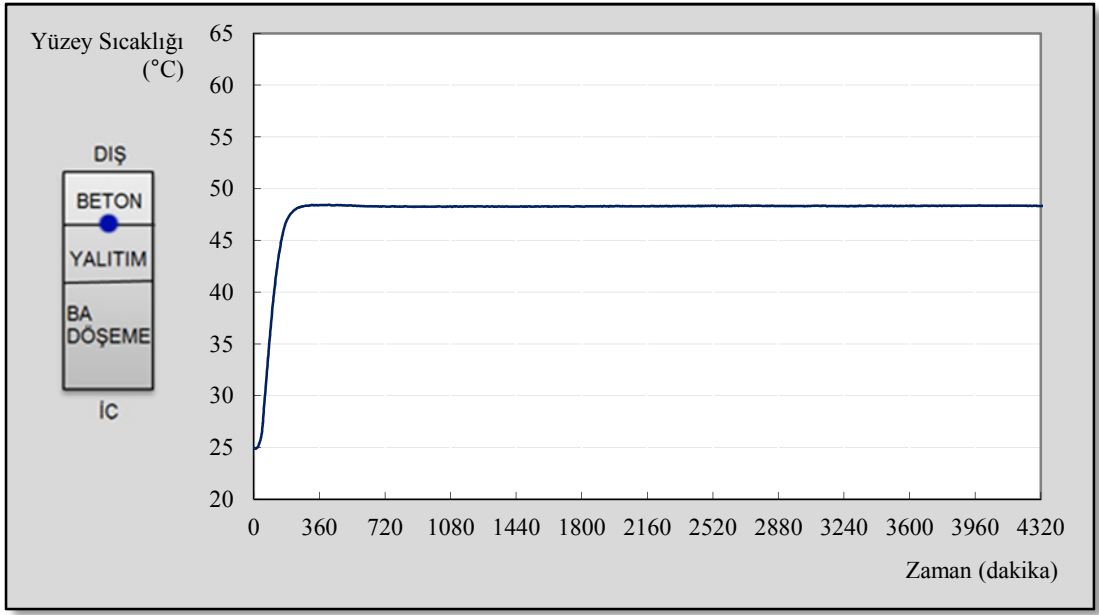
FDM'siz 2. Deney



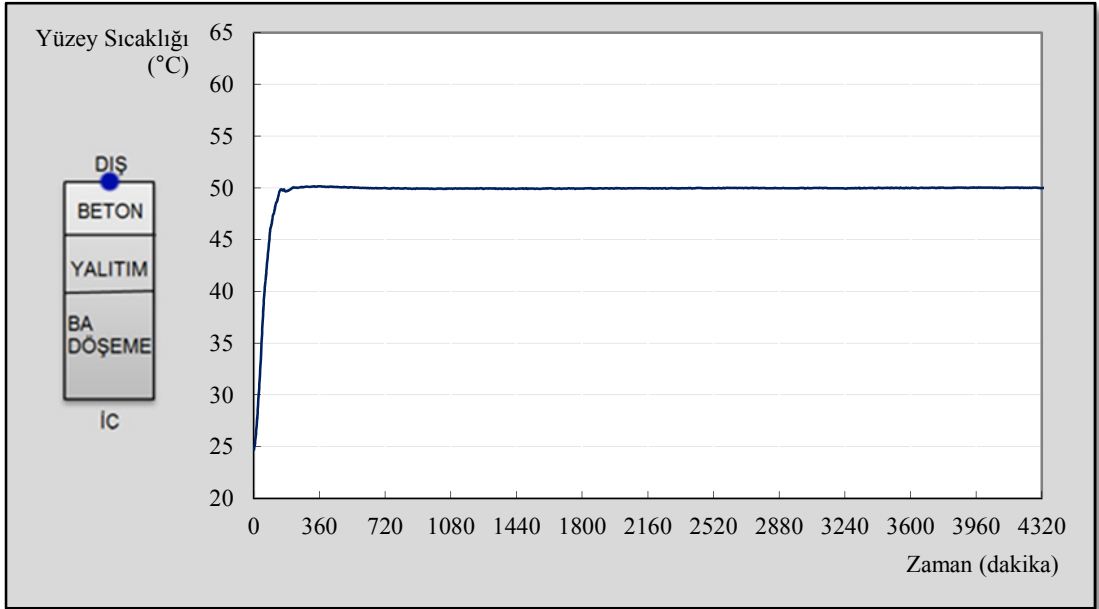
Şekil EK IV. 5 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)



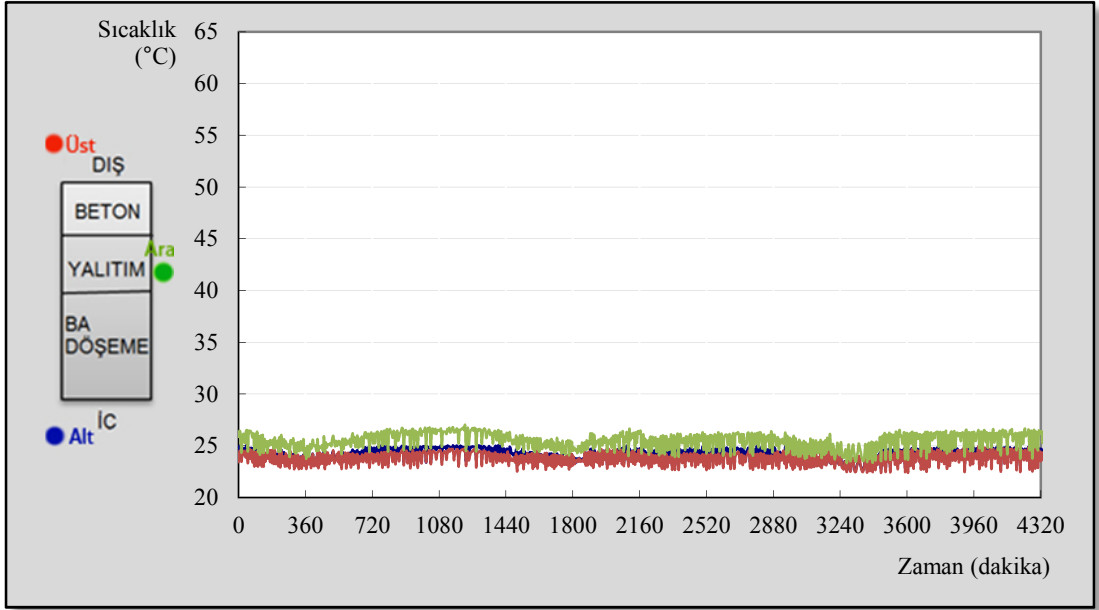
Şekil EK IV. 6 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)



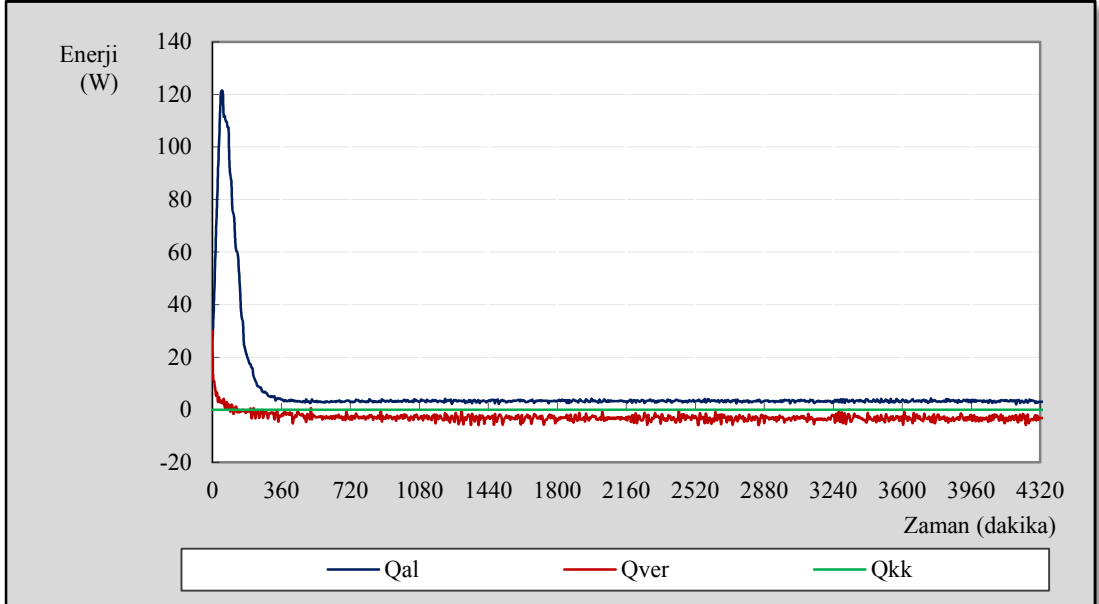
Şekil EK IV. 7 XPS – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 8 Üst yüzey sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)

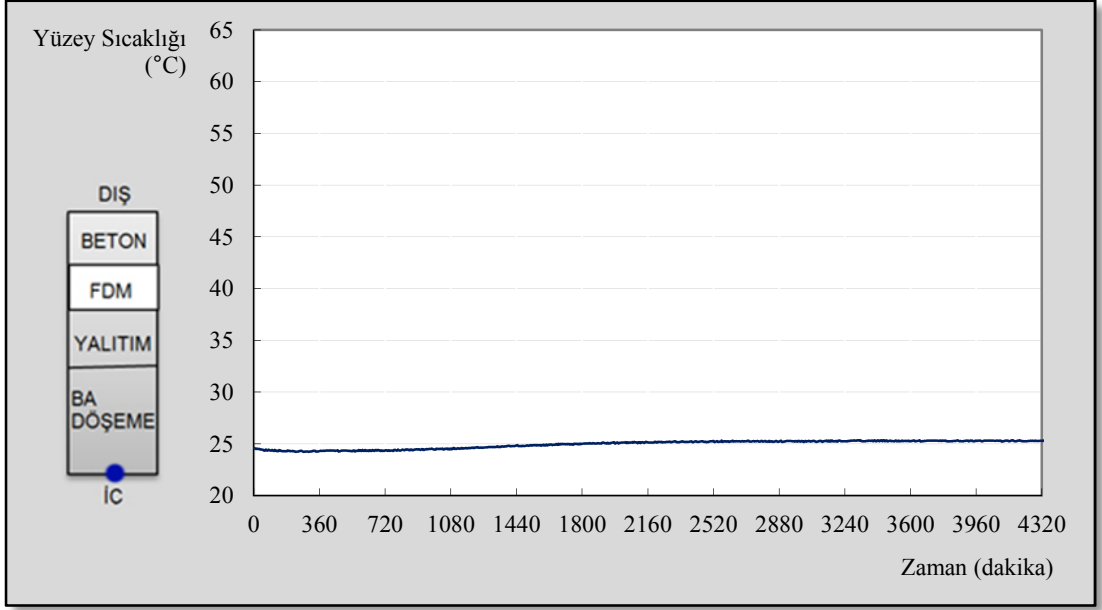


Şekil EK IV. 9 Ortamdan alınan sıcaklıklar (FDM'siz 2. deneyde ölçülen)

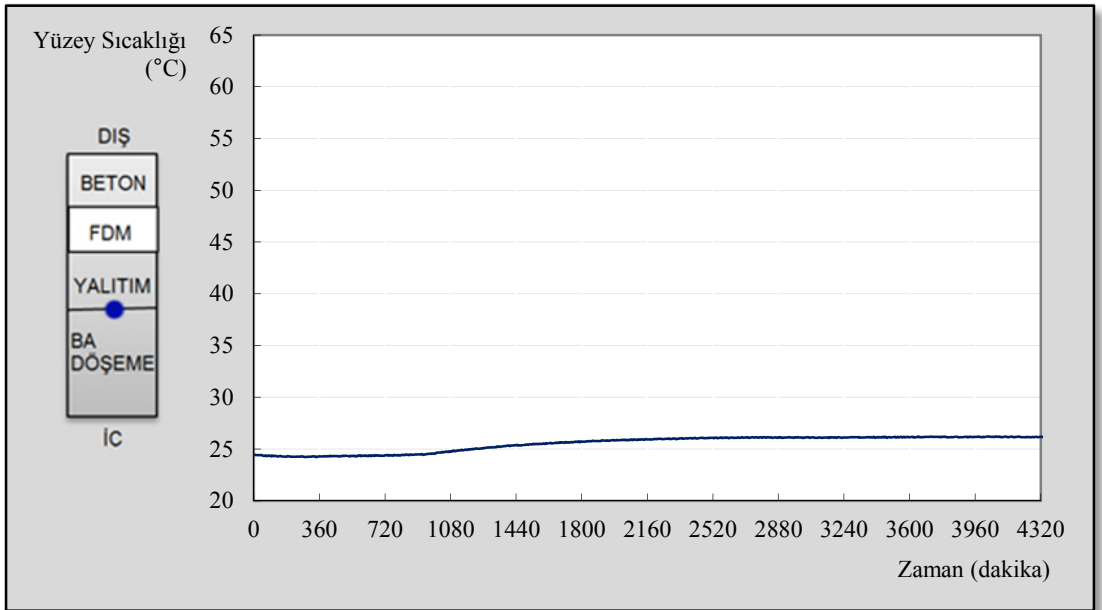


Şekil EK IV. 10 Sistemdeki anlık enerji verileri (FDM'siz 2. deney verileriyle hesaplanan)

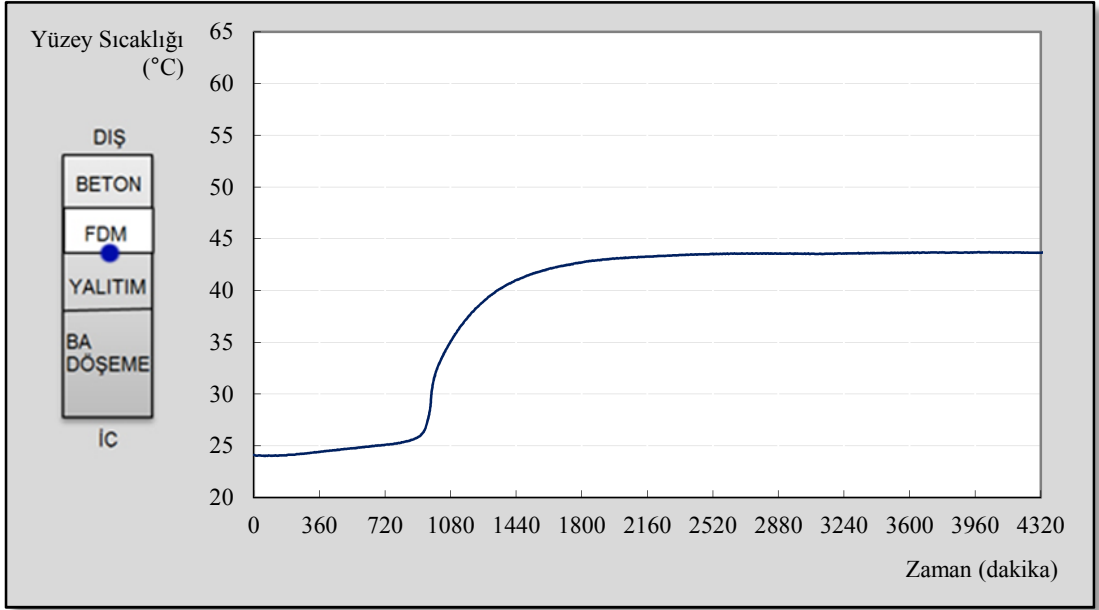
50 °C 1. Deney



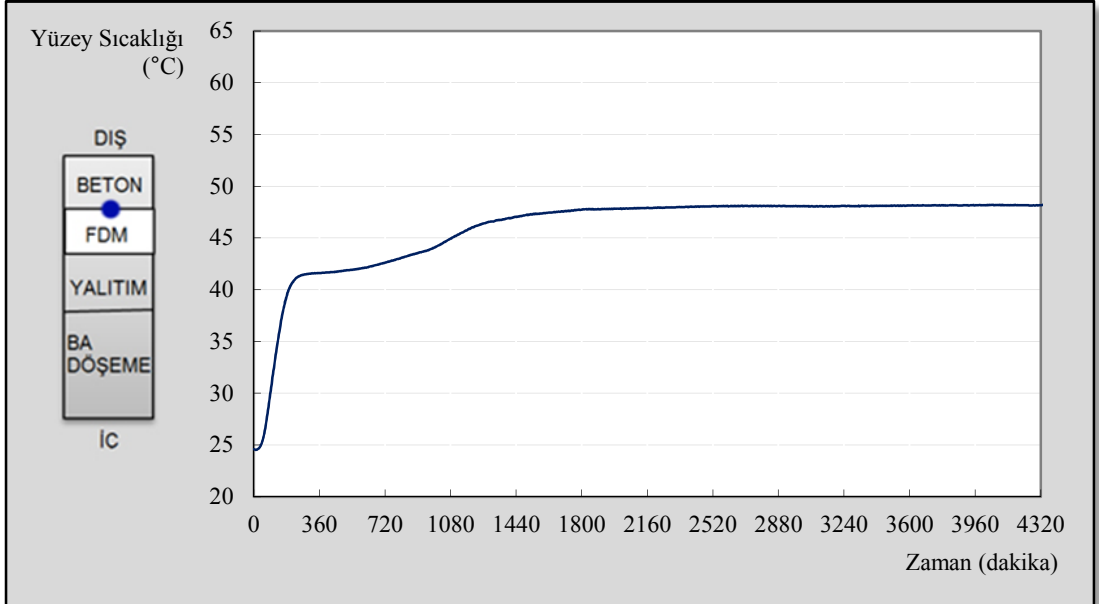
Şekil EK IV. 11 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (50°C 1. deneyde ölçülen)



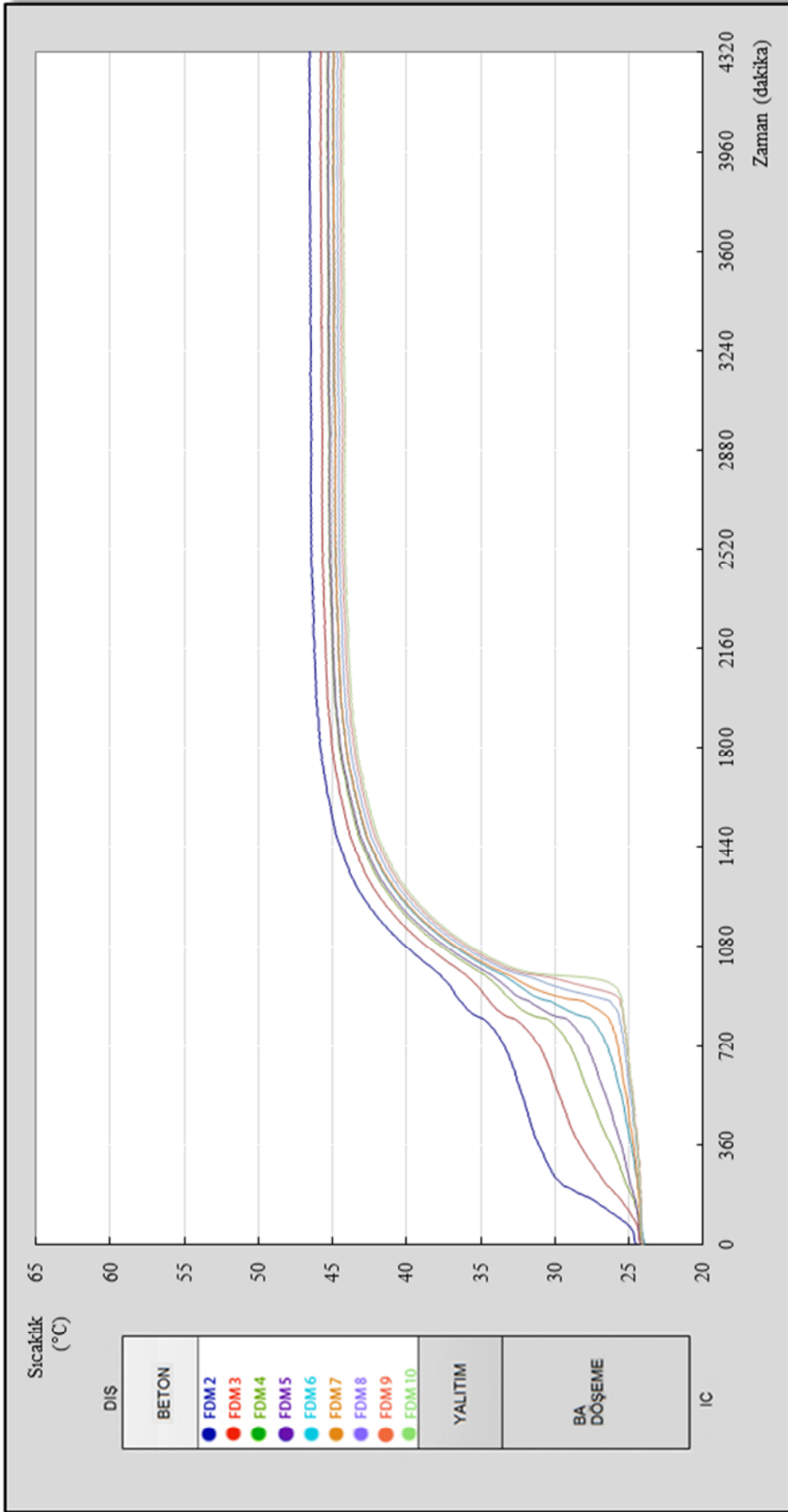
Şekil EK IV. 12 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (50°C 1. deneyde ölçülen)



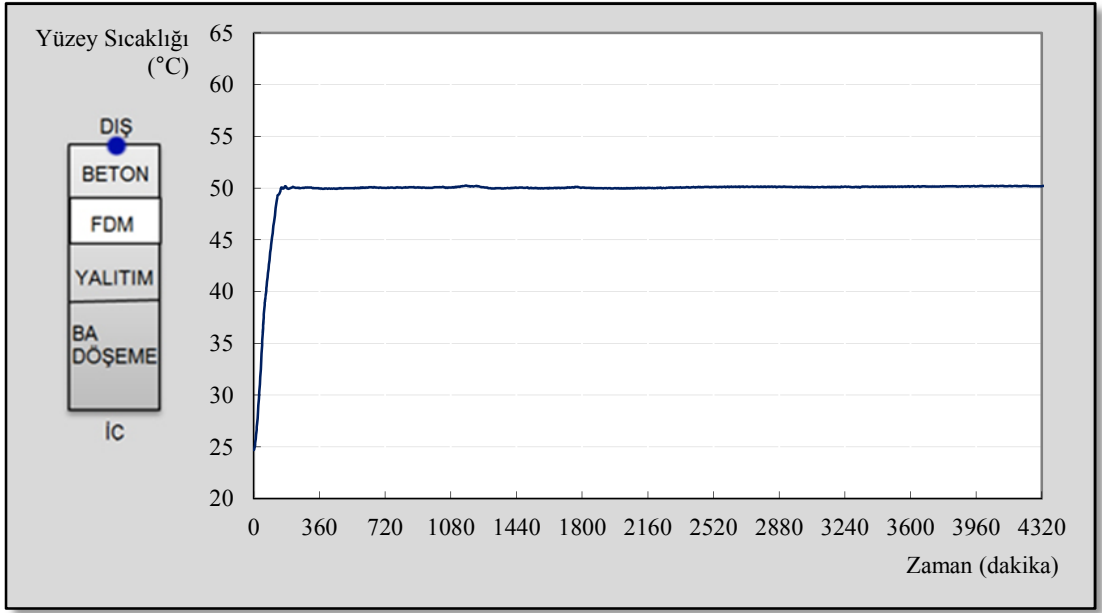
Şekil EK IV. 13 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (50°C 1. deneyde ölçülen)



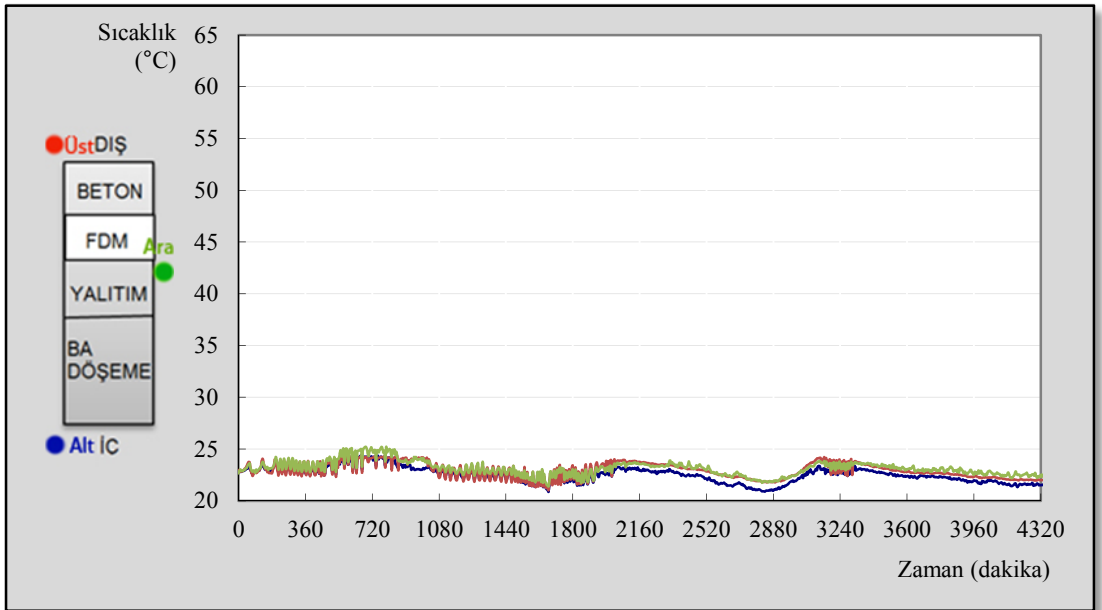
Şekil EK IV. 14 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (50°C 1. deneyde ölçülen)



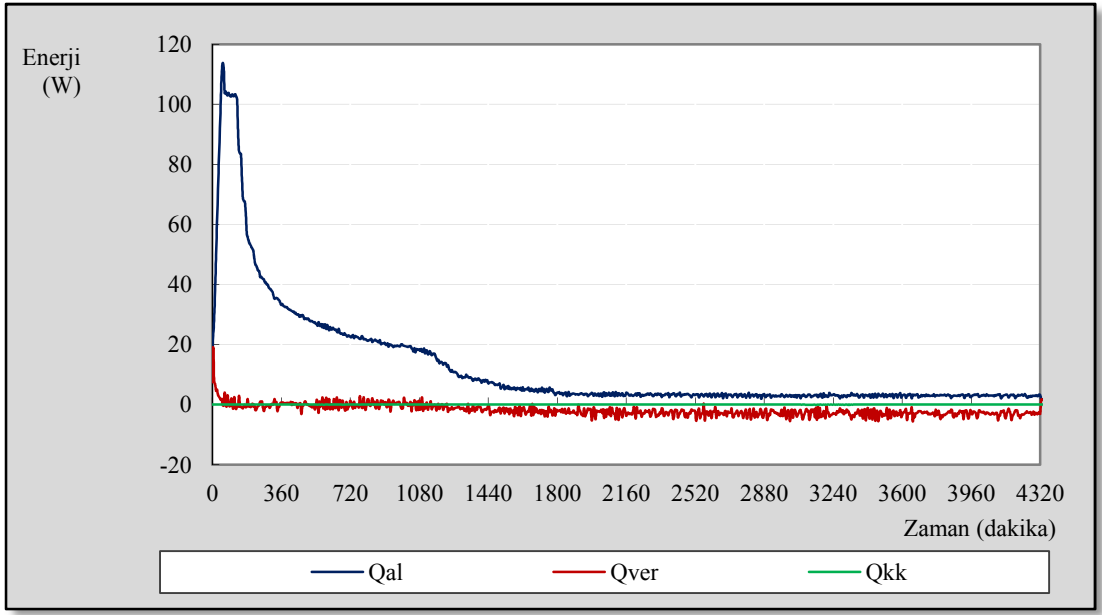
Şekil EK IV. 15 FDM sıcaklıkları (50°C 1. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 16 Üst yüzeý sıcaklık ortalamaları (50°C 1. deneyde ölçülen)

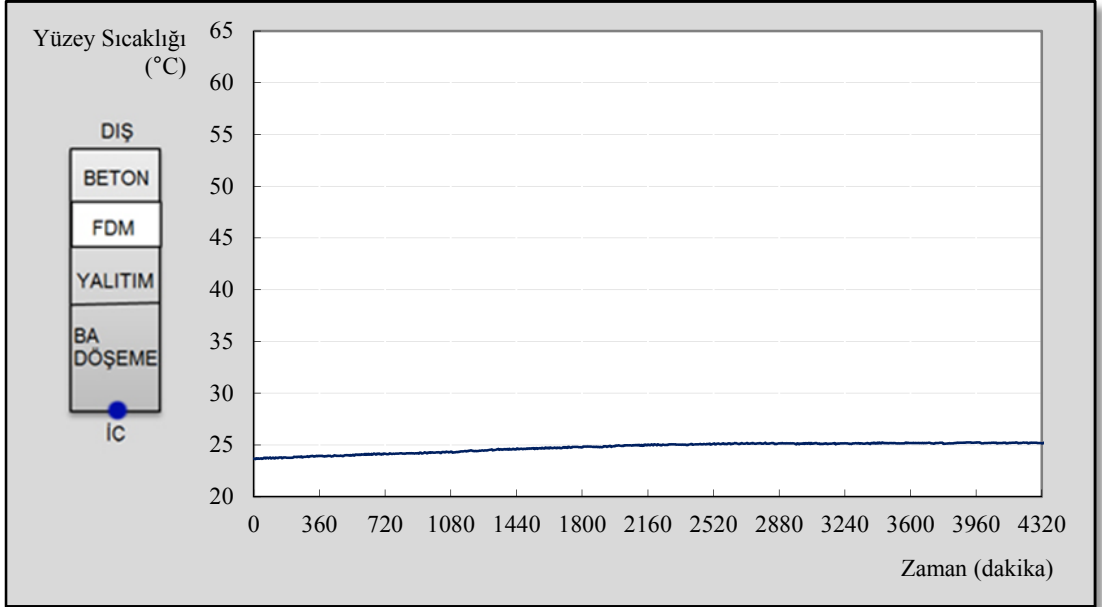


Şekil EK IV. 17 Ortamdan alınan sıcaklıklar (50°C 1. deneyde ölçülen)

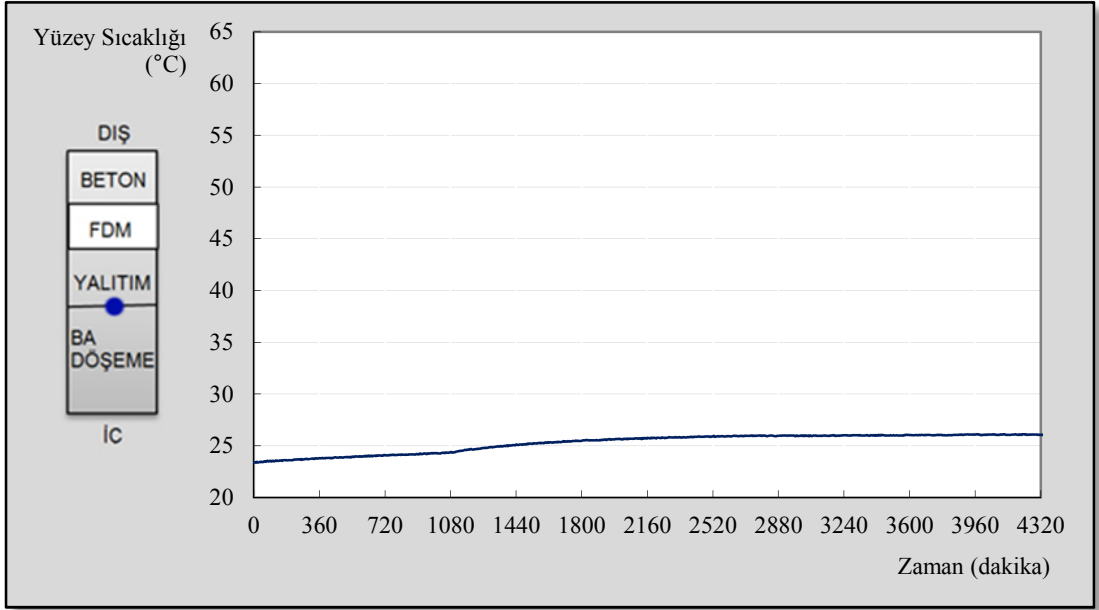


Şekil EK IV. 18 Sistemdeki anlık enerji verileri (50°C 1. deney verileriyle hesaplanan)

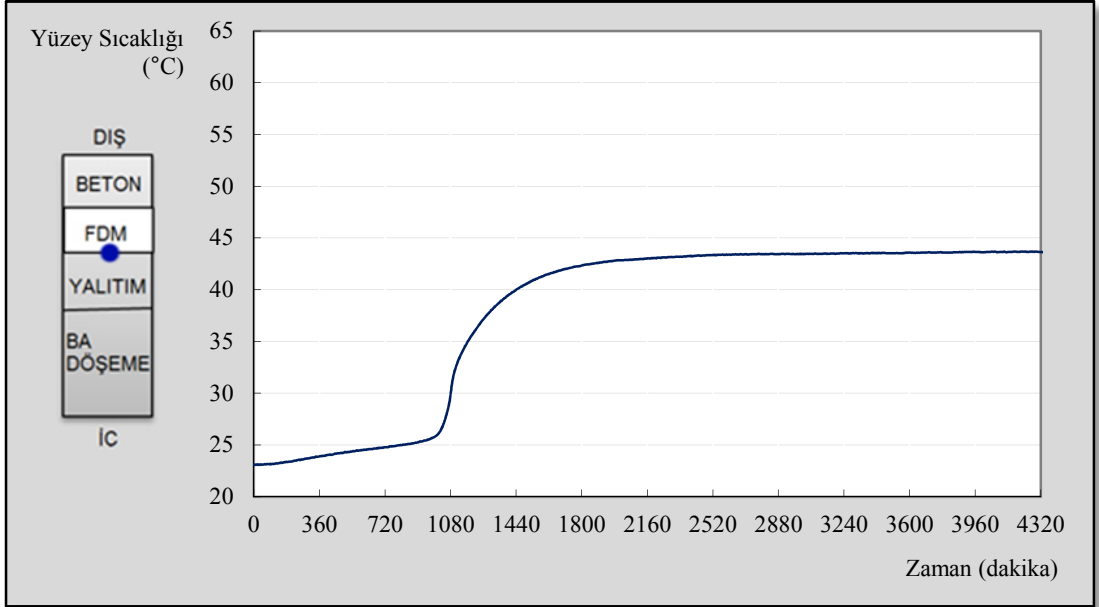
50 °C 2. Deney



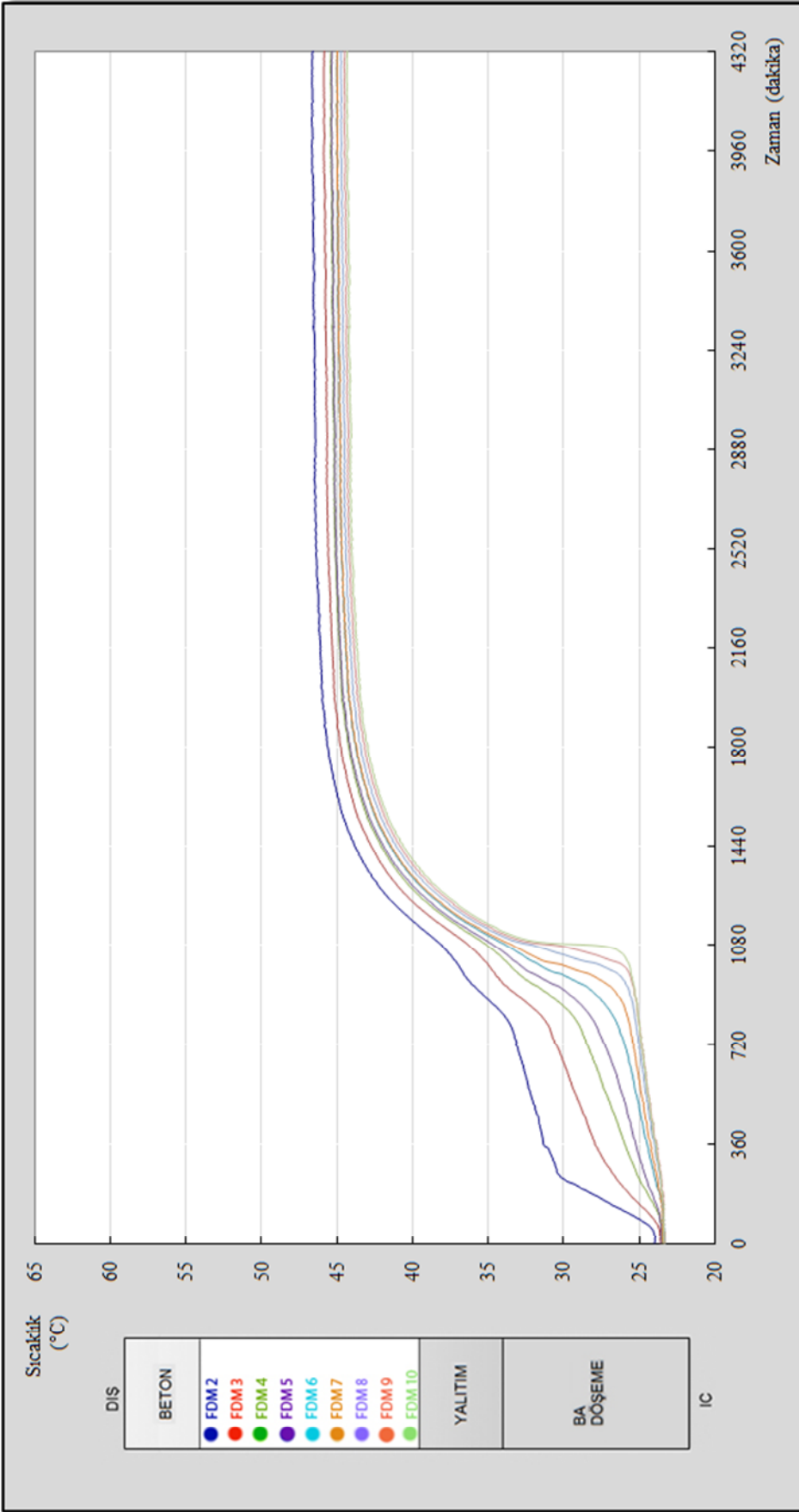
Şekil EK IV. 19 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (50°C 2. deneyde ölçülen)



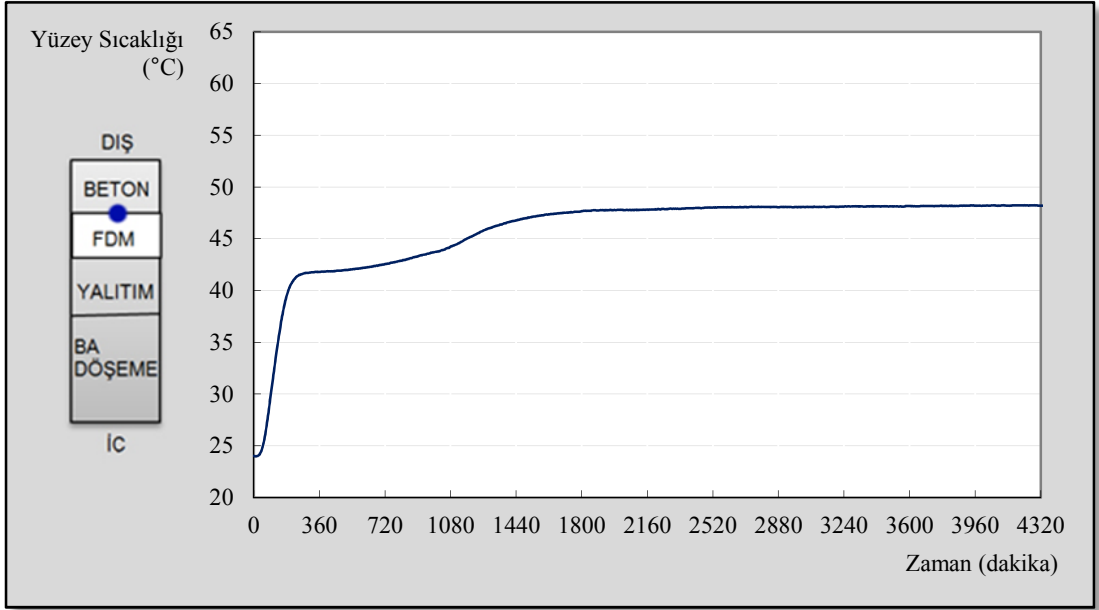
Şekil EK IV. 20 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (50°C 2. deneyde ölçülen)



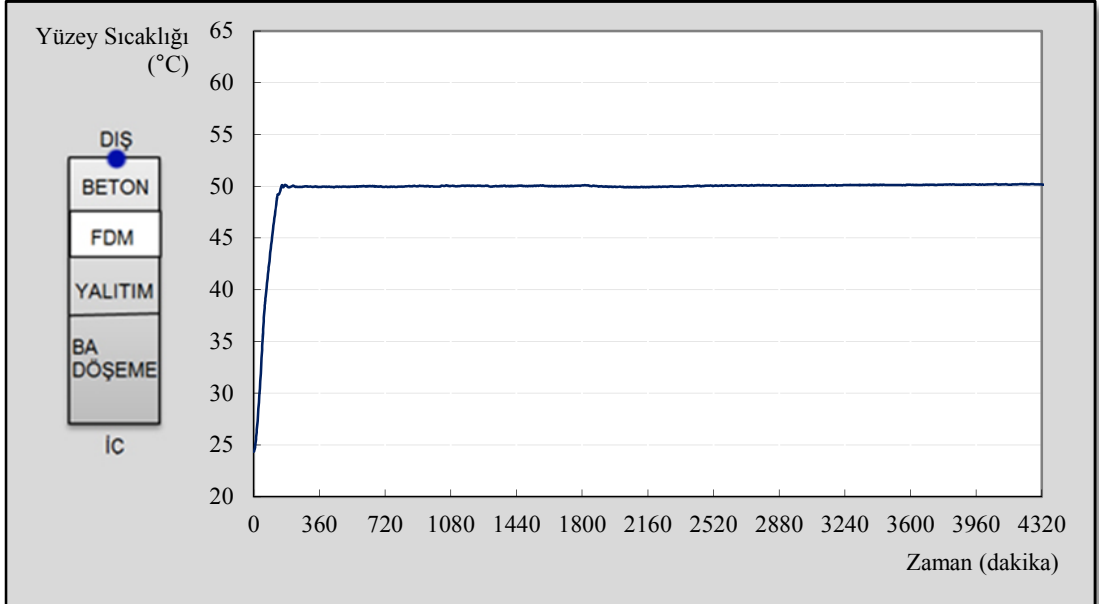
Şekil EK IV. 21 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (50°C 2. deneyde ölçülen)



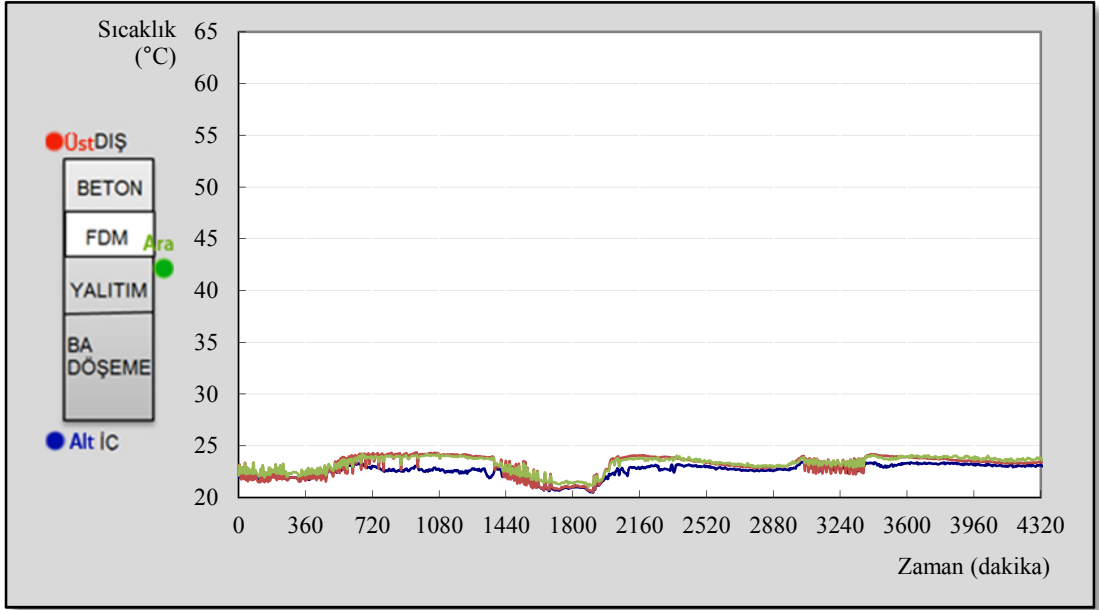
Şekil EK IV . 22 FDM sıcaklıkları (50°C 2 . deneyde ölçülen)



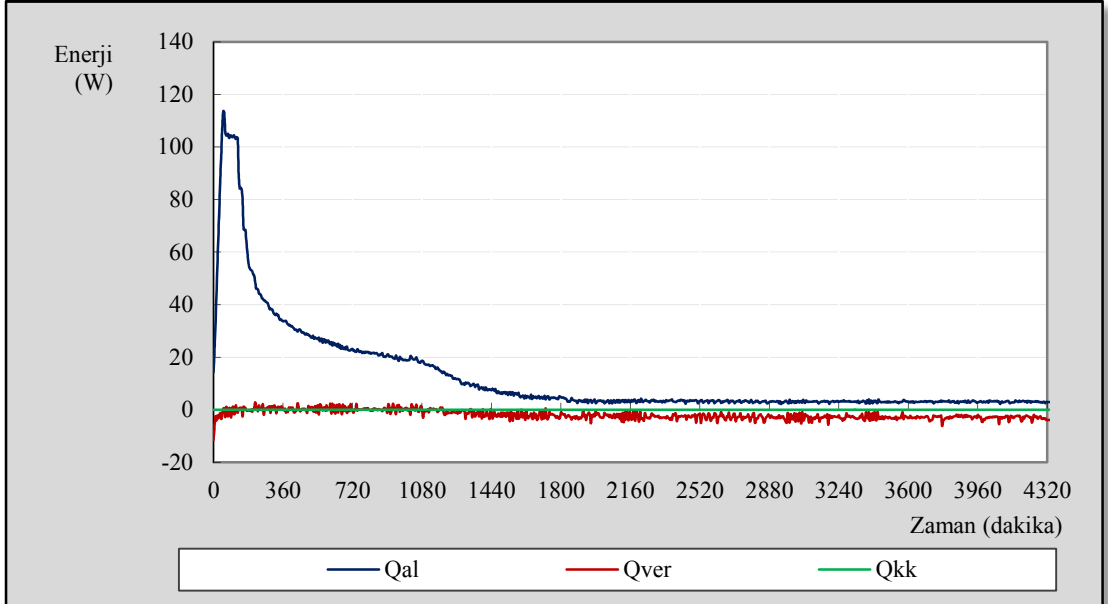
Şekil EK IV. 23 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (50°C 2. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 24 Üst yüzeý sıcaklık ortalamaları (50°C 2. deneyde ölçülen)

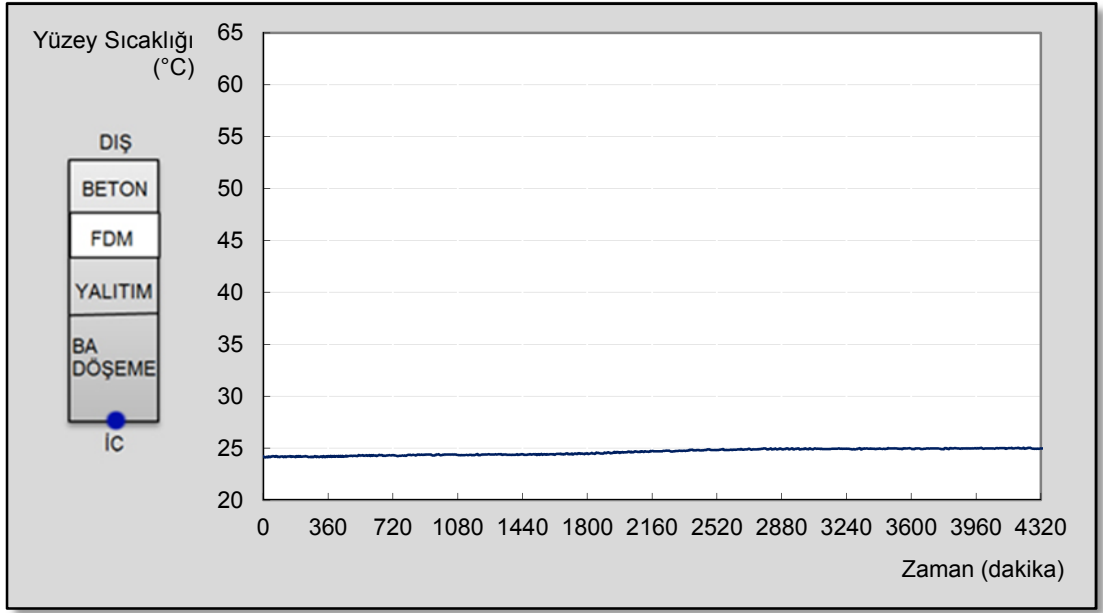


Şekil EK IV. 25 Ortamdan alınan sıcaklıklar (50°C 2. deneyde ölçülen)

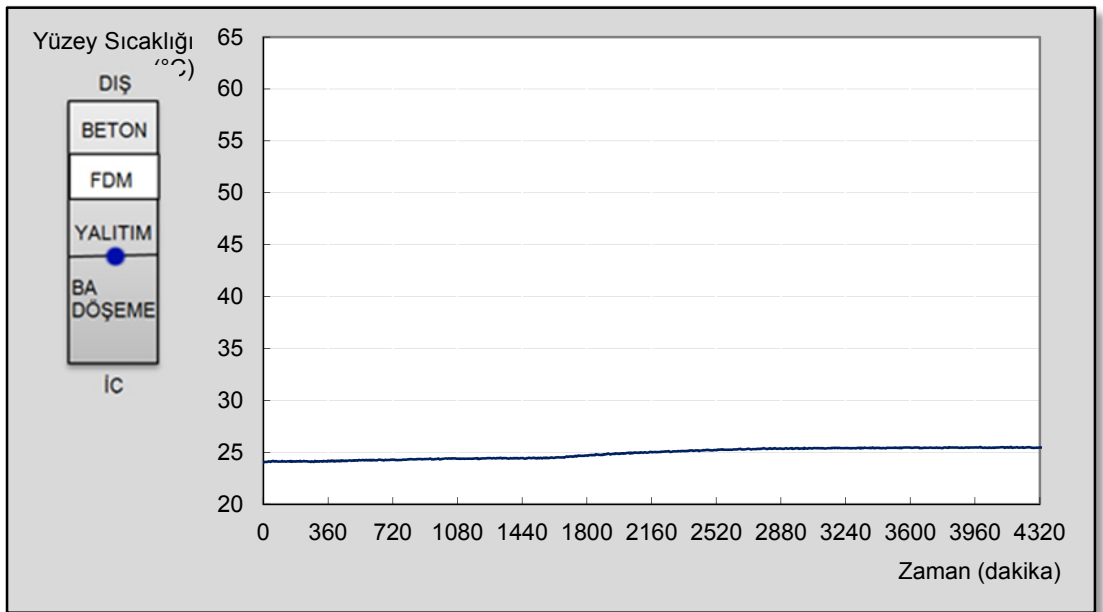


Şekil EK IV. 26 Sistemdeki anlık enerji verileri (50°C 2. deney verileriyle hesaplanan)

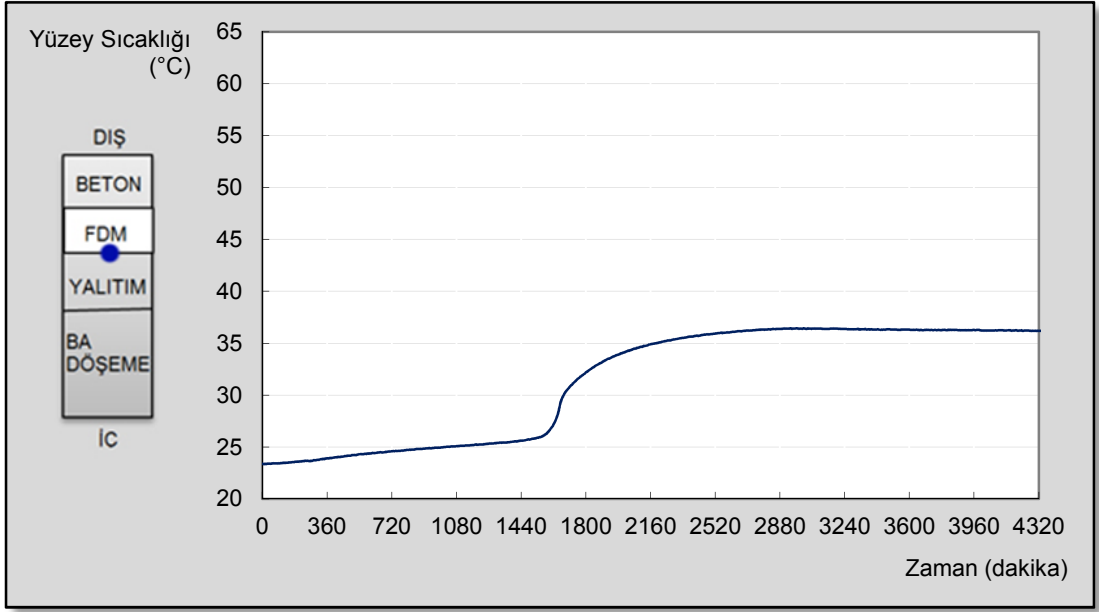
40 °C 1. Deney



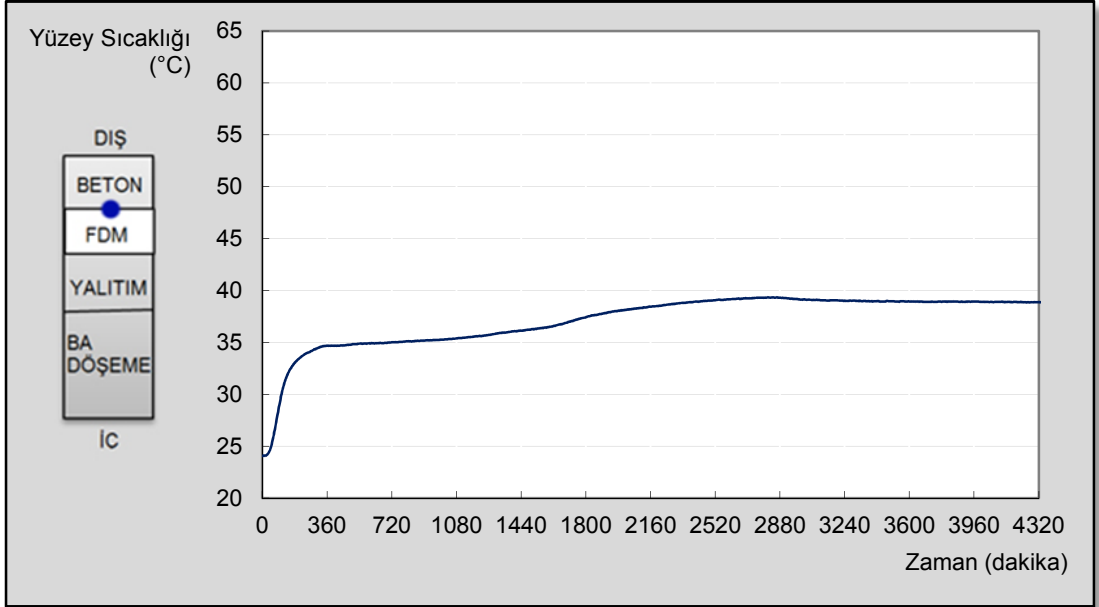
Şekil EK IV. 27 Alt yüzev sıcaklık ortalamaları (40°C 1. deneyde ölçülen)



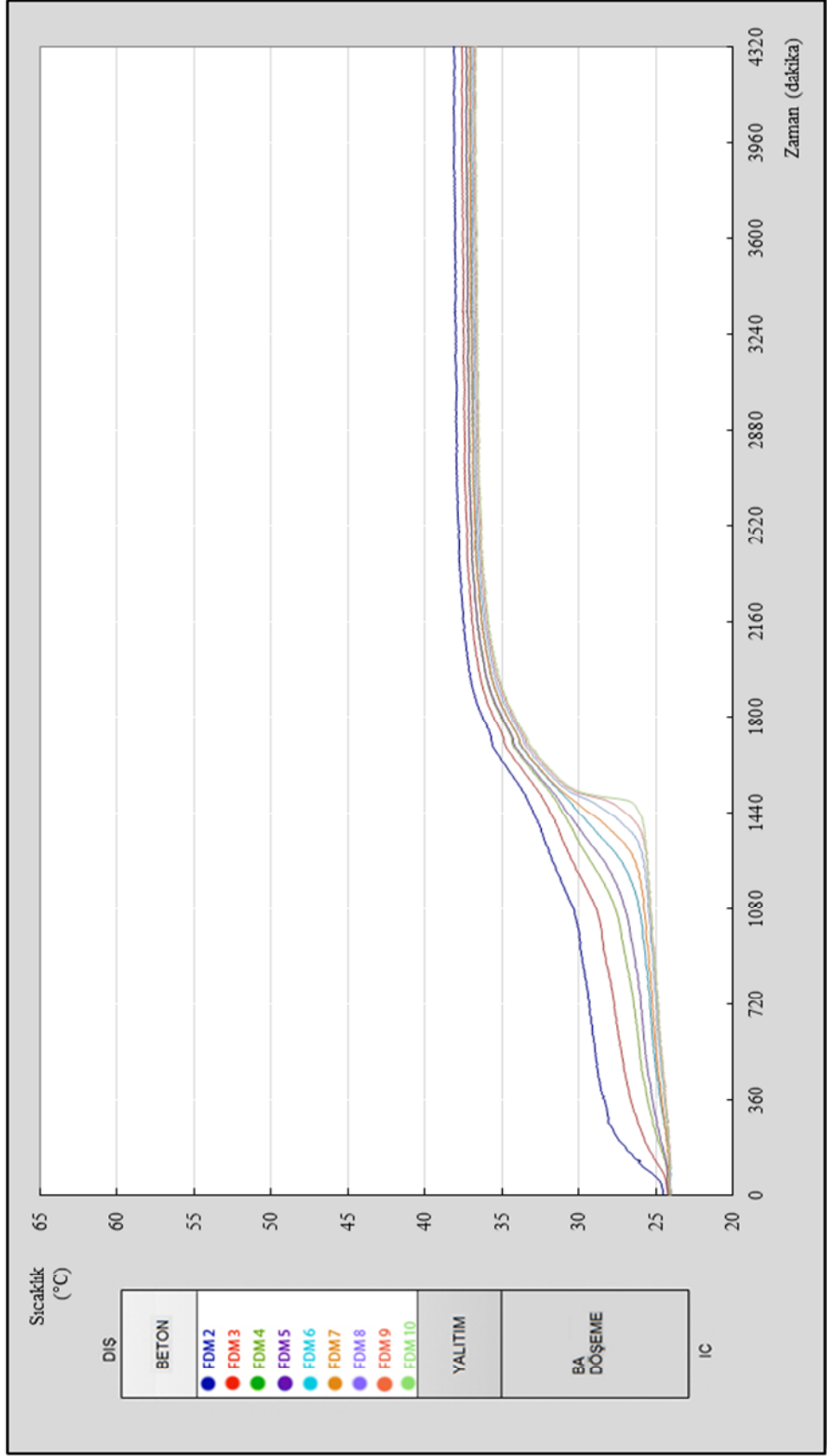
Şekil EK IV. 28 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (40°C 1. deneyde ölçülen)



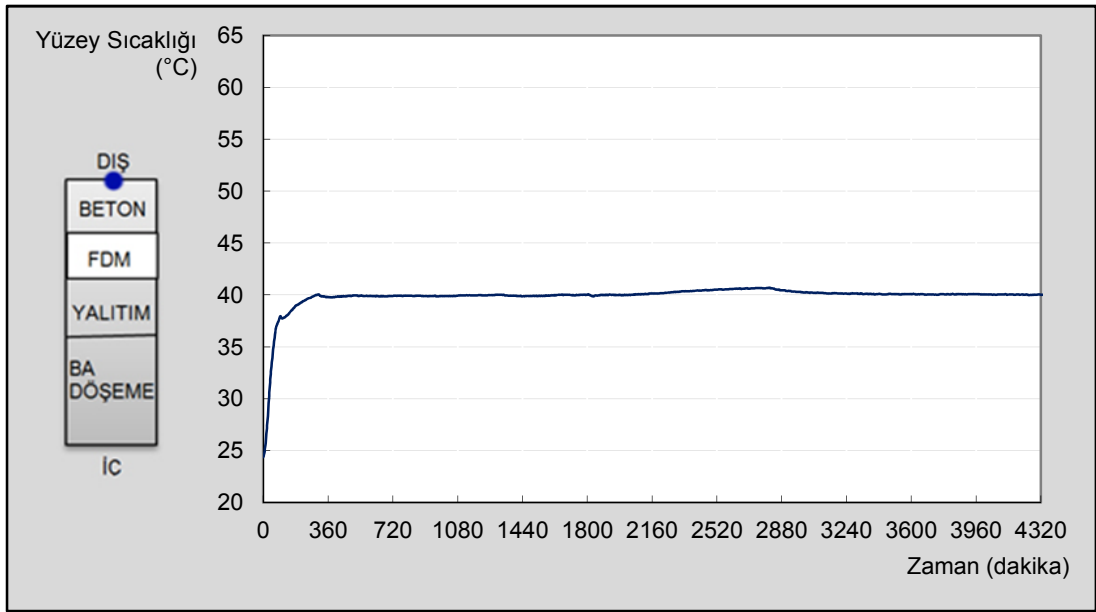
Şekil EK IV. 29 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (40°C 1. deneyde ölçülen)



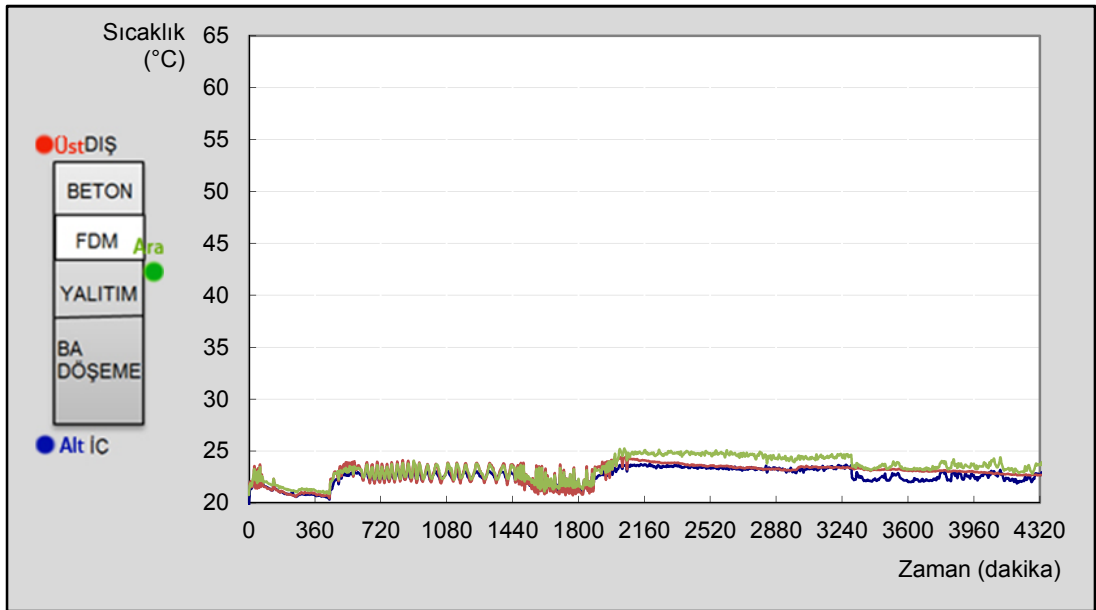
Şekil EK IV. 30 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (40°C 1. deneyde ölçülen)



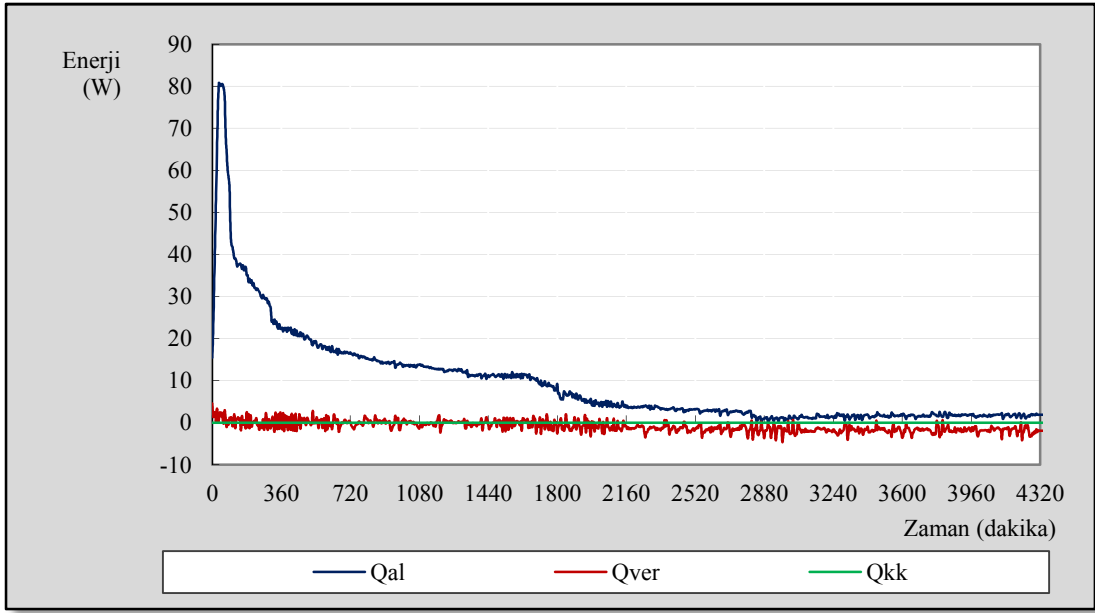
Şekil EK IV. 31 FDM sıcaklıkları (40°C 1. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 32 Üst yüzey sıcaklık ortalamaları (40°C 1. deneyde ölçülen)

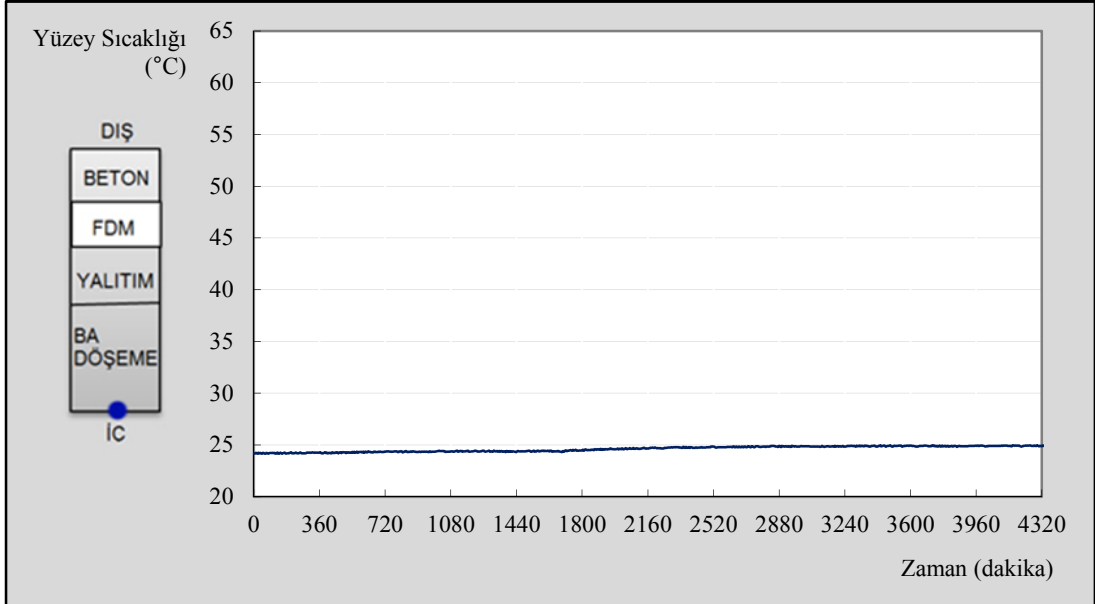


Şekil EK IV. 33 Ortamdan alınan sıcaklıklar (40°C 1. deneyde ölçülen)

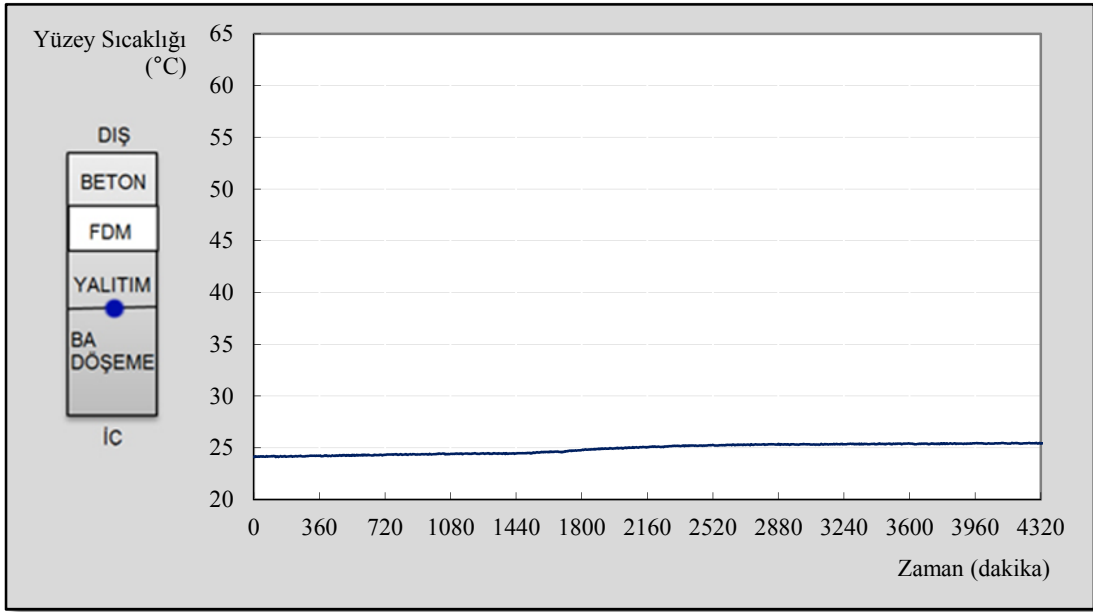


Şekil EK IV. 34 Sistemdeki anlık enerji verileri (40°C 1. deney verileriyle hesaplanan)

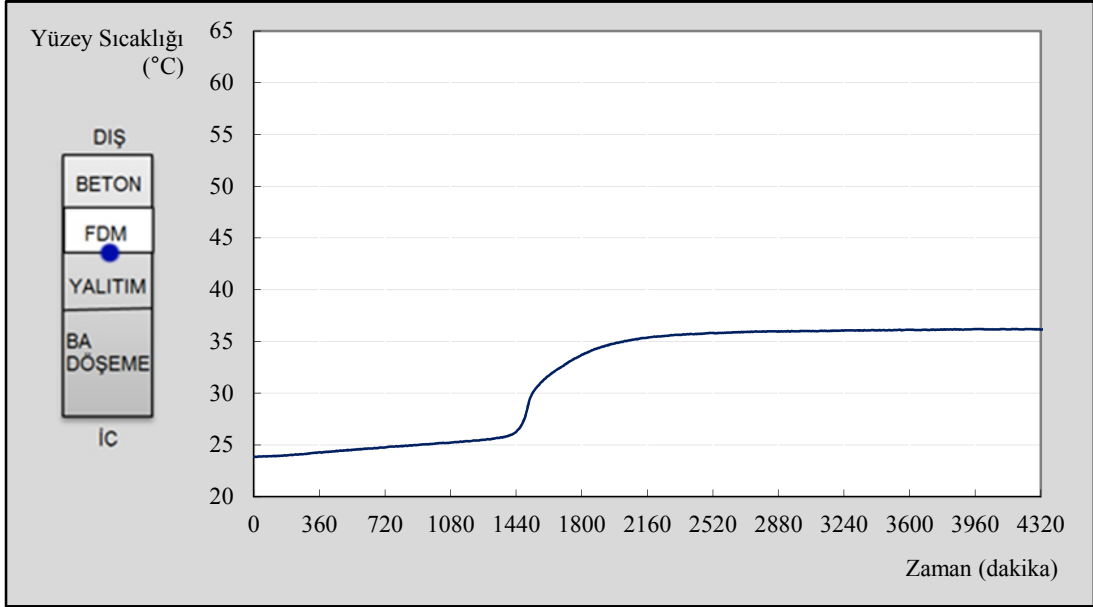
40 °C 2. Deney



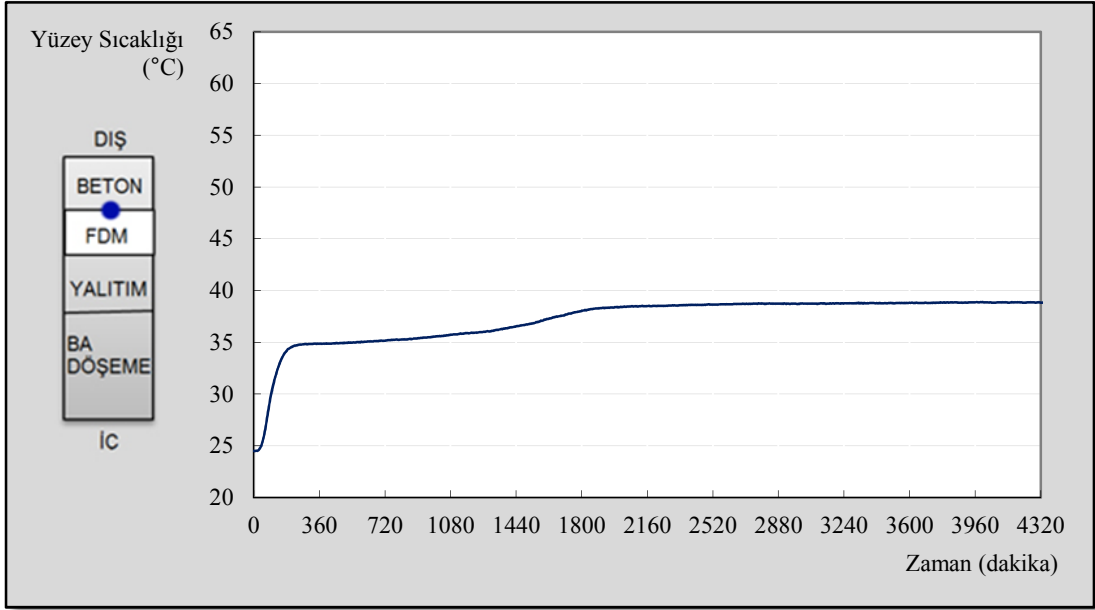
Şekil EK IV. 35 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (40°C 2. deneyde ölçülen)



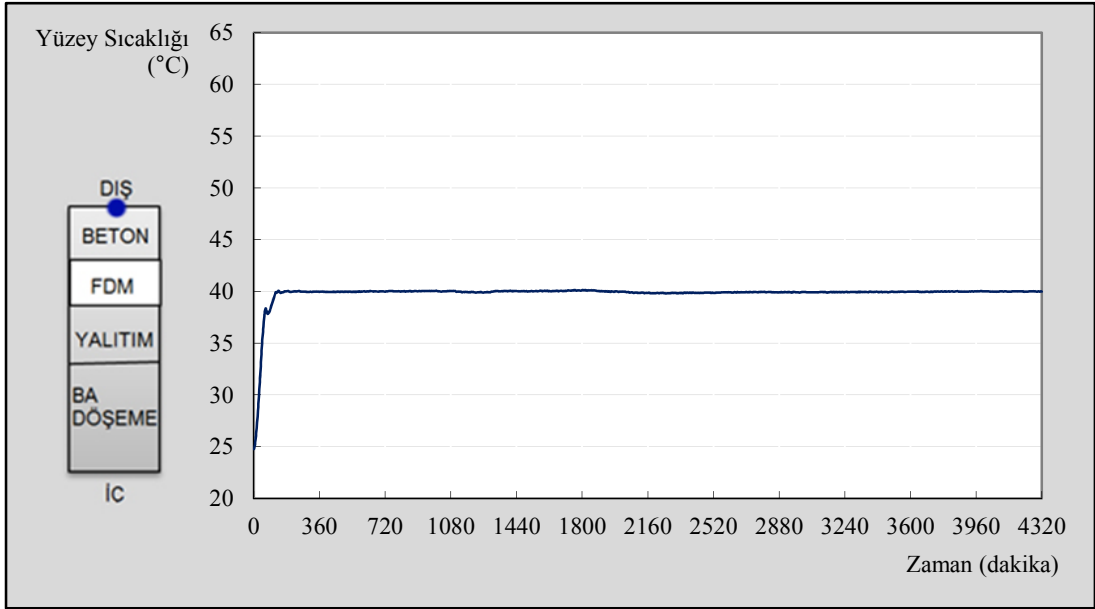
Şekil EK IV. 36 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (40°C 2. deneyde ölçülen)



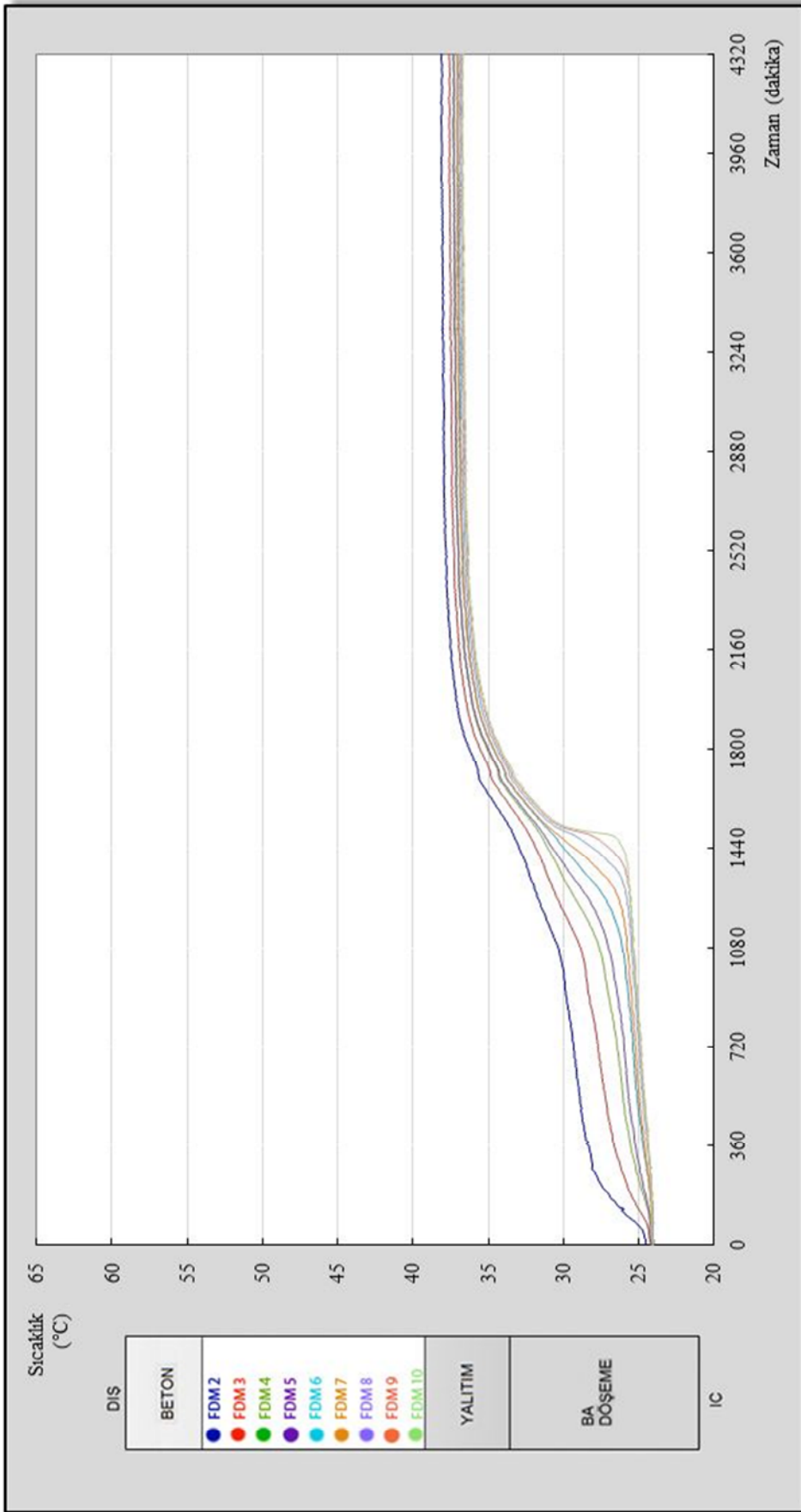
Şekil EK IV. 37 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (40°C 2. deneyde ölçülen)



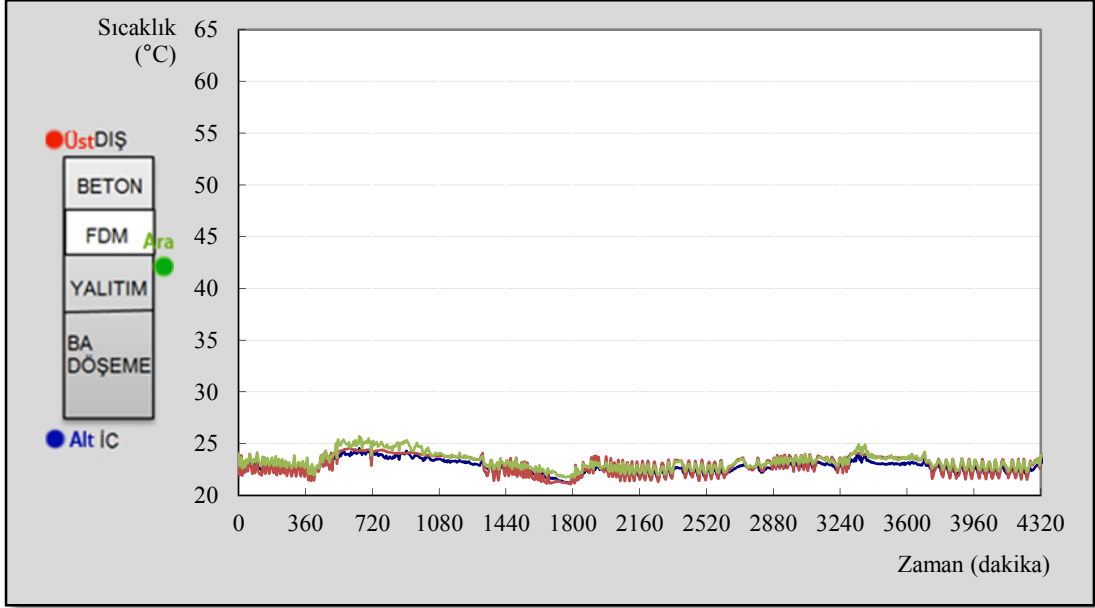
Şekil EK IV. 38 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (40°C 2. deneyde ölçülen)



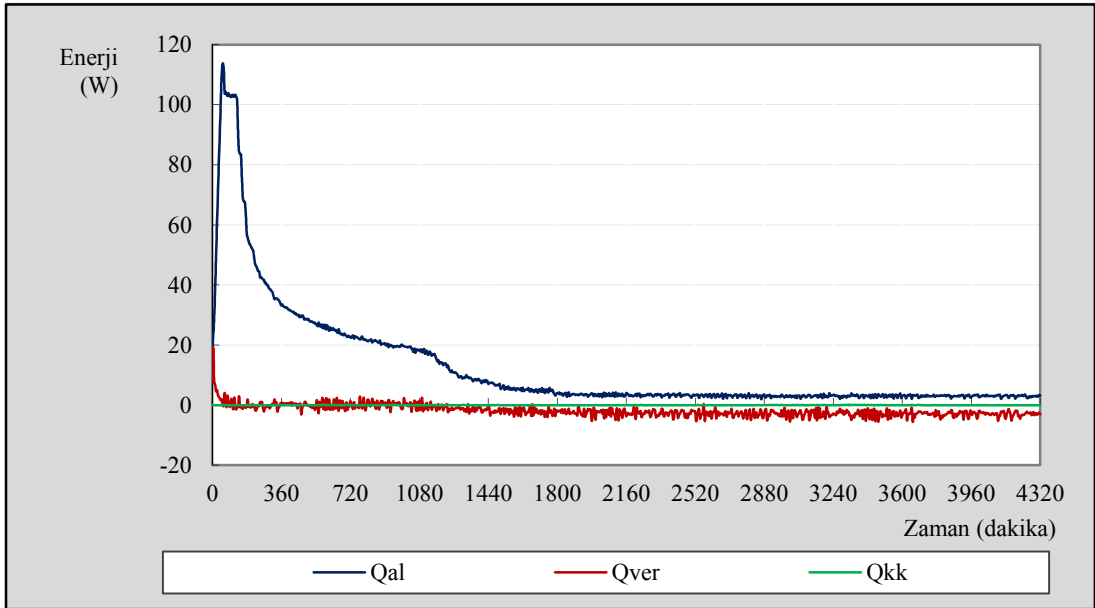
Şekil EK IV. 39 Üst yüzeý sıcaklık ortalamaları (40°C 2. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV . 40 FDM sıcaklıkları (40°C 2 . deneyde ölçülen)

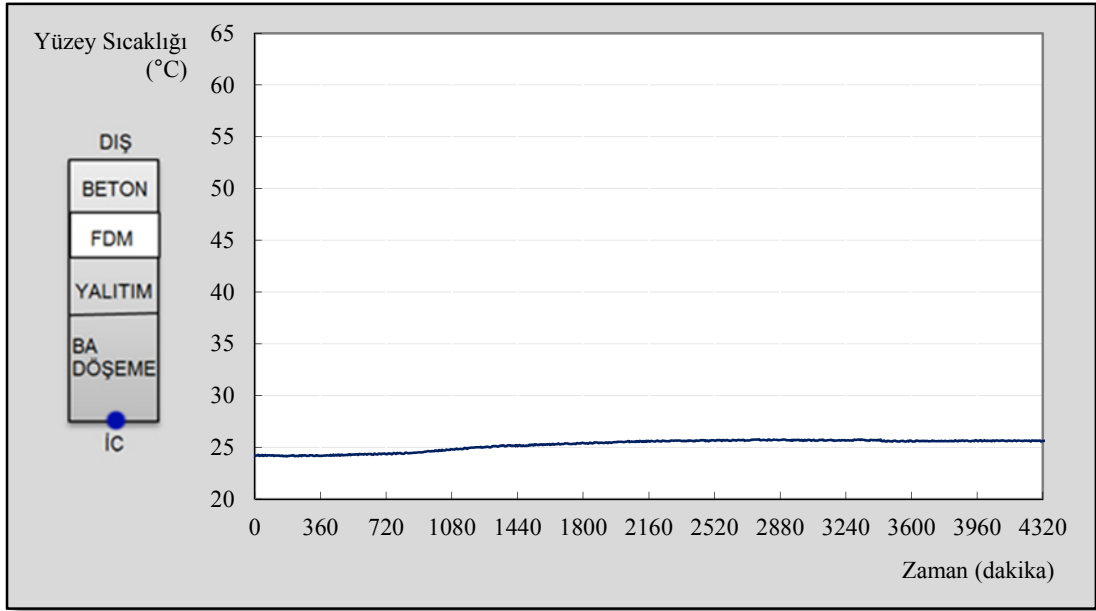


Şekil EK IV. 41 Ortamdan alınan sıcaklıklar (40°C 2. deneyde ölçülen)

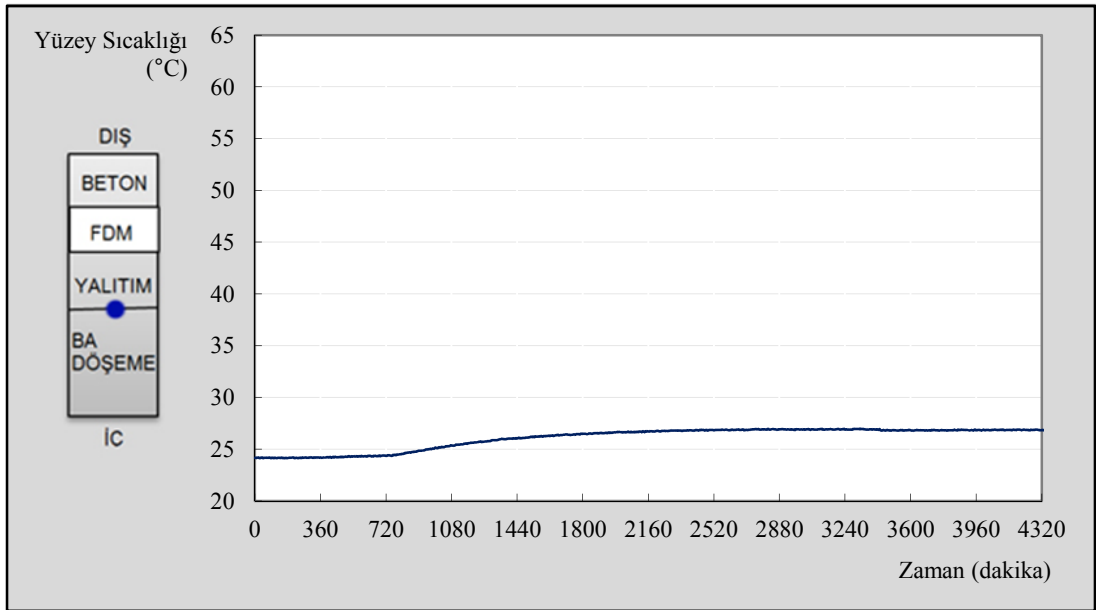


Şekil EK IV. 42 Sistemdeki anlık enerji verileri (40°C 2. deney verileriyle hesaplanan)

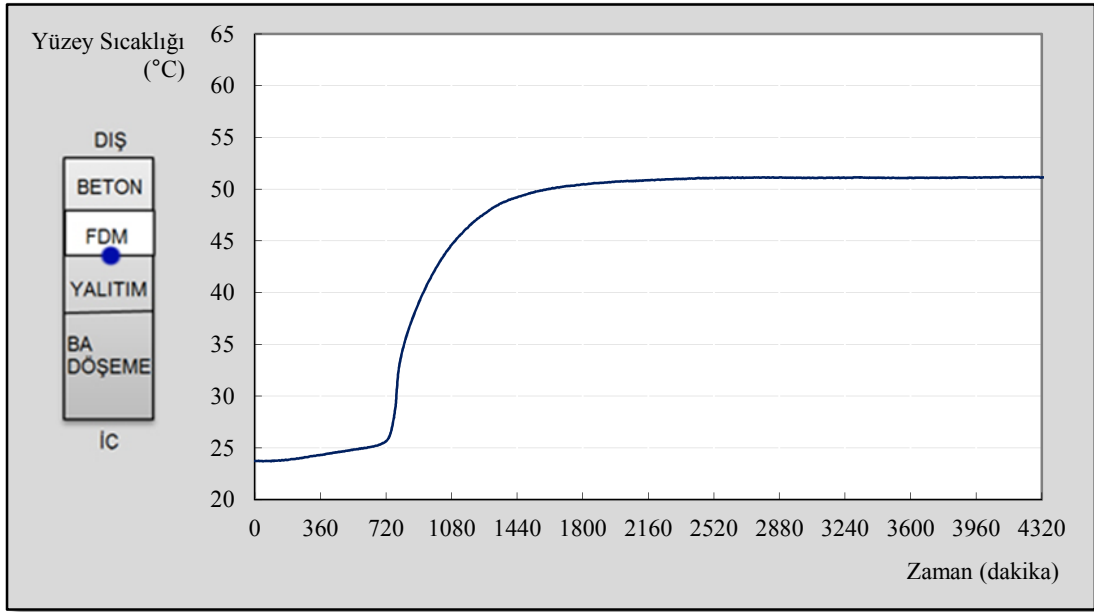
60 °C 1. Deney



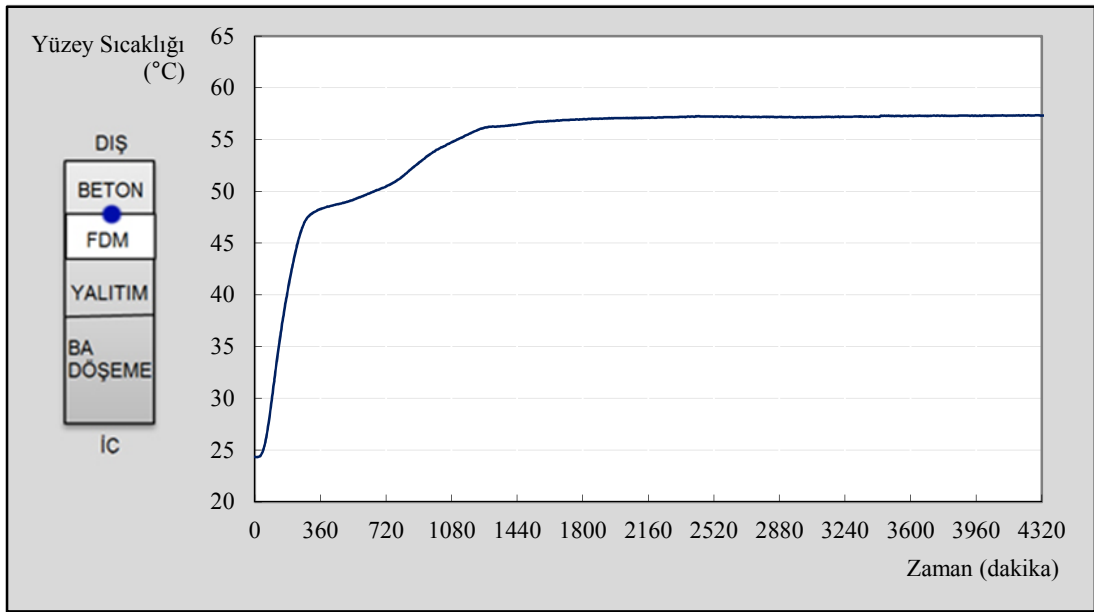
Şekil EK IV. 43 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (60°C 1. deneyde ölçülen)



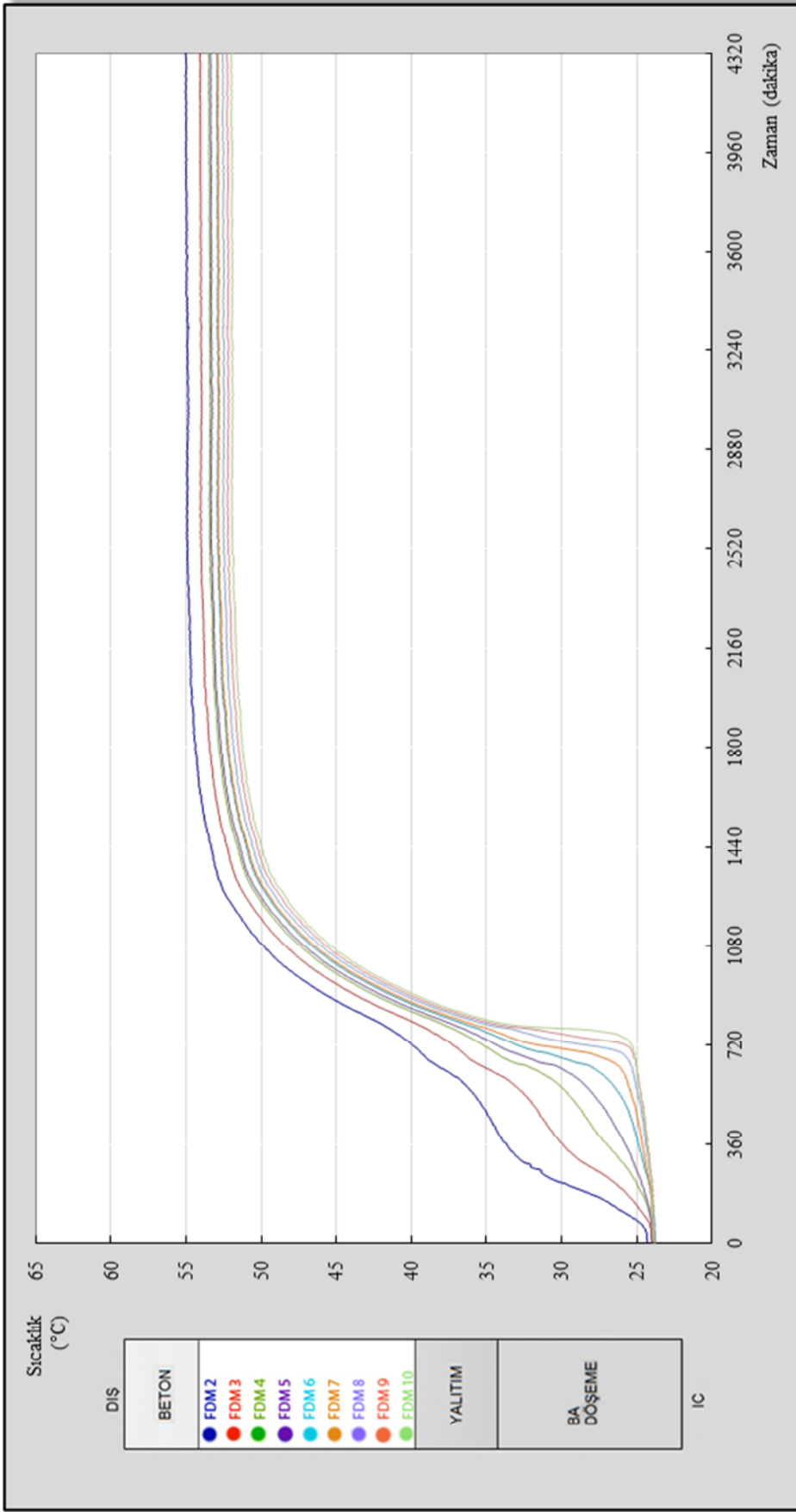
Şekil EK IV. 44 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (60°C 1. deneyde ölçülen)



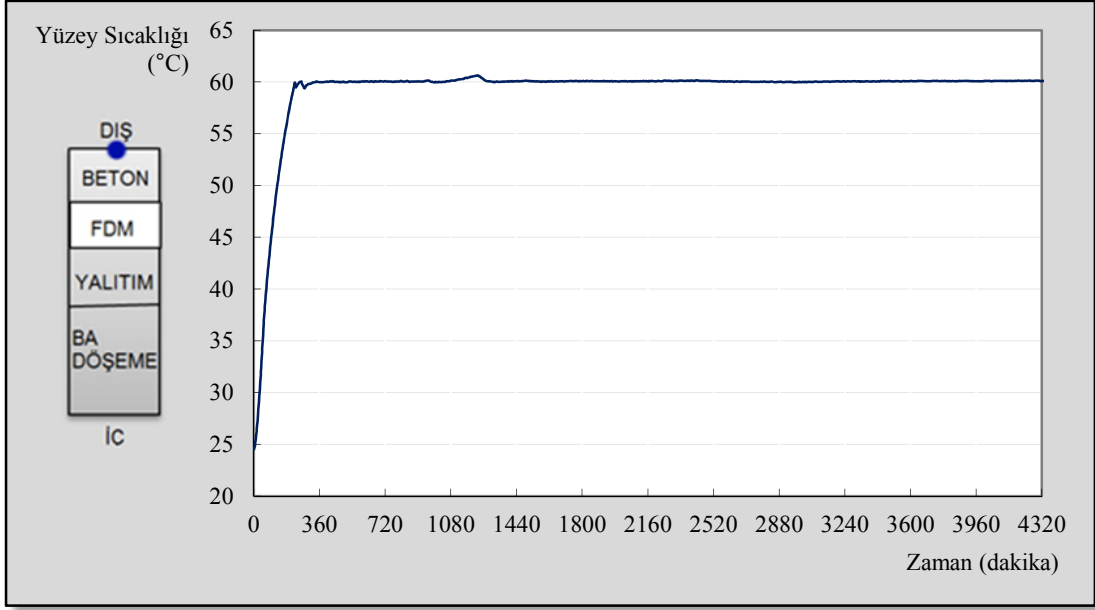
Şekil EK IV. 45 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (60°C 1. deneyde ölçülen)



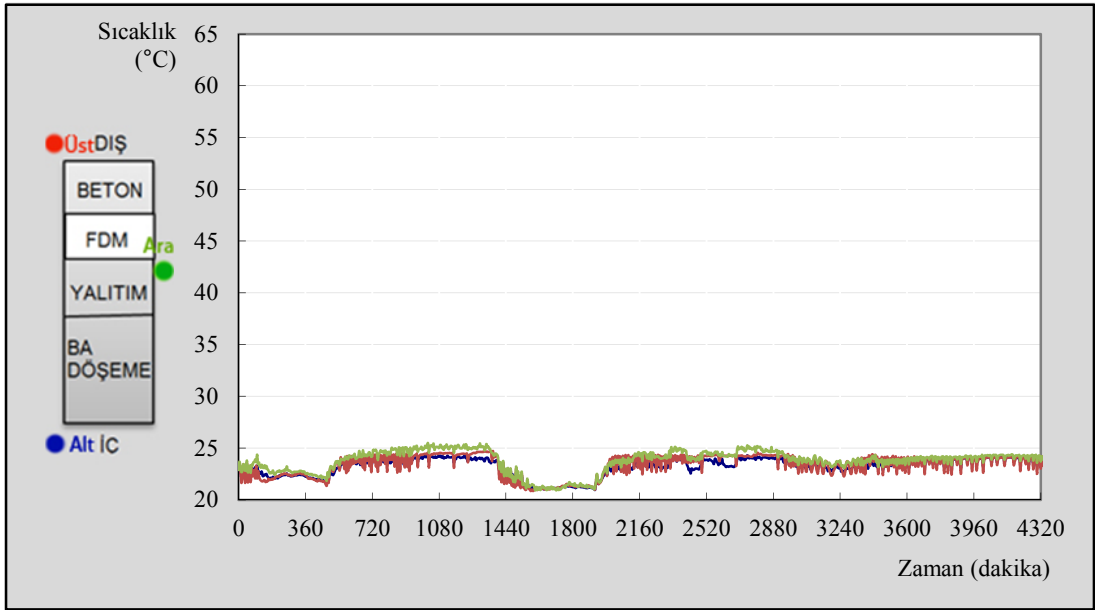
Şekil EK IV. 46 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (60°C 1. deneyde ölçülen)



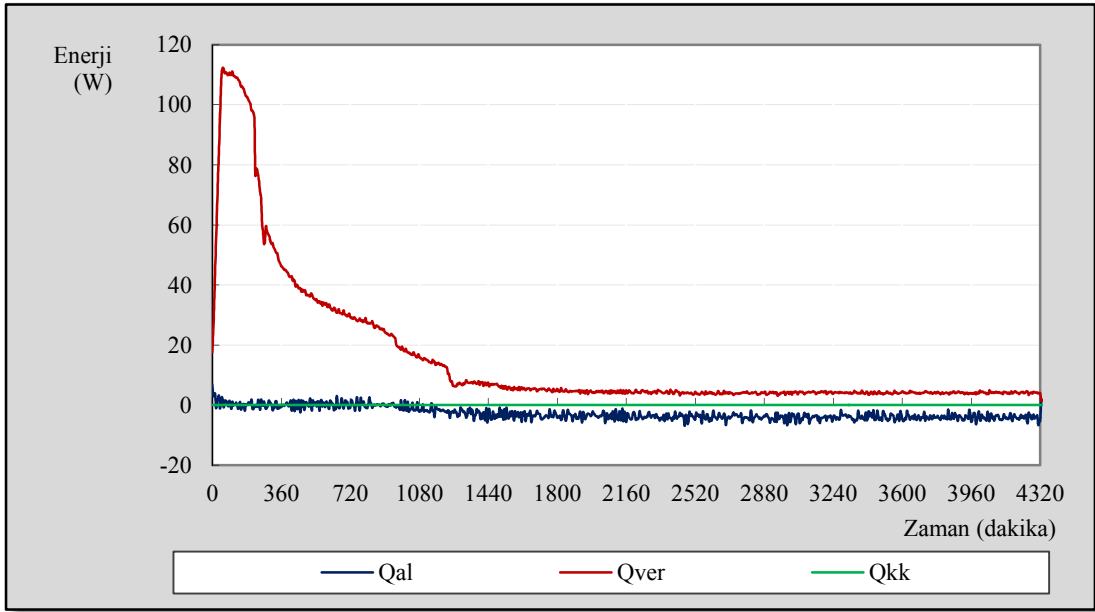
Şekil EK IV. 47 FDM sıcaklıkları (60°C 1. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 48 Üst yüzey sıcaklık ortalamaları (60°C 1. deneyde ölçülen)

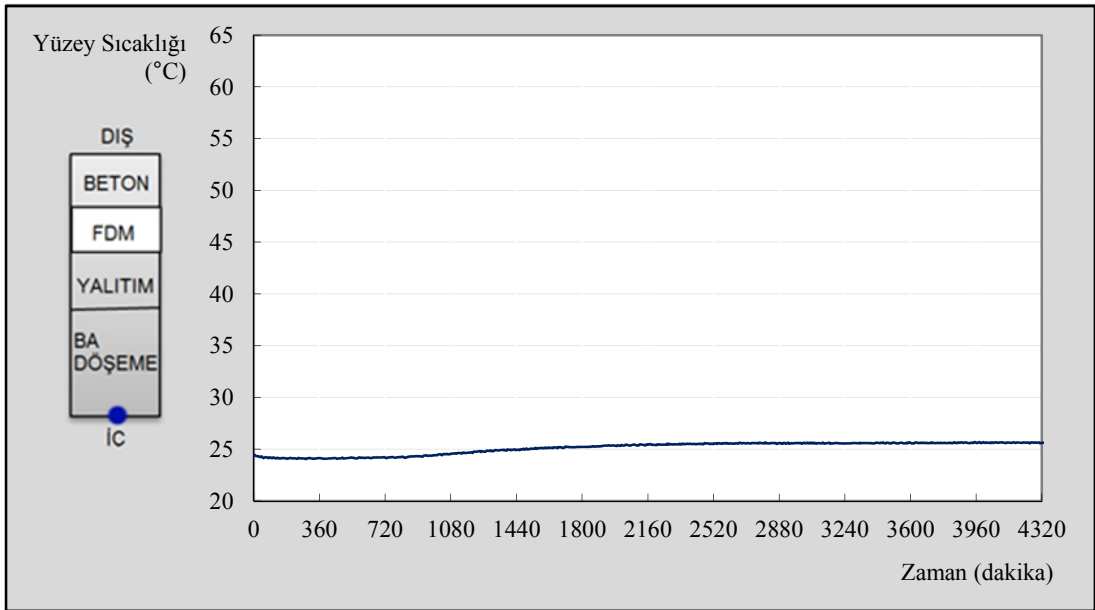


Şekil EK IV. 49 Ortamdan alınan sıcaklıklar (60°C 1. deneyde ölçülen)

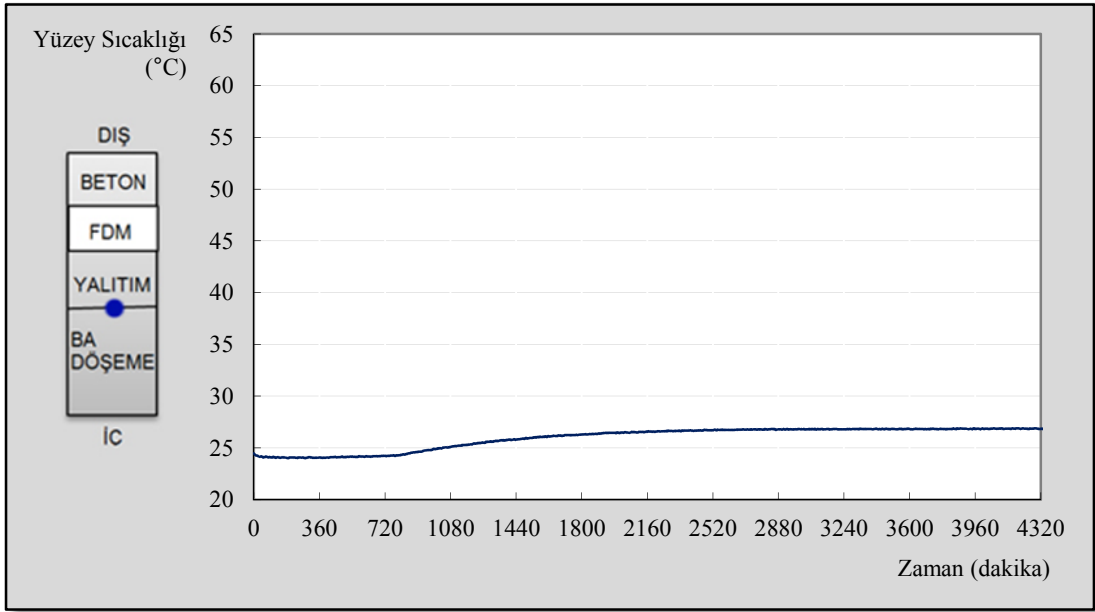


Şekil EK IV. 50 Sistemdeki anlık enerji verileri (60°C 1. deney verileriyle hesaplanan)

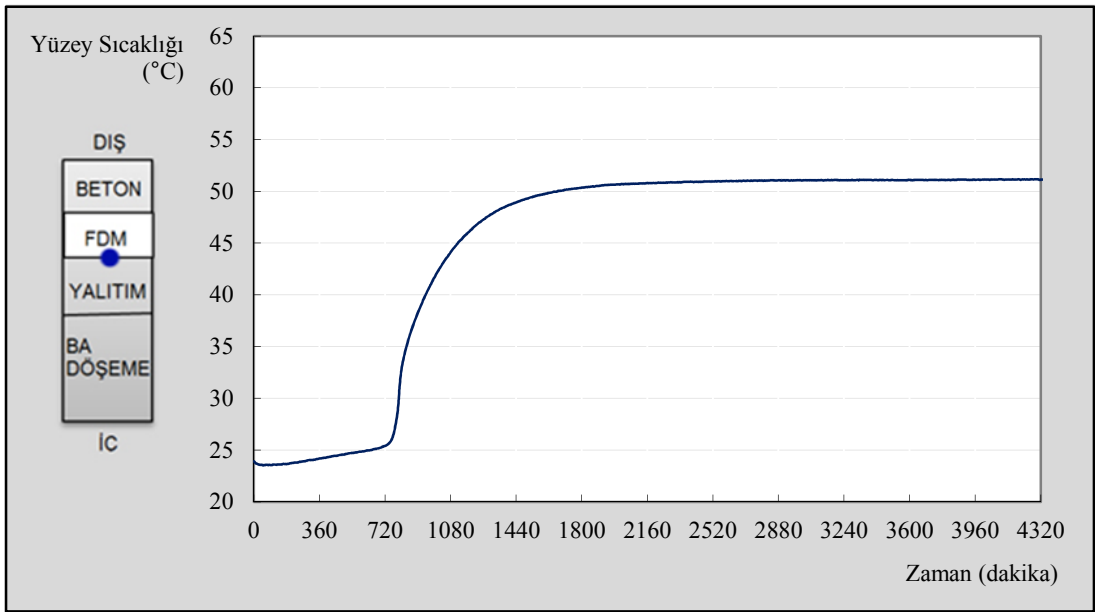
60 °C 2. Deney



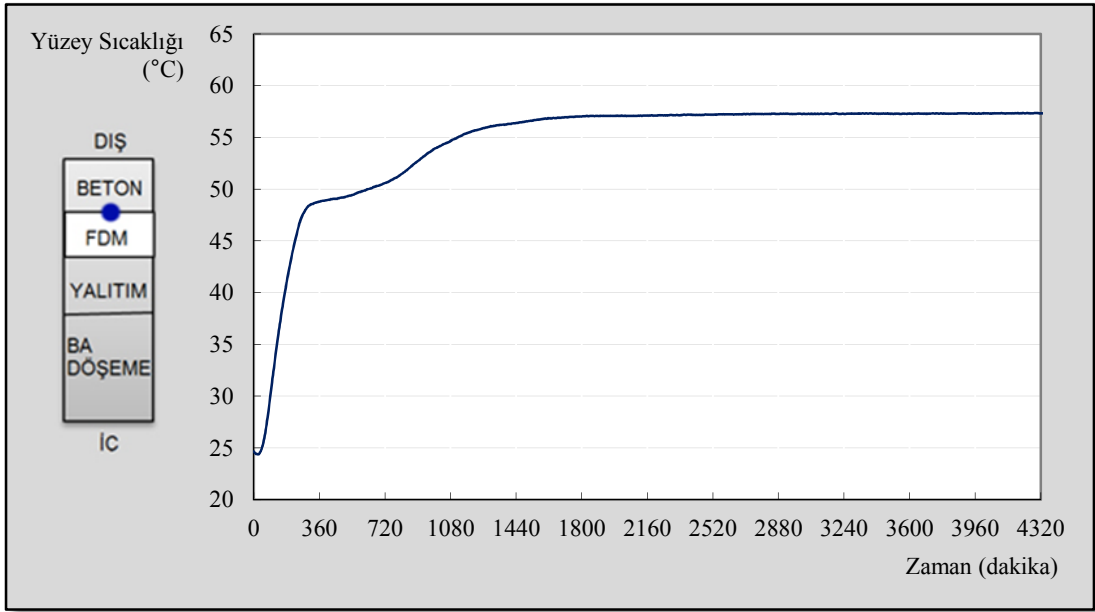
Şekil EK IV. 51 Alt yüzey sıcaklık ortalamaları (60°C 2. deneyde ölçülen)



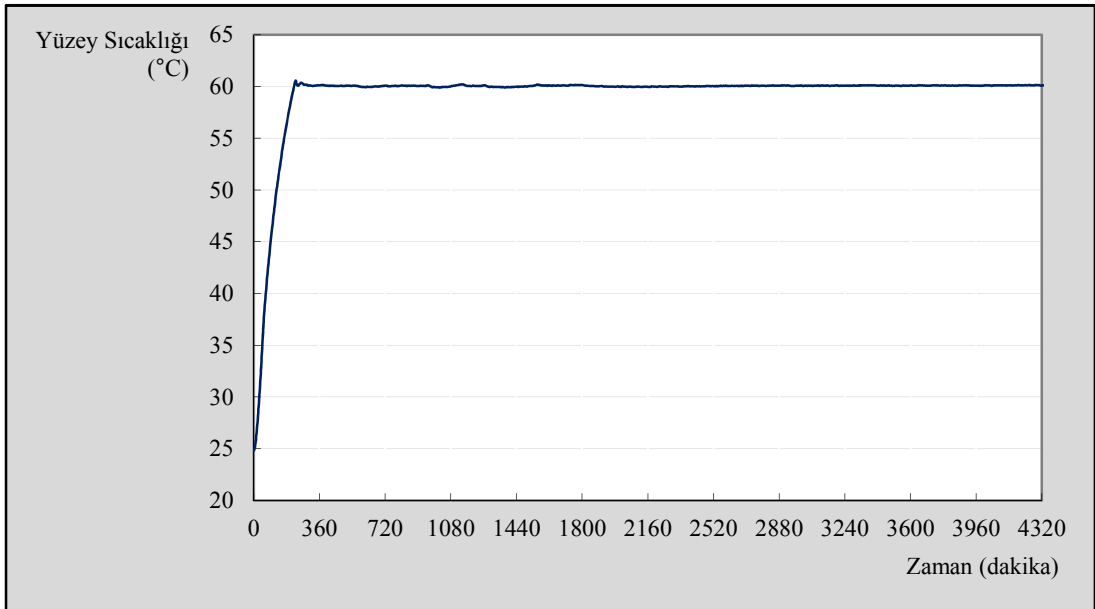
Şekil EK IV. 52 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (60°C 2. deneyde ölçülen)



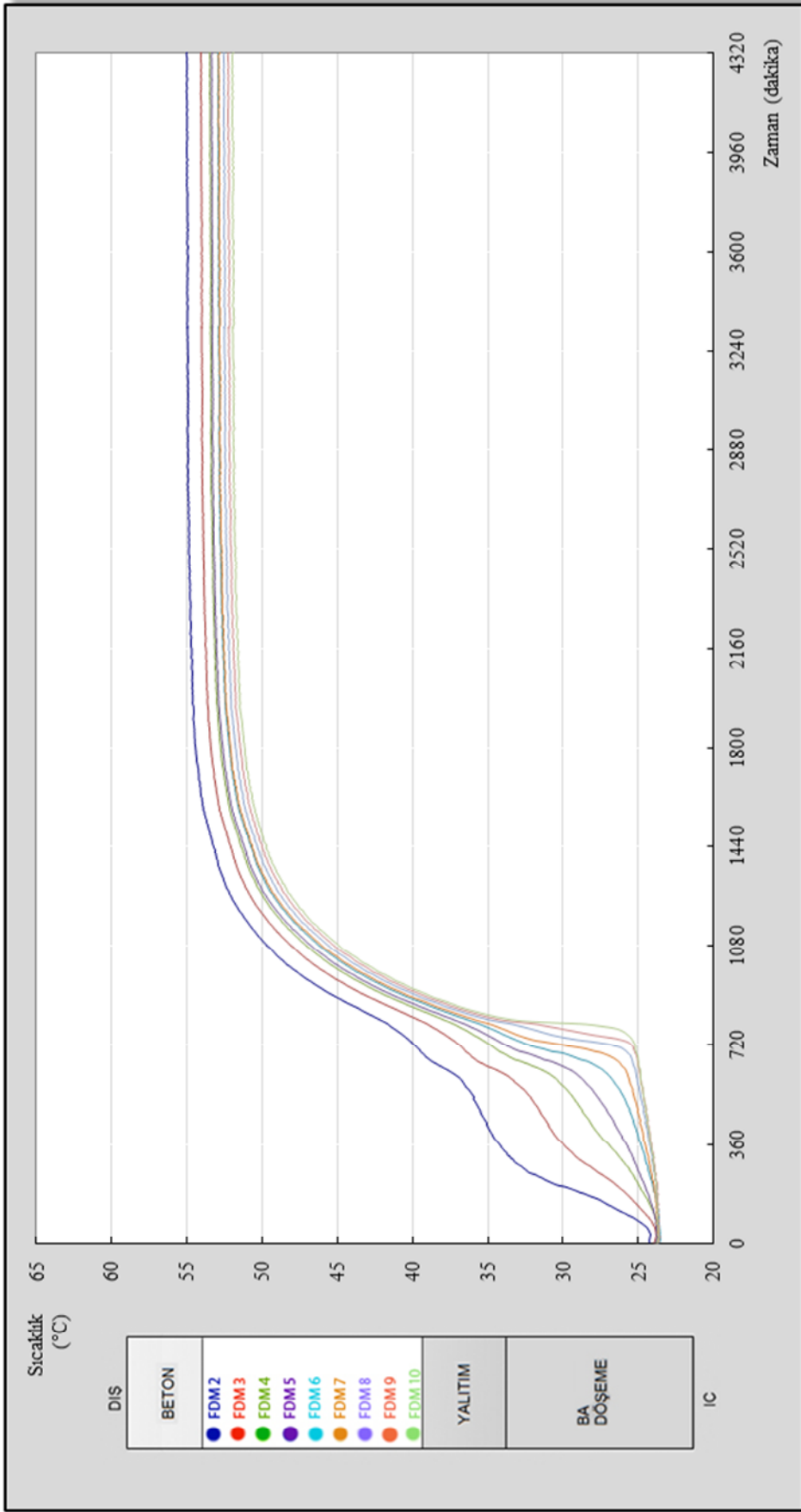
Şekil EK IV. 53 XPS - FDM arası sıcaklık ortalamaları (60°C 2. deneyde ölçülen)



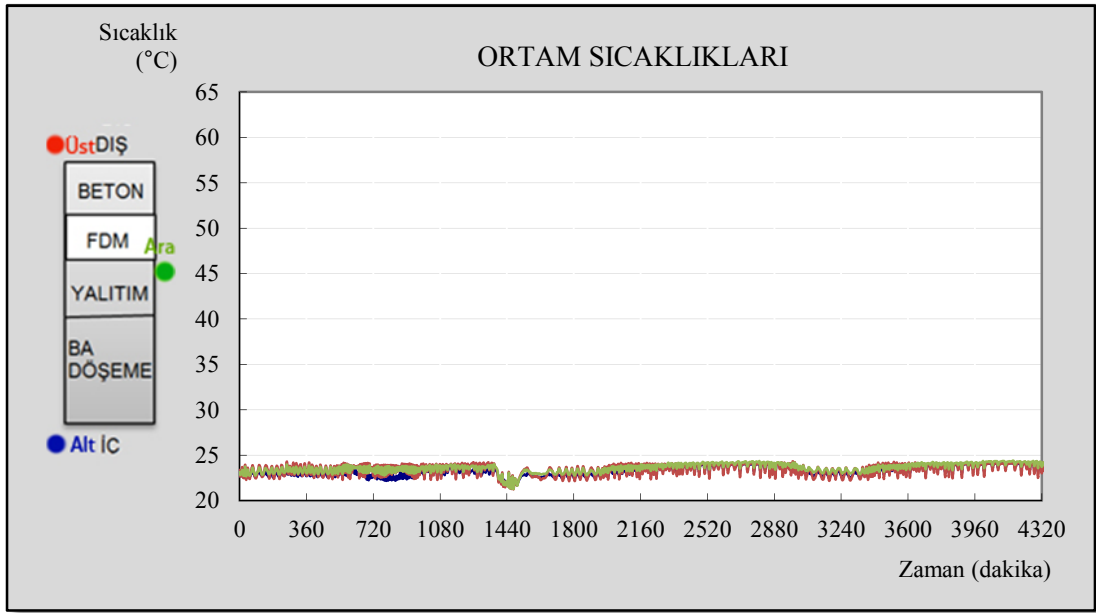
Şekil EK IV. 54 FDM – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (60°C 2. deneyde ölçülen)



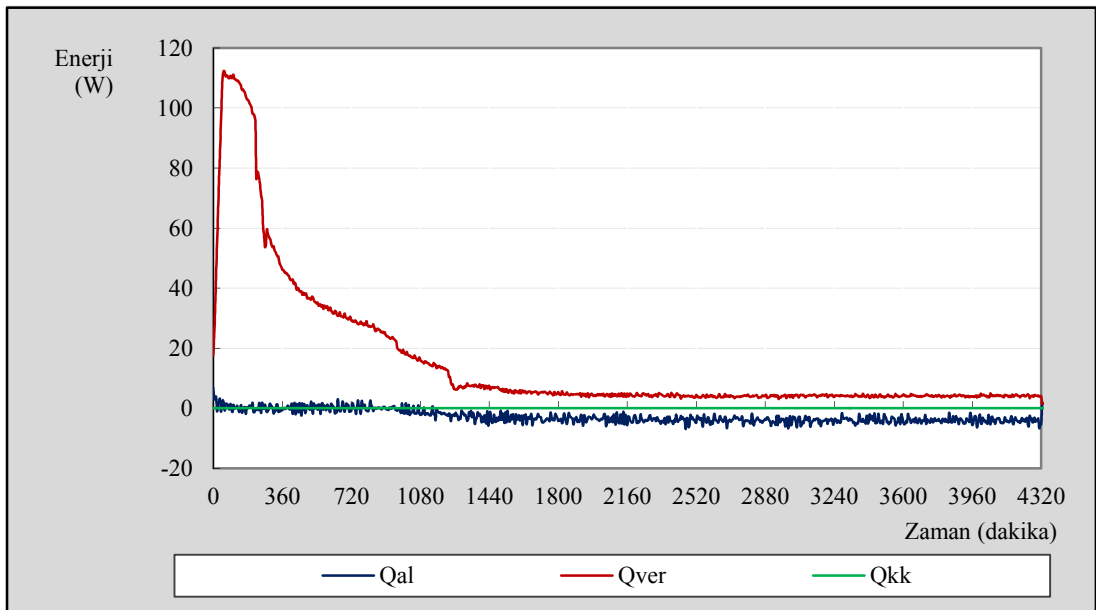
Şekil EK IV. 55 Üst yüzey sıcaklık ortalamaları (60°C 2. deneyde ölçülen)



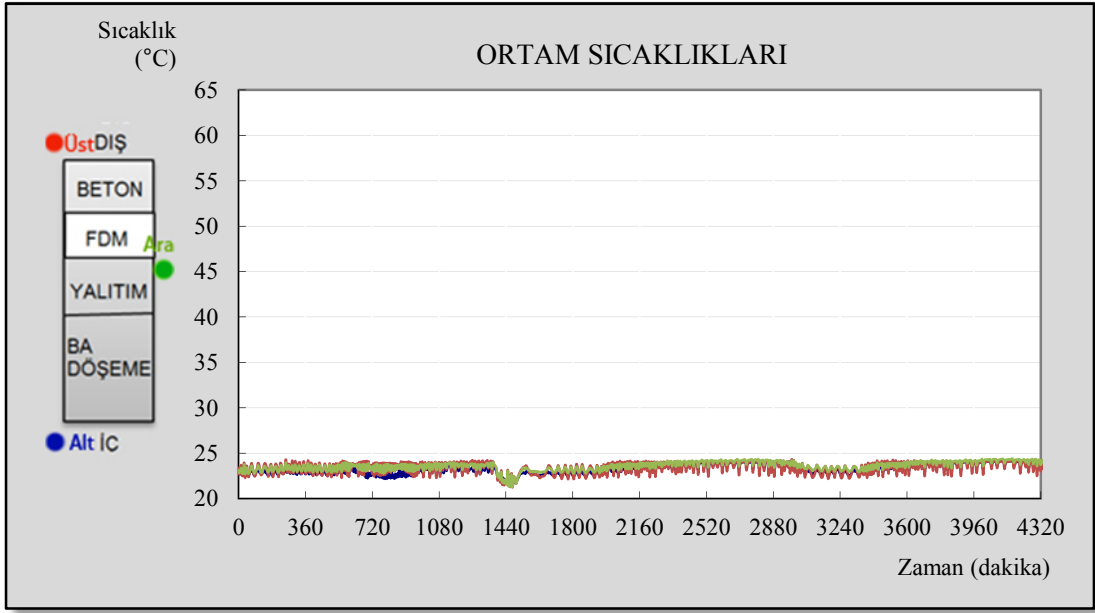
Şekil EK IV. 56 FDM sıcaklıkları (60°C 2. deneyde ölçülen)



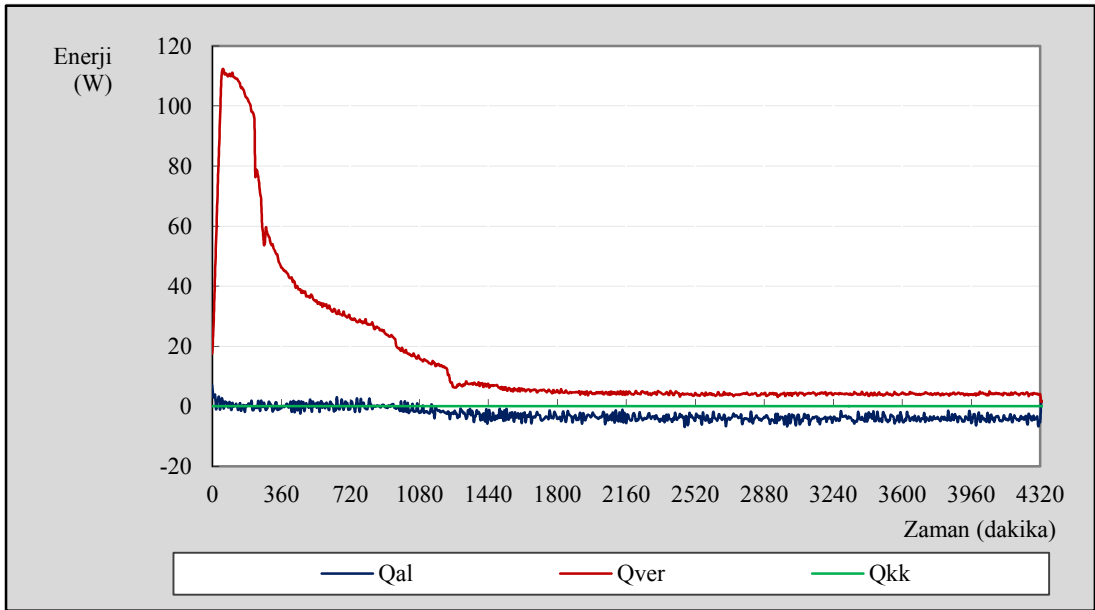
Şekil EK IV. 57 Ortamdan alınan sıcaklıklar (60°C 2. deneyde ölçülen)



Şekil EK IV. 58 Sistemdeki anlık enerji verileri (60°C 2. deney verileriyle hesaplanan)



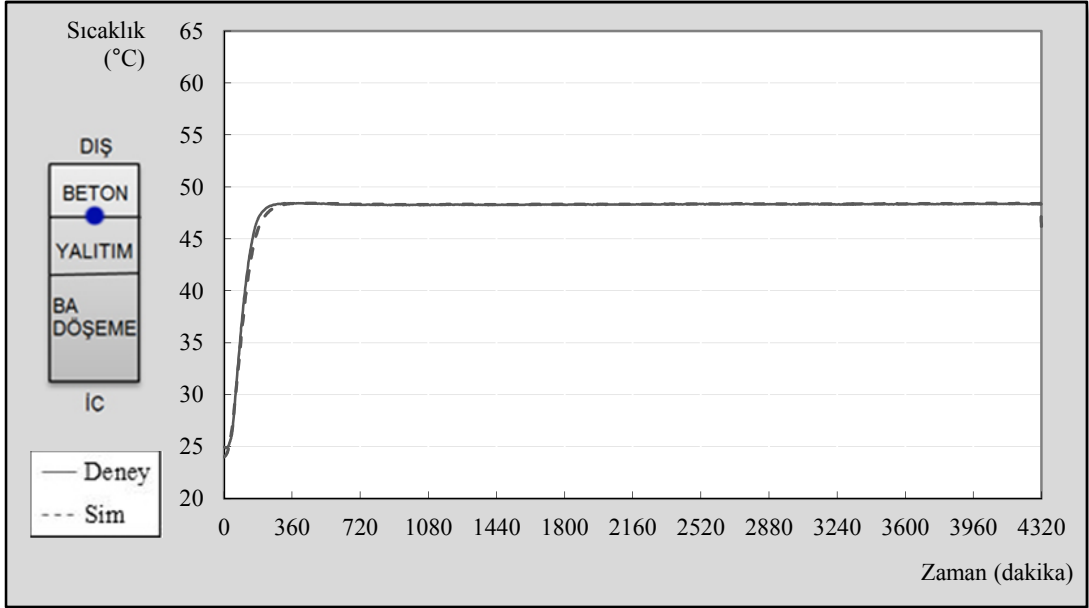
Şekil EK IV. 57 Ortamdan alınan sıcaklıklar (60°C 2. deneyde ölçülen)



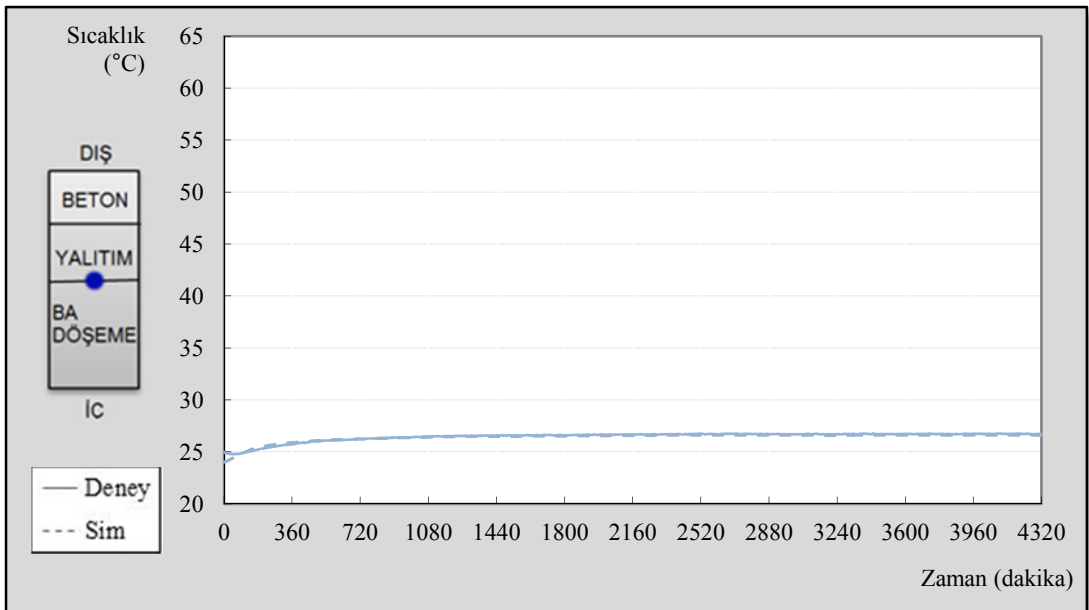
Şekil EK IV. 58 Sistemdeki anlık enerji verileri (60°C 2. deney verileriyle hesaplanan)

EK V Sayısal Çalışma ile Deneysel Çalışma Uyum Grafikleri

FDM'siz 1. Deney Simülasyonu

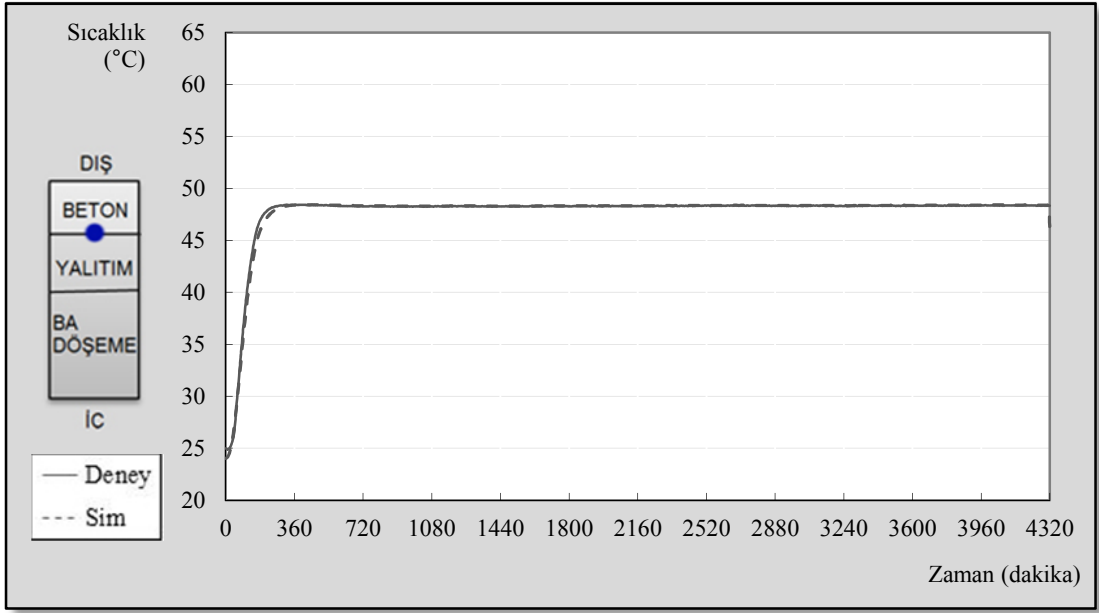


Şekil EK V.1 XPS – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 50°C 1. Deney-Simülasyon)

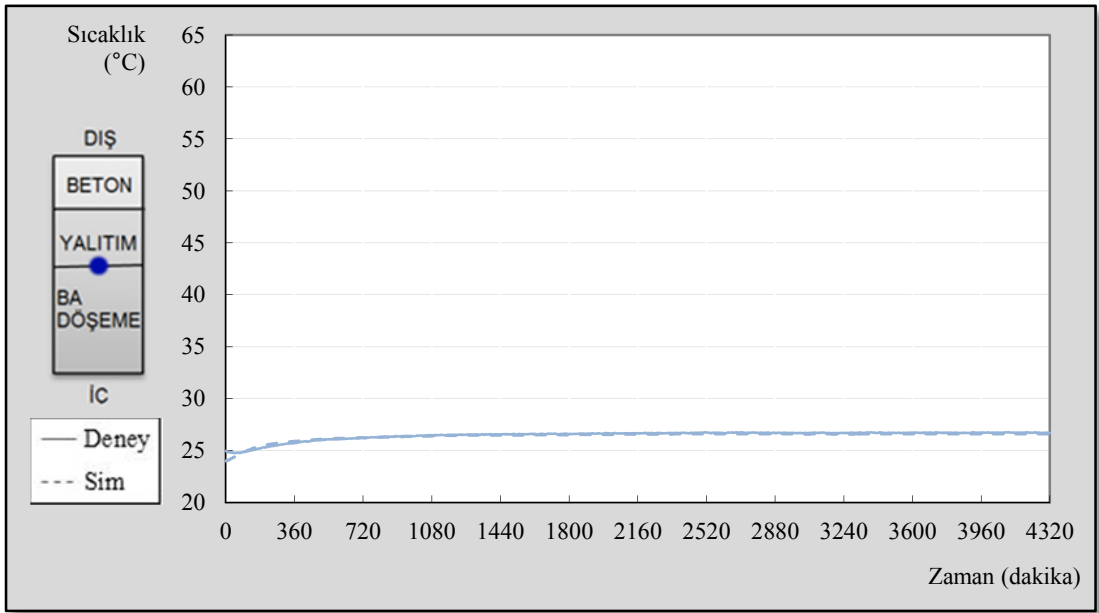


Şekil EK V.2 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (FDM'siz 50°C 1. Deney-Simülasyon)

FDM'siz 2. Deney Simülasyonu

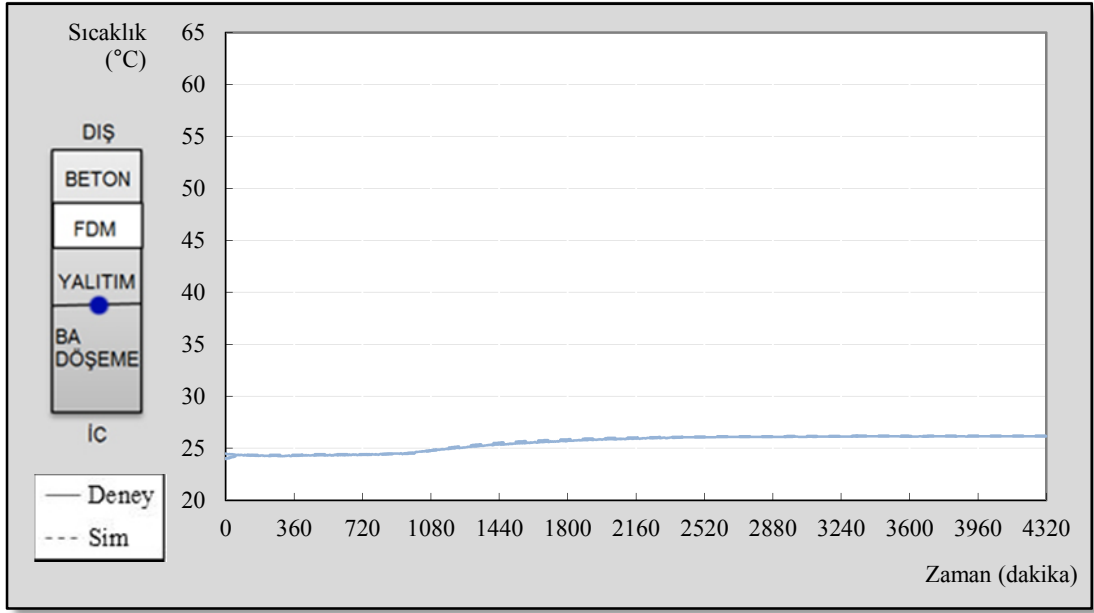


Şekil EK V.3 XPS – üst katmanlar arası sıcaklık ortalamaları (FDM'siz 2. Deney-Simülasyon)

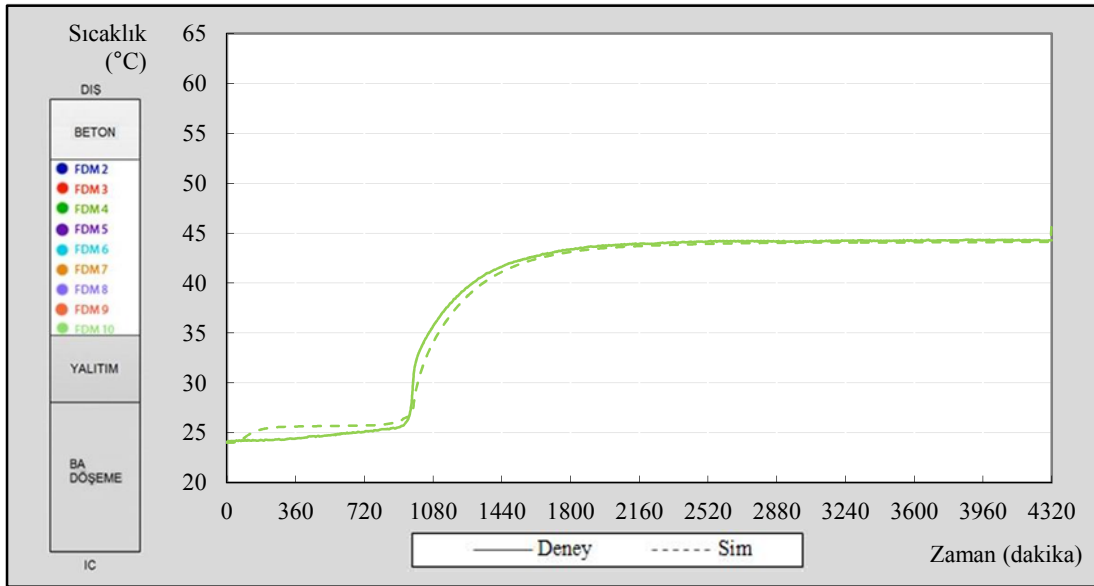


Şekil EK V.4 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (FDM'siz 2. Deney-Simülasyon)

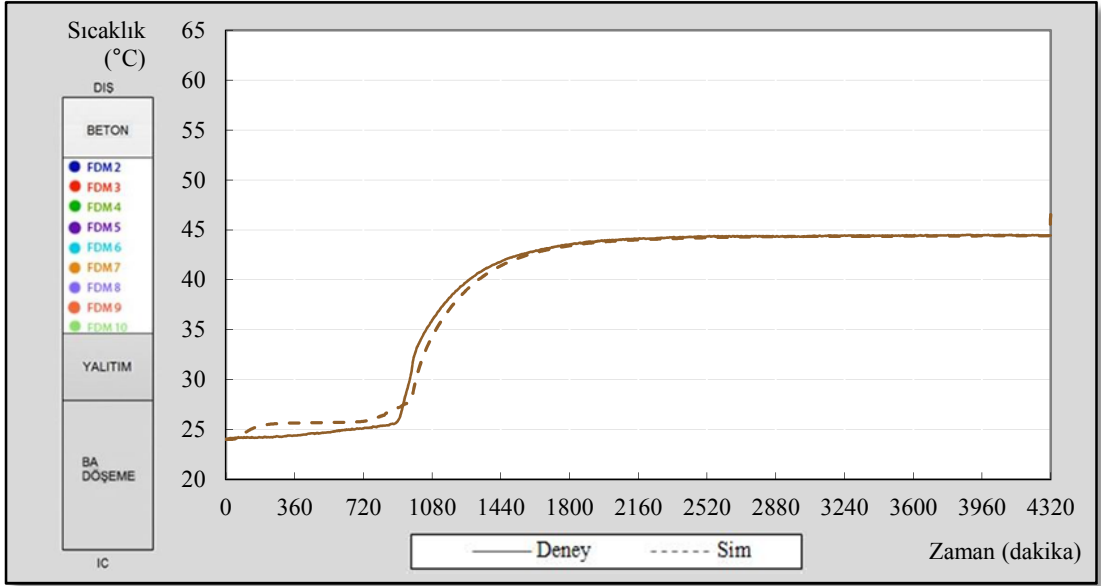
50 °C 1. Deney Simülasyonu



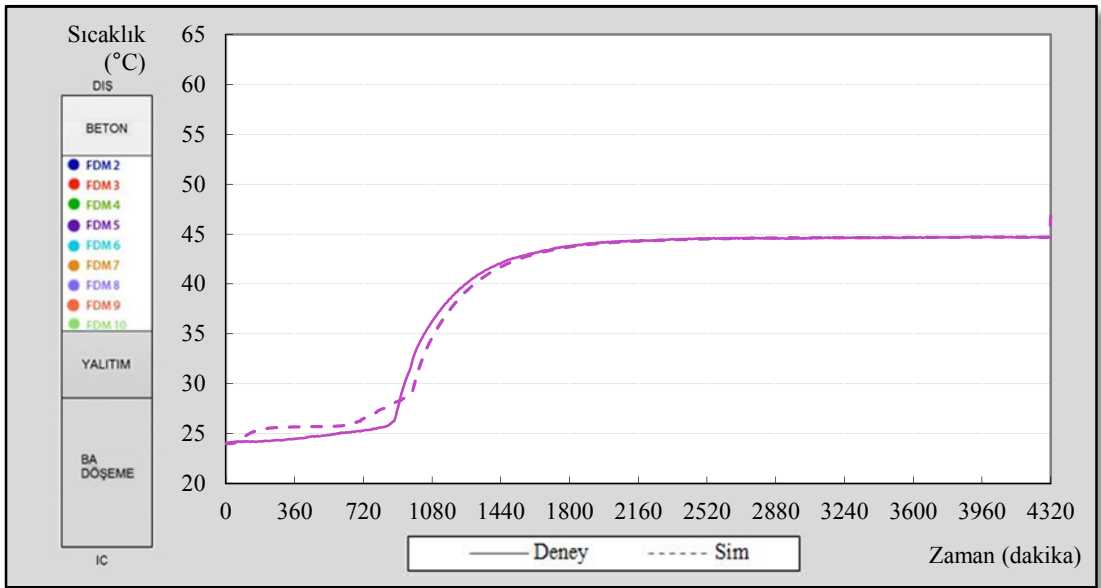
Şekil EK V. 5 Betonarme döşeme - XPS arası sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



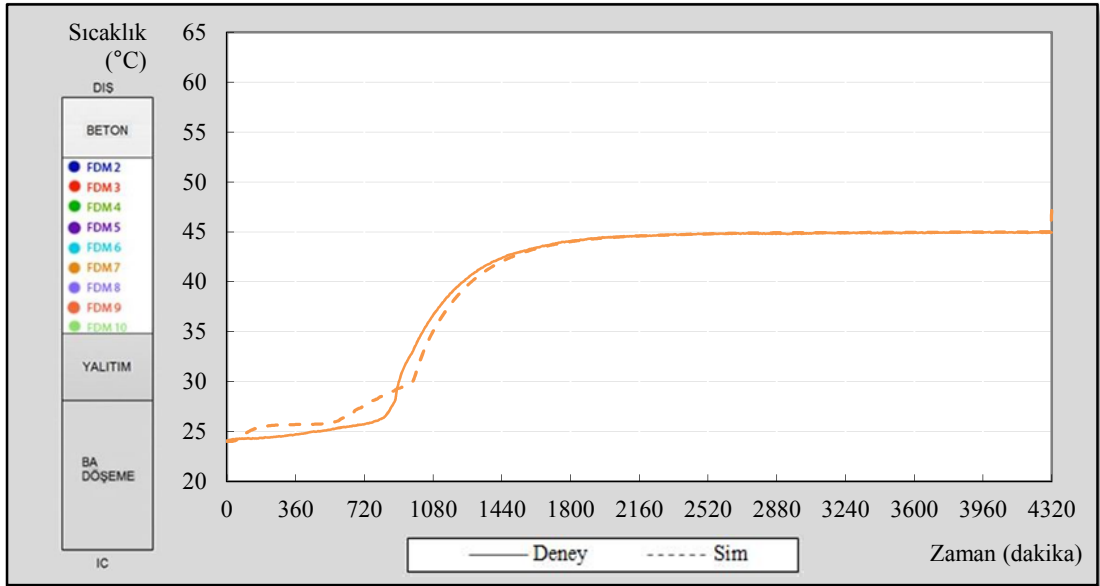
Şekil EK V. 6 FDM10 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



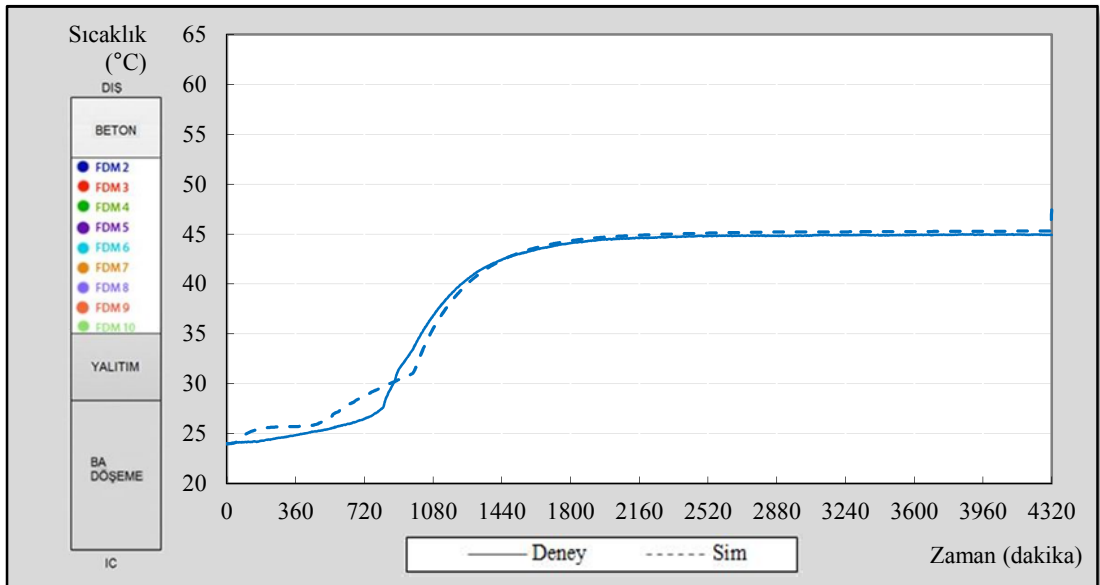
Şekil EK V.7 FDM9 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



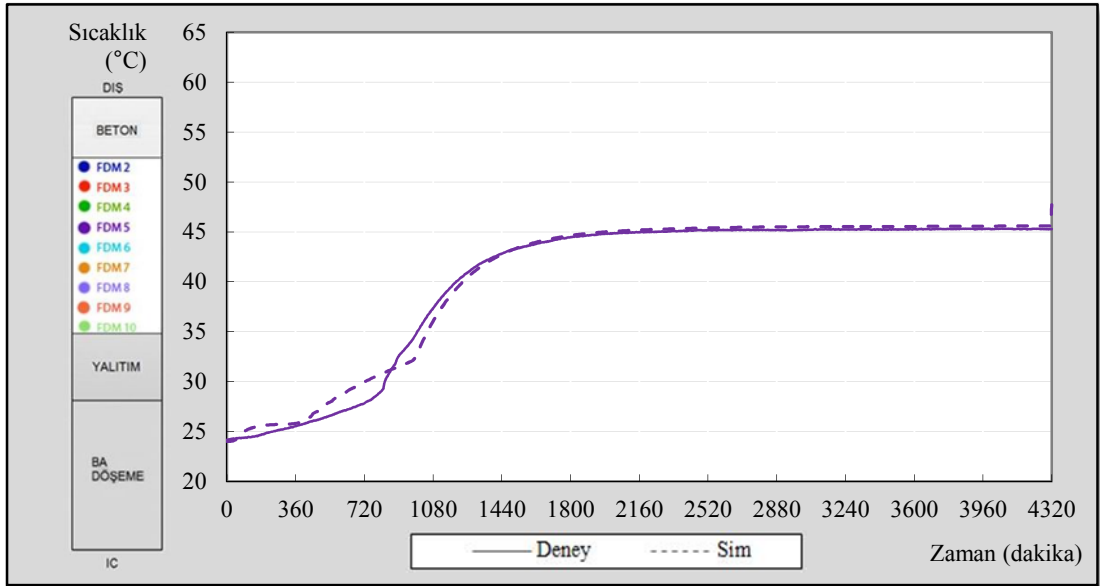
Şekil EK V.8 FDM8 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



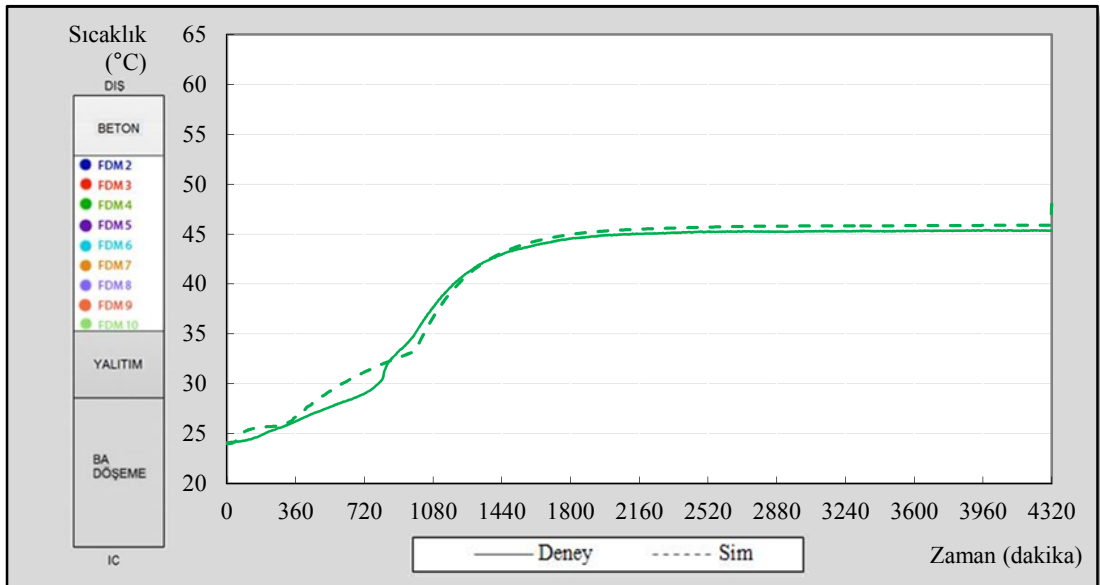
Şekil EK V.9 FDM7 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



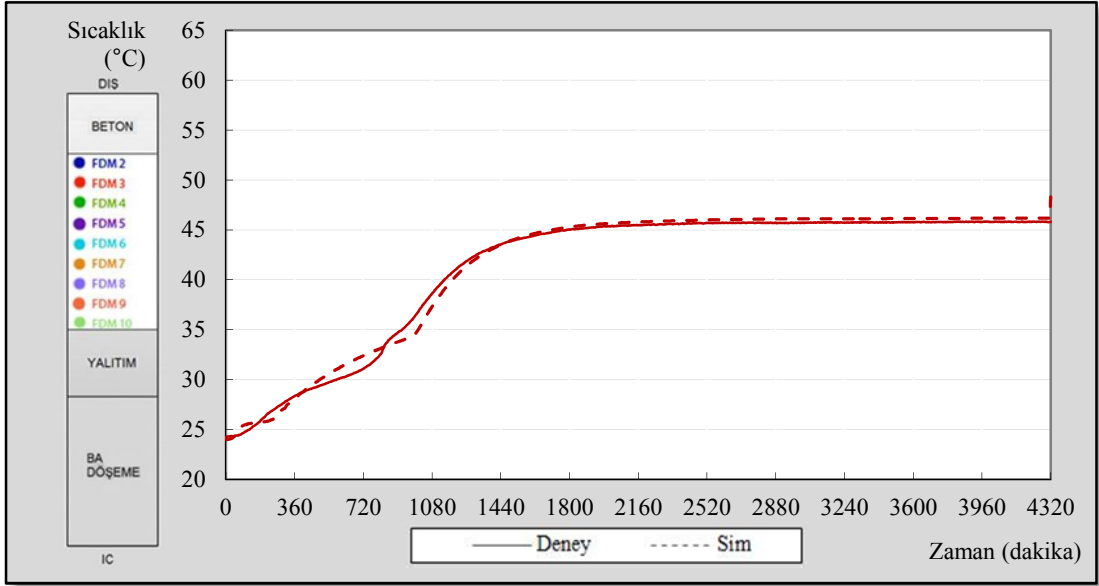
Şekil EK V.10 FDM6 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



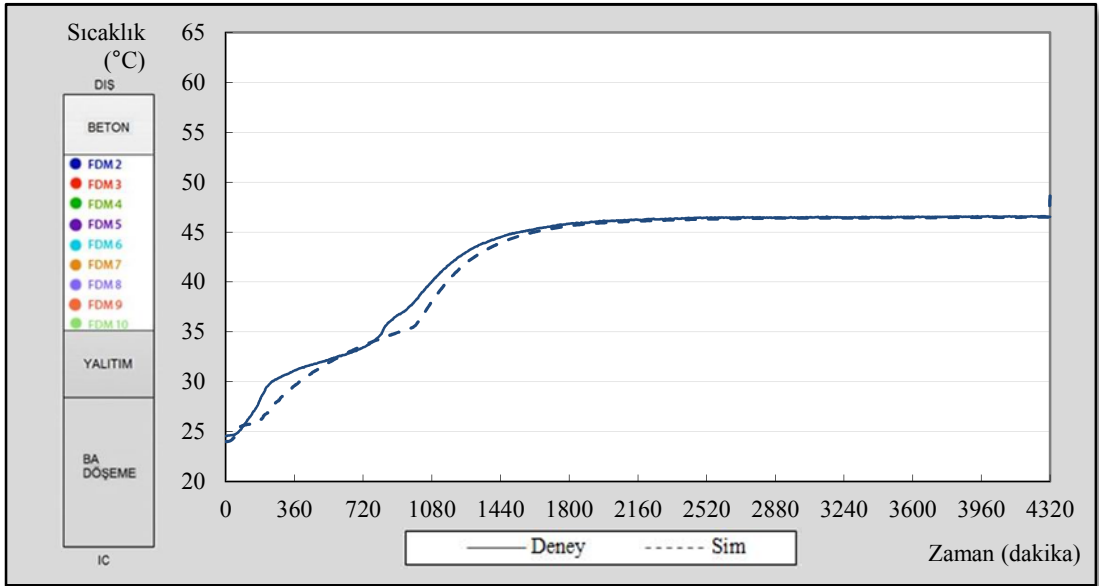
Şekil EK V.11 FDM5 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)



Şekil EK V.12 FDM4 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)

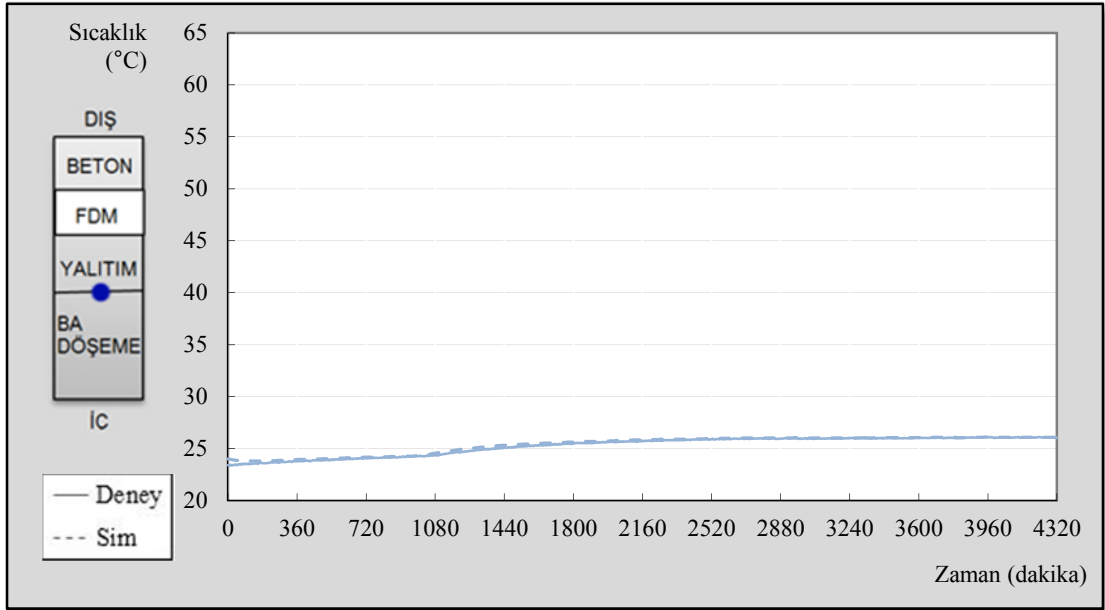


Şekil EK V.13 FDM3 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)

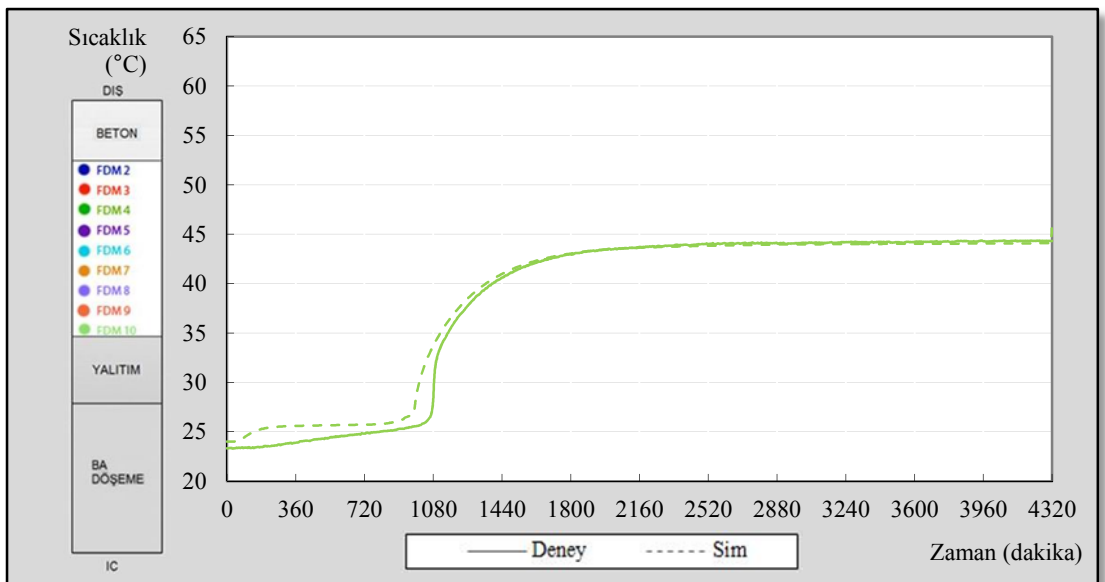


Şekil EK V.14 FDM2 sıcaklıkları (50°C 1. Deney-Simülasyon)

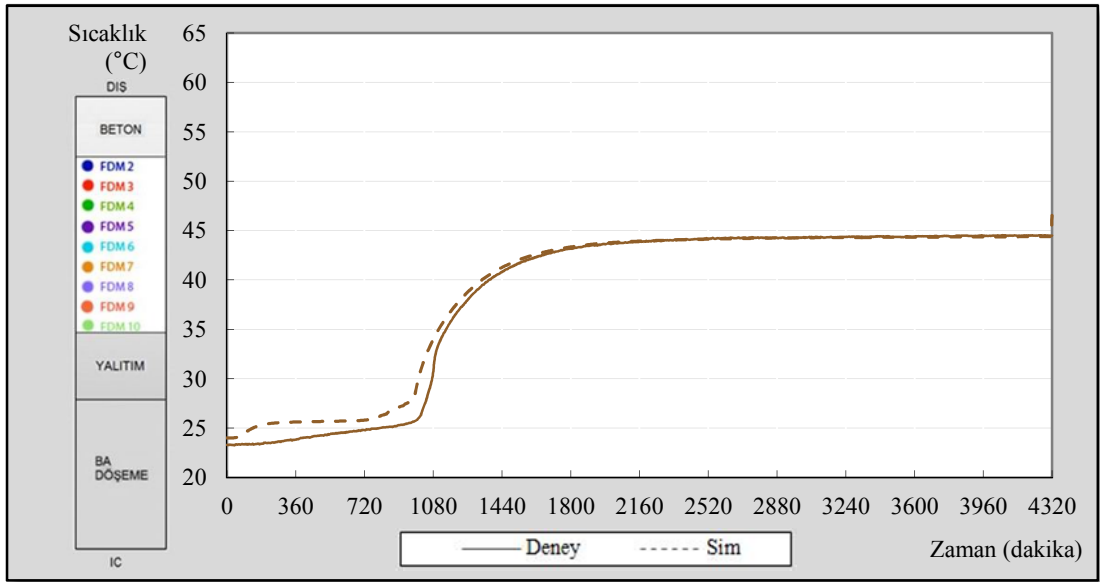
50 °C 2. Deney Simülasyonu



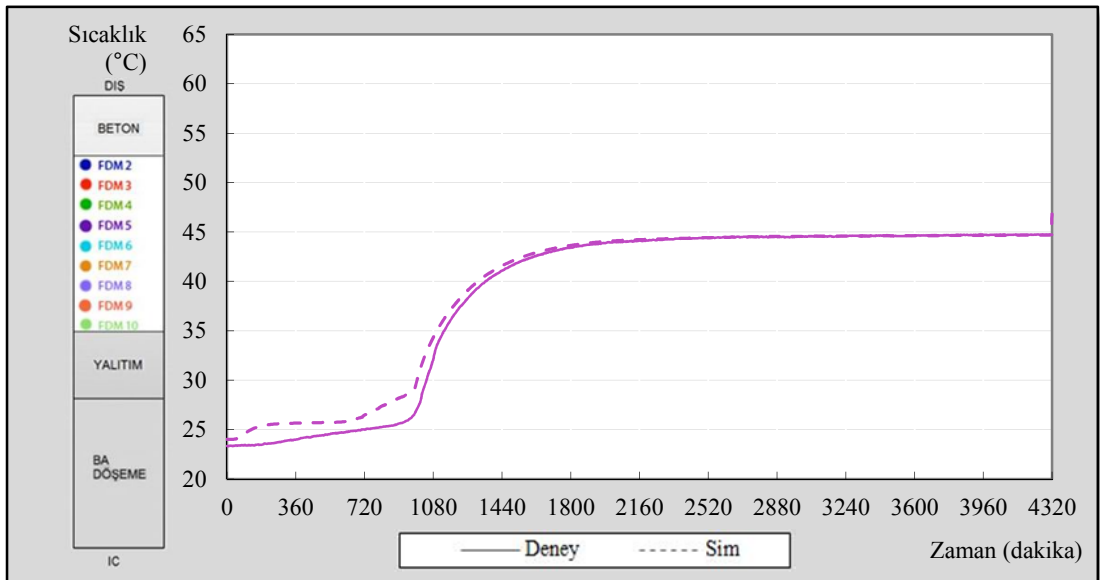
Şekil EK V.15 Betonarme üstü sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



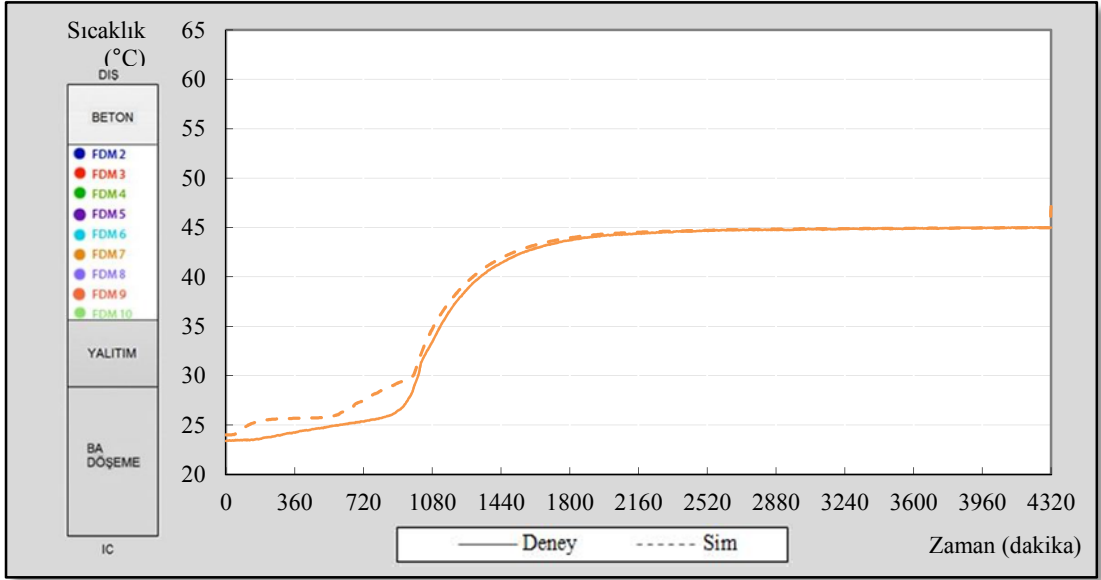
Şekil EK V.16 FDM10 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



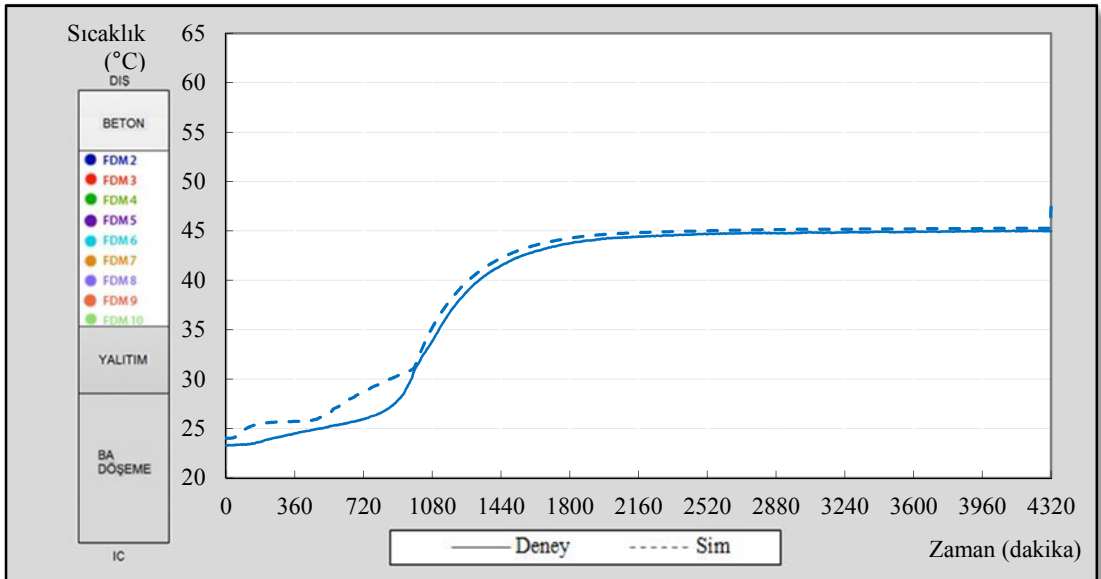
Şekil EK V.17 FDM9 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



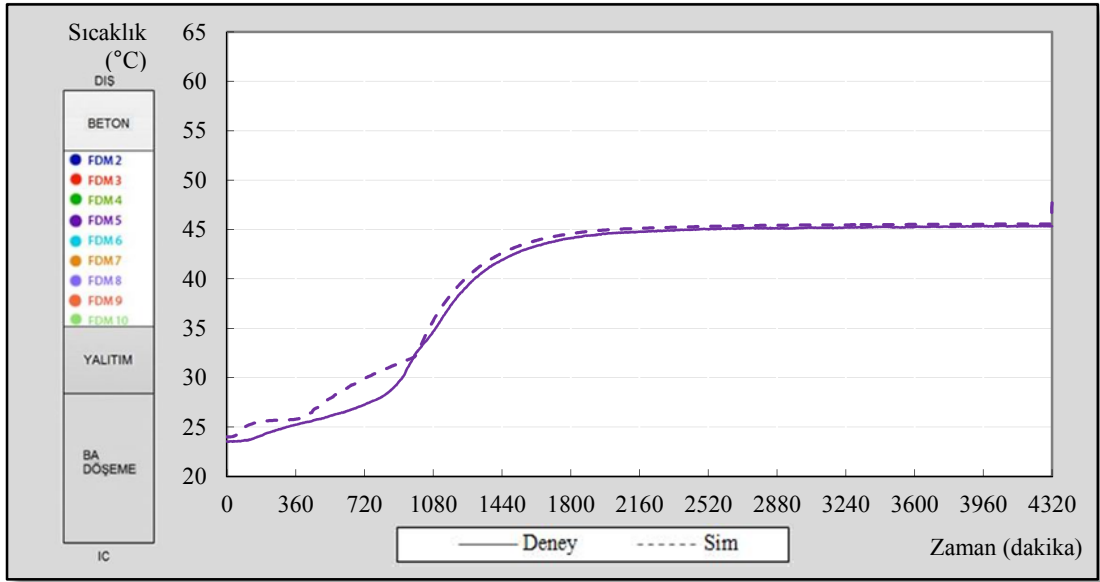
Şekil EK V.18 FDM8 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



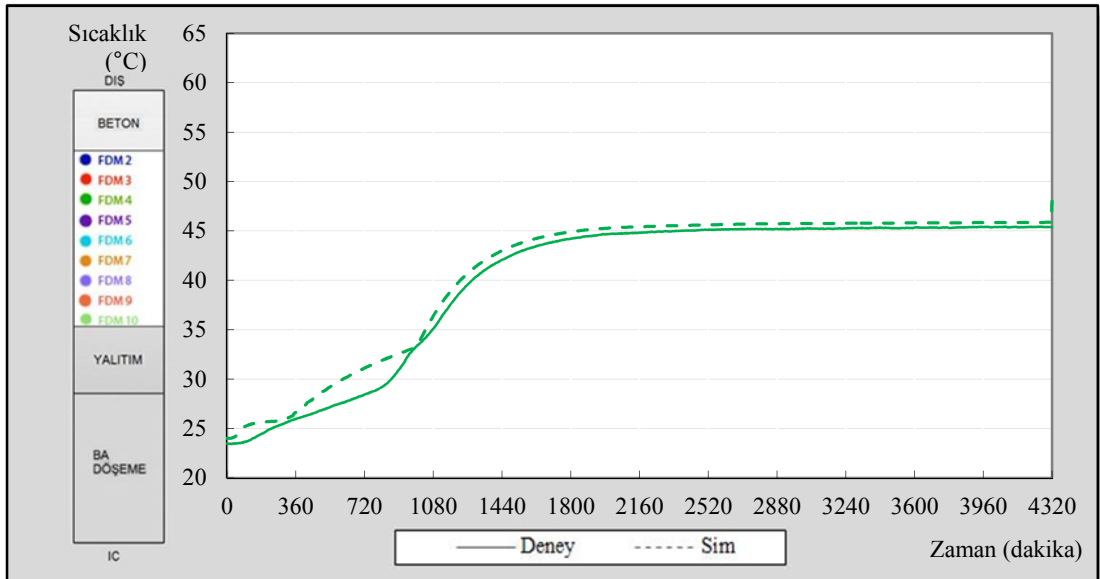
Şekil EK V.19 FDM7 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



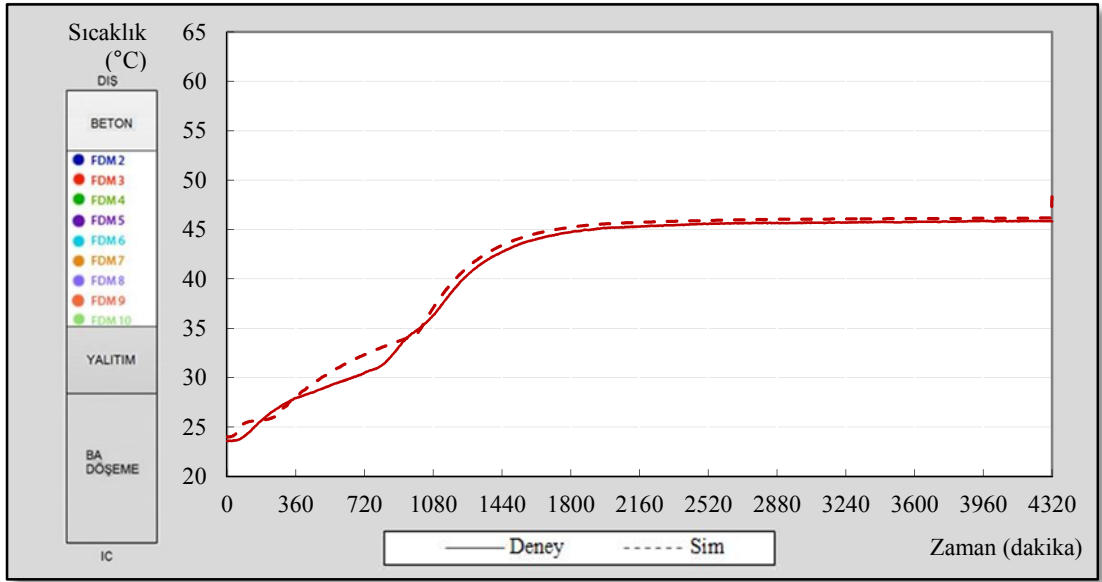
Şekil EK V 20 FDM6 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



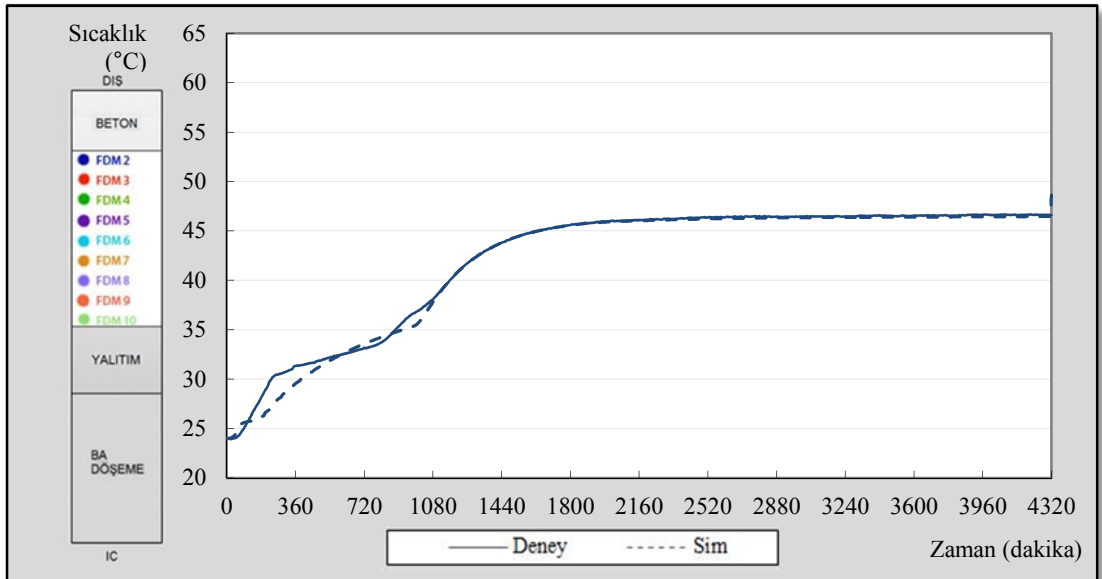
Şekil EK V.21 FDM5 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)



Şekil EK V.22 FDM4 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)

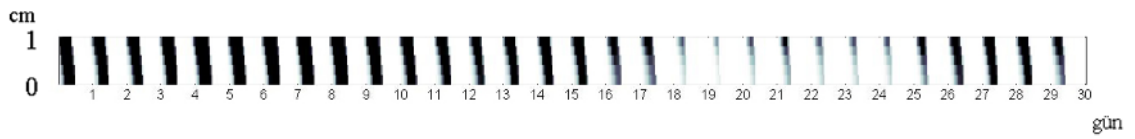


Şekil EK V.23 FDM3 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)

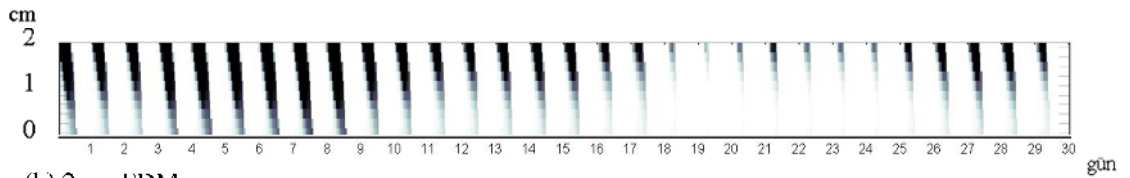


Şekil EK V.24 FDM2 sıcaklıkları (50°C 2. Deney-Simülasyon)

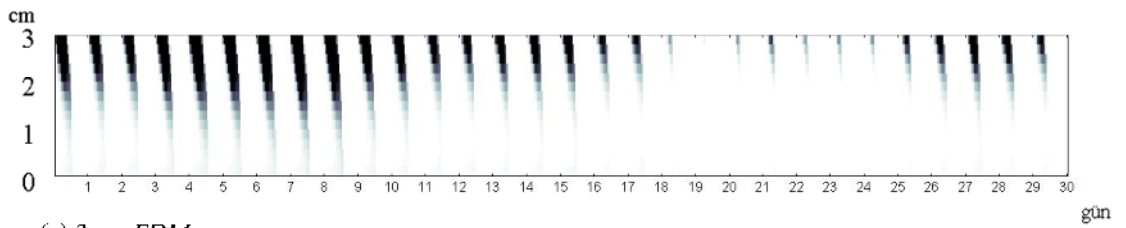
EK VI Simülasyon Faz Değişim Grafikleri



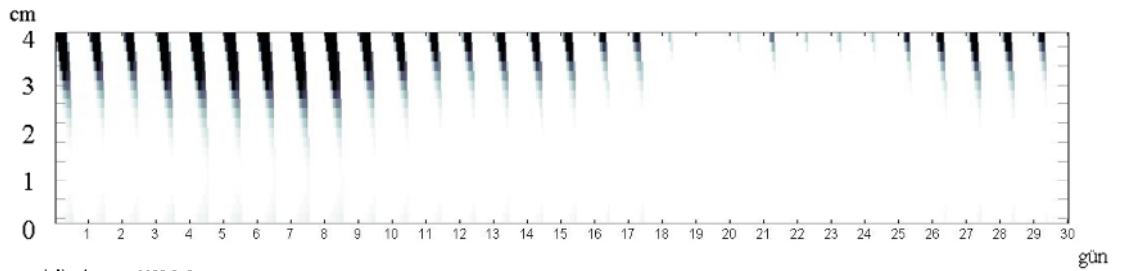
(a) 1 cm FDM



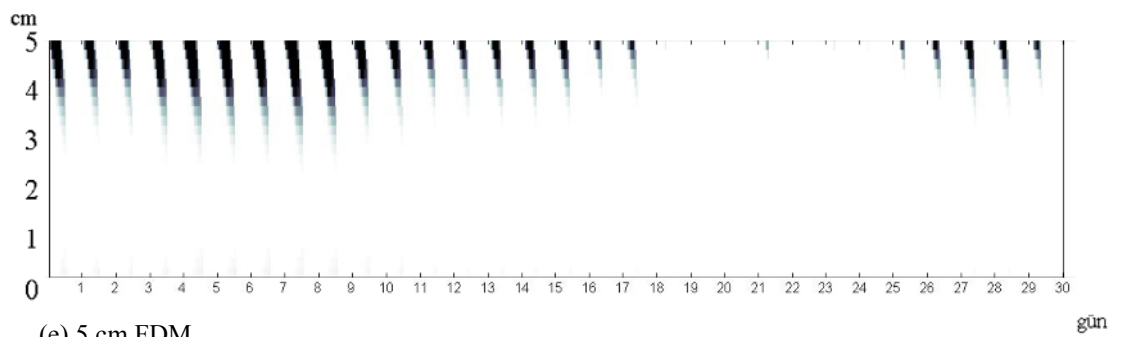
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



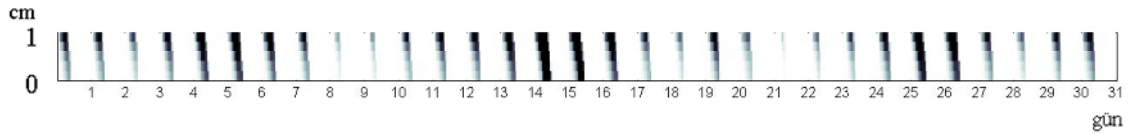
(d) 4 cm FDM



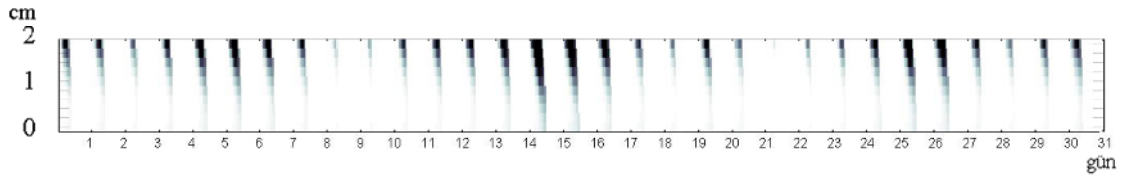
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.1 İzmir'de Haziran ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

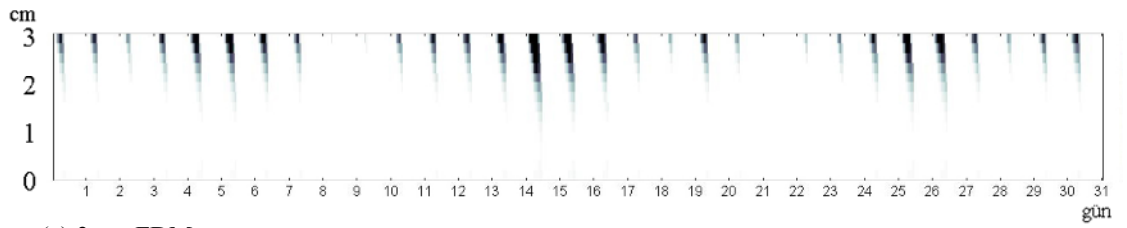
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



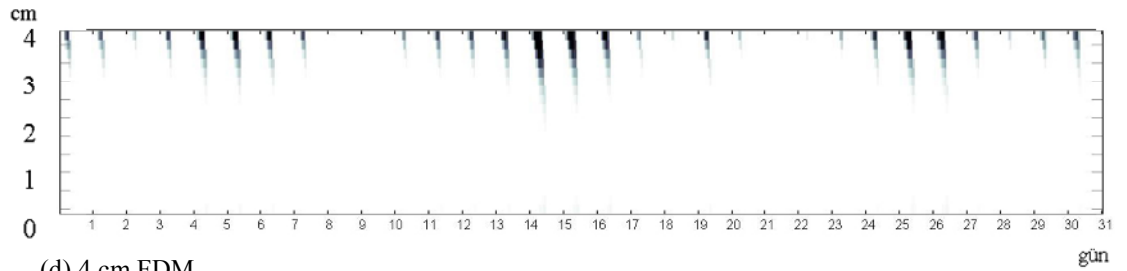
(a) 1 cm FDM



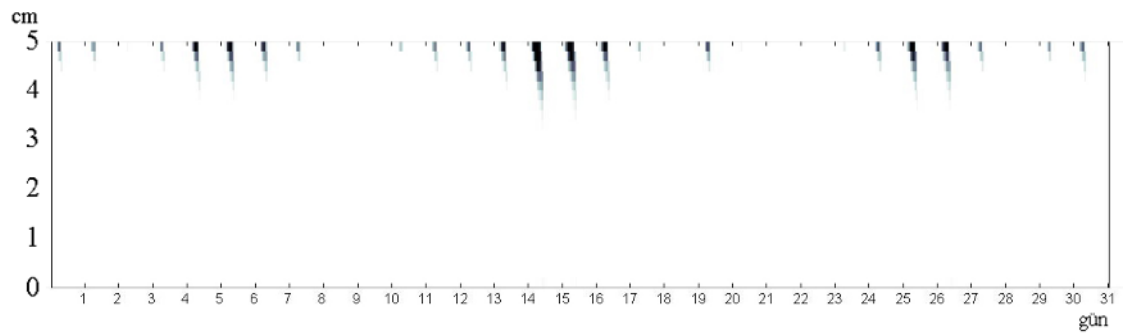
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



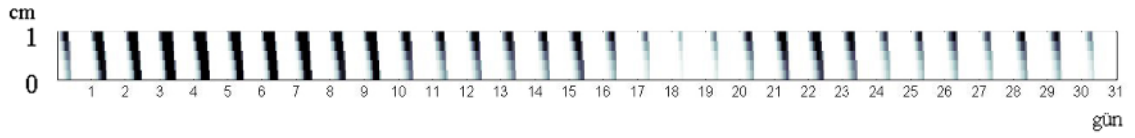
(d) 4 cm FDM



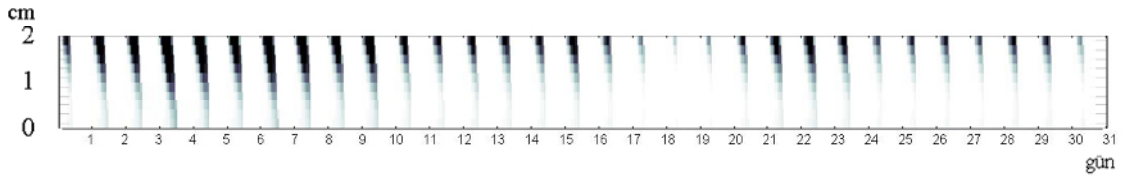
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.2 İzmir'de Temmuz ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

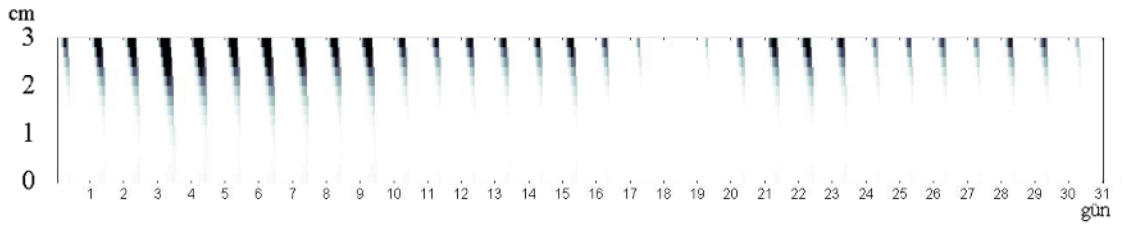
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



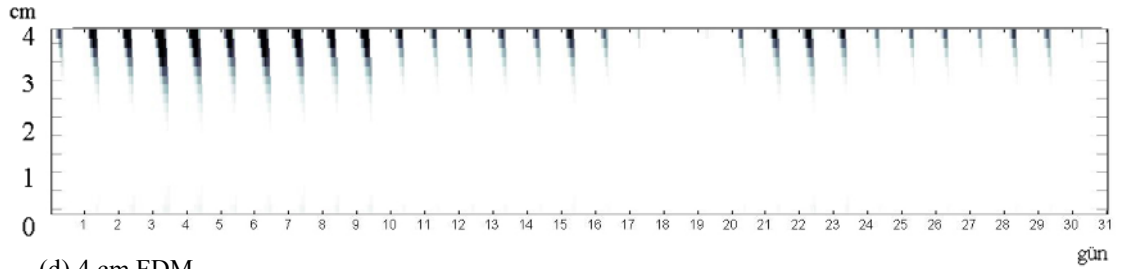
(a) 1 cm FDM



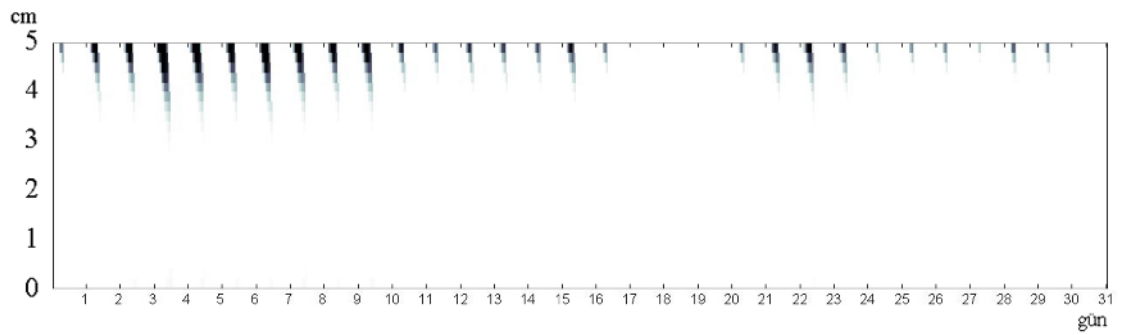
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



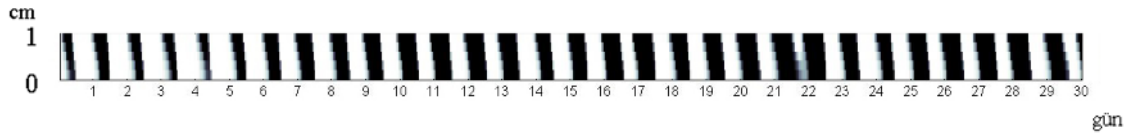
(d) 4 cm FDM



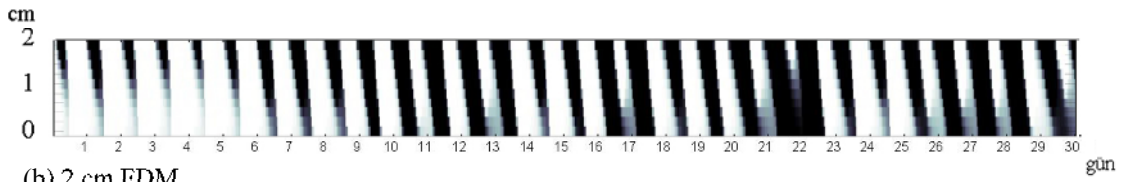
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.3 İzmir'de Ağustos ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

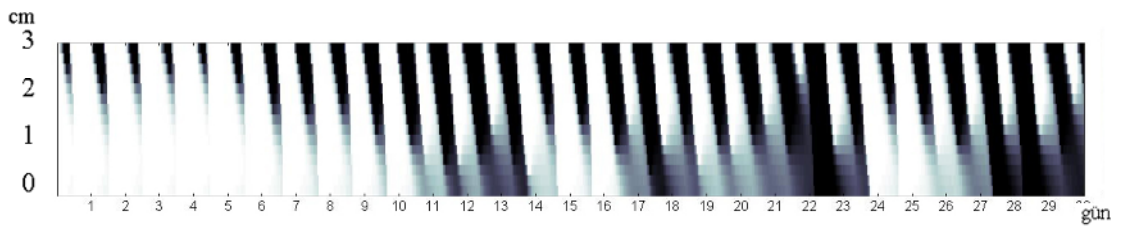
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



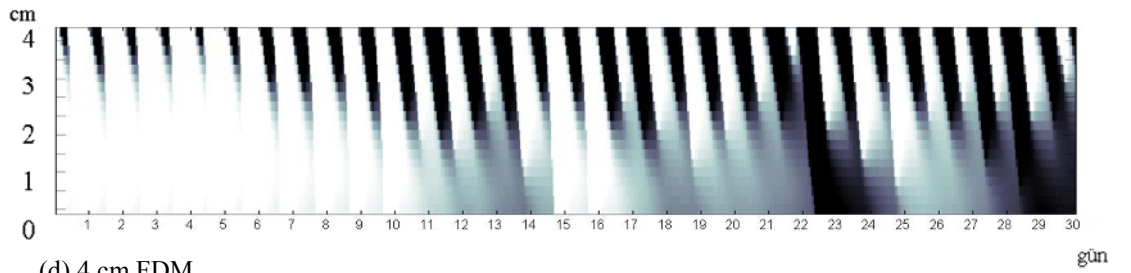
(a) 1 cm FDM



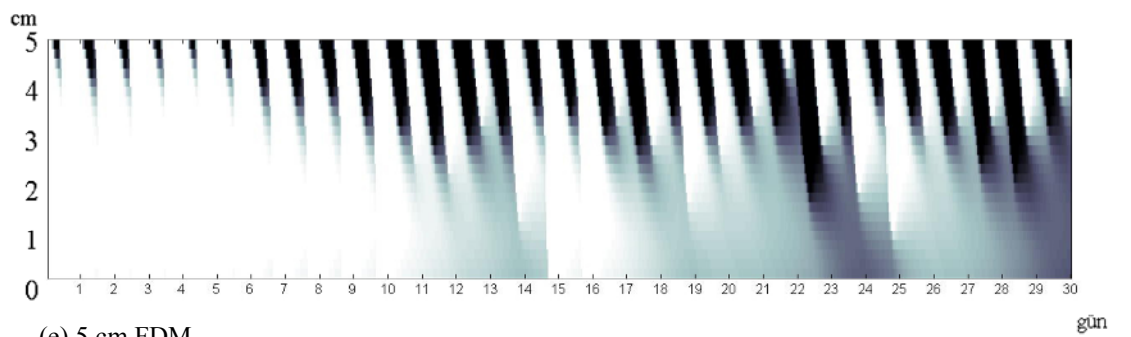
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



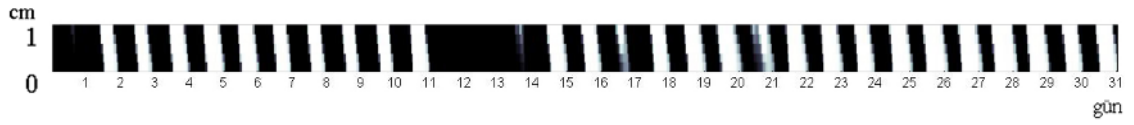
(d) 4 cm FDM



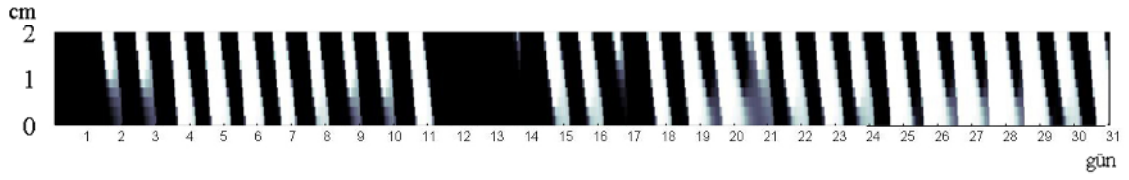
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.4 İzmir'de Eylül ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

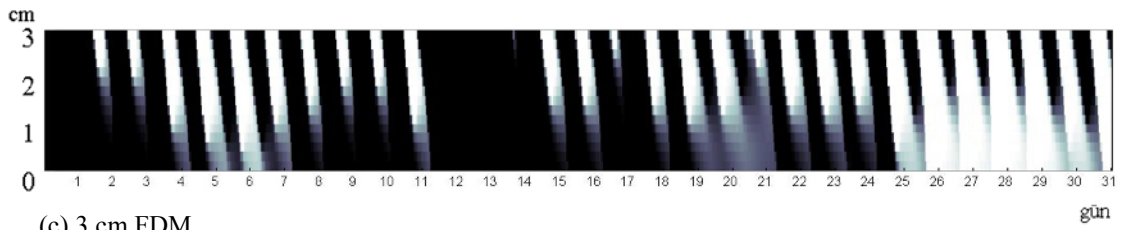
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



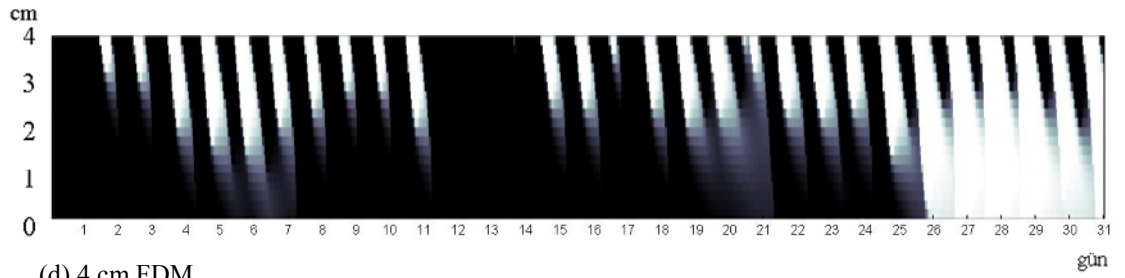
(a) 1 cm FDM



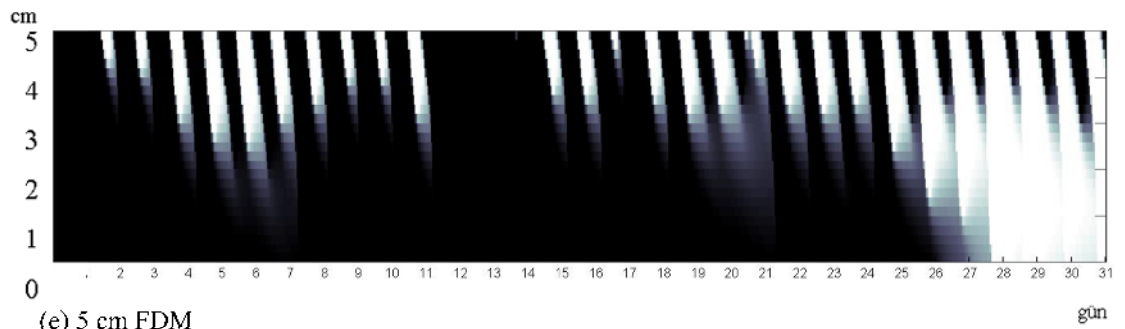
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



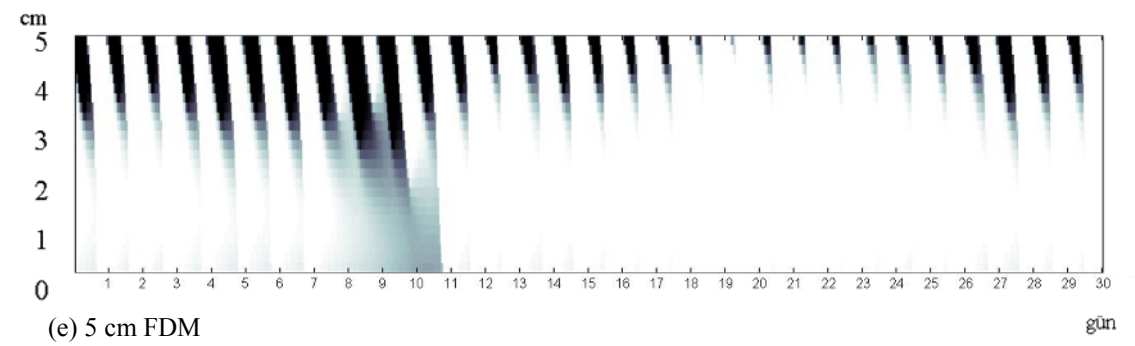
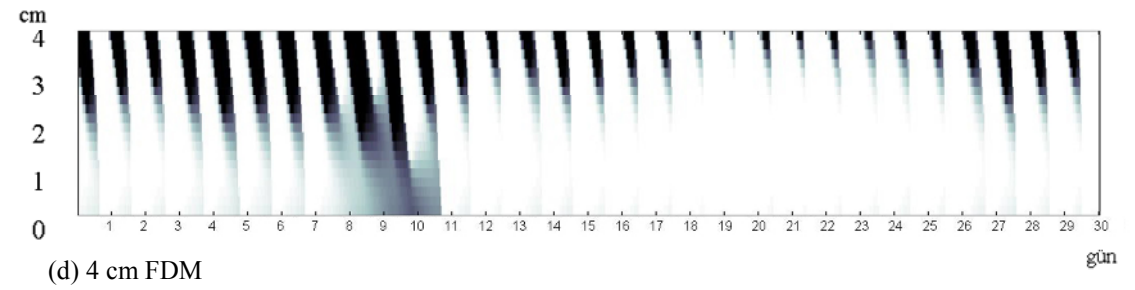
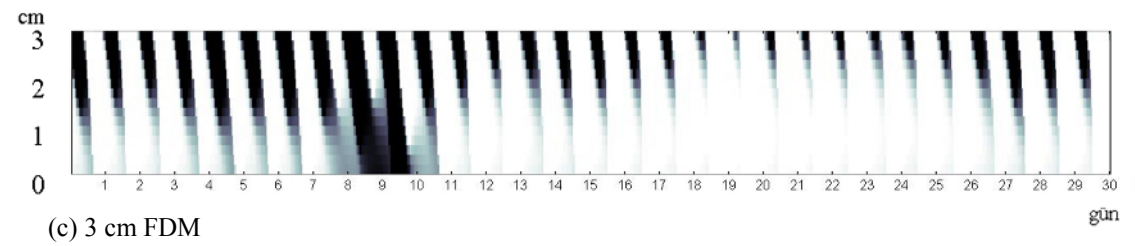
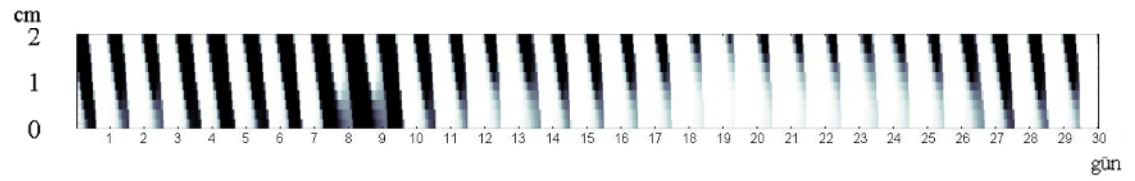
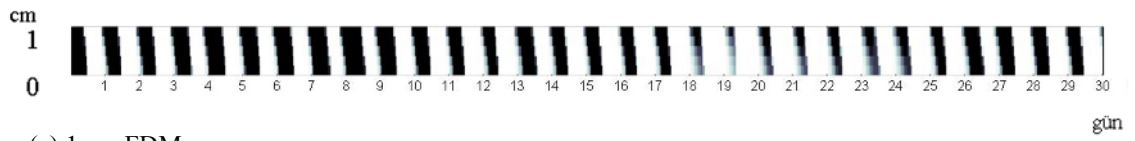
(d) 4 cm FDM



(e) 5 cm FDM

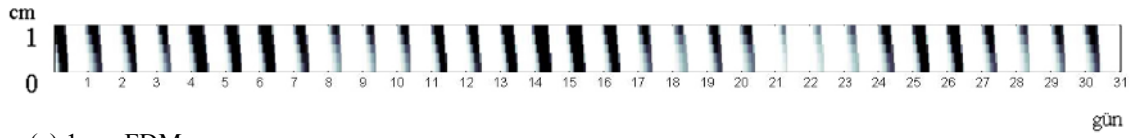
Şekil EKVI.5 İstanbul'da Mayıs ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

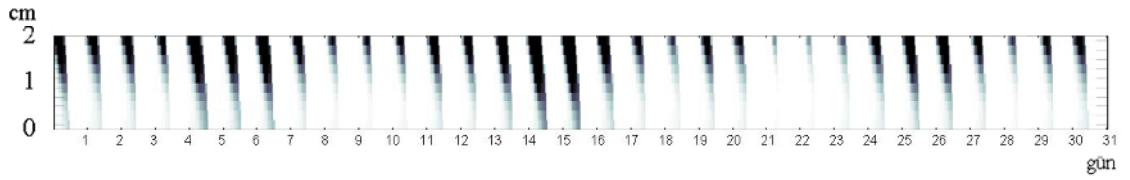


Şekil EKVI.6 İstanbul'da Haziran ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

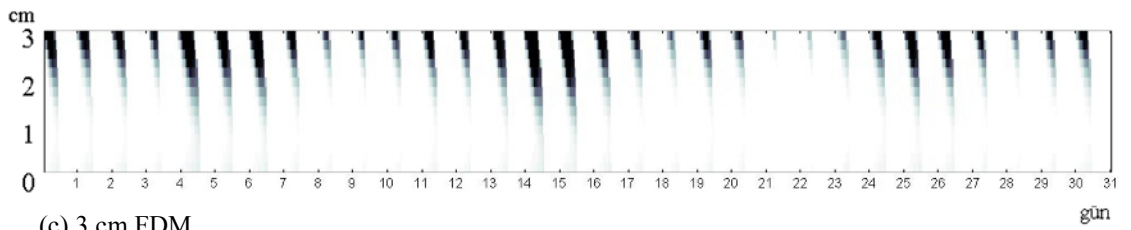
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



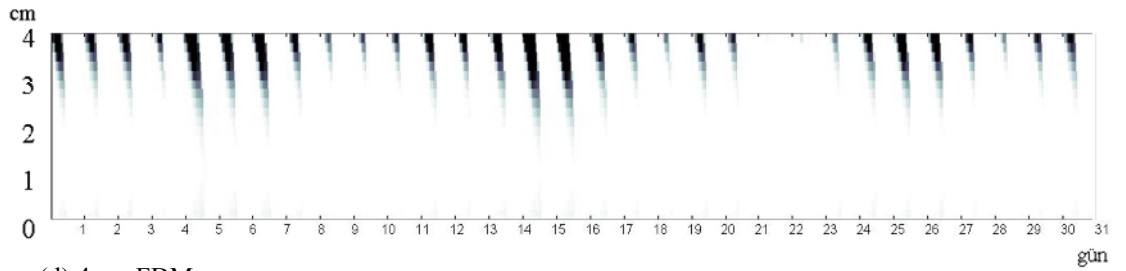
(a) 1 cm FDM



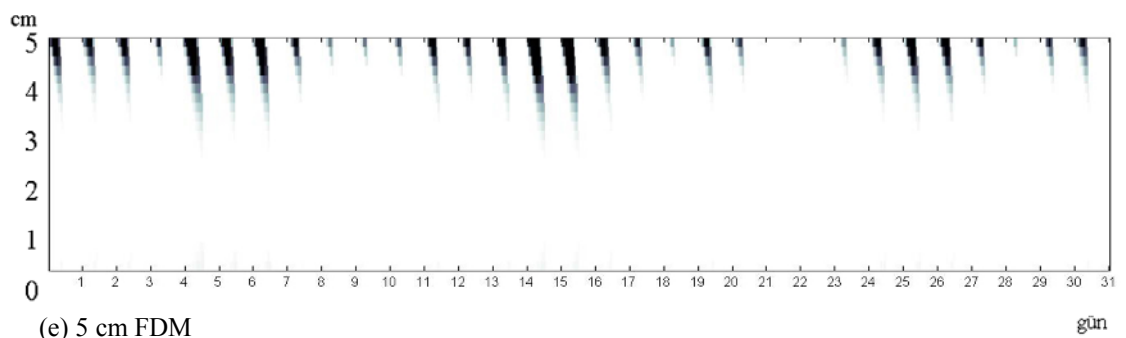
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



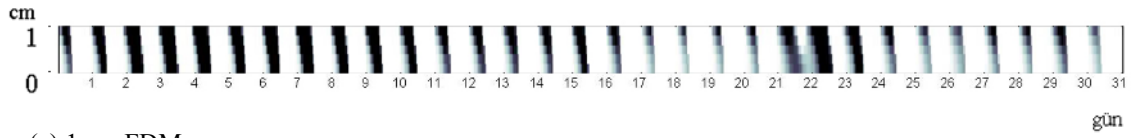
(d) 4 cm FDM



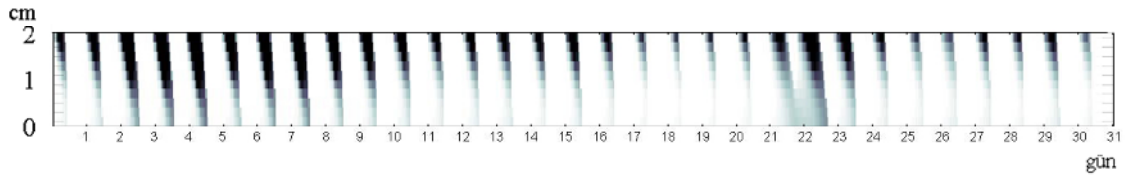
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.7 İstanbul'da Temmuz ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

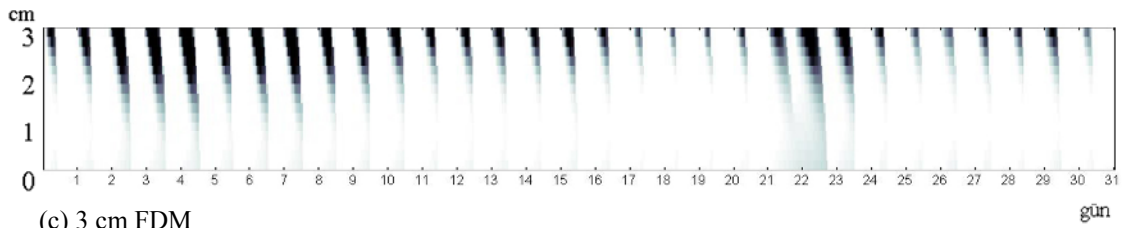
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



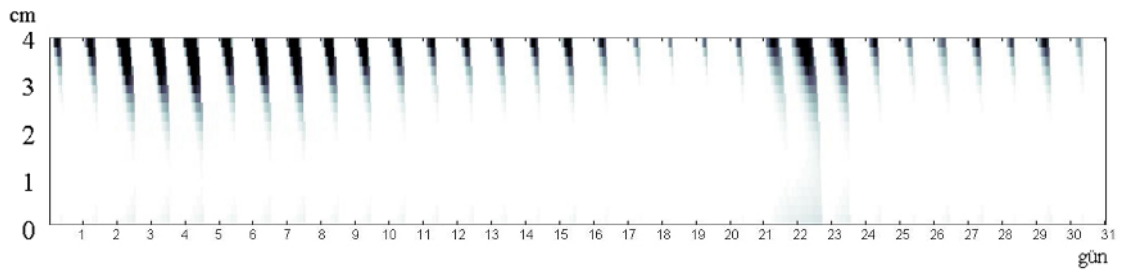
(a) 1 cm FDM



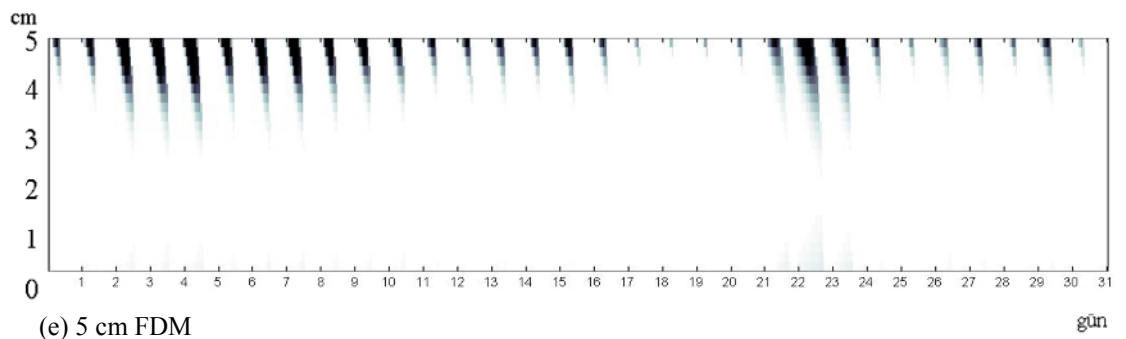
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



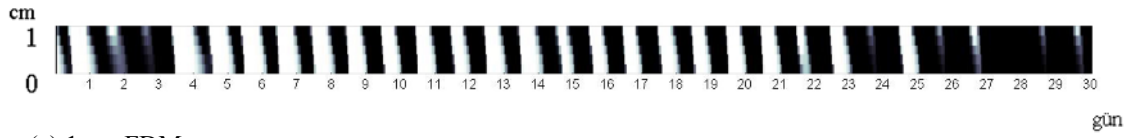
(d) 4 cm FDM



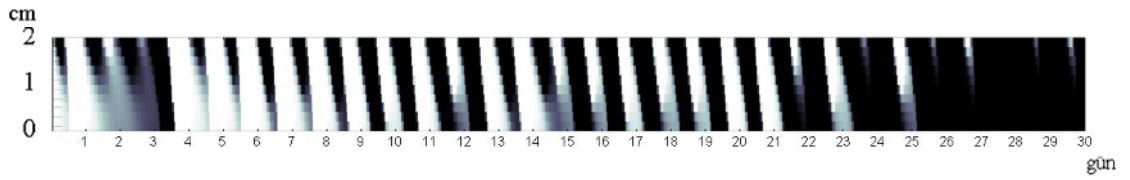
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.8 İstanbul'da Ağustos ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

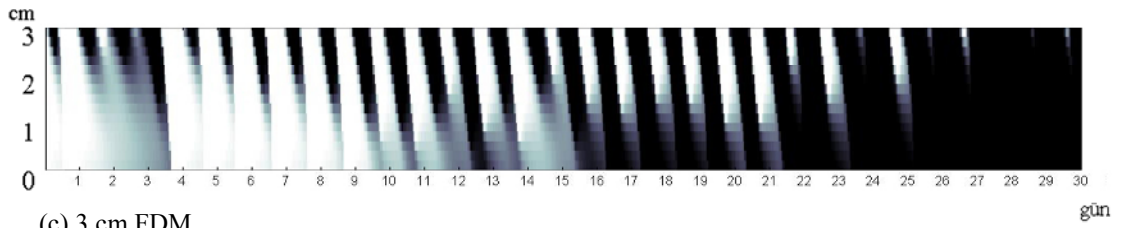
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



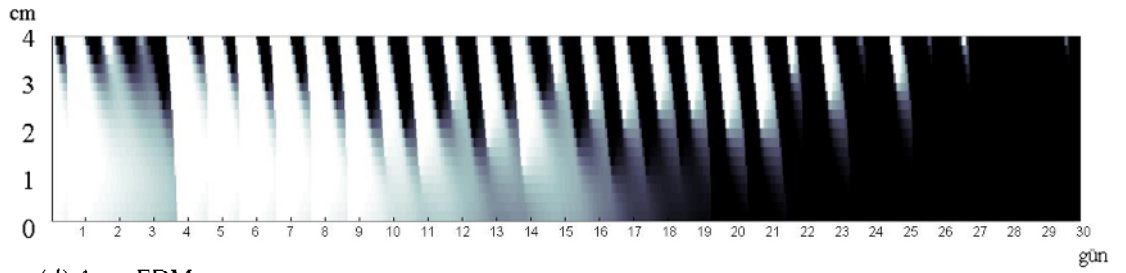
(a) 1 cm FDM



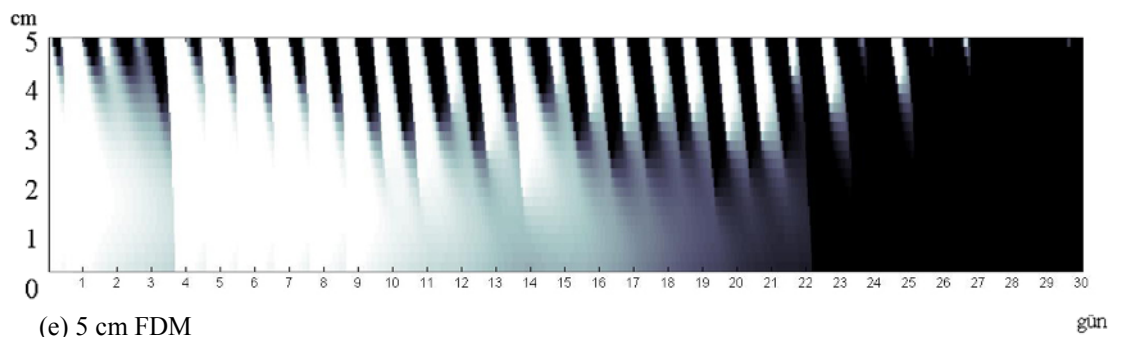
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



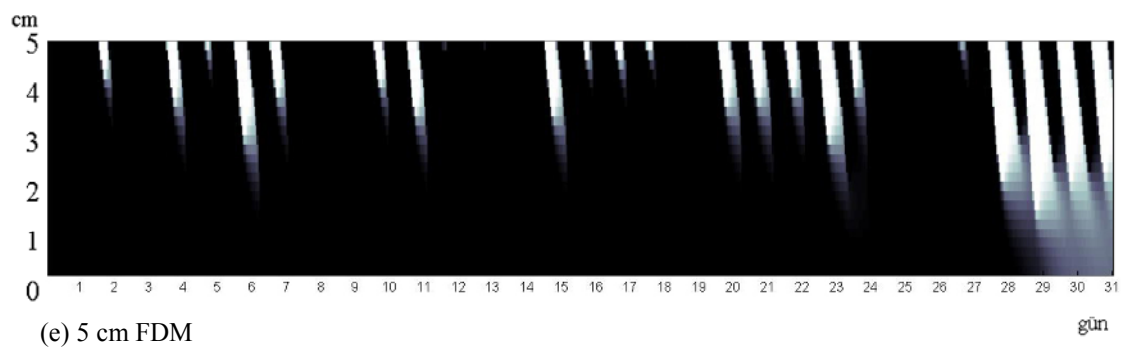
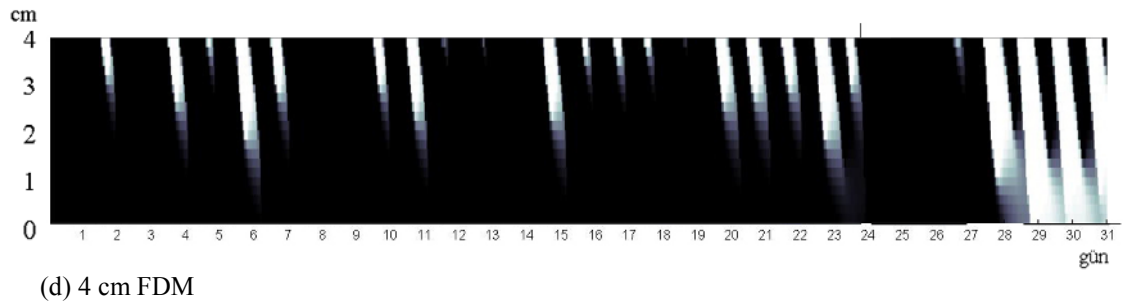
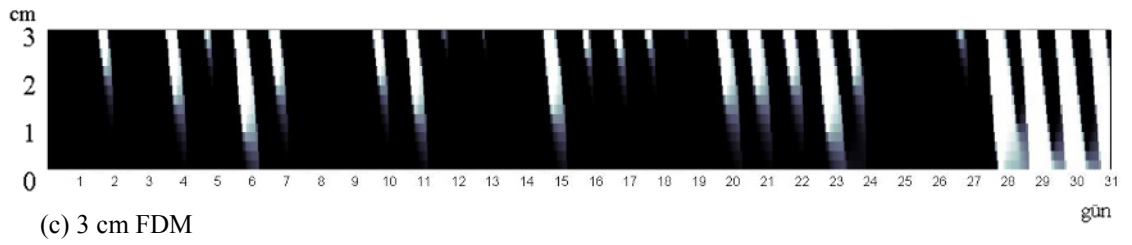
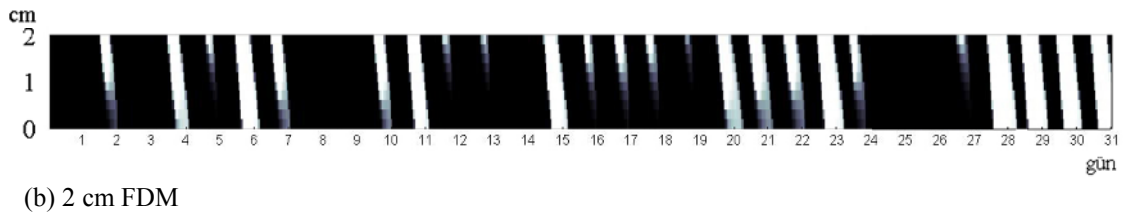
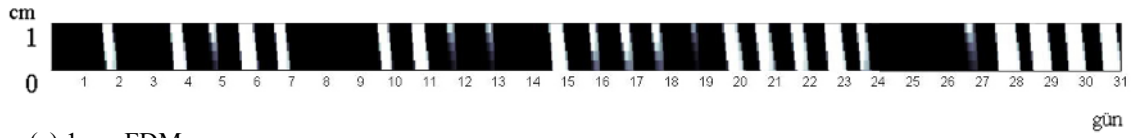
(d) 4 cm FDM



(e) 5 cm FDM

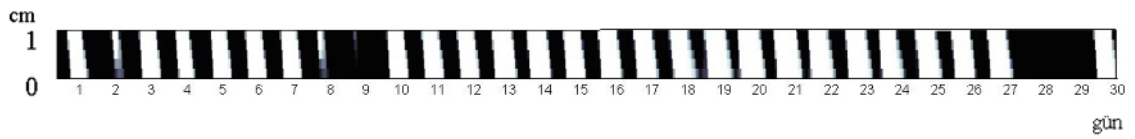
Şekil EKVI.9 İstanbul'da Eylül ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

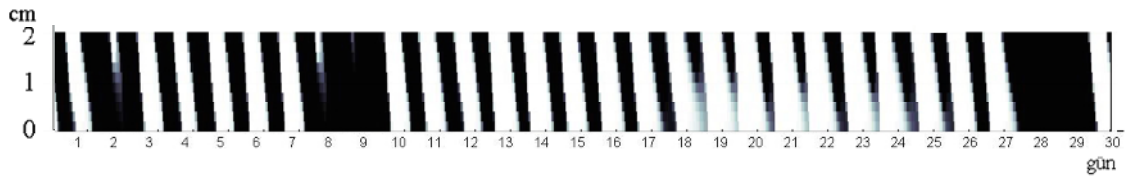


Şekil EKVI.10 Ankara'da Mayıs ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

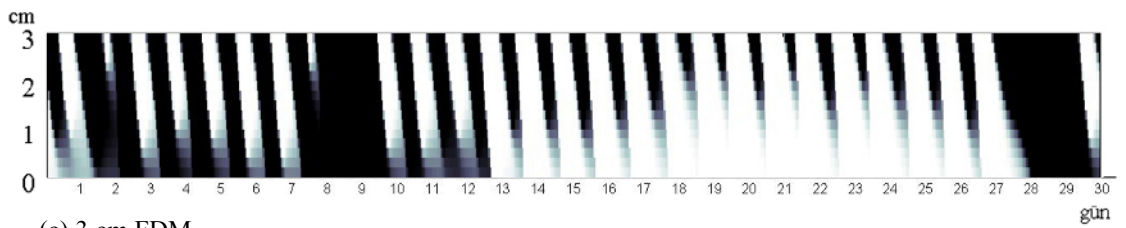
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



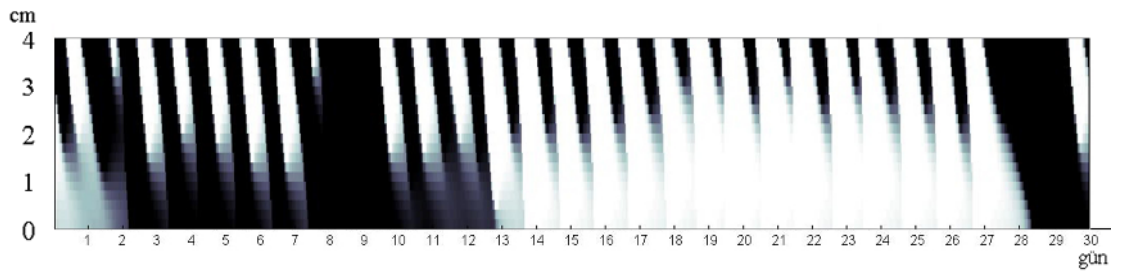
(a) 1 cm FDM



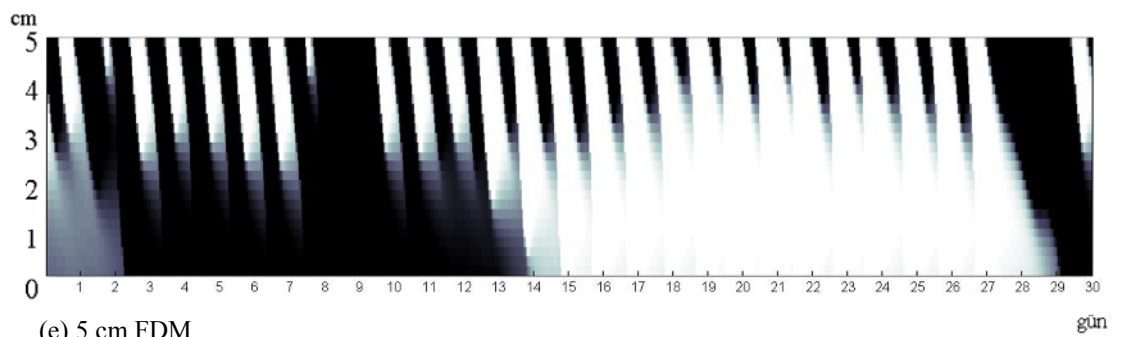
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



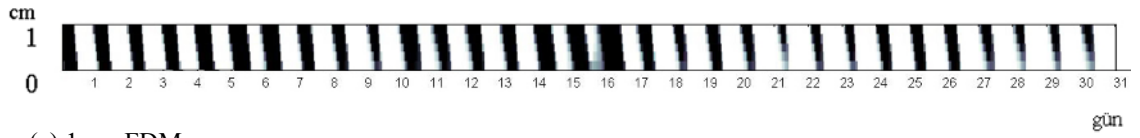
(d) 4 cm FDM



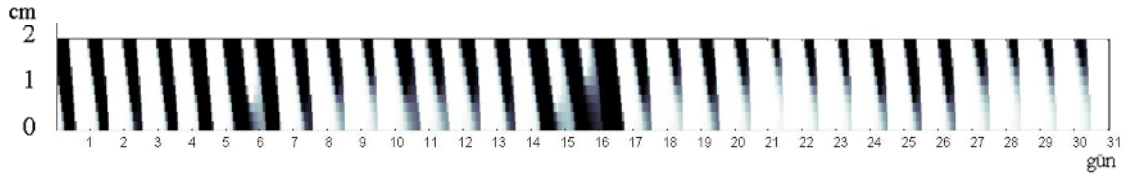
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.11 Ankara'da Haziran ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

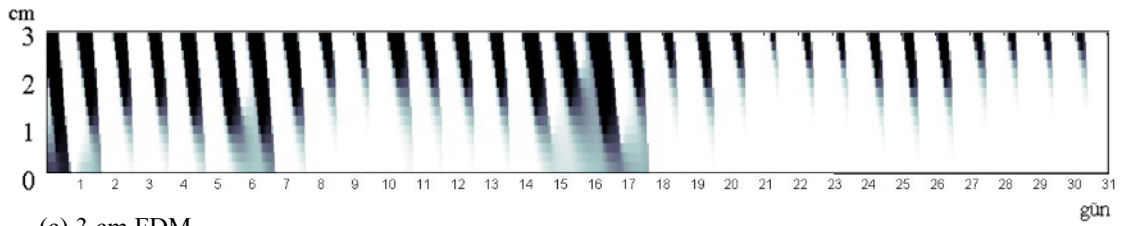
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



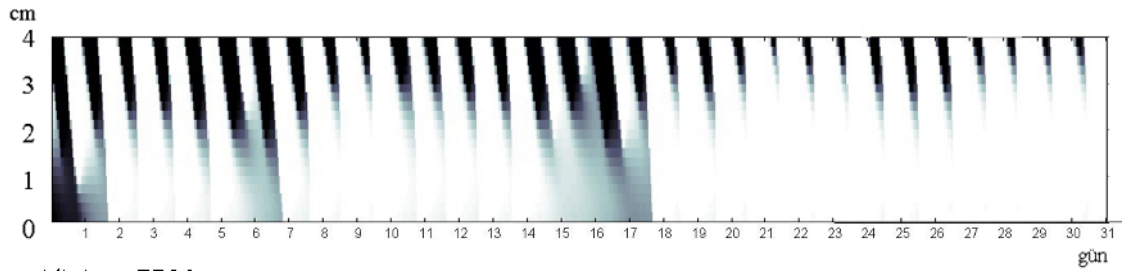
(a) 1 cm FDM



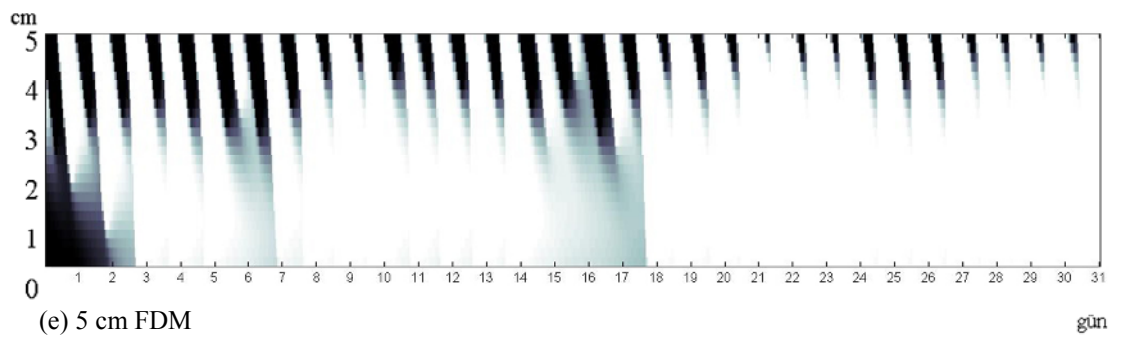
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



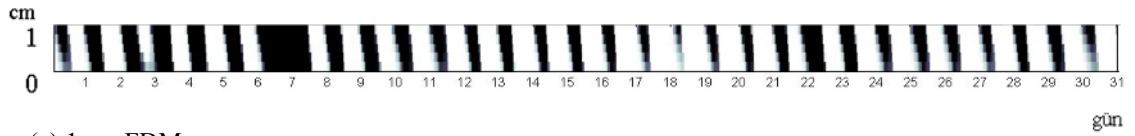
(d) 4 cm FDM



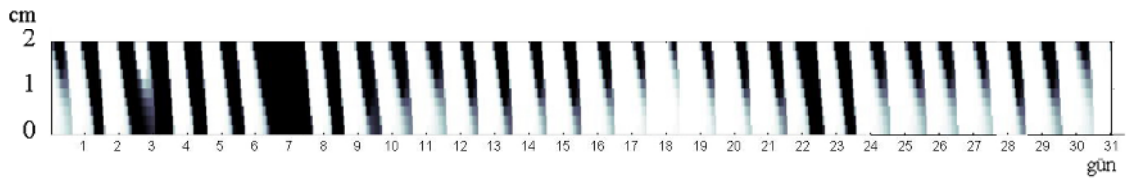
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.12 Ankara'da Temmuz ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

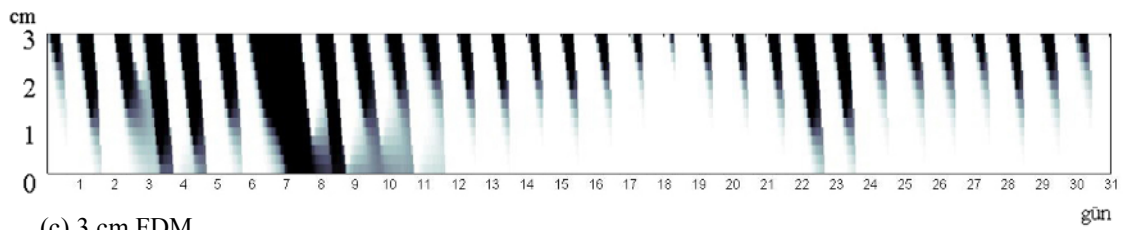
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



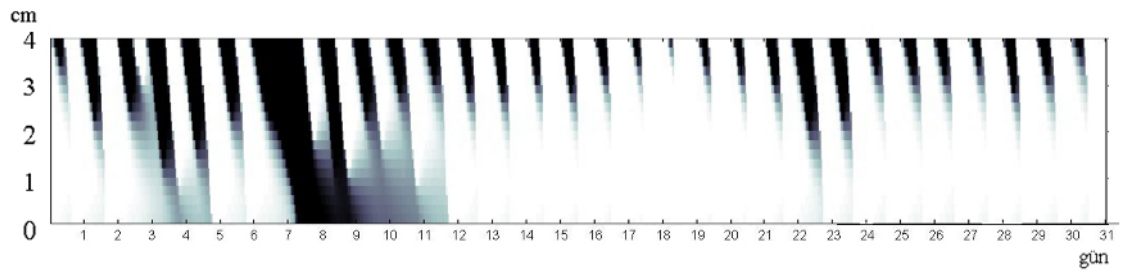
(a) 1 cm FDM



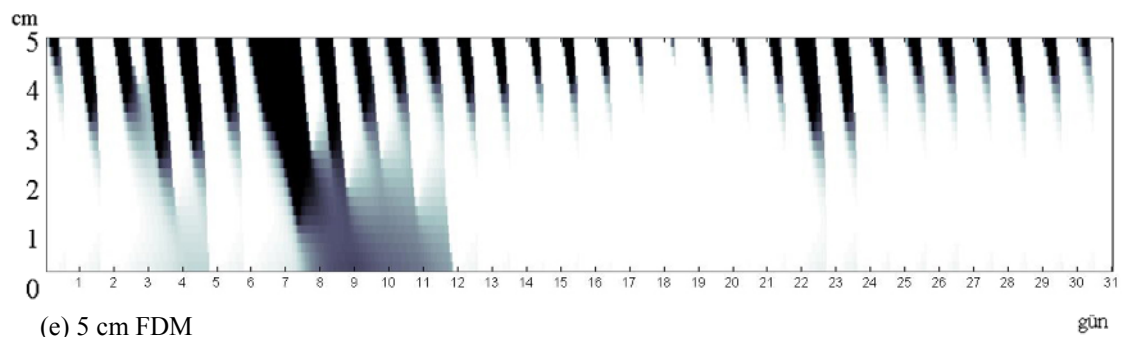
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



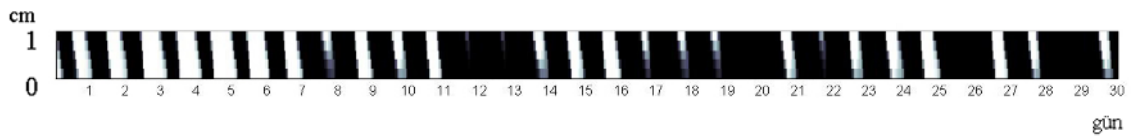
(d) 4 cm FDM



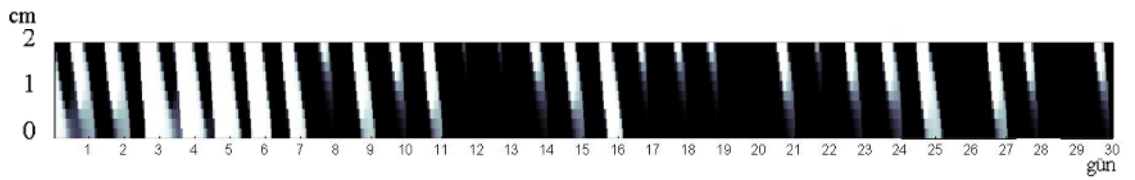
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.13 Ankara'da Ağustos ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

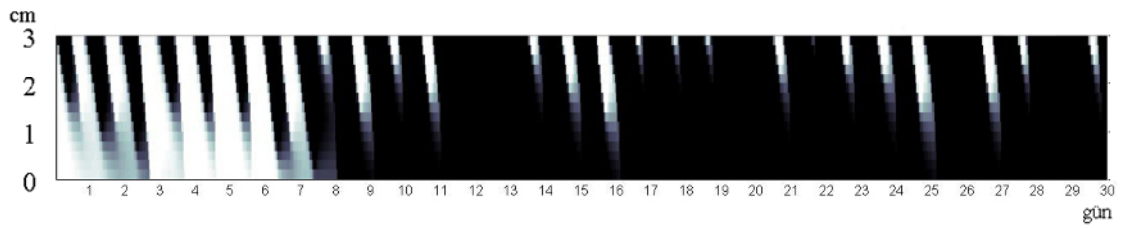
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



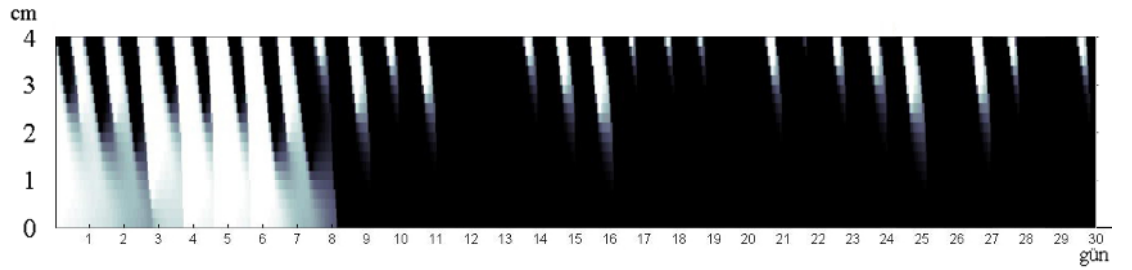
(a) 1 cm FDM



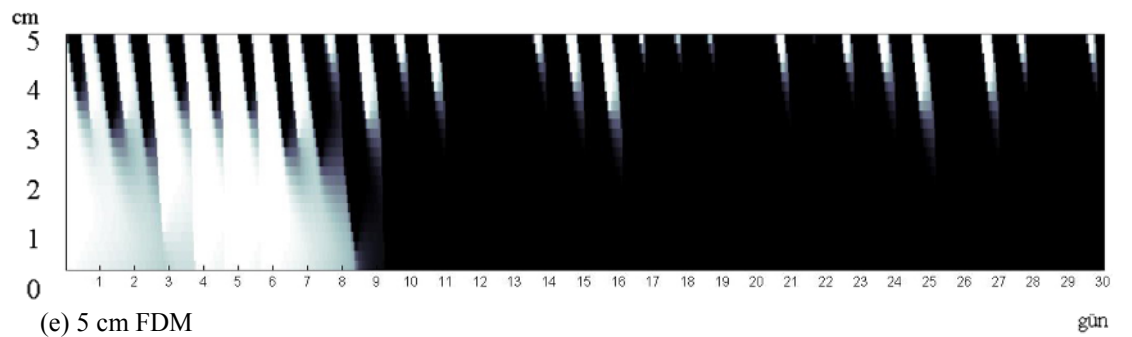
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



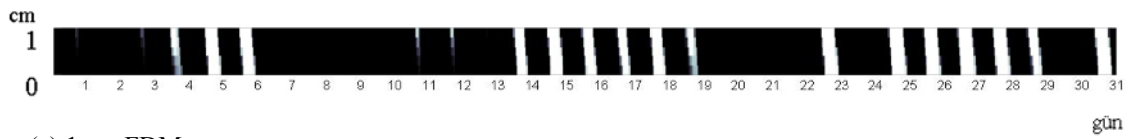
(d) 4 cm FDM



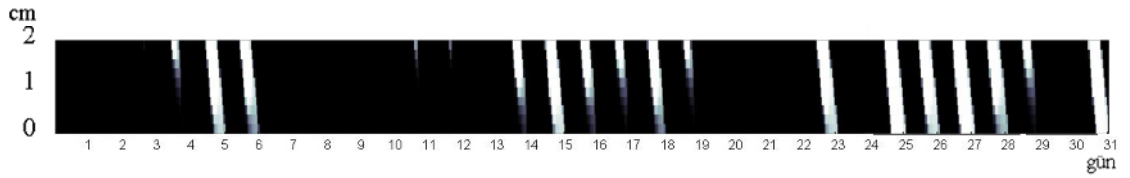
(e) 5 cm FDM

Şekil EKVI.14 Ankara'da Eylül ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

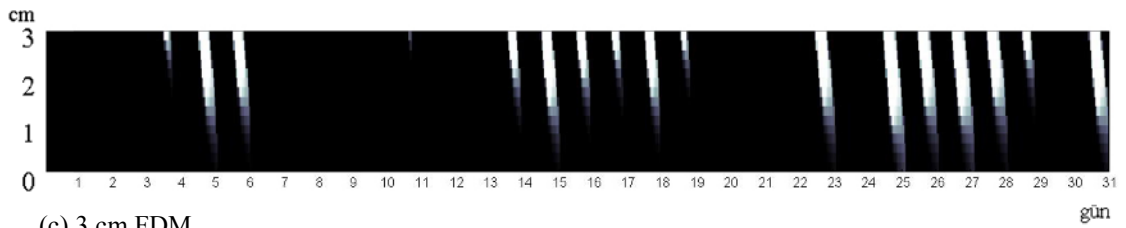
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



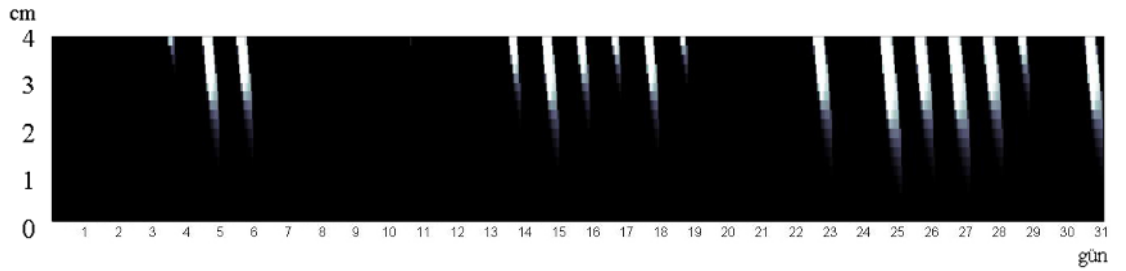
(a) 1 cm FDM



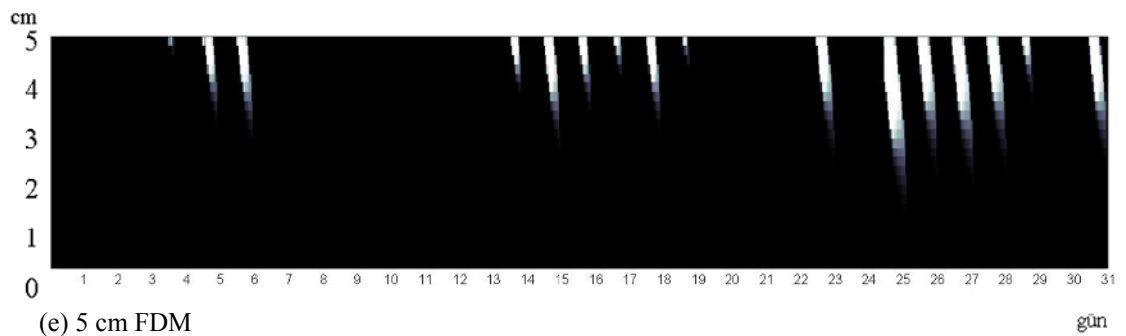
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



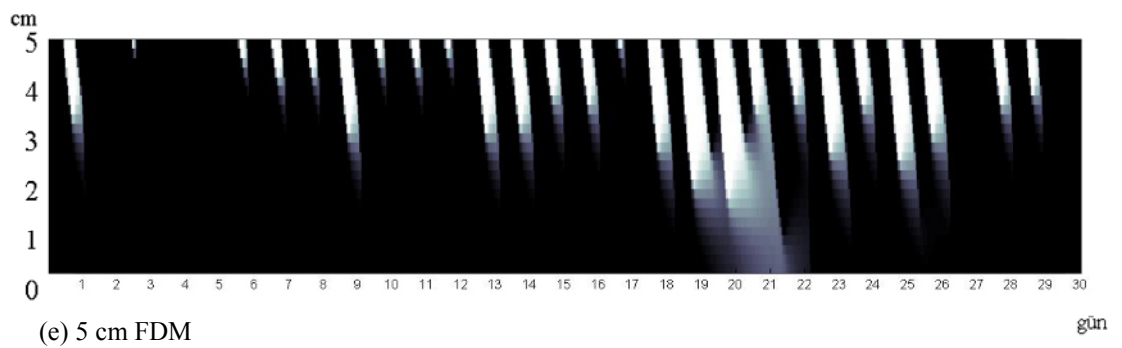
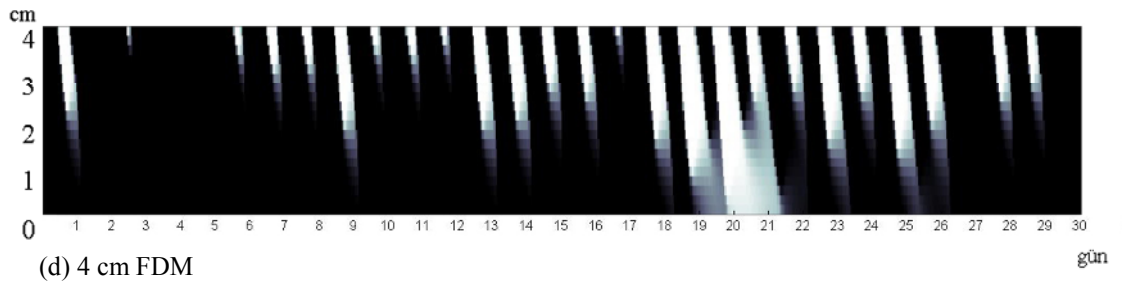
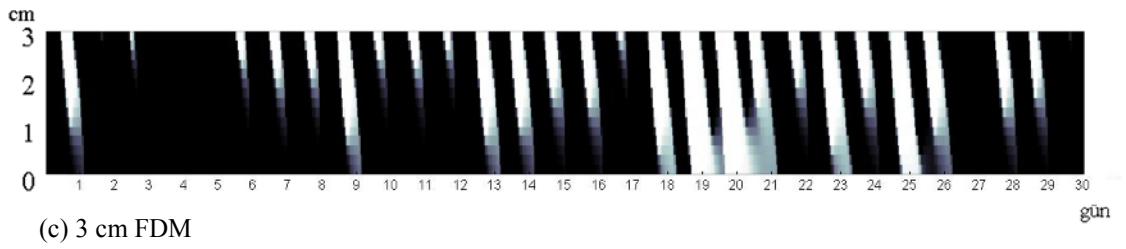
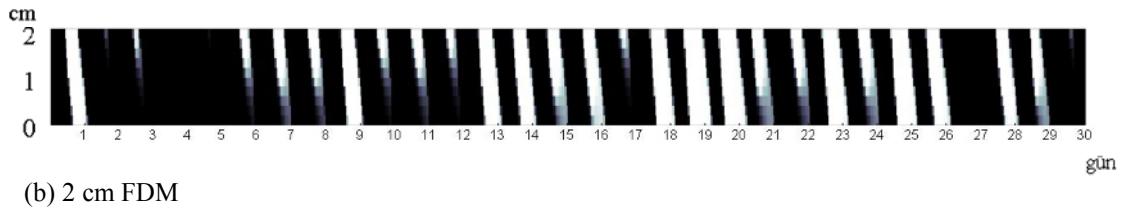
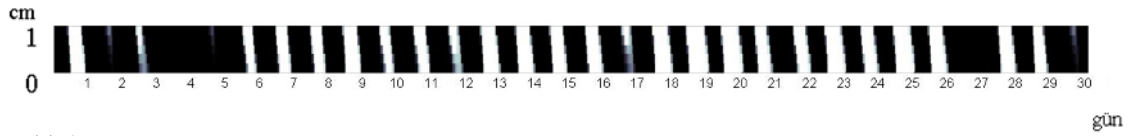
(d) 4 cm FDM



(e) 5 cm FDM

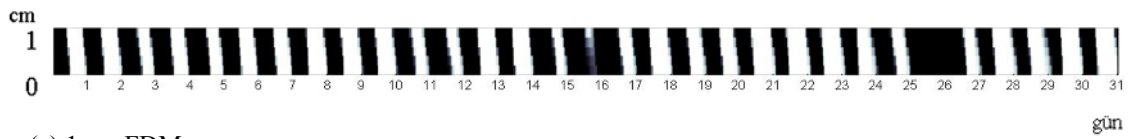
Şekil EKVI.15 Erzurum'da Mayıs ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır

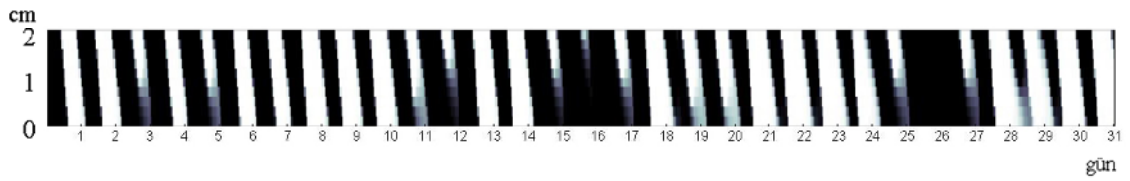


Şekil EKVI.16 Erzurum'da Haziran ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

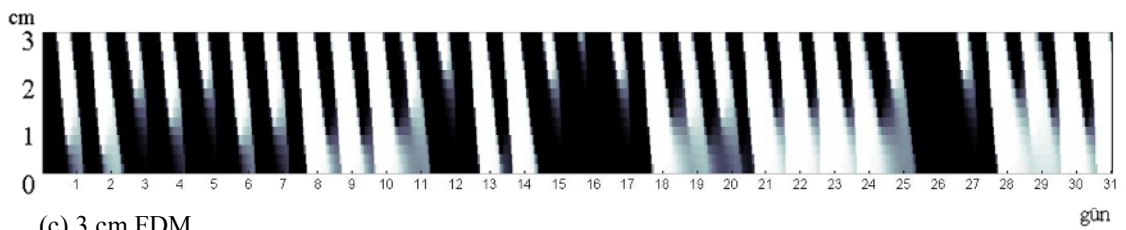
* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



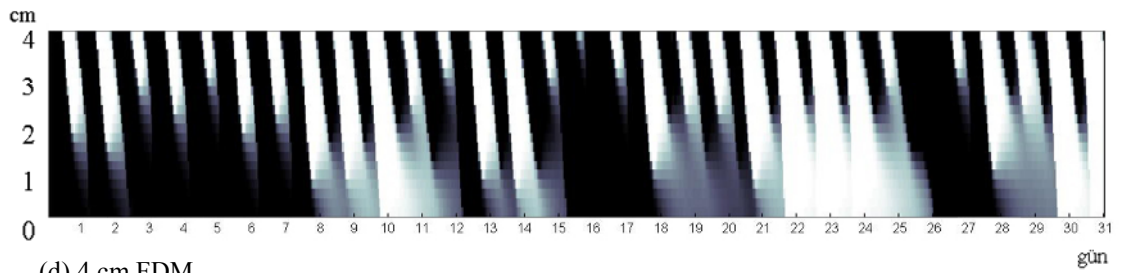
(a) 1 cm FDM



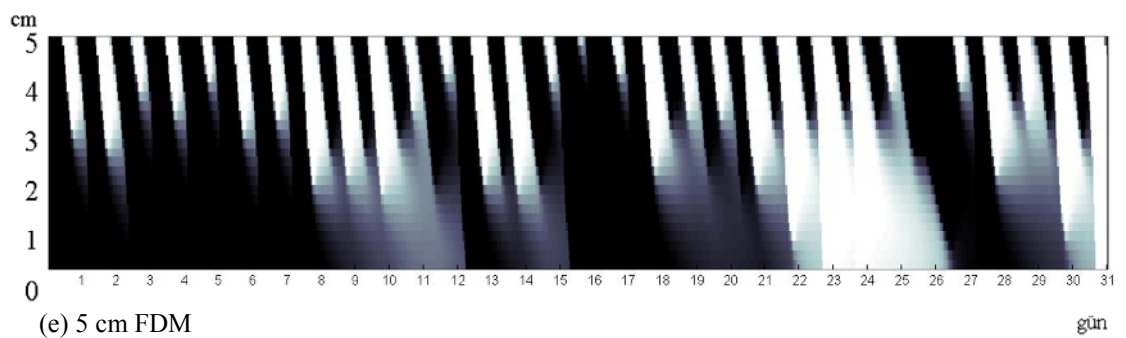
(b) 2 cm FDM



(c) 3 cm FDM



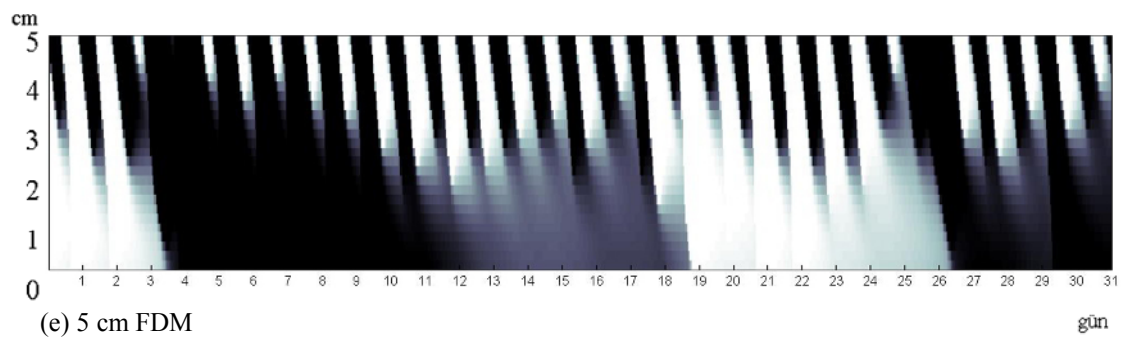
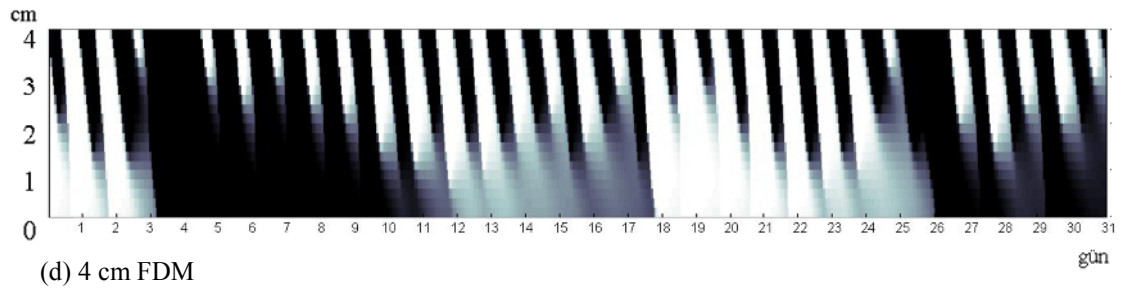
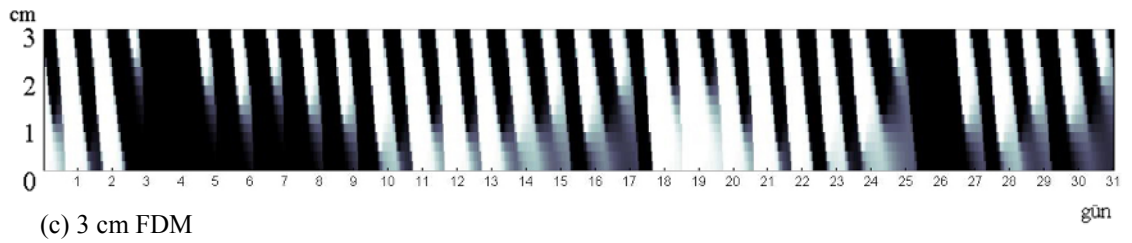
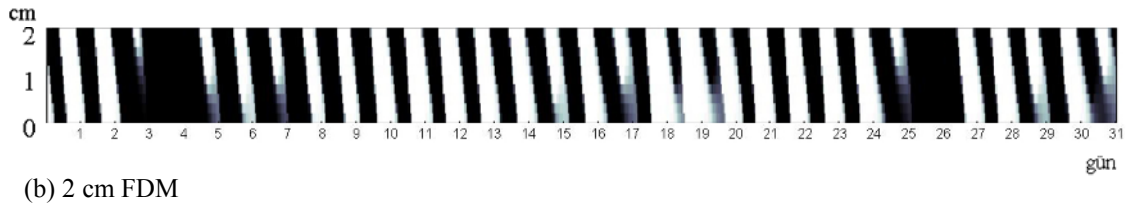
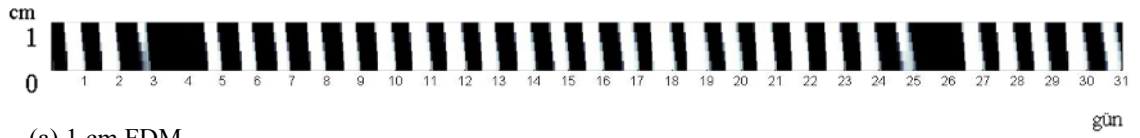
(d) 4 cm FDM



(e) 5 cm FDM

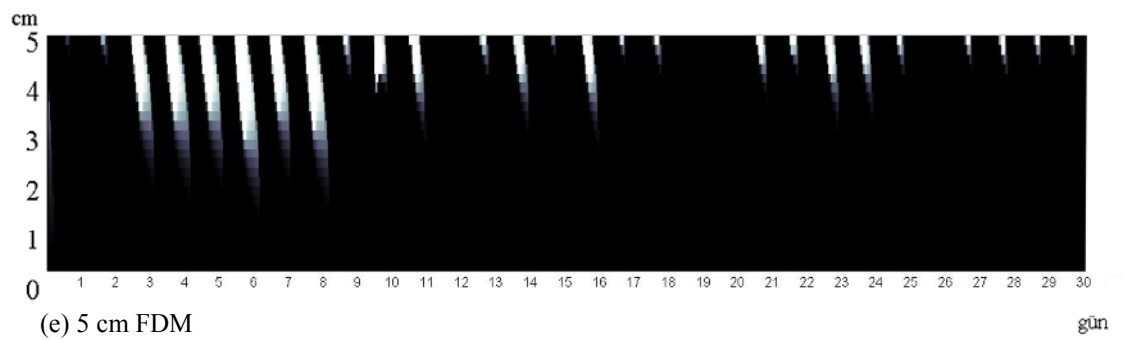
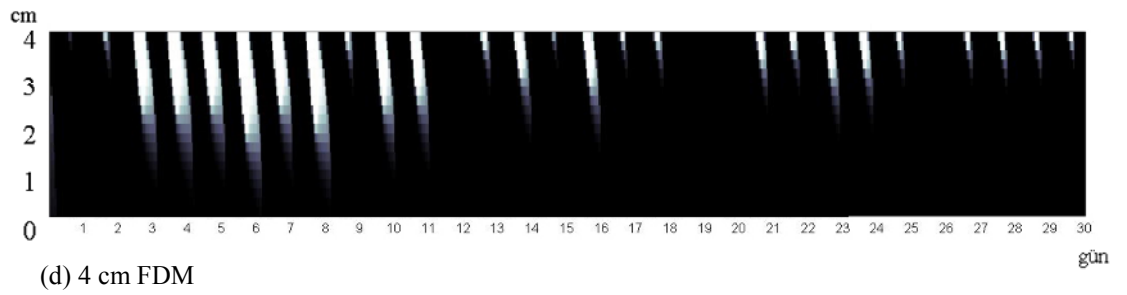
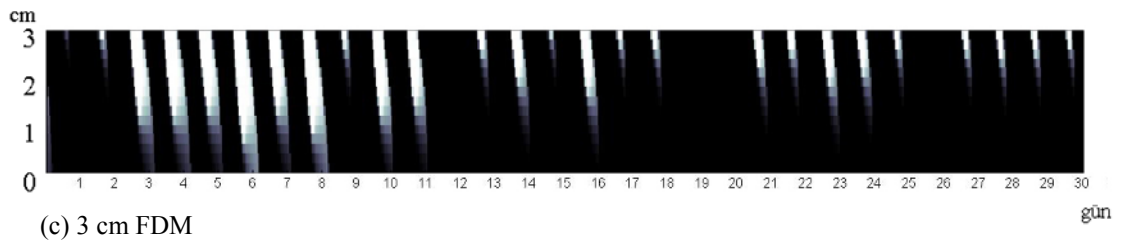
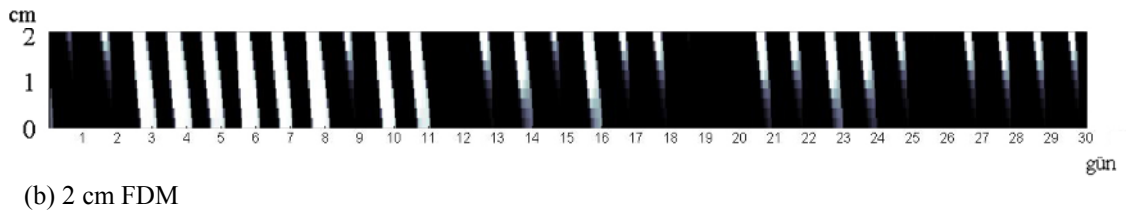
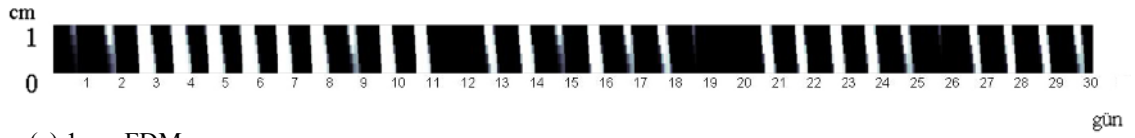
Şekil EKVI.17 Erzurum'da Temmuz ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



Şekil EKVI.18 Erzurum'da Ağustos ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır



Şekil EKVI.19 Erzurum'da Eylül ayında FDM'nin katı-sıvı* durumu

* Gösterimde katı için siyah, sıvı için beyaz, geçiş durumu için gri renkleri kullanılmıştır