

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

**TERMOELEKTRİK ISI POMPALI PREMATÜRE BEBEK
KUVÖZÜ TASARIMI, GELİŞTİRİLMESİ VE TERMAL-
HİDROLİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

OSMAN YELER

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2020

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



**TERMOELEKTRİK ISI POMPALI PREMATÜRE BEBEK
KUVÖZÜ TASARIMI, GELİŞTİRİLMESİ VE TERMAL-
HİDROLİK KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

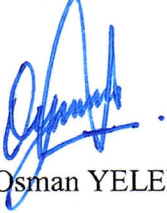
DOKTORA TEZİ

OSMAN YELER

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2020

Bu tez çalışması TÜBİTAK 1002-Hızlı Destek Programı tarafından 118M274 nolu proje ile desteklenmiştir. Aynı zamanda bu çalışmanın geliştirilmesinde öğretim üyesi yetiştirme programı (ÖYP) desteği kullanılmıştır.

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



Osman YELER

ÖZET

**TERMoeLEKTRİK ISI POMPALI PREMATÜRE BEBEK KUVÖZÜ
TASARIMI, GELİŞTİRİLMESİ VE TERMAL-HİDROLİK
KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ
DOKTORA TEZİ
OSMAN YELER
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET FEVZİ KÖSEOĞLU)
DENİZLİ, AĞUSTOS 2020**

Bu çalışma, rezistanslı bebek kuvözlerinde yaşanan eksiklikleri ve problemleri ortadan kaldıracak ve aynı zamanda tek bir cihazla kabini ısıtma ve soğutma yaparak prematüre bebeklerde yaşanan hipertermi (vücut sıcaklığı $>37,5$ °C) ve hipotermi (vücut sıcaklığı <36 °C) problemlerine aynı cihaz üzerinde çözüm üretebilen modüler termoelektrik ısı pompası sisteminin prematüre bebek kuvözlerine uygulanmasıyla ilgilidir. Önerilen sistemin geliştirilmesinden önce rezistanslı kuvöz sisteminin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Literatürden faydalınarak kuvöz sisteminin bütün kritik alt parçalarının ve termoelektrik ısı pompası sisteminin matematiksel ifadeleri belirlenmiş ve termoelektrikli kuvöz sisteminin matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Bununla birlikte çalışmada, rezistanslı kuvözün tasarımı değiştirilmeden, elektrik rezistansı ve kontrol ünitesi çıkartılarak elde edilen sabit hacim için maksimum ısıtma gücü yakınlarındaki maksimum $COP_{ısıtma}$ 'ya (ısıtma performans katsayısı) göre sınırlı optimizasyon yapılmış ve termoelektrikli kuvöz sistemin bütün boyutları belirlenmiştir. Belirlenen optimum boyutlara göre termoelektrik ısı pompası sistemi üretilerek geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemin otomatik kontrolü için MATLAB®-Simulink yazılımı kullanılarak kuvözün transfer fonksiyonları elde edilmiş ve sistemin hava sıcaklığı ölçüm modunda PID (oransal+integral+türevsel kontrolör) ile kontrolü için gerekli sabit PID katsayıları (K_P , K_I ve K_D) hassas olarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistemin ticari rezistanslı kuvözle, dinamik davranışları, termal ve hidrolik karakteristikleri çalışma kapsamında kurulan bir test düzeneğinde, 30-38 °C aralığında farklı kabin hava sıcaklıklarında yapılan deneylerle detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda ısıtmayı ve soğutmayı aynı cihaz üzerinde yapabilen termoelektrikli kuvöz sistemi geliştirilerek hipertermi ve hipotermi problemleri tek bir cihazla ortadan kaldırılabilir. Geliştirilen sistem, rezistanslı sisteme ($\pm 0,1$ °C) göre, kabin hava sıcaklığını 0,05 °C hassasiyetle ve daha homojen bir şekilde kontrol edebilmektedir. Kuvözler, genellikle ısıtma durumunda kullandığı için termoelektrikli sistemin $COP_{ısıtma}$ değeri her zaman rezistanslı sistemden daha büyüktür. Ancak alternatif akımın doğru akıma dönüştürülmesindeki kayıplar ve termoelektrik soğutucu modüllerin PWM'le (sinyal genişlik modülasyonu) kontrol edilmesi, geliştirilen sistemin elektrik enerji harcamasını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca geliştirilen sistemin soğutma modu sayesinde sistemin, çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda ve transport kuvözlerinde çalışabileceği gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Termoelektrik ısı pompası, prematüre bebek kuvözü, hipertermi ve hipotermi, matematiksel modelleme, optimizasyon, termal-hidrolik karakteristikler.

ABSTRACT

DESIGN, DEVELOPMENT AND DETERMINATION OF THERMAL-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF PREMATURE BABY INCUBATOR HAVING THERMOELECTRIC HEAT PUMP

Ph.D. THESIS

OSMAN YELER

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET FEVZİ KÖSEOĞLU)

DENİZLİ, AUGUST 2020

This study is about the application of modular thermoelectric heat pump system which can eliminate the deficiencies and problems experienced in resistance baby incubators, and also generate a solution of hyperthermia (body temperature >37.5 °C) and hypothermia (body temperature <36 °C) problems experienced in premature babies on the same device by heating and cooling the hood with a single device. Before the proposed system is developed, the design parameters of a resistance incubator system have been determined. Using the literature, mathematical expressions of all critical sub-parts of the incubator system and the thermoelectric heat pump system were determined, and modeling of the thermoelectric incubator system was created. Besides, in this study, depending on the fixed volume obtained by removing the electrical resistance and control unit without changing the design of the resistance incubator, limited optimization was performed according to the maximum COP_{heating} (coefficient of performance for heating) near the maximum heating power, and all dimensions of the thermoelectric incubator were determined. Based on the optimum dimensions, the thermoelectric heat pump system was manufactured and developed. For the automatic control of the improved system with PID (proportional+integral+derivative controller), the transfer functions of the incubator were obtained using MATLAB[®]-Simulink software, and the necessary PID coefficients (K_P , K_I and K_D) for the control of the system in the air temperature measurement mode were determined precisely. The dynamic behaviors, thermal and hydraulic characteristics of the thermoelectric and the commercial resistance incubators were compared in detail with experiments conducted at different hood temperatures in the range of 30-38 °C in a test setup established within the scope of the study. As a result, the thermoelectric incubator system, which can heat and cool on the same device, was developed, and hyperthermia and hypothermia problems were eliminated with a single device. The improved system can control the hood temperature with a sensitivity of 0.05 °C and more homogeneously than the resistance system (± 0.1 °C). Since infant incubators are generally used in heating mode, COP_{heating} value of the thermoelectric system is always higher than the resistance system. However, losses in the conversion of alternating current to direct current and the control of thermoelectric cooler modules with PWM (pulse width modulation) negatively affect the electricity energy consumption of the improved system. Besides, thanks to the cooling mode of the improved system, it was shown that it can operate in environments with high ambient temperatures and transport incubators.

KEYWORDS: Thermoelectric heat pump, premature infant incubator, hyperthermia and hypothermia, mathematical modeling, optimization, thermal-hydraulic characteristics.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	xii
SEMBOL LİSTESİ	xiii
KISALTMA LİSTESİ	xxi
ÖNSÖZ.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2. LİTERATÜR BİLGİSİ ve ARAŞTIRMASI.....	6
2.1 Prematüre Bebekler	6
2.1.1 Hipertermi ve hipotermi.....	8
2.1.1.1 Hipertermi	9
2.1.1.2 Hipotermi	11
2.1.1.3 Perioperatif hipotermi	13
2.1.1.3.1 Sıcak hava üfleli (forced-air) ısıtıcılar	14
2.1.1.3.2 Elektrikli battaniyeler (rezistif sistemler)	15
2.1.1.4 Terapötik hipotermi.....	15
2.1.2 Yenidoğanlarda ısı transferi mekanizmaları	16
2.1.2.1 Buharlaşmayla (evaporasyon) ısı transferi.....	17
2.1.2.2 Işınım (radyasyon) ısı transferi	18
2.1.2.3 Taşınım (konveksiyon) ısı transferi.....	19
2.1.2.4 İletimle (kondüksiyon) ısı transferi.....	19
2.1.3 Yenidoğanların vücut sıcaklığının korunmasında kullanılan cihazlar	20
2.1.3.1 Radyant ısıtıcı.....	21
2.1.3.2 Kuvöz.....	21
2.1.3.3 Transport kuvöz	24
2.2 Prematüre Bebek Kuvüzüyle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar.....	24
2.3 Termoelektrik	30
2.3.1 Yarı iletken malzemeler.....	32
2.3.1.1 N tipi yarı iletkenler	36
2.3.1.2 P tipi yarı iletkenler.....	37
2.3.2 Termoelektrik modüller	38
2.3.3 Termoelektrik etkiler	42
2.3.3.1 Seebeck etkisi.....	42
2.3.3.2 Peltier etkisi.....	44
2.3.3.3 Thomson etkisi.....	46
2.3.3.3.1 Thomson (Kelvin) ilişkisi	46
2.3.4 Joule ısı ve ısı iletimi etkileri	46
2.3.5 Termoelektrik malzemelerin performans katsayısı (Z)	47
2.4 Termoelektrikle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar	48
2.4.1 Termoelektrik jeneratörlerle (TEJ) ilgili yapılan çalışmalar	50
2.4.2 Termoelektrik soğutucularla (TES) ilgili yapılan çalışmalar.....	52

2.4.3	Medikal uygulamalarla ilgili yapılan çalışmalar	54
2.4.3.1	TE sistemlerin medikal uygulamalardaki soğutma-ısıtma uygulamaları.....	55
3.	KUVÖZÜN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ	60
3.1	Termoelektrikli Prematüre Bebek Kuvöz Sisteminin Matematiksel Modellemesi	60
3.1.1	Bebeğin modellenmesi.....	65
3.1.1.1	Bebeğin çekirdek (core) tabakasının modellenmesi	66
3.1.1.2	Bebeğin cilt (deri) tabakasının modellenmesi.....	70
3.1.2	Kabin havası (kabin içi hava boşluğu) modellenmesi	74
3.1.3	Kabin duvarlarının modellenmesi.....	77
3.1.4	Yatağın (şilte) modellenmesi	81
3.1.5	Radyal fan ve termoelektrik ısı pompası elemanlarının modellenmesi.....	82
3.1.5.1	Radyal fan elemanının modellenmesi	84
3.1.5.2	Termoelektrik ısı pompası elemanının modellenmesi	87
3.1.6	Nemlendirme sisteminin modellenmesi.....	89
4.	TERMOELEKTRİK ISI POMPASI SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ, OPTİMİZASYONU ve OTOMATİK KONTROLÜ ..	90
4.1	TEJ ve TES Modüllerin İdeal Denklemleri.....	91
4.1.1	TEJ modüllerin ideal denklemleri.....	91
4.1.1.1	TEJ modülün performans parametreleri.....	95
4.1.1.2	TEJ modülün maksimum parametreleri.....	95
4.1.1.3	TEJ parametrelerin normalize edilmesi (boyutsuzlaştırılması).....	96
4.1.1.4	TEJ'ün etkin malzeme özellikleri	98
4.1.2	TES modüllerin ideal denklemleri.....	100
4.1.2.1	TES modülün maksimum parametreleri	103
4.1.2.2	TES parametrelerinin normalize edilmesi (boyutsuzlaştırılması).....	104
4.1.2.3	TES'nun etkin malzeme özellikleri.....	106
4.2	TEJ ve TES Sistemlerin Optimum Tasarım Parametreleri.....	107
4.2.1	TEJ sistemlerin optimum tasarım parametreleri	107
4.2.2	TES sistemlerin optimum tasarım parametreleri	111
4.3	Termoelektrikli Kuvöz Sistemi İçin Optimum Termoelektrik Isı Pompası Sisteminin Matematiksel Modellemesi.....	115
4.3.1	Termoelektrik ısı pompası sisteminde kullanılan ısı kuyularının modellenmesi.....	117
4.3.1.1	Kanatçıklı yüzeylerin modellenmesi.....	117
4.3.1.2	Dikdörtgen kesitli tek kanatçıktan oluşan yüzeylerin optimizasyonu	124
4.3.1.3	Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinden oluşan yüzeylerin optimizasyonu	128
4.3.1.3.1	Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için optimum kanatçık boşluğu.....	133
4.3.1.3.2	Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için $\beta_{çkç}$ sayısının belirlenmesi	134
4.3.1.3.3	Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinin optimum tasarımı.....	136
4.3.2	Optimum termoelektrik ısı pompası sisteminin modellenmesi ..	138

4.3.2.1	Optimum termoelektrik ısı pompası sisteminin kanatçıklı yüzeylerle birlikte modellenmesi	140
4.4	Termoelektrikli Kuvöz Sisteminin Otomatik Kontrolü.....	146
4.4.1	PID	148
4.4.2	MATLAB®-Simulink ortamında termoelektrikli kuvöz sisteminin transfer fonksiyonlarının elde edilerek PID katsayılarının belirlenmesi .	151
4.4.2.1	Termoelektrik kuvöz sisteminin alt bölümlerinin blok bağlantıları.....	152
4.4.2.1.1	Bebeğin çekirdek tabakasının Simulink ortamında modellenmesi.....	152
4.4.2.2	Termoelektrik kuvöz sisteminin bütün parçalarının blok bağlantıları.....	157
4.4.2.3	Termoelektrikli kuvöz sisteminin transfer fonksiyonları	159
4.4.2.4	Termoelektrikli kuvöz sisteminin PID katsayılarının belirlenmesi	161
5.	DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ ve VERİ ANALİZİ	163
5.1	Rezistanslı Kuvöz Sistemin Tasarım Parametreleri	163
5.1.1	Kuvöz hava debilerinin belirlenmesi	164
5.1.1.1	Taze hava miktarının belirlenmesi	165
5.1.1.2	Kabin ortamından alınan hava miktarının belirlenmesi	167
5.1.1.3	Kabin içerisindeki havanın ortalama hızının belirlenmesi....	168
5.1.1.4	Hız ölçme ekipmanı	169
5.1.2	Kuvöz sıcaklıklarının belirlenmesi	171
5.1.2.1	Sıcaklık ölçüm ekipmanı.....	174
5.1.3	Kuvöz gürültü değerlerinin belirlenmesi	177
5.1.4	Rezistanslı sistemin harcadığı aktif gücün belirlenmesi.....	179
5.1.5	Termal kamera ölçümlerinin belirlenmesi	180
5.2	Termoelektrikli Kuvöz Sistemin Tasarım Parametreleri.....	181
5.2.1	TES modüllerin harcadıkları aktif güçlerin belirlenmesi	183
5.3	Belirsizlik Analizi.....	185
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve BULGULAR.....	187
6.1	Rezistanslı Kuvöz Sisteminde Yapılan Deneyler.....	189
6.1.1	Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneyler	195
6.2	Termoelektrikli Kuvöz Sisteminde Yapılan Deneyler	199
6.2.1	Optimum TE ısı pompası sisteminin belirlenmesi.....	199
6.2.2	Optimum TE ısı pompası sisteminin üretimi ve tasarımı	206
6.2.3	Geliştirilen optimum TE ısı pompası sistemin otomatik kontrolü	211
6.2.4	Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan kabin ortamını ısıtma deneyleri	217
6.2.4.1	Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneyler	223
6.2.5	Termoelektrikli kuvöz sisteminde kabin ortamına ait soğutma deneyleri	227
6.3	Kuvöz Sistemlerinin Karşılaştırılması.....	229
6.3.1	Rezistanslı kuvöz sistemle termoelektrikli kuvöz sisteminin bebedsiz durumdaki ısıtma performanslarının karşılaştırılması	229
6.3.1.1	Rezistanslı kuvöz sistemle termoelektrikli kuvöz sisteminin model bebekli durumdaki ısıtma performanslarının karşılaştırılması..	236

6.3.2	Rezistanslı kuvöz sisteminin doğal soğuma hızı ile termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma performansının karşılaştırılması.....	239
7.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	244
8.	KAYNAKLAR.....	250
9.	EKLER.....	264
	EK A - Termoelektrikli Prematüre Bebek Kuvöz Sisteminin Matematiksel Modelleme Kodu	264
	EK B - Hava Sıcaklığı Ölçüm Modu İçin Durum Uzayı (State-Space) Kodu... ..	270
	EK C - TE Isı Pompası Sisteminin Optimizasyon Kodu.....	271
	EK D – Belirsizlik Analizi Hesaplamaları	280
10.	ÖZGEÇMİŞ.....	285

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Vücut sıcaklığına bağlı olarak hipertermi ve hipotermi değişimi	9
Şekil 2.2: (a) Soğutma battaniyesi (b) Gentherm “Kool-Kit Neonate” cihazı .	10
Şekil 2.3: a) Gövde üzeri sıcak hava üfleli ısıtma sistemi b) Bair-Hugger gövde altı sıcak hava üfleli ısıtma sistemi.....	14
Şekil 2.4: Medwarm W-500D rezistif ısıtma ve kontrol ünitesi.....	15
Şekil 2.5: Yenidoğanın ısı kayıp mekanizmaları	16
Şekil 2.6: Yenidoğanlarda kullanılan ısıtma cihazları	21
Şekil 2.7: Tipik bir bebek kuvözünün temel parçaları.....	23
Şekil 2.8: Bebek kuvözü tarihçesi	25
Şekil 2.9: (a) Atomun yapısı (b) silisyum atomu.....	33
Şekil 2.10: Silisyum yarı iletken maddesinin bant yapısının oluşumu.....	35
Şekil 2.11: Maddelerin bant yapıları ve aralıkları (boşlukları).....	36
Şekil 2.12: (a) Si kristaline As atomu katkılanması (n-doping) (b) 1 ppm As atomu ile katkılanmış n tipi Si kristalinin enerji bant diyagramı ...	37
Şekil 2.13: (a) Si kristaline B atomu katkılanması (p-doping) (b) Serbest değişin (hole) yörüngedeki hareketi (c) 1 ppm B atomu ile katkılanmış p tipi Si kristalinin enerji bant diyagramı	38
Şekil 2.14: Bir n tipi termoelektrik malzeme içerisindeki elektron konsantrasyonu.....	39
Şekil 2.15: (a) n ve p termoçifti (b) tipik bir termoelektrik modülün kesit görünüşü	40
Şekil 2.16: Çeşitli boyut ve tiplere sahip TEJ ve TES modüller (a) standart (b) esnek	41
Şekil 2.17: (a) TEJ sistemler (b) TES sistemler	41
Şekil 2.18: Seebeck etkisi	42
Şekil 2.19: Seebeck etkisiyle bir termoçiftten gerilim üretilirken elektronların ve deşiklerin akışı.....	43
Şekil 2.20: Peltier ve Thomson etkileri	44
Şekil 2.21: Peltier etkisiyle bir termoçiftten ısıtma/soğutma elde edilirken elektronların ve deşiklerin akışı	45
Şekil 2.22: Taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanların transport katsayılarının değişimleri.....	48
Şekil 2.23: Termoelektrik fiziki olayının tarihçesi	49
Şekil 3.1: Termoelektrikli bebek kuvöz sistemindeki bütün alt parçaların birbirleriyle ilişkileri	61
Şekil 3.2: (a) AMS Amenity XP kuvözü (b) AMS Amenity XP kuvözünün çalışma prensibi.....	63
Şekil 3.3: Bebeğin çekirdek tabakasında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı.....	66
Şekil 3.4: Bebeğin cilt (deri) tabakasında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı.....	71
Şekil 3.5: Bebeğin silindir yaklaşımıyla modellenmesi	73
Şekil 3.6: Kabin içi hava boşluğunda meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı.....	75
Şekil 3.7: (a) AMS Amenity XP kuvöz kabini (b) kabinin şematik gösterimi.	77

Şekil 3.8: Kabin duvarlarında oluşan ısıl dirençlerin blok diyagramı	78
Şekil 3.9: Kabin duvarlarında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı.....	79
Şekil 3.10: Yatakta meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı.....	82
Şekil 3.11: Bebek kuvözündeki radyal fanın ve TE ısı pompası sisteminin şematik gösterimi	83
Şekil 3.12: Fan elemanında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı	85
Şekil 3.13: Termoelektrik ısı pompası sisteminde meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı	88
Şekil 4.1: Tek bir termoçift devresinden oluşan TEJ	93
Şekil 4.2: $T_c/T_h = 0,7$ ve $Z \cdot T = 1$ değerlerine göre bir TEJ modülün normalize edilmiş grafiği	97
Şekil 4.3: Tek bir termoçift devresinden oluşan TES.....	100
Şekil 4.4: $Z \cdot Th = 0,75$ değerine göre ΔT 'nin fonksiyonu olarak Q_c ve COP ifadelerinin akıma bağlı değişimleri incelenen bir TES modülün normalize edilmiş grafiği	105
Şekil 4.5: İki kanatçıklı yüzeyi bulunan TEJ sistem.....	108
Şekil 4.6: İki kanatçıklı yüzeyi bulunan TES sistem.....	112
Şekil 4.7: Termoelektrik ısı pompası sisteminin alt parçaları	116
Şekil 4.8: Dikdörtgen kesitli kanatçık profili	117
Şekil 4.9: Dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeyde ısı transferi.....	118
Şekil 4.10: Kanatçık boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi.....	121
Şekil 4.11: (4.152) ve (4.154) ifadeleriyle hesaplanan, kanatçıktaki ısı transfer hızlarının kanatçık kalınlığına göre değişimi	125
Şekil 4.12: Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi.....	128
Şekil 4.13: Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinde zorlanmış akış.....	129
Şekil 4.14: Tam gelişmiş dar kanal akışı	130
Şekil 4.15: Alt ve üst levhalar üzerindeki geniş kanal akışı	131
Şekil 4.16: Bebek kuvözü sisteminde çalışan TE ısı pompası sistemi	139
Şekil 4.17: Açık çevrim kontrol sistemlerinin blok diyagramı	147
Şekil 4.18: Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin blok diyagramı.....	148
Şekil 4.19: İntegral yığılması (integral wind-up) problemi	149
Şekil 4.20: PID kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı	150
Şekil 4.21: Metabolik ısı üretim hızının Simulink blokları	153
Şekil 4.22: Duyulur ısı kaybı miktarının Simulink blokları	153
Şekil 4.23: Gizli ısı kaybı miktarının Simulink blokları.....	154
Şekil 4.24: Bitişik dokulardan cilde iletimle olan ısı transferi miktarının Simulink blokları.....	154
Şekil 4.25: Bebeğin çekirdek tabakasından kana taşınımıyla olan ısı transfer miktarının Simulink blokları	155
Şekil 4.26: Bebeğin çekirdek kütlelerinin Simulink blokları.....	155
Şekil 4.27: Bebeğin çekirdek tabakasının Simulink blok diyagramı.....	156
Şekil 4.28: Bebeğin çekirdek tabakasının alt sistem olarak tek bir Simulink blok diyagramıyla oluşturulması	156
Şekil 4.29: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) hava sıcaklığı çıkış parametresine bağlı olarak oluşturulan Simulink blok bağlantıları.....	157
Şekil 4.30: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) tek bir Simulink blok diyagramı olarak oluşturulması	158

Şekil 4.31: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) cilt sıcaklığı çıkış parametresine bağlı olarak oluşturulan Simulink blok bağlantıları.....	158
Şekil 4.32: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) tek bir Simulink blok diyagramı olarak oluşturulması.....	159
Şekil 4.33: Root Locus ve Bode diyagramları (a) kabin hava sıcaklığı ölçüm modu (b) cilt sıcaklığı ölçüm modu	160
Şekil 4.34: Termoelektrikli kuvöz sisteminin birim basamak girişe göre davranışı	162
Şekil 5.1: Rezistanslı kuvöz sistemine ait deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	164
Şekil 5.2: (a) AMS Amenity XP kuvözünün taze havayı emdiği kanal aralığı (b) oluşturulan dairesel kanal	165
Şekil 5.3: Dairesel kanalın sabit hız ölçüm noktaları	166
Şekil 5.4: a) Toplam hava miktarının geçtiği kanal b) hız ölçümü için uygun hale getirilen dikdörtgen kanal.....	167
Şekil 5.5: Dikdörtgen kanalın sabit hız ölçüm noktaları	168
Şekil 5.6: Kabin içerisindeki havanın ortalama hızının belirlenmesi	169
Şekil 5.7: Testo 435-3 çok fonksiyonlu ölçüm cihazı ve Testo 0635-1025 sıcak tel (hot wire) hız ölçüm probu.....	170
Şekil 5.8: (a) Ortalama kabin sıcaklığı noktaları (b) kuvöz sisteminde ortalama kabin sıcaklığı noktalarının şematik olarak uygulanması	172
Şekil 5.9: (a) Kabin ortamındaki sıcaklık ölçüm noktalarının şematik gösterimi (b) AMS Amenity XP kuvöz sistemindeki kabin ortamının sıcaklık ölçüm noktaları.....	172
Şekil 5.10: Kuvözün rezistans bölgesine yerleştirilen ısı çiftler	173
Şekil 5.11: Rezistanslı kuvöz sistemine yerleştirilen ısı çiftlerin ölçüm yerleri	174
Şekil 5.12: Elimko E-680 serisi 32 kanallı datalogger	176
Şekil 5.13: 16 kanalın bar olarak anlık sıcaklık değerleri	176
Şekil 5.14: Isıl çiftlerin kalibrasyon işlemi.....	177
Şekil 5.15: CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazı.....	178
Şekil 5.16: Flir Thermovision A20M kızılötesi termal kamera cihazı	181
Şekil 5.17: Termoelektrikli kuvöz sistemine ait deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	182
Şekil 5.18: Termoelektrikli kuvöz sistemine yerleştirilen ısı çiftlerin ölçüm yerleri	183
Şekil 5.19: HIOKI PW3390 güç analizör cihazı	184
Şekil 6.1: Rezistanslı kuvöz sistemin gürültü seviyesinin zamana bağlı olarak değişimi	190
Şekil 6.2: Rezistanslı kuvöz sistemi deney düzeneği	191
Şekil 6.3: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi.....	193
Şekil 6.4: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri.....	193
Şekil 6.5: Rezistanslı kuvöz sisteminin model bebekli deney düzeneği	196

Şekil 6.6: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekli 25-36 °C deneyinin termal kamera görüntüleri (a) bebek yerleştirilmeden önce (b) bebek yerleştirildikten 60 dakika sonra	197
Şekil 6.7: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri	197
Şekil 6.8: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekle yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi.....	198
Şekil 6.9: TE ısı pompası sisteminde iç tarafta bulunan kanatçıklı yüzeylerin yerleştirilebileceği sınırlı kuvöz hacmi	200
Şekil 6.10: (a) Isıtma ve soğutma güçlerinin kanatçık kalınlığına göre değişimi (b) COP _{ısıtma} değerinin N _k ve N _l boyutsuz parametrelerine göre değişimi	203
Şekil 6.11: Ürettirilen kanatçıklı yüzeyler (a) tabansız (b) tabanlı.....	207
Şekil 6.12: Kanatçıklı yüzeylerle TES modüllerin birleştirilmesi (a) termal macun uygulaması (b) mekanik olarak sıkıştırılması.....	208
Şekil 6.13: Tabansız kanatçıklı yüzeye açılan ısı çift yuvası	209
Şekil 6.14: Radyal fan hariç olarak oluşturulan TE ısı pompası sistemi	209
Şekil 6.15: Geliştirilen optimum TE ısı pompası sistemi (a) bütün alt parçaları (b) kuvöz içerisinde kalan radyal fan bölümü (c) kuvöz dış kısmına bakan aksenal fan bölümü	211
Şekil 6.16: Termoelektrikli kuvöz sistemi deney düzeneği	212
Şekil 6.17: (a) TE ısı pompası sisteminin kontrol ünitesi (b) 5-35 V 30 A çift taraflı motor sürücülerin ısınmasını engellemek için kurulan düzenek.....	214
Şekil 6.18: Sensirion SHT31 sıcaklık ve bağıl nem sensörü	214
Şekil 6.19: (a) MATLAB® PID Tuning ile PID katsayılarının elde edilmesi (b) termoelektrikli kuvözde kabin havası merkez sıcaklığının 36 °C'ye getirilmesi esnasındaki PID kontrolü ve davranışı (c) termoelektrikli kuvözün diğer kabin havası merkez sıcaklıklarına getirilmesi esnasındaki PID kontrolleri ve davranışları	216
Şekil 6.20: Kabin havası merkez sıcaklığı 32 °C iken termoelektrikli kuvöz sisteminin sıcaklık kontrolü hassasiyeti	217
Şekil 6.21: Termoelektrikli kuvöz sisteminin gürültü seviyesinin zamana bağlı olarak değişimi	219
Şekil 6.22: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi.....	220
Şekil 6.23: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri (a) TES modüllerin elektriksel verileri ve soğuk yüzeylerden çekilen ısı miktarı (b) termoelektrikli kuvöz sisteminin elektriksel verileri .	221
Şekil 6.24: Termoelektrikli kuvöz sisteminin model bebekli deney düzeneği	223
Şekil 6.25: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekli 25-36 °C deneyinin termal kamera görüntüleri (a) bebek yerleştirilmeden önce (b) bebek yerleştirildikten 60 dakika sonra	224

Şekil 6.26: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekle yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi	225
Şekil 6.27: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri (a) TES modüllerin elektriksel verileri ve soğuk yüzden çekilen ısı miktarı (b) termoelektrikli kuvöz sisteminin elektriksel verileri.....	226
Şekil 6.28: Termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma modundaki soğutma performansı.....	227
Şekil 6.29: Termoelektrikli kuvöz sistemin sıcak ve soğuk taraftaki yüzeylerinin sıcaklık değişimleri ve çevre sıcaklığının altındaki bir ortamda soğutma performansı	228
Şekil 6.30: Rezistanslı sistemle termoelektrikli sistemin alarmsız durumdaki gürültü seviyeleri.....	230
Şekil 6.31: 36 °C kabin havası sıcaklığında her iki kuvöz sisteminin (a) ısıtma elemanlarının yüzey sıcaklığı ve ısıtma elemanlarına giren-çıkan havaların zamana bağlı sıcaklık değişimleri (b) kabin ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimleri	232
Şekil 6.32: Rezistanslı ve termoelektrikli kuvöz sistemlerinin 25-36 °C deneyi boyunca harcanan aktif elektriksel güç miktarlarının ve TES modüllerden çekilen ısı miktarının değişimleri.....	234
Şekil 6.33: Bebekli durumda 36 °C kabin havası sıcaklığında her iki kuvöz sisteminin (a) ısıtma elemanlarının yüzey sıcaklığı ve ısıtma elemanlarına giren-çıkan havaların zamana bağlı sıcaklık değişimleri (b) kabin ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimleri.....	237
Şekil 6.34: 25-36 °C deneyinin model bebekli ve bebeksiz termal kamera görüntüleri (a) rezistanslı kuvöz sistemi (b) termoelektrikli kuvöz sistemi.....	238
Şekil 6.35: Rezistanslı ve termoelektrikli kuvöz sistemlerinin model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyi boyunca harcanan aktif güç miktarlarının ve TES modüllerden çekilen ısı miktarının değişimleri.....	239
Şekil 6.36: Kuvöz sistemlerinin 38 °C'den 30 °C'ye soğutma hızlarının değişimi	240
Şekil 6.37: Termoelektrikli kuvöz sisteminde TES modüllerin sıcak ve soğuk taraftaki yüzeylerinin sıcaklık değişimleri ve geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin çevre sıcaklığının altındaki bir ortamda soğutma performansı.....	242

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Prematüre bebeklerin gestasyonel yaş ve doğum ağırlıklarına göre istenilen nötral ortam sıcaklık değerleri	8
Tablo 2.2: Türkiye’de yoğun bakım merkezleri ve cihaz durumlarının senelere göre değişimi	12
Tablo 2.3: Bir kuvözde bulunması gereken teknik özellikler	22
Tablo 2.4: Yüksek ZT değerine sahip TE malzemeler.....	54
Tablo 3.1: AMS Amenity XP marka kuvözün teknik özellikleri.....	64
Tablo 3.2: Yaklaşık oksijen akış oranları ve konsantrasyonları.....	84
Tablo 4.1: Farklı kısıtlamalar için yapılan kanatçık optimizasyonları.....	136
Tablo 4.2: Termoelektrikli kuvöz sisteminin alt bölümleri.....	152
Tablo 5.1: Testo 435-3 çok fonksiyonlu ölçüm cihazının ve Testo 0635-1025 sıcak tel (hot wire) hız ölçüm probunun teknik özellikleri	170
Tablo 5.2: Isıl çiftler ve datalogger cihazının tipi ve teknik özellikleri	175
Tablo 5.3: CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	178
Tablo 5.4: Entes MPR 45S enerji analizörü cihazının teknik özellikleri	179
Tablo 5.5: HIOKI PW3390 güç analizörü cihazının teknik özellikleri.....	184
Tablo 5.6: Ölçülen ve hesaplanan sayısal değerlerdeki belirsizlikler	185
Tablo 6.1: Tez kapsamında yapılan ısıtma deneylerinin listesi	188
Tablo 6.2: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki değerleri.....	194
Tablo 6.3: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekle yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki verileri	198
Tablo 6.4: TEC1-127140 kodlu TES modülünün katalogunda verilen maksimum parametreler	202
Tablo 6.5: TE ısı pompası sisteminin giriş parametreleri ve optimizasyon işlemi sonucundaki elde edilen optimum çıkış parametreleri	204
Tablo 6.6: 2 adet TEC1-127140 modüle sahip TE ısı pompası sisteminin optimizasyon sonucu elde edilen optimum çıkış parametreleri ...	206
Tablo 6.7: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki değerleri.....	222
Tablo 6.8: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekle yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki verileri	226

SEMBOL LİSTESİ

age	:	Bebeğin doğduktan sonraki yaşı (gün)
A	:	Pelletlerin kesit alanı (m ²)
A_{base}	:	Kanatçıklı yüzeyin taban alanı (m ²)
A_c	:	TE sistemdeki soğuk kanatçıklı yüzeylerin toplam alanı (m ²)
A_{cc}	:	Akışın temas ettiği yüzey alanı (m ²)
A_{cr}	:	Kanatçığın ısı transferi yönündeki dik kesit alanı (m ²)
A_{ct}	:	Akışın geçtiği toplam kesit alanı (m ²)
A_{cyt}	:	Yatak ile temas eden cildin yüzey alanı (m ²)
A_{dk}	:	İletimle ısı transferine maruz kalan dik kesit alanı (m ²)
A_{dky}	:	Doğal taşınımına maruz kalan her bir yüzeyin alanı (m ²)
A_h	:	TE sistemdeki sıcak kanatçıklı yüzeylerin toplam alanı (m ²)
A_i	:	Kabin duvarlarını gören bebeğin yüzey alanı (m ²)
A_{i,kçt}	:	Kuvözün iç tarafında kalan ısı kuyusunun toplam yüzey alanı (m ²)
A_{kç}	:	Tek bir kanatçığın yüzey alanı (m ²)
A_{kçt}	:	Toplam (kanatçıklı+kanatçıksız) yüzey alanı (m ²)
A_{kç,yok}	:	Kanatçıksız durumda yüzeyin alanı (m ²)
A_{kçz}	:	Toplam kanatçıksız yüzeyin alanı (m ²)
A_{kd}	:	Kabin duvarlarından geçen ısının temas ettiği toplam yüzey alanı (m ²)
A_{kdy}	:	Kabin duvarlarının toplam yüzey alanı (m ²)
A_{kmy}	:	Kabin içerisindeki havaya maruz kalan bebeğin yüzey alanı (m ²)
A_{net}	:	Bebek tarafından kaplanmayan yatağın alanı (m ²)
A_{pr}	:	Kanatçığın profil alanı (m ²)
A_{ty}	:	Toplam yüzey alanı (m ²)
A_y	:	Kanal içerisinden geçen akışkanın temas ettiği toplam yüzey alanı (m ²)
A_{yat}	:	Yatağın (şilte) alanı (m ²)
A_{yü}	:	Işınım ile ısı transferinde bulunan toplam yüzey alanı (m ²)
A_{yy}	:	Taşınım ile ısı transferine maruz kalan toplam yüzey alanı (m ²)
b	:	Kanatçık yüksekliği (m)
bf	:	Kan akış hızı parametresi (s ⁻¹)
b_{opt}	:	Optimum kanatçık yüksekliği (m)
Buharlaştırma	:	Bebeğin cildinden kuvöz ortamına olan buharlaşma kaybı (ml/kg.gün)
\bar{c}_f	:	Ortalama sürtünme katsayısı
c_p	:	Sabit basınçtaki özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,c}	:	Cildin özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,ç}	:	Çekirdeğin özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,çev}	:	Çevre havasının özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,d}	:	Kabin duvarlarının özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,h}	:	Havanın özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,k}	:	Kanın özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,kh}	:	Kabin ortamından gelen havanın özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,mix}	:	Çevre havasıyla kabinden gelen havanın karışım durumundaki özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,O₂}	:	İlave edilen ek oksijenin özgül ısı (J/kg.°C)
c_{p,y}	:	Yatağın özgül ısı (J/kg.°C)

CC	:	Molar konsantrasyon (kmol/m^3)
COP	:	Performans katsayısı
COP_{ısıtma}	:	Isıtma durumundaki sistemin performans katsayısı
COP_{soğutma}	:	Soğutma durumundaki sistemin performans katsayısı
D_h	:	Hidrolik çap (m)
D_{küre}	:	Bebeğin yaklaşık çapı (m)
e(t)	:	Hata miktarı
E	:	Elektrik alan (V/m^2)
EHH	:	Esinlenilmiş hava hacmi (ml/kg.s)
f	:	Sürtünme faktörü
g	:	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
GA	:	Gestasyonel yaş (hafta)
Gr	:	Grashof sayısı
h	:	Isı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{aty}	:	Kanatçıklar arasındaki yüzeyler ile alt taban yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{bgı}	:	Buharlaşma gizli ısısı (J/kg)
h_c	:	TE sistemde soğuk taraftaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{dçt}	:	Kabin dış duvarıyla çevre havası arasındaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{fg}	:	Suyun 35 °C'deki gizli ısı değeri (J/kg)
h_h	:	TE sistemde sıcak taraftaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{ketk}	:	Cilt ve kuvöz ortamı arasındaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
h_{kdt}	:	Kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasındaki ısı taşınım katsayısı ($\text{W/m}^2.\text{°C}$)
I	:	Akım (A)
ICOP	:	Soğutma performans katsayısını maksimum yapan akım (A)
I_{max}	:	Maksimum akım (A)
I_{MP}	:	Soğutma hızını maksimum yapan akım (A)
J	:	Akım yoğunluğu (A/m^2)
k	:	Isı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
k*	:	TEJ modül efektif ısı iletim katsayısı (W/m.K)
k**	:	TES modül efektif ısı iletim katsayısı (W/m.K)
k_{base}	:	Kanatçıklı yüzey tabanının ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
k_{hava}	:	Havanın ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
k_{plex}	:	Pleksiglas malzemesinin ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
K	:	TE modülün termal iletkenliği (W/K)
K**	:	TES modülün efektif termal iletkenliği (W/K)
K_{çik}	:	Çekirdek ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
K_D	:	Türevsel kontrolör sabit katsayısı
K_{hik}	:	Havanın ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
K_i	:	İntegral kontrolör sabit katsayısı
K_P	:	Oransal kontrolör sabit katsayısı
K_{yik}	:	Yatağın ısı iletim katsayısı ($\text{W/m}.\text{°C}$)
l	:	Pelletlerin boyu (m)
L	:	Kanatçık genişliği (m)
L_c	:	Geometrinin karakteristik uzunluğu (m)
m	:	Kanatçıklı yüzeyler için tanımlanmış bir terim
m_b	:	Bebeğin kütlesi (kg)
m_c	:	Bebeğin cilt kütlesi (kg)

$m_{\text{ç}}$:	Bebek çekirdeğinin kütlesi (kg)
m_d	:	Kabin duvarlarının kütlesi (kg)
m_h	:	Kabin hacmi içerisindeki havanın kütlesi (kg)
m_y	:	Yatağın kütlesi (kg)
M_{dmh}	:	1 haftalık bebeğin nötral ortam şartlarındaki dinlenme metabolizma hızı (W/m ²)
$M_{kç}$:	Kanatçıların kütlesi (kg)
MW_{gaz}	:	Her bir gazın molar ağırlığı (kg/kmol)
\dot{m}	:	Kütleli debi (kg/s)
\dot{m}_{buhar}	:	Buharın kütleli debisi (kg/s)
$\dot{m}_{\text{çev}}$:	Çevre havasının kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_{kh}	:	Kabin ortamından gelen havanın kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_{mix}	:	Çevre havasıyla kabinden gelen havanın karışım durumundaki kütleli debisi (kg/s)
\dot{m}_{O_2}	:	İlave edilen ek oksijenin kütleli debisi (kg/s)
n	:	Termoçift (p ve n) sayısı
N	:	Kanatçık sayısı
N_{gaz}	:	Gazın mol sayısı (kmol)
N_h	:	Boyutsuz taşınım kondüktans parametresi
N_i	:	Boyutsuz akım parametresi
N_k	:	Boyutsuz ısı kondüktans/taşınım kondüktans parametresi
Nu	:	Nusselt sayısı
N_t	:	Toplam mol sayısı (kmol)
N_v	:	Boyutsuz voltaj parametresi
P	:	Kanatçığın çevre uzunluğu (m)
PP	:	Akışın temas ettiği çevre uzunluğu (m)
Pr	:	Prandtl sayısı
P_{doyma}	:	Suyun doyma basıncı (kPa)
P_{gaz}	:	Gazın kısmi basıncı (kPa)
$P_{\text{su buharı}}$:	Su buharının kısmi basıncı (kPa)
P_t	:	Atmosfer basıncı (kPa)
q_{aty}	:	Ardışık 2 kanatçık arasında alt taban (base) yüzeyinden taşınım ile transfer edilen ısı transfer hızı (W)
$q_{\text{çkç}}$:	Çoklu kanatçık dizisinden transfer edilen toplam ısı hızı (W)
$q_{kç}$:	Bir kanatçıktan iletimle olan ısı transfer hızı (W)
$q_{kç,dar}$:	Dar kanal akışı durumunda kanatçıklardan olan ısı transfer hızı (W)
$q_{kç,geniş}$:	Geniş kanal akışı durumunda kanatçıklardan olan ısı transfer hızı (W)
$q_{kç,max}$:	Kanatçıklardan transfer olan maksimum ısı transfer hızı (W)
q_{kkm}	:	Bebenin kalbinin her atımında saniyede gönderdiği kan miktarı (ml/kg.s)
$q_{uz,kç}$:	Sonsuz uzunluktaki kanatçıktan transfer edilen ısı transfer hızı (W)
\dot{q}	:	Isı üretimi miktarı (W/m ³)
\vec{q}	:	Isı akısı (W/m ²)
$\dot{Q}_{\text{buharlaştırma}}$:	Buharlaştırma ile ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_c	:	TE modülün soğuk yüzeyinden çekilen ısı hızı (W)
Q_c^*	:	Boyutsuz TE modülün soğuk yüzeyden çekilen ısı
$\dot{Q}_{c,max}$:	TES modülün çekebileceği maksimum soğutma gücü (W)
\dot{Q}_{ckb}	:	Cilt ve kuvöz ortamı arasında buharlaşmayla olan ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{ck1}	:	Cilt ve kabin duvarları arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı (W)

\dot{Q}_{cyi}	:	Bebeğin cildinden yatağa iletimle olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{çkt}$:	Çekirdekten kan ile taşınımıyla olan ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{dci}	:	Bitişik tabakalar (dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{dç1}$:	Kabin duvarları ve çevre ortamı arasında ışınlımla olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{dçt}$:	Kabin duvarları ve çevre ortamı arasında gerçekleşen taşınım ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{dçty}$:	Her bir yüzey için kabin duvarları ve çevre ortamı arasında gerçekleşen taşınım ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{di}	:	Kabin duvarlarından iletimle gerçekleşen ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_h	:	TE modülün sıcak yüzeyinden atılan ısı (W)
\dot{Q}_h^*	:	Boyutsuz TE modülün sıcak yüzeyinden atılan ısı
\dot{Q}_{ht}	:	Termoelektrikli kuvöz sisteminde, TE ısı pompası üzerinden geçirilen havaya taşınımıyla aktarılan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{ih/sh}$:	Termoelektrikli kuvöz sisteminde ısıtma/soğutma + karışım havasından gelen ısı güçlerinin toplamı (W)
\dot{Q}_{iletim}	:	İletimle olan ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{Joule}	:	Joule ısı hızı (W)
$\dot{Q}_{kayıp}$:	Kabin havasının kabine girdiği ve çıktığı noktalar arasındaki kaybettiği enerji miktarı (W)
\dot{Q}_{kct}	:	Cilt ve kuvöz ortamı arasında taşınımıyla olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{kç}$:	Kanatçıktan olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{kç1}$:	TE ısı pompası sisteminde kapalı çerçevede bulunan nesnelere ışınlımla kaybolan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{kç,max}$:	Kanatçığın tüm yüzeylerinin kanatçık dip sıcaklığında olması durumundaki ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{kç,yok}$:	Kanatçık yokken tüm yüzeyden olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{kçz}$:	Kanatçık olmayan yüzeylerden olan ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{kdt}	:	Kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasında gerçekleşen taşınımıyla ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{kyt}	:	Kabin ortamı (havası) ve yatak arasında olan taşınımıyla ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{met}	:	Metabolizma ısı hızı (W)
\dot{Q}_{mix}	:	Kabin ortamından gelen hava + çevre ortamından alınan taze hava + varsa ilave O ₂ tarafından gelen ısı güçlerinin toplamı (W)
$\dot{Q}_{Peltier}$:	Peltier ısı hızı (W)
$\dot{Q}_{s,duyulur}$:	Solunumdan dolayı oluşan duyulur ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{s,gizli}$:	Solunumdan dolayı oluşan gizli ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{taşınım}$:	Taşınımıyla olan ısı transfer hızı (W)
$\dot{Q}_{Thomson}$:	Thomson ısı hızı (W)
\dot{Q}_{thp}	:	Termoelektrikli kuvöz sisteminde, TE ısı pompası tarafından üretilen toplam ısı transfer hızı (W)
\dot{Q}_{top}	:	Toplam ısı transferi miktarı (W)
$\dot{Q}_{ty,max}$:	Toplam yüzeyin kanatçık dip sıcaklığında verdiği ısı miktarı (W)
$\dot{Q}_{yayılan,max}$:	Bir yüzeyden yayılabilecek maksimum ışınlım transferi miktarı (W)

\dot{Q}_{yki}	:	Yatağın altında bulunan kızak ve mekanik düzeneğe iletimle olan ısı transfer hızı (W)
rr	:	Bebeğin solunum hızı (s^{-1})
R	:	TE modülün iç direnci (Ω)
R^{**}	:	TES modülün efektif iç direnci (Ω)
Ra	:	Rayleigh sayısı
Re	:	Reynolds sayısı
Re_z	:	Kanatçıklar arası boşluğa göre tanımlanmış Reynolds sayısı
Re_z^*	:	İndirgenmiş Reynolds sayısı
R_{di}	:	Pleksiglas malzemesinin iletim direnci ($W/^\circ C$)
R_e	:	Evrensel gaz sabiti (kJ/kmol.K)
R_{gaz}	:	Gaz sabiti (kJ/kg.K)
R_r	:	Boyutsuz direnç parametresi
R_{rd}	:	Dış ortamın ışıınım (radyasyon) direnci ($W/^\circ C$)
R_{ri}	:	İç ortamın ışıınım (radyasyon) direnci ($W/^\circ C$)
R_{td}	:	Dış ortamın taşınım direnci ($W/^\circ C$)
R_{ti}	:	İç ortamın taşınım direnci ($W/^\circ C$)
R_{top}	:	Toplam termal direnç ($W/^\circ C$)
R_L	:	Yük direnci (Ω)
R_{N_2}	:	Azot gazı sabiti (kJ/kg.K)
R_{O_2}	:	Oksijen gazı sabiti (kJ/kg.K)
s	:	Kanatçıklar arasındaki boşluk sayısı
S_{bya}	:	Bebeğin yüzey alanı (m^2)
t	:	Kanatçık kalınlığı (m)
t_{base}	:	Kanatçık taban (base) kalınlığı (m)
t_{opt}	:	Optimum kanatçık kalınlığı (m)
t_{hc}	:	Cilt kalınlığı (m)
t_{hd}	:	Pleksiglas malzemesinin kalınlığı (m)
t_{hy}	:	Yatağın kalınlığı (m)
\bar{T}	:	TE modülün yüzey sıcaklıklarının ortalaması (K)
T_{base}	:	Isı kuyusunun taban (base) sıcaklığı ($^\circ C$)
T_c	:	TE modülün soğuk yüzey sıcaklığı ($^\circ C$)
T_c^*	:	Boyutsuz TE modülün soğuk yüzey sıcaklığı
T_{cs}	:	Bebeğin cilt sıcaklığı ($^\circ C$)
$T_{\text{çev}}$:	Çevre havasının sıcaklığı ($^\circ C$)
$T_{\text{çs}}$:	Bebeğin çekirdek sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{dip}	:	Kanatçık dip sıcaklığı ($^\circ C$)
$T_{\text{dönüş}}$:	Kabin ortamından geri emilen havanın sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{ds}	:	Kabin duvarlarının sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{dsd}	:	Kabinin dış yüzey sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{dsi}	:	Kabinin iç yüzey sıcaklığı ($^\circ C$)
$T_{giriş}$:	Kabine giren hava sıcaklığı ($^\circ C$)
T_h	:	TE modülün sıcak yüzey sıcaklığı ($^\circ C$)
T_h^*	:	Boyutsuz TE modülün sıcak yüzey sıcaklığı
T_{hs}	:	Kabin ortamında bulunan havanın sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{khs}	:	Kabin ortamından gelen havanın sıcaklığı ($^\circ C$)
T_{mix}	:	Çevre havasıyla kabinden gelen havanın karışım durumundaki sıcaklığı ($^\circ C$)
T_o	:	Duvar sıcaklığı ($^\circ C$)

T_{O_2}	:	İlave edilen ek oksijenin sıcaklığı (°C)
T_{ort}	:	Ortalama dış hava sıcaklığı (°C)
$T_{ort\ hava}$:	Ortalama kabin havası sıcaklığı (°C)
$T_{ort\ iç\ yüzey}$:	Ortalama kabin iç yüzey sıcaklığı (°C)
$T_{shç}$:	Solunan havanın çıkış sıcaklığı (°C)
T_{shg}	:	Solunan havanın giriş sıcaklığı (°C)
T_{sur}	:	Kapalı çerçevede bulunan nesnelere yüzey sıcaklığı (°C)
T_{ys}	:	Ortalama yatak sıcaklığı (°C)
$T_{yü}$:	Işınım ile ısı transferi yapan cismin yüzey sıcaklığı (K)
T_{yy}	:	Taşınım ile ısı transferi yapan cismin dip sıcaklığı (°C)
T_{∞}	:	Çevre ortamı akışkan sıcaklığı (°C)
T_{∞}^*	:	Boyutsuz sıcaklık
$T_{\infty,c}$:	Termoelektrikli sistemde soğuk kanatçıklı yüzey tarafındaki akışkanın sıcaklığı (°C)
$T_{\infty,c,\ç}$:	Termoelektrikli sistemde soğuk kanatçıklı yüzeyden çıkan hava sıcaklığı (°C)
$T_{\infty,c,g}$:	Termoelektrikli sistemde soğuk kanatçıklı yüzeye giren hava sıcaklığı (°C)
$T_{\infty,h}$:	Termoelektrikli sistemde sıcak kanatçıklı yüzey tarafındaki akışkanın sıcaklığı (°C)
$T_{\infty,h,\ç}$:	Termoelektrikli sistemde sıcak kanatçıklı yüzeyden çıkan hava sıcaklığı (°C)
$T_{\infty,h,g}$:	Termoelektrikli sistemde sıcak kanatçıklı yüzeye giren hava sıcaklığı (°C)
U_{∞}	:	Akışkan hızı (m/s)
\bar{U}_{∞}	:	Kanal boyunca ortalama hız (m/s)
V	:	Voltaj (V)
V_{hh}	:	Havanın hızı (m/s)
V_{kabin}	:	Kabin hava boşluğunun hacmi (m ³)
$V_{kç}$:	Kanatçıkların hacmi (m ³)
V_{kh}	:	Kan hacmi (ml)
V_{max}	:	Maksimum voltaj (V)
v_t	:	Bebeğin tidal hacmi (ml)
\dot{W}	:	TES modülün harcadığı güç miktarı (W)
\dot{W}^*	:	Boyutsuz TES modülün harcadığı güç miktarı
$\dot{W}_{shç}$:	Solunan havanın çıkış mutlak nemi (kg su baharı/ kg kuru hava)
\dot{W}_{shg}	:	Solunan havanın giriş mutlak nemi (kg su baharı/ kg kuru hava)
\dot{W}_n	:	TEJ modülden elde edilen güç çıktısı (W)
\dot{W}_n^*	:	Boyutsuz TEJ modülün güç çıktısı
$\dot{W}_{n,max}$:	TEJ modülden elde edilen maksimum güç çıktısı (W)
$Y_{\%N_2}$:	N ₂ gazının nihai konsantrasyonu (%)
$Y_{\%O_2}$:	O ₂ gazının nihai konsantrasyonu (%)
z	:	Kanatçıklar arası boşluk miktarı (m)
z_{opt}	:	Optimum kanatçıklar arası boşluk miktarı (m)
Z	:	TE performans katsayısı (figure of merit) (1/K)
Z^*	:	TEJ modül efektif TE performans katsayısı (1/K)
Z^{**}	:	TES modül efektif TE performans katsayısı (1/K)
ZT	:	Boyutsuz TE performans katsayısı

Yunan Alfabeti Sembolleri

α	:	Seebeck katsayısı (V/K)
α^*	:	TEJ modülün efektif Seebeck katsayısı (V/K)
α^{**}	:	TES modülün efektif Seebeck katsayısı (V/K)
α_{AB}	:	Termoçift olan A ve B malzemelerinin Seebeck katsayıları farkı (V/K)
α_y	:	Isı yayılım katsayısı (m^2/s)
β	:	Kanatçıklı yüzeyler için tanımlanmış bir terim
$\beta_{kç}$:	Çoklu kanatçık dizisindeki β sayısı
β_g	:	Hacimsel genleşme katsayısı ($1/K$)
ΔP	:	Basınç düşümü (Pa)
ΔT	:	Sıcaklık farkı (K)
ΔT_{max}	:	TES modülün soğuk ve sıcak yüzeyleri arasında oluşturabileceği maksimum sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)
ΔV	:	Gerilim (voltaj) farkı (V)
Δx	:	İki nokta arası uzaklık (m)
ϵ_c	:	Cildin yayma katsayısı
ϵ_d	:	Kabin duvarlarının ışıyım yayıcılık katsayısı
$\epsilon_{i,h}$:	TE ısı pompası sisteminde kuvözün iç tarafında kalan ısı kuyusunun yayıcılık katsayısı
$\epsilon_{kç}$:	Kanatçık etkinliği
$\epsilon_{kçt}$:	Toplam kanatçık etkinliği
η_c	:	TE sistemde soğuk kanatçıklı yüzeylerin bütün yüzey verimi
η_C	:	Carnot verimi
η_h	:	TE sistemde sıcak kanatçıklı yüzeylerin bütün yüzey verimi
$\eta_{i,kçb}$:	TE ısı pompası sisteminde kuvözün iç tarafında kalan ısı kuyusunun bütün yüzeylerinin verimi
$\eta_{kç}$:	Tek bir kanatçığın verimi
$\eta_{kçb}$:	Bütün kanatçıklı yüzeylerin verimi
$\eta_{kçt}$:	Toplam yüzey verimliliği
η_{max}	:	TEJ modülün maksimum ısı verimi
η_{MP}	:	TEJ modülün maksimum güçteki ısı verimi
η_{th}	:	TEJ modülün ısı verimi
θ	:	$(T - T_{\infty})$ sıcaklık farkına eşit olan matematiksel dönüşüm simgesi
μ	:	Dinamik viskozite ($kg/m.s$)
μ_c	:	Bebeğin cilt sıcaklığındaki havanın dinamik viskozitesi ($kg/m.s$)
μ_h	:	Havanın dinamik viskozitesi ($kg/m.s$)
ϑ	:	Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)
π_{AB}	:	A ve B malzemelerinin Peltier katsayısı (V)
ρ	:	Elektrik özdirenci ($\Omega.m$)
ρ^*	:	TEJ modülün efektif özdirenci ($\Omega.m$)
ρ^{**}	:	TES modülün efektif özdirenci ($\Omega.m$)
ρ_c	:	Bebeğin cilt (deri) yoğunluğu (kg/m^3)
$\rho_{ç}$:	Bebeğin çekirdeğin yoğunluğu (kg/m^3)
$\rho_{çev}$:	Çevre havasının yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{gaz}	:	Gazın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_h	:	Havanın yoğunluğu (kg/ml)
ρ_k	:	Kan yoğunluğu (kg/ml)
ρ_{kh}	:	Kabin ortamından gelen havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_{mix}	:	Çevre havasıyla kabinden gelen havanın karışım durumundaki

	yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{O_2}	: İlave edilen ek oksijenin yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_{su}	: Su yoğunluğu (kg/ml)
ρ_y	: Yoğunluk (kg/m ³)
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti (W/m ² .K ⁴)
σ_i	: Elektriksel iletkenlik ($\Omega.m$) ⁻¹
φ	: Bağlı nem değeri (%)
$\bar{\tau}$: Kayma gerilmesi (Pa)
τ_{AB}	: Thomson katsayısı (V/K)
$\dot{\Phi}_{\text{cev}}$: Çevre havasının hacimsel debisi (m ³ /s)
$\dot{\Phi}_{Kh}$: Kabin ortamından gelen havanın hacimsel debisi (m ³ /s)
$\dot{\Phi}_{\text{mix}}$: Çevre havasıyla kabinde gelen havanın karışım durumundaki hacimsel debisi (m ³ /s)
$\dot{\Phi}_{O_2}$: İlave edilen ek oksijenin hacimsel debisi (m ³ /s)

Matematiksel Semboller

d/dx	: Adi türev
$\vec{\nabla}$: Gradyant (vektör alanı)

Alt İndisler

c	: Soğuk yüzeydeki büyüklükler
ç	: Sistemden çıkan büyüklükler
g	: Sisteme giren büyüklükler
h	: Sıcak yüzeydeki büyüklükler
n	: n tipi yarı iletken malzemenin özellikleri
p	: p tipi yarı iletken malzemenin özellikleri

KISALTMA LİSTESİ

AC	:	Alternatif akım
DC	:	Doğru akım
PID	:	Oransal + integral + türevsel kontrolör
PLA	:	Polilaktik asit malzeme
PWM	:	Pulse width modulation (sinyal genişlik modülasyonu)
RH	:	Relative humidity (bağıl nem)
RTJ	:	Radyoizotop termoelektrik jeneratör
TE	:	Termoelektrik
TEJ	:	Termoelektrik jeneratör
TES	:	Termoelektrik soğutucu
WHO	:	World Health Organization (Dünya Sağlık Örgütü)

ÖNSÖZ

Tanıştığımız ilk andan itibaren akademik bilgisine, verdiği derslerde bilgiyi anlatma, aktarma ve kullanma şekline hayran olduğum, tanışıklığımız artınca sadece akademik bilgisinin değil hayata dair bilgisinin ve tecrübesinin adeta dipsiz bir kuyu misali sonsuz olduğunu gözlemlediğim, daha siz konuşmaya başlamadan yüzünüzden ne demek istediğinizi hemen anlayarak hızlı bir şekilde cevaplamasına hala nasıl yaptığını anlamayarak hayret ettiğim, gerek akademik konularda gerekse hayata dair konularda insani ve ahlaki yaklaşımlarını örnek edindiğim, bu doktora çalışmasının konusunun belirlenmesinde, içeriğin şekillenmesinde ve sonuçlanmasında bir üst akıl olarak beni her zaman yönlendirerek akademik anlamda yetişmemi sağlayan, beraber çalışmaktan her zaman gurur ve mutluluk duyduğum, bütün sorunlarımı ve planlarımı açık açık paylaşabildiğim, desteğini ve güvenini her zaman üzerimde hissettiren çok kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Fevzi KÖSEOĞLU'na sonsuz teşekkür ederim. Fevzi Hocam size ne söylesem eksik kalacak ancak bana öğrettikleriniz ve katkılarınız için size her zaman minnettar kalacağımı bilmenizi isterim.

Akademisyenlik yolculuğumu başlatan, yüksek lisans ve doktora süreçlerim boyunca danışmanlıklar yaparak her zaman yanımda olan, yöneticilik yaptığı yoğun zamanlarda bile onca işinin arasında bana her zaman vakit ayırarak bilgisini ve tecrübesini paylaşan, bana olan desteğini ve güvenini her zaman hissettiğim, tezin termal kamera ile görüntülerini almamı sağlayarak katkıda bulunan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Nazım USTA'ya ve tezin bütün aşamalarında desteğini ve katkısını esirgemeyen, her bir tez izleme komite toplantılarında İzmir'den kalkıp gelerek yılmadan katılan, bilgisini ve tecrübesini benimle her zaman paylaşan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Cem ÖZDOĞAN'a çok teşekkür ederim. Zora düştüğüm zamanlarda dertlerimizi paylaşarak birlikte kâh gülerken kâh ağlayarak beni motive eden ve aynı zamanda bilgisini ve tecrübesini paylaşarak her zaman destek olan çok kıymetli hocam Doç. Dr. Gülay YAKAR'a, tezin DC güç analizörü ile ölçümlerini yapabilmemi sağlayan sayın hocam Doç. Dr. Selim KÖROĞLU'na ve birlikte çalışmaktan çok keyif aldığım Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde çalışan değerli hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve idari personele teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada kullanılan cihazlar ve ekipmanların maddi desteğini sağlayarak çalışmanın gerçekleştirilmesini mümkün kılan, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve öğretim üyesi yetiştirme programı (ÖYP) yetkililerine de teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, benim bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatımın her anında bana her zaman moral ve güç veren, maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan canım annem-babam Nagihan ve Mehmet YELER'e, sevgili eşim Betül YELER'e ve biricik kardeşim Yasemin YELER YILMAZ'a gösterdikleri sevgi, sabır ve anlayış için teşekkür ediyorum. Doktora sürecinde dünyaya gelen kızım ECE'nin tez çalışmalarım nedeniyle oyun zamanından çaldığım anların telafisini sağlamak ümidiyle bu tezi başta kızım olmak üzere, değerli aileme atfediyorum.

1. GİRİŞ

Sürekli gelişen teknoloji ve artan bilgi birikimi sayesinde yenidoğanların mortalite (ölüm sayısı) ve morbidite (hastalığa yakalanma) oranı kayda değer şekilde azalmasına rağmen halen prematüre bebek sağlığı, tüm dünyada önemli bir konudur (Canbak 2009, Armand ve diğ. 2018, Nourani ve diğ. 2019, Joseph 2019, Krucinska ve diğ. 2019). Prematüre (preterm), çeşitli nedenler ve faktörlerden dolayı bebeğin beklenen tarihten daha önce doğmasıdır. Tıbben 24-25. haftadan sonra doğan her bebek, hayatta kalacak kadar olgundur (Knobel ve diğ. 2010, Lorth ve diğ. 2018). Ancak gerçekleşen erken doğum sebebiyle, bu bebeklerin bazı organları yeterince gelişemediği için bir takım sağlık sorunları yaşayabilmektedir (WHO 1997, Nourani ve diğ. 2019). Bu nedenle sağlık problemleri minimize edilene ve yaşamsal faaliyetlerini de kendi başlarına idame ettirebilecekleri zamana kadar, prematüre bebeklere özel bakım yapılması gerekmektedir. Hayata erken başlayan bu bebeklerin; sinir sistemlerinin tam gelişmemiş (immatür) olması nedeniyle termal strese yetersiz cevap vermesi, ısı üretimi ve aynı zamanda ısı yalıtımı sağlayan derialtı yağ dokularının az olması, kahverengi yağ dokusunun ve glikojen depolarının azlığı, kas dokusunun titreme hareketleri yapabilecek kadar gelişmemiş olması ve vücut yüzeyleri ağırlıklarına oranla daha geniş olması gibi nedenlerden dolayı ısı kayıpları fazladır (WHO 1997, Bayram 2006, Canbak 2009). Bu yüzden yenidoğan pretermiler, hayatlarının ilk dakikalarında vücut sıcaklık kontrolünü sağlamakta zorlandıkları için hipertermi ve hipotermi riski yaşamaktadırlar (Gray ve diğ. 2004, Degorre ve diğ. 2015, Yilmazoglu ve Biyikoglu 2017, Armand ve diğ. 2018). Tıp biliminde, vücut sıcaklığının 37,5 °C üzerine çıkmasına hipertermi, 36 °C'nin altına düşmesine hipotermi adı verilmektedir (Knobel ve diğ. 2010, Mccall ve diğ. 2018). Hipertermi ve hipotermi riski, alınacak birtakım önlemlerle ve doğumdan sonra prematürelilik derecesine bağlı olarak uygulanacak sıcak zincir basamaklarıyla önemli derecede engellenebilmektedir.

Hipertermi yaşayan bebeklere ilk olarak sıcak ortamı uzaklaştırıcı önlemlerle (giysilerin çıkarılması, sıcak suyla banyo yaptırılması, vb.), bebeklerin vücut sıcaklıkları düşürülmeye çalışılmaktadır. Ancak bu önlemlerin yetmediği durumlarda, hipertermi ve prematüre derecesine bağlı olarak bebek kuvöz içerisine alınarak ya bebeğin altına yerleştirilen ek bir soğutma battaniyesiyle vücut sıcaklığı kontrol altına alınmaya çalışılmakta ya da kuvözün hava sıcaklığı düşürülerek bebeğin vücut sıcaklığının düşmesi beklenmektedir (WHO 1997,

Gentherm 2019, Shraddha 2019). Soğutma battaniyesi plastikten yapılmış ve bir cihaz vasıtasıyla battaniye içerisine su veya soğutucu ajanlar pompalanarak istenilen soğutmayı sağlamaktadır (Gentherm 2019). Hipotermi durumunda ise bebek, vücut sıcaklığını sabit tutabilmesi için ek ısı ihtiyacı duymaktadır. Kullanılacak yöntem bebeğin gestasyonel yaşına (gebelik süresi), doğum ağırlığına ve sağlık durumuna göre değişmekle birlikte sırasıyla anneyle cilt cilde temas (kanguru bakımı yöntemi), radyant ısıtıcı altına yerleştirme ve son olarak kuvöze yerleştirme yöntemleri kullanılmaktadır (WHO 1997, Onalo 2013, Armand ve diğ. 2018). Bu yöntemlerin temel hedefi, bebeğin ihtiyacı olan ek ısıyı sağlamaktır. Bununla birlikte son zamanlarda literatürde polietilen torba, polietilen başlık, vinil torba yerleştirme ve polietilen örtüyle sarmalama gibi ek bariyer yöntemleriyle hipotermimin engellenebildiği belirtilmektedir (Çağlar 2011, Kösa ve Çınar 2014). Bu ek bariyer yöntemlerindeki temel amaç ise bebeğin ısı kayıplarının ve transepidermal su kaybının azaltılması sağlanarak bebeğin vücut sıcaklığı muhafaza edilmeye çalışılmaktadır. Ek bariyer yöntemleriyle özellikle buharlaşmayla ısı ve sıvı kaybı engellenebilmesine rağmen bu yöntemler durumu zaten kritik olan bebeğe acil durumlarda müdahale edilmesini önemli bir şekilde engellemekte ve daha da önemlisi bebeğin ihtiyaç duyduğu uygun sıcaklık, bağıl nem ve oksijenin bu yöntemlerde kontrol edilebilmesi mümkün değildir (Tol 2005). Her bir yöntemin kendine ait avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak prematüre bebekler, normal bebeklere kıyasla risklere daha açık olduğu için bebeğin gerekli temel ihtiyaçlarını (sıcaklık, bağıl nem ve oksijen), kontrollü ve yüksek hassasiyette sağlayan kuvözler, diğer yöntemlere göre daha üstündür. Ayrıca kuvözlerde; istenilen sıcaklık, bağıl nem ve oksijen ile bebeğin etrafı homojen olarak sarılmakta, ısı kayıpları minimumda tutulmakta, gürültü, toz ve enfeksiyonlara karşı bebek izole tutulmaktadır (Molga-Seon ve diğ. 2014, Singla ve Singh 2015).

Günümüzde kullanılan kuvözlerin sıcaklığı, elektrikli rezistans ile ayarlanmakta ve bebeğin sadece hipotermi durumundaki ihtiyaçları karşılanmaktadır. Hipertermi durumunda ise rezistanslı kuvöze ya ikinci bir sistem olarak soğutma battaniyesi ilave edilerek bebeğin vücut sıcaklığı kontrol edilmeye çalışılmakta ya da kuvözün hava sıcaklığı düşürülerek bebeğin vücut sıcaklığının normal değerlere düşmesi beklenmektedir (Gentherm 2019, Shraddha 2019). Soğutma battaniyesini, kuvöz sisteminin içerisine yerleştirilebilmesi için ya bebek hareket ettirilerek rahatsız edilmekte ya da soğutma battaniyesi ikinci bir kuvözün içerisine yerleştirilerek bebek buraya taşınmaktadır. Her iki durumda da sistemin yerleştirilmesi esnasında kuvözün kabini açılıp kapanacağı için ayarlanan sıcaklık, bağıl nem ve oksijen

değerlerinde belli bir süre dalgalanmalar yaşanmaktadır. Diğer yandan, kuvözün hava sıcaklığı düşürüldüğünde ise kuvözün sıcaklığı istenilen hızda düşmemekte veya istenilen soğutmayı yapamamaktadır. Bu durumda, sağlığı zaten kritik olan prematüre bebeğin ihtiyacı olan ortam şartları sağlanamamaktadır. Bununla birlikte şu anki kuvözler genellikle çevre sıcaklığı 20-30 °C aralığında bulunan ortamlarda çalıştırılmak üzere tasarlanmıştır (EN 60601-2-19 2011, Tol 2005). Tasarlanan bu sıcaklık değerlerini hastane ortamlarında elde etmek mümkündür ve rezistanslı kuvözler rahatlıkla çalışabilmektedir. Ancak kuvözün kullanıldığı yerin coğrafi konumuna ve iklim şartlarına göre ya da prematüre bebeği kırsalda bulunan bir hastaneden teknolojik donanımlı bir hastaneye transport kuvöz ile taşınması sırasında, çevre sıcaklığı tasarlanan bu değerlerden daha yüksek olabilmektedir. Böyle durumlarda günümüzdeki rezistanslı kuvözlerin istenilen sıcaklık, bağıl nem ve oksijeni sağlaması mümkün değildir. Ayrıca EN 60601-2-19 standartlarında (2011), kuvözün kabin içi hava sıcaklığı çevre sıcaklığından en az 3 °C fazla olmadığı durumlarda, kuvözün istenilen hedefi gerçekleştirmesi mümkün olamayabileceği belirtilmiştir (Tol 2005). Bütün bunlara ek olarak, mevcut kuvözler elektrikli rezistansla ısıtıldığından dolayı kuvöz sisteminin harcadığı toplam elektriksel gücün büyük bir kısmı (~ %80-90) rezistansla harcanmaktadır. Ayrıca rezistanslı ısıtıcının yüzey sıcaklığı yüksek sıcaklıklara (150 °C'ye kadar) çıkabilmekte ve kuvözde herhangi bir sorun olması durumunda bu yüksek sıcaklık, çevrede bulunan nesnelere ve cihazlar için bir tehdit oluşturabilmektedir. Rezistans yüzeyinin bu yüksek sıcaklığa çıkmasına bağlı olarak, kuvöz içi sıcaklık dalgalanmaları rezistanslı sistemlerde $\pm 0,8$ °C olabilmektedir. Dolayısıyla mevcut sistemlerde yaşanan bütün bu sorunlar ve eksiklikler, bu çalışmada önerilen termoelektrik (TE) ısı pompası sistemiyle çalışan bir kuvöz sistemi tasarlanarak ortadan kaldırılabilir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin amacı; mevcut rezistanslı kuvöz sisteminin genel tasarımı değiştirilmeden, mevcut sistemdeki rezistans elemanı ve kontrol ünitesi çıkartılarak, prematüre bebekler için hem ısıtma hem de soğutma ihtiyaçlarını aynı cihaz üzerinde gerçekleştirebilen, rezistanslı sistemlere göre hem daha hassas sıcaklık kontrolü sağlayan hem de daha verimli bir şekilde termoelektrik ısıtma ve soğutma prensibiyle çalışan bir kuvöz sistemi tasarlamaktır. Tasarlanan sistemde, bebeğin ihtiyacına göre kabinin ısıtılması ve soğutulması tek bir cihazla sağlanabildiği için bebeğe dokunma olmayacak ve bebeğe herhangi bir rahatsızlık

verilmeyecektir. Aynı zamanda kuvözü soğutmak için ikinci bir ek cihaza ihtiyaç olmayacaktır. Dolayısıyla kuvözün kabini açılıp kapanmayacak ve kuvöz içerisindeki sıcaklık, bağıl nem ve oksijen değerlerinde herhangi bir dalgalanma olmayacaktır. TE sistemler, deşiklerin (hole) ve elektronların katı hal içerisindeki hareketleriyle ısıtma ve soğutma gerçekleştirebildikleri ve herhangi bir hareketli parça bulundurmadığı için kuvöz içerisinde bir gürültü seviyesi oluşturmayacaklardır. Bununla birlikte önerilen sistem çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda soğutma modunda çalıştırılarak, bir kuvözden istenilen parametreler dünyanın herhangi bir bölgesinde rahatlıkla kontrol edilebilecektir. Bütün bunlara ek olarak, kuvözlerin genellikle ısıtma modunda çalıştırıldıkları düşünüldüğünde, önerilen termoelektrikli kuvöz sistemi katı hal bir ısı pompası gibi çalıştığı için önerilen sistemin COP (coefficient of performance, performans katsayısı) değeri, her zaman rezistanslı sistemden daha yüksek olacaktır. Yani önerilen sistem daha az bir güç tüketimiyle istenilen aynı işi yapabilecektir.

Bu çalışma kapsamında, TE yarı iletken malzemeler ve bu malzemelere bağlı teknolojiler kullanılarak, ülkemizin belirlediği öncelikli alanlardan biri olan sağlık sektöründe yeni, rekabetçi ve özgün değeri olan teknolojik tıbbi bir cihaz tasarlanması (Termoelektrikli Prematüre Bebek Kuvözü) hedeflenmiştir. Termoelektrikli kuvöz sisteminin geliştirilme aşamasından önce ticari bir prematüre bebek kuvözünün (AMS Amenity XP) tasarım parametreleri (ısıtma, soğutma güçleri, hava debisi ve hızları, taze hava miktarı, vb.) tez kapsamında kurulan deney düzeneğiyle belirlenmiştir. Ardından literatürde mevcut olan çalışmalardan (Simon ve diğ. 1994, Al-Taweel 2006, Lee 2010, Lee 2017) faydalanarak bebek kuvözü sisteminin ve TE ısı pompası sisteminin, matematiksel modellemeleri yapılmıştır. TE sistemlerin optimizasyonu için Lee (2017) tarafından geliştirilen boyutsuzlaştırma yöntemiyle elde edilen önemli boyutsuz parametreler tanımlanmıştır. Ticari kuvözden ölçülerek belirlenen tasarım parametreleri ve TE ısı pompası sisteminin matematiksel modellemesindeki denklemler kullanılarak, nümerik bir paket programı olan MATLAB® yardımıyla termoelektrikli kuvöz sisteminin optimizasyonu maksimum ısıtma yükü yakınlarındaki maksimum COP_{ısıtma}'ya göre yapılmıştır. Optimizasyon sonucunda, termoelektrikli kuvöz sisteminin optimum soğutma ve ısıtma gücü için en uygun termoçift sayısı, kanatçıklı yüzeylerin kanat geometrisi, faz hızları, optimum çalışma voltajı ve akımı belirlenmiştir. Oluşturulan kuvöz sisteminin matematiksel modellemesi kullanılarak, MATLAB®-Simulink ortamında AMS Amenity XP kuvözünün transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Transfer fonksiyonları MATLAB®-PID tuning arayüzünde çağrılarak, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemin hassas bir şekilde otomatik

kontrolünü sağlayan PID sabit katsayıları (K_P , K_I , K_D) belirlenmiştir. Ardından önerilen sistemin çalışmasını sağlayan optimum TE ısı pompası sistemi, tez kapsamında üretilmiştir. Üretilen optimum TE ısı pompası sisteminin otomatik kontrolünü sağlamak için gerekli elektronik ekipmanlar temin edilerek, sistemin yazılımı Arduino ortamında oluşturulmuştur. Geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin dinamik davranışları, ısı ve hidrolik performans karakteristikleri tez kapsamında kurulan deney düzeneğinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak mevcut rezistanslı kuvöz sistemlerle geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi, deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bu tez çalışmasının kapsamı; (i) TE malzeme kullanılarak teknolojik tıbbi bir cihaz tasarlanması, (ii) sistemlerin matematiksel modellenmesi ve (iii) nümerik bir paket program kullanılarak üretilen sistemin optimizasyonu, üretimi ve otomatik kontrolü olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİSİ ve ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk olarak tez konusu olan “prematüre bebekler” ve “termoelektrik” hakkında temel bilgilerden bahsedilmiştir. Ardından her bir konunun kısa bir şekilde tarihçesi hakkında bilgi verildikten sonra bu konularla ilgili literatürde yapılmış önceki çalışmalar özetlenmiştir.

2.1 Prematüre Bebekler

Dünyada her gün binlerce bebek doğmakta ve normal doğan bebeklerin gebelik süreleri (gestasyonel süre) 38-42 hafta arasında sürmektedir. Herhangi bir nedenden dolayı doğumun 37. haftadan önce gerçekleşmesine erken doğum (preterm) denilmekte ve bu şekilde normal sürelerinden önce doğan bebeklere de prematüre (olgunlaşmamış) doğan bebek adı verilmektedir (Bayram 2006, Ahmed ve diğ. 2013, Ishak ve diğ. 2017, Zaylaa ve diğ. 2018). Prematüre doğan bebekler, doğumun gerçekleştiği gestasyonel hafta sayısına ve yenidoğan bebeğin doğum ağırlıklarına göre sınıflandırılabilir. Prematüre bebekler gebelik hafta sayısına göre 3 grupta incelenmektedir:

- İleri derecede prematüre (24-31 hafta arasında doğan bebekler)
- Orta derecede prematüre (32-35 hafta arasında doğan bebekler)
- Sınırdaki prematüre (36-37 hafta arasında doğan bebekler)

Doğum ağırlıklarına göre:

- 2500 g altındakiler düşük doğum ağırlıklı (DDA)
- 1500 g altındakiler çok düşük doğum ağırlıklı (ÇDDA)
- 1000 g altındakiler çok çok düşük doğum ağırlıklı (ÇÇDDA) prematüre olarak sınıflandırılmaktadır (WHO 2012, Zenciroğlu ve Koç 2013, WHO 2015, Balaban 2016, Acunaş ve diğ. 2018).

Yenidoğanın anne karnındaki sıcaklığı, anneninkine (36,5 °C) yakındır ve bebek doğduğunda ise 25-28 °C doğumhane çevre sıcaklığına maruz kalmaktadır. Doğumdan sonraki bu 10-12 °C sıcaklık farkıyla beraber, ısı transferi mekanizmalarıyla ısı kayıplarının meydana

gelmesi, düşük doğum ağırlığı gibi nedenlerle yenidoğanlar, hayatlarının ilk dakikalarında vücut sıcaklık kontrolünü sağlamakta zorlanmaktadır (WHO 1997, Çağlar 2011). Bu durum, bazı organları tam gelişmeden doğan prematüre bebeklerde daha fazla önem arz etmektedir. Çünkü prematüre bebeklerde vücut sıcaklık kaybı dakikada 0,1-0,3 °C olabilmekte ve doğumdan sonraki ilk 10-20 dakika içerisinde bebeğin vücut sıcaklığında 2-4 °C'ye kadar düşüşlerin oluşabildiği bilinmektedir (Çağlar 2011, Singla ve Singh 2015). Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization, WHO) ısı kaybını önlemek için preterm bebeği, doğar doğmaz radyant bir ısıtıcının altına yerleştirme, ıslak örtüleri uzaklaştırma, önceden ısıtılmış bir bezle bebeği sarma gibi standart sıcak zincir basamaklarını önermektedir. Ancak bütün bu önlemler, bebeğin doğumundan sonra vücut sıcaklığını normal sınırlar arasında tutmada yetersiz kaldığı bilinmektedir (WHO 1997, Çağlar 2011). Kısa sürede gerçekleşebilen bu sert düşüşler, bebekte hipotermi gelişmesine sebep olabilmekte ve prematüre bebeklerde mortalite ve morbidite oranını artırmaktadır. Bu yüzden bu bebeklerin sağlıklı olarak yaşayabilmesi için hastanelerde özel ortamlarda tutulmaları ve uzman kişiler tarafından izlenmeleri gerekmektedir. Ayrıca prematüre bebeklerde doğumdan sonraki altın zamanlar olarak bilinen ilk 12 saat boyunca, bebeklerin vücut sıcaklıkları çok hassas bir şekilde kontrol edilmelidir (WHO 1997, Çağlar 2011, Kösa ve Çınar 2014, Kutman ve diğ. 2015).

Yenidoğanların vücut sıcaklığını kontrol edebilmesine yardımcı olabilmek için çevre sıcaklığının ayarlanması gerekmektedir. Bu yüzden bebeğin normal vücut sıcaklığını temin edebilmesi için en az oksijen tüketimi ve metabolik harcama yaptığı sıcaklık olan nötral ortam sıcaklığının sağlanması gerekmektedir. Literatürde, bebeğin doğum ağırlığına ve doğumdan itibaren geçen süreye (bebeğin gestasyonel yaşına) bağlı olarak, bebek için uygun nötral ortam sıcaklığının hangi değerlerde olması gerektiği belirlenmiştir (Tablo 2.1). Nötral ortam sıcaklığının oluşturulabilmesi için ortamın sıcaklığı, hava akımı ve etrafındaki nesnelerin sıcaklıklarının bir bütün olarak düşünülerek hepsinin etkisi göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Tedavi altına alınan bir bebek, ortam sıcaklığı 30 °C olan bir ortamda, vücut sıcaklığını kararlı bir şekilde sabit tutabiliyorsa herhangi bir cihazdan yardım almadan kendi yaşamını sürdürebileceği anlamına gelmektedir. Literatürde özellikle düşük doğum ağırlıklı prematüre bebeklerin, bu dengeyi vücut ağırlıkları 1800 g değerine ulaştıktan sonra başarabildikleri bildirilmiştir (Tol 2005).

Preterm bebeklerin vücut sıcaklıklarının düzenli olarak belli aralıklarda ölçülmesi gerekmektedir. Vücut sıcaklığı rektal yolla, timpanik (kulak) membran, aksiler bölgelerden

ölçülebilmektedir. Özellikle orta ve ileri derecedeki prematüre bebeklerde rektal yolla sıcaklık ölçümü yapmak, rektal bölgede kanamaya sebep olabileceği için tavsiye edilmemektedir (Çağlar 2011). Prematüre bebekler, normal doğan bir bebek gibi tam olarak gelişemedikleri için teknolojik donanımlı Yenidoğan Yoğun Bakım Üniteleri'nin (YYBÜ) kurulması, bu konuda uzman ekiplerin oluşturulması ve çeşitli destek ve takip programlarının geliştirilmesi riskli yenidoğanların yaşayabilmelerini mümkün kılabilir. Ülkelerin gelişmişlik durumuna göre değişmekle birlikte, dünyadaki tüm gebeliklerin %10'unu düşük doğum ağırlıklı sonlanmakta ve bu bebeklerin yaklaşık %75'i prematüre olarak doğmaktadır. Bu bebeklerin morbidite ve mortalitelerin önlenmesi için yaşamlarının ilk anından itibaren bakım ünitelerinde doğumun gerçekleşmesi ya da bebeğin doğar doğmaz en yakındaki teknolojik donanımlı bir hastaneye taşınması (transport edilmesi) gerekmektedir.

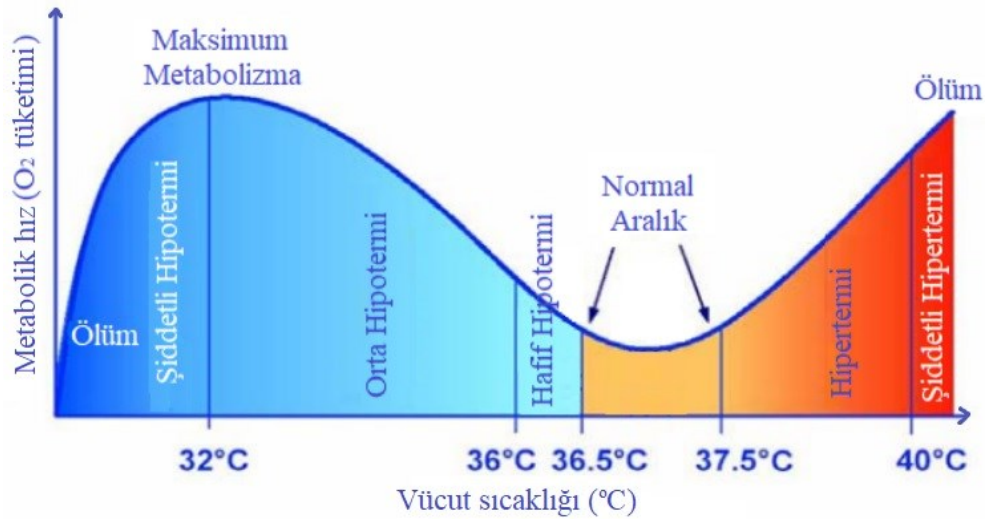
Tablo 2.1: Prematüre bebeklerin gestasyonel yaş ve doğum ağırlıklarına göre istenilen nötral ortam sıcaklık değerleri (Tol 2005, SRM Üniversitesi 2017)

Gestasyonel yaş	Doğum ağırlığı			
	1000-1200 g	1201-1500 g	1501-2500 g	>2500 g ile >36. hafta
0-12 saat	35,0 °C	34,0 °C	33,3 °C	32,8 °C
12-24 saat	34,5 °C	33,8 °C	32,8 °C	32,4 °C
24-96 saat	34,5 °C	33,5 °C	32,3 °C	32,0 °C
	<1500 g	1501-2000 g	<2500 g ile 36. hafta	
5-14 gün	33,5 °C	32,1 °C	32,0 °C	
2-3 hafta	33,1 °C	31,7 °C	30,0 °C	
3-4 hafta	32,6 °C	31,4 °C		
4-5 hafta	32,0 °C	30,9 °C		
5-6 hafta	31,4 °C	30,4 °C		

2.1.1 Hipertermi ve hipotermi

Çevre sıcaklığının sürekli değişmesine rağmen canlıların vücut sıcaklığı sabittir. Herhangi bir nedenle canlıların vücut sıcaklığının normalin üzerine çıkmasına hipertermi, altına inmesine ise hipotermi olarak tanımlanmaktadır. Her iki durumda da canlılar bazı sağlık problemleri yaşamaktadır. Bu yüzden vücut sıcaklığının kararlı bir şekilde korunması

gerekmektedir. Çekirdek (merkezi) sıcaklık, hayati organlar etrafındaki sıcaklık; perifer sıcaklık ise merkezden dışarda kalan bölgelerin dış yüzey sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Çekirdekteki sıcaklık normal koşullarda 37 °C'dir ve perifer sıcaklık ise her zaman çekirdek sıcaklığına göre 2-4 °C daha düşüktür. İnsanlarda vücut sıcaklığındaki eşik aralığı 0,2 °C olup, bu değer altında ve üstündeki değerlerde hipotalamustaki termoregülasyon merkezi vazodilatasyon (damar genişlemesi) ve terleme ile vücudun serinlemesini, vazokonstriksiyon (damar daralması) ve titreme ile vücudun ısınmasını sağlayarak vücut sıcaklığını ayarlamaktadır (Kuşdemir 2015). İnsanın çekirdek sıcaklığı her zaman sabit kalmalıdır. Aksi halde vücuttaki hayati işlemlerin bozulmasına bağlı olarak çekirdek sıcaklığındaki değişimler, kalıcı hasarlardan ölüme kadar gidebilecek komplikasyonları oluşturabilmektedir. Yenidoğan pretermler hayatlarının ilk dakikalarında ısı kontrolünü sağlamakta zorlandıkları için çoğunlukla hipertermi ve hipotermi riski yaşamaktadırlar. Hipertermi ve hipotermi riski, alınacak birtakım önlemlerle ve doğumdan sonra prematürelite derecesine bağlı olarak uygulanacak sıcak zincir basamaklarıyla, önemli ölçüde engellenebilmekte ve bebeğin vücut sıcaklığı normal sınırlar içerisinde tutulabilmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Vücut sıcaklığına bağlı olarak hipertermi ve hipotermi değişimi (Al-Taweel 2006)

2.1.1.1 Hipertermi

Vücut sıcaklığının 37,5 °C'den daha yüksek sıcaklıklara çıkması durumuna hipertermi denir. Yenidoğanlarda hipertermi, hipotermiye göre daha az sıklıkla görülmesine rağmen oldukça tehlikelidir. Yenidoğanlarda hipertermi çevresel faktörlerle (bebeğin çok fazla

giydirilmesi, ortam sıcaklığının aşırı artırılması), kuvöz veya radyant ısıtıcının sıcaklık değerlerinin yüksek olması, bebeğin fototerapiye fazla maruz kalması, enfeksiyon ve dehidratasyon gibi nedenlerle oluşabilmektedir. Prematüre bebeklerin gestasyonel yaşına bağlı olarak bazı organları yeterince gelişmeden doğum gerçekleştiği için hipertermi eğilimleri daha yüksektir. Prematüre bebeğin terleme ve diğer yollarla ısı kaybı sağlayarak, vücut sıcaklığını kontrol etme yeteneği yeterince gelişmemiştir. Bu yüzden prematüre bebeğin yaşamının ilk günlerinde hipertermi gelişimine dikkat edilmelidir. Özellikle vücut sıcaklığının 42 °C ve üzerine çıktığı durumlarda yüksek vücut sıcaklığı, bebeklerde kalıcı hasarlar bırakmakta ve hatta ölüme neden olabilmektedir (Çağlar 2011).

Hipertermi durumunda bebeğin vücut sıcaklığı düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için bebeğin üzerindeki giysiler çıkarılabilir, ortam ısısının sıcaklığı düşürülebilir, ılık su ile banyo yaptırılabilir. Ancak bebeğin vücut sıcaklığı, alınan bütün bu önlemlere rağmen düşmediği durumlarda plastik soğutma battaniyeleriyle bebeğin vücut sıcaklığı düşürülmeye çalışılmaktadır. Plastik soğutma battaniyesi, bir cihaz yardımıyla içerisinden su veya soğutma ajanı pompalanarak kontrollü bir şekilde vücut sıcaklığını düşürebilen cihazdır (Şekil 2.2). Bu yöntem aynı zamanda bebeğin, anne karnında veya doğum sırasında çeşitli nedenlerden dolayı bebeği besleyen plasentadan geçen oksijenin kesintiye uğramasıyla oluşan doğum ve perinatal asfiksi (birth and perinatal asphyxia) durumunda kullanılmaktadır (Gökmen 2018, Drager 2020).



(a)



(b)

Şekil 2.2: (a) Soğutma battaniyesi (b) Gentherm “Kool-Kit Neonate” cihazı (Gentherm 2019)

2.1.1.2 Hipotermi

Hipotermi, kısaca normal vücut sıcaklığının (36,5 °C) çevresel faktörler nedeniyle 36 °C'nin altına düşmesiyle oluşan sağlık problemidir. WHO'ya göre; vücut sıcaklığının 34-36 °C olması durumu hafif hipotermi (soğuk stres), 32-34 °C arası orta hipotermi ve 32 °C ve altı ise ağır hipotermi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1). Yenidoğan bebeklerde görülen neonatal (yenidoğan) hipotermi, bebek hayatını çok ciddi tehdit eden bir sorundur. Yenidoğanların ısı kayıplarını önlemek için alınan önlemler gelişmesine rağmen günümüzde halen yenidoğanlar hipotermi ile karşı karşıya kalmaktadır. Özellikle prematüre ve düşük doğum ağırlıklı bebekler, hipotermi gelişmesi açısından en fazla risk altındadırlar.

Normal doğan sağlıklı bebekler hemeotermiktir yani ısı üretimiyle ısı kaybı arasında denge sağlayarak vücut sıcaklığını sabit tutabilen bebeklerdir. Prematüre bebeklerden sınırda prematüre olanlarda, normal doğan bebekler gibi vücut sıcaklıklarını çok kısa bir sürede sabit tutabilmektedir. Ancak özellikle orta ve ileri derecedeki prematüre bebeklerin, vücut sıcaklıklarını kontrol etme yetenekleri azdır ve hipotermiye eğilimleri yüksektir. Genellikle hipotermi problemini, gelişmiş ülkelerden ziyade; elverişsiz ve yeterli sayıda donanımlı doğumhanelere sahip olmayan gelişmekte olan ülkeler daha fazla yaşamaktadırlar. Etiyopya'da bir hastanede düşük doğum ağırlıklı pretermilerin %67'sinde, İran'da 940 yenidoğanın %53,3'ünde, Nepal'de bebeklerin doğumdan sonra %80'inde ve Malta'da 710 bebeğin %74,5'inde hipotermi olduğu belirlenmiştir (Nayeri ve Nili 2006, Sodeman ve diğ. 2008, Çağlar 2011).

Ülkemiz, 2010 yılından itibaren başlattığı “Yenidoğan Yoğun Bakım Kursu” ve 2012 yılı sonu itibariyle “Yenidoğan Canlandırma Programı (Neonatal Resüstasyon Programı, NRP)” kapsamında 36.982 sağlık personeline ve uzmanına yenidoğanlarda dikkat edilmesi gereken konular hakkında eğitimler vermiştir. Aynı zamanda yenidoğan bebekler için çok sayıda yürütülen çeşitli projeler ve eğitim programlarıyla son zamanlarda önemli iyileşmeler gerçekleştirmiştir. Yenidoğan yoğun bakımlarının güçlendirilmesi için yenidoğan yoğun bakım merkezleri ve cihaz durumları senelere göre arttırılmıştır (Tablo 2.2). 2010 yılı öncesi Türkiye'de doğan prematüre bebek sayısı hakkında net bir bilgi yoktur. Ancak, 2012 yılında WHO'nun yayınladığı Erken Doğum Hakkında Küresel Eylem Raporu'nda (Born Too Soo), 2010 yılında Türkiye'de gerçekleşen canlı doğum sayısı 1.298.300 olarak belirtilmiştir. Ayrıca

raporda, bu sayının %11,97'sinin (155.400) prematüre doğum olarak gerçekleştiği ve bu preterm bebeklerin %4,8'inin kaybedildiği açıklanmıştır (Sağlık Bakanlığı 2014).

Tablo 2.2: Türkiye’de yoğun bakım merkezleri ve cihaz durumlarının senelere göre değişimi (Sağlık Bakanlığı 2014, Okumuş 2016, Sağlık İstatistikleri 2018)

Yıl	2002	2007	2008	2010	2012	2015	2018
Yenidoğan yoğun bakım yatak sayısı	665	1736	1980	2544	3114		12402
Yenidoğan vantilatörü sayısı	252	884	1146	717	900		
Transport kuvöz sayısı	158	626	672	438	490		
1. basamak yenidoğan yoğun bakımı bulunan kurumların sayısı		116	196	259	391	2008	
2. basamak yenidoğan yoğun bakımı bulunan kurumların sayısı		106	169	205	239	2331	
3. basamak yenidoğan yoğun bakımı bulunan kurumların sayısı		53	113	167	233	6039	

Yenidoğanların gestasyonel sürelerine bağlı olarak prematürelilik derecesi arttıkça, hipotermi riski de artmaktadır. Özellikle orta ve ileri derecede prematüre bebeklerin bazı organlarının tam gelişmemiş ve sinir sistemlerinin immatür olması nedeniyle termal strese yetersiz cevap vermesi, ısı üretimi ve aynı zamanda ısı yalıtımı sağlayan derialtı yağ dokularının az olması, kahverengi yağ dokusunun ve glikojen depolarının azlığı, kas dokusunun titreme hareketleri yapabilecek kadar gelişmemiş olması ve vücut yüzeyleri ağırlıklarına oranla daha fazla olması nedenlerinden dolayı ısı kayıpları fazladır (WHO 1997, Bayram 2006, Canbak 2009). Dolayısıyla bu bebekler, vücut sıcaklığını kontrol edememekte ve ısı kontrol mekanizmaları yeterince gelişmediği için çevrelerindeki sıcaklık değişimlerine karşı hızlı tepkiler vermektedir.

Preterm bebekler vücut sıcaklıklarını sabit tutabilmek ve aynı zamanda hipotermi gelişimini önlemek için dışarıdan ek ısı ihtiyacı duymaktadır. Ek ısı ihtiyacı; ısı yatağı, kuvöz, radyant ısıtıcı ve kanguru bakımı yöntemi gibi yöntemler sağlanmaktadır. Kullanılacak yöntem bebeğin yaşına, doğum ağırlığına ve sağlık durumuna göre değişmektedir. Bu yöntemlerin temel hedefi, bebeğin ihtiyaç duyduğu ek ısıyı bir cihaz vasıtasıyla elde ederek bebeğe uygun ortamı sağlamaktır. Literatürde son zamanlarda yapılan çalışmalarda, polietilen torba, polietilen başlık, vinil torba yerleştirme ve polietilen örtüyle sarmalama gibi ek bariyer yöntemleriyle de

hipotermi'nin önemli ölçüde engellenebildiği belirtilmektedir (Çağlar 2011, Kösa ve Çınar 2014). Bu ek bariyer yöntemlerinin temel amacı ise bebeğin ısı kayıplarının ve transepidermal su kaybının azalmasını sağlayarak, bebeğin vücut sıcaklığını muhafaza etmeye çalışmaktadır. Ayrıca normal hipotermiye ek olarak, prematüre bebeklerde farklı durumlardan ve koşullardan dolayı perioperatif ve terapötik hipotermi gelişebilmektedir. Bu hipotermi türleri, prematüre bebeklerin yanı sıra çeşitli faktörlerden dolayı yetişkin bireylerde de oluşabilmektedir.

2.1.1.3 Perioperatif hipotermi

Yaş, cinsiyet, beden kitle indeksi gibi bireysel faktörler ve aşırı ısı kaybı, anestezi, hastaların ameliyathane gibi soğuk yerlerde bulunmaları, hastaya tedavi amaçla verilen sıvıların (kan, serum) vücut sıcaklığından düşük olması gibi çevresel faktörler hipotermiye neden olmaktadır (Demirarslan 2015). Perioperatif hipotermi, ameliyat öncesi hastaya uygulanan preoperatif işlemlerle (anestezi öncesi 1 saat) başlayan ve postoperatif döneme (anestezi sonrası ilk 24 saat) kadar geçen süre içinde vücut sıcaklığının 36°C'nin altına düşmesi olarak bilinmektedir. Anestezi uygulanan hastaların yaklaşık yarısında perioperatif hipotermi gelişmektedir. Anestezi, bedenin belli bir bölümünü veya tamamını ağrıya karşı duyarsız hale getirdiği için vücutta bulunan sıcaklık reseptörlerinin çalışmalarını bozarak sıcaklıktaki değişikliklerin algılanmasını engellemektedir. Aynı zamanda anestezi, damarlarda vazodilatasyona neden olarak periferdeki daha soğuk kanın çekirdek sıcaklığıyla karışmasına ve hipotalamusta bulunan termoregülasyon merkezinin çalışmasını bozarak vücudun ısı kaybını artırmaktadır. ABD'de, her yıl 14 milyondan fazla kişinin perioperatif hipotermi yaşadığı ve anestezi sonrası yoğun bakımda yatan hastaların %30-40'nda perioperatif hipotermi görüldüğü bildirilmiştir Anestezi uygulanmasından sonra ilk 30 dakika içerisinde hastaların çekirdek sıcaklığı 1 °C, 60 dakikanın sonunda ise 1,6 °C düşmektedir. (Weirich 2008, Fred ve diğ. 2012, Demirarslan 2015). Avrupa'da anestezi altında ameliyat olan hastaların %43'ü dışardan ek bir ısıtma sistemiyle (sıcak hava üfleli sistemler veya rezistif sistemler) aktif olarak ısıtılmaktadır. Ülkemizde, anesteziyle cerrahi işlem uygulanan hastalara ameliyat öncesinde, ameliyat sırasında ve sonrasında uygulanan ısıtma ile ilgili belirli bir standart bulunmadığı için bu konuyla alakalı net bir veri bulunmamaktadır (Yüzden 2016). Oysaki cerrahinin en sık karşılaşılan ve kolaylıkla önlenilebilir bir komplikasyonu olan perioperatif hipotermi, ameliyat öncesinde, ameliyat sırasında ve sonrasında alınacak birtakım önlemlerle engellenebilir. Aynı

zamanda perioperatif hipotermi komplikasyonları önlenmesiyle birlikte, hastalar daha hızlı bir şekilde iyileşmekte, enfeksiyon riskleri azalmakta, ameliyat sonrası ağrı azalmakta, hastanede kalış süreleri kısaltılmakta, hasta memnuniyeti ve konforu sağlanmakta ve hastanenin maddi kayıpları azalmaktadır (Demirarslan 2015, Kuşdemir 2015, Yüzden 2016).

2.1.1.3.1 Sıcak hava üfleli (forced-air) ısıtıcılar

Bu ısıtıcılar, elektrikle çalışan bir cihazın ısı üreterek bir fan ünitesi vasıtasıyla hastanın üzerine örtülen bir örtünün içerisinde sıcak havayı dolaştırarak ısıtma sağlayan cihazlardır. Bu sistemde hastanın, gövde üzerine, gövde altına ve vücudun çeşitli bölgelerine örtüler (blanketler) yerleştirilerek hasta ısıtılmaktadır. Kotondan yapılmış bu örtülerin alt kısımlarında, örtünün içerisindeki sıcak havanın dışarı çıkıp hastayı sarmasını sağlayan ince delikler vardır. Bu sistemler, hastaların vücut sıcaklığına göre 32-43 °C'ler arası ısıtma yapabilmekte ve radyasyonla olan ısı kayıplarını azaltarak, taşınım yoluyla hastalara ısıtma yapabildiklerinden dolayı günümüzde perioperatif hipotermiyi önlemede en çok tercih edilen yöntemdir. Sektörde Bair-Hugger, Warmtouch, Thermacare, WarmAir gibi sıcak hava üfleli ısıtıcı sistemler bulunmaktadır (Şekil 2.3). Bu sistemlerin en büyük dezavantajları örtüler tek kullanımlıdır ve özellikle çok büyük insizyonlar (cerrahi kesi) gerektiren durumlarda yetersiz kalabilmektedirler. Ayrıca kullanılan cihazların sesli çalışması ve sürekli çalışan fan sesi, cerrahi ekibin konforunu bozan gürültü kirliliği yapmaktadır (Demirarslan 2015, Kuşdemir 2015, Yüzden 2016).



Şekil 2.3: a) Gövde üzeri sıcak hava üfleli ısıtma sistemi b) Bair-Hugger gövde altı sıcak hava üfleli ısıtma sistemi (Kuşdemir 2015)

2.1.1.3.2 Elektrikli battanierler (rezistif sistemler)

Elektrik enerjisini dirençler sayesinde ısı enerjisine dönüştüren ve gelişen teknolojiyle birlikte yarı iletken polimer ya da karbon fiberden yapılabilen düşük voltajlı (15 V) ve düşük akımlı ısıtma sistemleridir. Bu örtülerin (battaniye) bazılarının içerisinde su, jel, vb. bulunmakta ve 37-42 °C'ler arası ısıtma yapabilmektedir (Şekil 2.4). Elektrikli battanierler hastanın yatak çarşafının altına serildikleri için iletim yoluyla ısı transferi sağlayarak, üretilen ısının büyük bir kısmını hastaya aktarabilirler. Isıtıcı fanlar kadar etkilidir ve tek kullanımlık örtü gerektirmediği için daha ekonomiktir ve sessiz çalışmaktadırlar. Ayrıca hızlı bir şekilde hasta değişimi ve ısıtma yapılabildiğinden dolayı hasta sirkülasyonunun çok olduğu ameliyathanelerde personel iş yükünü azalttıkları için rahatlıkla kullanılabilir. Elektrikli battanierlerin, mikroorganizmaların ürememesi için belli periyotlara kimyasal bir sıvı içerisinde birkaç saat bekletildikten sonra 40 °C'lik su ile yıkanarak dezenfekte edilmeleri, bu sistemlerin dezavantajıdır. Ayrıca bu sistemlerde, hastanın uzun süre aynı pozisyonda yatması sonucu, lokal cilt yanıkları oluşabilmektedir (Demirarslan 2015, Kuşdemir 2015, Yüzden 2016).



Şekil 2.4: Medwarm W-500D rezistif ısıtma ve kontrol ünitesi (Yüzden 2016)

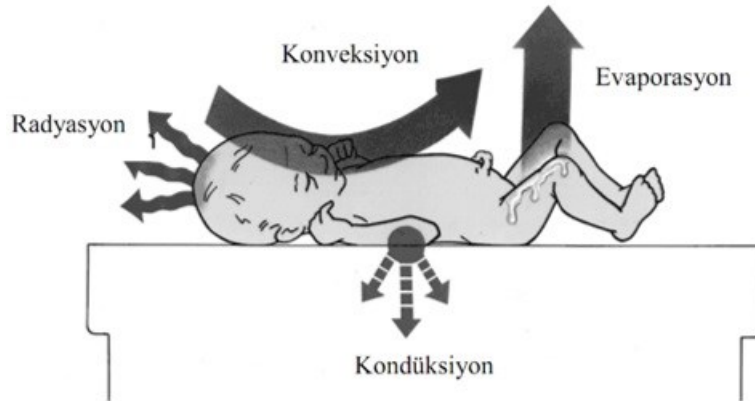
2.1.1.4 Terapötik hipotermi

Beyin travmalarında, kardiyak arrestlerde, asfiksi durumlarında ve aşırı kan kayıplarında vücut sıcaklığının kontrol edilmesi çok önemlidir. Çünkü insan beyni 30-32 °C'ye soğutulduğunda; kansız, oksijensiz, glikozsuz yaşayabilmektedir ve hatta kalbin durduğu durumda bile beyin, 45-60 dakika yaşayabilmektedir (Kapıdere 2005, Yavuz 2009). 1940'lı yıllarda keşfedilen bu bilgi kullanılarak kardiyopulmoner resüsitasyon (kalp masajı)

uygulanılarak, durmuş olan dolaşım ve solunumun yeniden sağlandıktan sonra hastaların uygun nörolojik geri dönüşümü başarılı bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu yüzden herhangi bir sebepten dolayı kalbi duran hastaların ilk 4-6 saat içinde vücut sıcaklığı 32-34 °C'ye indirilmektedir. Ardından hastaların vücut sıcaklığı 12-24 saat (ortalama 18 saat) bu sıcaklıkta sabit tutulmaktadır. Hastaların hedef sıcaklıkta yeterli süre tutulduktan sonra yavaş yavaş tekrar vücut sıcaklığına kadar ısıtılma işlemine terapötik hipotermi denir. Bu şekilde hastaların herhangi bir problem yaşamadan tekrar sağlıklı bir şekilde hayata geri dönmesi hedeflenmektedir (Duru 2015).

2.1.2 Yenidoğanlarda ısı transferi mekanizmaları

Isı üretimiyle ısı kaybı arasında denge sağlayarak vücut sıcaklığını muhafaza edebilme yeteneğine termoregülasyon denilmektedir. Yenidoğanlarda ısı üretimi metabolik aktivitelerle sağlanırken ısı kayıpları; buharlaşma (evaporasyon), radyasyon (ışınım), kondüksiyon (iletim), konveksiyon (taşınım) olmak üzere 4 yolla gerçekleşir (Şekil 2.5). Yenidoğanlarda, ortalama olarak buharlaşmayla 60-80 W/m², radyasyonla 50 W/m², konveksiyonla 25 W/m² olmak üzere toplam 130-135 W/m² ısı kaybı gerçekleşmektedir (Watkinson 2006).



Şekil 2.5: Yenidoğanın ısı kayıp mekanizmaları (Çağlar 2011)

Yenidoğanlar anne karnında iken nemli ortamda bulunurlar. Bu yüzden yenidoğan bebeklerin vücut sıvısı, normal bir insana göre daha yüksek olmaktadır. Zamanında doğan bebeklerde, vücut ağırlığının %82'sini su oluşturmaktadır. Prematüre bebeklerde bu oran, prematüre derecesine bağlı olarak artmakta ve %90'lara kadar çıkmaktadır. Dünyadaki klasik nem seviyesi (%40-50) bebeğe göre çok düşük olduğundan, bebeklerde buharlaşmayla (%70),

solunum yoluyla (%30) sıvı ve ısı kaybı daha çok olmaktadır. Bu bebekler özellikle radyant ısıtıcı gibi bir açık ortamda bulunmaları halinde, buharlaşma ısı kayıpları kayda değer (%50-150) olarak artmaktadır. Ayrıca bebeklerde, vücut yüzeyinin ağırlığa oranı daha fazla olduğu için cilt dokusunun yeterince gelişmemiş ve üzerinde bulunan termal iletkenliği yüksek doğumsal sıvılar olması nedeniyle ısı kayıpları çok hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Artan sıvı kayıplarının sonucu olarak, bebeğin bütün metabolik dengesi bozulabilmektedir. Özellikle düşük doğum ağırlıklı preterm bebeklerin yaşam şanslarının artırılabilmesi, bebeğin ihtiyaç duyduğu sıvı ve elektrolit dengesinin sağlanmasına bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle bu bebekler için bağıl nem seviyesi kontrol edilebilen kuvözlerin kullanılması gerekmektedir (Tol 2005). Yapılan araştırmalar, ortamın bağıl nemi arttırılarak buharlaşma ile sıvı ve ısı kayıplarının önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Ayrıca kuvöz kabini içerisindeki bağıl nem seviyesinin arttırılması, bebeğe daha iyi ve etkili bir ısıtma yapılabilmesini mümkün kılmaktadır (Tol 2005).

2.1.2.1 Buharlaşmayla (evaporasyon) ısı transferi

Buharlaşma, kendine has birtakım özellikler göstermesine rağmen literatürde taşınım ısı transferinin bir türü olarak düşünülür. Çünkü buharlaşma sırasında sıvının uçması aslında bir akışkan hareketidir. Buharlaşma, buharlaşma gizli ısı ile sıvı-buhar arayüzeyindeki yüzey gerilmelerine bağlı olması sebebiyle diğer taşınım türlerinden farklıdır ve buharlaşmayla ısı transferi, çift fazda gerçekleştiği için tek fazlı diğer taşınım türlerinden daha büyüktür. Buharlaşma, sıvı bir maddenin ısı alarak gaz haline geçip faz değiştirme işlemidir. Belli bir sıcaklıktaki buhar basıncı, sıvının doyma basıncından düşükse sıvı-buhar arayüzünde buharlaşma meydana gelir. Bir başka ifadeyle herhangi bir sıcaklıkta, yüzeyde olan sıvı moleküllerinden kinetik enerjisi yüksek olan tanecikler, sıvı molekülleri arasındaki çekim kuvvetini yenerek sıvı halden gaz hale geçip buharlaşırlar. Buharlaşma sonrasında geride kalan sıvı moleküllerinin ortalama kinetik enerjileri azaldığı için ortamdan ısı alarak enerjilerini yükseltirler. Bu şekilde buharlaşma olayı sürekli devam ederek sistem dengeye gelinceye kadar sürmektedir. Giysilerin, meyvelerin ve sebzelerin kuruması, insan vücudunun soğuması için terleme, buharlaşmaya verilebilecek en iyi örneklerdir. Buharlaşma ile ısı transferi Denklem (2.1) ifadesiyle hesaplanır (Çengel 2010).

$$\dot{Q}_{buharlaşma} = \dot{m}_{buhar} \cdot h_{b,gi} \quad (2.1)$$

Bebeklerde buharlaşmayla ısı transferi, anne karnında bebeğin etrafını sararak bebeğin korunmasını sağlayan amniyotik sıvının vücut derisi üzerinden buharlaşmasıyla meydana gelen ısı kaybıdır. Bu ısı transferi bebeğin doğumundan itibaren bir hafta boyunca en fazla ısı kaybettiği mekanizma türüdür. Vücut ve çevre sıcaklıklarının artması, buharlaşma hızını artırmaktadır. Ayrıca bebeğin ağırlığı ve gestasyonel süresi azaldıkça, sıvı kaybı üstel olarak artmaktadır (Tol 2005). Bu yüzden bebeğin doğduktan sonra vücut yüzeyinde bulunan verniks kazeozanın hemen temizlenmemesi gerektiği belirtilmektedir. Verniks kazeoza, bebeğin cildini nemlendirerek doğumu kolaylaştıran ve doğumdan sonra ise çevre sıcaklığı ile bebeğin uyumunu sağlayan kremi, kaygan yağ tabakasıdır. Buharlaşmayla ısı kaybı, çevrenin soğutucu etkilerinden korunarak ve özellikle çevrenin bağıl nemi artırılarak önlenmektedir. Çınar ve Dede (2006) çok düşük doğum ağırlıklı bebeklerde çevrenin bağıl nem oranının %20'den %80'e çıkarılmasıyla, buharlaşmayla oluşan ısı kaybının %75 oranında azaltılabileceğini belirtmişlerdir (Çağlar 2011). Buharlaşma ile ısı kaybını önlemek için prematüre bebekleri vinil torba içerisine yerleştirme, polietilen streç film ile sarmalama gibi ek bariyer yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile sıvı kaybı önemli ölçüde engellenebilmektedir. Ancak kullanılan bu maddeler, durumu zaten kritik olan bebeğin acil durumlarda müdahale edilmesini önemli bir şekilde engellemektedir. Ayrıca bu yöntemlerle, hipotermi önlenmesi için bebeğin ihtiyaç duyduğu uygun sıcaklık ve bağıl nemin kontrol edilmesi mümkün değildir.

2.1.2.2 Işınım (radyasyon) ısı transferi

Bebeğin vücut yüzeyi ile çevresindeki nesnelere arasında, sıcaklık farkından dolayı elektromanyetik dalgalar (fotonlar) şeklinde gerçekleşen ısı transferidir. Yenidoğanlarda, buharlaşmadan sonra en fazla ısı kaybı, ışınım yoluyla gerçekleşmektedir (Çağlar 2011). Işınım ısı transferi, mutlak Kelvin sıcaklığından itibaren her sıcaklıkta meydana gelmekte ve iletim ve taşınım olan ısı transferinden farklı olarak, ışınım ısı transferinin gerçekleşmesi için aracı bir ortama gerek olmamaktadır. Bu yüzden boşlukta bile yavaşlamaz ve uzayda ışınım ısı transferi ışık hızında gerçekleşir. Pratikte bazı cisimler ısı ışınımını yutar, bazıları yansıtır, bazıları da içerisinden geçirir. Teorik olarak; bir yüzeyden yayılabilecek maksimum ışınım ısı transfer miktarı Stefan-Boltzmann Kanunu ile hesaplanır (Denklem 2.2). Maksimum hızda ışınım yayan ideal yüzeye, literatürde karacisim (siyahcisim) denilmektedir. Denklem (2.2) ifadesindeki σ terimi, Stefan-Boltzmann sabiti olarak tanımlanmaktadır ve

değeri $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 'dir. Bütün gerçek cisimlerden yayılan ışınım, aynı sıcaklıktaki karacisim tarafından yayılan ışınım değerinden daha küçük olacağı için her bir yüzey, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ aralığında değişen yayıcılık (ε) değerine sahiptir. Bu şekilde gerçek cisimlerin ışınım ile olan ısı transferleri (2.3) ifadesiyle hesaplanabilmektedir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\dot{Q}_{yayilan,max} = \dot{Q}_{siyahcisim} = \sigma \cdot A_{yü} \cdot T_{yü}^4 \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_{gercek cisim} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{yü} \cdot T_{yü}^4 \quad (2.3)$$

2.1.2.3 Taşınım (konveksiyon) ısı transferi

Taşınım ile ısı transferi, bir katı yüzeyle ona bitişik hareket halindeki akışkan arasında meydana gelen ısı geçiştir ve bebeğin vücut yüzeyiyle çevre akışkanının arasında gerçekleşir. Daha yalın bir ifadeyle taşınım, iletim + akışkan hareketi olarak tanımlanabilir. Dolayısıyla akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa, taşınım ile olan ısı transferi de o kadar büyük olur. Taşınım ile ısı geçiş hızı, Newton'un Soğuma Kanunu ismiyle adlandırılır ve Denklem (2.4) ifadesiyle hesaplanır. Bu ifadedeki taşınım katsayısı olan h , sadece akışkanın bir özelliği değildir ve geometriye (iç akış, dış akış), akışın özellikleri (doğal taşınım, zorlanmış taşınım, laminer, türbülanslı) ve akışkan özellikleri (yoğunluk, viskozite, özgül ısı, ısı iletim katsayısı, hız) gibi birçok parametreye sahip olması sebebiyle biraz karmaşıklık içerir. Bu yüzden, çoğu zaman deneysel olarak hesaplanır. Isı taşınım katsayısı (h), yüzeyle akışkan arasında 1 K ($1 \text{ }^\circ\text{C}$) sıcaklık farkı olması halinde, birim yüzey alanından taşınım ile geçen ısı transferi miktarıdır. Dolayısıyla birimi $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ 'dir. Bir akışkanın faz değişimini içeren ısı transferi işlemleri de kaynama sırasında kabarcıkların yükselmesi ya da yoğunlaşma sırasında sıvı damlalarının yağması akışkan hareketi sebebiyle gerçekleştiği için taşınım ile ısı transferi olarak düşünülebilmektedir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\dot{Q}_{tasinim} = h \cdot A_{yy} \cdot (T_{yy} - T_{\infty}) \quad (2.4)$$

2.1.2.4 İletim (kondüksiyon) ısı transferi

İletim ile ısı transferi, iki farklı sıcaklıktaki cismin birbirlerine temas ettirilmesi sonucu, yüksek enerjili parçacıklardan düşük enerjili parçacıklara ısı geçiştir ve bebeğin vücut yüzeyinin katı bir cisim ile temas etmesiyle gerçekleşir. İletim ile ısı transferi katılarda, sıvılarda

ve gazlarda meydana gelebilir. Katılarda ısı iletimi, malzemeyi oluşturan kafes yapısı içerisindeki atomların titreşimleri ve bunun yanında daha çok kafes yapısı içerisinde bulunan serbest elektronların bir atomdan diğerine enerji aktarımıyla oluşur. Sıvılarda ve gazlarda ısı iletimi ise, moleküllerin rastgele hareketleri sırasında birbirleriyle çarpışmaları ve yayılmaları sebebiyle meydana gelir. Yapılan deneysel çalışmalar ile bir ortamın ısı iletim hızı; ortam boyunca olan sıcaklık farkına, ortamın malzemesine, geometrisine (alanına) ve kalınlığına bağlı olduğu tespit edilmiştir ve ilk kez 1822 yılında J. Fourier tarafından Denklem (2.5) olarak ifade edilmiştir. Bu ifadede malzemenin ısı iletim kabiliyetini gösteren ısı iletim katsayısı (k), birim kalınlıktaki bir cismin, birim yüzey alanından birim zamanda cismin iki yüzeyi arasında birim sıcaklık farkı başına gerçekleşen ısı transfer hızıdır. Dolayısıyla birimi W/m.K'dir. Isı iletim katsayısı her madde için farklıdır ve malzemenin sıcaklığına, bileşimine, gözenekli olup olmamasına, nem miktarına, vb. gibi birçok parametreye bağlıdır (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\dot{Q}_{iletim} = k \cdot A_{dk} \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (2.5)$$

2.1.3 Yenidoğanların vücut sıcaklığının korunmasında kullanılan cihazlar

Yenidoğanlarda vücut sıcaklığını kontrol etmek için kullanılan cihazlar, genelde açık bakım ve kapalı bakım cihazları olarak ikiye ayrılır (Şekil 2.6). Açık ve kapalı bakımda kullanılan kuvöz ve radyant ısıtıcıların farklılıkları aşağıda özetlenmiştir.

Kuvöz

- Kapalı bakım
- Taşınım prensiplerine göre çalışır.
- Bağıl nem kontrolü var.
- Enfeksiyon kapma riski yok.
- Oksijen kontrolü yapılabilir.

Radyant ısıtıcı

- Açık bakım
- Işınım prensiplerine göre çalışır.
- Bağıl nem kontrolü yok.
- Enfeksiyon kapma riski var.
- Oksijen kontrolü yok.



Şekil 2.6: Yenidoğanlarda kullanılan ısıtma cihazları

2.1.3.1 Radyant ısıtıcı

Yaydıkları kızılötesi ışınların kişi üzerinde ısı enerjisine dönüşmesi prensibiyle çalışmaktadırlar. Radyant ısıtıcılar, genellikle üstte asılı bir ısıtma elemanı ve bir yataktan oluşur. Bebeğin cilt sıcaklığı bir sensörle ölçülmektedir ve ölçülen bu değere göre ısıtıcı istenilen sıcaklıkta bebeği muhafaza etmeye çalışmaktadır. Vücut sıcaklığı dengede olmayan bebeklerde ilk olarak radyant ısıtıcılar kullanılmaktadır. Radyant ısıtıcı ile bebek arasında en az 90 cm mesafe olmalıdır. Ancak bu yöntemde, bebeğin sıvı kaybı kuvöze göre %40-50 daha fazladır. Yenidoğanın vücut sıcaklığı burada sabit tutulamazsa, bebek kuvöze alınmaktadır (Çağlar 2011). Radyant ısıtıcının avantajı, bebek açık bir ortamda bulunduğu için bakım veren personel bebeğin her tarafına rahatça ulaşabilmekte ve herhangi bir olumsuzluk durumunda kolaylıkla müdahale edebilmektedir. En büyük dezavantajı ise bütün enfeksiyonlara karşı bebek açıktır, bağıl nemi kontrol etmek oldukça zordur ve bebeğin buharlaşmayla ısı kaybı oldukça fazladır (SRM Üniversitesi 2017).

2.1.3.2 Kuvöz

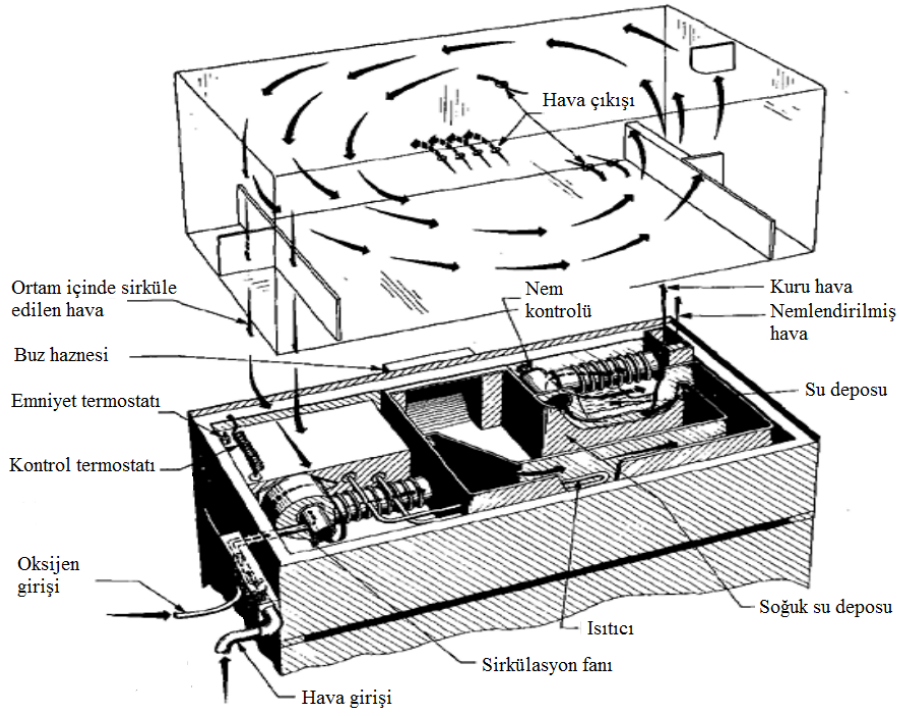
Yenidoğana anne karnındaki ortama benzer yapay bir ortam sunan, kontrollü bir şekilde oluşturulan çevre ile bebeğin temel ihtiyaç duyduğu sıcaklığı, bağıl nemi ve oksijeni sağlayan biyomedikal cihazlardır (Tol 2005, SRM Üniversitesi 2017). Kuvözler genellikle ıyıyı sağlayan bir ısıtıcı, ıyıyı dağıtan fan, bebeğin yattığı yatak, bebeğin hareket ettirilmesine sağlayan

mekanik düzenekler, ısı kaybını önlemek için çift duvardan oluşan izolasyonlu şeffaf kabin ve kontrol ünitesinden oluşan medikal cihazlardır (Antonucci ve diğ. 2009, Çağlar 2011). Kuvözlerde bir fan vasıtasıyla filtrelenmiş şekilde alınan taze hava ve bazı durumlarda bebeğin O₂ ihtiyacının arttırılması için kullanılan ilave O₂, bir rezistanslı ısıtıcı ile ısıtılır. Isıtılan hava ve varsa ilave O₂, su bulunan bir hazne üzerinden geçirilerek nemlendirilmesi sağlanır. Elde edilen ılık ve nemli hava, kuvöz içerisinde sirkülasyon ettirilir (SRM Üniversitesi 2017). Tipik bir kuvözde bulunması gereken teknik özelliklerin bir kısmı Tablo 2.3'te verilmiştir. Kuvöz içi hava sıcaklığında bir saatte $\pm 0,5$ °C arasında değişme olursa, kuvöz içi sıcaklığının kararlılığa ulaştığı kabul edilmektedir (Tol 2005).

Tablo 2.3: Bir kuvözde bulunması gereken teknik özellikler (Tol 2005, SRM Üniversitesi 2017)

Hava sıcaklığı kontrol aralığı	25-39 °C
Havanın akış hızı	$\leq 0,3$ m/s
Ortamın sıcaklık dalgalanması	$\pm 0,8$ °C
İç gürültü seviyesi	<60 desibel
Isınma (warm-up) süresi	≤ 45 dakika
Bağıl nem (RH) oranı	%30-70
Kabin içi ayarlanabilir ilave O₂ giriş oranı	%20-90
Yüksek ısı güvenlik sistemi	Ayarlanan sıcaklığın $\pm 0,5$ °C üzerinde devreye giren termostat
Alarm sistemi	Işıklı ve sesli
Alarm kapanma süresi	10 dakika
Sistemi besleme ünitesi	Nikel kadmiyum batarya
Güç değeri	220V-50 Hz

Kuvözler, bebeğin ihtiyaç duyduğu temiz havayı sağlayan ve bebeğin gürültüden, enfeksiyondan, tozdan korunmasına yardımcı olan cihazlardır. Bebeğin yattığı yatağın altında hava üflemeli bir elektrikli ısıtma ve nemlendirme sistemi vardır. Bu sistem, ısıtılmış nemli havayı istenen sıcaklık ve bağıl nemde kuvöz içerisinde dolaştırabilmektedir (Şekil 2.7). Ayrıca bu cihazlar, ihtiyaca göre kuvöz içerisine ilave oksijen de gönderilebilmektedir. Bebeğin vücut sıcaklığı bir sıcaklık sensörüyle ölçülür ve kuvöz sıcaklığı, ısıtılmış hava akımı içerisindeki bir termostat ile bebeğin ihtiyaç duyduğu sabit bir sıcaklığa ayarlanabilmektedir. Fakat kuvözlerde, bebek kapalı bir ortamda yattığı için bakım veren personelin uygulayacağı tıbbi bakım ve işlemlerde bebeğe ulaşmak zordur (SRM Üniversitesi 2017).



Şekil 2.7: Tipik bir bebek kuvözünün temel parçaları (SRM Üniversitesi 2017)

Eğer yenidoğanda herhangi bir şekilde hipotermi gelişmişse, hipotermimin derecesine ve şiddetine bağlı olarak sırasıyla anneyle cilt-cilde temas (kanguru bakımı yöntemi) yapılır, ısıtılmış bir örtü veya battaniye ile sarılır, radyant ısıtıcı kullanılır ve en son olarak kuvöz kullanılmaktadır (SRM Üniversitesi 2017). Kuvözler genellikle sıcaklığı 20-30 °C aralığında bulunan ortamlarda çalıştırılmak üzere tasarlanırlar (Tol 2005). Eğer çevre sıcaklığı, kuvözün ayarlanan sıcaklık değerinden daha yüksek ise kuvözün çalışması mümkün değildir (SRM Üniversitesi 2017). EN 60601-2-19 standartlarında (2011), kabin içi hava sıcaklığı çevre sıcaklığından en az 3 °C fazla olmadığı durumlarda, kuvözün istenilen hedefi gerçekleştirmesi mümkün olmayabileceği belirtilmiştir (Tol 2005).

Prematüre bebekler çok narin oldukları için sıcak, temiz, gürültüsüz bir ortama ihtiyaç duymaktadırlar. Ancak bebekler, yenidoğan yoğun bakım ünitelerinde (Neonatal Intensive Care Unit, NICU) yüksek seviyede gürültüye maruz kalabilmektedir. Aynı zamanda bakım veren personelin sık sık bebeğe dokunmaları, bebekleri uykusuz bırakabilmekte, normal büyümelerinde ve gelişmelerinde rahatsızlık verebilmektedir. Yenidoğanlarda yüksek gürültü, işitme bozukluklarına, uyku bozukluklarına ve somatik etkilere neden olabilmektedir. Bu yüzden özellikle prematüre bebeklerin bulunduğu ortamlarda, kuvözün normal çalışmasında gürültünün 60 desibeli, kuvözde sesli alarm devreye girdiğinde ise 80 desibeli aşmaması

gerekmektedir. Bebeğe daha rahat bir ortam sağlanması için bebek bölümündeki gürültü düzeyi 50 desibel ve altında olmalıdır (Tol 2005, EN 60601-2-19 2011). Kuvözlerin temel parametreleri olan sıcaklık, bağıl nem, hava akımı ve ses seviyesi kuvöz yatağının üzerine yerleştirilen bir inkübatör analiz cihazı (incubator analyzer) vasıtasıyla kaydedilebilmektedir. Bu cihaz, bebek kuvözlerinin doğru ve düzgün çalıştığını doğrulamak için kullanılmaktadır (Özdemirci 2013, SRM Üniversitesi 2017, Sallam 2018).

2.1.3.3 Transport kuvöz

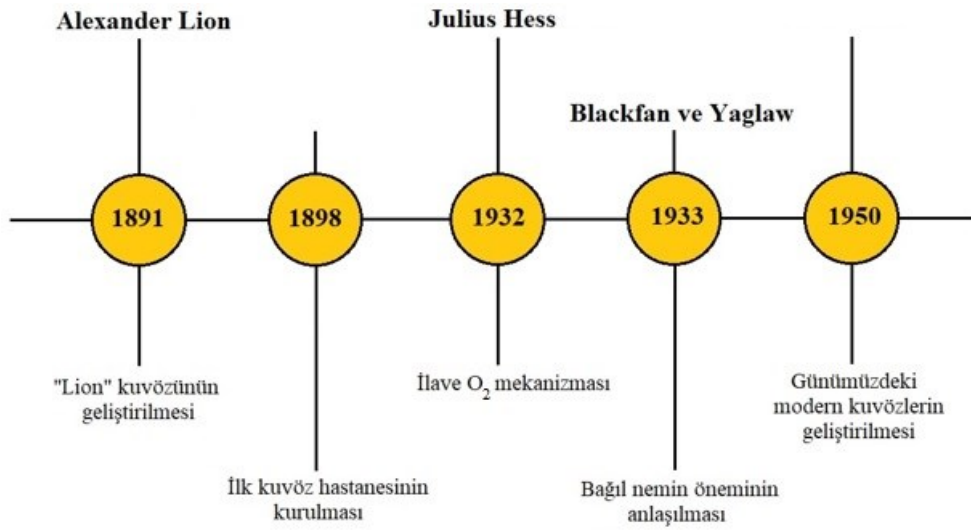
Özel ilgiye muhtaç prematüre bebeklerin bir yerden başka bir yere sağlıklı bir şekilde taşınabilmeleri esnasında, bebeğin ihtiyaç duyduğu kontrollü çevre şartlarının sağlanabilmesi için ilk kez 1900 yılında Dr. Joseph De Lee tarafından geliştirilmiş taşıma kuvözleridir (Bayram 2006).

2.2 Prematüre Bebek Kuvözüyle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Tablo 2.1’de açık bir şekilde görüldüğü gibi, prematüre bebeklerin herhangi bir sebepten dolayı hipertermi veya hipotermi yaşamaları durumunda, vücut sıcaklıklarının çok hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Hipertermi ve hipotermi durumunda, prematüre bebeğe uygulanabilecek literatürde birçok yöntem olmakla birlikte, prematüre bebekler normal bebeklere kıyasla risklere daha açık olduğu için bebeğin gerekli ihtiyaçlarını (sıcaklık, bağıl nem ve oksijen) kontrollü ve yüksek hassasiyette sağlayan kuvözler diğer yöntemlere göre daha üstündür. Ayrıca kuvözde; istenilen sıcaklık ve bağıl nem ile bebeğin etrafı homojen olarak sarılmakta, ısı kayıpları minimumda tutulmakta, gürültü, toz ve enfeksiyonlara karşı bebek izole edilmektedir.

Kuvözler, yenidoğan bebeklere anne karnındayken alışık oldukları ortama benzer yapay bir ortam sunmaktadır. İlk modern kuvöz Fransa’da 1891 yılında Dr. Alexander Lion tarafından geliştirilmiştir (Javed ve Mahmood 2013). Bu kuvözler (Lion incubator), kendine ait bir havalandırma sistemi bulundurmakta ve kuvözün dış duvarına yerleştirilmiş bir silindirik su kazanı ile ısıtılmaktadır. Sıcaklığı ayarlanabilen ve temiz hava sirkülasyonu yapabilen bu cihazlar sayesinde, çoğu bebek sağlıklı bir şekilde yaşamayı başarabilmiş ve bebek ölümlerinin

birçoğu önlenebilmişti. Ardından 1898 yılında ABD'nin Nebraska eyaletindeki Omaha kentinde ilk kuvöz hastanesi kurulmuştur (Lieberman 2001). 1932 yılında Julius Hess, kuvözlere oksijen ilavesini ek bir mekanizma olarak önermiştir. 1933 yılında Blackfan and Yaglaw, bağıl nem bakımından zenginleştirilmiş bir ortamda tutulan bebeklerin mortalitelerinin ciddi bir şekilde azaltılabileceğini tespit etmişlerdir (Knobel 2014). Bu şekilde günümüzdeki kuvözlerin altyapısı oluşturulmuş (Şekil 2.8) ve 1950'li yıllardan itibaren geliştirilerek günümüzdeki sıcaklık, bağıl nem ve oksijen kontrolü olan modern kuvözler oluşturulmuştur (Lieberman 2001, Korones 2004, SRM Üniversitesi 2017).



Şekil 2.8: Bebek kuvözü tarihçesi

Günümüzde medikal cihaz üreticilerinin yoğun olarak çalıştıkları konulardan birisi, yenidoğan ve prematüre bebekler için yoğun bakım ve taşıma kuvözleri tasarlamaktır. Hali hazırda yerli ve yabancı birçok medikal cihaz firması farklı çalışma prensiplerine sahip çeşitli ürünler üretmektedir. Bu ürünlerin birçoğu çeşitli ısıtma mekanizmaları (dirençli ısıtma, radyant ısıtma, vb.) kullanarak, kuvözlerde sadece ısıtma fonksiyonunu yerine getirmektedir. Bazıları da ısıtma yanında nemlendirme ve oksijen ihtiyacını da karşılamaktadır. Tol (2005), kuvözün temel parametreleri olan sıcaklık, bağıl nem ve oksijen konsantrasyonunu yüksek hızlı ve performanslı PIC 16F877 mikrodenetleyici bir sistemle, ölçümünü ve kontrolünü sağlayarak sistemin performans analizlerini yapmıştır. Ayrıca kuvöz kabini içerisindeki sıcaklık dağılımını, yatağın merkezinden eşit uzaklıktaki 4 noktada ve 10 cm yukarıda olacak şekilde sensörler yerleştirilerek belirlemiştir. Çalışmada cilt sıcaklık probu, civalı cam termometre ve bağıl nem (RH) sensörleri yatak merkezinden 10 cm yükseklikte, aynı noktaya yerleştirilmiştir.

Kuvözdeki nem ihtiyacı, ultrasonik nebulizatör (40 W) aktif nemlendirme sistemiyle karşılanmıştır. Deney sırasındaki çevre sıcaklığı 21,6 °C ölçülmüştür. Sistemin hedeflenen sıcaklığı 40 dakikada ulaşabildiği tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan kontrol sisteminin, kuvöz tasarım standartlarında belirlenen doğruluk, hassasiyet ve hasta ihtiyaçları karşılamada iyi bir performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca bu sistemin, âtil durumda bulunan kuvözlerde de kullanılabilmesi ve böylelikle âtil kuvözlerin yeniden ülke ekonomisine kazandırılabilmesi ifade edilmiştir. Bir başka çalışmada Çalışkan (2013), kontrol elemanı olarak PIC16F877A mikrodenetleyicisi kullanarak, kuvözün sıcaklık, bağıl nem, ışık şiddetini sensörler ile ölçebilen ve kontrol edebilen kuvöz sisteminin devre kartını tasarlamıştır. Ayrıca çalışmada, bebeğin kanındaki oksijen seviyesini (SpO₂) ve nabzını ölçebilen devre kartlarında tasarlanmış ve kuvöz sisteminin devre kartına entegre edilmiştir. Kuvözün devre kartında sıcaklık ve bağıl nem sensörü olarak SHT11 sensörü ve ortam ışığının ölçülmesi için de Lx1972 sensörü kullanılmıştır. Geliştirilen kart tasarımında mikrodenetleyici, kuvözün ayarlanan sıcaklığa bağlı olarak ısıtma elemanını (rezistans) bir röle vasıtasıyla devreye alıp çıkartarak sıcaklığı kontrol etmektedir. Benzer şekilde diğer ölçülen verilerde, devre kartıyla kontrol edilmekte ve herhangi bir problem durumunda kuvöz, sesli ve görüntülü uyarı verebilmektedir. Bu şekilde geliştirilen devre kartı ve yazılımı ile kuvözün temel parametreleri hassas bir şekilde ölçülüp kontrol edilmiştir.

Kuvöz sistemi içinde meydana gelen fiziksel prosesler genellikle deneysel teknikler kullanılarak belirlenir. Son yıllarda bilgisayar teknolojisinin hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte, mühendislik hesaplamalarında hesaplamalı akışkanlar mekaniği (Computational Fluid Dynamics, CFD) yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu şekilde kombine şekilde çalışan kompleks geometriye sahip sistemlerin simülasyonlarını yapmak mümkün hale gelmiştir. Ginalski ve diğ. (2008) kabin içerisinde bulunan bir bebekte iletim, taşınım, ışınım, buharlaşma ve metabolik ısı üretimi ile oluşan ısı ve kütle transferi mekanizmalarını, hesaplamalı akışkanlar mekaniği paket programlarıyla modelleyerek kuvöz sistemindeki problemleri araştırmışlardır. Nümerik hesaplamalar sonucunda elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, hesaplamalı akışkanlar mekaniği kullanılarak elde edilen çekirdek sıcaklığı, cilt sıcaklığı, ısı kayıpları değerlerinin deneysel sonuçlarla örtüşüğü gösterilmiştir. Benzer şekilde Wrobel ve diğ. (2010) hesaplamalı akışkanlar mekaniğiyle, kuvöz, radyant ısıtıcı ve oksijen başlıklarında oluşan ısı ve kütle transferleri mekanizmalarını araştırarak literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Ayrıca hipotermik müdahalelerde beyin soğutma teknikleriyle ilgili yapılan çalışmaları tartışmışlardır. Oksijen başlıklarındaki solunum sistemi modellemesi için k-ε türbülans modelini kullanarak, havayı oksijen, nitrojen, karbondioksit ve su buharının karışımı olarak modellemişlerdir. Sayısal simülasyon 25 dakikalık düzenli sonulum için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, deneysel değerlerle tam olarak doğrulanmamış olsa da oksijen başlığına sağlanan oksijen konsantrasyonu ile bebeğin hava ortamından soluduğu oksijen miktarının oldukça farklı konsantrasyonlarda olduğu tespit edilmiştir. Oksijenden farklı olarak karbondioksit gazının her iki durumda da benzer dağılım gösterdiği belirlenmiştir.

Biyomedikal alanın en hassas konularından biri şüphesiz ki prematüre bebek sağlığıdır. Özellikle yeni gelişmekte olan ülkelerde birçok insan yoksulluk sınırı ve altında yaşadığı için bu ülkelerde dünyaya gelen prematüre bebeklerin bakım hizmetleri maliyetli olmaktadır. Bu problemi dikkate alan Nisha ve Elahi (2014), akıllı kontrol sistemi içeren düşük maliyetli bir prematüre bebek kuvüzü geliştirmişlerdir. Kuvöz, biri küçük diğeri büyük olan iki hazneden (bölme) oluşmaktadır. Küçük haznede sıcaklık ve bağıl nem kontrol ünitesi bulunmakta, büyük haznede ise bebeğin yatacağı yatak bulunmaktadır. Kuvözün tüm hazneleri akrilik levha kullanılarak üretilmiştir. Küçük haznede kendi içinde iki bölmeye ayrılmıştır. Alt bölmede ısıtma amaçlı olarak bir fan, ısıtma elemanı olarak bir akkor lamba, sensörler ve Arduino'dan oluşmaktadır. Üst bölme soğutma amaçlı olarak, buz haznesi ve nemlendirme haznesinden oluşmaktadır. Bu basit ve ekonomik sistem, çevre sıcaklığının 1 gün içerisinde 32-42 °C arasında sıcaklık değişimine bağlı olarak, bebeğin bulunduğu hazne ortamının sıcaklığını 36-37 °C ve bağıl nemi %70-75 arasında tutabilmeyi başarabilmiştir. Benzer şekilde Biswas ve diğ. (2016) gelişmekte olan ülkelerde elektrik, maliyetli ve sürekliliği sağlanamayan (kıt) bir enerji olduğu için düşük maliyetli olan ve elektriksiz olarak çalışabilen bir bebek kuvöz tasarımı yapmışlardır. Mevcut kuvöz sistemlerindeki elektrikli ısıtma sistemleri yerine sıcak su kullanarak, bebeğin sıcaklık ve bağıl nem (özellikle %70 ve üzeri) ihtiyaçları karşılanmıştır. Tasarlanan elektriksiz kuvözdeki sensörler ve fanlar için 12 V 100 Ah (Ampersaat) bir akü kullanılarak, sistemdeki sensörlerin ve fanların 20 gün boyunca güç beslemesi karşılanmıştır. Sıcak su deposu olarak 20 x 20 x 22 cm³ ebatlarında, içerisine 9 kg sıcak su alabilen iyi bir şekilde yalıtılmış hazne kullanılmıştır. Sıcak su deposundaki su, küçük bir pompa (5 W) ile bebeğin bulunduğu ortama alüminyum borular ile sirkülasyon yaptırılarak elektriksiz kuvözün ısıtma ve bağıl nem ihtiyaçları ekonomik bir şekilde sağlanmıştır.

Prematüre bebek kuvözlerinde önemli konulardan biri de şüphesiz ki sistemin kontrolüdür. Çünkü bebeğin normal vücut sıcaklığını temin edebilmesi için bebeğin en az oksijen tüketimi ve metabolik harcama yaptığı sıcaklık olan nötral ortam sıcaklığının hassas bir şekilde sağlanması gerektiği, yukarıda açık bir şekilde gösterilmiştir (bkz. Tablo 2.1). Bu konuyla ilgili olarak Bansal ve diğ. (2015) mikro denetleyici (Arduino) kullanarak bir kuvözün sıcaklık ve bağıl nem değerlerini orantısal + integral + türevsel (PID) denetleyici ile kontrol etmeye çalışmışlardır. Kabin havası sıcaklığı için LM35 sıcaklık sensörünü ve nemlendirme haznesindeki suyun sıcaklığı için ise DS18B20 sensörlerini kullanmışlardır. Kabin ortamındaki bağıl nem miktarı, DHT11 nem sensörü kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada, kuvöz sistemi PID kontrol ile 0,1 °C hassasiyetle kontrol edilmiş ve ayarlanan sıcaklık 14 dakikada kararlı hale ulaşabilmiştir. Benzer şekilde Feki ve diğ. (2017) yaptıkları kuvöz sistemi modelinde, prematüre bebeği de matematiksel modelleme içine alacak şekilde, sistemin matematiksel modellemesini literatürden faydalanarak elde etmişlerdir. Ardından elde edilen matematiksel modellemeyi kullanarak Drager marka kuvöz sisteminin transfer fonksiyonunu, MATLAB/Simulink paket programından elde etmişlerdir. Transfer fonksiyonunu kullanarak, mikro denetleyici (Arduino) vasıtasıyla genelleştirilmiş öngörücü kontrol (Generalized Predictive Control, GPC) ve PID kontrolle kuvöz sistemini kontrol etmişler ve karşılaştırmışlardır. Her iki kontrol sistemi de genellikle benzer davranışlarla sistemi kontrol etmeyi başarmıştır. Ayrıca çalışmada GPC kontrolün, sistemin geçiş tepkisi (transient response), sistemin ayarlanan değere yerleşme süresi (settling time) ve ayarlanan değeri aşma (overshoot) değerlerinde, PID kontrole göre daha üstün olduğunu altı çizilmiştir.

Prematüre bebek kuvözleri, herhangi bir nedenden dolayı erken doğan bebeğin gelişebilmesi ve yaşayabilmesi için ihtiyacı olan ortamı sağlamak için tasarlanmış cihazlardır. Dolayısıyla bu cihazlar, bebeğe sağladığı temel parametreler olan sıcaklık, bağıl nem ve oksijen değerlerini hassas bir şekilde sağlamak zorundadır. Kuvöz sistemlerinin bu değerleri sağlayıp sağlamadığı, EN 60601-2-19 kuvöz standardı (2011) ile denetlenmektedir. Bu denetleme işlemlerinde de kuvöz performans analiz kiti (incubator analyzer) kullanılmaktadır. Bu analiz cihazı ile kuvözün uygunluğu ve aynı zamanda kuvözün 6 aylık periyotlarla performans testleri yapılmaktadır. Bunun için günümüz uygulamalarında Fluke ve Daternd firmalarının geliştirdiği ve tasarladığı test cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu test cihazlarının maliyetleri oldukça yüksektir. Bu parametreyi göz önünde bulunduran Özdemirci (2013), hem daha ekonomik bir şekilde bu test cihazını ülkemize kazandıran hem de mevcut cihazlardan

daha hassas ve daha fazla donanıma sahip performans test ünitesini (ALMULA) geliştiren bir çalışma gerçekleştirmiştir. ALMULA cihazı, mevcut cihazlarda bulunan sıcaklık, bağıl nem, hava akış hızı ve gürültü seviyesi ölçümlerinin yanında ultraviyole ışık şiddeti ve oksijen saturasyonu parametrelerinin ölçümlerini de yapabilmektedir. ALMULA cihazının donanımsal kısımları için EN 60601-2-19 standardında (2011) belirtildiği gibi 5 farklı noktadan sıcaklık ölçümü (LM 35 sensör), bağıl nem ölçümü (HIH-4030 sensör), oksijen ölçümü (OOM 102-1 sensör), ultraviyole ölçümü (TOCON Blue4 sensör), ses ölçümü (dinamik mikrofon) ve hava akış hızı ölçümünün (EE576-V2A1 mini sensör) gerekli elektronik devreleri tasarlanmış ve ARM7 Cortex M3 mikrodenetleyicisi ile kontrol edilmiştir. Ölçülen veriler, 3,2 inç TFT dokunmatik ekran ile takip edilebilmektedir. Geliştirilen cihazın yazılımsal kısımları için C dilinde MDK ARM Keil-C derleyici programı kullanılmıştır. Sistem çalıştırıldığında ölçtüğü veriler TXT formatında kaydedilmekte ve usb portu sayesinde bilgisayarla haberleşebilmektedir. Geliştirilen test cihazı üretilip ve kalibrasyonu yapıldıktan sonra Ertunç Özcan Babynest ticari kuvözü üzerinde deneysel çalışması yapılmış ve ticari INCU Fluke ve Datrend IncuTest kuvöz test cihazları ile geliştirilen cihazın performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, geliştirilen ALMULA test cihazının mevcut sistemlerden daha yüksek hassasiyetli ölçümler yapabildiği gösterilmiştir. Ayrıca ALMULA cihazının maliyeti, mevcut cihazlardan 5 kat daha ucuz olduğunun altı çizilmiştir. Benzer şekilde bir diğer çalışmada Sallam (2018) bir AVR Atmega32 mikrodenetleyici ile kontrol edilebilen ve ölçtüğü verilerin (sıcaklık, bağıl nem, gürültü seviyesi) LCD ekran ile görüntülenebildiği bir kuvöz test analizörü geliştirmiştir. Bu çalışmada, sıcaklık sensörü olarak LM35, bağıl nem sensörü olarak DHT11 ve gürültü seviyesi ölçüm sensörü olarak kondansatörlü mikrofon kullanılmıştır. Test cihazının üretimi yapıldıktan sonra Drager Isolette® (Model C2000) bebek kuvözü üzerinde deneysel çalışması yapılmış ve aynı zamanda ticari Datrend IncuTest kuvöz test cihazı ile geliştirilen cihazın performansları karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde geliştirilen cihazla, INCU Fluke test cihazının performansları Girffe OmniBed bebek kuvözü üzerinde karşılaştırılmıştır.

Prematüre bebek kuvözlerinin ve bebeklerin mobil telefon veya bilgisayarla uzaktan izlenilmesi ve gerekli durumlarda kuvözlerin uzaktan müdahale edilmesi ve kontrol edilmesi günümüzün gelişen teknolojisi ile mümkün olmaktadır. Bu doğrultuda Selek (2018) tek kart bilgisayar olan Raspberry Pi kullanarak kuvöz sistemine bağlanan bir kamera ile kuvöz içerisinde yatan bebeğin verilerinin uzaktan izlenebilmesi ve kuvözün ısıtma elemanı ve nemlendiricisinin uzaktan müdahale edilebilmesi olanak sağlayan sistemi kurmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmada, kuvözün sıcaklığı DS18B20 sensörüyle ve kuvözün bağıl nemi SHT11 sensörüyle ölçülmüştür. Sistemde kullanılan Raspberry Pi 2, A 900 MHz quad-core ARM Cortex-A7 mikroişlemciye, 1 GB Ram'e, 4 tane usb porta, kamera arayüzüne, Full HDMI ve ethernet porta sahiptir. Sistemin uzaktan izlenebilmesi ve müdahale edilebilmesi için açık kaynaklı ve ücretsiz Web server programı olan Apache kullanılmıştır. Sensör verilerinin depolanması için MySQL veri tabanı yönetim sisteminin yeni versiyonu olan MariaDB kullanılmıştır. Ayrıca MariaDB içerisindeki verilerin yönetimi için görsel bir web arayüz yazılımı olan Phpmyadmin yazılımı kullanılmıştır. Bu şekilde geliştirilen sistem ve arayüz ile bebek kuvözü uzaktan izlenebilmiş ve fan, ısıtıcı ve nemlendirici elemanları uzaktan müdahale edilebilmiştir. Bir diğer çalışmada Altan (2019), bebek kuvözlerindeki sıcaklık, bağıl nem ve hava kalitesi parametrelerini anlık olarak sunucuya kaydedebilen, bakım veren personele ve aileye bebeğin uzaktan izlenebilmesini sağlayan ve gerekli durumlarda bakım veren personelin uzaktan sistemi kontrol edebilmesine olanak sağlayan LattePanda tabanlı bir hasta takip sistemi geliştirmiştir. LattePanda, üzerinde gömülü Window 10 işletim sistemi bulunan tek kartlı bir bilgisayardır ve 1.84 Ghz Intel Cherry Trail Z8300 Quad Core işlemci, 2GB/4GB seçenekleriyle RAM ve 32GB/64GB SSD depolama, 802.11n 2.4G kablosuz bağlantı ve Bluetooth 4.0 kablosuz iletişim teknolojilerini bünyesinde bulundurmaktadır. Geliştirilen sistemde, hava kalitesi MQ135 sensörüyle, sıcaklık ve bağıl nem DHT11 sensörüyle ve ses seviyesi LM393 sensörüyle ölçülmüştür. Çalışma, Visual Studio ortamında ve MySQL veri tabanı yönetim sisteminde geliştirilmiştir. Ayrıca kuvöz kabininin içerisine yerleştirilen bir web kamerasıyla bebeğin anlık görüntüleri kaydedilip, kullanıcılarla paylaşılabilir. Ölçülen veriler, Apache web server yazılımıyla aktarılmaktadır ve bulut tabanlı olarak kaydedilmektedir. Geliştirilen bu sisteme birden fazla bebek kuvözü eklenebilmektedir. Ayrıca geliştirilen sistemde, bebeklerin veya bebek kuvözlerinin karıştırılmaması için MFRC522 RFID modülüyle QR kodu okuyabilen bir sistem bulunmaktadır. Bu şekilde özellikle yeterli sayıda personeli olmayan sağlık kuruluşlarında, tek bir yerden bütün bebek kuvözlerinin uzaktan izlenimi ve kontrolü yapılabilmektedir.

2.3 Termoelektrik

Dünyada her geçen gün insan nüfusunun ve çevresel sorunların artmasıyla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretiminde kullanım paylarının artırılması ve enerjinin

daha verimli bir şekilde daha küçük teknolojik cihazlarla karşılanması zorunluluk haline gelmektedir. Çünkü bugün dünyada kullanılan enerjilerin büyük çoğunluğu (%80) fosil bazlı yakıtlardan (petrol, kömür, doğal gaz, vb.) elde edilmekte ve kullanılan enerjilerin %65 civarı atık ısı olarak atılmaktadır. Bununla birlikte dünya üzerinde kullanılan günlük enerji ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Birçok bilimsel kaynakta açık bir şekilde belirtildiği gibi, fosil bazlı yakıtlar yakın gelecekte tükenecektir ve daha da önemlisi bu yakıtlar doğaya çok fazla zarar vermektedir. Bütün bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda bilim adamları ve mühendisler, bu problemin çözümü için yenilenebilir enerji kaynaklarının (güneş, rüzgâr, jeotermal, termoelektrik, vb.) kullanımlarının artırılması ve cihazların küçültülerek daha az enerji tüketen ve daha verimli çalışan cihazların geliştirilmesi konularında hemfikirdirler. Ancak şu ana kadar yapılan çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarından hiçbirinin tek başına fosil bazlı yakıtların sağladığı enerji miktarını sağlayamayacağını göstermiştir. Bu noktada, bilim adamları ve mühendisler bu sorunun çözümünün, yenilenebilir enerji kaynaklarının birlikte kullanılmasını içeren teknolojilerin geliştirilmesiyle mümkün olabileceği konusunda birleşmektedir. TE cihazların hem küçük cihazlar olması hem de sadece yarı iletken malzemelerin özelliklerini kullanarak; istenilirse ısıtma-soğutma amaçlı, istenilirse güç üretimi amaçlı olarak çift yönlü çalışabilmesi sayesinde, yukarıda sayılan yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte kullanımın elverişli olması, son yıllarda TE malzemeler ve sistemler konularında çok sayıda çalışmaların ve uygulamaların artmasına sağlamıştır (Ballıkaya 2010).

Termoelektrik, basitçe ısı ve elektrikle ilgilidir ve TE prosesi, termal enerjinin direkt olarak elektrik enerjisine dönüşmesi ya da tam tersidir. Temel olarak TE cihazlar, termoelektrik jeneratörler (TEJ) ve termoelektrik soğutucular (TES) olmak üzere ikiye ayrılırlar (Lee 2017). TEJ'ler, termoelektrik malzemelerin bir sıcaklık farkına maruz bırakıldıklarında, ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen çevre dostu güç üreten sistemlerdir. TEJ'ler, otomobil egzoz gazları, güç santralleri gibi sistemlerden çevreye atılan atık ısıları kullanarak elektrik enerjisi üretebilmek için kullanılabilir. Şu anda dünya üzerinde kullanılan toplam enerjinin büyük bir kısmının (yaklaşık %65) atık ısı olarak atmosfere karıştığı göz önünde bulundurulduğunda, TEJ'ler dünyamızda her geçen gün artan çevre sorunlarına temiz bir şekilde geri dönüşüm sağlayabilen temel çözümlerden biri olabileceği rahatlıkla söylenebilmektedir (Ballıkaya 2010). Aynı zamanda NASA tarafından farklı galaksilere gönderilen; Voyager (1977 başladı, görevi devam ediyor), Galileo (1987 başladı, görevini tamamladı), Ulysses (1990 başladı ve görevini tamamladı), Cassini (1997 başladı, görevi

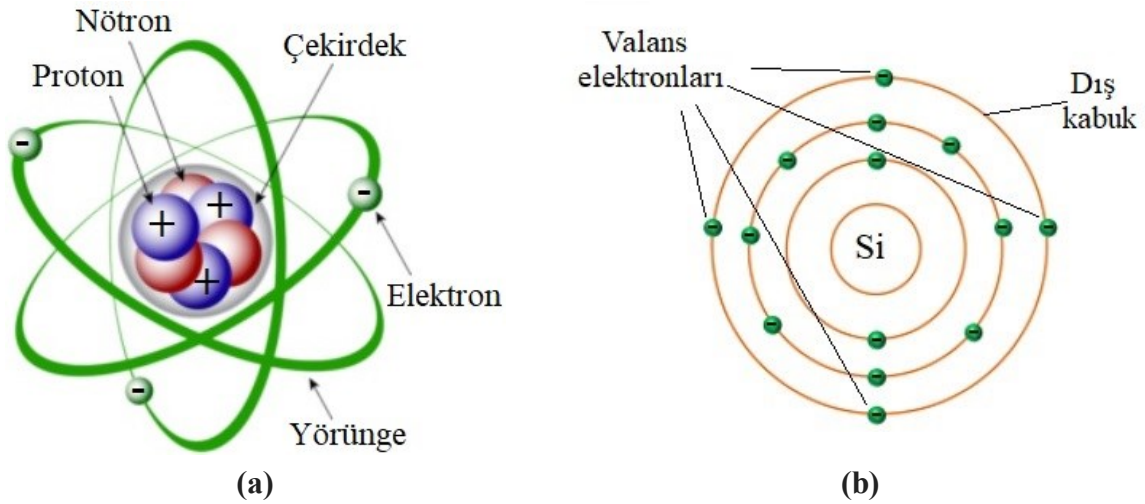
devam ediyor), New Horizons (2006 başladı, görevi devam ediyor) uzay araçlarında görevlerini başarılı bir şekilde yapabilmesinden dolayı TEJ'lere olan ilgi artmıştır (Mackey 2015). TES'lar ise termoelektrik malzemelere bir doğru akım (DC) kaynağından uygulanan voltajın yönüne bağlı olarak ısıyı bir uçtan diğer uca transfer edebilmektedir. Yani, TE malzemenin bir ucu ısınırken, diğer ucu eş zamanlı olarak soğumaktadır. Bu yüzden TES'lar kullanım amacına göre ısıtıcı veya soğutucu olarak kullanılabilirdiği için bir katı hal ısı pompası olarak adlandırılmaktadır. TES'larda, elektronik cihazlarda (mikro işlemci, sensör, lazerler, kızılötesi dedektörler, vb.) ve tıbbi cihazlarda (DNA analizi, hipertermi ve hipotermi, biyomalzeme, kan, aşı ve ilaç taşınımı, vb.) soğutma-ısıtma ve hassas sıcaklık kontrolü sağlamak amaçlı kullanılabilirler. Termoelektrik cihazlar (TEJ'ler ve TES'lar) üstlendikleri bu görevleri geleneksel ısı makinaları ve ısı pompalarından farklı olarak; herhangi bir iş akışkanına, mekanik bağlantılara, hareketli parçalara ve kapalı bir çevrime ihtiyaç duymadan yapabilmektedirler (Mackey 2015). Çünkü bu cihazlar, sadece kendisini oluşturan yarı iletken malzemelerin malzeme özelliklerini kullanarak (deşik (hole) ve elektronların katı hal içerisindeki hareketleriyle) istenilen amacı (ısıtma- soğutma veya güç üretimi) başarıyla sağlamaktadırlar. Bütün bunlara ek olarak TE cihazlar; sessiz, güvenilir, basit yapılı ve uzun ömürlü olmaları (ortalama 25 yıl), sıcaklık kontrollerinin kolaylıkla yapılabilmesi ve bakım gerektirmemeleri gibi birçok avantajlarından dolayı başta uzay araçları olmak üzere; askeri, tıp, endüstriyel uygulamalar ve bilimsel çalışmalar gibi birçok sektörde hızla yaygınlaşmakta ve termoelektrik ürünlere yönelik piyasanın ekonomik hacmi her geçen gün büyümektedir (Mamur 2013). Bununla birlikte TE malzemelerin tek dezavantajı, şu anki verimlerinin istenilen seviyede olmaması ve üretim maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Ancak TE malzemelerin, ısı ve elektrik enerjisini direkt olarak birbirine dönüştürebilmesi ve bahsedilen diğer avantajlarından dolayı başta bilim dünyası olmak üzere bütün mühendislik sektörlerinde, bu TE sistemlerin geliştirilmesi üzerine büyük çaba harcanmaktadır.

2.3.1 Yarı iletken malzemeler

TE olayı yukarıda da bahsedildiği gibi yarı iletken malzemelerin sadece malzeme özellikleri olandeşiklerin ve elektronların katı hal içerisinde hareket ettirilmesiyle termal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüşmesi ya da tam tersidir. Bu fiziksel olay, çok önceden (19. yüzyılın başlarında) keşfedilmiş olmasına rağmen ilk başlarda bilim adamları

tarafından çok iyi anlaşılammıştır. Bilim adamları, 19. yüzyılın sonlarına doğru elektronların keşfedilmesiyle, termoelektrik olayının fiziksel mekanizması daha iyi anlaşılmiş ve termoelektrik prensip ve ilkeleri gün yüzüne çıkarılmaya başlanmıştır. Özellikle 1950'lerde transistör uygulamaları için geliştirilen sentetik yarı iletken malzemeler, termoelektrik uygulamalar için de iyi özelliklere sahipti (Lee 2017). Termoelektrik ve elektroniğin temelini oluşturan yarı iletkenler detaylı bir şekilde açıklanmadan önce bazı temel kavramların açıklanması gerekir.

Bilindiği üzere madde, uzayda yer kaplayan, kütlesi ve hacmi olan ve duyuyla algılanabilen varlıklara verilen isimdir. Bütün maddeler atom ve atomların bir araya gelerek birleşmesinden oluşmaktadır. Atomların ise yapılan bütün deneylerde tek bir bütün olmadığı, merkezinde (çekirdek) artı yüklü protonlar ve yüksüz nötronların olduğu ve çekirdeğin etrafında ise dönen eksi yüklü elektron denilen daha küçük alt parçacıklardan oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 2.9). Ayrıca elektronların, çekirdeğin etrafına dağılmış en çok 7 farklı yörünge (kabuk) üzerinde hareket ettiği, çekirdeğe en yakın yörüngede bulunan elektronların ise enerji seviyelerinin en düşük olduğu ve çekirdekten uzaklaştıkça elektronların enerji seviyelerinin arttığı ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra elektrik akımını, madde içerisinde bulunan elektronların taşıdığı ve akım taşıyan bu elektronlarında, maddenin son yörüngesinde bulunan elektronlar (valans elektronları) olduğu yapılan bilimsel çalışmalarda anlaşılmiştir (Beşli 2012).

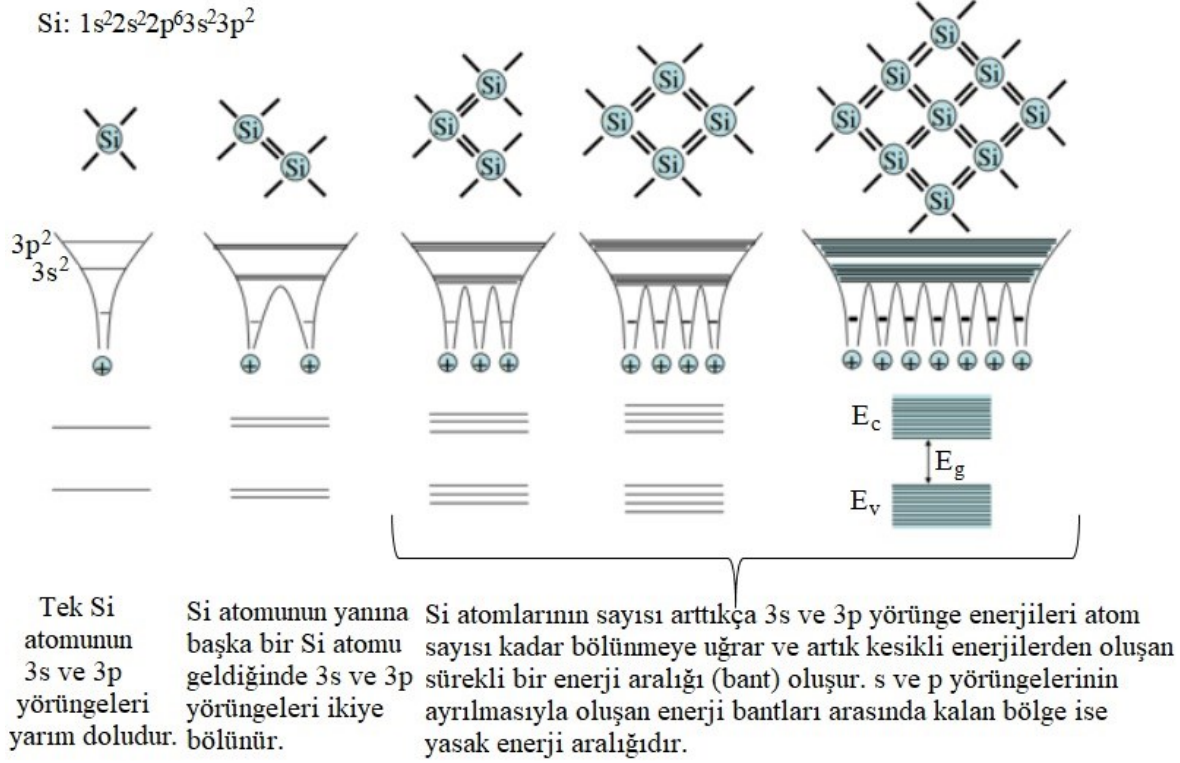


Şekil 2.9: (a) Atomun yapısı (b) silisyum atomu

Elektrik akımını iletme durumuna göre katı maddeler; iletken, yarı iletken ve yalıtkan olmak üzere üçe ayrılırlar. Elektrik akımı, katıların iletkenliği temeline dayanarak ifade edilir

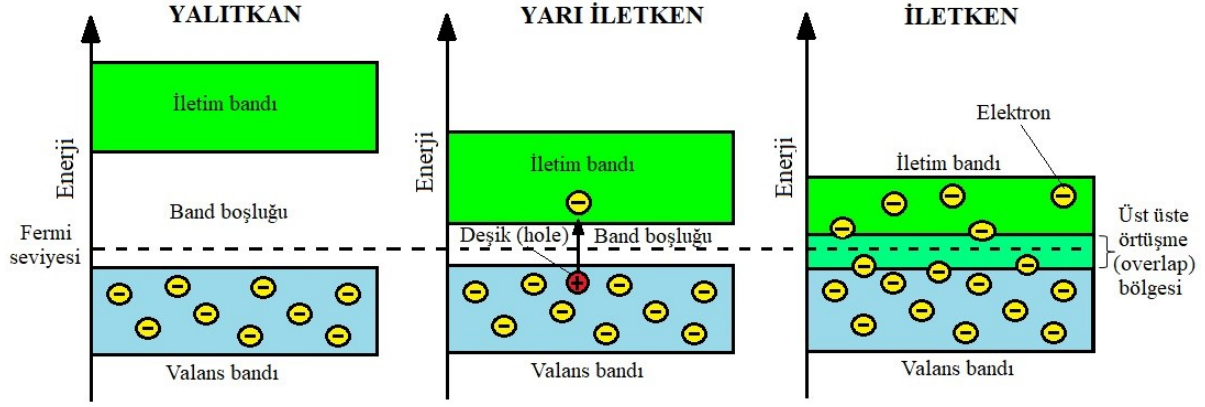
ve bir maddenin elektriği iletebilme oranı, maddenin kendi içerisinde serbest elektron üretme yeteneğine bağlı olarak değişmektedir. İletkenlerde bir atomun en dış yörüngesinde az sayıda (1-2-3) elektron vardır ve bu elektronları çekirdeğe bağlayan bağlar zayıftır. Dolayısıyla bu maddelere çok küçük şarj (enerji) uygulandığında, zayıf bağlı olan elektronlar serbest hale geçtiği için elektriği iyi iletirler. Bu maddelere örnek olarak bütün metaller verilebilir. Yalıtkanlar ise atom yapısında son yörüngelerinde 5-6-7-8 elektron bulunduran maddelerdir. Bu maddelerdeki elektronlar çekirdeğe güçlü bağlarla bağlıdır ve atomlar arası boşluklarda serbest elektron çok az sayıda bulunur. Dolayısıyla yalıtkan maddelere gerilim uygulandığında elektrik iletkenliği çok düşük olmaktadır. Plastik, kâğıt, tahta, cam, vb. maddeler bu gruba örnek verilebilir. Aslında yalıtkanlara uygulanan gerilim arttıkça, geçirdiği akımda artmaktadır. Belli bir gerilim değerinden sonra yalıtkan maddelerde tamamen iletken olur. Buna “yalıtkan delinmesi” denir ve her bir yalıtkan madde için yalıtkan delinmesine sebep olan enerji değeri farklıdır. Yalıtkan maddelerin yalıtkan delinme değeri genelde çok yüksek değerlerdir ve bu değerler endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla kullanılmadığı için yalıtkan maddeler, elektrik akımını iletmeyen madde olarak kullanılmaktadır (Beşli 2012).

Yarı iletkenler ise elektriksel iletkenliği, iletkenler ile yalıtkanlar arasında bulunan ve atom yapısı bakımından son yörüngesinde 4 elektron bulunduran maddelerdir. Bu maddeler normalde yalıtkanlardır ancak dışarıdan küçük bir etki (sıcaklık, ışık, manyetik, gerilim, katkılama (doping), vb.) ile etki altında bırakıldıklarında, valans bandında bulunan elektronların bir kısmı serbest hale geçebilmektedir. Bu yüzden bu maddelerin elektriksel iletkenliği değiştirilebildiği için özel maddelerdir ve bu yönlerinden dolayı elektronikte ve termoelektrik malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bir maddeyi elektriksel olarak iletken hale getirebilmek için dışarıdan bir enerji uygulanması gerekmektedir. Bu enerji miktarına bağlı olarak atomlarda enerji seviyeleri ve bant yapıları oluşmaktadır. Enerji seviyeleri ve bant yapısının oluşumu kuantum mekaniğine göre açıklanabilmektedir. Kuantum mekaniğine göre bir atom, kesikli enerji düzeylerine sahiptir. İki atom bir araya geldiğinde ise elektronların-elektronlarla ve elektronların-komşu atomlarla etkileşimleri sonucunda, her bir enerji düzeyi daha yüksek ve daha düşük enerji seviyelerine ayrılarak; atom çevresinde elektronların bulunma ihtimalinin yoğunlaştığı bölgeler olan orbitalleri oluştururlar. Bir kristaldeki atom sayısı arttıkça etkileşim miktarı da artar ve enerji düzeyleriyle beraber bant yapısı da ortaya çıkar. Eğer en yüksek işgal edilmiş enerji seviyesi ile en düşük işgal edilmiş enerji seviyesi arasında büyük bir enerji farkı varsa band aralığı Şekil 2.10’da gösterildiği gibi ortaya çıkmaktadır (Bilgen 2019).



Şekil 2.10: Silisyum yarı iletken maddesinin bant yapısının oluşumu (Bilgen 2019)

İletken, yarı iletken ve yalıtkanlar arasındaki temel farklardan biri bant aralıklarıdır ve oluşan bantların her biri, farklı kuantum durumları ile ilgilidir. Herhangi bir maddenin elektriksel iletkenliğinin değiştirebilmesi için valans bandında bulunan elektronların dışarıdan bir etkiyle kopartılarak, bant boşluğundan (E_g) atılması ve iletim bandına geçmesi gerekir. Bir elektron valans bandından kopartılıp, iletim bandına geçirildiğinde elektronun çıkarıldığı yerde bir deşik (hole) oluşmaktadır. Başka elektronlar, bu deşikleri doldurunca deşik hareket etmiş olur. Bu hareketler elektronların hareketleri ile karşılıklı olduğu için deşiklerin, pozitif yüklü parçacıklar gibi davrandığı kabul edilir. Şekil 2.11’de açık bir şekilde görüldüğü üzere, maddelerin elektriksel iletkenliği kazanabilmesi maddenin türüne ve atomların enerji seviyesine bağlıdır. Metallerde herhangi bir bant boşluğu olmadığı ve valans bandı ile iletim bandı iç içe olduğu için çok küçük bir enerji ile bu malzemelerde pek çok valans bandında bulunan elektron serbest hale geçmektedir. Bu yüzden bu malzemeler elektriği iyi iletebilmektedir. Yarı iletkenlerde, iletkenliğin sağlanabilmesi için bant boşluğuna aşacak kadar enerjinin dışarıdan sağlanması gerekmektedir. Yalıtkanlar oldukça büyük bant boşluğuna sahip oldukları için iletkenliğin sağlanabilmesi için çok yüksek enerji değerine ihtiyaç bulunmaktadır (Beşli 2012).



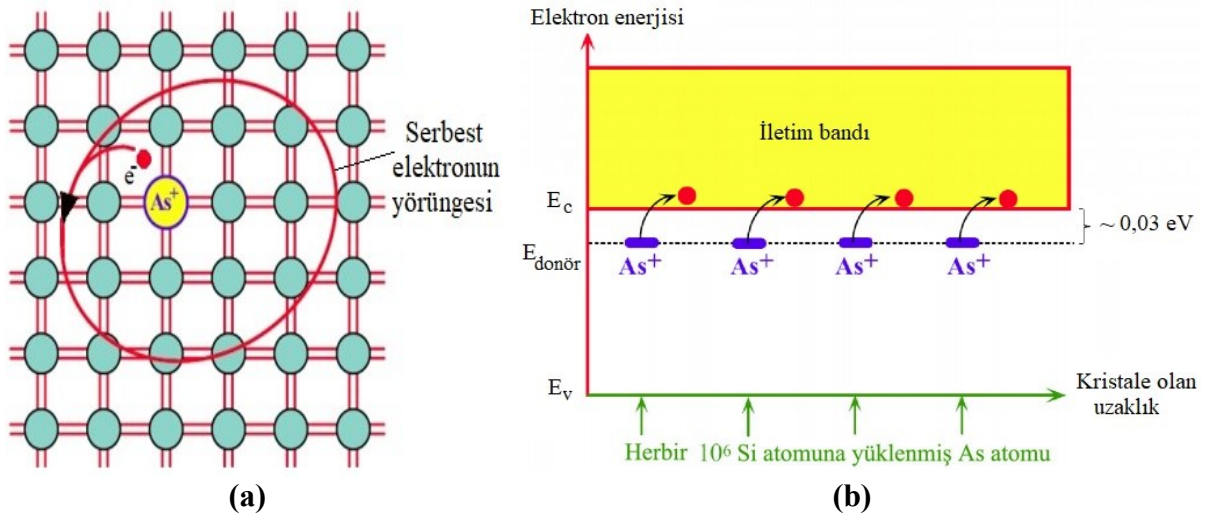
Şekil 2.11: Maddelerin bant yapıları ve aralıkları (boşlukları)

Elektronların işgal ettiği dolu enerji seviyeleri ile boş enerji seviyelerini ayıran enerji, kuantum mekaniğinde fermi enerjisi olarak tanımlanmaktadır. Elektronların dağılımını gösteren bu fermi enerjisi, kuantum mekaniğinde Fermi-Dirac istatistiğiyle hesaplanmaktadır. Yarı iletkenlerin hem elektronikte hem de termoelektrikte yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlayan en önemli özellikleri, çok az miktarda uygun seçilmiş yabancı atom katkılanmasıyla (doping) elektriksel özelliklerinin kontrollü olarak değiştirilebilmesidir. Yapılan katkı ile yarı iletken maddenin akım taşıyan serbest elektron sayısı artırıldığında “n tipi yarı iletken” malzemeler, deşiklerin miktarı artırıldığında ise “p tipi yarı iletken” malzemeler elde edilmektedir.

2.3.1.1 N tipi yarı iletkenler

Valans bandında 4 elektronu bulunan Silisyum (Si) yarı iletken maddesine, valans bandında 5 elektronu bulunan periyodik cetvelin 5A grubundan arsenik (As), fosfor (P), antimon (Sb), vb. atomların eklenmesiyle n tipi yarı iletkenler elde edilir. Örneğin Si kristaline As ilave edilmesiyle, As atomu Si atomunun 4 elektronu ile kovalent bağ yaptıktan sonra bir elektronu açıkta kalır (Şekil 2.12 (a)). Bağ yapamayan bu elektron As atomunun etrafındaki bir yörüngede dolaşır ve dışarıdan gerekli enerjinin verilmesiyle bu serbest elektron iletim bandına geçer. Bu şekilde Si yarı iletken maddesi içerisine eklenen katkı ile elektron sayısı artırıldığında n tipi yarı iletken elde edilmiş olur. As atomu ise bir elektronunu kaybettiği için As^+ iyonu haline gelir ve As atomunun iletkenlik bandına bir elektron vermesinden dolayı bağışlayıcı (donör) atom denir. Aynı işlem saf olan bir Si yarı iletkeninden, dışarıdan bir etki ile iletkenlik bandına bir elektron transferi yapılarak sağlanmak istenildiğinde, elektronu kopartmak için

verilmesi gereken enerji çok yüksek olacaktır. As atomu ilave edilmesiyle verilmesi gereken enerji yaklaşık 0,03 eV kadar küçük bir enerjidir. Oda sıcaklığı (25 °C), atomların titreşmesi için yaklaşık olarak 0,07 eV termal enerji sağlayabildiği göz önünde bulundurulduğunda, bu katkılama işleminin saf bir yarı iletkenin elektron transfer etmekten daha kolay olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. As atomunun latis örgüsü içerisindeki konumu ve serbest elektronun yörünge hareketi ile oluşan enerji bant diyagramı Şekil 2.12’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Özgün 2009).

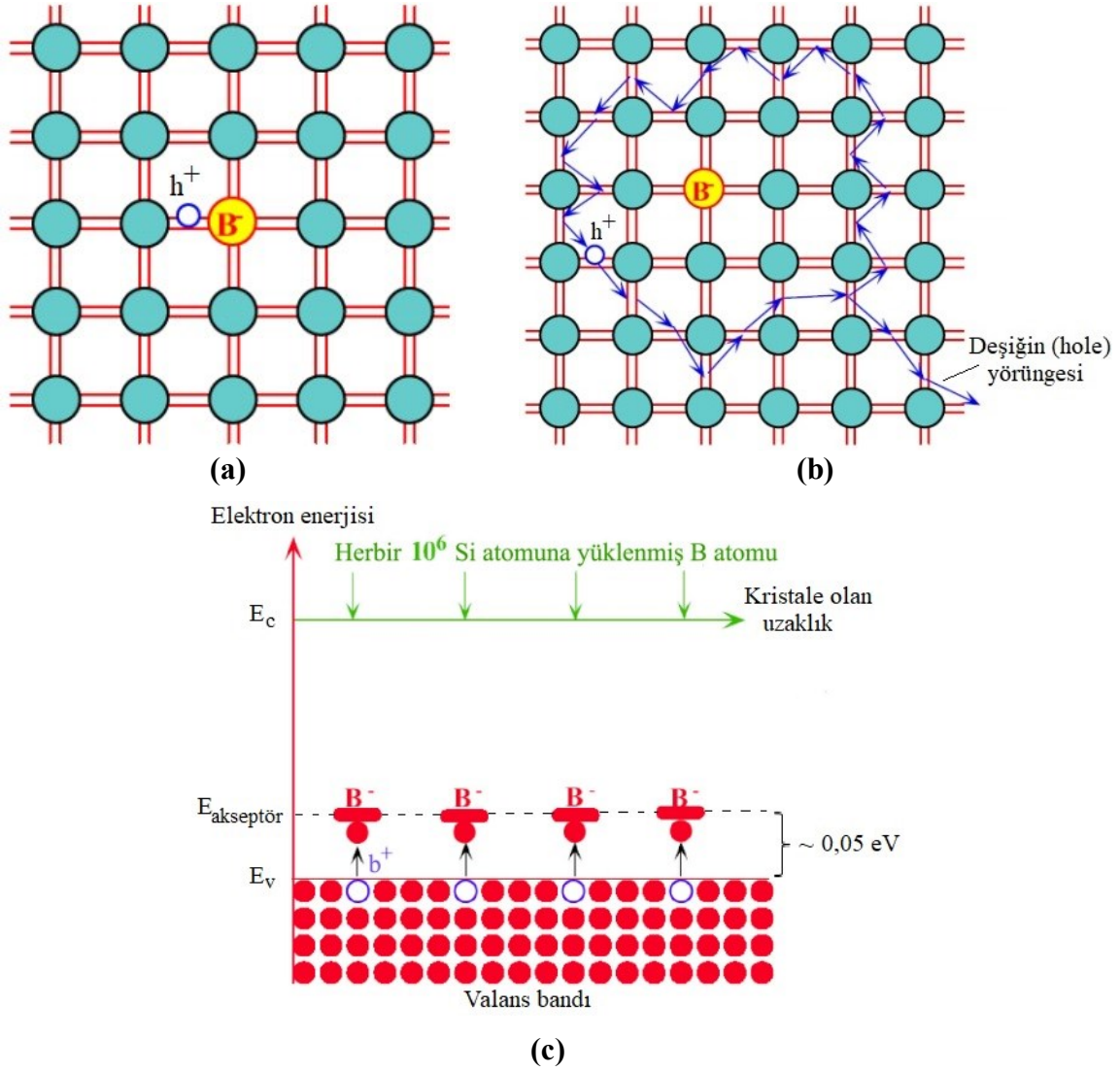


Şekil 2.12: (a) Si kristaline As atomu katkılanması (n-doping) (b) 1 ppm As atomu ile katkılanmış n tipi Si kristalinin enerji bant diyagramı (Özgün 2009)

2.3.1.2 P tipi yarı iletkenler

Valans bandında 4 elektronu bulunan Si yarı iletken maddesine, valans bandında 3 elektronu bulunan periyodik cetvelin 3A grubundan alüminyum (Al), bor (B), galyum (Ga), vb. atomların eklenmesiyle p tipi yarı iletkenler elde edilir. Örneğin Si kristaline B ilave edilmesiyle, B atomunun elektronlarıyla Si atomunun elektronları kendi aralarında kovalent bağ yapar ve Si atomunun bir elektronu bağ yapmadan açıkta kalır (Şekil 2.13 (a)). Dolayısıyla bu açıkta kalan yerde bir deşik (hole) oluşmuş olur. Madde içerisindeki elektronların hareketleriyle deşik B atomu çevresinde bir yörünge oluşturur ve dışarıdan yeterli enerji verilmesiyle deşik yörüngeden kurtulur (Şekil 2.13(b)). Yörüngeden kurtulmuş deşik, valans bandı içerisinde serbestçe hareket eder. Bu şekilde Si yarı iletken maddesi içerisine eklenen katkı ile elektron sayısı azaltılarak, deşik sayısı artırıldığı için p tipi yarı iletken elde edilmiş

olur. B atomu ise bir deşik kazandığı için B^- iyonu haline gelir ve elektron yutarak deşğin oluşmasına neden olduğu için B atomuna alıcı (akseptör) atom denir. Bahsedilen işlemin gerçekleşmesi için yaklaşık 0,05 eV enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır ve B atomunun latis örgüsü içerisinde konumu ve serbest deşğin yörünge hareketi ile oluşan enerji bant diyagramı Şekil 2.13’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir (Özgün 2009).

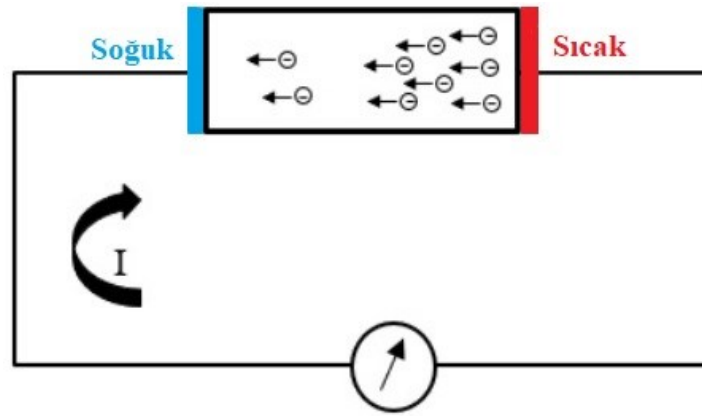


Şekil 2.13: (a) Si kristaline B atomu katkılanması (p-doping) (b) Serbest deşğin (hole) yörünge hareketi (c) 1 ppm B atomu ile katkılanmış p tipi Si kristalinin enerji bant diyagramı (Özgün 2009)

2.3.2 Termoelektrik modüller

TE yarı iletken malzemelerde; termal enerji etkisiyle atomik bağlardaki bulunan bazı elektronlar serbest hale geçer. Hatta TE malzemelerin elektronları, oda sıcaklığında (25 °C) bile

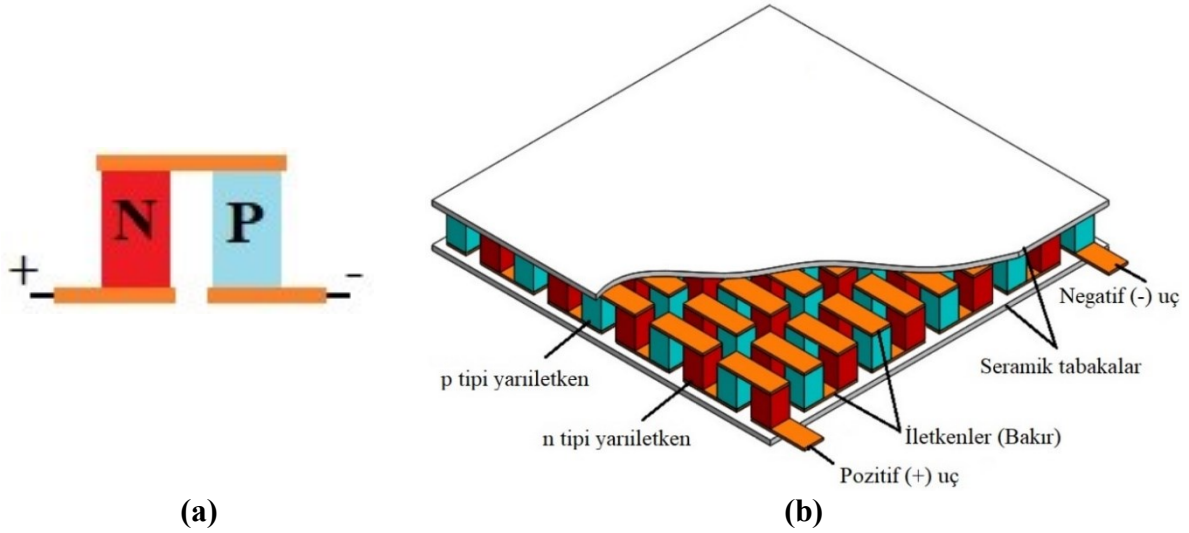
valans bandından iletim bandına atlayarak serbest konuma geçebilmektedir. Bir n tipi yarı iletken üzerine Şekil 2.14'deki gibi sıcaklık farkı uygulandığında, termal enerjile iletkenin sıcak bölgesindeki elektronların bir kısmı serbest hale geçer ve bu elektronlar sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket eder. Diğer yandan elektronun sıcak bölgeden soğuk bölgeye hareketiyle birlikte, Coulomb kuvvetleri vasıtasıyla elektrik alan oluşur. Böylece sıcaklık gradyanına karşı elektrik akım akarak bir elektromotor (emf) kuvveti (doğru gerilim) üretilir. Termoelektrik malzemelerin maruz bırakıldığı bu etki mekanizmasıyla (sıcaklık farkı uygulanması) termoelektrik jeneratörler (TEJ) oluşur. Tabii ki bunun tersi de doğrudur. Termoelektrik yarı iletken malzemelere bir DC gerilim uygulandığında, elektronlar hareket etmekte ve bünyesinde bir miktar termal enerji taşımaktadırlar. Bu şekilde termoelektrik malzemelere yapılan etki mekanizması ile (DC gerilim uygulanması) termoelektrik soğutucular (TES) oluşmaktadır (Lee 2017).



Şekil 2.14: Bir n tipi termoelektrik malzeme içerisindeki elektron konsantrasyonu (Lee 2017)

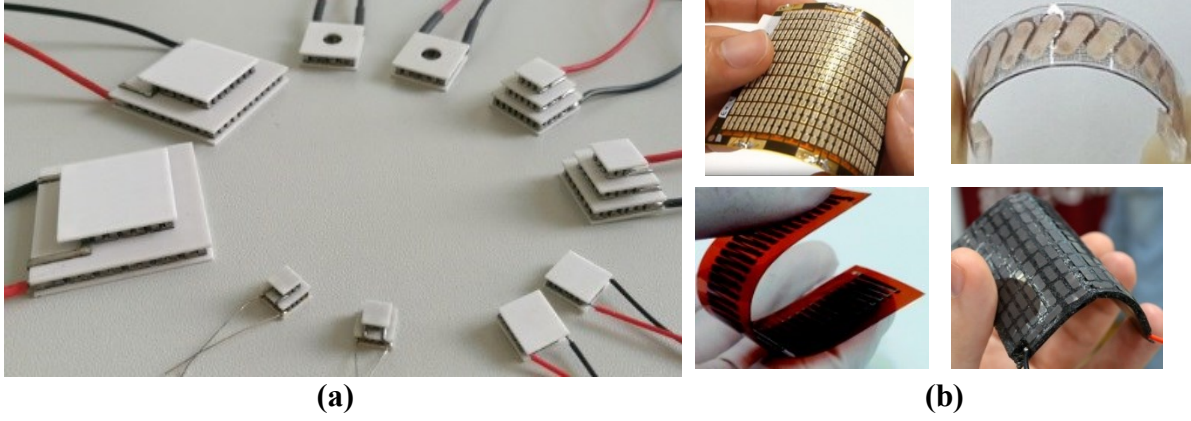
Hem TEJ'ler hem de TES'lar, termoelektrik yarı iletken maddelere farklı yabancı atom katkılanmasıyla elde edilen n ve p tipi yarı iletken malzemelerden elde edilir. n tipi yarı iletkenlerde ısı/emf kuvveti serbest olan elektronlar ile taşınırken, p tipi yarı iletkenlerde deşikler ile taşınır. Bu şekilde termoelektrik özellik gösteren bir tek n veya p tipi yarı iletken malzemeye termoelement denir. Termoelektrik etki ise p ve n tipi yarı iletken malzemelerin (termoelementler) birbirlerine iletkenler ile seri bağlanmasıyla oluşur ve bu yapıya termoçift denir (Şekil 2.15 (a)). Hemen hemen bütün uygulamalarda tek bir termoçift, istenilen güç üretimini veya istenilen ısıtma-soğutma ihtiyacını karşılayamaz. Bu yüzden termoçiftler birbirlerine iletkenler (bakır) ile elektriksel olarak seri, termal olarak paralel olacak şekilde bağlandıklarında termoelektrik modülleri oluşturmaktadırlar (Şekil 2.15 (b)). Termoelektrik modüllerin üzerinde seramik bir tabaka bulunur. Bu seramik tabaka, termoelektrik modüle

rijitlik (mukavemet) sağlayarak termoelementlerin bir arada kalmasını sağlar. Aynı zamanda seramik malzeme, yüksek ısı ve düşük elektriksel iletkenliğe sahip olması sebebiyle, termoelektrik modülün dış kısmının hem elektriğe karşı yalıtım hem de iyi bir ısı transferi sağlamasında yardımcı olmaktadır (Ioffe 1957, Rowe 1995, Rowe 2006, Lee 2010, Goldsmid 2010, Lee 2017). Tipik bir termoelektrik modülün kesit görünüşü Şekil 2.15 (b)'de detaylı olarak gösterilmektedir.



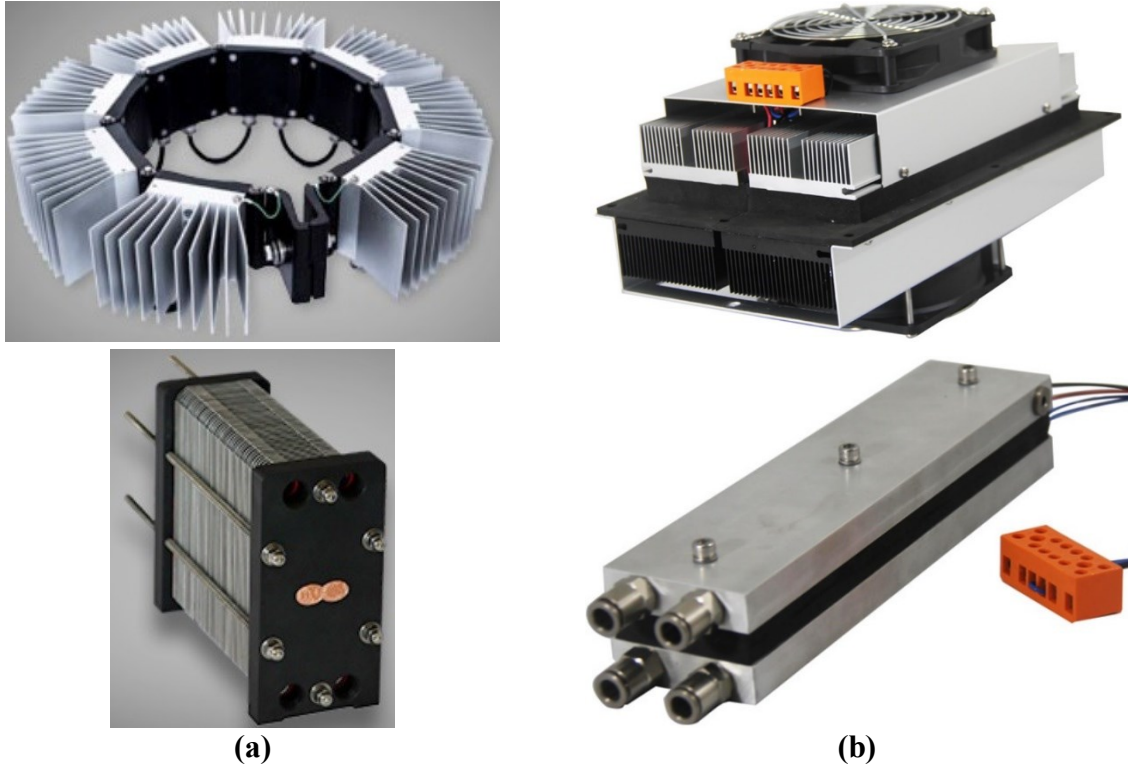
Şekil 2.15: (a) n ve p termoçifti (b) tipik bir termoelektrik modülün kesit görünüşü

Termoelektrik modüller tersinir oldukları için teoride hem TEJ hem de TES olarak kullanılabilecekleri düşünülebilir. Fakat pratikte TEJ güç üretimi amaçlı ve TES ısıtma-soğutma amaçlı kullanıldıkları için termoelektrik modülün kullanıldığı amaca bağlı olarak modülün içerisindeki yarı iletken malzemenin cinsi, geometrisi ve lehim bağlantı tipleri farklılık göstermektedir. Örneğin TEJ'lerin malzemeleri genelde yüksek sıcaklıklarda çalışabilmek için dizayn edilmiştir ve literatürde 300 K ile 1300 K arasında çalışabilen TEJ'ler geliştirilmiştir. Buna karşılık TES'lar bir yüzeyden ısı atmak veya ısı çekmek için kullanıldıkları için örneğin düşük sıcaklıklar elde edilmek için kaskat TES geliştirilmiştir. Yani kısaca bu cihazlar kullanım amacına göre kendi içerisinde özelleştirilmiştir ve TES yerine TEJ modül ya da TEJ yerine TES modül kullanılabilir ancak tam olarak istenilen performans alınmaz (Özgün 2009). Bütün bunlara ek olarak TEJ ve TES mini boyutlarda, farklı geometrilere ve hatta esnek malzeme olarak da üretilebilmektedir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: Çeşitli boyut ve tiplere sahip TEJ ve TES modüller (a) standart (b) esnek

Termoelektrik modüllerden daha fazla verim elde etmek için modüllerin kullanıldığı uygulamaya bağlı olarak modül yüzeylerine; kanatçıklı yapılar (ısı kuyuları), fan, ısı eşanjörü, vb. gibi ek mekanizmalar ilave edilebilmektedir. Bu şekilde oluşturulan yapılara termoelektrik sistemler adı verilir ve bu sistemlerden birkaçı Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



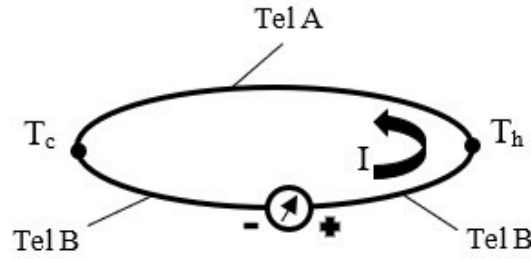
Şekil 2.17: (a) TEJ sistemler (b) TES sistemler (Marlow 2020, P&N Technology 2019)

2.3.3 Termoelektrik etkiler

Termoelektrik modüllerin güç üretimi amaçlı ve ısıtma-soğutma amaçlı çalışabilmeleri, modülün içerisinde gerçekleşen termoelektrik etkilerle sağlanmaktadır. Bu etkiler, kullanılan yarı iletken malzemenin özelliğine bağlı olarak değişmektedir.

2.3.3.1 Seebeck etkisi

1821 yılında Thomas Johann Seebeck, iki farklı metalden yapılmış ve bir uçları birleştirilerek oluşturulan kapalı bir devre kurarak, devrenin birleştirilen noktasının ucunu ısıtmıştır. Isının etkisiyle pusula iğnesinin bir miktar sapma yaptığını gözlemlemiştir (Allred 1993). Bu olay termoelektrikte Seebeck etkisi olarak bilinir. Seebeck etkisi, sıcaklık farkının bir potansiyel fark oluşturmasıyla doğrudan elektrik enerjisine dönüşümüdür (Şekil 2.18).



Şekil 2.18: Seebeck etkisi (Lee 2017)

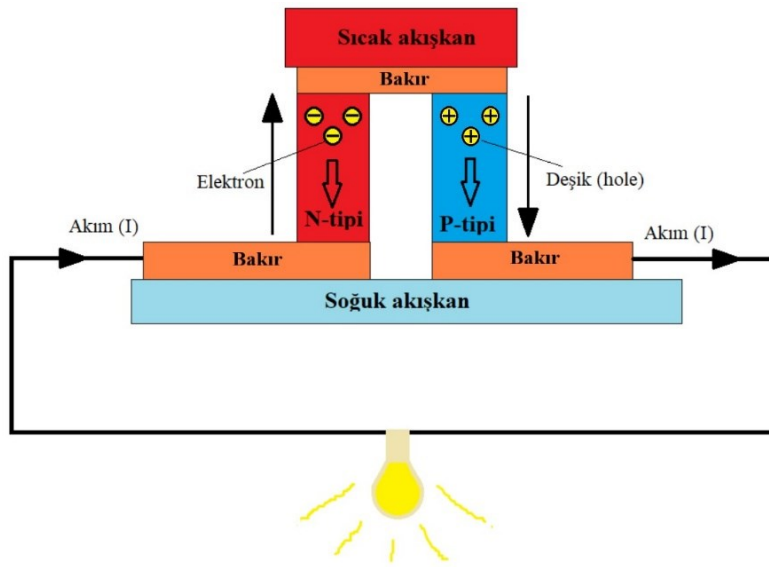
Şekil 2.18’de gösterildiği gibi, A telinin her iki ucu B teliyle birleştirilmiştir. B telinin arasına bir voltmetre yerleştirilerek, kapalı bir devre oluşturulmuştur. Bu devrenin birleşim noktalarından birine ısı uygulanarak iki uç arasında sıcaklık farkı oluşturulduğunda, voltmetrede bir potansiyel fark (ΔV) elde edildiği görülür. Bu potansiyel fark, sıcaklık farkıyla orantılıdır ve büyüklüğü (2.6) eşitliği ile belirlenir. Burada; $\Delta T = T_h - T_c$, $\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B$ ve α_{AB} , ısı çift malzemesinin Seebeck katsayıları (termoemk) farkı olup, birimi V/K’dir (Lee 2017).

$$\Delta V = \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Seebeck katsayısı malzeme özelliğidir ve her malzemenin farklı bir Seebeck katsayısı vardır. Aynı zamanda bazı malzemelerin iç yapısına (kristal yapı) bağlı olarak Seebeck katsayısı pozitif veya negatif olabilmektedir. Bununla birlikte Seebeck etkisi, bağlantı yapılan malzemeler farklı olduğunda gözlemlenir. Çünkü bağlantı yapılan uç ısıtıldığında malzemelerden birinin içerisinde sıcak taraftan soğuk tarafa daha çok elektron fermi enerjisi

seviyesini geçebilecek enerjiye sahip olurken, diğer malzemede daha az olacaktır. Bu sayede fermi enerji seviyesini geçen, serbest halde dolaşabilen yüksek enerjili elektronlar malzemelerin içerisinde yayılım gösterecekler ve malzemelerin bütününde sıcak ve soğuk uçlarda değişen yük dağılımından kaynaklı elektrik alana bağlı olarak net bir potansiyel farkı (elektron akışı) elde edilebilecektir. Verimli bir termoelektrik etki oluşturmak için Seebeck katsayısı mümkün olduğunca büyük olmalıdır.

Bir TEJ modülün bir adet termoçifti yüzeylerine uygulanan sıcak farklı ile termoçift içerisindeki elektronlar ve deşiklerin hareketleriyle meydana gelen Seebeck etkisi Şekil 2.19'da detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bunun için termoçiftin üst yüzeyinden bir sıcak akışkanın ve alt yüzeyinden ise bir soğuk akışkanın sürekli olarak sağlanıldığı düşünülmüştür. Sıcak akışkanın bakıra teması ile iletilen yüksek sıcaklık, n ve p tipi yarı iletken malzemelerin (pellet) üst yüzeyine ulaşmaktadır. Benzer şekilde diğer yüzeydeki bakırlar, soğuk akışkan sıcaklığını pelletlerin alt yüzeyine iletmektedir. Bu sayede elde edilen sıcaklık farkından dolayı n tipinde fazla olan akım taşıyıcı olan elektronlar ve p tipinde fazla olan akım taşıyıcı olan deşikler, artan enerji seviyelerinden dolayı sıcak taraftan soğuk tarafa doğru difuz etmek (yayılmak) istemektedirler. Fizik biliminde bilindiği üzere, elektron ve deşiklerin sıcak taraftan soğuk tarafa hareketine ters yönde elektrik akımı oluşmaktadır. Eğer alt yüzeyde bulunan bakır uçlar birbirlerine bir iletkenle birleştirilerek kapalı bir devre oluşturulursa, elektrik akımı kapalı devrede akmaya başlayacak ve kapalı devrede bulunan lamba, motor, vb. sürülen cihaz üzerinde iş yapacaktır. Bu şekilde bir termoçiftten bir DC gerilim üretilecektir (Seebeck etkisi).



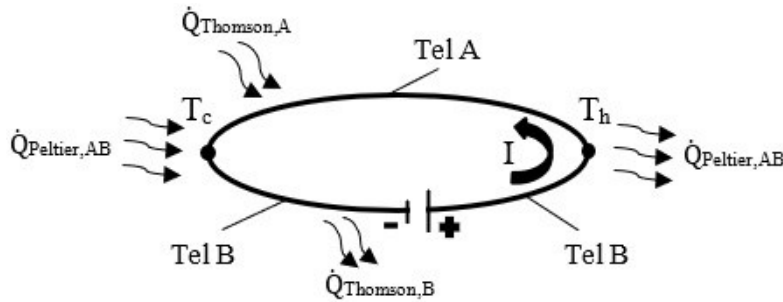
Şekil 2.19: Seebeck etkisiyle bir termoçiftten gerilim üretilirken elektronların ve deşiklerin akışı

2.3.3.2 Peltier etkisi

Şekil 2.20’de gösterildiği gibi, eğer iki farklı telden oluşturulan bir devreden DC akım geçirilirse, telin bir ucundan $\dot{Q}_{Peltier}$ kadar ısı atılırken (ısıtma), telin diğer ucundan $(-)\dot{Q}_{Peltier}$ kadar ısı çekilir (soğutma). Bu ısı miktarı geçen akım ile orantılıdır ve uygulanan elektrik akımının yönüne bağlı olarak soğuk ve sıcak ucun yerleri değiştirilebilmektedir (Rowe 1995, Rowe 2006). İlk kez 1834 yılında Charles Peltier tarafından keşfedilen ve Seebeck etkisinin tam tersi şekilde oluşan bu etkiye Peltier etki denir. Peltier ısıısının ($\dot{Q}_{Peltier}$) birimi W olup, (2.7) eşitliğiyle ifade edilir.

$$\dot{Q}_{Peltier} = \pi_{AB} \cdot I \quad (2.7)$$

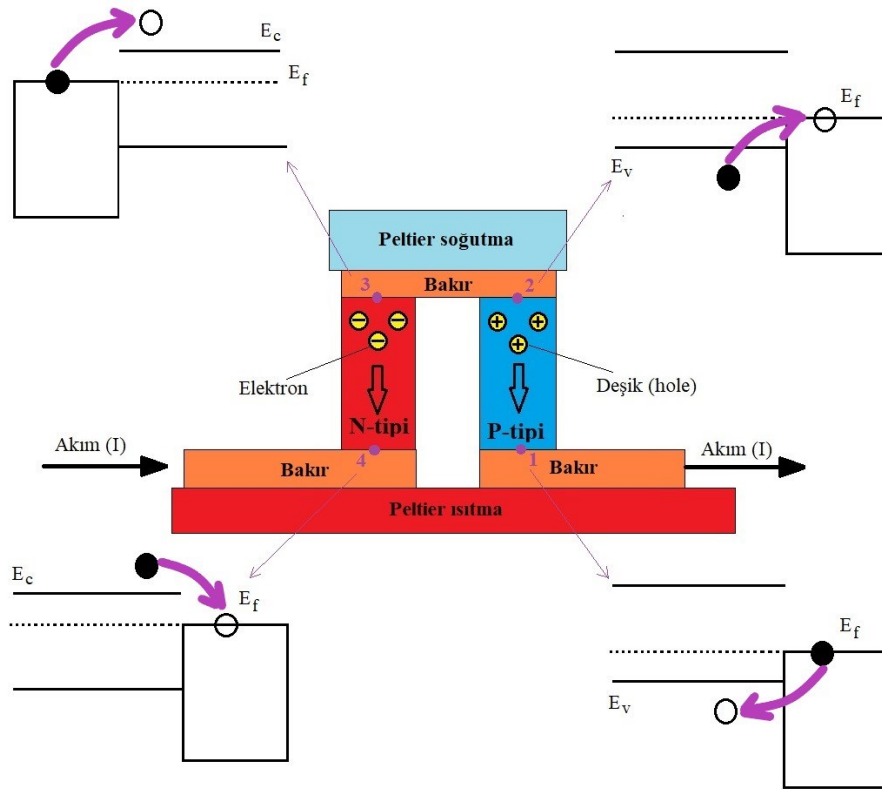
Burada; π_{AB} Peltier katsayısıdır ve bu katsayı uygulanan DC akımdan ne kadar ısıtma ya da soğutma elde edilebildiğinin bir ölçüsüdür. Peltier ısıtma ya da soğutma, ısı ve elektrik arasında tersinirdir. Yani ısıtma ya da soğutma ile doğrudan herhangi bir enerji kaybı olmadan elektrik üretilebilir ya da tam tersi de gerçekleşebilir (Lee 2017). Bununla birlikte sistemin soğutma gücünü peltier soğutma haricinde etkileyen iki faktör daha bulunmaktadır. Bunlar, Peltier soğutma etkisine karşı bir şekilde çalışırlar ve sistemin soğutma gücünü azaltırlar. Bu faktörler, ısı iletimi ve Joule ısınmasıdır.



Şekil 2.20: Peltier ve Thomson etkileri (Lee 2017)

Bir TES modülün bir adet termoçiftinin yüzeylerine uygulanan DC gerilim ile termoçift içerisindeki elektronlar ve deşiklerin hareketleriyle meydana gelen Peltier etkisi Şekil 2.21’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu sistemde, uygulanan akım yönünün tersi yönde elektronlar akmaya başlamaktadır. Alt yüzeyde bulunan bakır iletkeninden geçen elektronlar 1 noktasına gelerek, buradan p tipi yarı iletkenin alt tarafına geçmek istemektedir. Ancak kullanılan malzemelerin özelliklerine göre 1 noktasında bakır iletkenin fermi enerjisi p tipi malzemeden yüksektir. Dolayısıyla elektronun p tipine geçebilmesi için fazla enerjisini bırakması

gerekmektedir. Bırakılan enerji Peltier ısıtmadır. Elektron p tipi pellete geçince fazla olandeşikler üzerinden akarak, p bacağının diğer ucu (üst yüzey) olan 2 noktasına gelecektir. Bu noktada bakır iletkenin fermi enerjisi, p bacağından yüksektir. Dolayısıyla p pelletindeki elektronun bakır iletkenine geçebilmesi için enerjisini arttırması gerekir. Bunun için bir miktar ısıyı çevreden çeker ve böylelikle üst yüzeyde bir miktar Peltier soğutma yapar. Daha sonra bakır iletken vasıtasıyla 3 noktasına gelen elektronun n tipi pellete geçebilmesi için enerji ihtiyacı olmaktadır. Enerji ihtiyacını çevreden ısı olarak çeken elektron, üst yüzeydeki Peltier soğutmaya ilave katkı yaparak n tipi pellete geçmektedir. Ardından n tipi pellet üzerinden geçen elektron son olarak 4 noktasına gelmektedir. Burada n tipi pelletten bakır iletkenine geçebilmesi için üzerinde taşıdığı yüksek enerjii bırakması gerekmektedir. Dolayısıyla alt yüzeyde 1 noktasında gerçekleşen Peltier ısıtmaya ek bir ısıtma daha katkıda bulunur. Bu şekilde üst yüzeyde soğuma alt yüzeyde ise ısınma gerçekleşecektir (Peltier etki). Eğer uygulanan akımın yönü değiştirilirse, termoçift aynı fiziksel olayı ters yönde gerçekleştirecektir. Yani soğuyan yüzey ısınacak, ısınan yüzey soğuyacaktır. Bu şekilde uygulanan DC gerilimin büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak, termoçift ısıtma veya soğutma amaçlı olarak kullanılabilir.



Şekil 2.21: Peltier etkisiyle bir termoçiftten ısıtma/soğutma elde edilirken elektronların vedeşiklerin akışı

2.3.3.3 Thomson etkisi

Peltier ve Seebeck etkilerine ek olarak, tek bir iletkenin herhangi iki noktası arasında sıcaklık gradyanı varsa ve aynı zamanda bu iletkenin akım geçirilirse Thomson etkisi ortaya çıkmaktadır (bkz. Şekil 2.20). Bu etki, akım yönüne ve malzemeye bağlı olarak uçların birinde ısı açığa çıkarırken, diğerinde soğutma oluşturur. Thomson etkisi hem sıcaklık gradyanıyla hem de elektrik akımıyla orantılıdır ve (2.8) eşitliğiyle ifade edilir. Burada; τ_{AB} Thomson katsayısıdır ve bu katsayı diğer termoelektrik katsayılarından farklı olarak tek bir malzeme için ölçülmektedir. Ayrıca Thomson ısı, ısı ve elektrik arasında tersinirdir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_{Thomson} = -\tau_{AB} \cdot I \cdot \nabla T \quad (2.8)$$

2.3.3.3.1 Thomson (Kelvin) ilişkisi

Termoelektrik olayının fiziksel mekanizmasını kavramak için bu üç termoelektrik etkinin birbirleri arasındaki ilişkilerini bilmek çok önemlidir. Thomson, Termodinamiğin I. ve II. Kanunlarını uygulayarak, (2.9) ve (2.10) eşitliklerini elde etmiştir. Thomson etkisi aslında Peltier etkiyle kıyaslandığında oldukça küçüktür. Ancak bu etki, Thomson ilişkisinin iyi bir şekilde anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Lee 2017).

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} \cdot T \quad (2.9)$$

$$\pi_{AB} = T \cdot \frac{d\alpha_{AB}}{dT} \quad (2.10)$$

(2.9) eşitliği kullanarak Peltier ısı için (2.11) eşitliği elde edilmektedir. Burada; T iki ucun birleşme noktasındaki sıcaklığıdır (K).

$$\dot{Q}_{Peltier} = \alpha_{AB} \cdot T \cdot I \quad (2.11)$$

2.3.4 Joule ısı ve ısı iletimi etkileri

İçerisinden akım geçen bir iletkenin ürettiği ısı, üzerinden geçen akımın karesiyle ve iletken malzemesinin direnci ile orantılıdır. Birim zamandaki Joule ısının miktarı, (2.12) eşitliği ile ifade edilir.

$$\dot{Q}_{Joule} = I^2 \cdot R \quad (2.12)$$

Bilindiği üzere, termoelektrik malzemeler yarı iletken maddelerin özelliklerini kullanarak üstlendiği görevi yerine getirmektedirler. Bu maddeler sonuçta katı maddeler olduğu için ve termoelektrik modüllerde, termoçiftlerin birbirlerine katı-katı temas ettirilerek oluşturulduğu için bir miktar ısı, sıcak yüzeyden soğuk yüzeye transfer olmaktadır. Bu ısı miktarının Denklem (2.5) ile belirlenebildiği daha önce ifade edilmiştir.

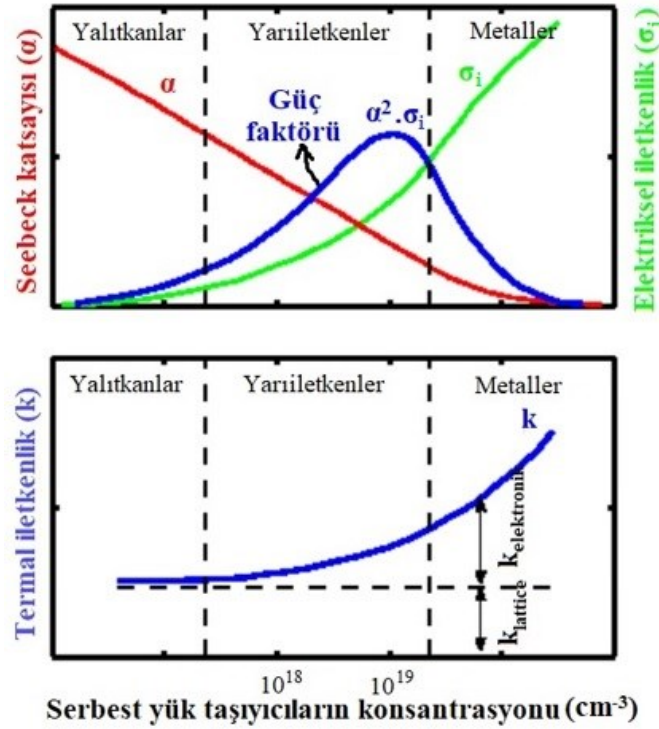
2.3.5 Termoelektrik malzemelerin performans katsayısı (Z)

Termoelektrik malzemelerin performans katsayısı (figure of merit) fikri ilk olarak 1909 yılında Edmund Altenkirch tarafından ortaya atılmıştır. Altenkirch çalışmasında, iyi bir TE malzemede Seebeck katsayısı ve elektrik iletkenliğin yüksek, termal iletkenliğin ve Joule ısısının minimum olması gerektiğini ifade etmiştir. Ardından 1950'lerde Abram F. Ioffe, Altenkirch'in ifade ettiği bu terimi, termoelektrik malzemeler ve sistemler için çok önemli olan Z (termoelektrik performans katsayısı) değeri altında toplayarak, matematiksel olarak ifade etmiştir (Ioffe 1957, Polozine ve diğ. 2014). Termoelektrik performans katsayısı, (2.13) ifadesiyle belirlenir ve bu Z katsayısı hem TEJ hem de TES'lar için geçerli olmakla birlikte, Z değeri ne kadar büyükse TE sistem o kadar verimlidir. Bununla birlikte Z değeri, TE malzemeleri fiziksel olarak daha iyi anlamamıza ve birbirleriyle kıyaslama yapmamıza yardımcı olduğundan çok önemlidir. Burada; α = Seebeck katsayısı (V/K), ρ = öz direnç ($\Omega.m$), $\sigma_i = 1/\rho$ = elektriksel iletkenlik ($\Omega.m$)⁻¹ ve k = ısıl iletkenliktir (W/m.K). Z değerinin birimi 1/K'dir ve Z değeri boyutlu olduğundan ve bu değeri fiziksel olarak anlayıp yorumlamak da zor olduğundan dolayı termoelektrik malzemeler için boyutsuz ZT katsayısı tanımlanmıştır. Burada, T mutlak sıcaklıktır (K). Aynı zamanda (2.13) ifadesindeki $\alpha^2 \cdot \sigma_i$ büyüklüğü, literatürde güç faktörü olarak tanımlanmakta ve ısıl iletkenlik katsayısı (k) ise kendi içerisinde elektronik katkı ($k_{elektronik}$) ve lattice katkısı ($k_{lattice}$) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot k} = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma_i}{k_{elektronik} + k_{lattice}} \quad (2.13)$$

(2.13) ifadesi göz önüne alındığında, metallerin yüksek elektriksel iletkenlik özelliklerinden dolayı iyi birer TE malzeme olabileceği düşünülebilir. Ancak metallerin bu üstün özelliklerine karşın düşük Seebeck katsayısına ve yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip

olmaları, metallerin iyi birer TE malzeme olmasını engellemektedir (Şekil 2.22). Bu noktada yarı iletken maddeler, diğer maddelerle (metaller ve yalıtkanlar) kıyaslandığında, Seebeck katsayılarının yüksek olması ve daha da önemlisi düşük elektriksel iletkenliklerinin katkılama (doping) ile iyileştirebilmesinden dolayı onları, iyi birer TE malzeme için öne çıkarmaktadır. Bütün bunlara ek olarak, yapılan değişik katkılama ve etkiler ile ısı iletim katsayılarında düşürülebilmesi yarı iletken maddeleri TE malzemeler için vazgeçilmez kılmaktadır. Fakat yapılan katkılama miktarının artırılmasıyla elektriksel iletkenlik artmasına karşın aynı etki Seebeck katsayısının azalmasına neden olmaktadır. Yani Z katsayısının altındaki değişkenler birbirlerine bağımlıdır ve bu yüzden yapılan katkılama miktarına göre Z değerinin optimize edilmesi gerekmektedir (Lee 2017, Karamitaheri 2013).

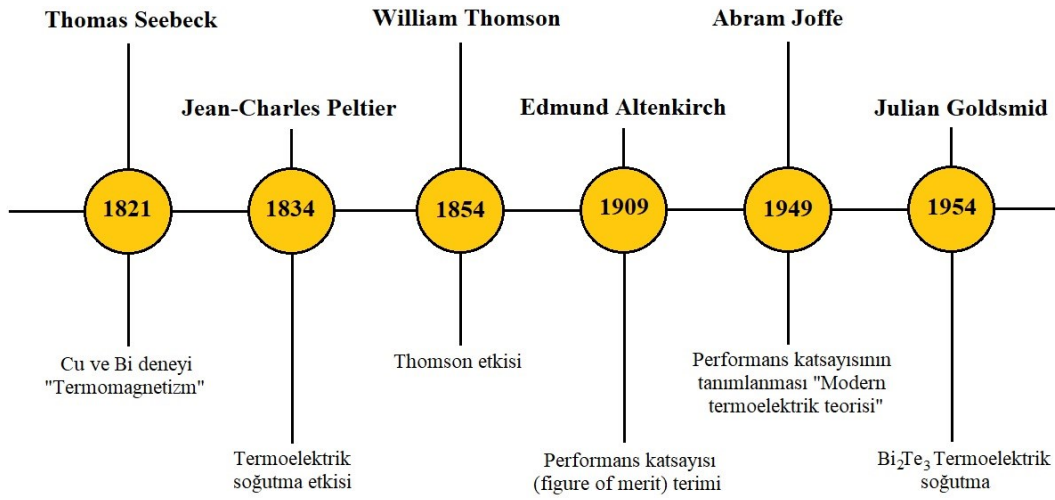


Şekil 2.22: Taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanların transport katsayılarının değişimleri (Karamitaheri 2013)

2.4 Termoelektrikle İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

Termoelektrik konusundaki çalışmalar, Thomas Johann Seebeck ve Jean Peltier çalışmalarına kadar eskiye dayanmaktadır. 1821 yılında Seebeck ve 1834 yılında Peltier günümüzde kendi adlarıyla anılan termoelektrik etkilerden Seebeck etkisini ve Peltier etkisini

keşfetmişlerdir (Seebeck 1821, Peltier 1834 ve Allred 1993). Aynı zamanda Lord Kelvin olarak bilinen William Thomson, Seebeck ve Peltier katsayılarının arasındaki ilişkiyi bulmuştur (Thomson 1854). Böylece bir termoelektrik malzemenin, herhangi bir sıcaklık gradyanının varlığında, güç üretmesinin veya uygulanan bir akım ile bir yerden bir yere ısı pompalamasının mümkün olabileceği gösterilmiştir. 1909 yılında Edmund Altenkirch hem TEJ'ler hem de TES'lar için maksimum verimlilik değerini, TE malzemelerin malzeme özellikleri cinsinden matematiksel olarak ifade etmiştir (Polozine ve diğ. 2014). 1950'lerde ünlü Rus bilim adamı Abram F. Ioffe, Altenkirch'in ifade ettiği ilişkiyi ideal TE cihazlar için çok önemli olan Z değeri altında toplamıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23: Termoelektrik fiziki olayının tarihçesi

TE malzemelerin yaygın bir şekilde kullanımı, bizmut tellürid (Bi_2Te_3), kurşun tellürid (PbTe) ve silisyum-germanyum (SiGe) gibi temel katkıli yarı iletkenlerin geliştirilmesine kadar mümkün değildi (Mackey 2015). 1950 yılında Ioffe, ZT değerini artırmak için katkıli yarı iletken malzemeler oluşturarak, malzemelerin kristal kafesinin ısı iletkenlik katsayısının azaltılabileceğini düşünmüştür. Ioffe'nin yaptığı çalışmaların sonucunda, katkıli yarı iletken malzemelerin diğer malzemelere kıyasla daha iyi bir termoelektriksel özelliklere sahip olduklarını keşfetmiştir ve bu doğrultuda yapılan çalışmalar sonucunda, oda sıcaklığında en iyi sonucu veren malzemelerin Bi_2Te_3 ve Sb_2Te_3 alaşımları olduğu ortaya çıkmıştır (Goldsmid 1986, Nolas ve diğ. 1998). 1960-1990 yılları arasında yapılan çalışmalarla $ZT \approx 1$ civarındadır ve ZT değerini artırmadaki başarı, istenilen seviyede değildir (Dresselhaus ve diğ. 2007, Zhao ve Tan 2014). Ancak TE endüstrisi, maliyetin ve verimliliğin çok önemli olmadığı ve sadece TE malzemelerin avantajlarından dolayı kullanıldığı uzay araştırmaları ve medikal uygulamalar

sayesinde yavaş yavaş ve istikrarlı bir şekilde büyümeye devam etmiştir. TE malzemelerle ilgili asıl kayda değer gelişmeler 1990'lı yıllarda malzeme alanına nanoteknolojinin gelmesinden sonra yaşanmıştır (Hicks ve Dresselhaus 1993, Snyder ve Toberer 2008, Zhao ve Tan 2014, Champier 2017). Malzeme sentezi ve karakterizasyon tekniklerindeki ilerlemelerle, geleneksel TE malzemelere nanokatılar yapılarak yüksek verimli TE malzemeler geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığında TE malzemeler genel olarak 2 kısımda incelenir. Bunlar, güç elde etmek için kullanılan termoelektrik jeneratörler (TEJ) ve soğutma-ısıtma elde etmek için kullanılan termoelektrik soğutuculardır (TES). Bununla birlikte bu tez çalışması kapsamında, teknolojik tıbbi bir cihaz tasarımı gerçekleştirildiği (termoelektrikli prematüre bebek kuvüzü) için sağlık sektöründe yapılan TE ilgili çalışmalar da ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

2.4.1 Termoelektrik jeneratörlerle (TEJ) ilgili yapılan çalışmalar

Elektrik üretimi insanlığı için çok önemli bir konudur. TEJ'ler iki ısı değiştirici arasına yerleştirilen TE modüller kümesinden oluşan bir sistemle elektrik üretebilirler. TEJ'ler ısı enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine çevirebilmeleri, hareketli parçaları olmamaları, herhangi bir iş akışkanına ihtiyaç duymamaları, bakım gerektirmemeleri, yer çekiminden etkilenmemeleri gibi birçok avantajlarından dolayı bilim adamlarının ilgisini çekmiştir. Ancak bu kadar avantajlarına rağmen verimleri düşüktür ve maliyetleri oldukça yüksektir.

Bilim adamları 19. yüzyıldan beri, TE malzemelerin hem ekonomik hem de verimli olarak çalıştırılabilmesi için yeni yollar aramaktadırlar. Termoelektrik etkilerin keşfedilmesi ve öneminin anlaşılmasından sonra birçok ülkede birçok TEJ yapılmıştır. Ancak uygulamada kullanılan ilk TEJ; M. G. Farmer tarafından yapılmış ve 1867 yılında Paris'te ulusal bir sergide yaptığı ürünlerden iki tanesi sergilenmiştir. Bu TEJ'ler Alman gümüşü (German Silver) olarak adlandırılan ve %60 Cu, %20 Ni ve %20 Zn oluşan n tipi malzeme ile antimon-çinko alaşımından oluşan p tipi malzemedan elde edilmiştir. Fakat yapılan bu TEJ, kapasitesini hızlı bir şekilde kaybetmesi ve termoelektrik çubukların kırılabilirliği sebebiyle yaygın bir şekilde kullanımı engellemiştir (Clamond 1875).

Farmer'ın ardından birkaç bilim adamı TEJ'lerle ilgilenmiş ve Farmer'ın yaptığı cihazların eksik taraflarını iyileştirerek, yeni TEJ'ler tasarlamıştır. Ancak düşük verimlilik, yüksek maliyet ve TE ilgili bilimsel bilgilerdeki yetersizliklerden dolayı istenilen ilerlemeler

sağlanamamış ve 1950’li yıllara kadar kayda değer TEJ ile çalışan bir sistem geliştirilemeyerek bir durgunluk dönemi yaşanmıştır (Polozine ve diğ. 2014). TEJ’lerin durgunluk dönemini bitiren çalışmalar, 1947 yılında Maria Telkes’le başlamıştır. Telkes (1947), TE sistemlerle termal enerjiden direkt olarak elektrik enerjisi üretilmesi, verimliliği %1’den az olan ve sıcaklık ölçümleri için kullanılan mevcut alaşımlardan yapılmış ısı çift (termokupl) malzemelerle gerçekleştirilemeyeceğini ifade etmiştir. TE’lerin teorik olarak verimlilik hesaplamaları değerlendirildiğinde, termoelektrik gücü $200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ’dan daha yüksek olan ve Wiedemann-Franz-Lorenz ilişkisinin geçerli olduğu ısı çift malzemeler ile daha yüksek verimlilik değerleri elde edilebileceğini göstermektedir. Telkes, yukarıdaki koşula yaklaşan bazı metalleri çinko-antimon alaşımlarıyla karıştırarak, %5 verimlilikle ilk TEJ’leri inşa etmiştir.

İlerleyen zamanlarda NASA, yüksek güvenilirliği, düşük ağırlığı, uzun çalışma süresi, bakım gerektirmemesi gibi avantajlarından dolayı TEJ’leri uzay araçlarında kullanmayı düşünmüştür. Özellikle güneşten uzak olan gezegenlere gönderilen uzay araçlarında, güneş ışığının yetersiz kalmasından dolayı mevcut güneş panelleri istenilen elektriği üretmiyor ve istenilen elektriği üretmek için de daha büyük yüzey alanına sahip güneş panellerine ihtiyaç oluyordu. Güneş panellerinin yüzey alanlarının büyümesi de uzay aracının ağırlığının artmasına neden olduğu için büyük bir sorun teşkil ediyordu. Bu noktada TEJ’ler uzay aracının ağırlığını artırmadığı için büyük bir potansiyele sahipti. Bu yüzden NASA, gerekli analiz ve testleri yaptıktan sonra 1961 yılında “SNAP 3” (Space Nuclear Auxiliary Power) diye adlandırılan Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörü (RTJ) tasarladı. Bu sistem, kurşun tellürden (PbTe) yapılmış ve termoçiftlerin bir yüzeyine Plutonyum-238 radyoaktif maddesinin bozunumu ile açığa çıkan ısı, diğer yüzeyine de soğuk olan uzay atmosferi temas ettirilerek, meydana gelen sıcaklık farkıyla elektrik üretebilmekteydi (Dix ve diğ. 1959, Gross ve Schramm 1960, Schwartz ve Shure 1965). SNAP 3 aracının 15 yılın üzerinde başarılı bir şekilde görevini tamamlamasının ardından uzaya gönderilen bütün uzay araçlarında (Voyager (1977 başladı, görevi devam ediyor), Galileo (1987 başladı, görevini tamamladı), Ulysses (1990 başladı ve görevini tamamladı), Cassini (1997 başladı, görevi devam ediyor), New Horizons (2006 başladı, görevi devam ediyor) RTJ’ler kullanılmıştır (Mackey 2015).

RTJ’lerin NASA tarafından uzay araçlarında başarılı bir şekilde uygulanmasının ardından, bilim dünyasında TE malzemeler ve TEJ sistemlerle ilgili çalışmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Ancak 1960-1990 yılları arasında yapılan bilimsel çalışmalarda TE malzemelerin Z değerindeki beklenen artış ve ilerleme sağlanamamıştır (Dresselhaus ve diğ. 2007, Zhao ve

Tan 2014). TE sistemlerde kullanılan TE malzemelerin hepsi bulk (katkısız yığın) formundaydı. Hicks ve Dresselhaus (1993) TE malzemelerin kafes sistemi içerisinde atomlarını düzgün bir şekilde yerleştirerek (nanoteknoloji), TE malzemelerin Z değerlerinin arttırabileceğini ifade etmişlerdir. Bu şekilde TE malzemelerde nanoteknoloji kullanılmasıyla birlikte, modern ve verimli TE malzemeler geliştirilmiş ve TE sistemlerin altın çağı başlamıştır. Günümüzde TEJ sistemleri içerisinde bulduran birçok uygulama ve sektör bulunmaktadır. Bu sektörler ve uygulamalar; uzay araştırmaları TEJ uygulamaları, atık ısı geri kazanımlarında TEJ uygulamaları, yenilenebilir enerji sistemleri ile kombine edilen TEJ uygulamaları, mikroelektronik ve sensörlerde kullanılan TEJ uygulamaları ve güneş enerjisi TEJ uygulamaları olarak 5 geniş kategori altında toplanabilmektedir. Ayrıca bu kategorilere, çok yakın bir zamanda “organik TEJ uygulamaları” adı altında bir kategori daha eklemek gerekecektir (Champier 2017).

2.4.2 Termoelektrik soğutucularla (TES) ilgili yapılan çalışmalar

TES, basit olarak n-tipi ve p-tipi yarı iletken malzemelerin birbirlerine iletkenler vasıtasıyla birleştirilmesiyle termoelementlerden (termoçift) oluşur. Birçok termoçiftin birbirlerine elektrik olarak seri ve termal olarak paralel bağlanmasıyla TES modüller oluşur. TES modüllere DC akım verildiğinde, uygulanan akımın yönüne bağlı olarak elektronlar vasıtasıyla modülün bir yüzeyinde ısı soğurumu (soğuma), diğer yüzeyinde ısı salınımı (ısınma) meydana gelir. TES’lar; yüksek hassasiyetle kontrol edilebilmeleri, uygulanan akımın yönü değiştirilerek istenilen yüzeyde çok kısa sürede ısıtma ve soğutma yapabilmeleri, bünyelerinde hareketli parçalar buldurmamaları, çalışırken herhangi bir iş akışkanına gerek olmaması, ağırlık olarak hafif ve kompakt yapıları gibi birçok avantaja sahiptirler. Buna karşılık en büyük dezavantajları ise maliyetlerinin yüksek ve verimlerinin (COP) düşük olmasıdır.

TES’lar 1834 yılında Peltier tarafından keşfedilmesine rağmen TE malzemelerin fiziksel olarak iyi anlaşılmasından dolayı 1950’li yıllara kadar TES’larda hızlı bir gelişim kaydedilememiştir (Dresselhaus ve diğ. 2007). Bu zaman zarfında, Peltier soğutma etkisini kullanarak bir termoelektrik buzdolabı tasarlamak için çeşitli girişimler yapılmıştır. Ancak, gerekli özelliklere sahip hiçbir termoeleman malzeme bulunamadığı ve elde edilen malzemelerde de Peltier soğutma miktarının genel olarak Joule ısınmasından çok daha düşük olması nedeniyle, tüm bu girişimler başarısız olmuştur. Aslında, iyi bir TE malzemede

bulunması gereken özellikler Altenkirch çalışmaları sonucunda, Ioffe tarafından Z değerinin altında toplanmasıyla ortaya çıkmıştır. Metallerin, istenilen güç faktörüne sahip olmaması ve elektrik iletkenliğinin termal iletkenliğe oranının, herhangi bir sıcaklıktaki tüm metallerde yaklaşık olarak sabit olması sebebiyle TES'ler için uygun değildi. Bu noktada bilim adamları yarı iletken malzemelere büyük bir ilgi göstermeye başladı. Yarı iletkenlerin genel olarak elektrik-termal iletkenlik oranı bir metalinkinden çok daha az olmasına rağmen termoelektrik güç faktörü çok daha büyük olabilmekteydi. Bu konulardaki çalışmaların öncülüğünü yapan Ioffe'nin ardından 1954 yılında H. Julian Goldsmid ve Douglas, bizmut tellürid-bizmut ($\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}$) bazlı bir termoelektrik Peltier soğutucusu kullanarak, bir yüzeyi $0\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar soğutmayı başarmıştır. Goldsmid, saf bizmut (Bi) ile bağlantılı olan p-tipi Bi_2Te_3 kullanılarak bir termoçift yapmıştır. Bu çiftin teorik olarak maksimum sıcaklık farkını $28\text{ }^\circ\text{C}$ hesaplamıştır. Ancak deneysel çalışmada, yaklaşık olarak $6,5\text{ A}$ akım geçirildiğinde $26\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik maksimum sıcaklık farkı elde edildiğini gözlemlemiştir (Goldsmid ve Douglas 1954).

Goldsmid ve Douglas'ın elde ettiği başarıdan sonra 1960-1990 yılları arasında bizmut tellürid yerine kurşun tellürid (PbTe), silisyum-germanyum (SiGe) gibi birçok farklı yarı iletkenlerle çalışmalar yapılarak, TES'ler elde edilmiştir. Elde edilen yarı iletkenlerde maksimum $ZT \approx 1$ değerine sahipti ve ZT 'yi arttırmadaki başarı istenilen seviye değildi (Zhao ve Tan 2014). 1990 yılının ortasından itibaren yapılan çalışmalarda, nanokatlı TE malzemelerle ZT değerinin büyük oranlarda arttırılabileceği ortaya konmuştur. Günümüzde yapılan bilimsel çalışmalarla literatürde en yüksek $ZT = 3$ değeri elde edilmiştir (Harman ve diğ. 2005). Literatürdeki farklı kaynaklardan bir araya getirilerek elde edilen en iyi ZT değerlerine sahip TE malzemeler Tablo 2.4'de gösterilmiştir. Günümüzde en iyi ticari TE malzemenin ZT değeri 1 civarındadır ve bu değere sahip TES'lerin, Carnot verimliliğinin sadece %10'unda çalıştığı tahmin edilmektedir. $ZT = 4$ değerine sahip bir TES cihazıyla, Carnot verimliliğinin yaklaşık %30'una ulaşılabilir. Bu değer günümüzdeki evlerimizde kullanılan soğutma sistemlerinin COP değeridir. Ancak $ZT = 4$ yükseltmek oldukça çetin zorlukların üstesinden gelmekle mümkün olabilir (DiSalvo 1999). Günümüzde, TES'leri içerisinde bulunduran birçok uygulama ve sektör bulunmaktadır. Bu uygulamalar ve sektörler; termoelektrik buzdolapları uygulamaları, otomobil endüstrisinde soğutma-ısıtma uygulamaları, elektronik cihazlarda soğutma uygulamaları ve termoelektrik iklimlendirme uygulamaları olarak 4 kategori altında toplanabilmektedir (Zhao ve Tan 2014).

Tablo 2.4: Yüksek ZT değerine sahip TE malzemeler (Zhao ve Tan 2014)

Malzeme	Tipi	ZT değeri	Sıcaklık	Yazar
Bi-katkılı PbSeTe/PbTe(QDSL)	n tipi	3	550 K	Harman ve diğ. 2005
In_{0.2}Ce_{0.15}Co₄Sb₁₂ Skutterudite	n tipi	1,43	800 K	Li ve diğ. 2009
Pb_{0.25}Sn_{0.25}Ge_{0.5}Te	p tipi	~0,95	670 K	Rosenberg ve diğ. 2012
(Bi_{0.25}Sb_{0.75})₂Te₃	p tipi	1,27	298 K	Yamashita ve diğ. 2009
Bi₂(Te_{0.94}Se_{0.06})₃	n tipi	1,25	298 K	Yamashita ve diğ. 2009
K_{0.95}Pb₂₀Sb_{1.2}Te₂₂	n tipi	~1,6	750 K	Pierre ve diğ. 2010
PbTe-SrTe	p tipi	1,7	~800 K	Biswas ve diğ. 2011
İkili kristal In₄Se_{3-δ}	n tipi	1,48	~705 K	Rhyee ve diğ. 2009
AgPb_mSbTe_{2+m}	n tipi	~2,2	800 K	Hsu ve diğ. 2004

2.4.3 Medikal uygulamalarla ilgili yapılan çalışmalar

Ticari termoelektrik cihazlar 1950'lerden beri mevcut olmasına rağmen, biyomedikal uygulamalarda termoelektrik cihazların kullanılması sınırlı kalmıştır. Canlıların vücut fonksiyonlarının daha iyi anlaşılması ve araştırılması için biyomedikal alandaki hızlanan çalışmalar ve termoelektrik alanında yaşanan son gelişmelerden sonra termoelektrik cihazlar gelişmiş ve tıbbi cihazların ihtiyaçlarını karşılamaya başlamıştır. Termoelektrik cihazlar ilk olarak DNA ısı döngüleyicileri, ilaç soğutma poşetleri ve medikal görüntüleme cihazları gibi ufak uygulamalarda ısıtma-soğutma amaçlı kullanılmıştır (Chen 2011). Enerjinin her geçen gün değerlendirildiği günümüzde, yaşanan teknolojik gelişmelere bağlı olarak, bütün cihazların daha kompakt olacak şekilde boyutlarının küçülmesi hedeflenmektedir. Bu şekilde cihazlar daha az bir güç tüketimine ihtiyaç duyarak görevini yapabilecektir. Bu noktada TE sistemler, medikal uygulamalar için çok önemli hale gelmektedir. Medikal uygulamalarda kullanılan TE sistemler, soğutma-ısıtma medikal uygulamaları ve kendi gücünü canlı vücudunun vücut sıcaklığıyla çevre koşulunun arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak sağlayan biyomedikal uygulamalar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Kendi gücünü kendi sağlayan biyomedikal uygulamalarda kendi içerisinde; vücut içerisine yerleştirilebilen uygulamalar ve

giyilebilir uygulamalar olarak ikiye ayrılmaktadır (Chen 2011). Bu tez kapsamında termoelektrikli bebek kuvözü geliştirildiği için TE sistemlerin sağlık sektöründeki soğutma-ısıtma uygulamalarının bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

2.4.3.1 TE sistemlerin medikal uygulamalardaki soğutma-ısıtma uygulamaları

Termoelektrik soğutma-ısıtma, katı hal bir ısı pompası gibi davranan Peltier etki ile gerçekleşir. Bu cihazlar, uygulanan akımın yönüne bağlı olarak ısıyı bir yüzeyden diğer yüzeye transfer ederler. TE sistemlerin maliyetleri yüksek ve verimleri düşük olmasına rağmen hareketli bir parça olmadan hızlı bir şekilde soğutma-ısıtma yapabilmeleri ve kolay bir şekilde tersine çevirebilmeleri sayesinde bazı özel medikal uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadırlar. Günümüzde termoelektrik cihazların en yaygın biyomedikal kullanım alanlarından biri, DNA'nın hızlı ısıtılması ve soğutulması için polimeraz zincir reaksiyonunun (polymerase chain reaction, PCR) termal çevrimlerinde ortaya çıkmaktadır. 1983 yılında Kary Mullis tarafından geliştirilen ve 1993 yılında kimya alanında Nobel ödülü almasına sağlayan bu yöntem, DNA moleküllerinin kopyalanmasında kullanılmaktadır. DNA moleküllerini PCR kullanarak çoğaltma işlemi, 94 °C'de denatürasyon, 54 °C'de tavlama ve 72 °C'de uzatma (büyütme) olacak şekilde üç ayrı noktada DNA'nın termal olarak tedavi edilmesiyle gerçekleşir (Sambrook ve Russell 2001, Chen 2011). Tabii ki bu reaksiyonlar için gereken termal döngü süresini hızlandırması, tersine çevrilebilmesi, hızlı yanıt vermesi gibi avantajlarından dolayı TES'ler PCR sistemi için en ideal olmaktadır.

PCR'nin yanı sıra termoelektrik soğutma, tedavi edici tıbbi uygulamalarda kullanılmaktadır. En tanınmış termoelektrik cihaz üreticilerinden biri olan Gentherm Anonim şirketi (Gentherm Incorporated) kanserli hastaların termoregülasyonu (ısı düzenleme) için termoelektrik cihazların kullanımını araştırmıştır. Kemoterapi alan kanser hastaları, beyaz kan hücresi sayısının azalmasına (nötkopeni), enfeksiyonlara ve kırmızı kan hücre sayısının azalmasına (anemi) karşı duyarlıdır. Bu yan etkiler, hastayı soğuk hissi vererek ısı duyarlılığına yol açabilmektedir (Kowal ve Bertino 1979). Bu yüzden Gentherm&Mattress firmaları hastalara bu yan etkilere karşı koyması için TE sistemle çalışan "YuMe" isimli sıcaklık kontrollü yatağı geliştirmiştir (Chen 2011). YuMe aynı zamanda insanların rahat bir şekilde uyku uyuyabilmesi ve uyku problemlerini en aza indirilmesi için ticari olarak da kullanılmıştır. Bu yatak 16-42 °C aralığında çalışabilen ve çift taraflı olarak ayrı ayrı kontrol edilebilen iki

parçadan oluşmaktadır. Cihaz en yüksek performansta bile sadece iki tane gece lambasının harcadığı enerji olan 220 W enerji tüketmektedir (Gentherm Incorporated 2010).

Uygun sıcaklık etkileriyle, insan ve canlılarda bulunan birçok hastalığın tedavi edilebildiği, tıbbi uygulamalarda bilinmektedir. Bu doğrultuda Yavuz ve diğ. (2013) yaralanma, ateş, travma, vb. gibi durumlarda vücut sıcaklığını dengelemek için istenilen bölgeye soğuk ve sıcak tedavi uygulayabilen TE modülle çalışan bilgisayar kontrollü bir cihaz tasarlamışlardır. Literatüre göre soğuk ve sıcak tedavi cihazlarında istenilen sıcaklık değerleri; soğutma için 0-15 °C, ısıtma için 40-45 °C arasında değişmektedir. Geliştirilen cihazda soğuk ve sıcak tedavi, kullanıcının isteğine göre TE sistemi besleyen akım yönünün ve büyüklüğünün değiştirilmesiyle, istenilen sıcaklık çok hızlı bir şekilde oluşturularak yapılabilmektedir. Tedavi ünitesinde 40 × 40 × 3,8 mm³ boyutlarında TEC1-12706 termoelektrik modül kullanılmıştır. Bütün testlerde çevre sıcaklığı 37 °C olarak sabit alınarak, farklı akım, voltaj ve su debi değerlerine göre ünitenin soğutma-ısıtma performansı belirlenmiştir. Ünite bilgisayar kontrollü olarak TE modülün voltajını 0-12 V arasında değiştirerek, soğutma için 0 °C ve ısıtma için 45 °C kadar istenilen sıcaklığı ayarlayabilmektedir. Sistemin sıcak yüzeyinden atılan ısı için kullanılan soğutma suyu debisi 500 g/dak olduğunda ünite 0 °C'ye, 9,5 V ve 8,6 A değerinde 81,7 W güç harcayarak ulaşmıştır. Su debisinin hızı 1000 g/dak artırıldığında ise ünite 0 °C'ye, 67,74 W harcayarak ulaşmıştır. Ünite ısıtma amaçlı kullanıldığında 45 °C'ye, 500 g/dak soğutma akış hızında 3,3 W ve 1000 g/dak akış hızında ise 2,94 W güç harcayarak ulaşmıştır. Bu sistem, literatürde belirtilen değerleri karşılayabildiği için farklı nedenlerle yaşanan sağlık problemlerinin tedavisinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Benzer şekilde Anatyckuk ve Kobylyansky (2012) omurga ve omurga sinirlerindeki kök iltihabı masaj tedavisinde TE sistemleri kullanmışlardır. Bu cihaz, doktor tarafından belirlenen sıcaklık değerlerini zamana bağlı olarak kontrol edebilmektedir. Omurgaya bağlı hastalıkların yaklaşık olarak yarısı sinir sistemi hastalığıdır ve bu sinir sistemi hastalıklarının %80'i omurilik hasarı olarak bel merkezli olarak gerçekleşmektedir. Bu hastalıkların tedavisi için ilaç tedavisi, fizik tedavi ve omurgadaki kas-sinir doku arasına periyodik aralıklarla sıcaklık tedavisi bir arada uygulanması gerekmektedir. Geliştirilen bu cihaz, termoelektrik modüle doğrudan besleme akımı kullanan mevcut tıbbi cihazların aksine daha iyi bir tedavi süreci için doktor tarafından belirlenen sıcaklık değişimini zamana bağlı olarak kontrol edebilmekte ve -20 °C ile 50 °C sıcaklık aralığında, sıcaklık değişim hızınının 5-10 K/s ulaşabilecek şekilde çalışabilmektedir. Aynı zamanda bu cihaz menenjit, diğer omurga hastalıkları, sırt travmaları gibi sağlık problemlerinin

sıcaklıkla tedavisinde kullanılabilir. Bununla birlikte, yumuşak doku zedelenmelerinin tedavi edilmesinde hasara uğrayan bölgeye ısıtma ve soğutma yapılarak, tedavi edilebildiği ve bu tedavinin iyileşme süresini kısalttığı tıp biliminde bilinmektedir (McLean 1989). Ancak bu yöntemde, genellikle TE sistemler yerine daha ekonomik olan buz ve ısı torbalarıyla tedavi yapılmaktadır. Buz ve ısı torbaları yerine, özellikle profesyonel sporcu tedavilerinde TE ısıtma-soğutma kullanımı bir fırsat olabilir. Çünkü düşük dereceli doku zedelenmelerinde giyilebilir bir TE ısıtma-soğutma sistemi tasarlanarak, sporcuların aktivitelerine hızlı bir şekilde geri dönmesi sağlanabilir.

TE soğutucular basit, kompakt, gürültüsüz ve taşınabilir oldukları için sıcaklık kontrolünün çok hassas kontrol edilmesi gereken biomedikal ürünlerde (aşı, kan, organ taşınımı, vb.) kullanımı çok elverişlidir. Bu şekilde biyomedikal ürünlerin ilk andan kullanılacağı son ana kadar güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için belli sıcaklıklarda tutulması gerekmektedir. Güler ve Ahiska (2002) özellikle küçük hacimli kutularda taşınması gereken durumlarda, bu ürünlerin buzla soğutulmuş taşıma ve depolama işlemlerinin kontrolsüz ve elverişsiz koşullarda yapıldığını tespit etmişler ve bu şekilde sistemler için TE soğutmanın en avantajlı sistem olabileceğini fark etmişlerdir. Bu yüzden bu sorunun çözümü için dış boyutları 31 x 26 x 26 cm³ ve iç boyutları 15 x 15 x 10 cm³ olan, toplam ağırlığı 8 kg olan mikroişlemci kontrollü taşınabilir termoelektrik tıbbi soğutma kitini tasarlayıp geliştirmişlerdir. Bu sistem, 4 x 4 cm² boyutlarında tek bir TE soğutucu ile kullanıcının isteğine göre ısıtma ve soğutma amaçlı olarak çalıştırılabilir. Özellikle ısıtma, ürünü (aşı, kan, vb.) kullanmadan önce gereklidir. Geliştirilen mikroişlemci kontrol ile medikal kit soğutucu içerisindeki ürünü 0-8 °C arasında istenilen sıcaklıkta tutabilmektedir. Kanın kullanılmadan önce vücut sıcaklığına kadar ısıtılması gerekmektedir. Burada cihaz ısıtıcı moduna alınarak, soğuk kan vücut sıcaklığına (37 °C) kadar ısıtılabilir. Aynı zamanda çevre sıcaklığı, farklı iklim ve coğrafi koşullara göre değişebilmektedir. Güler ve Ahiska bu parametreyi de dikkate alarak, çevre sıcaklığının 25-50 °C arasında değişmesi durumuna göre medikal kiti test etmişlerdir. Yapılan bütün testlerde, kit içerisindeki sıcaklığın 6-10 °C arasında kalabildiğini tespit etmişlerdir. Çevre sıcaklığı 45 °C olması durumunda bile, kitin sıcaklığının 10 °C'ye geçmediği belirlenmiştir. Başka bir TE kan soğutucu tasarımında Wang ve diğ. (2011), ısı transferi analizleriyle bir TE kan soğutucu için optimum kanat uzunluğu 0,598 m ve optimum kanatçık (fin) kalınlığı 0,0025 m olarak bulmuşlar ve kan soğutucu içerisindeki kabin sıcaklığının değişimini, kabin içerisinde yük olma durumuna ve yük olmama durumuna göre deneysel

olarak test etmişlerdir. TE soğutucunun soğuk tarafına kanatçıklar ekleyerek ortamı hızlı bir şekilde soğutmaya çalışmışlar. Sistemin sıcak tarafına ise ısı borusu ekleyerek sıcak taraftan ısıyı atmaya çalışmışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlara göre yük olmama durumunda, çevre sıcaklığının 25 °C olarak sabit kalması koşuluyla, 40 dakika içerisinde kabin sıcaklığının 2 °C'ye kadar düştüğünü ve optimum kanatçık kalınlığının istenilen soğutma performansını sağladığını tespit etmişlerdir. Sistemin yüklü durumdaki davranışlarını ise kabin içerisine yerleştirilen 10 tane deney tüpüyle incelemişlerdir. Yine çevre sıcaklığının 25 °C'de sabit olduğu yüklü durumda, TE soğutucu 2-10 °C değerleri arasında sıcaklığı güvenli bir şekilde sağlamıştır. Bu sonuçlardan kan soğutucu kitleri için, Dünya Sağlık Örgütü'nün istediği sıcaklık aralığını hem yüklü hem de yüksüz durumda TE soğutucunun karşılayabildiği tespit edilmiştir. Ancak çalışmada, çevre sıcaklığının daha yüksek değerlerde olduğu durumlarda, istenilen sıcaklığı sağlayamadığı da belirtilmiştir.

Termoelektrik teknolojisinin kullanıldığı bir başka potansiyel tedavi edici uygulama alanı hipertermi ve hipotermidir. İnsan beyni sıcaklık değişimlerinden çok fazla etkilendiği ve bu değişiklikler kalıcı hasarlara sebep olabileceği için her iki durumda da mutlaka korunması gerekmektedir. Özellikle de insan beyninin merkezi 30-32 °C'ye soğutulduğunda kalbin durduğu durumda bile kansız, oksijensiz ve glikozsuz 45-60 dakika yaşayabilmektedir (Kapıdere 2005, Yavuz 2009). Bu yüzden insan beyninin hızlı bir şekilde kısa bir sürede soğutulması ve soğutulan sıcaklıkta sabit tutulması insan hayatı için çok önem arz etmektedir. Aynı zamanda beynin soğutulması tedavisinden sonra beynin tekrar normal sıcaklığına geri getirilmesi gerekmektedir. Bu da hem soğutma hem de ısıtma yapabilen TE sistemleri ön plana çıkarmaktadır. Kapıdere (2005) çalışmasında beynin hızlı bir şekilde soğutulması için 8 adet sıcaklık algılayıcı ve 120 adet esnek TE modülü birbirine bağlayarak, TE başlık oluşturmuş ve mikrodenetleyici kontrollü olarak termohipotermi tıp cihazını tasarlamıştır. Bu cihazda kullanılan modüllerin çalışma gerilimleri 0,1 V ve maksimum çektiği akım 40 A'dir. Tasarlanan cihazın test sonuçlarıyla, beynin korunmasında TE sistemin çalışabileceği ve istenilen sıcaklıkta sabit olarak tutulabileceği gösterilmiştir. Çok kısa süre sonra Yavuz (2009), bu sistemi 70 esnek TE modülle, 140 W soğutma kapasitesine sahip ve ısıtma hızı kontrollü olarak 0,5 °C/dak'yı aşmayacak şekilde bulanık mantıkla kontrol ederek daha da geliştirmiştir. Bunun yanı sıra yenidoğanların ensefalopati (beyin bozuklukları) tedavisinde ve ani kalp durması sonucu nörolojik koruma gerektiren durumlarda TE sistemler kullanılabilir. Dünya genelinde ani kalp durması sebebiyle yılda 1 milyon kişi kalp krizi geçirmekte ve hastaların

sadece tahmini 150.000'i hayata geri döndürülmektedir. Kalp krizi geçiren hastaların yaklaşık %60'ı hastanede taburcu olmadan vefat etmekte, %28'inde kalıcı beyin hasarları meydana gelmekte ve %12'si tamamen iyileşmektedir. Dünyanın önde gelen International Liaison Committee on Resuscitation (ILCOR), American Heart Assosiasitin (AHA), European Resuscitation Council (ERC) gibi kuruluşlar, hayata geri döndürülenlerin tamamen iyileşme oranını yükseltmek için kalp krizi geçiren hastaların 32-34 °C arasında 12-24 saat soğutulması gerektiğini önermektedirler (Yavuz 2009).

Hipotermik hidrasyon doku nakli, yapay ortamda (in vitro) hücrelerin depolanması ve nakledilmesi esnasında hücre dokularının metabolik faaliyetlerinin azaltılarak, dokuların canlı bir şekilde nakledilmesini sağlamaktadır. Hipotermik koşullar altında yapay ortamdaki çoğu hücre dokusu, hücrelere ve dokulara zarar veren serbest radikallerin üretimini geciktirerek, dokuların düşük metabolizma faaliyetlerinde kalmasını sağlar. Seo (2015) yaptığı analizler sonucunda 4 °C'de, sürekli olarak hipotermik şartlar sağlanması halinde, yapay ortamdaki test hücrelerinin hayatta kalma oranlarının arttığını tespit etmiştir. Klasik soğutma sistemlerinde sıcaklığın sürekli olarak sabit tutulamaması, cihazların büyük ve gürültülü olması sebebiyle bazı problemlere neden olmaktadır. Seo, bu sorunların önüne geçebilmek için, TE sistem ile çalışan bir hipotermik hidrasyon doku nakil depolama sistemi (Medical Chilling Device, MCD) tasarlamıştır. Tasarladığı sistemde saç kökü naklini depolamayı ve nakletmeyi seçerek, sistemi test etmiştir. Soğutma sistemi, nakledilecek dokunun 4 °C'de hipotermik koşullarda bir soğutma sıvısıyla soğutulan solüsyon içinde depolandığı birinci bölüm (MCD 1), daha sonra dokunun nakledileceği zaman yerleştirildiği ve TE sistemle soğutularak 4 °C'de tutularak dokunun minimum seviyede metabolik faaliyetlerinin başladığı soğuk halkadan (cryo-ring) oluşan ikinci bölümden oluşmaktadır. Ayrıca sıcaklığı 4 °C'de hassas olarak tutmak için TE sistemin sıcak tarafından oluşan ısının efektif bir şekilde uzaklaştırılmasına sağlayan 8 çift ısı borusundan oluşan üçüncü bölüm olmak üzere, cihaz toplamda 3 parçadan oluşmaktadır. Yapılan analitik ve Fluent simülasyon analizleri sonucunda, TE sistemin hedef sıcaklığı olan 4 °C'ye yaklaşık 10 saniyede ulaştığı belirlenmiştir. Söz konusu olan cihaz, simülasyonda belirlenen değerlere göre üretilmiştir. Çevre sıcaklığının soğutma performansına etkisi, 4 farklı oda sıcaklığında (10, 15, 20 ve 25 °C) MCD 1 ve TE içeren cryo-ring soğutma sıcaklıklarındaki değişimlerine bağlı olarak incelenmiştir.

3. KUVÖZÜN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ

Genellikle prematüre bebekler termoregülasyon sistemleri tam gelişmeden dünyaya gözlerini açtıkları için vücut sıcaklıklarını koruyamazlar. Bu, ısı üretimi sağlayan mekanizmaların hala gelişmekte olduklarını ve yaşamsal faaliyetlerini gerçekleştirebilmek için yetersiz enerji kaynaklarına sahip oldukları anlamına gelmektedir. Bu yüzden, prematüre bebeklerin ihtiyaç duyduğu ortamları sağlayabilecek sistemlerin geliştirilmesi çok önemlidir (Zermani ve diğ. 2014). Vücut sıcaklığı temel olarak; çevre ortamıyla iletim, taşınım, ışıınım ve buharlaşma ısı transferleri yolları kullanılarak değiştirilir (Yigit 1998). Vücudun temel ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için, vücut içerisinde kullanılan enerjiler (kimyasal tepkimeler) sonucunda metabolizma ısı (metabolik ısı) üretilir. Üretilen bu metabolik ısı, dokuların içerisinde hem iletimle hem de kan akışıyla taşınım ile cilt yüzeyine ve aynı zamanda solunum yoluyla genelde daha serin çevre ortamına transfer olur (Ferreira ve Yanagihara 2009, Wrobel ve diğ. 2010). Normal doğan bebekler, vücut içerisinde ürettikleri metabolik ısıyla çevreye olan ısı kayıplarını dengeleyerek, dünya şartlarına çok kısa bir sürede adapte olurlar. Ancak prematüre bebekler bazı organları tam gelişmeden doğdukları için bu dengeyi sağlayamazlar. Bu bebeklerin bu dengeyi sağlayabilmeleri için doğum ağırlığı ve gestasyonel yaşına bağlı olarak belirlenen nötral ortam şartlarında belli bir süre tutulması gerekmektedir (bkz. Tablo 2.1). Nötral ortam şartları pratikte iki temel cihaz olan kuvöz ve radyant ısıtıcı ile sağlanmaktadır. Radyant ısıtıcılar kızılötesi ışınım ile bebeğin vücut sıcaklığını kontrol ederler. Kuvözler ise nemlendirilmiş ve ısıtılmış sıcak havayla bebeğin etrafını homojen bir şekilde sararak, bu işlemi gerçekleştirirler. Bu bölümde, termoelektrikli bebek kuvöz sistemi için, temeli ısı ve kütle korunum yasalarına dayanan bir matematiksel modelleme gerçekleştirilmiştir.

3.1 Termoelektrikli Prematüre Bebek Kuvöz Sisteminin Matematiksel Modellemesi

Bir kuvöz sistemi, temel olarak bir bebek ve bebeğin ihtiyaçları doğrultusunda gerekli olan ortamı sağlayan kuvöz cihazından oluşmaktadır. Geliştirilen matematiksel modelleme, probleme uygun mantıklı kabuller ışığında bebek, kuvöz cihazını oluşturan parçalar ve çevre arasındaki ısı ve kütle alışverişi ilişkilerini incelemektedir. Matematiksel modellemeyi

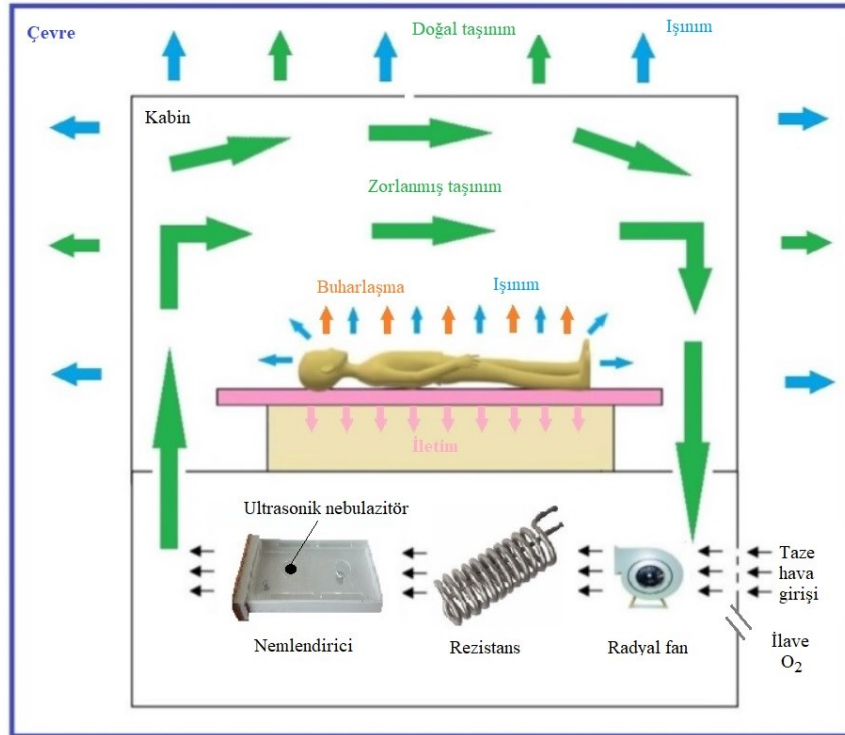
Modellemede kullanılan kuvöz Ankara’da bulunan Pulcuoğlu Medikal firmasından temin edilmiştir. Temin edilen kuvöz AMS Amenity XP marka olup, 2006 yılında üretilmiştir. Kuvöz mikro işlemci ile kontrol edilmekte olup, bir fan vasıtasıyla dışarıdan filtrelenerek alınan taze hava ve bazı özel durumlarda gerekli olan ilave O₂, bir dirençli ısıtıcı (rezistans) üzerinden geçirilerek ısıtılmaktadır. Isıtılan hava, içerisinde su bulunan hazneye yerleştirilen bir ultrasonik nebulizatör cihazıyla nemlendirilmektedir. Bebeğin ihtiyacına göre ısıtılan ve nemlendirilen hava, kabin hacmi içerisine gönderilerek, bebeğin rahat ettiği anne karnındaki benzer ortam yapay olarak oluşturulmaktadır. Kabin içerisinde dolaştırılan hava bir açıklıktan emilerek, bir miktar taze havayla ve varsa ilave O₂ karıştırıldıktan sonra, tekrar ısıtıcı üzerinden geçirilerek kesintisiz bir şekilde hava dolaşımı sağlanmaktadır. Kuvözde iki tane ölçüm modu (hava sıcaklığı ölçüm modu ve cilt sıcaklığı ölçüm modu) bulunmaktadır. Kullanıcının tercihine göre mod seçilmekte ve kontrol paneline girilen değere göre istenilen modda istenilen sıcaklık, mikroişlemcinin rezistansı otomatik kontrolle (oransal + integral kontrol, PI) açıp kapamasıyla ayarlanmaktadır. Kabin saydam pleksiglas malzemedan yapılmıştır ve toplam 6 tane müdahale kapısı bulunan tek cidarlı kabin duvarlarından oluşmaktadır. Kabin bölümünde bebeği yatarken tartabilecek bir tartı, bebeği rahatsız etmeden röntgen filminin çekilebileceği bir kızak düzeneği ve bebeğin yatma konumunun açısını değiştiren mekanik düzenekler bulunmaktadır. Bebeğin kilosunu ölçen tartı ve gerekli durumlarda O₂ ihtiyacını sağlayan sensörler kuvöz üzerinde bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada kullanılan kuvöz, daha çok akademik çalışmalarda kullanıldığı için deaktif edilmiştir. Cihazın rezistansı maksimum güçte 368 W ve sistemin nemlendirilmesini sağlayan nebulizatör ile kuvöz içerisindeki hava sirkülasyonunu sağlayan radyal fan 32 W güç harcadığından dolayı kuvöz maksimum durumda toplam 400 W elektriksel güç harcamaktadır. Ayrıca rezistansa verilen güç, 20 kademeli LED gösterge ekran ile takip edilebilmektedir (AMS Amenity XP 2005). Bahsedilen kuvöz Şekil 3.2 (a)’da ve kuvözün çalışma prensibi ise detaylı bir şekilde şematik olarak Şekil 3.2 (b)’de gösterilmiştir.

AMS Amenity kuvözün kullanım kılavuzunda normal çalışma için gerekli çevre koşulları, sıcaklık 20-30 °C, basınç 86-106 kPa, bağıl nem %50±5, hava hızı 6-8 m/dk olarak belirtilmiştir. Kabin bölümünde, istenilen sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde ayarlanan hava, bebeğin etrafına homojen bir şekilde dağılarak kapalı bir devrede çalışan kontrollü iç atmosferle sağlanmaktadır. Kabin içerisinde bebek tarafından üretilen CO₂ birikimini önlemek için mikrofiltrelenmiş taze hava ile ortam sürekli olarak yenilenmektedir. AMS Amenity XP kuvözü, hava sıcaklığı ölçüm modunda çalıştırıldığında ± 0,25 °C hassasiyetle ve cilt sıcaklığı

ölçüm modunda çalıştırıldığında ise $\pm 0,1$ °C hassasiyetle istenilen hedefi sağlayabileceği belirtilmiştir (AMS Amenity XP 2005). AMS Amenity XP marka kuvözün diğer teknik özellikleri Tablo 3.1’de detaylı olarak verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.2: (a) AMS Amenity XP kuvözü (b) AMS Amenity XP kuvözünün çalışma prensibi

Tablo 3.1: AMS Amenity XP marka kuvözün teknik özellikleri (AMS Amenity XP 2005)

Hava sıcaklığı kontrol aralığı	25-37 °C (ek ısı düğmesiyle 39 °C kadar)
Cilt sıcaklığı kontrol aralığı	34-37 °C (ek ısı düğmesiyle 38 °C kadar)
Havanın şilte üzerindeki akış hızı	≤ 0,2 m/s
Ortamın sıcaklık dalgalanması	± 0,5 °C
Hava sıcaklığının istenilen değere sağlamama hassasiyeti	± 0,25 °C
Cilt sıcaklığının istenilen değere sağlamama hassasiyeti	± 0,1 °C
Kabin içi sıcaklık eş dağılımı	± 0,4 °C
İç gürültü seviyesi	< 60 dBA
Isınma (warm-up) süresi	≤ 45 dakika
Bağıl nem (RH) oranı	%30-90
Kabin içi ayarlanabilir oksijen giriş oranı	%21-80
Azami CO₂ konsantrasyonu	<%4 (EN 60601-2-19, madde 105 Test)
Kabin ölçüleri	89 cm x 45 cm x 49,5 cm
Şilte ölçüleri	60 cm x 31,5 cm
Dış boyutlar	110 cm x 60 cm x 137 cm
Alarm sistemi	Işıklı ve sesli
Alarm sisteminin çalışma halleri	Her türlü enerji kesildiğinde, kabin içi sıcaklığın 1,5 °C yükseldiğinde/düştüğünde, bebeğin cilt sıcaklığının 0,8 °C yükseldiğinde/düştüğünde
Alarm kapanma süresi	15 dakika
Sistemin besleme ünitesi	NiMH- 4,8V-320mAh – GPMoDelT117
Isıtıcı	Aralık %0-100 (20 aşamada)
Güç tüketimi	400 W (Azami)

Kuvöz kabının içindeki hava sirkülasyonu için kabin iç hacmi bebeğin nefes hacmine oranla çok büyüktür. Bu nedenle kabin içerisindeki havanın oksijen ve azot içeriğinin (%21 O₂ ve %79 N₂) çok değişmediği düşünülebilir (Al-Taweel 2006). Ancak her ihtimale karşı kabin içerisindeki O₂ konsantrasyonu daima bir oksijen analizörüyle ölçülerek uzman doktorlar tarafından önerilen değerlerde olup olmadığı kaydedilmelidir. Çünkü herhangi bir nedenden dolayı oksijen eksikliğinde, bebek yaşamsal faaliyetleri için ihtiyacı olan oksijeni alamayabilir. Tam tersi durumda oksijen konsantrasyonunun fazlalığı ise bütün malzemelerin yanabilirliğini kayda değer oranda artırır. Aynı şekilde fazla miktarda oksijen, bebekte körlük, beyin hasarı, ölümün yanı sıra her bebeğe göre farklı olumsuz sonuçlar ortaya çıkarabilir (AMS Amenity XP 2005). Bu yüzden kuvözlerde oksijen seviyesi sürekli olarak ölçülerek, takip edilmelidir.

3.1.1 Bebeğin modellenmesi

Literatürde, bebeğe ait birçok matematiksel modelleme mevcuttur. Ancak bu modellerden iki tanesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modellerin birinde, bebek merkezde bir çekirdek, çekirdeğin etrafında kan dolaşım sistemi ve en üstte deri olacak şekilde uzaysal bir yığın kütle olarak modellenmiştir (Simon ve diğ. 1994). Bu modelde, kabin dikdörtgen şeklinde ve tek cidarlı kabin duvarlarından oluşmaktadır. Bebek kuvözü sistemi, bebeğin çekirdek sıcaklığı, bebeğin cilt sıcaklığı, kabin içerisindeki hava sıcaklığı, kabin duvarları ve yatak olacak şekilde 5 ayrı homojen bölmeye ayrılarak, matematiksel ifadeler elde edilmiştir. Diğerinde ise bebek baş, gövde, üst uzuvlar (eller) ve alt uzuvlar (ayaklar) olmak üzere toplam 4 bölüme ayrılmıştır. Bebeğin baş kısmı küre, diğer bölümler silindir olarak düşünülmüştür. Her bir bölüm çekirdek, kas ve deri tabakalarından oluşmaktadır. Bitişik tabakalar (dokular) arasında ısı akışı iletimle gerçekleşmekte ve tüm tabakalarda merkezi bir kan akışı vasıtasıyla taşınımıyla ısı alışverişi olacak şekilde modellenmiştir (Rojas ve diğ. 1996). Aslında bu modelleme, ilk olarak Stolwijk (1970) tarafından önerilen ve 25 bölümden oluşan matematiksel modelin, Rojas ve diğ. (1996) tarafından 11 bölüme indirilerek, daha basitleştirilmiş modelidir. Rojas ve diğ. (1996) geliştirdikleri modellemede, bebeği bölümlere ayırarak bölümler arasında olabilecek sıcaklık farklarını ve sıcaklık farklarına bağlı olarak ısı üretimi ve kayıplarını dikkate aldıkları görülmektedir. Her şeye rağmen iki model de bebeğin matematiksel olarak modellemesinde kullanılabilir. Zaten her iki teknikte de bebeğin içerisindeki ısı değişim işlemlerini tanımlarken benzer tekniği ve benzer matematiksel eşitlikleri kullanmaktadır. Bu tez çalışmasında, daha basit olan Simon ve diğ.'nin (1994) bebek matematiksel modellemesi kullanılmıştır ve bebek ve kuvöz modellemesi için kullanılan matematiksel ifadeler, aşağıdaki varsayımlar kabul edilerek elde edilmiştir.

- 1) Kuvöz ve yatak arasında olan iletimle ısı transferi ihmal edilmiştir ($\dot{Q}_{yki} \cong 0$).
- 2) Kuvöz sistemi içerisindeki her bir parçanın malzemesi homojen özelliklere sahiptir.
- 3) Kuvöz içerisinde tüm hava akışı düzenli (üniform) olarak kabul edilmiştir.
- 4) Bebeğin kendi kendine termoregülasyonu için gerekli olan metabolizma hızı, aynı zamanda bebek dinlenme esnasındaki dinlenme metabolizma hızına eşittir.
- 5) Modellemeyi basitleştirmek adına bebek, siyah renkli bir silindir olarak düşünülmüştür.

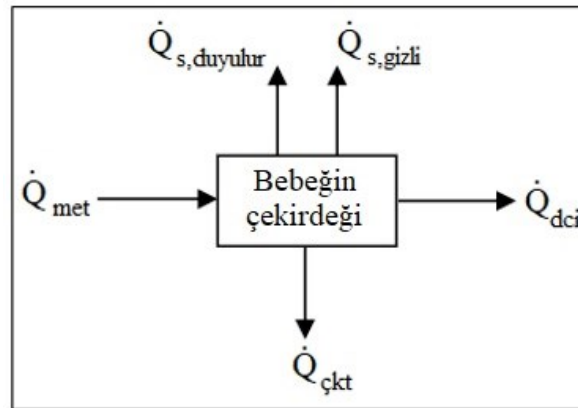
- 6) Prematüre bebek sağlıklıdır ve yaşamsal faaliyetlerini devam ettirebilmesi için herhangi bir resüsitasyon cihazına ihtiyaç duymamaktadır.
- 7) Bebeğin kendi vücut sıcaklığını korumak için doğal mekanizmaları olan terleme ve titreme gibi termoregülasyon sistemleri modele dahil edilmemiştir.
- 8) Yatağı oluşturan sünger, bez ve diğer parçalar tek bir malzeme olarak kabul edilmiştir.
- 9) Kuvöz çevre sıcaklığı ayarlanabilen bir ortama yerleştirilmiştir ve yerleştirilen ortamda hava hızları çok düşüktür. Bu yüzden çevre ortamında sadece doğal taşınımın etkili olduğu kabul edilmiştir.

Yukarıdaki kabuller ışığında, her bir parça için Termodinamiğin Birinci Kanunu'na göre enerji korunumu ifadesi birim zaman için yazılırsa; Denklem (3.1) elde edilir. Modelleme de bebek tarafından üretilen metabolizma ısısı, giren ısı terimi olarak hesaba katılmıştır.

$$(\dot{Q}_{giren} - \dot{Q}_{çıkan}) \cdot dt = \text{Isıl depolama miktarı} \quad (3.1)$$

3.1.1.1 Bebeğin çekirdek (core) tabakasının modellenmesi

Bebeğin çekirdek (core) tabakası uzaysal bir yığın (kütle) olarak modellenmiştir. Şekil 3.3'te, bebeğin çekirdek tabakasında meydana gelen ısı transferleri blok diyagramıyla gösterilmiştir. Burada metabolizma ısısı üretim hızı (\dot{Q}_{met}), çekirdekten kan ile taşınım ile olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{çkt}$), bitişik tabakalar (dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{dci}), solunumdan dolayı oluşan ısı transfer hızları ($\dot{Q}_{s,duyulur} + \dot{Q}_{s,gizli}$) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3: Bebeğin çekirdek tabakasında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

Denklem (3.1)'e göre bebeğin çekirdek tabakasının birim zaman için enerji korunum ifadesi yazılırsa Denklem (3.2) elde edilir. Bebeğin çekirdek tabakasının anlık sıcaklığı Denklem (3.3) olarak yazılabilir. Burada, $m_{\dot{c}}$: bebeğin çekirdek kütlesi (kg), $c_{p_{\dot{c}}}$: bebek çekirdeğin özgül ısısı (J/kg.°C) ve $T_{\dot{c}s}$: bebeğin çekirdek sıcaklığıdır (°C) (Al-Taweel 2006).

$$[\dot{Q}_{met} - \dot{Q}_{\dot{c}kt} - \dot{Q}_{dci} - \dot{Q}_{s,duyulur} - \dot{Q}_{s,gizli}] \cdot dt = m_{\dot{c}} \cdot c_{p_{\dot{c}}} \cdot dT_{\dot{c}s} \quad (3.2)$$

$$\frac{dT_{\dot{c}s}}{dt} = \frac{[\dot{Q}_{met} - \dot{Q}_{\dot{c}kt} - \dot{Q}_{dci} - \dot{Q}_{s,duyulur} - \dot{Q}_{s,gizli}]}{m_{\dot{c}} \cdot c_{p_{\dot{c}}}} \quad (3.3)$$

Bebeğin çekirdek tabakasında ısı kazanımı olarak, sadece metabolizma ısısı üretim hızı (\dot{Q}_{met}) bulunmaktadır ve büyüklüğü basitçe Denklem (3.4) ile hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Q}_{met} = M_{dmh} \cdot S_{bya} \quad (3.4)$$

(3.4) ifadesinde, M_{dmh} : 1 haftalık bebeğin nötral ortam şartlarındaki dinlenme metabolizma hızı (W/m²) ve S_{bya} : bebeğin yüzey alanı (m²) olarak tanımlanmaktadır. Bebeklerde metabolizma ısısı üretim hızı hesaplanırken, dinlenme metabolizma hızını dikkate alarak hesaplamalar yapılmalıdır. Çünkü bebek doğumdan sonra genellikle uyumaktadır ve temel yaşamsal işlevleri olan nefes alma, kan dolaşımı ve basit beyin işlevleri gibi durumlar için sadece enerji harcamaktadır. Aynı zamanda dinlenme metabolizma hızının karşıtı olan basal metabolizma hızı, bir sonraki gün akşam yemeğinden sonra aç karnına ölçülerek belirlenir. Bu durumda basal metabolizma hızının belirlenmesi, yenidoğan bebekler için uygun olmamaktadır. Literatürdeki çalışmalardan elde edilen verilere göre, tahmini olarak $M_{dmh} = 24,80$ W/m² sabit bir değer alınabilir (Wheldon ve Rutter 1982, Sauer ve diğ. 1984, Al-Taawel 2006). S_{bya} ise bebeğin kütlesinin bir fonksiyonu olarak ampirik bir formülasyonla belirlenebilir (Denklem (3.5)). Bu ifadedeki m_b : bebeğin kütlesidir (kg) (Al-Taweel 2006).

$$S_{bya} = \frac{m_b^{0,75}}{10,80} \quad (3.5)$$

Bebeğin çekirdek tabakasından, çekirdekten kan ile taşınımıyla olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{\dot{c}kt}$), bitişik tabakalar (dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{dci}) ve solunumdan dolayı oluşan ısı transfer hızları ($\dot{Q}_{s,duyulur} + \dot{Q}_{s,gizli}$) şeklinde ısı kayıpları mevcuttur. Bebeğin her bir solunumu esnasında, vücut çekirdek sıcaklığına göre nispeten daha soğuk olan hava akciğerlere girer ve bir süre sonra solunum gerçekleşerek, hava dışarı verildiğinde bir miktar

ısınır. Buna solunum duyulur ısı ($\dot{Q}_{s,duyulur}$) denir. Ayrıca canlı akciğerleri nemli bir ortamda bulunmaktadır. İçeri giren hava akciğerlerin nemli ortamından geçerken bol miktarda su buharı ile yüklenir ve giren havanın içindeki mutlak nem miktarı artar. Bu nemli hava solunumla dışarı verildiğinde, atmosfer havası ile aralarında su buharı basıncı farkı oluşur. Bundan dolayı su buharı yoğunlaşır. Buna da solunum gizli ısı ($\dot{Q}_{s,gizli}$) denir. Solunum hızı ve tidal hacim bakımından, solunum yoluyla oluşan kayıplar (3.6) ve (3.7) denklemleriyle belirlenir (Simon 1991, Simon ve diğ. 1994).

$$\dot{Q}_{s,duyulur} = rr \cdot c_{p_h} \cdot v_t \cdot \rho_h \cdot (T_{sh\check{c}} - T_{shg}) \quad (3.6)$$

$$\dot{Q}_{s,gizli} = h_{fg} \cdot rr \cdot \rho_h \cdot v_t \cdot (W_{sh\check{c}} - W_{shg}) \quad (3.7)$$

Bu ifadelerde, rr : bebeğin solunum hızı (s^{-1}), c_{p_h} : havanın özgül ısı (J/kg.°C), v_t : bebeğin tidal hacmi (ml), ρ_h : havanın yoğunluğu (kg/ml), $T_{sh\check{c}}$: solunan havanın çıkış sıcaklığı (°C), T_{shg} : solunan havanın giriş sıcaklığı (°C), h_{fg} : suyun 35 °C'deki gizli ısı değeri (J/kg), $W_{sh\check{c}}$: solunan havanın çıkış mutlak nemi (kg su baharı/ kg kuru hava) ve son olarak W_{shg} : solunan havanın giriş mutlak nemi (kg su baharı/ kg kuru hava) olarak tanımlanmaktadır (Al-Taweel 2006). (3.6) ve (3.7) denklemleri Simon (1991) ve Simon ve diğ. (1994) tarafından geliştirilmiştir. Bu ifadelerdeki bebeğin solunum hızını (rr) ve tidal hacmini (v_t) her bir bebek için belirlemek zordur. Bu yüzden bu denklemler 200 ml/kg bebek kütesinden esinlenilmiş dakika hacmi (inspired minute volume, IMV) açısından revize edilmiştir (Ultman 1987, Al-Taweel 2006). Bu değer, bebeğin kg başına bir dakika içinde soluk alma ve soluk verme işlemi sonucundaki toplam havanın hacmini temsil etmektedir. Eğer esinlenilmiş dakika hacmi saniye olarak yazılırsa, bebek kütesinin esinlenilmiş saniye hacmi (esinlenilmiş hava hacmi, EHH) elde edilir ve değeri 3,333 ml/kg.s eşit olur. (3.6) ve (3.7) denklemleri, esinlenilmiş hava hacmi (EHH) ve bebeğin kütesi (m_b) türünden yazılırsa (3.8) ve (3.9) ifadeleri elde edilir. Solunan havanın giriş sıcaklığı (T_{shg}), kabin ortamında bulunan havanın sıcaklığına (T_{hs}) ve solunan havanın çıkış sıcaklığı ($T_{sh\check{c}}$) ise bebeğin çekirdek sıcaklığına ($T_{\check{c}s}$) eşit alınabilir (Al-Taweel 2006).

$$\dot{Q}_{s,duyulur} = EHH \cdot m_b \cdot c_{p_h} \cdot \rho_h \cdot (T_{\check{c}s} - T_{hs}) \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{s,gizli} = EHH \cdot m_b \cdot h_{fg} \cdot \rho_h \cdot (W_{sh\check{c}} - W_{shg}) \quad (3.9)$$

Solumak için alınan havanın mutlak nemi (W_{shg}) ve solunduktan sonra verilen havanın mutlak nemi ($W_{shç}$) sırasıyla, Denklem (3.10) ve (3.11) ile hesaplanabilir. Bu ifadelerde, $P_{su\ buharı}$: su buharının kısmi basıncı (kPa) ve P_t : atmosfer basıncıdır (kPa).

$$W_{shç} = 0,622 \cdot \frac{P_{su\ buharı}}{P_t - P_{su\ buharı}} \quad (3.10)$$

$$W_{shg} = 0,622 \cdot \frac{P_{su\ buharı}}{P_t - P_{su\ buharı}} \quad (3.11)$$

$T_{shç}$ ve T_{shg} sıcaklıklarındaki havanın su buharı kısmi basınçları Denklem (3.12) ile elde edilir. Burada, P_{doyma} : aranan sıcaklıkta suyun doyma basıncı (kPa) ve φ : bağıl nem değeridir (%). P_{doyma} basıncı ısı transferi kitaplarından veya 0,01-60 °C aralığındaki bir sıcaklık değeri için (3.13) formülasyonu ile bulunabilir. Bu formülasyondaki T_{hs} , kabin içerisindeki havanın sıcaklığıdır (°C) (Çengel 2010).

$$P_{su\ buharı} = P_{doyma} \cdot \varphi \quad (3.12)$$

$$P_{doyma} = 0,133 \cdot (2,234 \cdot T_{hs} - 18,104) \quad (3.13)$$

Bitişik tabakalar (dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{dci}) Denklem (3.14) ile hesaplanır. Bu ifadeye, $T_{çs}$: bebeğin çekirdek sıcaklığı (°C), T_{cs} : bebeğin cilt sıcaklığı (°C), $K_{çik}$: bebek çekirdeğinin ısı iletim katsayısı (W/m.°C), S_{bya} : bebeğin yüzey alanı (m²), m_b : bebeğin kütlesi (kg) ve $\rho_ç$: bebek çekirdeğinin yoğunluğu (kg/m³) olarak tanımlanmaktadır (Al-Taweel 2006).

$$\dot{Q}_{dci} = \frac{(T_{çs} - T_{cs}) \cdot K_{çik} \cdot S_{bya}}{\frac{m_b}{\rho_ç \cdot S_{bya}}} \quad (3.14)$$

Bebeğin çekirdek tabakasından kan ile taşınımı ile olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{çkt}$), Denklem (3.15) ile hesaplanabilir. Bu ifadeye, ρ_k : kan yoğunluğu (kg/ml), bf : kan akış hızı parametresi (s⁻¹), c_{p_k} : kanın özgül ısısı (J/kg.°C) ve V_{kh} : kan hacmi (ml) olarak tanımlanmaktadır. Kan hacmi (V_{kh}) bebeğin kütlesinin bir fonksiyonu olarak ampirik bir bağıntı olan (3.16) ifadesiyle hesaplanabilir (Al-Taweel 2006).

$$\dot{Q}_{çkt} = (T_{çs} - T_{cs}) \cdot \rho_k \cdot bf \cdot c_{p_k} \cdot V_{kh} \quad (3.15)$$

$$V_{kh} = 80 \cdot m_b \quad (3.16)$$

Bebeğin kan akış hızı parametresi (bf), Denklem (3.17) ile hesaplanabilir. Bu ifadede, q_{kkm} : bebeğin kalbinin her atımında saniyede gönderdiği kan miktarını (ml/kg.s) göstermektedir ve değeri 3,333 (ml/kg.s)'dir. Benzer şekilde $\rho_k = 1,06 \times 10^{-3}$ kg/ml olarak alınır, (3.17) eşitliğinden kan akış hızı parametresi (bf) $0,00353 \text{ s}^{-1}$ olarak hesaplanır (Al-Taweel 2006).

$$bf = \rho_k \cdot q_{kkm} \quad (3.17)$$

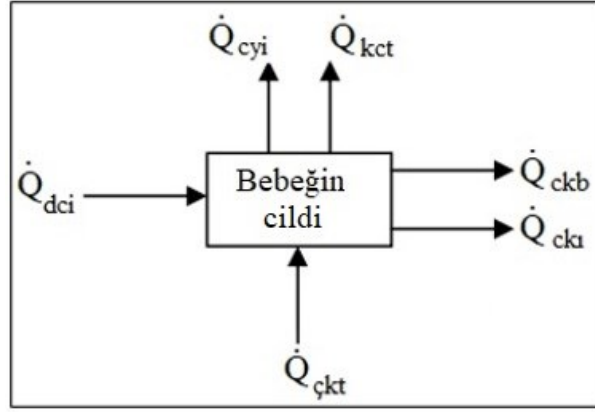
Bebek çekirdeğinin kütlesi (m_c) basitçe Denklem (3.18) olarak yazılabilir. Bu ifadedeki m_c terimi bebeğin cilt kütlelerini (kg) göstermekte ve Denklem (3.19) ifadesiyle bulunmaktadır. Burada, ρ_c : bebeğin cilt (deri) yoğunluğunu (kg/m^3) ve th_c : bebeğin cilt kalınlığını (m) göstermektedir (Al-Taweel 2006).

$$m_c = m_b - m_{cb} \quad (3.18)$$

$$m_c = th_c \cdot \rho_c \cdot S_{bya} \quad (3.19)$$

3.1.1.2 Bebeğin cilt (deri) tabakasının modellenmesi

Bebeğin cilt (deri) tabakası uzaysal bir yığın (kütle) olarak modellenmiştir. Şekil 3.4'te, bebeğin cilt tabakasında meydana gelen ısı transferleri blok diyagramıyla gösterilmiştir. Burada, bitişik tabakalar (dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{dci}), çekirdekten kan ile taşınımıyla olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{çkt}$), cilt ve yatak arasında iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{cyi}), cilt ve kuvöz ortamı arasında taşınımıyla olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{kct}), cilt ve kuvöz ortamı arasında buharlaşmayla olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckb}), cilt ve kabin duvarları arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckl}) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.4: Bebeğin cilt (deri) tabakasında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

Denklem (3.1) dikkate alınarak bebeğin cilt tabakasının enerji korunumu ifadesi birim zaman için Denklem (3.20) olarak yazılabilir. Bebeğin cilt tabakasının anlık sıcaklığı Denklem (3.21) olarak yazılabilir. Burada, c_{p_c} : bebek cildinin özgül ısısı ($J/kg \cdot ^\circ C$) ve T_{cs} : bebeğin cilt sıcaklığıdır ($^\circ C$) (Al-Taweel 2006).

$$[\dot{Q}_{dci} + \dot{Q}_{ckt} - \dot{Q}_{cyi} - \dot{Q}_{kct} - \dot{Q}_{ckb} - \dot{Q}_{cki}] \cdot dt = m_c \cdot c_{p_c} \cdot dT_{cs} \quad (3.20)$$

$$\frac{dT_{cs}}{dt} = \frac{[\dot{Q}_{dci} + \dot{Q}_{ckt} - \dot{Q}_{cyi} - \dot{Q}_{kct} - \dot{Q}_{ckb} - \dot{Q}_{cki}]}{m_c \cdot c_{p_c}} \quad (3.21)$$

Bebeğin cilt tabakasında, daha sıcak olan çekirdek tabakasından hem iletimle hem de arada bulunan kan vasıtasıyla taşınım ile ısı kazanımları bulunmaktadır. (3.21) ifadesindeki ısı kazanımları \dot{Q}_{dci} ve \dot{Q}_{ckt} terimlerinin hesaplanma yöntemleri sırasıyla, (3.14) ve (3.15) ifadelerinde detaylı bir şekilde verilmiştir. m_c teriminin hesaplama yöntemi Denklem (3.19)'da ifade edilmiştir.

Bebeğin cilt tabakasının ısı kayıplarından; cilt ve yatak arasında iletimle olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{cyi}), Denklem (3.22) ifadesiyle bulunabilir. Burada, A_{cyt} : yatak ile temas eden bebek cildinin yüzey alanı (m^2), K_{yik} : yatağın ısı iletim katsayısı ($W/m \cdot ^\circ C$), T_{ys} : ortalama yatak sıcaklığı ($^\circ C$) ve th_y : yatağın kalınlığı (m) olarak tanımlanmaktadır.

$$\dot{Q}_{cyi} = A_{cyt} \cdot K_{yik} \cdot \left(\frac{T_{cs} - T_{ys}}{th_y} \right) \quad (3.22)$$

(3.22) ifadesindeki ortalama yatak sıcaklığı (T_{ys}), verilen yatak kalınlığının ortasındaki sıcaklık olarak alınabilir. Bu durumda yatağın kalınlığı (th_y) yarıya inmektedir. Bebeğin yatak ile temas eden cildin yüzey alanı (A_{cyt}), toplam yüzey alanının %10'u olabileceği kabul edilmiştir (Al-Taweel 2006).

$$A_{cyt} = 0,1 \cdot S_{bya} \quad (3.23)$$

Bebeğin cilt sıcaklığı ile kuvöz ortamında dolaşan havanın sıcaklığındaki farklılıktan dolayı cilt sıcaklığı taşınımıyla ısı kaybına uğramaktadır. Bu kayıp hızı (\dot{Q}_{kct}), Denklem (3.24) ile hesaplanır. Burada, h_{kctk} : cilt ve kuvöz ortamı arasındaki ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A_{kmy} : kabin içerisinde havaya maruz kalan bebeğin yüzey alanı (m^2) ve T_{hs} : kabin ortam havası sıcaklığı ($^\circ C$) olarak tanımlanmaktadır.

$$\dot{Q}_{kct} = h_{kctk} \cdot A_{kmy} \cdot (T_{cs} - T_{hs}) \quad (3.24)$$

Bebeğin yatak ile temas eden yüzey alanı, toplam yüzey alanının %10'u olabileceği kabul edildiğine göre, kabin içerisinde havaya maruz kalan bebeğin yüzey alanı toplam yüzey alanının %90'dır.

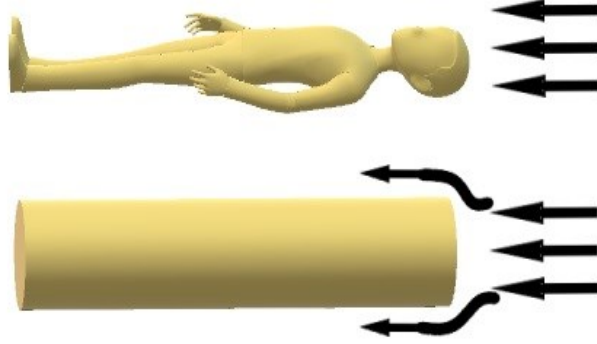
$$A_{kmy} = 0,9 \cdot S_{bya} \quad (3.25)$$

(3.24) ifadesindeki h_{kctk} , zorlanmış ısı taşınım katsayısıdır ve bu katsayı, geometriye (iç akış, dış akış), akışın özellikleri (doğal taşınım, zorlanmış taşınım, laminar, türbülanslı) ve akışkan özelliklerine (yoğunluk, viskozite, özgül ısı, ısı iletim katsayısı, hız) göre değişmektedir. Dolayısıyla birçok parametreye bağlı olan bu katsayı, Nusselt, Reynold ve Prandtl boyutsuz sayılarının bir fonksiyonu olarak yazılabilmektedir. Ayrıca bebeğin vücut şekli üniform olmadığı için modellemek oldukça zordur. Aynı zamanda bebeğin vücut eksenine boyunca paralel hava akış yönü, Nusselt sayısı için seçilecek ampirik denklemde başka bir karışıklık yaratmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada bebek vücudu, kendi eksenine paralel akış yönü olan bir silindir olarak kabul edilmekte ve buna göre matematiksel hesaplamalar yapılmaktadır (Şekil 3.5). (3.26) ifadesindeki $D_{küre}$: bebeğin yaklaşık çapını (m), K_{hik} : havanın ısı iletim katsayısını ($W/m \cdot ^\circ C$), (3.27) ifadesindeki V_{hh} : havanın hızını (m/s) ve μ_h : havanın dinamik viskozitesini ($kg/m \cdot s$) göstermektedir.

$$Nu_{küre} = \frac{h_{kctk} \cdot D_{küre}}{K_{hik}} \quad (3.26)$$

$$Re_D = \frac{\rho_h \cdot V_{hh} \cdot D_{küre}}{\mu_h} \quad (3.27)$$

$$Pr = \frac{\mu_h \cdot c_{p_h}}{K_{hik}} \quad (3.28)$$



Şekil 3.5: Bebeğin silindir yaklaşımıyla modellenmesi

Hava akış yönüne göre silindirin kesit alanı bir küre olduğu için Nusselt sayısı için Whitaker tarafından önerilen Denklem (3.29)'daki ifade seçilmiştir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010). Bu ifadedeki, μ_c : bebeğin cilt sıcaklığındaki (T_{cs}) havanın dinamik viskozitesini (kg/m.s) göstermektedir.

$$Nu = \frac{h_{kctk} \cdot D_{küre}}{K_{hik}} = 2 + [0,4 \cdot Re^{1/2} + 0,06 \cdot Re^{2/3}] \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(\frac{\mu_h}{\mu_c}\right)^{1/4} \quad (3.29)$$

Buharlaştırma yoluyla ciltten (deriden) kabin ortamındaki hava hacmine olan su kaybı, çevre ortamındaki su buharının kısmi basıncı ile ters orantılıdır. Cilt ve kuvöz ortamı arasında buharlaşmayla olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckb}), Denklem (3.30) ile belirlenir. Bu denklemde h_{fg} : suyun 35 °C'deki gizli ısısı (J/kg), m_b : bebeğin kütlesi (kg), ρ_{su} : su yoğunluğu (kg/ml) ve buharlaşma: bebeğin cildinden kuvöz ortamına olan buharlaşma kaybını (ml/kg.gün) göstermektedir. Buharlaştırma, gestasyonel yaş (GA, hafta) ve doğumdan sonraki yaşın (age, gün) bir fonksiyonudur ve LeBlanc (1987) tarafından geliştirilen eşitlikle, yani Denklem (3.31) ile hesaplanır (Al-Taweel 2006). P_{doyma} , Denklem (3.13) ile belirlenir ve (3.31) ifadesinde bu ifadenin birimi torr türünden olduğu için (3.31) formülasyonunda 1 kPa= 7,5 torr dönüşümü yapılmıştır.

$$\dot{Q}_{ckb} = \frac{h_{fg} \cdot m_b \cdot \text{Buharlaşma} \cdot \rho_{su}}{86400} \quad (3.30)$$

$$\text{Buharlaşma} = \left[6,5 \cdot \exp\left(\frac{168}{(\text{age}+11,8)}\right) \cdot \exp\left(\frac{-5,2 \cdot GA}{(\text{age}+12,2)}\right) + 4,8 \right] \cdot \left[2 - \left(\frac{7,5 \cdot P_{\text{doyma}}}{23}\right) \right] \quad (3.31)$$

Cilt, aynı zamanda ışınım ile kabin duvarlarına ısı kaybeder. Cilt ve kabin duvarları arasında ışınım ile olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckl}), Denklem (3.32) ile belirlenir. Bu ifadede σ : Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ eşittir. ε_c : bebek cildinin yama değeridir ve bebek, siyah cisim gibi kabul edildiği için $\varepsilon_c = 1$ alınabilir. T_{ds} : kabin duvar sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ve A_l : kabin duvarlarını gören bebeğin yüzey alanıdır (m^2). Bu alan ortam havasına maruz kalan bebek yüzey alanının (A_{kmy}) bir bölümüdür ve bebek vücudunun çeşitli kısımları için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Al-Taweel 2006):

1. Yatan bir bebeğin üstündeki bulunan nesnelere için toplam yüzey alanının %30'u ışınımına katılır.
2. Yanlar için toplam yüzey alanının %17'si ışınımına katılır.
3. Bebeğin başının üstü veya ayaklarının altı için ise toplam yüzey alanının %8,5'i ışınımına katılır.

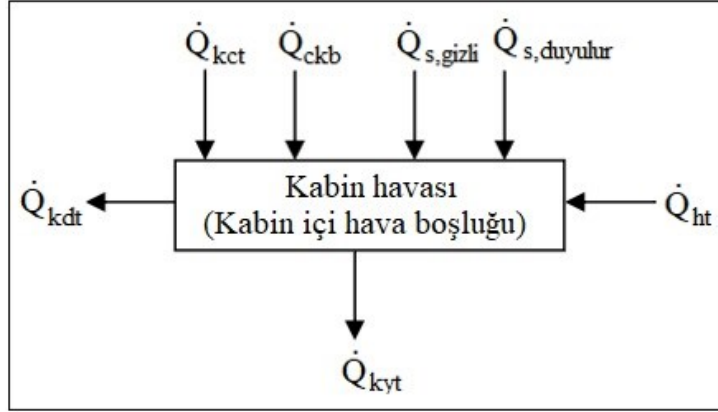
Bu durumda kabin duvarlarını gören bebeğin yüzey alanı (A_l), kabin içerisindeki havaya maruz kalan bebeğin yüzey alanının ($0,9 \cdot S_{bya}$) yaklaşık olarak %55,5'i alınarak belirlenir.

$$\dot{Q}_{ckl} = A_l \cdot \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot [(T_{cs} + 273)^4 - (T_{ds} + 273)^4] \quad (3.32)$$

3.1.2 Kabin havası (kabin içi hava boşluğu) modellenmesi

Bir kuvöz kabini standart olarak, kabin içerisinde bulunan kabin havası (kabin içi hava boşluğu), saydam kabin duvarları ve bebeğin yattığı yataktan oluşur. Kabin hava boşluğu, bebek-kuvöz sisteminin bütün bileşenleriyle çoğunlukla taşınımla olmak üzere, aynı zamanda solunum ve buharlaşma yollarıyla da kütle ve ısı transferinde bulunur. Şekil 3.6'da blok diyagramlarıyla, hava boşluğu bölmesinde gerçekleşen tüm ısı kazanımları ve kayıpları gösterilmektedir. Burada, cilt ve kuvöz ortamı arasında taşınımla olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{kct}), cilt ve kuvöz ortamı arasında buharlaşmayla olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckb}), solunumdan dolayı oluşan ısı transferler hızları ($\dot{Q}_{s,duyulur} + \dot{Q}_{s,gizli}$) ve TE ısı pompası sisteminde kuvözün

mevcut ısı ihtiyacını karşılayan (havaya aktarılan) ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ht}) yollarıyla ısı kazanmaktadır. Kuvöz ortamı (havası) ve yatak arasında olan taşınım ile ısı transfer hızı (\dot{Q}_{kyt}) ve kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferi (\dot{Q}_{kdt}) yollarıyla ısı kaybetmektedir.



Şekil 3.6: Kabin içi hava boşluğunda meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

Denklem (3.1) dikkate alınarak kabin içi hava boşluğunun enerji korunumu ifadesi birim zaman için Denklem (3.33) olarak yazılabilir. Kabin içi hava boşluğunun anlık sıcaklığı ise Denklem (3.34) olarak yazılabilir. Burada, m_h : kabin hacmi içerisindeki havanın kütlesi (kg), c_{p_h} : havanın özgül ısısı (J/kg.°C) ve T_{hs} : havanın sıcaklığıdır (°C) (Al-Taweel 2006).

$$[\dot{Q}_{kct} + \dot{Q}_{ckb} + \dot{Q}_{ht} + \dot{Q}_{s,duylur} + \dot{Q}_{s,gizli} - \dot{Q}_{kyt} - \dot{Q}_{kdt}] \cdot dt = m_h \cdot c_{p_h} \cdot dT_{hs} \quad (3.33)$$

$$\frac{dT_{hs}}{dt} = \frac{[\dot{Q}_{kct} + \dot{Q}_{ckb} + \dot{Q}_{ht} + \dot{Q}_{s,duylur} + \dot{Q}_{s,gizli} - \dot{Q}_{kyt} - \dot{Q}_{kdt}]}{m_h \cdot c_{p_h}} \quad (3.34)$$

(3.34) ifadesindeki \dot{Q}_{ht} terimi, TE ısı pompası sisteminin modellenmesi sırasında tanımlanacaktır. Benzer şekilde kabin ortamı içerisindeki havanın kütlesi (m_h), kabin ortamının hava sirkülasyonunu sağlayan fan elemanı modellenirken detaylandırılacaktır. $\dot{Q}_{s,duylur}$, $\dot{Q}_{s,gizli}$, \dot{Q}_{kct} , \dot{Q}_{ckb} terimleri sırasıyla, Denklem (3.8), (3.9), (3.24) ve (3.30) ile tanımlanmıştır. (3.34) ifadesinde bulunan kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferi (\dot{Q}_{kdt}), Denklem (3.35) ile belirlenebilir.

$$\dot{Q}_{kdt} = h_{kdt} \cdot A_{kdy} \cdot (T_{hs} - T_{ds}) \quad (3.35)$$

(3.35) ifadesinde, A_{kdy} : kabin duvarlarının toplam yüzey alanı (m^2) ve h_{kdt} : kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasındaki ısı taşınım katsayısıdır ($W/m^2 \cdot ^\circ C$). Bu katsayı kabin boşluğu içerisindeki hava hızı rejimine (akışın özelliklerine), kabinin geometrisine ve akışkanın özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. EN 60601-2-19 standardına (2011) göre, kabin içerisindeki dolaşan havanın hızı 0,35 m/s'den küçük olmalıdır. Bu yüzden literatürde standart sınırları içerisinde ortalama bir hava hızı seçilerek Reynold sayısı hesaplandığında, kabin içerisindeki akış rejiminin türbülanslı olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda kabin içerişi dikdörtgen bir kanal akışına benzetilerek, literatürden alınan uygun Nusselt genel denklemi (3.36) kullanılarak ısı taşınım katsayısı belirlenmektedir (Al-Taweel 2006).

$$Nu = \frac{h_{kdt} \cdot D_h}{K_{hik}} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3.36)$$

Ancak bu yöntem, AMS Amenity XP kuvözü için iki nedenden dolayı geçerli değildir. AMS Amenity XP kuvözünde kabin içerisindeki ortalama hava hızı 0,0929 m/s olarak ölçülmüştür. Bu durumda $Re = 2646$ eşittir ve akış rejimi karışık bölgededir, türbülanslı değildir. Diğer problem ise ısıtılmış hava, kabine hem kısa kenardan hem de uzun kenardan olmak üzere iki farklı bölgeden girmektedir (bkz. Şekil 3.7 (b)). Dolayısıyla mevcut kuvöz için (3.36) ifadesi uygun değildir. Bu durumda, kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasındaki ısı taşınım katsayısını enerji dengesi yazılarak elde etmek daha doğrudur. Kabine giriş-çıkış noktaları arasındaki kaybedilen enerji, kabin havasından taşınım ile kabinin iç yüzeylerine transfer olan enerjiye yaklaşık eşittir. Bu durumda kaybedilen enerji, Denklem (3.37) ve taşınım ile transfer olan enerji ise Denklem (3.38) olarak ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{kayıp} = \dot{m}_h \cdot c_{p_h} \cdot (T_{giriş} - T_{dönüş}) \quad (3.37)$$

$$\dot{Q}_{taşınım} = h_{kdt} \cdot A_{kd} \cdot (T_{ort\ hava} - T_{ort\ iç\ yüzey}) \quad (3.38)$$

Bu ifadelerdeki, A_{kd} : bütün kabin duvarlarının yüzey alanı (m^2), $T_{ort\ hava}$: ortalama hava sıcaklığı ($^\circ C$), $T_{ort\ iç\ yüzey}$: ortalama kabin iç yüzey sıcaklığı ($^\circ C$), $T_{giriş}$: kabine giren hava sıcaklığı ($^\circ C$) ve $T_{dönüş}$: kabin ortamından geri emilen havanın sıcaklığıdır ($^\circ C$). Aynı zamanda yatak (şilte), kabin içerisinde bulunduğu için kabin içerisindeki hava tarafından taşınım ile ısıtılmaktadır. Kuvöz ortamı (havası) ve yatak arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{kıt}$), Denklem (3.39) ile belirlenebilir. Bu ifadedeki, A_{net} : bebek tarafından kaplanmayan

yatağın alanıdır (m^2) ve Denklem (3.40) ile hesaplanabilir. Burada, A_{yat} : yatağın (şilte) alanı (m^2) ve A_{cyt} ise daha önce Denklem (3.23) ile tanımlanmıştır.

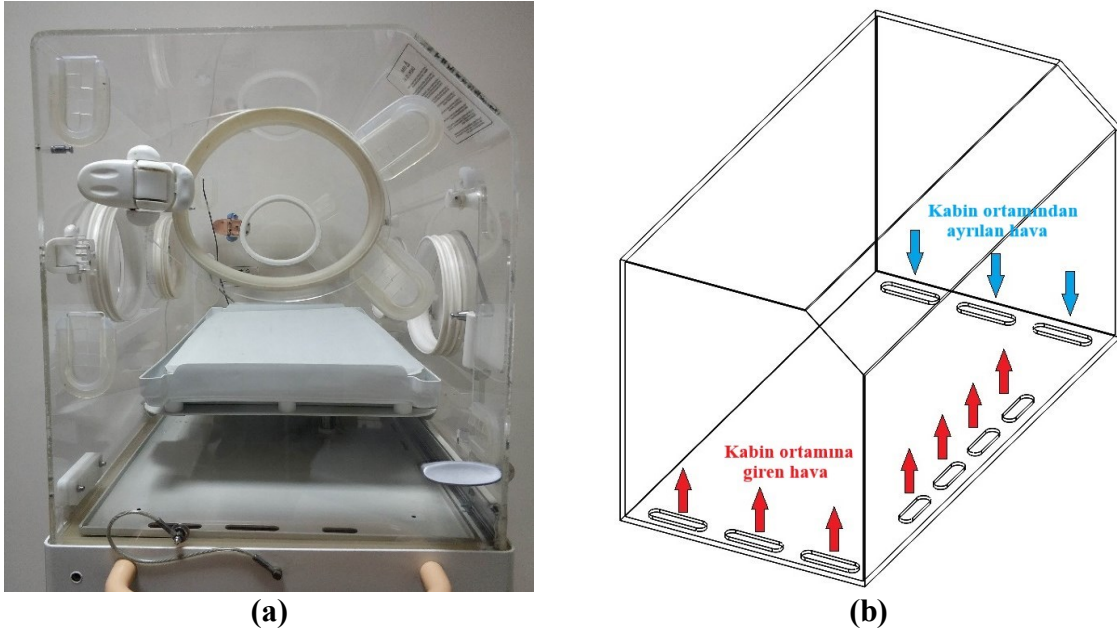
$$\dot{Q}_{kyt} = h_{kdt} \cdot A_{net} \cdot (T_{hs} - T_{ys}) \quad (3.39)$$

$$A_{net} = A_{yat} - A_{cyt} \quad (3.40)$$

3.1.3 Kabin duvarlarının modellenmesi

AMS Amenity XP kuvözünün kabini tek cidarlıdır ve kabin duvarları 6 mm kalınlığındaki saydam pleksiglas malzemesinden üretilmiştir. Bu kuvözün kabininin ön ve arka yüzeylerinde ikişer adet, yanlarda ise birer adet olmak üzere toplamda 6 tane müdahale kapısı bulunmaktadır. Ayrıca kabinin ön tarafı hafif eğimli bir yüzeye sahiptir (Şekil 3.7). AMS Amenity XP kuvözünün kabin duvarları aşağıdaki varsayımları kabul edilerek modellenmiştir.

- Kabin duvarı malzemesi homojen ve üniformdur.
- Duvarların iç ve dış yüzeyleri boyunca ve üzerinde eşit bir sıcaklık dağılımı vardır.

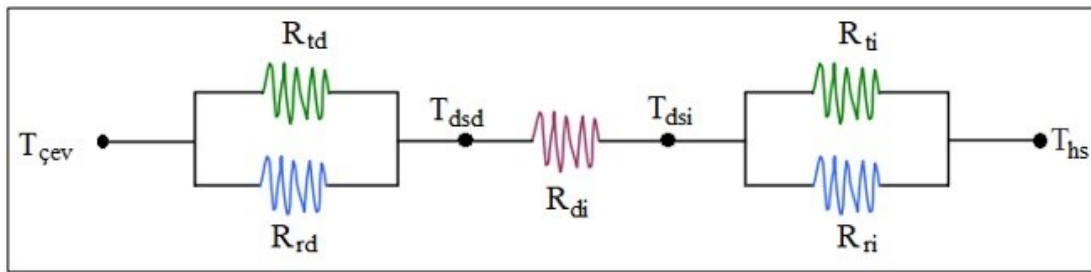


Şekil 3.7: (a) AMS Amenity XP kuvöz kabini (b) kabinin şematik gösterimi

Kabin duvarları, kabin içerisindeki hava ortamı ve kabinin dış kısmında (çevresinde) bulunan hava ortamı farklı sıcaklıklara sahiptir. Dolayısıyla bu ortamlarda iletim, taşınım ve ışınlama ile ısı transferleri olmaktadır. Meydana gelen ısı transferlerinin oluşturduğu ısı

dirençlerin blok diyagramı Şekil 3.8’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir. Burada duvarın iç sıcaklığı, T_{dsi} ve duvarın dış sıcaklığı ise T_{dsd} olarak tanımlanmıştır. Duvarın sıcaklığı (T_{ds}), Denklem (3.41) ile basitçe hesaplanabilmektedir. Kuvöz EN 60601-2-19 standardında (2011) belirtildiği üzere, çevre sıcaklığı ($T_{\text{çev}}$) 20-30 °C değerleri arasında bulunan ortamlarda çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak standartta çevre sıcaklığının 21-26 °C arasında çalıştırılması tavsiye edilmektedir. Kabin içerisindeki hava sıcaklığı (T_{hs}) için standartta kesinlikle 40 °C’ye geçmemesi gerektiği belirtilmiştir (EN 60601-2-19 2011). Literatürde bebeğin gestasyonel yaşına ve doğum ağırlığına göre belirlenen nötral ortam şartları 30-36 °C sıcaklık değerleri arasında değişmektedir (bkz. Tablo 2.1). Hava sıcaklığı (T_{hs}) bebeğin sağlık durumuna göre uzmanlar tarafından belirlenmektedir ve bu sıcaklık genelde 30-39 °C arasında değişmektedir. Dolayısıyla her zaman kabin içerisindeki sıcaklık, çevre sıcaklığından büyüktür. Bu yüzden kabin hava sıcaklığından kabinin iç duvarlarına hem ışınlama hem de taşınım ile ısı geçişi olmaktadır. Ardından 6 mm kalınlığındaki pleksiglas malzemesinden iletimle ısı geçişi meydana gelmektedir. Son olarak da kabinin dış duvar sıcaklığından, çevre sıcaklığına hem ışınlama hem de taşınım ile ısı geçişi gerçekleşmektedir. Bu yüzden Şekil 3.8’de R_{ti} : iç ortamın ışınlama (radyasyon) direnci ($W/^\circ C$), R_{ti} : iç ortamın taşınım direnci ($W/^\circ C$), R_{di} : pleksiglas malzemesinin iletim direnci ($W/^\circ C$), R_{td} : dış ortamın ışınlama (radyasyon) direnci ($W/^\circ C$) ve R_{td} : dış ortamın taşınım direnci ($W/^\circ C$) olarak tanımlanmıştır.

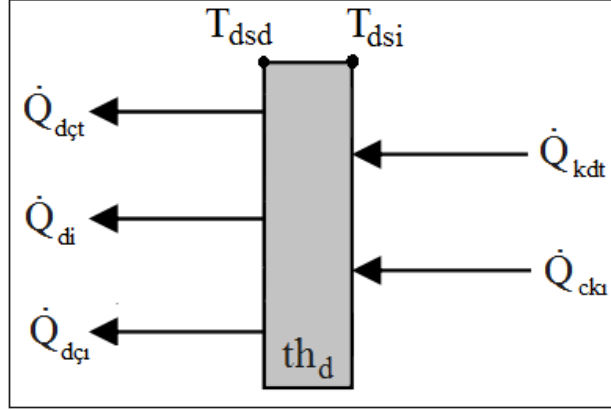
$$T_{ds} = \frac{T_{dsi} + T_{dsd}}{2} \quad (3.41)$$



Şekil 3.8: Kabin duvarlarında oluşan ısıl dirençlerin blok diyagramı

Şekil 3.8’de gösterilen ısıl dirençler nedeniyle meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı Şekil 3.9’da verilmiştir. Burada cilt ve kabin duvarları arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ckl}), kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transfer hızı (\dot{Q}_{kdt}), kabin duvarları ve çevre ortamı arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{dcl}), kabin

duvarları ve çevre ortamı arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{d\check{c}t}$) ve kabin duvarından iletimle gerçekleşen ısı transfer hızı (\dot{Q}_{di}) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.9: Kabin duvarlarında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

Denklem (3.1) dikkate alınarak kabin duvarlarının enerji korunumu ifadesi birim zaman için Denklem (3.42) olarak yazılabilir. Kabin duvarının anlık sıcaklığı ise Denklem (3.43) olarak yazılabilir. Burada, m_d : kabin duvarlarının kütlesi (kg) ve c_{p_d} : kabin duvarlarının özgül ısıdır (J/kg.°C) (Al-Taweel 2006).

$$[\dot{Q}_{kdt} + \dot{Q}_{cki} - \dot{Q}_{d\check{c}t} - \dot{Q}_{di} - \dot{Q}_{dci}] \cdot dt = m_d \cdot c_{p_d} \cdot dT_{ds} \quad (3.42)$$

$$\frac{dT_{ds}}{dt} = \frac{[\dot{Q}_{kdt} + \dot{Q}_{cki} - \dot{Q}_{d\check{c}t} - \dot{Q}_{di} - \dot{Q}_{dci}]}{m_d \cdot c_{p_d}} \quad (3.43)$$

(3.43) ifadesindeki \dot{Q}_{cki} ve \dot{Q}_{kdt} terimleri sırasıyla, (3.32) ve (3.35) ifadelerinden elde edilmiştir. Kabin duvarından iletimle gerçekleşen ısı transferi (\dot{Q}_{di}), basitçe Denklem (3.44) kullanılarak Fourier ısı iletim kanunu ile belirlenebilir. Bu ifadede, k_{plex} : pleksiglas malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/m.°C), A_{kd} : kabin duvarlardan ısının geçtiği toplam kesit alanı (m²) ve th_d : pleksiglas malzemesinin kalınlığı (m) olarak tanımlanmıştır.

$$\dot{Q}_{di} = k_{plex} \cdot A_{kd} \cdot \left(\frac{T_{dsi} - T_{dsd}}{th_d} \right) \quad (3.44)$$

Dış kabin duvarı ve çevre ortamı arasındaki sıcaklık gradyanı nedeniyle oluşan taşınım ısı transferi ($\dot{Q}_{d\check{c}t}$), çevre havası durgun bir ortam olduğu için doğal taşınım mekanizmasıyla gerçekleşir. Doğal taşınım ile ısı transferi, Prandtl ve Grashof boyutsuz sayılarının veya bu iki

boyutsuz sayının çarpımına eşit olan Rayleigh sayısının bir fonksiyonu olarak yazılabilir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010). (3.45) ifadesindeki, g : yerçekimi ivmesi (m/s^2), β_g : hacimsel genleşme katsayısı ($1/K$), L_c : geometrinin karakteristik uzunluğu (m) ve ϑ : akışkanın kinematik viskozitesidir (m^2/s). (3.47) denklemindeki $h_{d\check{c}t}$: kabin dış duvarıyla çevre havası arasındaki ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), C ve y ise katsayı sabitleridir. C ve y sabitlerinin değerleri, yüzey geometrisine ve Rayleigh sayısının aralığıyla tanımlanan akış rejimine bağlıdır.

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta_g \cdot (T_{dsd} - T_{\check{c}ev}) \cdot L_c^3}{\vartheta^2} \quad (3.45)$$

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (3.46)$$

$$Nu_{doğal} = \frac{h_{d\check{c}t} \cdot L_c}{K_{hik}} = C \cdot (Gr_L \cdot Pr)^y = C \cdot Ra_L^y \quad (3.47)$$

Yukarıda eşitlikler için akışın özellikleri, Denklem (3.48)'de tanımlanan ortalama sıcaklık ile termodinamik ve ısı transferi tablolarından belirlenebilir. Kabin ve çevre ortamında bulunan akışkan, hava olduğu için ideal gaz kabul edilebilir. Bu durumda hacimsel genleşme katsayısı (β_g), Denklem (3.49) olarak yazılabilir. Karakteristik uzunluk (L_c), düşey plakada doğal taşınım aktığı yüzeyin uzunluğuna eşittir. Ancak yatay plakada L_c ifadesi Denklem (3.50)'ye eşittir. Bu ifadede, A_{cc} : akışın temas ettiği yüzey alan (m^2) ve PP : akışın temas ettiği çevredir (m).

$$T_{ort} = \frac{T_{dsd} + T_{\check{c}ev}}{2} \quad (3.48)$$

$$\beta_{g,ideal\ gaz} = \frac{1}{T_{ort}} \quad (3.49)$$

$$(L_c)_{yatay\ plaka} = \frac{A_{cc}}{PP} \quad (3.50)$$

Kabin duvarlarının yatay ve dikey yüzeylerden oluştuğu varsayılarak; yatay yüzeyler için Nu_{yatay} sayısı, Denklem (3.51) ile dikey yüzeyler için Nu_{dikey} sayısı, Denklem (3.52) ile hesaplanabilir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010).

$$Nu_{yatay} = 0,27 \cdot Ra_L^{1/4} \quad (3.51)$$

$$Nu_{düşey} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.52)$$

(3.51) ve (3.52) eşitlikleri kullanılarak kabinin dış duvarlarıyla çevre havası arasındaki ısı taşınım katsayıları ($h_{dçt}$) her bir yüzey için ayrı ayrı belirlenebilir. Bu taşınım katsayıları Denklem (3.53) ifadesinde yerine yazılarak, her bir yüzey için kabin duvarları ve çevre ortamı arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transferi ($\dot{Q}_{dçty}$) hesaplanır. Kabin duvarları ve çevre ortamı arasında gerçekleşen toplam taşınım ile ısı transferi ($\dot{Q}_{dçt}$), Denklem (3.54) ile belirlenir. (3.53) ifadesindeki, A_{dky} : her bir yüzey için doğal taşınım maruz kalan yüzeyin alanıdır (m^2).

$$\dot{Q}_{dçty} = h_{dçt} \cdot A_{dky} \cdot (T_{dsd} - T_{çev}) \quad (3.53)$$

$$\dot{Q}_{dçt} = (\dot{Q}_{dçty})_{yatay} + 2 \cdot (\dot{Q}_{dçty})_{düşey,kısa} + 2 \cdot (\dot{Q}_{dçty})_{düşey,uzun} \quad (3.54)$$

Kabin duvarları ve çevre ortamı arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı ($\dot{Q}_{dçl}$), Denklem (3.55) ile hesaplanır. Burada, ε_d : kabin duvarının ışınlama yayıcılık katsayısıdır ve değeri 0,86 olarak kabul edilebilir (Al-Taweel 2006).

$$\dot{Q}_{dçl} = A_{kdy} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_d \cdot \left[(T_{dsd} + 273)^4 - (T_{çev} + 273)^4 \right] \quad (3.55)$$

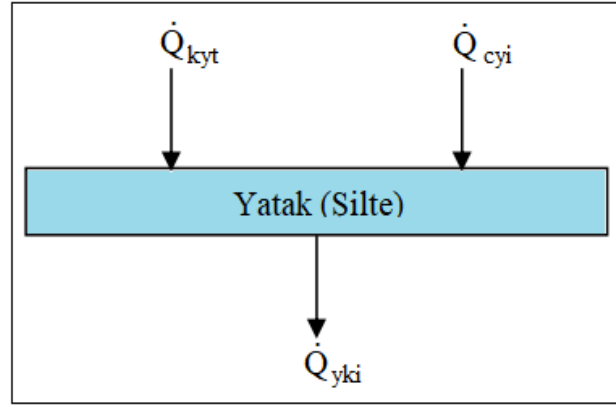
Kabin duvarlarının kütlesi ise Denklem (3.56) ile hesaplanabilir.

$$m_d = \rho_d \cdot th_d \cdot A_{kdy} \quad (3.56)$$

3.1.4 Yatağın (şilte) modellenmesi

Yatak (şilte), kabin ortamının ortasında olacak şekilde, bebeği yatarken tartabilecek bir tartı, bebeği rahatsız etmeden röntgen filminin çekilebileceği bir kızak düzeneği ve bebeğin yatma konumunun açısını değiştiren mekanik düzeneğin üzerinde kabin içerisinde yer almaktadır. Yatak, bebeğin cildiyle temas ettiğinden dolayı bebekten yatağa iletimle ($\dot{Q}_{çyi}$) ve kabin içerisindeki havayla temas ettiğinden dolayıda taşınım ile (\dot{Q}_{kvt}) ısı kazanımı vardır. Yatağın altında bulunan kızak ve mekanik düzeneğe, iletimle (\dot{Q}_{yki}) bir ısı kaybı olmaktadır. Ancak bu kızak ve mekanik düzenekler sürekli olarak kabin havasıyla temas ettiği için bu

mekanizmalardan meydana gelen ısı kaybı (\dot{Q}_{yki}) göz ardı edilebilir. Yatakta meydana gelen ısı kazanımları ve kayıpları Şekil 3.10'daki blok diyagramıyla gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Yatakta meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

Denklem (3.1) dikkate alınarak yatak için enerji korunumu ifadesi birim zaman için Denklem (3.57) olarak yazılabilir. Yatağın anlık sıcaklığı da Denklem (3.58) olarak yazılabilir (Al-Taweel 2006). Burada, m_y : yatağın kütlesi (kg) ve c_{p_y} : yatağın özgül ısısıdır (J/kg.°C).

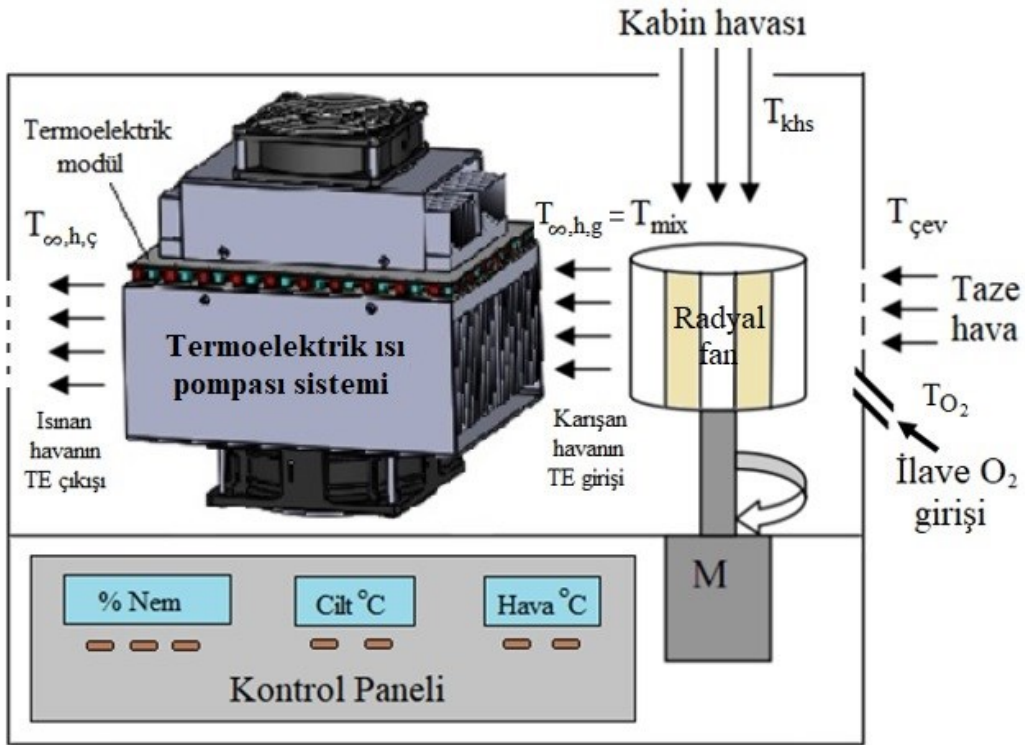
$$[\dot{Q}_{kyt} + \dot{Q}_{cyi} - \dot{Q}_{yki}] \cdot dt = m_y \cdot c_{p_y} \cdot dT_{ys} \quad (3.57)$$

$$\frac{dT_{ys}}{dt} = \frac{[\dot{Q}_{kyt} + \dot{Q}_{cyi} - \dot{Q}_{yki}]}{m_y \cdot c_{p_y}} \quad (3.58)$$

3.1.5 Radyal fan ve termoelektrik ısı pompası elemanlarının modellenmesi

Kuvöz, kullanıcı tercihinine bağlı olarak; istenirse hava sıcaklığı ölçüm moduna ya da istenirse cilt sıcaklığı ölçüm moduna göre ayarlanarak çalıştırılabilmektedir. Mod tercihi yapıldıktan sonra, istenilen sıcaklık ve bağıl nem değeri kontrol paneli vasıtasıyla sisteme girilmektedir. Otomatik kontrol ile çalışan sistem, istenen değerleri otomatik olarak algılamakta ve kuvöz çalışmaya başlamaktadır. Radyal fan aracılığıyla çevre ortamından emilen bir miktar taze hava ile bir miktar kabin ortamından emilen hava karıştırılır. Bebeğin sağlığına bağlı olarak, bazı özel durumlarda uzman kişiler kabin içerisindeki O_2 seviyesinin daha yüksek olmasını isteyebilirler. Bu durumda ilave O_2 miktarı uzman kişiler tarafından belirlendikten sonra, hastanenin oksijen kanalı bağlantısından veya kuvözün alt bölümünde bulunan oksijen regülatörünün ayarlanmasıyla, kabin ortamındaki oksijen miktarı artırılabilir.

Ortamdan emilen hava, çevreden emilen taze hava ve varsa ilave O₂ miktarı karıştırılarak, termoelektrik ısı pompası sistemi üzerinden geçirilmektedir. Termoelektrik ısı pompası sisteminde bir miktar ısıtılan/soğutulan hava, nemlendirme bölmesine gönderilir. Ardından ısıtılan/soğutulan ve nemlendirilen bu hava, kabin ortamına gönderilmesiyle döngü tamamlanır. Doğal olarak, kuvöz sistemi istenilen değerleri tek seferde sağlayamayacağı için sistem kararlı hale gelinceye kadar çalışmaya devam eder. Kararlı hale geldikten sonra ise sistemin hedeflenen değeri sürekli olarak sağlayabilmesi için sistem otomatik kontrolle sürekli olarak kontrol edilmektedir. Yukarıda bahsedilen olaylar, Şekil 3.11’de şematik olarak detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Şekil 3.11: Bebek kuvözündeki radyal fanın ve TE ısı pompası sisteminin şematik gösterimi

Ortamdan emilen kabin havasıyla çevreden emilen taze hava karışımının oranı, içeride bebek tarafından üretilen yaklaşık CO₂ miktarına bağlı olarak üreticiler tarafından belirlenmektedir. Üretici, kabin içerisinde birikebilecek maksimum CO₂ oranını, kuvöz özelliklerinde CO₂/hava karışımı olarak vermek zorundadır (EN 60601-2-19 2011). Ayrıca üreticiler, kuvöz cihazın CO₂ derişiminin EN 60601-2-19 standardında (2011) belirlenen limit değerleriyle uyumlu olduğunu, standartda belirlenen ölçüm yoluyla ispatlamak zorundadırlar. Bebek tarafından solunumla üretilen CO₂ miktarı; bebeğin gestasyonel yaşına, doğum ağırlığına ve bebeğin sağlık durumuna bağlı olarak değişmektedir. Literatürdeki çalışmalarda,

prematüre bebeklerde üretilen CO₂ miktarının yaklaşık olarak 7-10 ml/kg.dk arasında olduğu görülmekle birlikte, normal doğan bebeklerde solunumla üretilen CO₂ miktarının 25-35 ml/dk arasında olduğu kabul edilmektedir (Scopes 1967, Bell 1983, Kingdon ve diğ. 2000, Adams ve diğ. 2000, Ginevri 2010). Dolayısıyla solunan havanın içindeki CO₂ konsantrasyonunu binde bir olarak kabul edersek kabin içerisindeki havanın yaklaşık olarak 25-35 l/dk yenilenmesi gerekmektedir (Ginevri 2010). Normal koşullar altında kabin havası, yaklaşık olarak saatte altı kez yeniden sirküle ettirilir ve toplam havanın yaklaşık olarak 1/6'sını çevreden emilen taze hava, yaklaşık 5/6'sını ise kabin içinden emilen kabin havası oluşturur (Chapple 1938, Cau 2010). İlave O₂ miktarı, bebeğin sağlık durumuna bağlı olarak uzmanlar tarafından belirlenir. Kabin içerisine verilmesi gereken oksijen akış oranı, ihtiyaç duyulan O₂ konsantrasyonuna bağlı olarak değişir ve imalatçılar tarafından verilen yaklaşık değerleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir (Al-Taweel 2006). Bu konsantrasyon değerlerine yaklaşık 20-30 dk içerisinde ulaşılır.

Tablo 3.2: Yaklaşık oksijen akış oranları ve konsantrasyonları

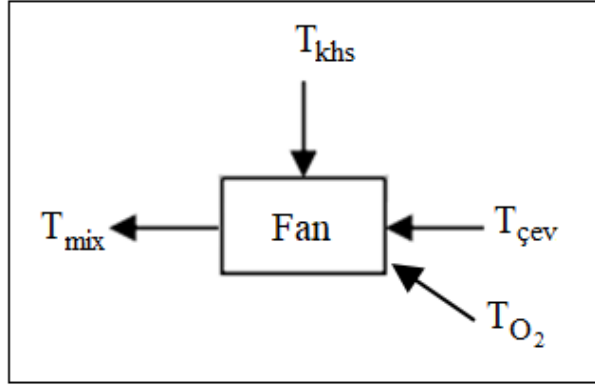
Oksijen akış oranı (l/dk)	2	3	4
Konsantrasyonu (%)	28-31	32-36	37-40

Sıcaklık dağılımının üniform olduğu ve karışan havanın özgül ısısının ($c_{p_{mix}}$) yaklaşık olarak kabin ortamından gelen havanın özgül ısısına ($c_{p_{kh}}$) eşit olduğu kabul edilerek, fan ve termoelektrik ısı pompası sistemi basitçe modellenenir.

3.1.5.1 Radyal fan elemanının modellenmesi

Fan motoru ($W_{fan} = 0$) tarafından harcanan iş ihmal edilerek, işlemin adyabatik (ısı değişimi yok) olarak gerçekleştiği kabul edilebilir. Bu durumda fan için blok diyagramı Şekil 3.12'deki gibi gösterilebilir. Fan için sistemin enerji korunumu ifadesi, Denklem (3.59) olarak elde edilir ve karışım durumundaki hava sıcaklığı (T_{mix}), Denklem (3.60) ile belirlenir. Burada \dot{m}_{kh} : kabin ortamından gelen havanın kütleli debisi (kg/s), $c_{p_{kh}}$: kabin havasından gelen havanın özgül ısısı (J/kg.°C), T_{khs} : kabin ortamından gelen havanın sıcaklığıdır (°C). Benzer şekilde "çev" alt indisi çevre ortamındaki havanın özellikleri, "O₂" alt indisi ilave edilen

oksijenin özelliklerini ve “mix” alt indisi de karışan havanın özelliklerini ifade etmek için kullanılmıştır.



Şekil 3.12: Fan elemanında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

$$\dot{m}_{kh} \cdot c_{p_{kh}} \cdot T_{khs} + \dot{m}_{çev} \cdot c_{p_{çev}} \cdot T_{çev} + \dot{m}_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} \cdot T_{O_2} = \dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}} \cdot T_{mix} \quad (3.59)$$

$$T_{mix} = \frac{\dot{m}_{kh} \cdot c_{p_{kh}} \cdot T_{khs} + \dot{m}_{çev} \cdot c_{p_{çev}} \cdot T_{çev} + \dot{m}_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} \cdot T_{O_2}}{\dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}}} \quad (3.60)$$

Kütlenin korunum ifadesinden karışımın kütleli debisi (\dot{m}_{mix}) için Denklem (3.61) elde edilir. (3.61) ifadesi, hacimsel debi türünden (3.62) olarak ifade edilebilir. Burada, ρ_{mix} : karışan havanın yoğunluğunu (kg/m^3) ve $\dot{\phi}_{mix}$: karışım havasının hacimsel debisini (m^3/s) göstermektedir.

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_{kh} + \dot{m}_{çev} + \dot{m}_{O_2} \quad (3.61)$$

$$\rho_{mix} \cdot \dot{\phi}_{mix} = \rho_{kh} \cdot \dot{\phi}_{kh} + \rho_{çev} \cdot \dot{\phi}_{çev} + \rho_{O_2} \cdot \dot{\phi}_{O_2} \quad (3.62)$$

(3.62) ifadesinde elde edilen ifadeler, (3.60) ifadesinde yerine yazılırsa karışım durumundaki hava sıcaklığı (T_{mix}), (3.63) olarak elde edilir. Bebek kuvözünün kabin hava sıcaklığı 25-40 °C arasında değişmektedir. Dolayısıyla karışan havanın özgül ısısı ($c_{p_{mix}}$) yaklaşık olarak kabin ortamından gelen havanın özgül ısısına ($c_{p_{kh}}$) eşit alınabilir.

$$T_{mix} = \frac{\rho_{kh} \cdot \dot{\phi}_{kh} \cdot c_{p_{kh}} \cdot T_{khs} + \rho_{çev} \cdot \dot{\phi}_{çev} \cdot c_{p_{çev}} \cdot T_{çev} + \rho_{O_2} \cdot \dot{\phi}_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} \cdot T_{O_2}}{(\rho_{kh} \cdot \dot{\phi}_{kh} + \rho_{çev} \cdot \dot{\phi}_{çev} + \rho_{O_2} \cdot \dot{\phi}_{O_2}) \cdot c_{p_{mix}}} \quad (3.63)$$

Denklem (3.33) ve (3.34)'de kullanılan kabin içerisindeki havanın kütlesini (m_h); dışarıdan alınan taze havanın kütlesi, kabin duvarlarında bulunan menfezlerden atılan atık

havanın kütlesi ve ilave edilen O₂ miktarının kütlesi etkilemektedir. Kuvözde, fan vasıtasıyla bir sirkülasyon gerçekleştirildiği için dışarıdan alınan taze havanın kütlesi yaklaşık olarak menfezlerden atılan atık havanın kütlesine eşit alınabilir. Dolayısıyla kabin içerisindeki havanın kütlesi (m_h), sadece ilave edilen O₂ miktarının kütlesine bağlı olarak değişmektedir. Yani, kabin havasının kütlesi, son durumda içeride bulunan hem azot hem de oksijen gazlarının nihai konsantrasyonu belirlenerek hesaplanabilir. Çünkü normal şartlar altında kabin havasının %21 O₂ ve %79 N₂'tan oluştuğu bilindiğinden dolayı her iki gazın da nihai konsantrasyonu, basit bir şekilde denklem (3.64) ve (3.65) ile belirlenir.

$$Y_{\%O_2} = 0,21 + \% O_2 \quad (3.64)$$

$$Y_{\%N_2} = 0,79 - \% O_2 \quad (3.65)$$

Kabin havası, ideal gaz kabul edildiği için oksijen ve azotun her birinin yoğunluğu, mol bazında mükemmel gaz yasası kullanılarak hesaplanabilir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010). (3.66) ifadesindeki P_t: toplam atmosfer basıncı (kPa), V_{kabin}: kabin hava boşluğunun hacmi, N_t: toplam mol sayısı (kmol), R_e: evrensel gaz sabiti (8,314 kJ/kmol.K) ve T_{hs}: kabin havası sıcaklığıdır (K).

$$P_t \cdot V_{kabin} = N_t \cdot R_e \cdot T_{hs} \quad (3.66)$$

Denklem (3.66), her bir gazın konsantrasyon yüzdesi cinsinden Denklem (3.67) olarak yazılabilir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010).

$$\frac{P_{gaz}}{P_t} = \frac{\frac{N_{gaz} \cdot R_e \cdot T_{hs}}{V_{kabin}}}{\frac{N_t \cdot R_e \cdot T_{hs}}{V_{kabin}}} = \frac{N_{gaz}}{N_t} = Y_{\% gaz} \quad (3.67)$$

Her bir gazın molar konsantrasyonu (birim hacimdeki kmol sayısı), Denklem (3.68) ile belirlenir. Son olarak da her bir gazın yoğunluğu, kendi molar ağırlığı ve kendi molar konsantrasyonu cinsinden Denklem (3.69) olarak yazılabilir (Al-Taweel 2006, Çengel 2010). Burada, CC: molar konsantrasyon (kmol/m³) ve MW_{gaz}: her bir gazın molar ağırlığıdır (kg/kmol).

$$CC = \frac{N_{gaz}}{V_{kabin}} \quad (3.68)$$

$$\rho_{gaz} = CC \cdot MW_{gaz} \quad (3.69)$$

Oksijen ve azot gazlarının molar ağırlıkları sırasıyla, 32 ve 28 kg/kmol olduğuna göre, her bir gaz için ideal gaz denkleminin genel formunu kullanarak kabin havasının kütlesi (m_h) hesaplanabilir. (3.70) ifadesindeki, R_{gaz} : gaz sabitidir ve $R_{O_2} = 0,2598$ kJ/kg.K, $R_{N_2} = 0,2968$ kJ/kg.K eşittir. P_{gaz} terimi, daha önce belirlenen (3.67) ifadesi kullanılarak Denklem (3.71) olarak hesaplanabilir. $Y_{\%gaz}$ terimi, (3.64) ve (3.65) ifadeleriyle belirlenir. Buradan kabin havasının kütlesi (m_h), Denklem (3.72)'de belirtildiği gibi hesaplanır (Al-Taweel 2006, Çengel 2010).

$$P_{gaz} \cdot V_{kabin} = m_h \cdot R_{gaz} \cdot T_{hs} \quad (3.70)$$

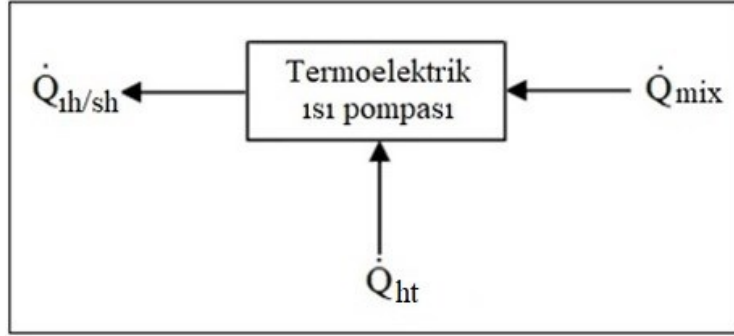
$$P_{gaz} = Y_{\%gaz} \cdot P_t \quad (3.71)$$

$$m_h = \left[\left(\frac{Y_{\%O_2} \cdot P_t}{R_{O_2}} \right) + \left(\frac{Y_{\%N_2} \cdot P_t}{R_{N_2}} \right) \right] \cdot \frac{V_{kabin}}{T_{hs}} \quad (3.72)$$

3.1.5.2 Termoelektrik ısı pompası elemanının modellenmesi

Termoelektrik ısı pompası elemanı için sistemin adyabatik olduğu ve üretilen ısının hepsinin termoelektrik ısı pompası sistemi üzerinden geçirilen hava tarafından absorbe edildiği kabul edilebilir. Bu durumda, termoelektrik ısı pompası elemanında meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı Şekil 2.13'te gösterildiği gibi olur. Sistem, termoelektrik modülün akım yönünün değiştirilmesiyle istenilirse ısıtma amaçlı, istenilirse soğutma amaçlı olarak kullanılabilir. Kuvöz sıcaklığına bağlı olarak otomatik kontrol ile kontrol edilecek bu sistem, iki yönlü olarak çalışacaktır. Bu nedenle \dot{Q}_{ht} : termoelektrik sistem üzerinden geçirilen havaya termoelektrik ısı pompası sistemi tarafından verilen ısıtma veya soğutma gücünü temsil etmektedir. \dot{Q}_{mix} : kabin ortamından gelen hava, çevre ortamından alınan taze hava ve varsa ilave O_2 tarafından gelen ısı enerjisi miktarları toplamını ve $\dot{Q}_{lh/sh}$: termoelektrik ısı pompası sisteminden verilen ısıtma veya soğutma miktarı enerjisi ile karışım havasından gelen ısı enerjisi miktarlarının toplamını göstermektedir. Termoelektrik ısı pompası sistemi için sistemin enerji korunumu ifadesi, Denklem (3.73) olarak yazılabilir. (3.73) ifadesinde, kütlenin korunumu gereği $\dot{m}_{mix} = \dot{m}_{lh/sh}$ yazılabilir. Problemin fiziği gereği karışan havanın sıcaklığı, TE sisteme giren havanın sıcaklığına eşittir ($T_{mix} = T_{\infty,h,g}$). Bu durumda (3.74) ifadesi, (3.75) ve (3.76) olarak yazılabilir. $T_{\infty,h,\zeta}$: termoelektrik modülün çalışma yönüne bağlı olarak ısıtma

modunda ısıtılan havanın sıcaklığını, soğutma modunda ise soğutulan havanın sıcaklığını (°C) göstermektedir. Son durumda ise kuvözün mevcut ısı ihtiyacını (ısıtma veya soğutma) karşılayan ısı transfer hızı (\dot{Q}_{ht}), (3.77) ifadesi olarak yazılabilir.



Şekil 3.13: Termoelektrik ısı pompası sisteminde meydana gelen ısı transferlerinin blok diyagramı

$$\dot{Q}_{mix} + \dot{Q}_{ht} = \dot{Q}_{ih/sh} \quad (3.73)$$

$$\dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}} \cdot T_{mix} + \dot{Q}_{ht} = \dot{m}_{ih/sh} \cdot c_{p_{ih/sh}} \cdot T_{\infty,h,\zeta} \quad (3.74)$$

$$\dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}} \cdot T_{\infty,h,g} + \dot{Q}_{ht} = \dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}} \cdot T_{\infty,h,\zeta} \quad (3.75)$$

$$T_{\infty,h,\zeta} = T_{\infty,h,g} + \frac{\dot{Q}_{ht}}{\dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}}} \quad (3.76)$$

$$\dot{Q}_{ht} = \dot{m}_{mix} \cdot c_{p_{mix}} \cdot (T_{\infty,h,\zeta} - T_{hs}) \quad (3.77)$$

(3.77) ifadesiyle, TE ısı pompası sistemi üzerinden geçirilen havaya aktarılan ısı gücü belirlenebilir. Fakat bu noktada dikkat edilmesi gereken bir detay bulunmaktadır. TE ısı pompası tarafından üretilen toplam ısı gücünün (\dot{Q}_{thp}) büyük çoğunluğu, sistem üzerinden geçirilen havaya taşınım ile ısı transferi olarak aktarılırken; küçük bir miktarı, sistemi çevreleyen kapalı çerçevede bulunan nesnelere ışınlama ile ısı transferi mekanizmasıyla kaybolmaktadır. Bu etki de dikkate alındığında, TE ısı pompası tarafından üretilen toplam ısı gücü, Denklem (3.78) olarak yazılabilir. $\dot{Q}_{kçl}$ terimi, TE ısı pompası tarafından verilen toplam güçten ışınlama ile kapalı çerçevedeki nesnelere kaybolan ısı gücünü göstermektedir ve büyüklüğü (3.79) ifadesiyle hesaplanabilmektedir.

$$\dot{Q}_{ht} + \dot{Q}_{kçl} = \dot{Q}_{thp} \quad (3.78)$$

$$\dot{Q}_{k\check{c}i} = \eta_{i,k\check{c}b} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{i,h} \cdot A_{i,k\check{c}t} \cdot [(T_{base} + 273)^4 - (T_{sur} + 273)^4] \quad (3.79)$$

Tez kapsamında prematüre bebek kuvözü için tasarımı geliştirilen termoelektrik ısı pompası sistemi, aslında kendi içerisinde TES modül, TES modül üzerinde bulunan kanatçıklı yüzeyler (ısı kuyusu) ve kanatçıklı yüzeylerin üzerinde bulunan fanlardan oluşan komplike bir sistemdir (bkz. Şekil 3.11). Dolayısıyla AMS Amenity kuvözü için gerekli olan maksimum ısıtma ve soğutma parametrelerine bağlı olarak; geliştirilen termoelektrik ısı pompası sistemi için en uygun TES modülün seçilmesi, TES modülün optimum akım ve voltaj çıktılarının ayarlanması, optimum kanatçıklı yüzeylerin hesaplanarak belirlenmesi, optimum fan debilerin tespit edilmesi ve bütün bu parametrelerin sonucunda kuvöz sistemine verilmesi gereken toplam ısıtma/soğutma gücünün (\dot{Q}_{thp}) belirlenmesi gerekmektedir. Bu yüzden termoelektrik ısı pompası sistemini oluşturan parçaların modellenmesi ayrı bir başlıkta (bkz. Bölüm 4) detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.1.6 Nemlendirme sisteminin modellenmesi

Nemlendirici bileşeninde, alınan hava miktarının TE ısı pompası sisteminde ısıtıldıktan veya soğutulduktan sonra, nemlendirici denilen içi su dolu bir hazne üzerinden geçirilir. Bu işlem esnasında nemlendirici haznesinin alt yüzeyinde bulunan bir ultrasonik nebulizatör cihazı ile haznedeki suyun ses dalgalarıyla kontrollü bir şekilde buharlaşması sağlanarak, hazne üzerinden geçirilen hava içerisindeki nem miktarı artırılır (bkz. Şekil 3.2). Nemlendirici bileşeninden sonra, ısıtılan ve nemlendirilen hava miktarı bebeğin bulunduğu kabin ortamına gönderilir. Kuvöz sistemlerinde bulunan nemlendirici, ısıtma işleminin yapıldığı bölmeye bir hava kanalıyla bağlantısı olan ayrı bir bölmeye yerleştirilir. Nemlendirici genel olarak, plastikten yapılmış bir su haznesi, ısıtılan havanın nemlendiriciye girdiği bir açıklık, nemlendirme işleminden sonra nemlendirilmiş havanın çıktığı bir açıklık ve su seviyesini kullanıcıyı gösteren saydam bir gözetleme camından oluşur. Bu çalışma kapsamında, rezistanslı kuvöz sistemi ile geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin ısıtma performansları açısından karşılaştırılmaları yapılacağı için kuvöz sistemine herhangi bir nem verilmemiştir. Nemlendirmeyi sağlayan ultrasonik nebulizatör, yapılan deneyler sırasında deaktif edildiği için nemlendirici sistemin modellenmesi yapılmamıştır.

4. TERMOELEKTRİK ISI POMPASI SİSTEMİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ, OPTİMİZASYONU ve OTOMATİK KONTROLÜ

TE ısı pompası sistemiyle çalıştırılan sistemin matematiksel olarak modellemesinde, ilk olarak temel fizik yasaları (Termodinamiğin I. Kanunu ve Ohm Yasası) kullanılarak hem TEJ hem de TES modüllerin ideal denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen ideal denklemlerde problemle uyumlu mantıklı kabuller yapılarak, TE modülün sıcaklık dağılımı, soğuk/sıcak bağlantı yüzeylerinden birim zamanda çekilen/atılan ısı transferi miktarları, akım, voltaj, güç ve verim ifadeleri tespit edilmiştir. Ardından TE modülün maksimum parametreleri (I_{max} , V_{max} , vb.) belirlenmiştir. Tespit edilen gerçek değerlerin maksimum ifadelerle orantılanmasıyla, TE modüllerin karakteristiklerini gösteren normalize (boyutsuzlaştırma) ifadeleri belli parametrelerin fonksiyonları cinsinden çıkartılmıştır. Ayrıca ticari TE üreticileri, genellikle modüllerin maksimum parametrelerini ürün kataloglarında vermekte ancak malzeme özelliklerini (Seebeck katsayısı, elektriksel özdirenci, ısı iletim katsayısı) ürün kataloglarında vermemektedir. Bu yüzden ideal denklemleri ve malzeme özelliklerini kullanılarak hesaplanan performans eğrileriyle, ticari modüllerin kullanım esnasında ölçülen performans eğrileri arasında sapmalar olmaktadır. Bu problemi ortadan gidermek için Lee (2017) tarafından geliştirilen etkin malzeme özellikleri tanımlanmıştır (bkz. Bölüm 4.1). Aynı zamanda TEJ ve TES sistemlerin kullanıldığı uygulamalarda istenilen performansları sağlayabilmesi, TE modülün her iki yüzeylerinde bulunan ısı kuyularının etkin ve verimli olarak çalışabilmesiyle mümkün olmaktadır. TE sistemlerin etkin ve verimli çalışabilmesi; sistemi oluşturan termoçift sayısına, her iki ısı kuyusunda bulunan kanat geometrisine, ısı kuyularından geçen akışkana, akış hızına, vb. parametrelere bağlıdır. Bu yüzden ısı kuyularını da içene alacak şekilde hem TEJ hem de TES sistemleri için modelleme yapılmış ve boyutsuzlaştırma yöntemiyle TEJ ve TES sistemlerin optimum çalışma durumlarını belirleyen önemli boyutsuz parametreler elde edilmiştir (bkz. Bölüm 4.2).

Bölüm 4.2’de yapılan TES sisteminin modellemesi kullanılarak, prematüre bebek kuvözleri için tez kapsamında geliştirilen TE ısı pompası sisteminin bütün alt parçaları (TES modül, kanatçıklı yüzeyler ve fanlar) bir bütün olarak modellenmiştir. Modellemede, termoelektrik ısı pompası sisteminde kullanılacak kanatçıklı yüzeylerin, optimum kanatçık aralığı ve optimum kanatçık kalınlığı formülasizyonları çıkartılmıştır. Bu formülasizyonlar ile

Bölüm 4.2’de boyutsuzlaştırma yöntemiyle elde edilen ve TES sistemlerin optimum şartlarda çalışmasını sağlayan önemli boyutsuz parametreler bir araya getirilerek, kuvöz sisteminde kullanılacak olan TE ısı pompası sistemi matematiksel olarak modellenmiştir. Bu modelleme kullanılarak, tez kapsamında geliştirilen ve üretimi yapılan TE ısı pompası sisteminin bütün optimum parametreleri belirlenmiştir (bkz. Bölüm 4.3). Son olarak da geliştirilen TE ısı pompası sisteminin EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) belirtilen parametreleri, hızlı ve hassas bir şekilde sağlayabilmesi için TE ısı pompası sisteminin PID (orantısal + integral + türevsel kontrol algoritması) ile otomatik kontrolü yapılmıştır. Sistemin hızlı ve hassas bir şekilde otomatik kontrolünü sağlayan PID sabit katsayıları (K_P , K_I ve K_D) için ilk önce Bölüm 3’te yapılan kuvözün modellenmesi kullanılarak, MATLAB®/Simulink ortamında geliştirilen sistemin transfer fonksiyonları belirlenmiş ve daha sonra elde edilen transfer fonksiyonları kullanarak PID sabit katsayıları birim basamak girdiye göre belirlenmiştir (bkz Bölüm 4.4).

4.1 TEJ ve TES Modüllerin İdeal Denklemleri

4.1.1 TEJ modüllerin ideal denklemleri

I = elektrik akımı (A), J = akım yoğunluğu (A/m^2), V = voltaj farkı (V), E = elektrik alan (V/m^2), α = Seebeck katsayısı (V/K), ρ = elektriksel öz direnç ($\Omega.m$) ve k = ısı iletim katsayısı ($W/m.K$) olmak üzere, içerisinde sıcaklık farkı olan bir termoelektrik malzemede üretilen elektrik akımı, Ohm kanunu gereği giren akım çıkmak zorunda olduğu için Denklem (4.1)’deki ifade elde edilir. Böyle bir durumda (termoelektrik malzemelerde) elektrik alan (\vec{E}), hem akım akısından (\vec{J}) hem de sıcaklık gradyanından ($\vec{\nabla}T$) etkilendiği için (4.2) ifadesi elde edilir. Benzer şekilde birim zamandaki birim alandan olan ısı akısı da (\vec{q}) hem elektrik alandan (\vec{E}) hem de sıcaklık gradyanından ($\vec{\nabla}T$) etkilenir (Denklem (4.3)). Katı maddeler için genel ısı iletim denklemi yazıldığında, (4.4) ifadesi elde edilir. (4.4) ifadesi sürekli rejimde $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ olduğu için (4.5) ifadesi elde edilir. Genel ısı iletimi denklemindeki ısı üretimi terimi (4.6) olarak yazılarak, (4.2) ifadesindeki elektrik alan ifadesi, (4.6) ifadesinde yerine yazıldığında (4.7) denklemi elde edilir. (4.3) ve (4.7) denklemleri, (4.5) ifadesinde yerine yazıldığında TEJ sistemlerin genel denklemi olan (4.8) ifadesi elde edilir. Bu ifadede ilk terim ısı iletimini, ikinci terim Joule ısısisını ve üçüncü terim ise Thomson ısısisını göstermektedir (Lee 2017).

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = 0 \quad (4.1)$$

$$\vec{E} = \vec{J} \cdot \rho + \alpha \cdot \vec{\nabla} T \quad (4.2)$$

$$\vec{q} = \alpha \cdot T \cdot \vec{J} - k \cdot \vec{\nabla} T \quad (4.3)$$

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

$$-\vec{\nabla} \cdot \vec{q} + \dot{q} = 0 \quad (4.5)$$

$$\dot{q} = \vec{E} \cdot \vec{J} = (\vec{J} \cdot \rho + \alpha \cdot \vec{\nabla} T) \cdot \vec{J} \quad (4.6)$$

$$\dot{q} = J^2 \cdot \rho + \vec{J} \cdot \alpha \cdot \vec{\nabla} T \quad (4.7)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (k \cdot \vec{\nabla} T) + J^2 \cdot \rho - T \cdot \frac{d\alpha}{dT} \cdot \vec{J} \cdot \vec{\nabla} T = 0 \quad (4.8)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}$
 Isı iletimi

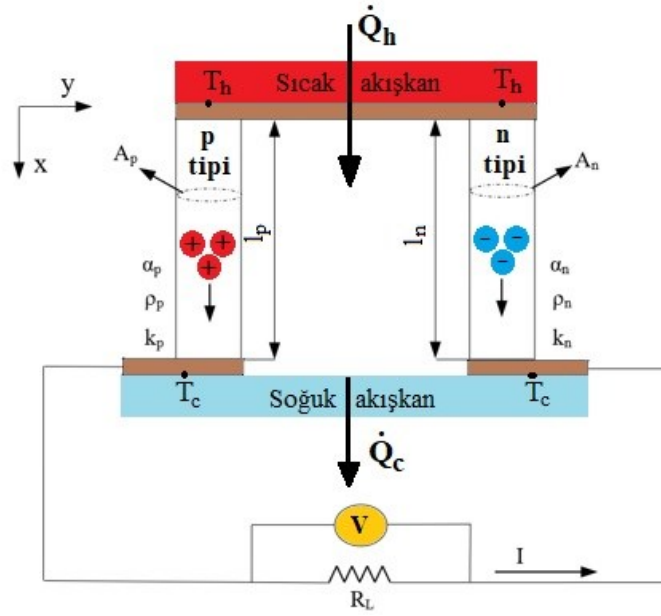
$\underbrace{\hspace{5em}}$
 Joule ısısı

$\underbrace{\hspace{10em}}$
 Thomson ısısı

TEJ sistemler, çok sayıda p ve n tipi termoçiftin birbirlerine elektriksel olarak seri ve termal olarak paralel birleştirilmesiyle oluşturulan TE modüllerdir. TEJ için bu termoçiftlerden bir tanesi kapalı devresiyle birlikte dikkate alınarak (Şekil 4.1), aşağıda yapılan kabuller ışığında, (4.8) genel denklemi (4.9) ifadesi haline gelmektedir. (4.9) ifadesindeki akım yoğunluğu yerine $J = I/A$ yazıldığında, (4.10) ifadesi elde edilir.

Kabuller;

- 1-) Sürekli rejim
- 2-) Bir boyutlu
- 3-) Termoçiftin temas noktalarındaki elektriksel ve termal dirençler ihmal edilmektedir.
- 4-) Seebeck katsayısı (α) sıcaklıktan bağımsızdır.
- 5-) P ve n çifti arasındaki yüzeylerden ışıyım ve taşınım ile olan ısı transferleri ihmal edilmektedir.



Şekil 4.1: Tek bir termoçift devresinden oluşan TEJ

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right) + J^2 \cdot \rho = 0 \quad (4.9)$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{I^2 \cdot \rho}{A} = 0 \quad (4.10)$$

(4.10) ifadesinde gerekli matematiksel işlemler yapılarak, Şekil 4.1’de gösterilen sınır şartları ($T_{x=0} = T_h$ ve $T_{x=l} = T_c$), (4.10) ifadesine uygulandıktan sonra pelletlerdeki sıcaklık dağılımı ($T(x)$), (4.11) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$T(x) = -\frac{I^2 \cdot \rho \cdot x^2}{2 \cdot k \cdot A^2} + \left[\frac{T_c - T_h}{l} + \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l}{2 \cdot k \cdot A^2} \right] \cdot x + T_h \quad (4.11)$$

Sıcaklık dağılımı bulunduktan sonra sıcak bağlantı yüzeyinde birim zamanda çekilen ısı Denklem (4.12) olarak yazılıp, matematiksel olarak çözüldüğünde (4.13) ifadesi elde edilir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_h \cdot I + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \right) \Big|_p + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \right) \Big|_n \right] \quad (4.12)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot l_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot l_n}{A_n} \right) + \left(\frac{k_p \cdot A_p}{l_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{l_n} \right) \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.13)$$

(4.14), (4.15) ve (4.16) ifadelerindeki değerler, (4.13) ifadesinde yerine yazıldığında sıcak bağlantı yüzeyinde birim zamanda çekilen ısı, Denklem (4.17) olarak elde edilmektedir (Lee 2017).

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (4.14)$$

$$R = \frac{\rho_p \cdot l_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot l_n}{A_n} \quad (4.15)$$

$$K = \frac{k_p \cdot A_p}{l_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{l_n} \quad (4.16)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.17)$$

Benzer şekilde soğuk bağlantı yüzeyinden birim zamanda atılan ısı, (4.18) ifadesinin matematiksel olarak çözülmesiyle Denklem (4.19) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l} \right) \Big|_p + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l} \right) \Big|_n \right] \quad (4.18)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha \cdot T_c \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.19)$$

n tane termoçiftten oluşan bir TEJ modül için Termodinamiğin I. Yasasından üretilen güç, (4.20) ifadesinde yerine yazıldığında Denklem (4.21) elde edilir.

$$\dot{W}_n = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (4.20)$$

$$\dot{W}_n = n \cdot [\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) - I^2 \cdot R] \quad (4.21)$$

Toplam güç çıktısı aynı zamanda dış yük direncinden geçen akım ve toplam voltaj cinsinden de yazılabilmektedir. Bu durumda dış yük direnci cinsinden tüketilen güç Denklem (4.22) ve toplam voltaj farkı ise Denklem (4.23) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$\dot{W}_n = I \cdot V = n \cdot I^2 \cdot R_L \quad (4.22)$$

$$V = n \cdot I \cdot R_L = n \cdot [\alpha \cdot (T_h - T_c) - I \cdot R] \quad (4.23)$$

4.1.1.1 TEJ modülün performans parametreleri

(4.23) ifadesi yeniden düzenlendiğinde bir TEJ modülden elde edebilecek akım, (4.24) olarak bulunur ve dikkat edilirse elde edilebilecek akım, termoçift sayısından (n) bağımsızdır.

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_h - T_c)}{R_L + R} \quad (4.24)$$

(4.24) ifadesinde elde edilen akım (4.23) ifadesinde yerine yazıldığında modülden elde edebilecek voltaj, Denklem (4.25) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$V = n \cdot I \cdot R_L = \frac{n \cdot \alpha \cdot (T_h - T_c)}{\frac{R_L}{R} + 1} \cdot \left(\frac{R_L}{R}\right) \quad (4.25)$$

(4.22)'de elde edilen güç çıktısı ifadesinde, Denklem (4.24)'te elde edilen akım yerine yazıldığında bir TEJ modülden elde edebilecek güç, Denklem (4.26) ve ısıl verim ise Denklem (4.27) olarak bulunur (Lee 2017).

$$\dot{W}_n = n \cdot I^2 \cdot R_L = \frac{n \cdot \alpha^2 \cdot (T_h - T_c)^2}{R} \cdot \frac{\frac{R_L}{R}}{\left(1 + \frac{R_L}{R}\right)^2} \quad (4.26)$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_n}{\dot{Q}_h} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \cdot \frac{R_L}{R}}{\left(1 + \frac{R_L}{R}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{1}{2 \cdot (Z \cdot \bar{T})} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (4.27)$$

(4.27) ifadesindeki ortalama sıcaklık, $\bar{T} = \frac{T_h + T_c}{2}$ olarak yazılabilir.

4.1.1.2 TEJ modülün maksimum parametreleri

1-) Maksimum akım (I_{max}): TEJ modül için maksimum akım kısa devrede yani $R_L = 0$ olduğunda gerçekleşir. (4.24) ifadesinden maksimum akım, Denklem (4.28) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$I_{max} = \frac{\alpha \cdot (T_h - T_c)}{R} \quad (4.28)$$

2-) **Maksimum voltaj (V_{max}):** Maksimum voltaj açık devrede yani $I=0$ olduğunda gerçekleşir. (4.23) ifadesinden maksimum voltaj ifadesi, Denklem (4.29) olarak elde edilir.

$$V_{max} = n \cdot \alpha \cdot (T_h - T_c) \quad (4.29)$$

3-) **Maksimum güç çıktısı ($\dot{W}_{n,max}$):** Maksimum güç çıktısı, gücü veren (4.26) ifadesinin $\left(\frac{R_L}{R}\right)$ 'ye göre türevi alınıp, sıfıra eşitlenmesiyle Denklem (4.30) olarak bulunur. Bu matematiksel işlem yapıldığında $\frac{R_L}{R} = 1$ değeri elde edilir. Bulunan ifadenin fiziksel anlamı şunu belirtmektedir: modülün iç direnci kadar yük direnci sisteme bağlandığında maksimum güç elde edilmiş olur (Lee 2017).

$$\dot{W}_{n,max} = \frac{n \cdot \alpha^2 \cdot (T_h - T_c)^2}{4 \cdot R} \quad (4.30)$$

4-) **Maksimum verim (η_{max}):** (4.27) ifadesinin $\left(\frac{R_L}{R}\right)$ 'ye göre türevi alınıp, sıfıra eşitlendiğinde bulunur. Bu matematiksel işlem yapıldığında $\frac{R_L}{R} = \sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}}$ ifadesi elde edilir. Buradan maksimum verim ifadesi, Denklem (4.31) olarak bulunur.

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \cdot \frac{\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (4.31)$$

Bahsedilen 4 maksimum parametreye ek olarak, maksimum güçteki verimde TEJ'lerde zaman zaman kullanılmaktadır. Maksimum güçteki verim, (4.27) ifadesinde $\frac{R_L}{R} = 1$ eşitliği yerine yazıldığında, Denklem (4.32) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$\eta_{max,power} = \eta_{MP} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{2}{Z \cdot \bar{T}} \cdot \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)} \quad (4.32)$$

4.1.1.3 TEJ parametrelerinin normalize edilmesi (boyutsuzlaştırılması)

Gerçek değerlerin maksimum değerlere oranlanmasıyla, TEJ'ün karakteristikleri normalize edilebilmektedir. Bu matematiksel işlem yapıldığında, $\frac{\dot{W}_n}{\dot{W}_{n,max}}$, $\frac{I}{I_{max}}$ ve $\frac{V}{V_{max}}$

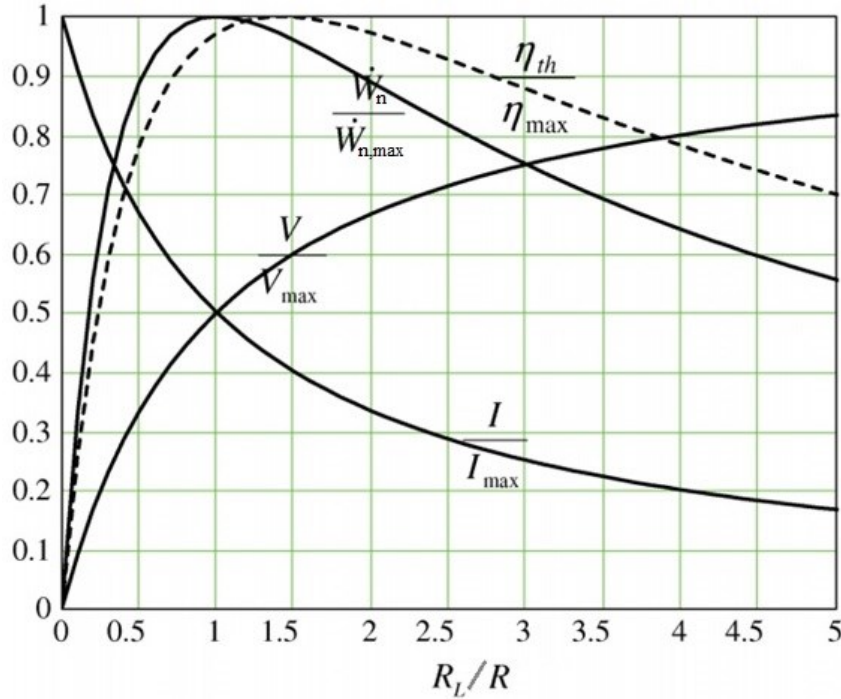
ifadelerinin sadece $\frac{R_L}{R}$ ifadesinin bir fonksiyonu olduğu görülmektedir (Denklem (4.33) - (4.35)). $\frac{\eta_{th}}{\eta_{max}}$ ifadesi ise; $\frac{R_L}{R}$, $\frac{T_c}{T_h}$ ve $Z \cdot \bar{T}$ ifadelerinin bir fonksiyonudur (Denklem (4.36)). Yapılan bu normalize işlemlerinin grafikleri çizildiğinde, maksimum gücün $\frac{R_L}{R} = 1$ 'de olduğu ve maksimum verimin yaklaşık $\frac{R_L}{R} = 1,5$ 'da olduğu Şekil 4.2'de açık bir şekilde görülmektedir (Lee 2017).

$$\frac{\dot{W}_n}{\dot{W}_{n,max}} = \frac{4 \cdot \frac{R_L}{R}}{\left(\frac{R_L}{R} + 1\right)^2} \quad (4.33)$$

$$\frac{I}{I_{max}} = \frac{1}{\frac{R_L}{R} + 1} \quad (4.34)$$

$$\frac{V}{V_{max}} = \frac{\frac{R_L}{R}}{\frac{R_L}{R} + 1} \quad (4.35)$$

$$\frac{\eta_{th}}{\eta_{max}} = \frac{\frac{R_L}{R} \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}\right)}{\left[\left(\frac{R_L}{R} + 1\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{1}{2 \cdot Z \cdot \bar{T}} \cdot \left(1 + \frac{R_L}{R}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)\right] \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} - 1\right)} \quad (4.36)$$



Şekil 4.2: $T_c/T_h = 0,7$ ve $Z \cdot \bar{T} = 1$ değerlerine göre bir TEJ modülün normalize edilmiş grafiği (Lee 2017)

4.1.1.4 TEJ'ün etkin malzeme özellikleri

TE sistem tasarımcıları, ideal denklemi kullanarak TEJ modülünün performansını veya TEJ modüllerin kullanıldığı bir uygulamanın performansını analiz etmek isterler. Bunun yapılabilmesi için TEJ modülün malzeme özelliklerinin (Seebeck katsayısı (α), elektriksel özdirenci (ρ) ve ısı iletim katsayısı (k)) bilinmesi gerekmektedir. Ancak ticari TEJ modül üreticileri, ürettikleri TEJ modüllerin maksimum parametre (I_{\max} , V_{\max} , $\dot{W}_{n,\max}$ ve η_{MP}) değerlerini ürün kataloglarında verirken, ticari kaygılardan dolayı ürettikleri TEJ modülün malzeme özelliklerini ürün kataloglarında vermemektedirler. Bu durum, TE sistem tasarımcıları ile TEJ modül üreticilerini karşı karşıya getirmekte ve ikilem oluşturmaktadır. Aslında TEJ modülün malzeme özellikleri uygun test cihazlarıyla kolaylıkla ölçülebilmektedir. Fakat çoğu TE sistem tasarımcısının bu işlem için ölçme işlemlerini yapabileceği test cihazları yoktur. Aynı zamanda bu malzeme özellikleri çok küçük değerler olduğu için hassas cihazların tasarlanması kolay bir işlem değildir. Ayrıca literatürde, bu malzeme özellikleri değişik ampirik bağıntılarla da hesaplanabilmektedir ve bu ampirik bağıntılardan elde edilen değerler ideal denklemlerde yerine yazılarak analizler yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen performans değerleri ile ticari modüllerin çalıştırılmasıyla ölçülerek elde edilen deneysel performans eğrileri arasında birtakım sapmalar olmaktadır. Çünkü ideal denklemler elektriksel ve termal dirençleri, Thomson etkisini ve ısı kayıpları içermeden belli kabuller yapılarak çıkarılmıştır. Bu yüzden deneysel olarak elde edilen gerçek değerler ile hesaplanan değerler arasında sapmalar olmaktadır. Bu kabullerin ihmal edilmeyerek hesaba katılması ise ideal denklemlerin çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu noktada yukarıda bahsedilen bütün eksikleri gidermek için Lee (2017) tarafından geliştirilen efektif (etkin) malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Efektif malzeme özelliklerin belirlenmesinde, TEJ modül üreticileri tarafından verilen maksimum parametreler kullanılmaktadır. Çünkü bu değerler, üretici tarafından modülün çalıştırılmasıyla ölçülmüştür ve dikkat edilirse bu maksimum parametreler, malzeme özelliklerinin (α , ρ , k), geometrinin (A/l) ve iki bağlantı yüzey sıcaklıklarının (T_h , T_c) fonksiyonudur (bkz. Denkem (4.28) - (4.31)). Dolayısıyla maksimum parametrelerin değerleri belli ise bu değerler kullanılarak malzeme özelliklerinin belirlenmesi matematiksel olarak mümkündür. Efektif malzeme özelliklerin belirlenmesi için TEJ modülün maksimum parametrelerinden 3 tanesinin bilinmesi yeterlidir. Bu maksimum parametrelerden I_{\max} ve η_{MP} kesinlikle gereklidir ve her durumda kullanılması gerekir. Fakat V_{\max} ve $\dot{W}_{n,\max}$ opsiyoneldir ve ikisinden biri tercih edilerek efektif malzeme özellikleri belirlenebilmektedir. Bu tez

kapsamında TEJ modüllerin efektif malzeme özellikleri (ρ^* , α^* , Z^* ve k^*); I_{max} , η_{MP} ve $\dot{W}_{n,max}$ maksimum parametreleri kullanılarak çıkartılmıştır (Lee 2017). Efektif elektriksel öz direnç ifadesi, (4.28) ve (4.30) ifadeleri kullanılarak Denklem (4.37) olarak elde edilmiştir.

$$\rho^* = \frac{4 \cdot \left(\frac{A}{l}\right) \cdot \dot{W}_{n,max}}{n \cdot (I_{max})^2} \quad (4.37)$$

Benzer şekilde efektif Seebeck katsayısı ifadesi, (4.28) ve (4.30) denklemleri kullanılarak Denklem (4.38) olarak elde edilmiştir.

$$\alpha^* = \frac{4 \cdot \dot{W}_{n,max}}{n \cdot I_{max} \cdot (T_h - T_c)} \quad (4.38)$$

Efektif TE performans katsayısı (4.32) denklemini kullanılarak Denklem (4.39) olarak elde edilmiştir. Burada η_C , Carnot çevrimi verimini ifade etmektedir ve $\eta_C = 1 - \frac{T_c}{T_h}$ ifadesine eşittir (Lee 2017).

$$Z^* = \frac{\frac{2}{\bar{T}} \cdot \left(1 + \frac{T_c}{T_h}\right)}{\eta_C \cdot \left(\frac{1}{\eta_{MP}} + \frac{1}{2}\right) - 2} \quad (4.39)$$

Son olarak da efektif ısı iletim katsayısı, TE performans katsayısının genel formülünde efektif malzeme özellikleri kullanılarak Denklem (4.40) ile elde edilir.

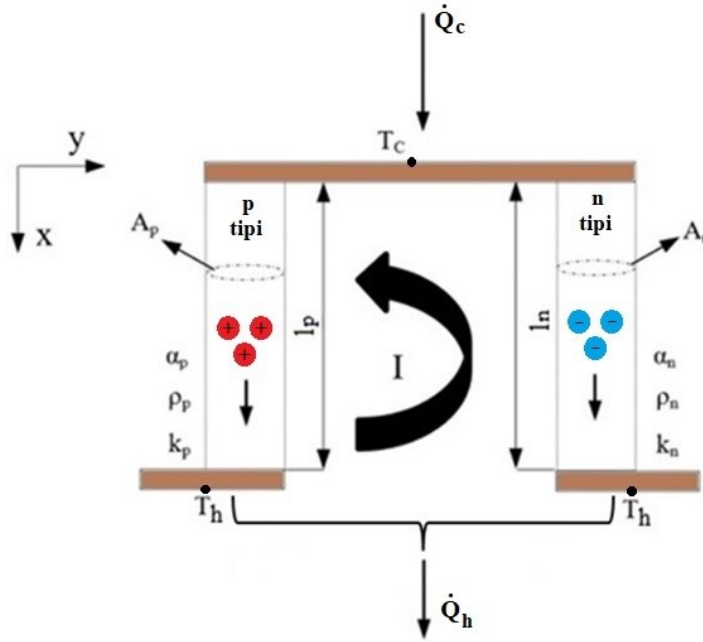
$$k^* = \frac{(\alpha^*)^2}{\rho^* \cdot Z^*} \quad (4.40)$$

Bu şekilde maksimum parametreler kullanılarak elde edilen efektif malzeme özellikleri, elektriksel ve termal dirençleri, Thomson etkisini ve ısı kayıplarını içerdiğine dikkat etmek edilmelidir. Çünkü maksimum parametreler deneysel olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda elde edilen efektif malzeme özelliklerinin bir tane termoçiftin değeri olduklarına dikkat edilmelidir. Sadece p veya n tipi termoelementin efektif malzeme özellikleri belirlenmek istenirse bu değerlerin ikiye bölünmesi gerektiği unutulmamalıdır (Lee 2017).

4.1.2 TES modüllerin ideal denklemleri

TEJ için çıkartılan genel denklem, TES içinde geçerli olduğu için (4.41) ifadesi elde edilir. Benzer şekilde TES sistemlerde, çok sayıda p ve n tipi termoçiftlerinin birbirine elektriksel olarak seri, termal olarak paralel bağlanmasıyla oluşturulan modüllerdir. Dolayısıyla TES modül için bu termoçiftlerden bir tanesi devresiyle birlikte dikkate alınarak (Şekil 4.3) aşağıdaki kabuller ışığında, (4.41) genel ısı denklemi, (4.42) ifadesi haline gelmektedir. (4.42) ifadesindeki akım yoğunluğu yerine $J= I/A$ yazıldığında (4.43) ifadesi elde edilir (Lee 2017).

$$\underbrace{\vec{V} \cdot (k \cdot \vec{\nabla} T)}_{\text{Isı iletimi}} + \underbrace{J^2 \cdot \rho}_{\text{Joule ısısı}} - \underbrace{T \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial T} \cdot \vec{J} \cdot \vec{\nabla} T}_{\text{Thomson ısısı}} = 0 \quad (4.41)$$



Şekil 4.3: Tek bir termoçift devresinden oluşan TES

Kabuller;

- 1-) Sürekli rejim
- 2-) Bir boyutlu
- 3-) Termoçiftin temas noktalarındaki elektriksel ve termal dirençler ihmal edilmektedir.
- 4-) Seebeck katsayısı (α) sıcaklıktan bağımsızdır.

5-) P ve n çifti arasındaki yüzeylerden ışıınım ve taşınım ile olan ısı transferleri ihmal edilmektedir.

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot \frac{dT}{dx} \right) + I^2 \cdot \rho = 0 \quad (4.42)$$

$$\frac{d}{dx} \left(k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{I^2 \cdot \rho}{A} = 0 \quad (4.43)$$

(4.43) ifadesindeki matematiksel işlemler yapılarak, Şekil 4.3'de açık bir şekilde gösterilen sınır şartları ($T_{x=0} = T_c$ ve $T_{x=l} = T_h$) yerine yazıldığında pelletlerin sıcaklık dağılımı ($T(x)$), Denklem (4.44) olarak elde edilir.

$$T(x) = -\frac{I^2 \cdot \rho \cdot x^2}{2 \cdot k \cdot A^2} + \left[\frac{T_h - T_c}{l} + \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l}{2 \cdot k \cdot A^2} \right] \cdot x + T_c \quad (4.44)$$

Sıcaklık dağılımı bulunduğundan sonra soğuk bağlantı yüzeyinden birim zamanda çekilen ısı hızı, Denklem (4.45) olarak yazılıp gerekli matematiksel işlemler yapıldığında (4.46) ifadesi olarak elde edilir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \right) \Big|_p + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} \right) \Big|_n \right] \quad (4.45)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_c \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot l_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot l_n}{A_n} \right) - \left(\frac{k_p \cdot A_p}{l_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{l_n} \right) \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.46)$$

(4.47), (4.48) ve (4.49) ifadelerindeki değerler, (4.46) ifadesinde yerine yazıldığında soğuk bağlantı yüzeyinden birim zamanda çekilen ısı hızı, Denklem (4.50) olarak sadeleşmektedir.

$$\alpha = \alpha_p - \alpha_n \quad (4.47)$$

$$R = \frac{\rho_p \cdot l_p}{A_p} + \frac{\rho_n \cdot l_n}{A_n} \quad (4.48)$$

$$K = \frac{k_p \cdot A_p}{l_p} + \frac{k_n \cdot A_n}{l_n} \quad (4.49)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha \cdot T_c \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.50)$$

Benzer şekilde sıcak bağlantı yüzeyinden birim zamanda atılan ısı hızı, (4.51) ifadesinin matematiksel olarak çözülmesiyle Denklem (4.52) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[(\alpha_p - \alpha_n) \cdot T_h \cdot I + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l} \right) \Big|_p + \left(-k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=l} \right) \Big|_n \right] \quad (4.51)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.52)$$

n tane termoçiftten oluşan TES modül için Termodinamiğin I. Yasası gereği TES modülde harcanan güç değeri, (4.53) ifadesinde (4.50) ve (4.52) denklemlerinde elde edilen değerler yerine yazıldığında (4.54) olarak bulunur.

$$\dot{W} = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c \quad (4.53)$$

$$\dot{W} = n \cdot [\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) + I^2 \cdot R] \quad (4.54)$$

Güç aynı zamanda Ohm Kanunu göre, $\dot{W} = I \cdot V$ eşittir ve buradan voltaj değeri, Denklem (4.55) olarak elde edilmektedir.

$$V = n \cdot [\alpha \cdot (T_h - T_c) + I \cdot R] \quad (4.55)$$

Yine Termodinamiğin I. Kanunu kullanılarak TES modülün soğutma performans katsayısı ($COP_{soğutma}$), Denklem (4.56) olarak belirlenmektedir (Lee 2017).

$$COP_{soğutma} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} = \frac{n \cdot \left[\alpha \cdot T_c \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot (T_h - T_c) \right]}{n \cdot [\alpha \cdot I \cdot (T_h - T_c) + I^2 \cdot R]} \quad (4.56)$$

TES modüllerde, soğutma hızını (\dot{Q}_c) maksimum yapan akım (I_{MP}) ve soğutma performans katsayısını ($COP_{soğutma}$) maksimum yapan akım (I_{COP}) olmak üzere iki ayrı akım tanımı yapılmaktadır. Bu ifadelerden \dot{Q}_c ifadesini maksimum yapan akım (I_{MP}), $\frac{d\dot{Q}_c}{dI} = 0$ matematiksel işlemi yapılmasıyla (4.57) ifadesi ve $COP_{soğutma}$ ifadesini maksimum yapan akım (I_{COP}) ise $\frac{d(COP)}{dI} = 0$ matematiksel işlemi yapılmasıyla Denklem (4.58) olarak bulunabilmektedir (Lee 2017).

$$I_{MP} = \frac{\alpha \cdot T_c}{R} \quad (4.57)$$

$$I_{COP} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{R \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} - 1 \right)} \quad (4.58)$$

(4.58) ifadesindeki $Z \cdot \bar{T}$ terimi, (4.59) ifadesiyle belirlenebilmektedir.

$$Z \cdot \bar{T} = Z \cdot T_h \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{2 \cdot T_h} \right) \quad (4.59)$$

4.1.2.1 TES modülün maksimum parametreleri

1-) Maksimum akım (I_{max}): TES modülde mümkün olan en yüksek sıcaklık farkını, yani $(\Delta T)_{max}$ üreten akımdır. Bu durum, her zaman $\dot{Q}_c = 0$ olduğunda gerçekleşir. (4.50) ifadesinde, $\dot{Q}_c = 0$ ve $T_c = T_h - \Delta T$ yerine yazılıp $\frac{d(\Delta T)}{dI} = 0$ matematiksel işlemi yapıldığında (4.60) ifadesi bulunur (Lee 2017).

$$I_{max} = \frac{\alpha}{R} \left[\sqrt{\left(T_h + \frac{1}{Z} \right)^2 - T_h^2} - \frac{1}{Z} \right] \quad (4.60)$$

2-) Maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{max}): Bu durum, soğutma hızının hiç olmadığı ve modüle verilen akımın maksimum olduğu durumda gerçekleştiği için (4.50) ifadesinde, $\dot{Q}_c = 0$ ve $I = I_{max}$ ifadeleri yazıldığında (4.61) ifadesi elde edilir.

$$\Delta T_{max} = \left(T_h + \frac{1}{Z} \right) - \sqrt{\left(T_h + \frac{1}{Z} \right)^2 - T_h^2} \quad (4.61)$$

(4.61) ifadesi yeniden düzenlenerek (4.60) ifadesinde yerine yazılırsa maksimum akım (I_{max}) ifadesi, Denklem (4.62) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$I_{max} = \frac{\alpha \cdot (T_h - \Delta T_{max})}{R} \quad (4.62)$$

3-) Maksimum soğutma yükü ($\dot{Q}_{c,max}$): Sıcaklık farkının hiç olmadığı ve modüle uygulanan akımın maksimum olduğu şartlarda elde edilen soğutma yüküdür. (4.50) ifadesinde $\Delta T = T_h - T_c = 0$ ve $I = I_{max}$ ifadeleri yerine yazılıp, gerekli matematiksel işlemler yapıldığında Denklem (4.63) olarak elde edilir.

$$\dot{Q}_{c,max} = \frac{n \cdot \alpha^2 \cdot (T_h^2 - \Delta T_{max}^2)}{2 \cdot R} \quad (4.63)$$

4-) Maksimum voltaj (V_{max}): TES modüle verilen akımın maksimum olduğu durumda ($I = I_{max}$), maksimum sıcaklık farkını (ΔT_{max}) veren DC voltajdır. (4.55) ifadesinde, Denklem (4.62) ve $\Delta T_{max} = T_h - T_c$ ifadesi yerine yazıldığında Denklem (4.64) olarak elde edilir (Lee 2017).

$$V_{max} = n \cdot \alpha \cdot T_h \quad (4.64)$$

4.1.2.2 TES parametrelerinin normalize edilmesi (boyutsuzlaştırılması)

Gerçek değerlerin, maksimum değerlere oranlanmasıyla TES'nun karakteristikleri normalize edilebilmektedir. Bu matematiksel işlemler yapıldığında normalize edilmiş parametreler $\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}$, $\frac{I}{I_{max}}$ ve $Z \cdot T_h$ ifadelerinin fonksiyonları olduğu görülmektedir (Denklem (4.66) – (4.68)). Bu üç parametreye bağlı olarak çizilen normalize edilmiş grafikler kullanılarak, TES modüllerin karakteristikleri yorumlanabilmekte ve performansları tahmin edilebilmektedir (Lee 2017).

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{c,max}} = \frac{n \cdot \left[\alpha \cdot (T_h - \Delta T) \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R - K \cdot \Delta T \right]}{\frac{n \cdot \alpha^2 \cdot (T_h^2 - \Delta T_{max}^2)}{2 \cdot R}} \quad (4.65)$$

(4.65) ifadesi, normalize edilmiş akım ve sıcaklık farkı türünden elde edilirse Denklem (4.66) bulunur.

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{c,max}} = \frac{2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h} \right) \cdot \frac{I}{I_{max}} - \left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h} \right) \cdot \left(\frac{I}{I_{max}} \right)^2}{1 + \frac{\Delta T_{max}}{T_h}} - \frac{2 \cdot \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h}}{Z \cdot T_h \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta T_{max}}{T_h} \right)^2 \right]} \quad (4.66)$$

(4.66) ifadesinde, $\frac{\Delta T_{max}}{T_h} = \left(1 + \frac{1}{Z \cdot T_h} \right) - \sqrt{\left(1 + \frac{1}{Z \cdot T_h} \right)^2 - 1}$ ifadesine eşittir.

Normalize edilmiş COP değeri Denklem (5.26) ve normalize edilmiş voltaj ise Denklem (5.27) olarak elde edilir (Lee 2017).

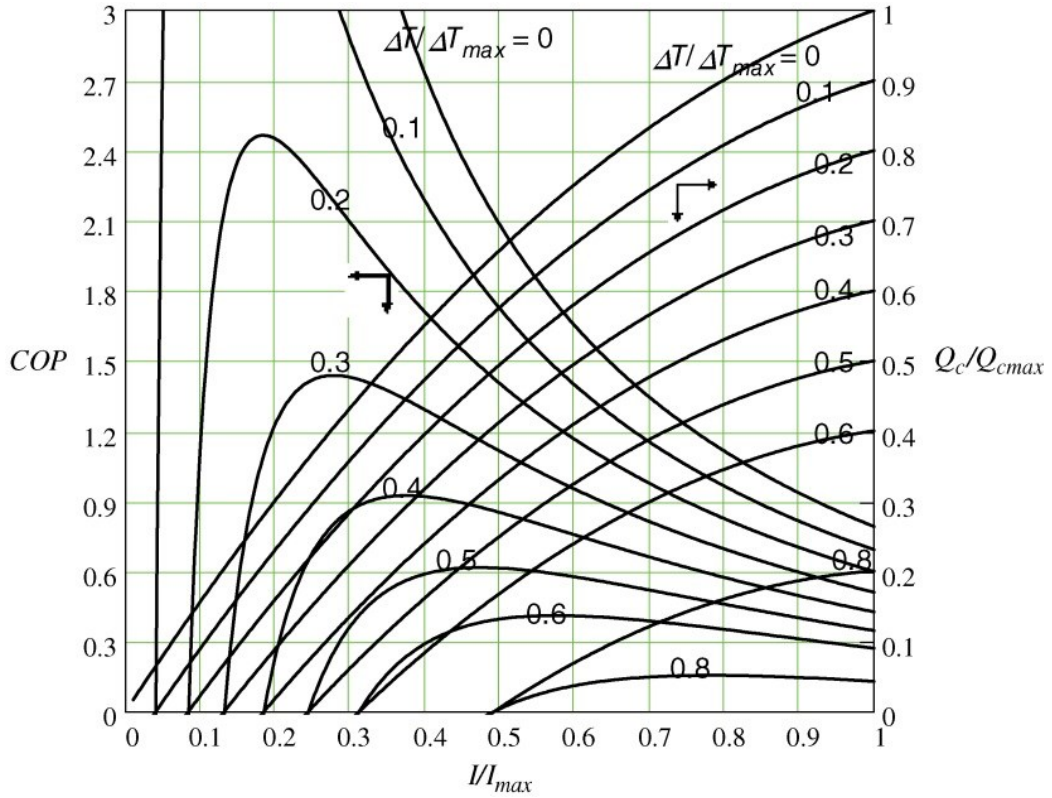
$$\frac{COP}{COP_{max}} = \frac{\left(1 - \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \frac{I}{I_{max}} - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \left(\frac{I}{I_{max}}\right)^2 - \frac{\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h}}{Z \cdot T_h \cdot \left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right)}}{\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h} \cdot \frac{I}{I_{max}} + \left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \left(\frac{I}{I_{max}}\right)^2} \quad (4.67)$$

$$\frac{V}{V_{max}} = \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h} + \left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \frac{I}{I_{max}} \quad (4.68)$$

Maksimum COP için normalize edilmiş akım, Denklem (4.69) ile belirlenir.

$$\frac{I_{COP}}{I_{max}} = \frac{\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} \cdot \frac{\Delta T_{max}}{T_h}}{\left(1 - \frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + Z \cdot \bar{T}} - 1\right)} \quad (4.69)$$

(4.69) ifadesinde, $Z \cdot \bar{T} = Z \cdot T_h \left(1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta T_{max}}{T_h}\right) \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}\right)\right)$ ifadesine eşittir.



Şekil 4.4: $Z \cdot T_h = 0,75$ değerine göre ΔT 'nin fonksiyonu olarak Q_c ve COP ifadelerinin akıma bağlı değişimleri incelenen bir TES modülün normalize edilmiş grafiği (Lee 2017)

4.1.2.3 TES'nun etkin malzeme özellikleri

TEJ'lerde olduğu gibi genelde TES üreticileri de ürettikleri ticari modüllerin maksimum parametre (I_{max} , V_{max} , ΔT_{max} ve $\dot{Q}_{c,max}$) değerlerini ürün kataloglarında vermekte ancak malzeme özelliklerini (Seebeck katsayısı (α), elektriksel özdirenci (ρ) ve ısı iletim katsayısı (k)) vermemektedirler. Bu durum, ideal denklemleri kullanarak çeşitli uygulamalar için TES modül veya sistem tasarlayan TE sistem tasarımcıları için problem oluşturmaktadır. Bununla birlikte TEJ'ün etkin malzeme özelliklerini tanımlarken bahsedilen zorluklar ve modüllerde görünen performans sapmaları, TES için de geçerlidir. Bu yüzden bu sorunları ortadan kaldırmak için Lee (2017) tarafından geliştirilmiş efektif (etkin) malzeme özellikleri, TES modüller için de tanımlanmıştır. TEJ'ün efektif malzeme özellikleri tanımlamasında olduğu gibi, TES modülün efektif malzeme özelliklerinin belirlenmesinde de modüllerin ürün kataloglarında verilen maksimum parametreler kullanılmıştır. TEJ'lerde olduğu gibi, TES'ların efektif malzeme özelliklerinin belirlenmesi için TES modülün maksimum parametrelerinden 3 tanesinin bilinmesi yeterlidir. TES modülün efektif malzeme özelliklerinin belirlenmesi için bu maksimum parametrelerden I_{max} ve ΔT_{max} kesinlikle gereklidir ve her durumda kullanılması gerekir. Fakat V_{max} ve $\dot{Q}_{c,max}$ opsiyoneldir ve ikisinden biri tercih edilebilir. Bu tez kapsamında TES modüllerin efektif malzeme özellikleri (ρ^{**} , α^{**} , Z^{**} ve k^{**}); I_{max} , ΔT_{max} ve $\dot{Q}_{c,max}$ maksimum parametreleri kullanılarak çıkartılmıştır. Son olarak elde edilen efektif malzeme özelliklerinin, elektriksel ve termal dirençleri, Thomson etkisini ve ısı kayıplarını içerdiklerine dikkat edilmeli ve bu malzeme özelliklerinin bir termoçiftin değeri oldukları da göz önünde bulundurulmalıdır. Sadece p veya n tipi termoelementin efektif malzeme özellikleri belirlenmek istenirse bu değerlerin ikiye bölünmesi gerektiği unutulmamalıdır (Lee 2017).

Efektif TE performans katsayısı, (4.61) ifadesi kullanılarak Denklem (4.70) olarak elde edilmiştir.

$$Z^{**} = \frac{2 \cdot \Delta T_{max}}{(T_h - \Delta T_{max})^2} \quad (4.70)$$

Efektif Seebeck katsayısı, (4.62) ve (4.63) ifadeleri kullanılarak Denklem (4.71) olarak belirlenmiştir (Lee 2017).

$$\alpha^{**} = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{c,max}}{n \cdot I_{max} \cdot (T_h + \Delta T_{max})} \quad (4.71)$$

Efektif elektriksel özdirenç, (4.62) ifadesi kullanılarak Denklem (4.72) olarak elde edilmiştir.

$$\rho^{**} = \frac{\alpha^{**} \cdot (T_h - \Delta T_{max}) \cdot \frac{A}{l}}{I_{max}} \quad (4.72)$$

Son olarak da efektif ısı iletim katsayısı, TE performans katsayısının genel formülünde efektif malzeme özellikleri yazılarak, Denklem (4.73) olarak belirlenmiştir.

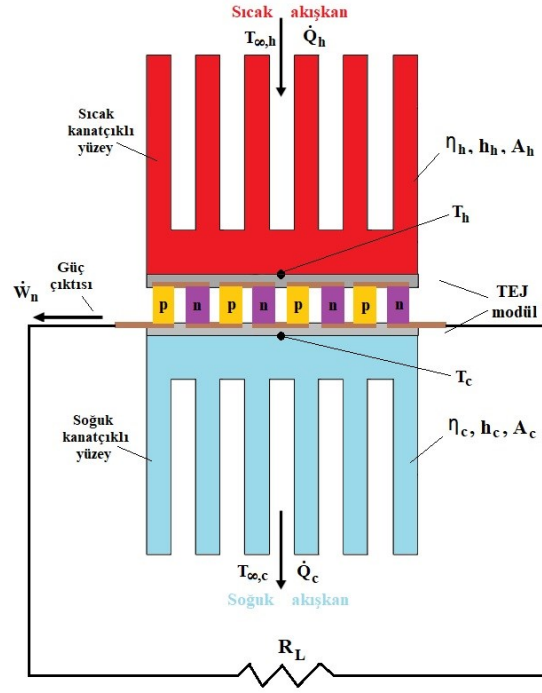
$$k^{**} = \frac{(\alpha^{**})^2}{\rho^{**} \cdot Z^{**}} \quad (4.73)$$

4.2 TEJ ve TES Sistemlerin Optimum Tasarım Parametreleri

TE sistemlerin optimum tasarımı, TE modülün her iki yüzeyinde bulunan ısı kuyularını da içerecek şekilde boyut analiz (boyutsuzlaştırma) yöntemi kullanılarak yapılabilmektedir. Bu yöntemi geliştiren Lee (2017), TE modüllerin ideal denklemleri ve Termodinamiğin Kanunlarını kullanarak hem TEJ hem de TES sistemlerin optimizasyonu için önemli boyutsuz parametreleri tanımlamıştır. Tanımlanan bu önemli boyutsuz parametreler, TE sistemlerin optimum tasarımı için verimlilik, güç, akım, geometri, termoçift sayısı ve ısı kuyularının etkilerini içerecek şekilde geliştirilmiştir. Bu bölümde, Lee (2017) tarafından geliştirilen ve TE sistemlerin optimizasyonu için kullanılan önemli boyutsuz parametrelerin tanımlanması ve tanımlanan bu önemli boyutsuz parametreler ile TE sistemlerin optimum tasarımlarının geliştirilmesi hakkında bilgiler verilmiştir.

4.2.1 TEJ sistemlerin optimum tasarım parametreleri

TEJ sistemlerinin optimum tasarımı, TEJ modül ve modülün her iki yüzeyinde bulunan ısı kuyularına bağlıdır. Bunun için Şekil 4.5’de gösterildiği gibi bir TEJ modül ve modülün iki yüzeyinde kanatçıklı yüzeylere sahip TEJ sistemi aşağıda yapılan kabullerle birlikte dikkate alınsın.



Şekil 4.5: İki kanatçıklı yüzeyi bulunan TEJ sistem

Kabuller;

- 1-) TEJ sistem sürekli rejim şartlarında çalıştırılmaktadır.
- 2-) Sistemdeki termal ve elektriksel temas dirençleri ihmal edilmektedir.
- 3-) Sistemdeki malzeme özellikleri sıcaklıktan bağımsızdır.
- 4-) Sistem mükemmel bir şekilde yalıtılmıştır.

Bu şekilde çalışan bir TEJ sistemde sıcak ısı kuyusundan geçen ısı hızı (\dot{Q}_h), Newton'un Soğuma Kanunu kullanılarak Denklem (4.74) olarak yazılabilir. Sürekli şartlarda aynı \dot{Q}_h ısı hızı, TEJ modülün sıcak yüzeyine gelir ve büyüklüğü Bölüm 4.1.1'de çıkartılan ideal denklemler kullanılarak (4.75) ifadesiyle belirlenir. Benzer şekilde soğuk taraftan geçen ısı hızı (\dot{Q}_c), Newton'un Soğuma Kanunu kullanılarak, Denklem (4.77) olarak yazılabilir ve sürekli şartlarda \dot{Q}_c ısı hızı, TEJ modülün soğuk yüzeyine geleceği için büyüklüğü ideal denklemler kullanılarak (4.76) ifadesiyle elde edilir. Bu şekilde TEJ modülün iki yüzeyi arasında bir sıcaklık farkı oluşturulduğunda, TEJ modülden bir miktar güç (\dot{W}_n) elde edilir ve bu modülden üretilen akım miktarı ise ideal denklemler kullanılarak (4.78) ifadesiyle belirlenir. Bu ifadelerde η = kanatçık verimini, h = ısı taşınım katsayısını ($W/m^2.K$) ve T_∞ = çevre sıcaklığını (K) ifade etmektedir. Aynı zamanda TEJ modül p ve n tipi termoçiftlerden oluştuğu için $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$, $k = k_p + k_n$ ve $\rho = \rho_p + \rho_n$ eşitliklerinin olduğu unutulmamalıdır (Lee 2017).

$$\dot{Q}_h = \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot (T_{\infty,h} - T_h) \quad (4.74)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha \cdot T_h \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \frac{A \cdot k}{l} \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.75)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha \cdot T_c \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \frac{A \cdot k}{l} \cdot (T_h - T_c) \right] \quad (4.76)$$

$$\dot{Q}_c = \eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot (T_c - T_{\infty,c}) \quad (4.77)$$

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_h - T_c)}{R_L + R} \quad (4.78)$$

(4.74) - (4.78) denklemleri kullanılarak T_h ve T_c modül yüzeylerinin sıcaklıkları belirlenebilir. Bu sıcaklıklar, ideal denklemlerde çıkartılan akım, voltaj ve güç ifadelerinde yerlerine yazılarak TEJ modülden üretilen bütün elektriksel büyüklükler elde edilebilir. Ancak TEJ sistemin optimizasyonu yapılması gerektiğinde bazı önemli boyutsuz parametreler tanımlanmalıdır. Sistemin boyutsuz parametreleri, soğuk akışkan geçen ortamın taşınım kondüktansına ($\eta_c \cdot h_c \cdot A_c$) göre elde edilebilmektedir. Bu bağlamda (4.79) ifadesinde ısı kondüktans, soğuk yüzeyin taşınım kondüktansına göre boyutsuzlaştırılarak, N_k boyutsuz parametresi tanımlanmıştır. Benzer şekilde (4.80) ifadesinde sıcak yüzeyin taşınım kondüktansı, soğuk yüzeyin taşınım kondüktansına göre boyutsuzlaştırılarak, N_h boyutsuz parametresi ve son olarak da (4.81) ifadesindeki yük direnci TEJ modülün iç direncine göre boyutsuzlaştırılarak, R_r boyutsuz parametresi tanımlanmıştır. Bu boyutsuz parametrelere ek olarak boyutsuz sıcaklıklar da (4.82), (4.83) ve (4.84) ifadelerindeki gibi tanımlanmıştır (Lee 2017).

$$N_k = \frac{\text{ısı kondüktans}}{\text{soğuk yüzey taşınım kondüktans}} = \frac{n \cdot \left(\frac{A \cdot k}{l} \right)}{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c} \quad (4.79)$$

$$N_h = \frac{\text{sıcak yüzey taşınım kondüktansı}}{\text{soğuk yüzey taşınım kondüktansı}} = \frac{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h}{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c} \quad (4.80)$$

$$R_r = \frac{\text{yük direnci}}{\text{TEJ modülün iç direnci}} = \frac{R_L}{R} \quad (4.81)$$

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_{\infty,c}} \quad (4.82)$$

$$T_c^* = \frac{T_c}{T_{\infty,c}} \quad (4.83)$$

$$T_{\infty}^* = \frac{T_{\infty,h}}{T_{\infty,c}} \quad (4.84)$$

Yukarıda tanımlanan boyutsuz parametre ifadelerinden sonra sıcak ve soğuk yüzeylerden geçen boyutsuz ısı hızları da sırasıyla, Denklem (4.85) ve (4.86) olarak tanımlanabilir. Termodinamiğin I. Kanununa göre bu ifadelerden elde edilebilen boyutsuz güç çıktısı ise Denklem (4.87)'deki gibi yazılabilmektedir (Lee 2017).

$$Q_h^* = \frac{Q_h}{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot T_{\infty,c}} \quad (4.85)$$

$$Q_c^* = \frac{Q_c}{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot T_{\infty,c}} \quad (4.86)$$

$$W_n^* = \frac{W_n}{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot T_{\infty,c}} \quad (4.87)$$

(4.79) - (4.84) ifadelerinde tanımlanan boyutsuz parametreler, (4.74) - (4.77) ifadelerinde yerine yazıldıktan sonra (4.74) ile (4.75) ve (4.76) ile (4.77) denklemleri birbirlerine eşitlendiğinde, bu ifadeler boyutsuz parametreler cinsinden Denklem (4.88) ve (4.89) olarak elde edilebilmektedir (Lee 2017).

$$\frac{N_h \cdot (T_{\infty}^* - T_h^*)}{N_k} = \frac{Z \cdot T_{\infty,c} \cdot (T_h^* - T_c^*) \cdot T_h^*}{R_r + 1} - \frac{Z \cdot T_{\infty,c} \cdot (T_h^* - T_c^*)^2}{2 \cdot (R_r + 1)^2} + (T_h^* - T_c^*) \quad (4.88)$$

$$\frac{T_c^* - 1}{N_k} = \frac{Z \cdot T_{\infty,c} \cdot (T_h^* - T_c^*) \cdot T_c^*}{R_r + 1} + \frac{Z \cdot T_{\infty,c} \cdot (T_h^* - T_c^*)^2}{2 \cdot (R_r + 1)^2} + (T_h^* - T_c^*) \quad (4.89)$$

(4.88) ve (4.89) ifadelerinin T_h^* ve T_c^* boyutsuz sıcaklıkları için çözümlenebilmesi, matematiksel olarak mümkündür ve bu boyutsuz sıcaklıklar diğer boyutsuz parametrelerin fonksiyonudur (Denklem (4.90) ve (4.91)).

$$T_h^* = f(N_k, N_h, R_r, T_{\infty}^* \text{ ve } Z \cdot T_{\infty,c}) \quad (4.90)$$

$$T_c^* = f(N_k, N_h, R_r, T_{\infty}^* \text{ ve } Z \cdot T_{\infty,c}) \quad (4.91)$$

(4.90) ve (4.91) ifadelerindeki, T_{∞}^* problemin bir girdisi ve $Z \cdot T_{\infty,c}$ malzeme özeliği olarak bilindiğinden dolayı TEJ sistemlerin optimizasyon işlemi; N_k , N_h ve R_r boyutsuz parametrelerine bağlı olarak iterasyon yapılarak elde edilir. Bu optimizasyon işlemi

yapıldığında, ilk başta tahmin edilen başlangıç değerlerine göre N_k ve R_r boyutsuz parametrelerinin optimum değeri bulunurken, N_h boyutsuz parametresinin optimum bir değerinin olmadığı görülür. N_h değeri arttıkça, boyutsuz güç çıktısı (W_n^*) değeri monoton olarak artmaktadır. Bu durum, bir N_h değeri için optimum N_k ve R_r değerlerinin elde edilebileceğini işaret etmektedir. Ayrıca N_h değeri için bazı uygulanabilir mekanik kısıtlamalar söz konusudur. Bu sebeple probleme uygun makul bir N_h değeri için W_n^* değerini maksimum yapacak olan N_k ve R_r bulunur. N_h değeri değiştirilerek en elverişli çözümler yapılır. Kısaca TEJ sistemlerinin genel olarak optimizasyonunda; N_k , N_h ve R_r boyutsuz parametrelerinin optimum değerlerine bağlı olarak, T_h^* ve T_c^* değerleri bulunur. Ardından bulunan T_h^* ve T_c^* boyutsuz parametrelerin değerleri, (4.92) - (4.95) ifadelerinde yerine yazılır ve istenilen ifadenin maksimum değeri bulunarak optimizasyon işlemi tamamlanır. Son olarak da optimize edilen ifade, (4.85) - (4.87) denklemleri kullanılarak tekrar boyutlu hale dönüştürülür ve gerçekleştirilen TEJ sistemin optimum değerleri belirlenir (Lee 2017).

$$Q_h^* = N_h \cdot (T_\infty^* - T_h^*) \quad (4.92)$$

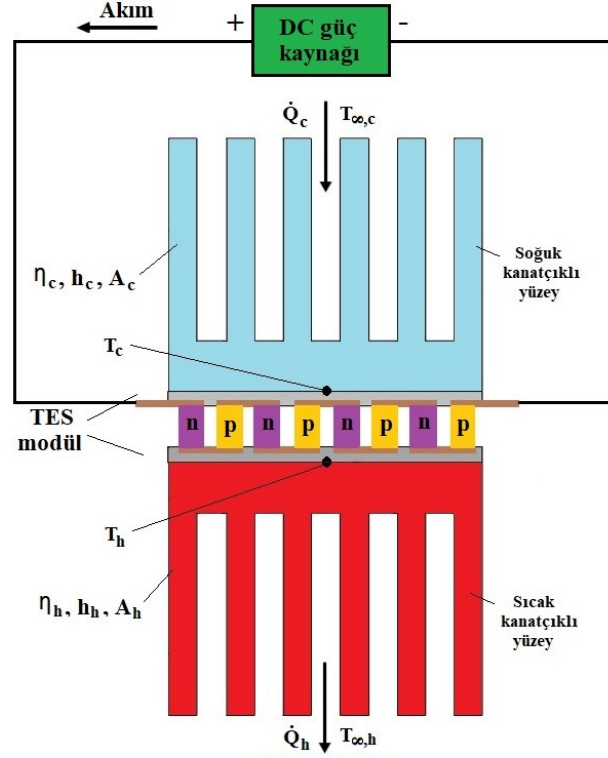
$$Q_c^* = T_c^* - 1 \quad (4.93)$$

$$W_n^* = Q_h^* - Q_c^* \quad (4.94)$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n^*}{Q_h^*} \quad (4.95)$$

4.2.2 TES sistemlerin optimum tasarım parametreleri

TEJ modül ve modülün her iki yüzeyinde kanatçıklı yüzey bulunduran TEJ sistemlerin optimum tasarımının nasıl yapıldığı bir önceki bölümde detaylı bir şekilde açıklanmıştır. TEJ sistemlere benzer şekilde, TES modül ve modülün her iki yüzeyinde kanatçıklı yüzey bulunan TES sistemlerinin de optimum tasarımı yapılabilmektedir. Bunun için Şekil 4.6 ve aşağıda yapılan kabuller dikkate alınmıştır.



Şekil 4.6: İki kanatçıklı yüzeyi bulunan TES sistem

Kabuller;

- 1-) TES sistem sürekli rejim şartlarında çalıştırılmaktadır.
- 2-) Sistemdeki termal ve elektriksel temas dirençleri ihmal edilmektedir.
- 3-) Sistemdeki malzeme özellikleri sıcaklıktan bağımsızdır.
- 4-) Sistem mükemmel bir şekilde yalıtılmıştır.

Bu şekilde çalışan TES bir sistemde, TES modüle bir DC voltaj uygulandığında veya bir güç harcandığında, TES modülün içinde bulunan p ve n tipi yarı iletken malzemelerin özelliklerinden dolayı uygulanan gerilimin yönüne ve büyüklüğüne bağlı olarak modülün bir yüzeyinde ısı çekilerek (\dot{Q}_c), soğuma gerçekleşir. Modülün diğer yüzeyinde ise çekilen bu soğutma ısı hızı (\dot{Q}_c) ile modülde harcanan elektriksel gücün (\dot{W}) toplamı kadar (Termodinamiğin I. Yasasına göre) ısı atılarak (\dot{Q}_h), ısıtma gerçekleştirilir. Bu soğutma ve ısıtma güçlerinin büyüklüğü, Bölüm 4.1.2 belirtilen ideal denklemler kullanılarak sırasıyla, (4.97) ve (4.98) ifadeleriyle belirlenir. TES sistemde TES modülün soğuk yüzeyi, soğuk kanatçıklı yüzeyle temas ettiği için soğutma ısı hızı Newton'un Soğuma Kanunu kullanılarak Denklem (4.96)'daki gibi yazılabilmektedir. Benzer şekilde ısıtma ısı hızı Newton'un Soğuma Kanunu'ndan, Denklem (4.99) olarak ifade edilebilmektedir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_c = \eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot (T_{\infty,c} - T_c) \quad (4.96)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha \cdot T_c \cdot l - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \frac{A \cdot k}{l} \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.97)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha \cdot T_h \cdot l + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + \frac{A \cdot k}{l} \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.98)$$

$$\dot{Q}_h = \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot (T_h - T_{\infty,h}) \quad (4.99)$$

(4.96) - (4.99) denklemleri kullanılarak TES modül yüzeylerinin sıcaklıkları olan T_h ve T_c belirlenebilir. Bu sıcaklıklar, elde edilen ideal denklemlerde yerlerine yazılarak TES modülün performans değerleri elde edilebilir. Ancak TES sisteminin optimizasyonunun yapılması gerektiğinde bazı önemli boyutsuz parametreler tanımlanmalıdır. Sistemin bu boyutsuz parametreleri, TEJ sistemlerden farklı olarak ısı atılan ortamın taşınım kondüktansına ($\eta_h \cdot h_h \cdot A_h$) göre elde edilebilmektedir. Bu bağlamda TES sistemler için önemli boyutsuz parametreler (4.100) - (4.105) ifadelerinde tanımlanmıştır. TEJ sistemlerdeki boyutsuz R_r parametresi yerine, TES sistemlerde boyutsuz akım parametresi (N_I) tanımlanmaktadır (Lee 2017).

$$N_k = \frac{\text{ısı kondüktans}}{\text{sıcak yüzey taşınım kondüktans}} = \frac{n \cdot \left(\frac{A \cdot k}{l} \right)}{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h} \quad (4.100)$$

$$N_h = \frac{\text{soğuk yüzey taşınım kondüktansı}}{\text{sıcak yüzey taşınım kondüktansı}} = \frac{\eta_c \cdot h_c \cdot A_c}{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h} \quad (4.101)$$

$$N_I = \frac{\alpha \cdot l}{\frac{A \cdot k}{l}} \quad (4.102)$$

$$T_c^* = \frac{T_c}{T_{\infty,h}} \quad (4.103)$$

$$T_h^* = \frac{T_h}{T_{\infty,h}} \quad (4.104)$$

$$T_{\infty}^* = \frac{T_{\infty,c}}{T_{\infty,h}} \quad (4.105)$$

Yukarıda tanımlanan boyutsuz ifadelerin ardından soğuk ve sıcak yüzeylerden çekilen ve atılan ısılar, sırasıyla Denklem (4.106) ve (4.107)'de ve boyutsuz soğutma gücü ise Denklem (4.108)'de tanımlanmaktadır (Lee 2017).

$$Q_c^* = \frac{Q_c}{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h}} \quad (4.106)$$

$$Q_h^* = \frac{Q_h}{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h}} \quad (4.107)$$

$$\dot{W}^* = \frac{\dot{W}}{\eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h}} \quad (4.108)$$

(4.100) - (4.105) ifadelerinde tanımlanan boyutsuz parametreler, (4.96) - (4.99) ifadelerinde yerine yazıldıktan sonra (4.96) ile (4.97) ve (4.98) ile (4.99) denklemleri birbirlerine eşitlendiğinde, bu ifadeler boyutsuz parametreler cinsinden Denklem (4.109) ve (4.110) olarak elde edilebilmektedirler (Lee 2017).

$$\frac{N_h \cdot (T_{\infty}^* - T_c^*)}{N_k} = N_I \cdot T_c^* - \frac{(N_I)^2}{2 \cdot Z \cdot T_{\infty,h}} + (T_c^* - T_h^*) \quad (4.109)$$

$$\frac{T_h^* - 1}{N_k} = N_I \cdot T_h^* + \frac{(N_I)^2}{2 \cdot Z \cdot T_{\infty,h}} + (T_c^* - T_h^*) \quad (4.110)$$

(4.109) ve (4.110) ifadelerinin T_h^* ve T_c^* boyutsuz sıcaklıkları için çözümlenebilmesi, matematiksel olarak mümkündür ve bu boyutsuz sıcaklıklar diğer boyutsuz parametrelerin fonksiyonudur (Denklem (4.111) ve (4.112)).

$$T_c^* = f(N_k, N_h, N_I, T_{\infty}^* \text{ ve } Z \cdot T_{\infty,h}) \quad (4.111)$$

$$T_h^* = f(N_k, N_h, N_I, T_{\infty}^* \text{ ve } Z \cdot T_{\infty,h}) \quad (4.112)$$

TEJ sistemdeki duruma benzer olarak (4.111) ve (4.112) ifadelerindeki, T_{∞}^* problemin bir girdisi ve $Z \cdot T_{\infty,h}$ malzeme özeliği olarak bilindiğinden dolayı TES sistemlerin optimizasyon işlemi; N_k , N_h ve N_I boyutsuz parametrelerine bağlı olarak iterasyon yapılarak elde edilir. Bu optimizasyon işlemi yapıldığında N_k ve N_I değerlerin optimum değeri bulunurken, N_h değerinin optimum bir değeri olmadığı görülür ve N_h değeri arttıkça Q_c^* değeri monoton olarak artmaktadır. Ayrıca N_h değeri için bazı uygulanabilir mekanik kısıtlamalar söz konusudur. Bu sebeple probleme uygun makul bir N_h değeri için Q_c^* 'yi

maksimum yapan N_k ve N_I bulunur. N_h değeri değiştirilerek en elverişli çözümler yapılır. Kısaca, TES sistemlerin genel olarak optimizasyonu; N_k , N_h ve N_I boyutsuz parametrelerinin optimum değerlerine bağlı olarak, T_h^* ve T_c^* değerleri bulunur. Ardından bulunan T_h^* ve T_c^* boyutsuz parametrelerinin değerleri, (4.113) - (4.116) ifadelerinde yerlerine yazılır ve istenilen ifadenin maksimum değeri bulunarak optimizasyon işlemi tamamlanır. Son olarakta optimize edilen ifade, (4.106) - (4.108) denklemleri kullanılarak tekrar boyutlu hale dönüştürülür ve böylece TES sisteminin optimum değerleri belirlenir (Lee 2017).

$$Q_c^* = N_h \cdot (T_{\infty}^* - T_c^*) \quad (4.113)$$

$$Q_h^* = T_h^* - 1 \quad (4.114)$$

$$\dot{W}^* = Q_h^* - Q_c^* \quad (4.115)$$

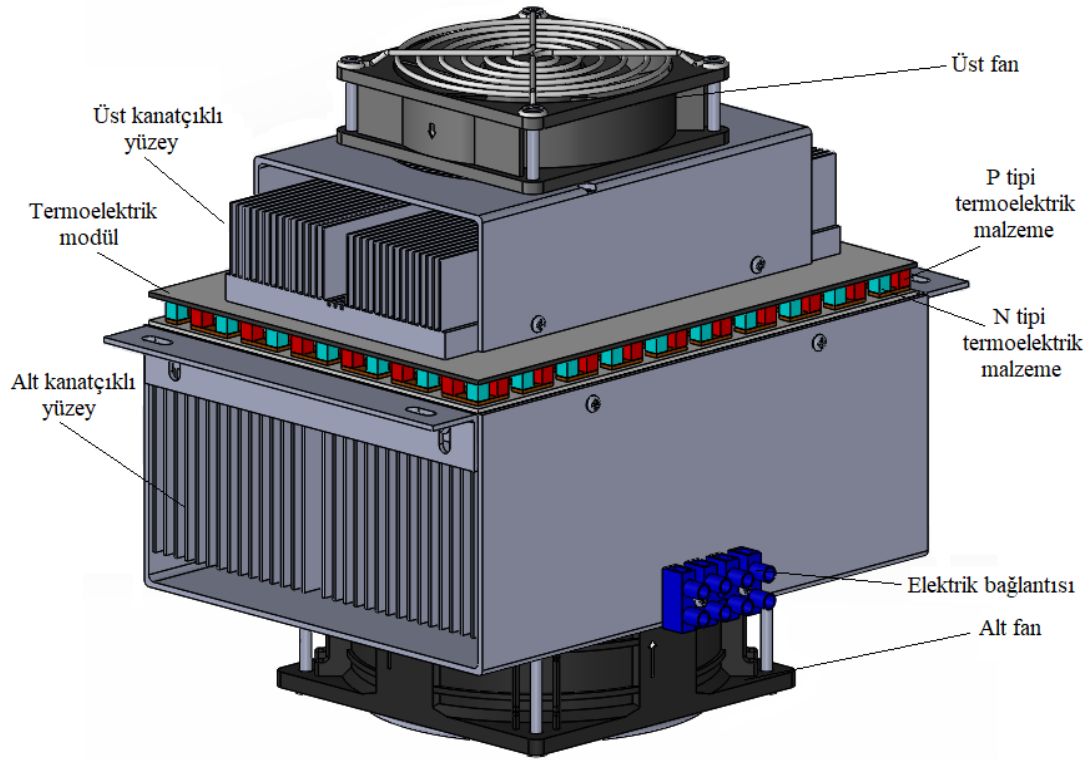
$$COP_{soğutma} = \frac{Q_c^*}{\dot{W}^*} \quad (4.116)$$

TES sistemlerde boyutsuz voltaj, Denklem (4.117)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$N_V^* = \frac{V}{n \cdot \alpha \cdot T_{\infty,h}} = \frac{\dot{W}^*}{N_I \cdot N_k} \quad (4.117)$$

4.3 Termoelektrikli Kuvöz Sistemi İçin Optimum Termoelektrik Isı Pompası Sisteminin Matematiksel Modellemesi

Termoelektrik ısı pompası sistemi, aslında kendi içerisinde TES modül, termoelektrik modül üzerinde bulunan kanatçıklı yüzeyler ve kanatçıklı yüzeylerin üzerinde bulunan fanlardan oluşan komplike bir sistemdir (Şekil 4.7). Dolayısıyla kuvöz için gerekli olan maksimum ısıtma ve soğutma parametrelerine bağlı olarak, termoelektrik ısı pompası sistemi için en uygun TES modülün seçilmesi, modülün optimum akım ve güç çıktılarının ayarlanması, optimum kanatçıklı yüzeylerin hesaplanarak belirlenmesi, optimum fan debilerin tespit edilmesi ve bütün bu parametrelerin sonucunda kuvöz sistemine verilmesi gereken toplam ısıtma/soğutma gücünün (\dot{Q}_{thp}) belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.7: Termoelektrik ısı pompası sisteminin alt parçaları (Yeler ve Koseoglu 2020)

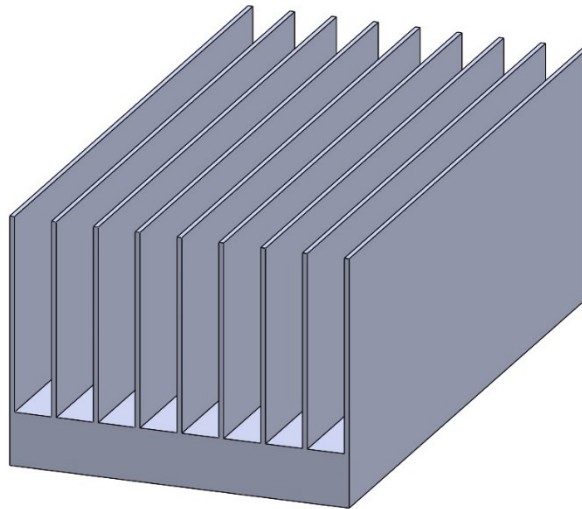
TE sistemle çalıştırılması planlanan ısı pompası sisteminin matematiksel modellenmesi için temel fizik yasaları kullanılarak elde edilen TE modüllere ait ideal denklemler ve performans parametreleri Bölüm 4.1’de belirtildi. Ardından TE sistemlerin kendilerinden beklenen performansları optimum olarak sağlayabilmesi için TE modül ve modülün yüzeylerinde bulunan kanatçıklı yüzeyleri içine alacak şekilde matematiksel modellenmesi de Bölüm 4.2’de gerçekleştirilerek optimum parametrelerin belirlenmesinde kullanılan önemli boyutsuz parametreler tanımlandı. Bu bölümde ise tez konusu olan prematüre bebek kuvzünde gerekli olan ısıtma ve soğutmayı optimum şekilde sağlayan TE ısı pompası sisteminin ve bütün alt parçalarının detaylı bir şekilde modellenmesi yapılmıştır. Bunun için öncelikle ısı pompası sisteminde kullanılan ısı kuyularının modellenmesi yapılmış ve ısı kuyularının optimum parametrelerini ifade eden matematiksel denklemler çıkartılmıştır. Ardından optimum ısı kuyularının matematiksel denklemleri ile TES sistemlerinin optimum parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan matematiksel denklemleri bir araya getirilerek, kuvöz sisteminde kullanılan TE ısı pompası sisteminin optimizasyonu sağlayan model geliştirilmiştir.

4.3.1 Termoelektrik ısı pompası sisteminde kullanılan ısı kuyularının modellenmesi

Prematüre bebeğin ihtiyaç duyduğu nötral ortam sıcaklığının kuvöz içerisinde sağlanabilmesi ve oluşabilecek sağlık problemlerinin en aza indirilebilmesi için kuvöz içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmelidir. Bunun için TE ısı pompası sistemi, gerekli olan sıcaklığı çok hızlı bir şekilde kuvöz içerisinde sağlamalıdır. TE ısı pompası sistemi istenilen sıcaklığı, TES modülün her iki yüzeyinde bulunan ısı kuyuları (kanatçıklı yüzeyler + fan) vasıtasıyla gerekli ısıyı hızlı bir şekilde sağlayarak başarabilmektedir. Dolayısıyla optimum soğutma veya ısıtma gücü için kanat malzemesi, kanat geometrisi ve fan hızlarının belirlenmesi çok önemlidir. Bu nedenle kanatçıklı yüzeyler ve fanlar için probleme uyumlu mantıklı kabuller yapılarak, bu sistemlerin matematiksel modellenmesi yapılmıştır.

4.3.1.1 Kanatçıklı yüzeylerin modellenmesi

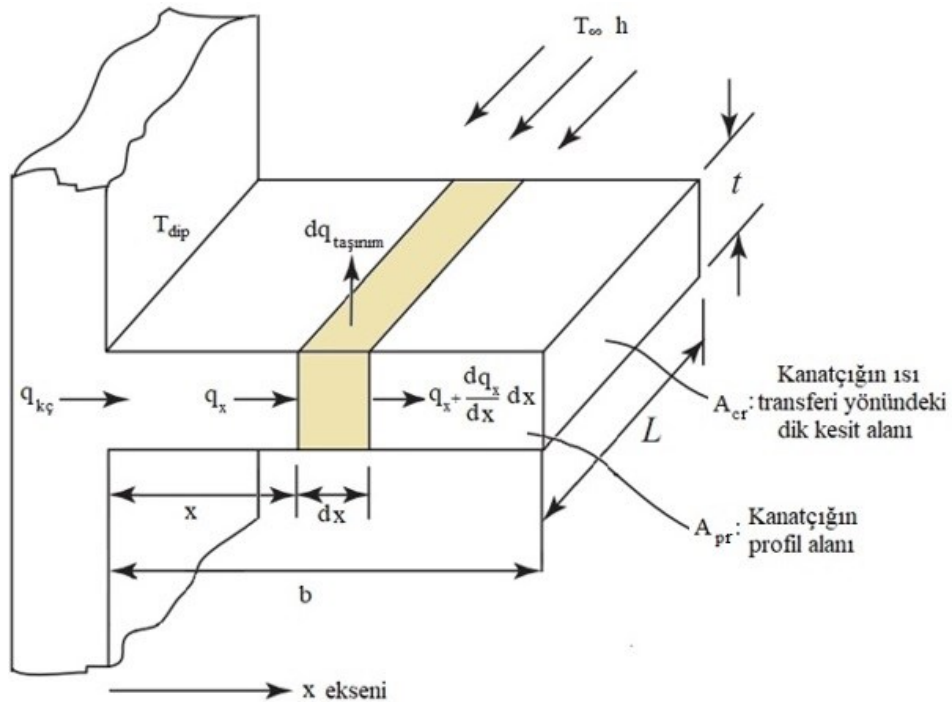
Kanatçıklı yüzey (ısı kuyusu), farklı tiplerdeki genişletilmiş yüzeyleri kullanarak, çevre ortamından ısı enerjisini etkin bir şekilde absorbe eden veya dağıtan (yayan) cihazlardır. Genelde kanatçık yüzey profilleri, aksenel ve radyal olmak üzere ikiye ayrılır. Aksenel kanatçık profilleri de kendi içinde dikdörtgen, üçgen ve parabolik kanatçıklı yüzeyler olmak üzere üçe ayrılır. Bunlardan dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeyler, üretimlerinin kolay olması ve verimli bir şekilde ısı transferi sağlaması sebebiyle birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Dikdörtgen kesitli kanatçık profili

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeylerin optimum tasarımı, zorlanmış taşınım durumu için yapılmıştır. Bu durum için kanatçık yüksekliği b , kanatçık genişliği L ve kanatçık kalınlığı t olan dikdörtgen kesitli bir kanatçıklı yüzeyin tek bir kanatçığının üzerinden, dx kalınlığında diferansiyel bir kontrol elemanı dikkate alınmaktadır (Şekil 4.9). Aşağıdaki kabullere göre bu kontrol elemanı için sürekli şartlarda enerji dengesi, Denklem (4.118)'deki gibi yazılabilir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

- Dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeylerde genellikle kanatçık kalınlığı (t), kanatçık yüksekliğinin (b) yanında çok küçük olduğundan kalınlık boyunca sıcaklık değişimi ihmal edilebilir. Bu yüzden sıcaklığın sadece kanatçık yüksekliği (b) boyunca, x ekseninde değiştiği kabul edilmiştir.
- Kanatçıklı yüzeyler içerisinde ısı üretimi yoktur.
- Kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısı (k), sıcaklıkla değişmediği varsayılarak sabit olarak alınmıştır.
- Isı taşınım katsayısı (h), kanatçığın bütün yüzeylerinde sabit ve üniform olduğu kabul edilmiştir.
- Kanatçık dip sıcaklığı (T_{dip}) sabittir ve akışkan sıcaklığı (T_{∞}) tüm kanatçık yüzeyi boyunca sabittir.



Şekil 4.9: Dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeyde ısı transferi

$$\begin{pmatrix} x \text{ mesafesinde} \\ \text{kontrol elemanına} \\ \text{iletimle giren ısı} \\ \text{transfer hızı} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + dx \text{ mesafesinde} \\ \text{kontrol elemanından} \\ \text{iletimle çıkan ısı} \\ \text{transfer hızı} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{Kontrol elemanından} \\ \text{taşınım ile çıkan ısı} \\ \text{transfer hızı} \end{pmatrix} \quad (4.118)$$

Bu kontrol elemanı için P: kanatçık kesitinin çevre uzunluğu (m), A_{cr} : kanatçığın ısı transferi yönündeki dik kesit alanı (m^2) ve $A_{kç}$: kanatçığın dış yüzey alanı olarak tanımlanmakta ve ifadeleri sırasıyla, Denklem (4.119), (4.120) ve (4.121)'deki gibidir.

$$P = 2 \cdot L + 2 \cdot t \quad (4.119)$$

$$A_{cr} = L \cdot t \quad (4.120)$$

$$A_{kç} = P \cdot dx \quad (4.121)$$

Denklem (4.118)'deki sözel ifadenin matematiksel hali Denklem (4.122)'deki gibidir:

$$\dot{Q}_x = \dot{Q}_{x+dx} + \dot{Q}_{taşınım} \quad (4.122)$$

Isı transferinin temel kanunları olan Fourier Kanunu ve Newton'un Soğuma Kanunundan yararlanılarak, (4.122) ifadesinde (4.123), (4.124) ve (4.125) ifadeleri yerine yazılırsa Denklem (4.126) elde edilir.

$$\dot{Q}_x = -k \cdot A_{cr} \cdot \frac{dT}{dx} \quad (4.123)$$

$$\dot{Q}_{x+dx} = \dot{Q}_x + \frac{d\dot{Q}_x}{dx} \cdot dx = -k \cdot A_{cr} \cdot \frac{dT}{dx} - k \cdot A_{cr} \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \cdot dx \quad (4.124)$$

$$\dot{Q}_{taşınım} = h \cdot A_{kç} \cdot (T - T_{\infty}) = h \cdot P \cdot dx \cdot (T - T_{\infty}) \quad (4.125)$$

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}} \cdot (T - T_{\infty}) = 0 \quad (4.126)$$

(4.126) ifadesindeki diferansiyel denkleminin çözümü için, (4.127) ve (4.128) ifadelerindeki sınır şartları yazılabilmektedir.

$$T(0) = T_{dip} \quad (4.127)$$

$$h \cdot A_{cr} \cdot (T(b) - T_{\infty}) = -k \cdot A_{cr} \cdot \frac{dT(b)}{dx} \quad (4.128)$$

Matematiksel işlem kolaylığı için $\theta = T - T_\infty$ dönüşümü yapılırsa (4.126) ifadesi, (4.129) ifadesi olarak yazılabilmekte ve yapılan dönüşüm sonucunda (4.127) ve (4.128) ifadelerindeki sınır şartları, Denklem (4.130) ve (4.131)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}} \cdot \theta = 0 \quad (4.129)$$

$$\theta(0) = \theta_b \quad (4.130)$$

$$h \cdot \theta(b) = -k \cdot \frac{d\theta(b)}{dx} \quad (4.131)$$

(4.130) ve (4.131) ifadelerinde, $\theta_b = T_{dip} - T_\infty$ eşitliği söz konusudur. Denklem (4.132)'de belirtilen eşitliğin Denklem (4.129)'da kullanılmasıyla elde edilen diferansiyel denklemin genel çözümü, Denklem (4.133)'deki gibi olmaktadır.

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}}} \quad (4.132)$$

$$\theta(x) = C_1 \cdot e^{m \cdot x} + C_2 \cdot e^{-m \cdot x} \quad (4.133)$$

(4.133) ifadesindeki C_1 ve C_2 terimleri, integral sabitleridir. Denklemler (4.130) ve (4.131)'deki sınır şartları kullanılarak bu integral sabitleri belirlenmekte ve böylelikle de kanatçığa ait sıcaklık dağılımı Denklem (4.134)'de gösterdiği gibi olmaktadır (Lee 2010).

$$\theta = \theta_b \cdot \frac{\cosh m \cdot (b - x) + \frac{h}{m \cdot k} \cdot \sinh m \cdot (b - x)}{\cosh m \cdot b + \frac{h}{m \cdot k} \cdot \sinh m \cdot b} \quad (4.134)$$

Kanatçığın sıcaklık dağılımı bulunduğundan sonra Şekil 4.9'da gösterildiği gibi bir kanatçıktan iletimle olan ısı transferi ($q_{k\zeta}$), (4.135) ifadesinin matematiksel çözümü yapılarak Denklem (4.136) olarak elde edilir. Aynı zamanda kanatçıktan iletimle olan ısı transfer hızı, Termodinamiğin I. Kanunu gereği çevre ortamına yayılan ısı transfer hızına eşittir.

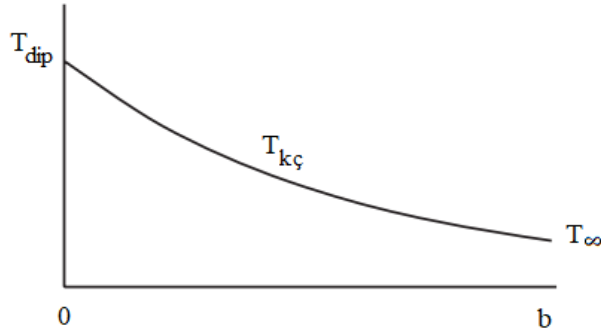
$$q_{k\zeta} = -k \cdot A_{cr} \cdot \frac{dT(0)}{dx} = -k \cdot A_{cr} \cdot \frac{d\theta(0)}{dx} \quad (4.135)$$

$$q_{k\zeta} = \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \frac{\sinh m \cdot b + \frac{h}{m \cdot k} \cdot \cosh m \cdot b}{\cosh m \cdot b + \frac{h}{m \cdot k} \cdot \sinh m \cdot b} \quad (4.136)$$

Kanatçık kalınlığı (t) genellikle çok ince olduğundan dolayı kanatçık ucundaki ısı transferi ihmal edilebilir ve bu durumda $dT(b)/dx=0$ olur. Yani kanat ucu yalıtılmış gibi kabul edilebilir. Böylece bir kanatçıktan meydana gelen iletimle ısı transferi, Denklem (4.137) olarak elde edilir.

$$q_{kç} = \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \tanh(m \cdot b) \quad (4.137)$$

Kanatçığın dibi, T_{dip} yüzey sıcaklığındadır. Kanatçığın ucuna doğru gidildikçe kanatçık sıcaklığı azalmakta ve kanatçık uzunluğu yeteri kadar uzunsa kanatçık ucundaki sıcaklık çevre sıcaklığına (T_{∞}) gelmektedir (Şekil 4.10). Dolayısıyla kanatçık boyunca meydana gelen sıcaklık değişiminin etkisini, kanatçıktan yapılan ısı transferi miktarına dâhil etmek için kanatçık verimi tanımlanmıştır. Kanatçık verimi ($\eta_{kç}$), kanatçıktan olan ısı transferinin ($\dot{Q}_{kç}$) kanatçığın tüm yüzeylerinin kanatçık dip sıcaklığında olması halindeki ısı transferine ($\dot{Q}_{kç,max}$) oranı şeklinde tanımlanmaktadır ve ifadesi de Denklem (4.138)'de görülmektedir.



Şekil 4.10: Kanatçık boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi

$$\eta_{kç} = \frac{\dot{Q}_{kç}}{\dot{Q}_{kç,max}} = \frac{q_{kç}}{h \cdot A_{kç,max} \cdot \theta_b} = \frac{\sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \tanh(m \cdot b)}{h \cdot P \cdot b \cdot \theta_b} = \frac{\tanh(m \cdot b)}{(m \cdot b)} \quad (4.138)$$

Kanatçıklı ve kanatçıksız toplam yüzeyin verdiği ısı miktarının, toplam yüzeyin kanatçık dip sıcaklığında verdiği ısı miktarına ($\dot{Q}_{ty,max}$) oranı, toplam kanatçıklı yüzey verimi ($\eta_{kçt}$) olarak tanımlanmaktadır (Denklem 4.139). Bu denklemde, gerekli ifadeler yerine yazıldığında (4.140) ifadesi elde edilmektedir. (4.137) ifadesindeki kanatçıktan iletimle gelen ısı transferi ($q_{kç}$), Termodinamiğin I. Kanunu gereği aynı zamanda kanatçıktan taşınımla giden ısı transferine eşit olduğu için (4.140) ifadesindeki gibi de yazılabilir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\eta_{k\zeta t} = \frac{\dot{Q}_{top}}{\dot{Q}_{ty,max}} = \frac{\dot{Q}_{kanat\ciskisiz} + \dot{Q}_{kanat\ciskli}}{\dot{Q}_{ty,max}} = \frac{\dot{Q}_{k\zeta z} + N \cdot q_{k\zeta}}{\dot{Q}_{ty,max}} \quad (4.139)$$

$$\eta_{k\zeta t} = \frac{h \cdot A_{k\zeta z} \cdot \theta_b + N \cdot \eta_{k\zeta} \cdot h \cdot A_{k\zeta} \cdot \theta_b}{h \cdot A_{ty} \cdot \theta_b} \quad (4.140)$$

(4.140) ifadesinde N: kanatçık sayısı ve $A_{k\zeta z}$: toplam kanatçiksiz yüzeyin alanı (m^2) olarak tanımlanmaktadır. Toplam yüzey alanı (A_{ty}), Denklem (4.141)'de belirtildiği gibi yazılabilir. Bu durumda (4.141) ifadesi, (4.140) ifadesinde yerine yazıldığında toplam yüzey verimi, Denklem (4.142) olarak elde edilir.

$$A_{ty} = A_{k\zeta z} + N \cdot A_{k\zeta} \quad (4.141)$$

$$\eta_{k\zeta t} = 1 - \frac{N \cdot A_{k\zeta}}{A_{ty}} \cdot (1 - \eta_{k\zeta}) \quad (4.142)$$

Tahmin edildiği üzere, kanatçıklı yüzeyler mevcut ısı transferini arttırmak için kullanılır. Ancak bir sisteme kanatçıklı yüzey eklemek, sistemin maliyetini arttırmaktadır. Bu yüzden çoğu zaman ısı transfer kazancı bakımından, kanatçiksiz orijinal yüzeyin performansı ile kanatçıklı yüzeyin performansı karşılaştırılarak, kanatçıklı yüzey kullanılmasının gerekli olup olmadığı sorgulanır. Bunun için sistemin kanatçık etkinliğine bakılarak, kanatçık eklendiği durumda ısı transfer miktarında ne kadar artış olduğu değerlendirilir. Kanatçık etkinliği ($\varepsilon_{k\zeta}$), kanatçıktan olan ısı transferinin kanatçiksiz halde kanatçık dip yüzeyinden olan ısı transferine oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklem 4.143). Pratik olarak $\varepsilon_{k\zeta} \geq 2$ olduğu sürece, kanatçık kullanılmasının uygun olduğu literatürde belirtilmektedir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\varepsilon_{k\zeta} = \frac{q_{k\zeta}}{h \cdot A_{cr} \cdot \theta_b} = \frac{\sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr} \cdot \theta_b} \cdot \tanh(m \cdot b)}{h \cdot A_{cr} \cdot \theta_b} \quad (4.143)$$

(4.143) ifadesi yeniden düzenlendiğinde daha sade olan (4.144) ifadesi elde edilir.

$$\varepsilon_{k\zeta} = \sqrt{\left(\frac{k}{h}\right) \cdot \left(\frac{P}{A_{cr}}\right)} \cdot \tanh(m \cdot b) \quad (4.144)$$

(4.144) ifadesinden kanatçık etkinliği için aşağıdaki çıkarımlar yapılabilmektedir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013):

- 1) Kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısı olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu yüzden genelde kanatçıklı yüzeyler, maliyeti düşük, hafif ve korozyona dayanıklılığı sebebiyle alüminyumdan yapılır.
- 2) Kanatçık çevresinin kesit alanına oranı (P/A_{cr}), olabildiğince yüksek olmalıdır. Bu yüzden kanatçık kalınlıkları (t) ince yapılarak, sık yerleştirilmiş kanatçıklar tercih edilmektedir. Ancak burada kanatçık aralıkları tasarlanırken, kanatçıklar arasındaki akışı engellemeyecek aralıkta olmasına dikkat edilmelidir. Bu yüzden ardışık iki kanatçık arası uzaklık, ardışık kanatçıklarda oluşan iki sınır tabaka kalınlığından küçük olmamalıdır.
- 3) Isı taşınım katsayısının küçük olması etkinliği artırır. Bu yüzden kanatçık kullanımının en etkin olduğu uygulamalar, düşük ısı taşınım katsayısına içeren gaz akışkanlarının kullanıldığı uygulamalardır.
- 4) Kanatçık boyunca sıcaklık üstel olarak azalmaktadır ve belli bir uzunluktan sonra çevre ortamının sıcaklığına (T_{∞}) ulaşır. Dolayısıyla kanatçığın o uzunluğundan sonraki kısmı, çevre sıcaklığında olacağı için ısı transferine katkı sağlamaz. Bu yüzden uygun kanatçık yüksekliğinin (b) bulunması gerekmektedir. Bir kanatçık yüksekliğinin uygun olup olmadığını anlamak için sınırlı uzunluktaki bir kanatçıktan transfer edilen ısıyla, aynı şartlardaki sonsuz uzunluktaki kanatçıktan transfer edilen ısı ($q_{uz,kç}$) karşılaştırılır. Bu iki transfer arasındaki oran, Denklem (4.145) ifadesiyle tespit edilir.

$$oran = \frac{q_{kç}}{q_{uz,kç}} = \frac{\sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \tanh(m \cdot b)}{\sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b} = \tanh(m \cdot b) \quad (4.145)$$

(4.145) ifadesinden “oran” değerinin $\tanh(m \cdot b)$ eşit olduğu bulunur. Sonsuz uzunluktaki kanatçık için maksimum ısı geçişi, $\tanh(m \cdot b) = 1$ olduğunda gerçekleşmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda sonsuz uzunluktaki kanatçık yüksekliğini, yarıya düşürmenin ısı transferinde sadece %1’lik bir azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden pratikte %1’lik bir hata ile $\tanh(m \cdot b) = 0,99$ eşitliği yapılarak yaklaşık olarak en uzun kanatçık yüksekliği, Denklem (4.147) ile belirlenmektedir (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\tanh(m \cdot b) = 0,99 \quad (4.146)$$

$$b = \frac{2,65}{m} \quad (4.147)$$

Bir yüzeyin kanatçıklı ve kanatçıksız olması hallerindeki ısı transferlerinin karşılaştırılabilmesi, toplam kanatçık etkinliğinin hesaplanmasıyla yapılır. Toplam kanat etkinliği ($\varepsilon_{kçt}$), kanatçıklı ve kanatçıksız yüzeylerinin verdiği toplam ısı transferinin kanatçık yokken tüm yüzeyden olan ısı transferine oranı olarak tanımlanır ve Denklem (4.149) ile hesaplanır. Burada $A_{kç,yok}$: kanatçık olmaması durumundaki yüzey alanıdır (m^2) (Çengel 2010, Halıcı ve Gündüz 2013).

$$\varepsilon_{kçt} = \frac{\dot{Q}_{top}}{\dot{Q}_{kanatçık\ yok}} = \frac{\dot{Q}_{kanatçıksız} + \dot{Q}_{kanatçıklı}}{\dot{Q}_{kanatçık\ yok}} = \frac{\dot{Q}_{kçz} + N \cdot q_{kç}}{\dot{Q}_{kç,yok}} \quad (4.148)$$

$$\varepsilon_{kçt} = \frac{h \cdot A_{kçz} \cdot \theta_b + N \cdot \eta_{kç} \cdot h \cdot A_{kç} \cdot \theta_b}{h \cdot A_{kç,yok} \cdot \theta_b} \quad (4.149)$$

4.3.1.2 Dikdörtgen kesitli tek kanatçıktan oluşan yüzeylerin optimizasyonu

Bir kanatçıktan meydana gelen ısı transferi miktarı, kanatçık kalınlığına (t) ve kanatçık profil yüksekliğine (b) bağlı olarak maksimize edilmek istenir. Kanatçık kalınlığının (t) artması ile ısı transferi miktarının asimptotik olarak artacağı tahmin edilebilir. Ancak asıl mühendislik problemi, kanatçığın profil alanı ($A_{pr} = b \cdot t$) veya kanatçıktan transfer edilen ısı ($q_{kç}$) veya kanatçığın hacmi ($V_{kç} = b \cdot t \cdot L$) sabit olduğunda, optimum kanatçık kalınlığı (t) ne olması gerektiğidir.

1-) Sabit kanatçık profil alanı (A_{pr})

Bunun için kanatçık profil alanının (A_{pr}), sabit olduğu kabul edilir. Kanatçık ucunun yalıtımlı (adyabatik uç) olduğu durumda, bir kanatçıktan transfer edilen ısı miktarı daha önce Denklem (4.150) olarak elde edilmişti.

$$q_{kç} = \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \tanh(m \cdot b) \quad (4.150)$$

Mantıklı bir yaklaşım olarak kanatçık genişliğinin (L), kanatçık kalınlığından (t) çok çok büyük ($L \gg t$) olduğu kabul edilebilir. Bu durumda $P \approx 2L$, $A_{cr} = L \cdot t$, $A_{pr} = b \cdot t$ ve $m \cdot b = \left(\sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}}} \right) \cdot b$ ifadelerine eşittir ve bu değerler (4.150) ifadesinde yerlerine yazıldığında

(4.151) ifadesi elde edilir. Bu ifade matematiksel olarak yeniden düzenlendiğinde, Denklem (4.152) olarak elde edilir.

$$q_{kç} = \sqrt{h \cdot 2 \cdot L \cdot k \cdot L \cdot t} \cdot \theta_b \cdot \tanh\left(\sqrt{\frac{h \cdot 2 \cdot L}{k \cdot L \cdot t}} \cdot b\right) \quad (4.151)$$

$$q_{kç} = (2 \cdot h \cdot k)^{1/2} \cdot L \cdot \theta_b \cdot t^{1/2} \cdot \tanh\left(\left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t}\right)^{1/2} \cdot b\right) \quad (4.152)$$

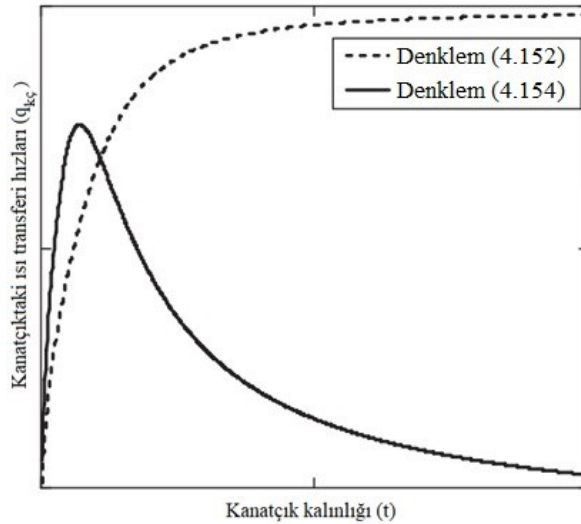
$m \cdot b$ terimi, A_{pr} terimi türünden yeniden yazıldığında Denklem (4.153) elde edilir.

$$m \cdot b = \left(\sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}}}\right) \cdot b = b \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t}\right)^{1/2} = A_{pr} \cdot \frac{b}{b \cdot t} \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t}\right)^{1/2} = A_{pr} \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t^3}\right)^{1/2} \quad (4.153)$$

(4.153) ifadesi kullanılarak (4.152) ifadesi yeniden yazılırsa Denklem (4.154) elde edilir.

$$q_{kç} = (2 \cdot h \cdot k)^{1/2} \cdot L \cdot \theta_b \cdot t^{1/2} \cdot \tanh\left(A_{pr} \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t^3}\right)^{1/2}\right) \quad (4.154)$$

(4.152) ve (4.154) denklemleri bir kanatçıktan meydana gelen iletimle ısı transfer hızını göstermektedir ve bu denklemlerin kanatçık kalınlığına (t) bağlı olarak grafikleri Şekil 4.11'deki gibidir. Grafikte açık bir şekilde görüldüğü üzere, (4.152) ifadesi asimptotik olarak sürekli artmaktadır ve herhangi bir optimum değeri yoktur. Fakat sabit profil alan türünden yazılan (4.154) ifadesinin, optimum bir değeri olduğu görülmektedir (Lee 2010).



Şekil 4.11: (4.152) ve (4.154) ifadeleriyle hesaplanan, kanatçıktaki ısı transferi hızlarının kanatçık kalınlığına göre değişimi (Lee 2010)

(4.154) ifadesinde maksimum ısı transferini veren kanatçık kalınlığı, matematiksel olarak Denklem (4.155) ile bulunabilir. Bu matematiksel işlem yapıldığında Denklem (4.156) elde edilir.

$$\frac{dq_{kç}}{dt} = 0 \quad (4.155)$$

$$6 \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-\frac{3}{2}} \cdot A_{pr} = \sinh \left(2 \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-\frac{3}{2}} \cdot A_{pr} \right) \quad (4.156)$$

(4.156) ifadesinde, yeni tanımlanan β ifadesi (Denklem (4.157)) yerine yazılırsa Denklem (4.158) elde edilir.

$$\beta = m \cdot b = \left(\frac{2 \cdot h}{k}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t^{-\frac{3}{2}} \cdot A_{pr} \quad (4.157)$$

$$6 \cdot \beta = \sinh (2 \cdot \beta) \quad (4.158)$$

(4.158) ifadesinin matematiksel olarak çözülmesiyle, $\beta = 1,4192$ olarak bulunur. Bu sayı sabit bir profil alana sahip dikdörtgen kesitli kanatçıklardan emilen/yayılan optimum ısı transfer hızı için önemli bir anlama sahiptir (Lee 2010). Bu durumda, sabit kesitli profil alan için optimum kanatçık kalınlığı (t_{opt}) ve optimum kanatçık yüksekliği (b_{opt}) belirlenebilir. Optimum şartlarda $A_{pr} = b_{opt} \cdot t_{opt}$ eşittir. Bu eşitlik, (4.157) ifadesinde yerine yazıldığında optimum kanatçık kalınlığı (t_{opt}) Denklem (4.159) olarak ve optimum kanatçık yüksekliği (b_{opt}) ise Denklem (4.160) olarak elde edilir (Lee 2010).

$$t_{opt} = \left(\frac{2 \cdot h}{k}\right) \cdot \left(\frac{b_{opt}}{\beta}\right)^2 \quad (4.159)$$

$$b_{opt} = \beta \cdot \left(\frac{k \cdot t_{opt}}{2 \cdot h}\right)^{1/2} \quad (4.160)$$

2-) Kanatçıktan transfer edilen sabit ısı ($q_{kç}$)

Kanatçıktan transfer edilen ısının ($q_{kç}$) sabit olduğu kabul edilerek, t_{opt} ve b_{opt} ifadeleri formülize edilebilir. $\beta = 1,4192$ olarak bulunduğu için (4.152) ifadesi, Denklem (4.161) olarak yazılabilir. Kanatçıktan transfer edilen ısı ($q_{kç}$) sabit olduğuna göre, (4.161) ifadesinde β değeri yerine yazılırsa t_{opt} ifadesi de Denklem (4.162) olarak elde edilir (Lee 2010).

$$q_{k\zeta} = (2 \cdot h \cdot k)^{1/2} \cdot L \cdot \theta_b \cdot t^{1/2} \cdot \tanh \beta \quad (4.161)$$

$$t_{opt} = \frac{0,632}{h \cdot k \cdot L^2} \cdot \left(\frac{q_{k\zeta}}{\theta_b} \right)^2 \quad (4.162)$$

β terimi, (4.163) ifadesine eşit olduğu için b_{opt} , Denklem (4.164) olarak elde edilir.

$$\beta = m \cdot b_{opt} = \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t_{opt}} \right)^{1/2} \cdot b_{opt} \quad (4.163)$$

$$b_{opt} = \beta \cdot \left(\frac{k}{2 \cdot h} \right)^{1/2} \cdot t_{opt}^{1/2} \quad (4.164)$$

(4.162) ifadesi, (4.164) ifadesinde yerine yazılırsa Denklem (4.165) elde edilir (Lee 2010).

$$b_{opt} = \frac{0,798 \cdot q_{k\zeta}}{h \cdot L \cdot \theta_b} \quad (4.165)$$

3-) Sabit kanatçık hacmi ($V_{k\zeta}$)

Benzer şekilde kanatçığın hacmi ($V_{k\zeta}$) sabit kabul edilerek, t_{opt} ve b_{opt} ifadeleri formülize edilebilir. Şekil 4.9'a göre, $V_{k\zeta} = b \cdot t \cdot L$ eşitliği söz konusudur. Bu durumda kanatçığın profil alanı, Denklem (4.166) olarak yazılabilir.

$$A_{pr} = b \cdot t = \frac{V_{k\zeta}}{L} \quad (4.166)$$

(4.166) ifadesine bakıldığında, aslında kanat genişliği (L) bir tasarım parametresi değildir. Bu yüzden bu problem temel olarak sabit profil alanına sahip kanatçıklarla aynıdır. Yani $\beta=1,4192$ olarak alınabilir ve bu durumda (4.154) ifadesi, Denklem (3.167) olarak yazılabilir (Lee 2010).

$$q_{k\zeta} = (2 \cdot h \cdot k)^{1/2} \cdot L \cdot \theta_b \cdot t^{1/2} \cdot \tanh \left[\left(\frac{V_{k\zeta}}{L} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t^3} \right)^{1/2} \right] \quad (4.167)$$

β terimi, Denklem (4.168)'deki gibi yazıldığında sabit kanatçık hacmindeki optimum kanatçık kalınlığı (t_{opt}), Denklem (4.169) olarak ve optimum kanatçık yüksekliği (b_{opt}), Denklem (4.170) olarak elde edilir (Lee 2010).

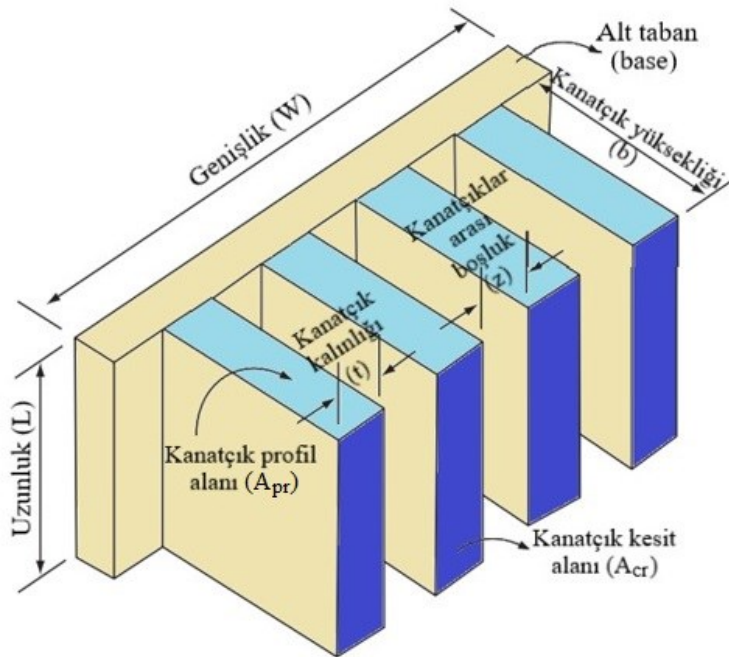
$$\beta = m \cdot b_{opt} = \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t_{opt}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot b_{opt} = \left(\frac{2 \cdot h}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t_{opt}^{-1/2} \cdot \frac{V_{k\zeta} \cdot b_{opt}}{b_{opt} \cdot t_{opt} \cdot L} \quad (4.168)$$

$$t_{opt} \cong \left(\frac{V_{k\zeta}}{L} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{h}{k} \right)^{1/3} \quad (4.169)$$

$$b_{opt} \cong \left(\frac{V_{k\zeta} \cdot k}{L \cdot h} \right)^{1/3} \quad (4.170)$$

4.3.1.3 Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinden oluşan yüzeylerin optimizasyonu

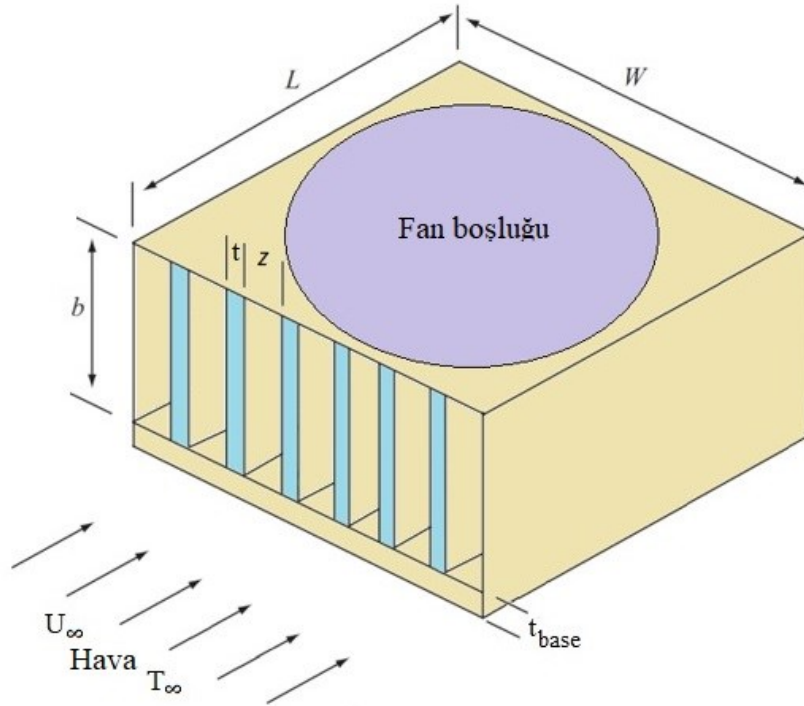
Önceki bölümde, tek bir kanatçıkta bazı özel durumlar için optimum kanatçık kalınlığı ve kanatçık yüksekliğinin nasıl belirlendiği açıklandı. Pratikte tek bir kanatçıktan oluşan bir yüzey kullanmak mantıklı değildir. Bu nedenle çoğu uygulamada Şekil 4.12’de gösterildiği gibi çoklu kanatçık dizisinden oluşan yüzeyler kullanılır. Bu bölümde, çoklu kanatçık dizisinden oluşan yüzeyler için optimum kanatçık kalınlığı ve optimum kanatçık yüksekliğinin nasıl belirleneceği açıklanmıştır. Ancak optimum kanatçık kalınlığı ve optimum kanatçık yüksekliğini belirlemeye geçmeden önce, çoklu kanatçık dizisindeki kanatçıklar arası boşluk miktarının (z) optimum değerinin belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12: Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi (Yeler ve Koseoglu 2020)

Literatürde, dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisindeki kanatçıklar arası boşluk miktarının (z) optimum değerinin belirlenmesi için çeşitli çalışmalar yapılarak, bu boşluk miktarı modellenmiştir. Şekil 4.13’de $L \times W$ boyutlarında, kanatçık yüksekliği b , kanatçık kalınlığı t ve kanatçıklar arası mesafe z olan dikdörtgen kesitli kanatçık dizisinin, sıcaklığı T_∞ ve hızı U_∞ olan havayla zorlanmış akışa maruz bırakıldığı kabul edilsin. Burada ardışık iki kanatçık arasındaki akış, birinci durumda iki paralel levha arasında dar kanal akışı, ikinci durumda ise; iki paralel levha arasında geniş kanal akışı olarak modellenebilir (Lee 2010). Çoklu kanatçıklı dizilerinde $z \gg t$ olduğu için kanatçık kalınlığı ihmal edilebilir. Bu durumda boşluk sayısı (s), bir başka ifadeyle kanal sayısı, (4.171) ifadesiyle belirlenebilmektedir.

$$s = \frac{W}{z + t} \cong \frac{W}{z} \quad (4.171)$$

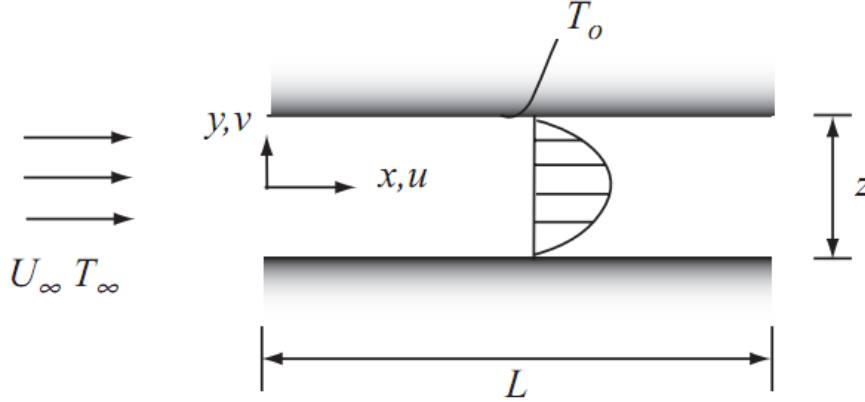


Şekil 4.13: Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinde zorlanmış akış (Yeler ve Koseoglu 2020)

1. Dar kanal akışı: İki paralel levha arasında dar kanal akışı (Şekil 4.14), akışkanlar mekaniğinde Couett-Poiseulli akışı olarak bilinmektedir. T_∞ sıcaklığındaki hava, T_0 duvar sıcaklığında bulunan kanal içerisinde zorlanmış taşınım ile akmaktadır. Kanal dar olduğu için tam gelişmiş akış kabulü yapılabilir. Aynı zamanda kanalın boyu, çıkış hava sıcaklığı T_0 olacak

kadar uzundur. Bu durum için x yönündeki momentum denklemi, (4.172) ifadesi olarak yazılabilir (Lee 2010).

$$\rho_y \cdot \left(U_\infty \cdot \frac{\partial U_\infty}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U_\infty}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \cdot \left(\frac{\partial^2 U_\infty}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_\infty}{\partial y^2} \right) \quad (4.172)$$



Şekil 4.14: Tam gelişmiş dar kanal akışı (Lee 2010)

Tam gelişmiş akış durumunda, $V = 0$ ve $\frac{\partial U_\infty}{\partial x} = 0$ olur. Kanalın girişi ve çıkışı atmosfer havasına açık olduğundan, kanal boyunca basınç düşümü sabittir $\left(\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\Delta P}{L}\right)$. Bu ifadeler Denklem (4.172)'de yerine yazıldığında, (4.173) ifadesi elde edilir.

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 U_\infty}{\partial y^2} = \frac{\Delta P}{L} \quad (4.173)$$

(4.173) ifadesi matematiksel olarak çözülüp, (4.174) ifadesindeki sınır şartları uygulandığında, Denklem (4.175) elde edilir.

$$U_\infty \left(\frac{z}{2} \right) = 0 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial U_\infty(0)}{\partial y} = 0 \quad (4.174)$$

$$U_\infty = \frac{\Delta P \cdot z^2}{8 \cdot \mu \cdot L} \cdot \left[1 - \left(\frac{y}{z/2} \right)^2 \right] \quad (4.175)$$

Kanal boyunca ortalama hız (\bar{U}_∞), (4.176) ifadesiyle bulunur.

$$\bar{U}_\infty = \frac{1}{A} \cdot \int U_\infty \cdot dA = \frac{\Delta P \cdot z^2}{12 \cdot \mu \cdot L} \quad (4.176)$$

Çıkış hava sıcaklığı T_o olarak kabul edildiğine göre, kanatçıklardan transfer edilen ısı hızı, Denklem (4.177) ile hesaplanabilir.

$$q_{k\check{c},dar} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.177)$$

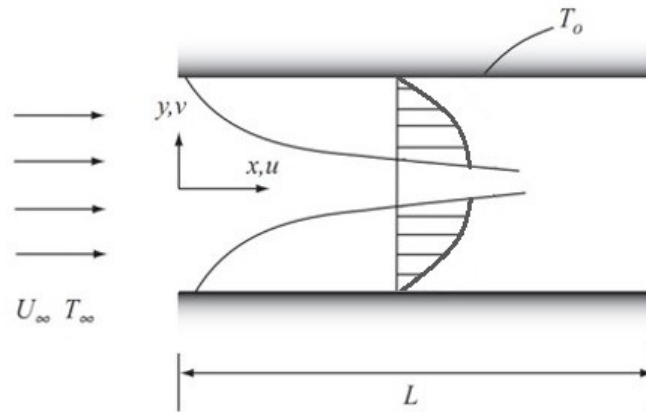
(4.177) ifadesindeki kütleli debi (\dot{m}), (4.178) ifadesiyle belirlenebilir. (4.178) ifadesi, (4.177) ifadesinde yerine yazılırsa Denklem (4.179) elde edilir. Burada, A_{ct} : akışın geçtiği toplam kesit alanıdır (m^2).

$$\dot{m} = \rho_y \cdot A_{ct} \cdot \bar{U}_\infty = \rho_y \cdot \left(z \cdot b \cdot \frac{W}{z} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot z^2}{12 \cdot \mu \cdot L} \right) \quad (4.178)$$

$$q_{k\check{c},dar} = \rho_y \cdot W \cdot b \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot z^2}{12 \cdot \mu \cdot L} \right) \cdot c_p \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.179)$$

(4.179) ifadesinde açık bir şekilde görüldüğü üzere, dar kanal akışı durumunda kanatçıklardan transfer edilen ısı hızı, kanatçıklar arası mesafenin karesiyle (z^2) orantılıdır.

2. Geniş kanal akışı: İki paralel levha arasında geniş kanal akışı ise Şekil 4.15'deki gibi gerçekleşmektedir. Her bir yüzeydeki hız sınır tabaka kalınlığı, diğer yüzeydekinden ayrıdır. Yani iki ardışık kanatçık arasındaki sınır tabaka kalınlıkları, birbiriyle çakışmamaktadır. Bu durum için basınç düşümü sabit kabul edilebilir. Kanatçıklı yüzeylerde, kanatçık genişliği (L) genelde çok büyük olamayacağı için kanatçıklar arasındaki akışı laminer olarak modellemek mantıklı bir yaklaşımdır. Laminer akış için Nusselt sayısı, Denklem (4.180) olarak yazılabilir (Lee 2010).



Şekil 4.15: Alt ve üst levhalar üzerindeki geniş kanal akışı (Lee 2010)

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h} \cdot L}{k_{hava}} = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad Pr > 0,5 \quad (4.180)$$

$$Re_L = \frac{U_\infty \cdot L}{\vartheta} \quad (4.181)$$

Böyle bir akış durumunda kanatçıklardan transfer edilen ısı, (4.182) ifadesiyle belirlenebilir. Burada, A_y : kanal içerisinden geçen akışın temas ettiği toplam yüzey alanıdır (m^2).

$$q_{kç,geniş} = A_y \cdot \bar{h} \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.182)$$

$$q_{kç,geniş} = 2 \cdot \frac{W}{z} \cdot b \cdot L \cdot \frac{k_{hava}}{L} \cdot 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.183)$$

$$q_{kç,geniş} = 1,328 \cdot \frac{W}{z} \cdot b \cdot k_{hava} \cdot \left(\frac{U_\infty \cdot L}{\vartheta} \right)^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.184)$$

Basınç düşümü (ΔP) sabit kabul edildiği için hava hızı (U_∞), ΔP ve z türünden yazılabilir. Şekil 4.13'de gösterilen dikdörtgen kanal kutusu için kuvvet dengesi yazılırsa; basınç düşümü, akışın temas ettiği her iki yüzeyde meydana gelen kayma gerilmelerinden ($\bar{\tau}$) kaynaklanmaktadır. Bu ifade, Denklem (4.185) olarak yazılabilir (Lee 2010).

$$\bar{\tau} \cdot \left(\frac{W}{z} \right) \cdot 2 \cdot b \cdot L = \Delta P \cdot W \cdot b \quad (4.185)$$

Laminer akış için sürtünme katsayısı, Denklem (4.186) olarak yazılabilir (Çengel 2010).

$$\bar{c}_f = \frac{\bar{\tau}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_y \cdot U_\infty^2} = 1,328 \cdot Re_L^{-1/2} \quad (4.186)$$

(4.186) ifadesi, (4.185) ifadesinde yerine yazıldığında Denklem (4.187) elde edilir.

$$U_\infty = \left(\frac{\Delta P \cdot z}{1,328 \cdot \rho_y \cdot L^{1/2} \cdot \vartheta^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (4.187)$$

(4.187) ifadesi, (4.184) ifadesinde yerine yazıldığında ise Denklem (4.188) elde edilir.

$$q_{kç,geniş} = 1,208 \cdot W \cdot b \cdot k_{hava} \cdot \left(\frac{Pr \cdot \Delta P \cdot L}{\rho_y \cdot \vartheta^2} \right)^{1/3} \cdot z^{-2/3} \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4.188)$$

(4.188) ifadesinde açık bir şekilde görüldüğü üzere, geniş kanal akışı durumunda kanatçıklardan transfer edilen ısı, kanatçıklar arası mesafenin $-2/3$ kuvvetiyle ($z^{-2/3}$) orantılıdır.

4.3.1.3.1 Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için optimum kanatçık boşluğu

Çoklu kanatçık dizisinde iki kanatçık arası mesafenin dar olması durumunda, dar kanal akışı kabul edilerek kanatçıklardan transfer edilen ısı miktarı belirlendi (Denklem (4.179)). Benzer şekilde iki kanatçık arası mesafenin geniş olması durumu için ise geniş kanal akışı kabul edilerek kanatçıklardan transfer edilen ısı miktarı belirlendi (Denklem (4.188)). Optimum kanatçık boşluğu, ardışık iki kanatçık yüzeyinde oluşan iki hız sınır tabaka kalınlığının birbirine eşit olduğu durumda oluşur. Bu yüzden (4.179) ve (4.188) ifadeleri birbirine eşitlendiğinde optimum kanatçık boşluğu (z_{opt}), (4.190) ifadesiyle belirlenebilir (Lee 2010).

$$q_{kç,dar} = q_{kç,geniş} \quad (4.189)$$

$$\frac{z_{opt}}{L} = 2,725 \cdot \left(\frac{\mu \cdot \alpha_y}{\Delta P \cdot L^2} \right)^{1/4} \quad (4.190)$$

(4.190) ifadesinde α_y : ısı yayılım katsayısı (m^2/s) olarak tanımlanmaktadır ve değeri (4.191) ifadesiyle belirlenmektedir. (4.190) ifadesindeki optimum kanatçık boşluğu (z_{opt}), $q_{kç,dar}$ veya $q_{kç,geniş}$ ifadelerinin herhangi birinde yerine konulduğunda, kanatçıklardan transfer edilen maksimum ısı transferi ($q_{kç,max}$) elde edilir (Denklem (4.192)).

$$\alpha_y = \frac{k}{\rho_y \cdot c_p} \quad (4.191)$$

$$\frac{q_{kç,max}}{W \cdot L \cdot b} = 0,619 \cdot \frac{k_{hava}}{L} \cdot (T_o - T_\infty) \cdot \left(\frac{\Delta P}{\mu \cdot \alpha_y} \right)^{1/2} \quad (4.192)$$

Kanatçık dizisinden geçen akışkanın basınç düşümü, (4.193) ifadesiyle belirlenebilir. Burada f : sürtünme katsayısıdır ve $\frac{f \cdot L}{D_h} \approx 1$ kabul edilebilir. Yapılan kabulde elde edilen (4.193) ifadesi, (4.190) ifadesinde yerine yazıldığında optimum kanatçık boşluğu (z_{opt}), Re_L ve Pr boyutsuz sayıları cinsinden Denklem (4.194) şeklinde genel bir ifade elde edilir (Lee 2010).

$$\Delta P = \frac{f \cdot L}{D_h} \cdot \frac{\rho_y \cdot U_\infty^2}{2} \approx \frac{\rho_y \cdot U_\infty^2}{2} \quad (4.193)$$

$$\frac{z_{opt}}{L} = 3,24 \cdot Re_L^{-1/2} \cdot Pr^{-1/4} \quad (4.194)$$

4.3.1.3.2 Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için $\beta_{kç}$ sayısının belirlenmesi

Sabit kanatçık profil alanı bölümünde, β sayısının dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzey tasarımındaki öneminden bahsedilmişti ve tek bir kanatçık için $\beta = 1,4192$ olarak bulunmuştu. Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için $\beta_{kç}$ terimi, tek kanatçıktakine benzer şekilde hesaplanabilmektedir. Tek kanatçık için $A_{pr} = b \cdot t$, $A_{cr} = L \cdot t$, $P \cong 2 \cdot L$ ve $\beta = m \cdot b$ eşitlikleri yazılarak, (4.195) - (4.198) ifadeleri elde edilmiştir.

$$q_{kç} = \sqrt{h \cdot P \cdot k \cdot A_{cr}} \cdot \theta_b \cdot \tanh(m \cdot b) \quad (4.195)$$

$$m = \sqrt{\frac{h \cdot P}{k \cdot A_{cr}}} = \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t}\right)^{1/2} \quad (4.196)$$

$$q_{kç} = \sqrt{h \cdot (2 \cdot L) \cdot k \cdot (L \cdot t)} \cdot \theta_b \cdot \tanh \beta \quad (4.197)$$

$$\frac{q_{kç}}{L} = \left(\frac{2 \cdot h \cdot k \cdot A_{pr}}{b}\right)^{1/2} \cdot \theta_b \cdot \tanh \beta \quad (4.198)$$

Şekil 4.12'ye göre, ardışık iki kanatçık arasında alt taban (base) yüzeyinden taşınım ile transfer edilen ısı (q_{aty}), Denklem (4.199) olarak yazılabilir. Kanatçıklar arası mesafe (z), kanatçık dizisinin geometrisi gereği Denklem (4.200)'deki gibi yazılabilir. (4.199) ifadesinde, (4.200) ifadesi yerine yazıldığında Denklem (4.201) elde edilir. Bu ifadelerde h_{aty} : kanatçıklar arasındaki yüzeyler ile alt taban yüzeyi arasındaki ısı taşınım katsayısı ($W/m^2 \cdot ^\circ C$) ve N : kanatçık sayısıdır.

$$q_{aty} = h_{aty} \cdot L \cdot z \cdot \theta_b \quad (4.199)$$

$$z = \frac{W}{N} - t = \frac{W}{N} - \frac{A_{pr}}{b} \quad (4.200)$$

$$\frac{q_{aty}}{L} = h_{aty} \cdot \left(\frac{W}{N} - \frac{A_{pr}}{b} \right) \cdot \theta_b \quad (4.201)$$

Çoklu kanatçık dizisinden transfer edilen toplam ısı ($q_{çkç}$), (4.202) ifadesiyle belirlenebilir. (4.202) ifadesinde, (4.198) ve (4.201) ifadelerinde elde edilen değerler yerine yazıldığında, (4.203) ifadesi elde edilir (Lee 2010).

$$\frac{q_{çkç}}{L} = N \cdot \left(\frac{q_{aty}}{L} + \frac{q_{kç}}{L} \right) \quad (4.202)$$

$$\frac{q_{çkç}}{L} = N \cdot \left(h_{aty} \cdot \left(\frac{W}{N} - \frac{A_{pr}}{b} \right) \cdot \theta_b + \left(\frac{2 \cdot h \cdot k \cdot A_{pr}}{b} \right)^{1/2} \cdot \theta_b \cdot \tanh \beta \right) \quad (4.203)$$

Kanatçık yüksekliğine (b) bağlı olarak, çoklu kanatçık dizisinden transfer edilen maksimum ısı transferi, (4.204) ifadesiyle hesaplanabilir.

$$\frac{dq_{çkç}}{db} = 0 \quad (4.204)$$

Sabit profil kanatçık alanı bölümünde uygulanan işlemler burada da uygulanırsa ve β terimi, (4.157) ifadesindeki gibi tanımlanırsa Denklem (4.205) elde edilir (Lee 2010).

$$\beta \cdot \tanh \beta - 3 \cdot \beta^2 \cdot \operatorname{sech}^2 \beta = \frac{2 \cdot h_{aty} \cdot b}{k} \quad (4.205)$$

(4.205) ifadesinde $h_{aty} = 0$ eşitliğinin olduğu durum için (4.208) ifadesi elde edilir.

$$\beta \cdot \tanh \beta - 3 \cdot \beta^2 \cdot \operatorname{sech}^2 \beta = 0 \quad (4.206)$$

$$3 \cdot \beta = \sinh \beta \cdot \cosh \beta \quad (4.207)$$

$$6 \cdot \beta = \sinh (2 \cdot \beta) \quad (4.208)$$

(4.208) ifadesinin matematiksel işlemleri yapılarak çözüldüğünde, sabit profil kanatçık alanı bölümünde elde edilen $\beta = 1,4192$ değeri bulunur. Ancak çoklu kanatçık dizisindeki $\beta_{çkç}$, (4.205) ifadesinde açık bir şekilde görüldüğü üzere, $\frac{h_{aty} \cdot b}{k}$ ifadesinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. $\beta_{çkç}$ değeri için (4.205) ifadesinin grafiği çizildiğinde, lineer ilişki yaklaşımıyla Denklem (4.209) elde edilir (Lee 2010). Burada, k : kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısıdır ($W/m \cdot ^\circ C$).

$$\beta_{\text{çkç}} = 1,4192 + 1,125 \cdot \frac{h_{\text{aty}} \cdot b}{k} \quad (4.209)$$

Dikkat edilirse çoklu kanatçık dizisindeki $\beta_{\text{çkç}}$ ile tek kanatçıktan elde edilen β sayısı arasındaki fark çok küçüktür. Bu yüzden pratik uygulamalarda, çoklu kanatçık dizisi içinde $\beta_{\text{çkç}} = \beta = 1,4192$ alınabilir (Lee, 2010). Bu tez çalışmasında da dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için $\beta = 1,4192$ eşit alınarak, işlemler yapılmıştır.

4.3.1.3.3 Dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisinin optimum tasarımı

Bu bölüme kadar çoklu kanatçık dizisi için ardışık kanatçık arasındaki optimum mesafenin (z_{opt}) ve çoklu kanatçık dizisindeki $\beta_{\text{çkç}}$ teriminin nasıl belirlendiğinden bahsedildi. $\beta_{\text{çkç}}$ ve β sayıları herhangi bir sınırlamanın olmadığı durumlar için elde edilmiştir. Ancak gerçek durumlar için yapılan optimizasyon işlemlerinde, çoğu zaman bir kısıtlama bulunmaktadır (Tablo 4.1). Tablo 4.1’de birinci durumda, problemde herhangi bir kısıtlama yoktur. İkinci, üçüncü ve dördüncü durumda kanat yüksekliği (b) 20 mm ve farklı kanatçık kalınlıkları için hesaplamalar yapılmıştır.

Tablo 4.1: Farklı kısıtlamalar için yapılan kanatçık optimizasyonları (Lee 2010)

PARAMETRE	Kısıtlamasız optimum çoklu kanatçık-1	Kısıtlamalı optimum çoklu kanatçık-2	Kısıtlamalı optimum çoklu kanatçık-3	Kısıtlamalı optimum çoklu kanatçık-4
Kanatçık kalınlığı, t (mm)	2	0,5	0,291	0,1
Kanatçık yüksekliği, b (mm)	113	20	20	20
Kanatçıklar arası boşluk, z (mm)	2,19	2,19	2,19	2,19
Isı transfer katsayısı, h ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	27,9	27,9	27,87	27,9
Toplam ısı transfer hızı, \dot{Q}_{top} (W)	118,6	49	50,48	45,3
Kanatçık sayısı, N	12	19	21	22

Kanatçık kütlesi, $M_{kç}$ (g)	219	15	9,5	3,54
$\beta = m \cdot b$	1,4192	0,503	0,658	1,122
Tek kanatçık verimi, $\eta_{kç}$	0,627	0,924	0,88	0,72
Tek kanatçık etkinliği, $\varepsilon_{kç}$	73,2	74,5	121	289
Toplam verimlilik, $\eta_{kçt}$	0,630	0,928	0,883	0,735
Toplam termal direnç, R_{top} ($^{\circ}C/W$)	0,653	1,618	1,578	1,761

Termoelektrik sistemlerinin pratik uygulamalarında yapılan optimizasyon işlemleri, genelde termoelektrik ısı pompası sisteminin yerleştirileceği hacme göre yapılır. O yüzden bu bölümde, $W \cdot L \cdot b$ boyutlarına sahip bir dikdörtgen kesitli çoklu kanatçık dizisi için maksimum ısı transferinin meydana geldiği optimum kanatçık kalınlığını belirleme yöntemi açıklanmıştır. Aynı zamanda tasarlanan çoklu kanatçık dizisinin bütün boyutları ve bütün performans özellikleri tespit edilmiştir. Bunun için bütün performans özellikleri kanatçık kalınlığının bir fonksiyonu olarak yazılmıştır. Bu sayede, her bir kanatçık kalınlığı değeri için bütün performans özellikleri hesaplanarak, mevcut bu kalınlıklar arasında maksimum ısı transferini sağlayan kanatçık kalınlığı tespit edilebilmiştir. Çoklu kanatçık dizisinde kanatçıklı yüzeyler arasındaki optimum mesafe (z_{opt}), Denklem (4.194)'deki gibi tek bir formülizasyonla belirlenebilmektedir.

Kanatçık sayısı ve kanatçıkların kütlesi; kanatçık kalınlığına bağlı olarak, sırasıyla (4.210) ve (4.211) ifadeleri olarak yazılabilir.

$$N(t) = \frac{W}{z_{opt} + t} \quad (4.210)$$

$$M_{kç}(t) = N(t) \cdot \rho_y \cdot L \cdot b \cdot t \quad (4.211)$$

(4.168) ifadesinden β değeri, Denklem (4.212) olarak yazılır.

$$\beta(t) = b \cdot \left(\frac{2 \cdot h}{k \cdot t} \right)^{1/2} \quad (4.212)$$

(4.138) ifadesinden tek bir kanatçığın verimi, Denklem (4.213)'deki gibi elde edilir.

$$\eta_{kç}(t) = \frac{\tanh \beta(t)}{\beta(t)} \quad (4.213)$$

Tek bir kanatçığın alanı, (4.214) ifadesiyle belirlenir.

$$A_{k\zeta}(t) = 2 \cdot (L + t) \cdot b \quad (4.214)$$

Toplam yüzey alanı (kanatçıklı+kanatçıksız), Denklem (4.215) olarak yazılabilir.

$$A_{k\zeta t}(t) = N(t) \cdot (A_{k\zeta}(t) + L \cdot z_{opt}) \quad (4.215)$$

Toplam yüzey verimliliği, Denklem (4.216)'deki gibi elde edilir.

$$\eta_{k\zeta t}(t) = 1 - \frac{N(t) \cdot A_{k\zeta}(t)}{A_{k\zeta t}(t)} \cdot (1 - \eta_{k\zeta}(t)) \quad (4.216)$$

Toplam ısı transfer hızı miktarı, (4.217) ifadesiyle belirlenir.

$$\dot{Q}_{top}(t) = \eta_{k\zeta t}(t) \cdot h \cdot A_{k\zeta t}(t) \cdot \theta_b \quad (4.217)$$

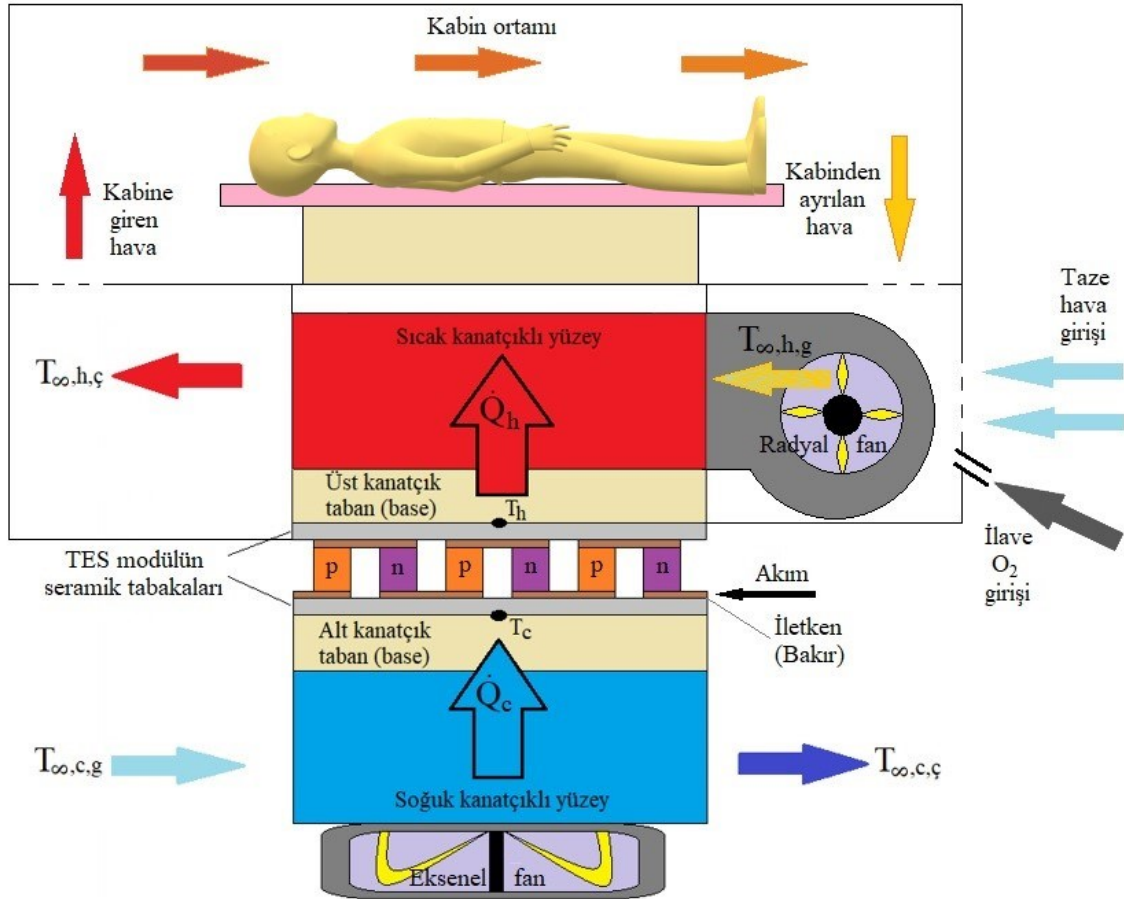
Toplam termal direnç (R_{top}), Denklem (4.218)'deki gibi yazılır.

$$R_{top}(t) = \frac{1}{\eta_{k\zeta t}(t) \cdot h \cdot A_{k\zeta t}(t)} \quad (4.218)$$

4.3.2 Optimum termoelektrik ısı pompası sisteminin modellenmesi

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilen optimum termoelektrik ısı pompası sisteminin modellenmesi detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Bunun için Şekil 4.7'e göre, sistemin bir boyutlu sürekli rejim şartlarında çalıştığını varsayalım. Bu durumda TE ısı pompası sisteminin kuvöz kabininin ısıtma durumu şematik olarak Şekil 4.16'da görülmektedir. Kuvözdeki hava dolaşımını radyal fan ile sağlandığı için Şekil 4.7'nin fanlarından birine küçük bir değişiklik yapılmıştır. Isı pompası sistemi ile çalışan kuvöz sisteminde TES modüle bir DC akım verildiğinde, TES modül içerisindeki yarı iletken termoelektrik malzemeler (p ve n tipi) üzerinden geçen akım, alt taraftaki (soğuk) ortamdan verilen akımın büyüklüğüne bağlı olarak belli bir miktar ısı çeker (Peltier soğutma). Dolayısıyla aksenel fan vasıtasıyla $T_{\infty,c,g}$ sıcaklığında soğuk kanatçıklı yüzeye giren hava, kanatçıklı yüzeylerden çekilen Peltier soğutmadan dolayı bir miktar soğuyarak, $T_{\infty,c,\zeta}$ sıcaklığında çevre ortamına gönderilir. Bu sistem sürekli şartlarda çalıştığı için Termodinamiğin I. Kanununa göre, TES modülde harcanan elektriksel güç ve soğuk ortamdan çekilen Peltier soğutma gücünün toplamı kadar ısı gücü sıcak ortamdan

atılmaktadır. Bu yüzden üst taraftaki (sıcak) ortamda, radyal fan vasıtasıyla kabin ortamına $T_{\infty,h,g}$ sıcaklığında giren karışım havası (taze hava, kabin ortamından ayrılan hava ve varsa ilave O_2), ısınan üst kanatçıklı yüzeyler üzerinden geçerek, bir miktar ısınmış olarak $T_{\infty,h,\phi}$ sıcaklığında kabin ortamına gönderilmektedir. Bu şekilde kabin ortamındaki havaya sürekli çevrim geçirilerek, kuvöz ortamının ısıtılması sağlanır. Kabin ortamındaki istenilen sıcaklık ise TES modüle verilen akıma bağlı olarak kontrol edilir. Eğer herhangi bir nedenden dolayı kabin ortamı soğutulmak istenirse, sadece TES modülün akım yönünün değiştirilmesi yeterlidir. Çünkü akım yönünün değiştirilmesiyle, sistem aynı çalışma mantığıyla ters çalışmaya başlar. Yani kabini soğutma durumunda, kabin ortamından emilen peltier soğutma, çevre ortamına atılır. Bu şekilde TE ısı pompası sistemi kabin içerisinde istenilen sıcaklığı çok hızlı bir şekilde karşılayabilmektedir.



Şekil 4.16: Bebek kuvözü sisteminde çalışan TE ısı pompası sistemi

Kabin ortamında EN 60601-2-19 standardında (2011) belirtilen kuvöz sıcaklıklarının TE ısı pompası sistemi tarafından sağlanabilmesi için TES modüle verilmesi gereken ısıtma/soğutma gücünün tespit edilmesi gerekir. Bu güç, kuvöz için gerekli olan maksimum

ısıtma ve soğutma parametrelerini karşılayacak şekilde ayarlanmıştır. Bebek ve kuvözde meydana gelen ısı kayıplarının ve kazanımlarının matematiksel olarak modellenmesiyle (bkz. Bölüm 3), sisteme sürekli şartlarda (kararlı halde) verilmesi gereken ısıtma/soğutma gücü (\dot{Q}_{thp}) belirlenebilmektedir. TE ısı pompası sisteminin, kuvöze hem maksimum ısıtma/soğutma durumunda hem de sürekli şartlarda verilmesi gereken \dot{Q}_{thp} gücünü her koşulda sağlaması gerekmektedir. Sistemin ihtiyacına göre bu güç, otomatik kontrol ile kontrol edilmektedir. Ancak TE ısı pompası sisteminde bu gücün sağlanabilmesi; kuvözün maksimum durumundaki ihtiyaçlarını karşılayacak en uygun TES modülün seçilmesi, modülün optimum akım ve güç çıktılarının ayarlanması, optimum kanatçıklı yüzeylerin hesaplanarak belirlenmesi ve optimum fan debilerin tespit edilmesiyle mümkündür. Bu yüzden optimum performans parametrelerinin belirlenebilmesi için bir matematiksel model geliştirilmiştir.

4.3.2.1 Optimum termoelektrik ısı pompası sisteminin kanatçıklı yüzeylerle birlikte modellenmesi

Bu tez kapsamında geliştirilen TE ısı pompası sisteminin kanatçıklı yüzeyleri için problemin fiziğine en uyumlu olan dikdörtgen kesitli kanatçıklı yüzeyler tercih edilmiştir. Aynı zamanda geliştirilen TE ısı pompası sisteminde fanlar bulunmaktadır ve bu fanlar vasıtasıyla zorlanmış taşınım etkindir. Bu yüzden zorlanmış taşınım durumu için dikdörtgen kesitli kanatçıklarda optimum kanatçıklar arası mesafe (z_{opt}), (4.219) ifadesi kullanılarak belirlenmiştir.

$$z_{opt} = L \cdot 3,24 \cdot Re_L^{-1/2} \cdot Pr^{-1/4} \quad (4.219)$$

Şekil 4.13'te gösterilen kanatçıklı yüzeylerin zorlanmış taşınım durumu için Nusselt sayısı, Teertstra ve diğ. (1999) tarafından Denklem (4.220) olarak elde edilmiştir. Bu eşitlik laminer ve türbülanslı akışları kapsamaktadır ve aynı zamanda gelişen ve tam gelişmiş akış durumlarında da kullanılabilir. Bu eşitliğin geçerli olabilmesi için kanalların kıyılarından herhangi bir hava sızıntısı olmamalıdır ve kanat yüksekliği, kanatçıklar arası mesafeden çok çok büyük olmalıdır ($z \ll b$). Hava sızıntısı olmaması ve aynı zamanda fanın kanatçık yüzeyine sabitlenebilmesi için Şekil 4.13'te gösterildiği gibi kanatçıkların üst kısmı örtülmüştür.

$$Nu_z = \frac{h \cdot z}{k_{akışkan}} = \left[\left(\frac{Re_z^* \cdot Pr}{2} \right)^{-3} + \left(0,664 \cdot \sqrt{Re_z^*} \cdot Pr^{1/3} \cdot \sqrt{1 + \frac{3,65}{\sqrt{Re_z^*}}} \right)^{-3} \right]^{-1/3} \quad (4.220)$$

(4.220) ifadesinde; $k_{akışkan}$: kanatçıklar arasından geçen akışkanın ısı iletim katsayısı (W/m.K), Re_z : kanatçıklar arası boşluğa göre tanımlanmış Reynolds sayısıdır ve Re_z^* : indirgenmiş Reynolds sayısıdır. Re_z ve Re_z^* ifadeleri, sırasıyla (4.221) ve (4.222) ile belirlenebilmektedir.

$$Re_z = \frac{U_\infty \cdot z}{\vartheta} \quad (4.221)$$

$$Re_z^* = Re_z \cdot \frac{z}{L} \quad 0,2 \leq Re_z^* \leq 200 \quad (4.222)$$

Tez çalışmasında kullanılan TE ısı pompası sisteminin yerleştirilebileceği sınırlı bir hacim vardır. Bu yüzden kanatçıklı yüzeylerin sınırlı bir hacim kısıtlaması durumu için kanatçıklı yüzeylerin performans değerleri, kanatçık kalınlığına (t) bağlı olarak daha önceden elde edilmişti (bkz. Bölüm 4.3.1.3.3). Ancak elde edilen bu formüllerde, kanatçık taban (base) yüzeyi dikkate alınmadan eşitlikler elde edilmişti. Burada, bu eşitlikler Şekil 4.13'te gösterilen taban (base) yüzeyi ve β teriminde ihmal edilen kanatçık kalınlığını kapsayacak şekilde yeniden revize edilmiştir. Bu durum için kanatçık sayısı ve kanatçıkların kütlesi, sırasıyla Denklem (4.223) ve (4.224) olarak yazılabilir.

$$N(t) = \frac{W}{z_{opt} + t} \quad (4.223)$$

$$M_{kç}(t) = N(t) \cdot \rho_y \cdot L \cdot b \cdot t \quad (4.224)$$

β değerinde, kanatçık kalınlığına da dikkat edilirse Denklem (4.225) elde edilir.

$$\beta(t) = b \cdot \left(\frac{2 \cdot h \cdot (L + t)}{k \cdot L \cdot t} \right)^{1/2} \quad (4.225)$$

Tek bir kanatçığın verimi, Denklem (4.226) olarak yazılır.

$$\eta_{kç}(t) = \frac{\tanh \beta(t)}{\beta(t)} \quad (4.226)$$

Tek bir kanatçığın alanı, Denklem (4.227)'deki gibi elde edilir.

$$A_{k\zeta}(t) = 2 \cdot (L + t) \cdot b \quad (4.227)$$

Toplam yüzey alanı (kanatçıklı + kanatçıksız), Denklem (4.228)'den elde edilir.

$$A_{k\zeta t}(t) = N(t) \cdot (A_{k\zeta}(t) + L \cdot z_{opt}) \quad (4.228)$$

Toplam yüzey verimliliği, Denklem (4.229) olarak yazılır.

$$\eta_{k\zeta t}(t) = 1 - \frac{N(t) \cdot A_{k\zeta}(t)}{A_{k\zeta t}(t)} \cdot (1 - \eta_{k\zeta}(t)) \quad (4.229)$$

Kanatçık taban (base) yüzeyini de içine alan bütün kanatçıklı yüzey verimi ($\eta_{k\zeta b}$), Denklem (4.230) olarak elde edilir.

$$\eta_{k\zeta b}(t) = \left(\frac{1}{\eta_{k\zeta t}(t)} + \frac{h \cdot A_{k\zeta t}(t) \cdot t_{base}}{k_{base} \cdot A_{base}} \right)^{-1} \quad (4.230)$$

Toplam ısı transferi miktarı, Denklem (4.231)'den elde edilir.

$$\dot{Q}_{top}(t) = \eta_{k\zeta b}(t) \cdot h \cdot A_{k\zeta t}(t) \cdot \theta_b \quad (4.231)$$

Toplam termal direnç (R_{top}), Denklem (4.232)'deki gibi ifade edilir.

$$R_{top}(t) = \frac{1}{\eta_{k\zeta t}(t) \cdot h \cdot A_{k\zeta t}(t)} + \frac{t_{base}}{k_{base} \cdot A_{base}} \quad (4.232)$$

Bu şekilde geliştirilen TE ısı pompası sisteminin kanatçık yüzeylerinin denklemleri kanatçık kalınlığına (t) bağlı olarak elde edilmişlerdir. Şekil 4.16'da gösterilen TE ısı pompası sisteminde, soğuk ortamdan sıcak ortama olan ısı akışının bir boyutlu ve sürekli şartlarda olduğu kabul edilmiştir. Aynı zamanda kanatçıklı yüzeylerdeki akış üniform kabul edilmiştir. Dolayısıyla kanatçıklı yüzeyler boyunca lineer bir sıcaklık değişimi olduğu varsayılmıştır. Bu kabulde kanatçıklı yüzeylerin sıcaklığı, giren havanın sıcaklığıyla çıkan havanın sıcaklığının aritmetik ortalaması olarak yazılabilmektedir (Denklem (4.234) ve (4.237)). Termodinamiğin I. Kanununa göre, sürekli şartlarda soğuk kanatçıklı yüzeyler boyunca havadan emilen ısı (\dot{Q}_c), Newton'un Soğuma Kanunu tarafından soğuk kanatçıklı yüzeyler içerisinde absorbe edilmek zorundadır. Ardından bu ısı (\dot{Q}_c), sistem sürekli şartlarda olduğu için TES modülün soğuk yüzeyinden de emilmek zorundadır. TES modülün soğuk yüzeyinden emilen bu ısı gücü ile TES modülde harcanan elektriksel gücün toplamına eşit olan ısıtma gücü (\dot{Q}_h) ise TES modülün

sıcak yüzeyinden transfer edilmektedir. Yine Termodinamiğin I. Kanununa göre transfer edilen bu ısı (\dot{Q}_h), sıcak kanatçıklı yüzeyler tarafından absorbe edilmektedir. Son olarak da sıcak kanatçıklı yüzeylerde absorbe edilen bu ısı, radyal fan vasıtasıyla geçirilen havayı ısıtmaktadır. Bahsedilen bu fiziksel olayların matematiksel denklemleri, sırasıyla (4.233) - (4.238) ifadelerinde verilmiştir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_{\infty,c,g} - T_{\infty,c,\zeta}) \quad (4.233)$$

$$\dot{Q}_c = \eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot \left(\frac{T_{\infty,c,g} + T_{\infty,c,\zeta}}{2} - T_c \right) \quad (4.234)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.235)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R + K \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.236)$$

$$\dot{Q}_h = \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot \left(T_h - \frac{T_{\infty,h,g} + T_{\infty,h,\zeta}}{2} \right) \quad (4.237)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot c_{p_h} \cdot (T_{\infty,h,\zeta} - T_{\infty,c,g}) \quad (4.238)$$

Bu ifadelerde “c” indisi soğuk taraftaki büyüklükleri, “h” indisi de sıcak taraftaki büyüklükleri tanımlamak için kullanılmıştır. Ayrıca “g” indisi giren ve “ç” indisi çıkan anlamında kullanılmıştır. Ayrıca (4.234) ve (4.237) ifadelerindeki bütün kanatçıklı yüzeylerin verimi ($\eta_{k\zeta b}$), ısı taşınım katsayısı (h) ve toplam yüzey alanı ($A_{k\zeta t}$) terimleri kanatçıklı yüzeylerin optimizasyonu ile belirlenmiştir.

(4.233) - (4.238) ifadeleri arasında toplam 6 tane denklem tanımlanmıştır ve bu denklemlerde 6 tane bilinmeyen (\dot{Q}_h , \dot{Q}_c , T_h , T_c , $T_{\infty,h,\zeta}$ ve $T_{\infty,c,\zeta}$) terim vardır. Dolayısıyla bu denklemler matematiksel olarak çözülebilir. Bu bilinmeyen terimlerden $T_{\infty,h,\zeta}$ ve $T_{\infty,c,\zeta}$ terimlerinin problem için girdi değil çıktı verileri olduğuna dikkat edilmelidir. Ayrıca (4.235) ve (4.236) ifadelerini matematiksel olarak çözebilmek için seçilen TES modülün malzeme özellikleri olan Seebeck katsayıları (α), elektriksel özdirençleri (ρ) ve ısı iletim katsayılarının (k) bilinmesi gereklidir. Ancak daha öncede belirtildiği gibi TES modülü üreticileri, ürün kataloglarında bu değerlerin bilgisini vermemektedirler. O yüzden bu problemi ortadan kaldırmak için önceki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanan ve Lee (2017) tarafından geliştirilen etkin malzeme özellikleri (ρ^{**} , α^{**} , Z^{**} ve k^{**}) kullanılmıştır. Dolayısıyla (4.233) -

(4.238) ifadeleri, etkin malzeme özellikleri cinsinden ve matematiksel kolaylık için $\frac{T_{\infty,c,g} + T_{\infty,c,\zeta}}{2}$, $\frac{T_{\infty,h,g} + T_{\infty,h,\zeta}}{2}$ terimleri yerine, sırasıyla $T_{\infty,c}$ ve $T_{\infty,h}$ yazılarak, (4.239) - (4.244) olarak yeniden düzenlenmiştir (Lee 2017).

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_{\infty,c,g} - T_{\infty,c,\zeta}) \quad (4.239)$$

$$\dot{Q}_c = \eta_c \cdot h_c \cdot A_c \cdot (T_{\infty,c} - T_c) \quad (4.240)$$

$$\dot{Q}_c = n \cdot \left[\alpha^{**} \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^{**} + K^{**} \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.241)$$

$$\dot{Q}_h = n \cdot \left[\alpha^{**} \cdot I \cdot T_h + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R^{**} + K^{**} \cdot (T_c - T_h) \right] \quad (4.242)$$

$$\dot{Q}_h = \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot (T_h - T_{\infty,h}) \quad (4.243)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot c_{p_h} \cdot (T_{\infty,h,\zeta} - T_{\infty,c,g}) \quad (4.244)$$

(4.241) ve (4.242) ifadelerinde α^{**} , R^{**} ve K^{**} terimleri, etkin malzeme özellikleri cinsinden (4.245) - (4.247) ifadelerine eşittir.

$$\alpha^{**} = \alpha_p^{**} - \alpha_n^{**} \quad (4.245)$$

$$R^{**} = \frac{\rho_p^{**} \cdot l_p}{A_p} + \frac{\rho_n^{**} \cdot l_n}{A_n} \quad (4.246)$$

$$K^{**} = \frac{k_p^{**} \cdot A_p}{l_p} + \frac{k_n^{**} \cdot A_n}{l_n} \quad (4.247)$$

TE ısı pompası sisteminin performansı, sıcak ve soğuk yüzeylerden atılan veya çekilen ısı güçlerine bağlı olarak değişmektedir. Sistemin bir yüzeyinden atılan ısı ne kadar büyükse, sistemin diğer yüzeyinde çekilen ısıda o kadar artmaktadır. Dolayısıyla bu ısı gücünün maksimum değerini, TES modüle doğrudan bağlantılı olan kanatçıklı yüzeyler belirlemektedir. Bu yüzden (4.240) ve (4.243) ifadeleri, sırasıyla (4.241) ve (4.242) ifadelerine eşitlenirse; Bölüm 4.2.2'de detayları bir şekilde açıklanan boyutsuz parametreler cinsinden (4.248) ve (4.249) denklemleri elde edilir (Lee 2017).

$$\frac{N_h \cdot (T_{\infty}^* - T_c^*)}{N_k} = N_I \cdot T_c^* - \frac{(N_I)^2}{2 \cdot Z^{**} \cdot T_{\infty,h}} + (T_c^* - T_h^*) \quad (4.248)$$

$$\frac{T_h^* - 1}{N_k} = N_I \cdot T_h^* + \frac{(N_I)^2}{2 \cdot Z^{**} \cdot T_{\infty,h}} + (T_c^* - T_h^*) \quad (4.249)$$

(4.248) ve (4.249) ifadelerinde bilinmeyen terimler, sadece T_c^* ve T_h^* boyutsuz sayılarıdır ve bu boyutsuz sayılar, yine diğer boyutsuz parametrelerin fonksiyonudur. Bölüm 4.2.2'de açıklandığı üzere; T_{∞}^* problemin bir girdisi ve $Z^{**} \cdot T_{\infty,h}$ ifadesi de malzeme özeliği olarak bilindiğinden dolayı optimizasyon işlemi N_k , N_h ve N_I boyutsuz parametreleriyle yapılabilmektedir. Bu boyutsuz parametrelerden N_h değerinin optimum bir değeri olmadığı bilinmektedir ve aynı zamanda bu değer için bazı uygulanabilir mekanik kısıtlamalarda söz konusudur. Bu sebeple probleme uygun makul bir N_h değeri kabul edilerek, her bir N_k ve N_I boyutsuz parametre değeri için T_c^* ve T_h^* değerleri, (4.248) ve (4.249) denklemleri kullanılarak belirlenir. T_c^* ve T_h^* değerleri, (4.250) - (4.254) ifadelerinde yerlerine yazılarak; maksimum yapılması istenen değer için optimum N_k ve N_I değerleri tespit edilir. N_h değiştirilerek en elverişli çözümler elde edilir (Lee 2017).

$$Q_c^* = N_h \cdot (T_{\infty}^* - T_c^*) \quad (4.250)$$

$$Q_h^* = T_h^* - 1 \quad (4.251)$$

$$\dot{W}^* = Q_h^* - Q_c^* \quad (4.252)$$

$$COP_{soğutma} = \frac{Q_c^*}{\dot{W}^*} \quad (4.253)$$

$$COP_{ısıtma} = \frac{Q_h^*}{\dot{W}^*} \quad (4.254)$$

Optimizasyon sonucunda (4.250) - (4.254) ifadelerinde boyutsuz olarak elde edilen değerler, gerçek boyutlu denklemler olan (4.255) - (4.260) ifadelerinde yerlerine yazılarak, sistemde kullanılan TES modülünün bütün performans verileri belirlenir (Lee 2017).

$$n = \frac{N_k \cdot \eta_h \cdot h_h \cdot A_h}{\left(\frac{A \cdot k^{**}}{l}\right)} \quad (4.255)$$

$$\dot{Q}_c = Q_c^* \cdot \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h} \quad (4.256)$$

$$\dot{Q}_h = Q_h^* \cdot \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h} \quad (4.257)$$

$$\dot{W} = \dot{W}^* \cdot \eta_h \cdot h_h \cdot A_h \cdot T_{\infty,h} \quad (4.258)$$

$$I = \frac{N_I \cdot \left(\frac{A \cdot k^{**}}{l}\right)}{\alpha^{**}} \quad (4.259)$$

$$V = N_V \cdot n \cdot \alpha^{**} \cdot T_{\infty, h} \quad (4.260)$$

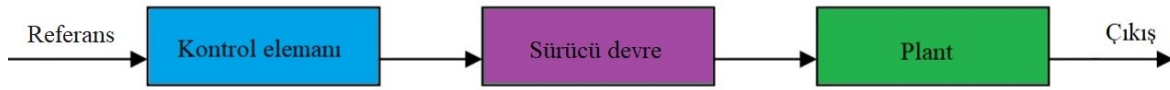
Bu tez kapsamında yapılan optimizasyon, geliştirilen MATLAB® yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir ve kuvöz çoğunlukla ısıtma modunda çalıştığı için boyutsuz maksimum ısıtma ısı transfer hızına (Q_h^*) göre yapılmıştır. Burada bir konuya dikkat etmek gerekmektedir; Q_c^* , \dot{W}^* , $COP_{soğutma}$ ve $COP_{ısıtma}$ değerlerinin her zaman bir optimum değeri bulunmaktadır. Ancak Q_h^* ifadesinin hiçbir zaman optimum bir N_k ve N_I değeri yoktur. Çünkü Q_h^* terimi, N_k ve N_I değerlerine bağlı olarak sürekli olarak artmaktadır. Bu durumda bu çalışmadaki optimizasyon şu şekilde yapılmıştır. TE ısı pompası sisteminin, söz konusu kuvözün içine yerleşebileceği sınırlı bir hacmi vardır. Dolayısıyla bu sınırlı hacimde, TES modülün sıcak yüzey tarafına yerleştirilebilecek, sınırlı bir kanatçıklı yüzey alanı bulunmaktadır. Bu sınırlı alanda sıcak tarafın kanatçıklı yüzeyinin verebileceği maksimum ısı transfer hızı, kanatçık kalınlığına bağlı olarak belirlenmiştir (Denklemler (4.223) – (4.232)). Bu şekilde geliştirilen TE ısı pompası sisteminin her iki yüzeyinde bulunan kanatçık geometrisi ayrı ayrı belirlenmiştir. Problemdaki kısıtlamalara bağlı olarak elde edilen bu maksimum ısı transfer hızına göre, TES modül seçilmiştir. Son durumda, sıcak kanatçıklı yüzeyden verilebilecek maksimum ısı miktarı belli olmasına ve bu değere bağlı olarak N_k ve N_I değerleri belli olmasına rağmen bu maksimum ısı transferi miktarında sistemin verimi ($COP_{ısıtma}$) maksimum olmayabilir. Bu yüzden maksimum ısı transferi değerinin ± 5 civarlarındaki, kanatçık kalınlığına bağlı olarak hesaplanan bütün ısı transfer miktarları arasında maksimum verimi ($COP_{ısıtma}$) veren N_k ve N_I değerleri bulunarak, optimizasyon tamamlanmıştır. Bu sayede TE ısı pompası sisteminin, kuvözün ısıtma durumuna göre maksimum ısı transfer hızı yakınlarındaki maksimum verimi veren performans parametreleri belirlenmiştir.

4.4 Termoelektrikli Kuvöz Sisteminin Otomatik Kontrolü

Geliştirilen TE ısı pompası sisteminin kuvöz içerisinde istenilen sıcaklığı hassas bir şekilde sağlayabilmesi için sistemin otomatik kontrol ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Otomatik kontrol sistemleri, insan müdahalesi olmaksızın, kendisini sürekli denetleyerek istenilen değerlerde bir ekipmanın sürekli (kararlı) olarak çalışmasını sağlayan sistemlerdir.

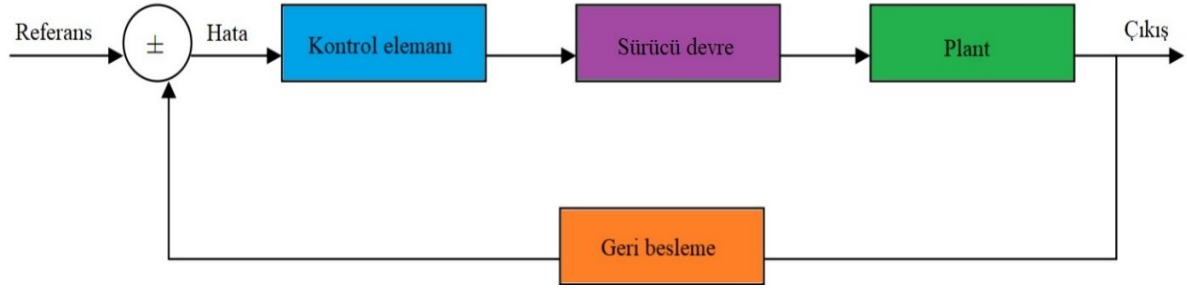
Otomatik kontrol sistemleri, açık çevrim kontrol sistemleri ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılır.

1-) Açık çevrim kontrol sistemleri: Sistemi kontrol eden düzeneğin sistemin çıktısından etkilenmediği ve sadece verilen referans değerine göre denetim işleminin yapıldığı sistemlerdir (Şekil 4.17). Örneğin otomobillerde gaz pedalına basıldığı zaman, sistem otomatik olarak aracın hızlanması gerektiğini algılamaktadır. Böylece açık çevrim kontrol sistemi, pistonlara daha fazla yakıt püskürterek aracı hızlandırmaktadır. Ters durumda ise gaz pedalına daha az basılacağından dolayı bu sefer kontrol sistemi aracın yavaşlatılmak istediğini algılayarak, aracı yavaşlatmaktadır.



Şekil 4.17: Açık çevrim kontrol sistemlerinin blok diyagramı

2-) Kapalı çevrim kontrol sistemleri: Bu kontrol sisteminde, çıkış değişkeni bir ölçme elemanı ile ölçülerek ölçme büyüklüğü girişe geri beslenir. Geri beslenen değer, referans edilen değerle karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda bir hata sinyali elde edilir. Kontrol sistemi, hata sinyalinin yapısına ve denetlenen çıkış değişkenine uygun bir denetim sinyali üretir. Bu denetim sinyali, sisteme giriş olarak girer ve yukarıdaki döngü tekrarlanarak, referans değerle çıkış değeri birbirine eşit oluncaya kadar çevrim sürekli olarak devam eder (Şirin 2019). Referans değeri ile çıkış sinyali birbirlerine eşit olunca, bir başka ifadeyle, sistemden ölçülen hata sıfır olduktan sonra kontrol elemanı, sistemi referans değerinde sürekli tutmaya devam eder. Kapalı çevrim denetim sistemine aynı zamanda “geri beslemeli denetim sistemi” de denilmektedir (Şekil 4.18). Bu çevrim sistemi için otomobillerdeki hız sabitleyici (cruise control) örnek verilebilir. Sürücü tarafından, hız sabitleyici belli bir referans değeri için ayarlanır. Ardından kapalı çevrim kontrol sistemi, ayarlanan referans değeri ile çıkış değerine karşılaştırarak bir hata sinyali üretir. Bu hata sinyali ile sisteme tekrar giriş yaptırılır ve çıkış değeri referans değerine ulaşmaya kadar bu döngü çalışmaya devam eder. Hata sinyalinin büyüklüğüne bağlı olarak piston içerisine gönderilecek yakıt belirlenir. Çıkış değeri ayarlanan referans değerine ulaştıktan sonra ise sistem, otomobilin ayarlanan değerinde kararlı bir şekilde yol almasını sağlamak için kontrol elemanı vasıtasıyla hep aynı miktarda yakıt püskürtür.



Şekil 4.18: Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin blok diyagramı

Sürücü devreler, otomatik kontrol sisteminde sistemin çalışması için kontrol elemanından aldığı sinyale göre güç elemanına enerji akışını sağlayan elemanlardır. Kontrol elemanı ise, ayarlanan referans değeri ile çıkış (ölçme) elemanından aldığı değerlere göre devrenin çalışmasına karar veren sinyali üreten elemanlardır. Otomatik kontrol sistemlerinde çıkış değerinin büyüklüğüne, duyarlılığına ve hassasiyetine göre birçok kontrol sistemleri geliştirilmiştir (Şırın 2019). Bu çalışma kapsamında, termoelektrikli kuvöz sisteminin kontrol elemanı olarak oransal + integral + türevsel kontrolör (PID) tercih edilmiştir.

4.4.1 PID

PID kontrolörler (denetleyiciler), endüstriyel uygulama kontrollerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca otomasyon sektöründe doğrusal (lineer) sistemlerin kapalı çevrim kontrollerinin yaklaşık %95'i PID kontrolörlerle yapılmaktadır. PID, yapısının çok basit olması, sistemin tek giriş, çıkış ve geri besleme döngüsü olması, ayarlanacak değişken sayısının az olması, kontrol edilmek istenen değere göre hızlı tepki vermesi, hata miktarının çok az olması gibi nedenlerden dolayı uygulamalarda çok tercih edilmektedir. PID yöntemi, oransal, integral ve türevsel kontrolör parametrelerinin birleşmesiyle oluşmaktadır. Aslında bir kontrol geri bildirim mekanizması olan PID, referans değeriyle geri besleme yoluyla gelen çıkış değerini karşılaştırır. Referans değeriyle çıkış değeri arasındaki farkın (hata, $e(t)$) büyüklüğüne bağlı olarak, sistem hatasını üç ayrı matematiksel işlemde (oransal + integral + türevsel) geçirip, toplaması sonucu kontrol sinyali üretir. Yani PID sistemi, bu şekilde sürekli olarak çalışan bir çevrim (döngü) ile hatayı en aza indirmeye çalışan basit bir algoritmadır (Özçivit 2019, Gören 2019).

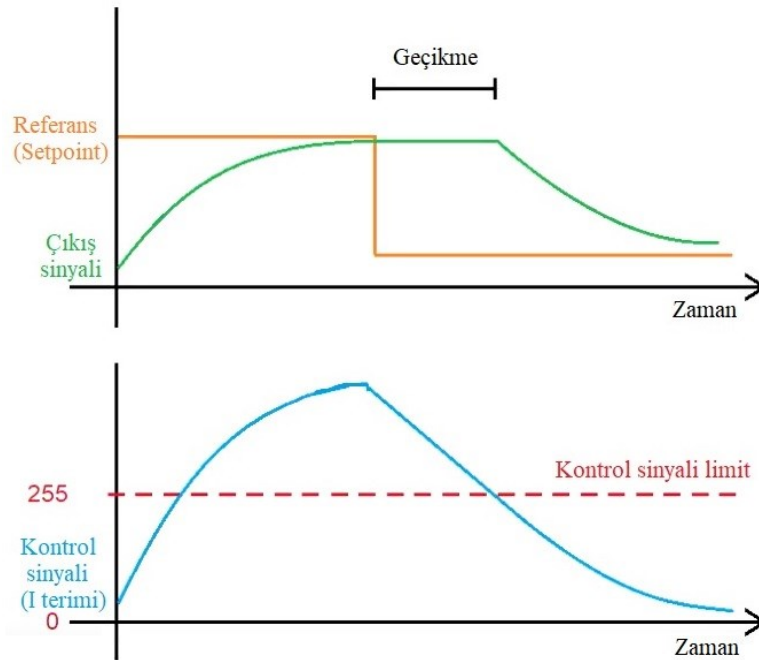
1-) Oransal (proportional) kontrolör (P): Oransal kontrolör sistemden gelen hatayı bir kat sayı (K_P) ile çarparak hatayı küçültmeye çalışmaktadır. Bu terim ayarlanan referans değerine yaklaştığında otomatik kontrolü bozucu etkileri de (osilasyon) mevcut olduğu için K_P katsayısının çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir (Özçivit 2019, Gören 2019).

$$e(t) = \text{referans değeri} - \text{feedback ile gelen çıkış değeri} \quad (4.261)$$

$$P = K_P \cdot e(t) \quad (4.262)$$

2-) İntegral kontrolör (I): İntegral kontrolör hata sinyalinin birim zaman (dt) için integralini alarak, yapılan hatanın alanını belirler. Bu yapılan hata alanıyla orantılı olarak kontrol sinyalinin büyüklüğü değiştirilerek, hata olduğu müddetçe hata miktarının toplamı bir katsayı ile çarpılarak toplanır. Bu kontrolör de yapılan hata miktarları sürekli olarak toplandığı için integral teriminin büyüklüğü çok artar. İntegral çok arttığında, integral teriminin tekrar azalmasını beklemek (gecikme) zaman alır (integral yığılması (integral wind-up) problemi, Şekil 4.19). Bu yüzden integrali sınırlandırılarak, yapılan hata alanlarının küçük küçük sisteme eklenmesi sistemin çabuk toparlanmasını sağlamaktadır. Kısaca integral bileşeni, büyük yük değişimleri nedeniyle oluşan oransal ofseti azaltmak ve yok etmek için kullanılır (Özçivit 2019, Gören 2019).

$$I = K_I \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (4.263)$$

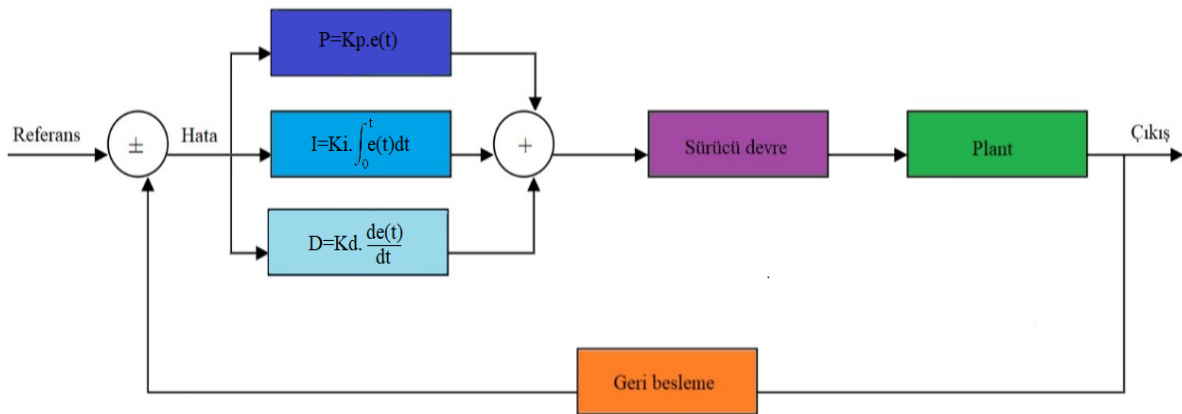


Şekil 4.19: İntegral yığılması (integral wind-up) problemi

3-) Türevsel (derivative) kontrolör (D): Türev kontrolör, hata sinyalinin birim zaman (dt) içinde değişim hızını belirler. Değişim hızıyla orantılı olarak kontrol sinyalinin büyüklüğünü değiştirerek, hata olduğu müddetçe hata miktarının değişimini bir katsayı ile çarparak toplar. Türev denetimi hatanın ne kadarlık bir hızla değiştiğini gözleyerek bu hatayı sezinlemeye ve ani yük değişimlerine karşı sistemi kontrol etmeye çalışır. Türev kontrolör, sadece hata değiştiğinde üretilen kontrol sinyaline katkıda bulunduğu için her zaman oransal kontrolörle beraber kullanılır. Türev kontrolör asla tek başına kullanılamaz (Özçivit 2019, Gören 2019).

$$D = K_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (4.264)$$

PID kısaca, geri besleme yoluyla gelen çıkış sinyalini, referans (setpoint) sinyali ile karşılaştırır ve hata miktarını (e(t)) belirleyerek PID denetleyicisine gönderir. Hata miktarı belli sabit katsayılar ile çarpılıp, üç ayrı matematiksel işlemden (oransal + integral + türevsel) geçirilir (Şekil 4.20). Matematik işlemler sonucunda elde edilen değerler toplanarak, bir kontrol sinyali üretilir. Elde edilen kontrol sinyali sırasıyla sürücü devre (driver) ve plant içerisinden geçirildikten sonra yeni bir çıkış sinyali elde edilir. Yeni çıkış sinyali feedback ile tekrar sisteme verilerek, sürekli çalışan bir kapalı çevrim içinde hata sinyali minimuma inene kadar işlem devam ettirilir.



Şekil 4.20: PID kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı

Bir sistemin (plant) PID ile hassas ve hızlı bir şekilde kontrol edilebilmesi için K_P , K_I ve K_D sabit katsayılarının doğru bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir. Bu katsayılar doğru seçildiği takdirde PID kontrolör sistemi, en küçük hatayı en az zamanda ve en az salınımla, referans değerini minimum aşımına ve en kısa zamanda sistemde kararlılığı sağlama gibi

kriterleri başarabilmektedir. Ancak bu katsayıları belirlemek kolay değildir. Literatüre bakıldığında bu konuyla ilgili birçok metot (Ziegler-Nichols, Relay, Cohen-Coon, Yuwana-Seborg vs.) ve deneysel yöntemler (Deneme-yanılma, 2. Ziegler-Nichols) mevcuttur (Wescott 2000, Lacoste 2008, Das ve diğ. 2012). Bütün bu metotlar ve deneysel yöntemler oldukça iyi sonuçlar vermesine rağmen bu katsayıların en doğru bir şekilde elde edilebilmesi için izlenecek yöntem şüphesiz ki sistemin (plant) transfer fonksiyonunun elde edilmesidir.

4.4.2 MATLAB®-Simulink ortamında termoelektrikli kuvöz sisteminin transfer fonksiyonlarının elde edilerek PID katsayılarının belirlenmesi

Günümüzde, mühendislikteki sistemlerin çoğunun tasarımları büyük oranda bilgisayar ortamlarında yapılmaktadır ve yapılan tasarımların test aşamaları için bilgisayar simülasyonlarından faydalanılmaktadır. Dolayısıyla mühendislik uygulamalarında simülasyonun önemi gün geçtikçe artmaktadır. MATLAB, günümüzde mühendislik alanında sistemlerin tasarım ve analizinde kullanılan en yaygın yazılım programlarından birisidir. Simulink ise MATLAB ile bütünleşik çalışan ve karmaşık sistemleri blok diyagramlarıyla görsel bir modelleme, tasarlama ve simülasyon yapma olanağı sunan yazılım ortamıdır. Çok gelişmiş Simulink kütüphanesi sayesinde sistemler, ön tanımlı blokların birbirlerine bağlanmasıyla “plant” adı verilen tek bir blok oluşturulur. Bu plant bloğuyla sistemlerin simülasyonları hızlı bir şekilde yapılarak, sonuçları görüntülenir.

Termoelektrikli kuvöz sisteminde (plant), temel olarak TES modüllerle ısıtma veya soğutma yapılmaktadır. Dolayısıyla bu plant sistemi için tek bir giriş parametresi vardır. Aslında bir de havadaki bağıl nem giriş parametresi de vardır. Ancak bu çalışmada nemlendirme yapılmadığı için bağıl nem değeri, sıradan atmosfer ortamının nem değeri olan %30 olarak sabit bir değer alınabilir. Bu yüzden bu sisteme tek giriş parametresi olur ve bu giriş parametresi sonucunda ise tek bir çıkış parametresi bulunmaktadır. Bu yüzden bu sistem için MATLAB®/Simulink yazılımının tek giriş tek çıkış (single input-single output tool, sisotool) arayüzü kullanılarak sistemin transfer fonksiyonu elde edilebilir. Bu arayüzün temeli Root Locus metota dayanmaktadır (Al-Taweel 2006). Termoelektrikli kuvöz sisteminde meydana gelen ısı ve kütle transferleri zamana bağlı olarak Bölüm 3’te detaylı bir şekilde elde edilmişti. Bu bölümde, Bölüm 3’teki matematiksel modellemede elde edilen denklemlerin her biri blok diyagramlarıyla ifade edilmiştir. Ardından, oluşturulan blokların birbirlerine bağlantıları

yapılarak alt sistemlerin (subsystem) tek blokları oluşturulmuştur. Son olarak, alt sistem bloklarının birbirlerine bağlantıları yapılarak, termoelektrikli kuvöz sistemi tek bir blok (plant) olarak oluşturulmuştur. Matematiksel modellemedeki sabit terimler ve bazı matematiksel işlemler sonucunda elde edilen katsayılar (ısı taşınım katsayıları, alanlar, vb.) MATLAB® M-file dosyası ile hesaplanarak, Simulink arayüzüyle haberleştirilmiştir. Termoelektrikli kuvöz, plant olarak elde edildikten sonra Simulink yazılımının sisotool arayüzü kullanarak sistemin birim basamak için transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Sistemin transfer fonksiyonu belirlendikten sonra ise MATLAB® içerisindeki PID tuning arayüzü kullanılarak, PID katsayıları elde edilmiştir.

4.4.2.1 Termoelektrik kuvöz sisteminin alt bölümlerinin blok bağlantıları

Oluşturulan Simulink modelinde, tasarlanan termoelektrikli kuvöz sistemi temel olarak 7 alt bölümden oluşmaktadır (Tablo 4.2).

Tablo 4.2: Termoelektrikli kuvöz sisteminin alt bölümleri

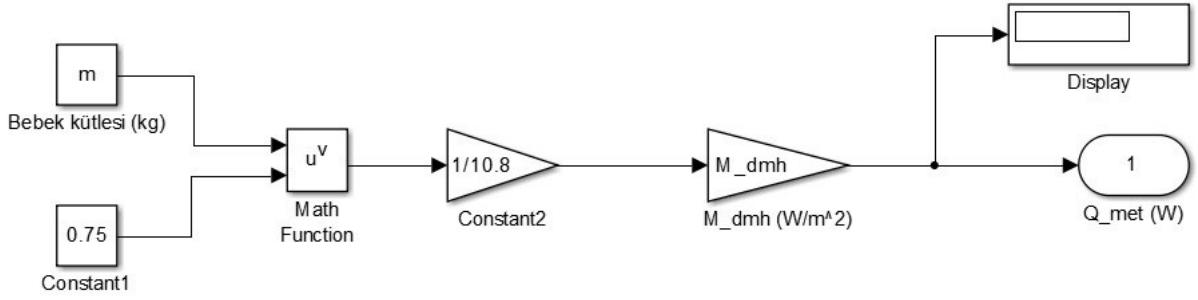
No	İsim	Alt bölümler
1	Prematüre bebek (tek yığın)	Bebeğin çekirdek tabakası
		Bebeğin cilt (deri) tabakası
2	Termoelektrikli kuvöz	Kabin havası
		Kabin duvarları
		Yatak (şilte)
		Radyal fan
		Termoelektrik ısı pompası

4.4.2.1.1 Bebeğin çekirdek tabakasının Simulink ortamında modellenmesi

Bebeğin çekirdek tabakası, Bölüm 3.1.1.1’de detaylı bir şekilde matematiksel olarak modellenmişti. Oluşturulan modelleme göz önüne getirildiğinde bebeğin çekirdek tabakası, kendi içerisinde 5 tane ısı transferi mekanizması ve bebeğin kütlesiyle birlikte toplam 6 Simulink alt bölümünden oluşacağı anlaşılmaktadır.

1-) Metabolik ısı üretim hızının Simulink ortamında modellenmesi

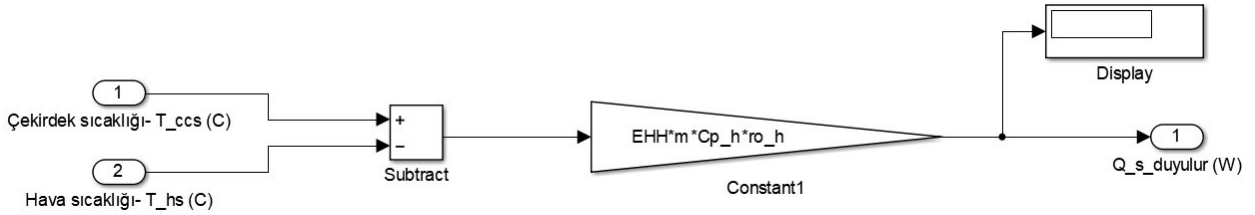
Metabolik ısı üretiminin Simulink blokları, Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.21). Bebeğin kütlesi ve M_{dmh} ifadelerinin değerleri, Ek A'da verilen MATLAB® M dosyasından otomatik olarak Simulink tarafından tanınmaktadır. Bu şekilde bebeğin ürettiği metabolik ısı (\dot{Q}_{met}) miktarı, Simulink yazılımı çalıştırılarak ekrandan (display) rahatlıkla görülebilmektedir.



Şekil 4.21: Metabolik ısı üretim hızının Simulink blokları

2-) Duyulur ısı kaybı miktarının Simulink ortamında modellenmesi

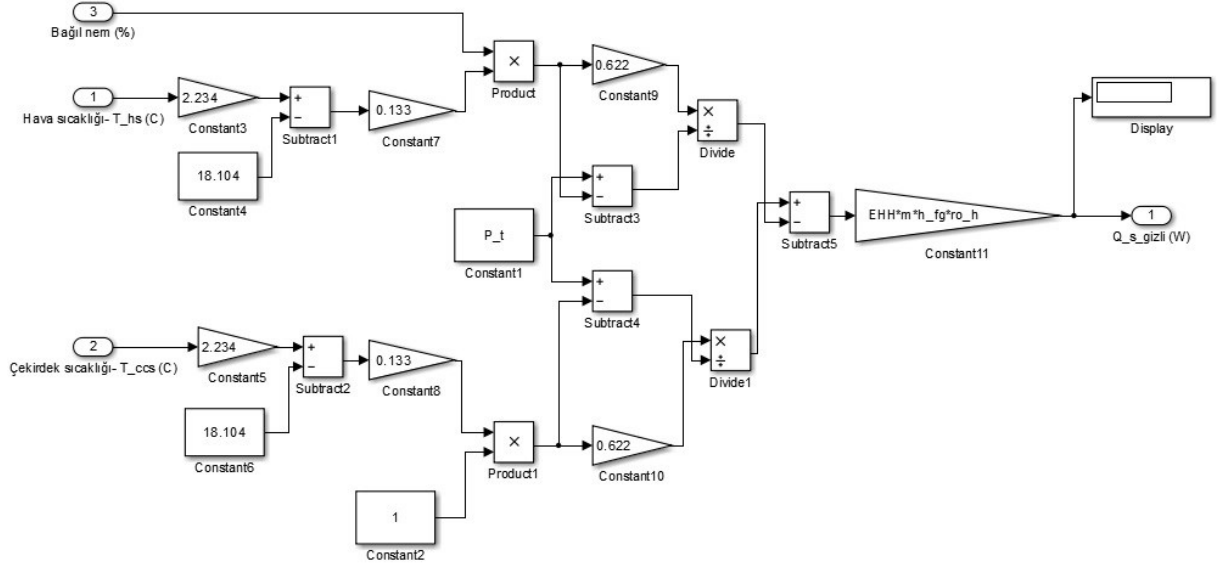
Duyulur ısı kaybı miktarının Simulink blok diyagramları, Denklem (3.8) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.22).



Şekil 4.22: Duyulur ısı kaybı miktarının Simulink blokları

3-) Gizli ısı kaybı miktarının Simulink ortamında modellenmesi

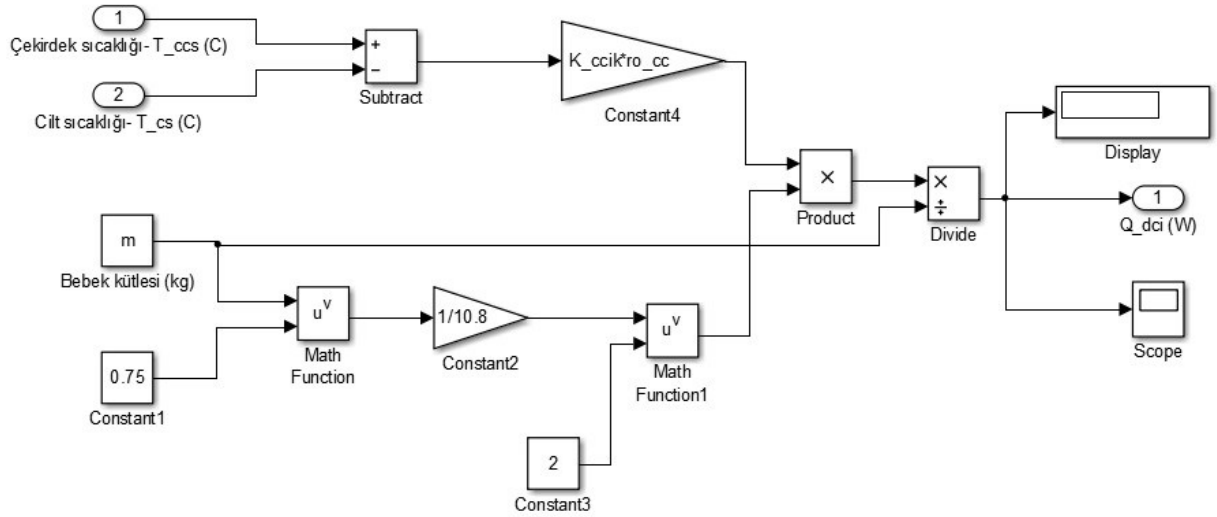
Gizli ısı kaybı miktarının Simulink blok diyagramları, (3.9) - (3.13) denklemleri kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23: Gizli ısı kaybı miktarının Simulink blokları

4-) Bitişik dokulardan bebeğin cildine iletimle olan ısı transferi miktarının Simulink ortamında modellenmesi

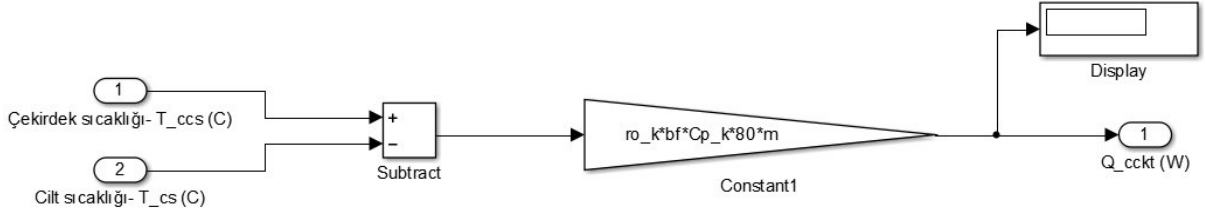
Bitişik dokulardan cilde iletimle olan ısı transferi miktarının Simulink blok diyagramları, Denklem (3.14) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.24).



Şekil 4.24: Bitişik dokulardan cilde iletimle olan ısı transferi miktarının Simulink blokları

5-) Bebeğin çekirdek tabakasından kana taşınımıyla olan ısı transfer miktarının Simulink ortamında modellenmesi

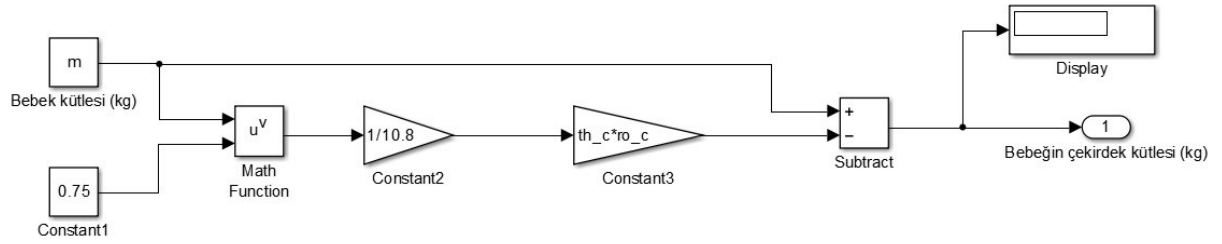
Bebeğin çekirdek tabakasından kana taşınımıyla olan ısı transfer hızı, Simulink blok diyagramlarıyla (3.15) - (3.17) denklemleri kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4.25: Bebeğin çekirdek tabakasından kana taşınımıyla olan ısı transfer miktarının Simulink blokları

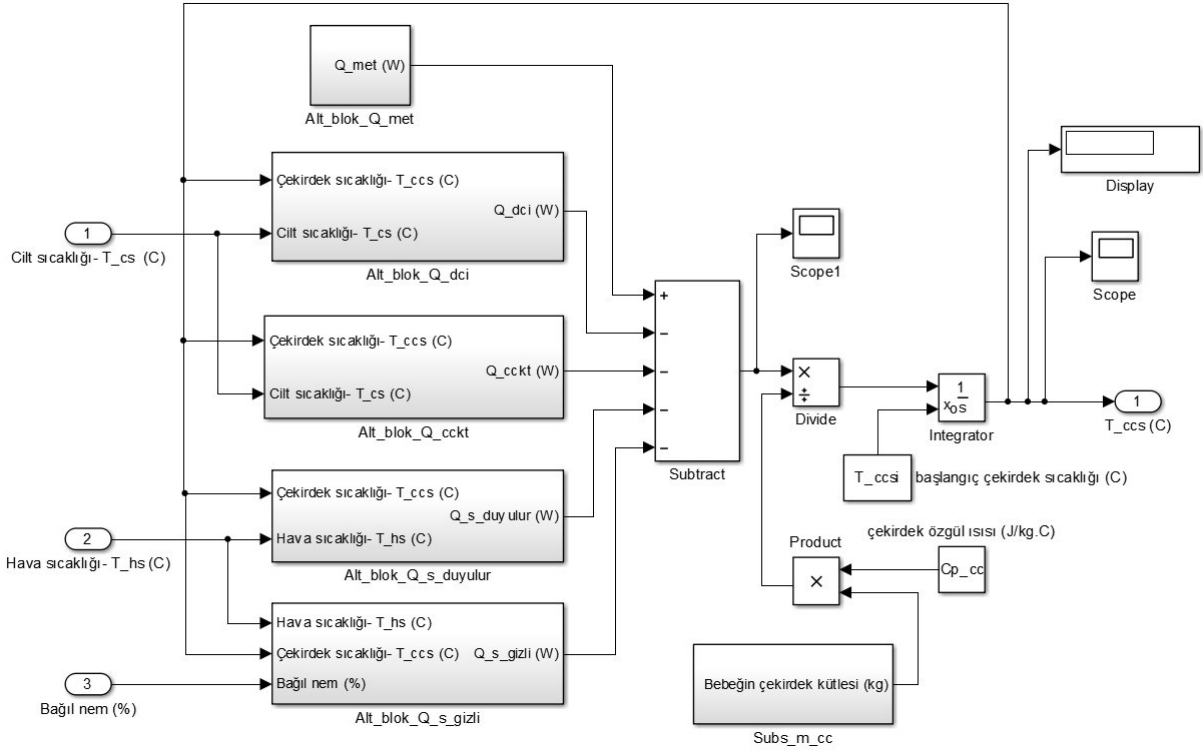
6-) Bebeğin çekirdek kütesinin Simulink ortamında modellenmesi

Bebek çekirdeğinin kütesi Simulink bloklarıyla Denklem (3.18) ve (3.19) kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4.26).

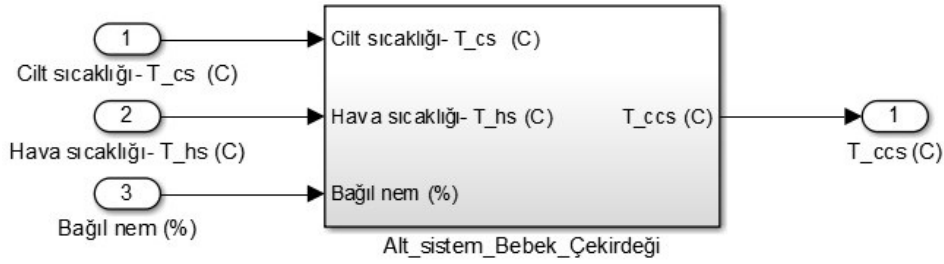


Şekil 4.26: Bebeğin çekirdek kütesinin Simulink blokları

Bebeğin çekirdek tabakasının, Bölüm 3.1.1.1'deki matematiksel modellemesinde kullanılan her bir denklemin yukarıda açık bir şekilde gösterdiği gibi Simulink blokları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu Simulink blokları, Denklem (3.3) dikkate alınarak birbirlerine bağlanmıştır (Şekil 4.27). Bu şekilde bebeğin çekirdek tabakasının Simulink modeli, alt sistem bebek çekirdeği olarak tek bir blokla elde edilmiştir (Şekil 4.28).



Şekil 4.27: Bebeğin çekirdek tabakasının Simulink blok diyagramı

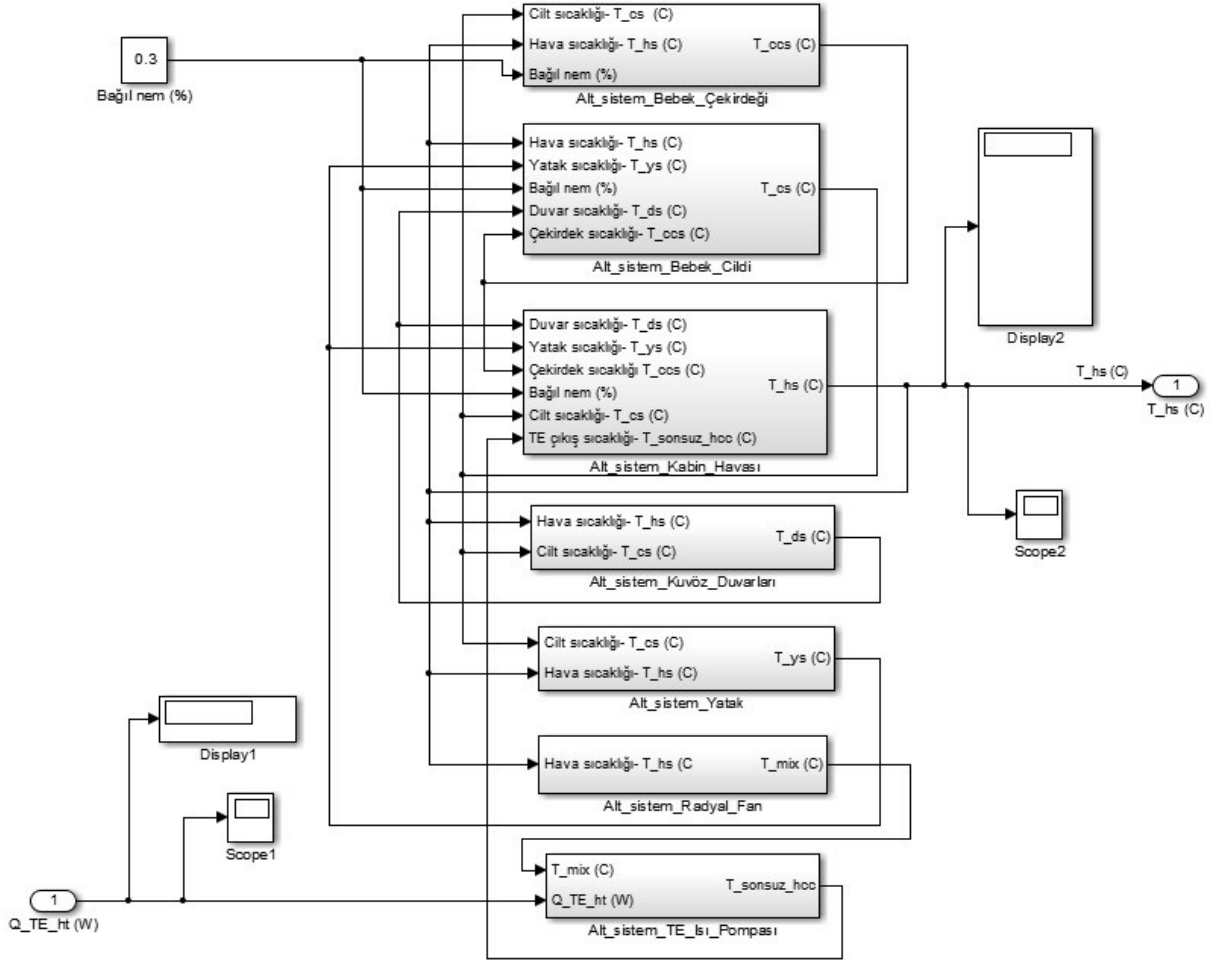


Şekil 4.28: Bebeğin çekirdek tabakasının alt sistem olarak tek bir Simulink blok diyagramıyla oluşturulması

Şekil 4.27 ve 4.28’de açık bir şekilde görüldüğü gibi, bebeğin çekirdek tabakasına cilt sıcaklığı (T_{cs}), kabin havası sıcaklığı (T_{hs}) ve sabit bağıl nem değeri giriş parametresi olarak girmektedir ve bu 3 parametrenin sonucu olarak tek bir çıkış parametresi olan çekirdek sıcaklığı ($T_{cs} = T_{ccs}$) etkilenmektedir. Elde edilen çekirdek sıcaklığı, Tablo 4.2’de verilen termoelektrikli kuvöz sisteminin alt bölümlerin bazılarında giriş parametresi olarak kuvöz sistemine etki etmektedir.

4.4.2.2 Termoelektrik kuvöz sisteminin bütün parçalarının blok bağlantıları

Önceki bölümde bebeğin çekirdek tabakasının Simulink blok diyagramları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Benzer şekilde Tablo 4.2’de bahsedilen her bir bölümün blok diyagramları, Bölüm 3’de oluşturulan matematiksel modellemeye göre ayrı ayrı oluşturulmuştur. 7 farklı bölümün blok diyagramları ayrı ayrı oluşturulduktan sonra bu bölümlerin birbirlerine bağlantıları yapılarak, termoelektrikli kuvöz sistemi Simulink blok diyagramlarıyla hava sıcaklığı ölçüm modu için oluşturulmuştur (Şekil 4.29). Son olarak da Şekil 4.29’daki Simulink blok diyagramlarıyla hava sıcaklığı ölçüm modu için elde edilen termoelektrikli kuvöz sistemi (plant), tek bir blok Simulink bloğu (TE_Bebek_Kuvözü_Sistemi_T_hs) olarak elde edilmiştir (Şekil 4.30).

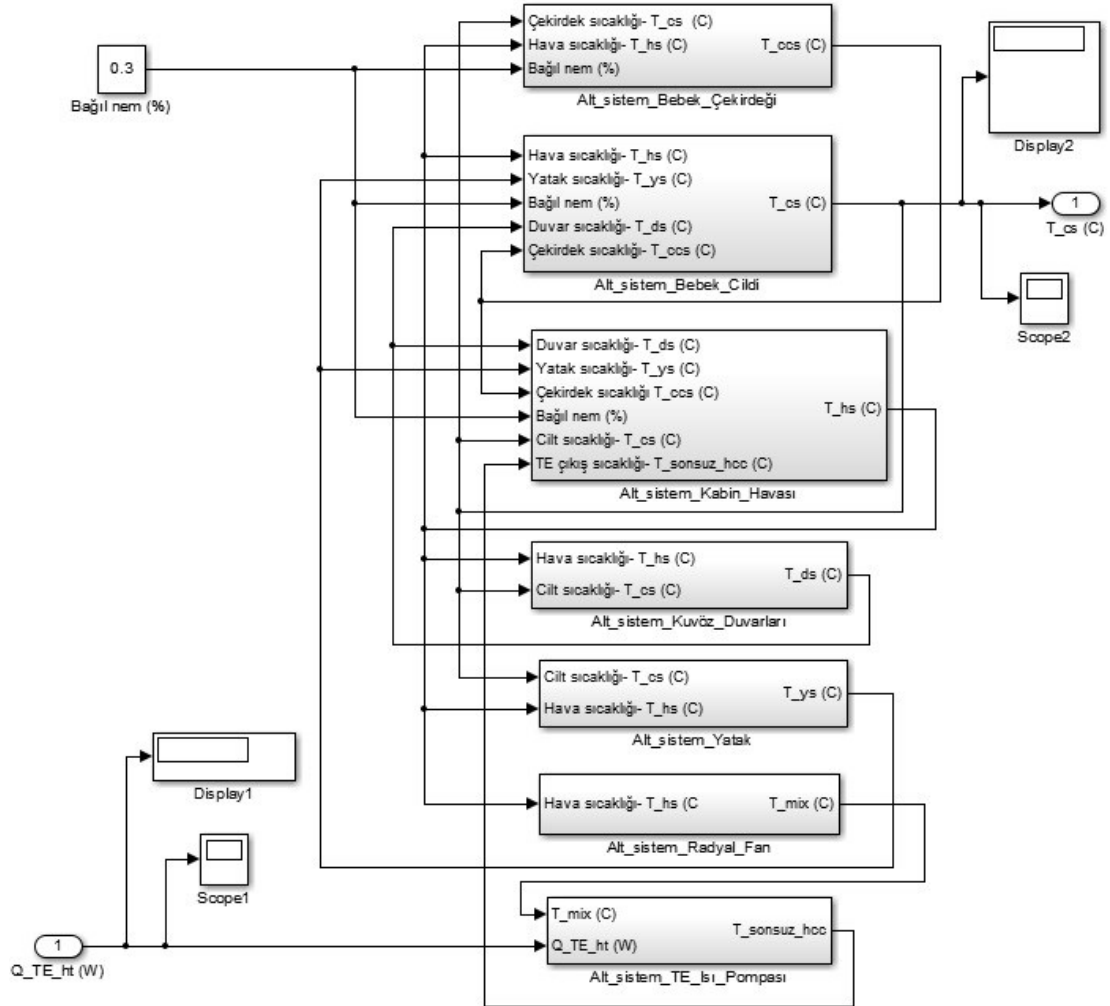


Şekil 4.29: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) hava sıcaklığı çıkış parametresine bağlı olarak oluşturulan Simulink blok bağlantıları



Şekil 4.30: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) tek bir Simulink blok diyagramı olarak oluşturulması

Bebek kuvözlerinde, kabin hava sıcaklığı ölçüm modu ve cilt sıcaklığı ölçüm modu olmak üzere iki tane sıcaklık ölçüm modu bulunmaktadır. Şekil 4.29 ve 4.30'daki Simulink blokları, kabin havası sıcaklığı ($T_{hs} = T_{hs}$) moduna göre çıkarılmıştır. O yüzden bu bağlantı yapısında, TES modülleri tarafından verilen ısıtma ya da soğutma gücü (Q_{TE_ht}), çıkış parametresi olarak kabin hava sıcaklığını (T_{hs}) etkilemektedir. Benzer işlemler cilt sıcaklığı ölçüm modu içinde yapılmıştır (Şekil 4.31) ve termoelektrikli kuvöz sistemi (plant) tek bir Simulink bloğu (TE_Bebek_Kuvözü_Sistemi_T_cs) olarak elde edilmiştir (Şekil 4.32).



Şekil 4.31: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) cilt sıcaklığı çıkış parametresine bağlı olarak oluşturulan Simulink blok bağlantıları



Şekil 4.32: Termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) tek bir Simulink blok diyagramı olarak oluşturulması

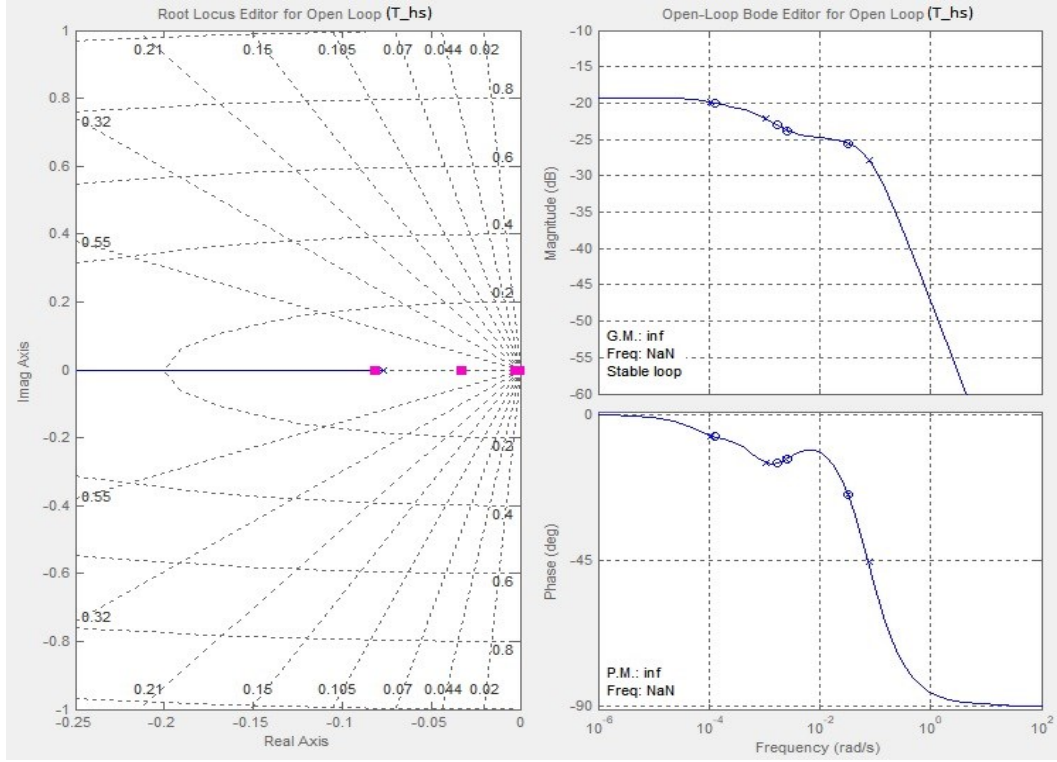
4.4.2.3 Termoelektrikli kuvöz sisteminin transfer fonksiyonları

Bir önceki bölümde hem kabin havası ölçüm modu hem de cilt sıcaklığı ölçüm modu için termoelektrikli kuvöz sisteminin (plant) tek bir Simulink bloğu olarak elde edilmesi gösterilmiştir. Her iki ölçüm modu için de tek giriş ve tek çıkış bulunduğu Şekil 4.30 ve 4.32’ de açık bir şekilde görülmektedir. Bu bölümde, her iki ölçüm modu için MATLAB®/Simulink yazılımının tek giriş tek çıkış (single input-single output tool, sisotool) arayüzü kullanılarak, her bir ölçüm modu için kuvözün transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Simulink modelini doğrusallaştırarak (linearize), (4.265) ve (4.266) denklemleriyle tutarlı bir durum-uzay (state-space) modeline dönüştürebilmek adına her bir ölçüm modu için EK B’de verilen kodlar yazılmıştır (Al-Taweel 2006).

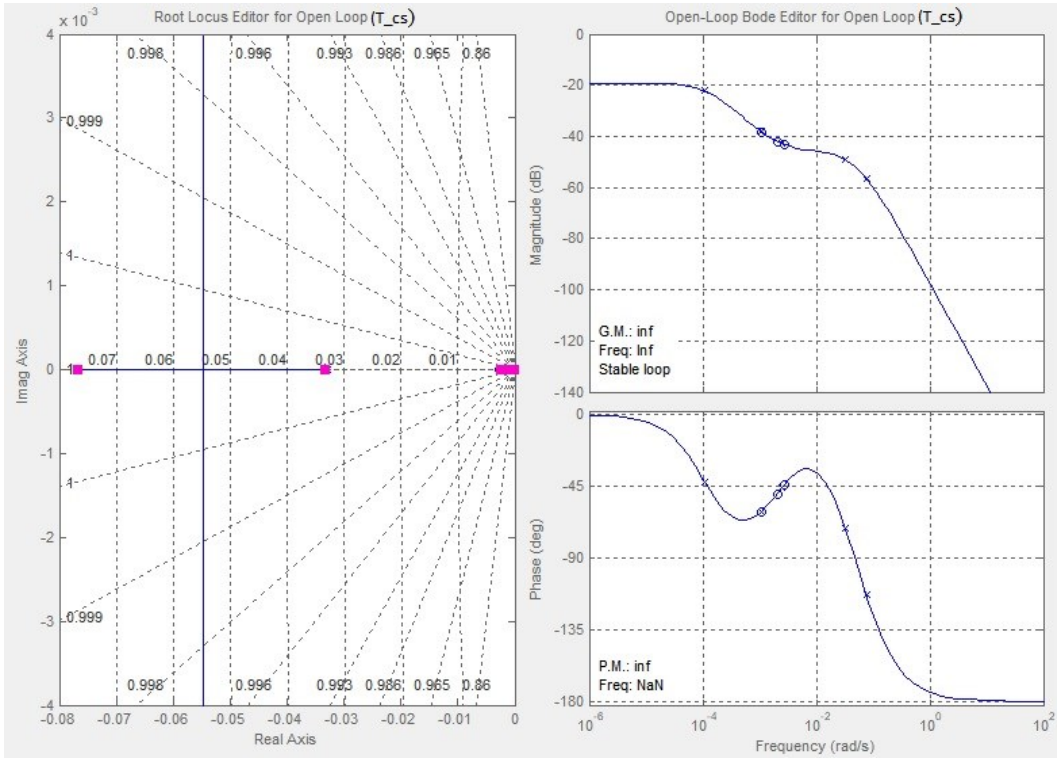
$$\frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot u \quad (4.265)$$

$$y = C \cdot x + D \cdot u \quad (4.266)$$

(4.265) ve (4.266) denklemlerindeki A, B, C ve D uygun boyutlarda matrisler, x durum vektörü, u giriş (input) ve y çıkış (output) vektörleridir. Hava ve cilt modları için açık çevrim Root Locus ve Bode diyagramları sırasıyla, Şekil 4.33 (a) ve (b)’de gösterilmiştir. Bu diyagramlar kullanılarak sistemin kararlılığı doğrulanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.33: Root Locus ve Bode diyagramları (a) kabin hava sıcaklığı ölçüm modu (b) cilt sıcaklığı ölçüm modu

Sisotool arayüzü kullanılarak, termoelektrik sistemle çalışan AMS Amenity XP kuvözünün, her bir ölçüm modunun sürekli zaman transfer fonksiyonları aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Kabin hava sıcaklığı ölçüm modunun transfer fonksiyonu:

$$0,004411 s^4 + 0,0001661 s^3 + 6,636e-07 s^2 + 7,129e-10 s + 7,999e-14$$

$$s^5 + 0,1136 s^4 + 0,002945 s^3 + 9,642e-06 s^2 + 7,776e-09 s + 7,358e-13$$

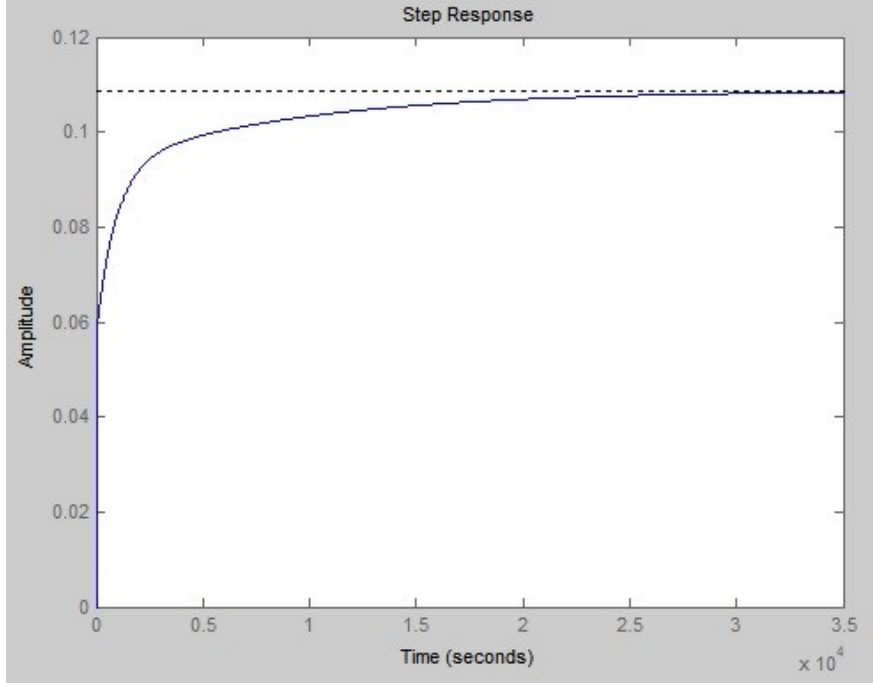
Cilt sıcaklığı ölçüm modunun transfer fonksiyonu:

$$1,347e-05 s^3 + 7,862e-08 s^2 + 1,44e-10 s + 8,09e-14$$

$$s^5 + 0,1136 s^4 + 0,002945 s^3 + 9,642e-06 s^2 + 7,776e-09 s + 7,358e-13$$

4.4.2.4 Termoelektrikli kuvöz sisteminin PID katsayılarının belirlenmesi

TE ısı pompası sistemiyle çalışan AMS Amenity XP kuvözün transfer fonksiyonları elde edildikten sonra, ısı pompası sisteminin kuvöz içerisinde hassas sıcaklık kontrolünü sağlayabilmesi ve herhangi bir bozucu durumla karşılaştığı zaman hızlı bir şekilde dinamik davranış gösterebilmesini sağlayacak olan PID katsayıları, MATLAB® yazılımının içerisindeki PID Tuning arayüzü kullanılarak belirlenmiştir. PID katsayılarının belirlenmesi esnasında, sistemin performansı ve kararlılığı için yükselme ve yerleşme zamanlarının en kısa süre, sistemin ayarlanan referans (setpoint) değerine minimum seviyede aşması, sistemin herhangi bir duruma karşı vereceği tepkisinin olabildiğince hızlı ve sistemin geçici davranışının mümkün mertebe salınım yapmadan referans değerine geldiğinde hemen yakalaması kriterlerine dikkat edilmiştir. Bu çalışmada, gerçek bir bebek kullanılmadığı için geliştirilen TE ısı pompası sisteminin PID katsayıları sadece kabin hava sıcaklığı ölçüm modu için belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen PID katsayıları, çevre sıcaklığının 25 °C ve kabin içerisindeki hava sıcaklığının da 36 °C olduğu durum için elde edilmiştir. Sistemin genel kararlılığı için birim basamak girişi uygulanmıştır ve bu girişe göre sistemin davranışı Şekil 4.34’de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.34: Termoelektrikli kuvöz sisteminin birim basamak girişe göre davranışı

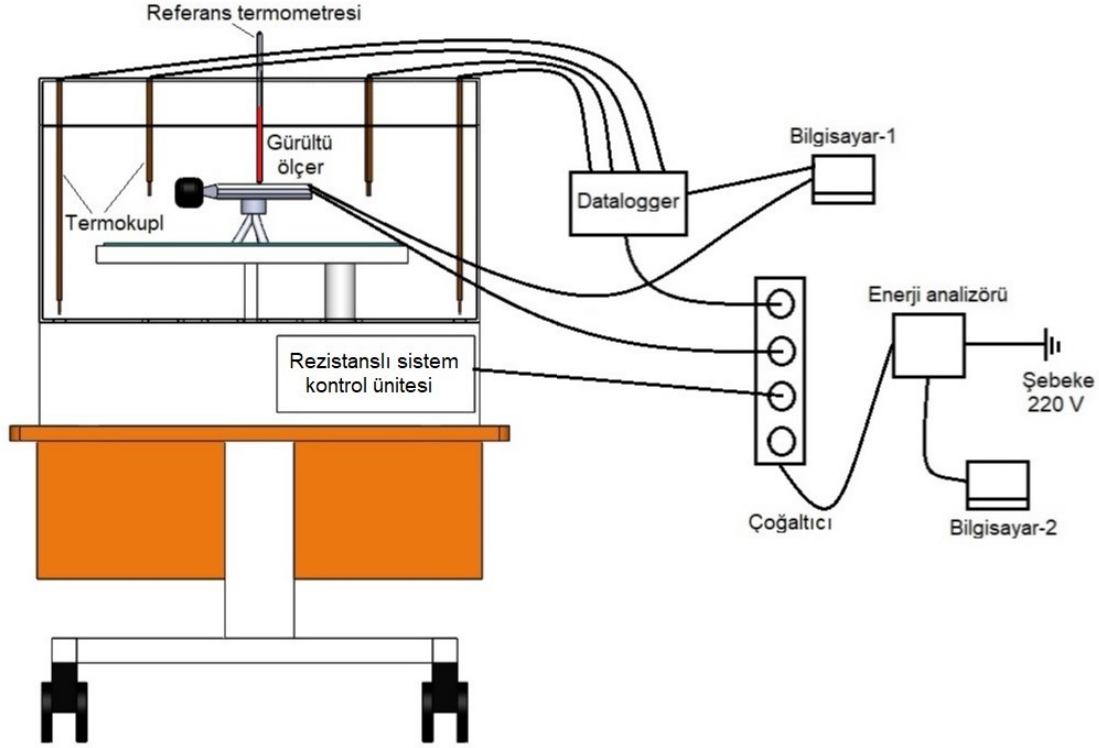
5. DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ ve VERİ ANALİZİ

Termoelektrik ısı pompası ile çalışan kuvöz sisteminin geliştirilebilmesi için öncelikle AMS Amenity XP prematüre bebek kuvözünün mevcut tasarım parametrelerinin (ısıtma gücü, hava debileri, vb.) doğru bir şekilde ölçülerek, belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü belirlenen tasarım parametreleri, termoelektrik ısı pompası sisteminin korunum denklemlerinde kullanılarak, termoelektrikli kuvöz sisteminin optimizasyonu yapılmaktadır. Ayrıca bu tez kapsamında, geliştirilen TE kuvöz sisteminin dinamik davranışları, ısı ve hidrolik performans özellikleri rezistanslı kuvöz sistemine ait olanlarla karşılaştırılacağı için her iki sistemdeki tasarım parametrelerinin ölçüm sistemleriyle ölçülmesi gerekmektedir.

5.1 Rezistanslı Kuvöz Sistemin Tasarım Parametreleri

Rezistanslı sistemin tasarım parametreleri olarak, kuvöz içerisine alınan taze hava miktarı, kabin ortamından alınan hava miktarı, kabin içerisindeki hız dağılımı, kuvöz sisteminin kritik noktalarının sıcaklıkları, kabin içerisindeki alarmlı ve alarmsız durumdaki gürültü seviyesi, akım, voltaj ve harcanan aktif güç değerleri belirlenmiştir. Bahsedilen tasarım parametrelerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için Şekil 5.1'deki düzenek kurulmuştur. Ayrıca deneysel çalışma yapılırken kabin ortamının termal kamera görüntüleri de alınmıştır. Rezistanslı sistemin hızı ile hacimsel ve kütleli debileri her zaman sabit olduğu için bu değerler bir kereye mahsus belirlenmiştir ve tez kapsamında yapılan bütün deneylerde kullanılmıştır. Kabin ortamındaki sıcaklık dağılımı için EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) belirtilen 5 farklı noktaya ısı çiftleri (termokupl) yerleştirilmiştir. Ayrıca matematiksel hesaplamalarda kullanılması ve geliştirilen termoelektrikli sistemle rezistanslı sistemin karşılaştırmalarının doğru bir şekilde yapılabilmesi için kabine giren-çıkan hava sıcaklıkları, kabinin iç-dış yüzey sıcaklıkları, rezistans elemanına giren-çıkan havanın sıcaklıkları, rezistans yüzeyi ve çevre ortamı sıcaklıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle rezistanslı sisteme toplam 17 adet ısı çifti yerleştirilmiştir. Böylece kuvözün kritik her bir noktasındaki sıcaklıklar ölçülmüş ve datalogger vasıtasıyla anlık olarak kaydedilmiştir. Hem 17 adet ısı çiftinin kalibre edilmesi hem de iki sistemin (rezistanslı ve termoelektrikli) doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi için kabinin merkez noktasına referans termometresi yerleştirilmiştir. Prematüre bebeklerde gürültü seviyesi çok önemli olduğu için mevcut sistemin gürültü seviyesi

alarmlı ve alarmsız durumlarda ölçülmüştür. Ölçüm sistemleri ve rezistanslı kuvöz sisteminin harcadığı toplam aktif gücün belirlenebilmesi için bütün ekipmanlar bir çoğaltıcı (priz) vasıtasıyla enerji analizörüne bağlanmıştır (Şekil 5.1). Böylelikle, gerçekleştirilen her bir deney için rezistanslı sistemin harcadığı akım, voltaj ve aktif güç miktarları belirlenmiştir.



Şekil 5.1: Rezistanslı kuvöz sistemine ait deney düzeneğinin şematik gösterimi

5.1.1 Kuvöz hava debilerinin belirlenmesi

AMS Amenty XP kuvözü, iç içe geçirilmiş iki silindir kanal ve bir radyan fan ile kabin içerisindeki hava sirkülasyonunu sağlamaktadır. Radyan fan, iki silindir kanalın bir ucuna temas etmektedir ve sistem çalıştırıldığında, ortamda bir vakum etkisi yaratmaktadır. İçteki silindir kanalın diğer ucu, dış (çevre) ortama açılmakta ve oluşturulan vakum etkisi ile bir miktar taze havayı kuvöz içerisine almaktadır. İçteki silindir kanal ile dıştaki silindir kanal arasında kalan aralık ise kabin ortamına açılmaktadır. Böylece fanın oluşturduğu vakum etkisi ile bir miktar hava kabin ortamından emilerek, yeniden rezistans üzerinden geçirilmek üzere kuvöz içerisine alınmaktadır. Bu şekilde taze hava ile kabin ortamından alınan hava karıştırılarak, içeri alınan taze havanın sıcaklığı bir miktar yükseltilmektedir. Ardından karışan toplam hava, fan vasıtasıyla ısıtma (rezistans) sisteminin üzerinden geçirilerek havanın sıcaklığı

bir miktar daha arttırılmaktadır. Bu şekilde gerçekleşen sürekli bir döngüyle, kuvöz içerisindeki hava akışı sağlanmaktadır. Kuvöz tasarımcıları, kuvöze alınacak taze hava ve kabin ortamından alınacak hava miktarlarını, kuvöz standardında verilen değerlerle uyumlu olacak şekilde belirlemekte ve buna bağlı olarak, havanın emildiği kanal çapları ile kabin ve çevre ortamına açılan aralıkların kesit alanlarını tasarlamaktadırlar. Bu büyüklükler belirlendikten sonra kuvöz her zaman aynı debilerle çalışmakta ve bebeğin taze hava ihtiyacını sürekli olarak karşılamaktadır. Dolayısıyla rezistanslı kuvöz için bu değerlerin bir kere belirlenmesi yeterlidir.

5.1.1.1 Taze hava miktarının belirlenmesi

AMS Amenity XP kuvözü çalıştırıldığında, kuvözün fanı hemen devreye girerek Şekil 5.2 (a)'da gösterilen dairesel kanal aralığı vasıtasıyla, dış (çevre) ortamdan bir miktar taze havayı kuvöz içerisine almaktadır. Taze hava, dairesel kanal aralığından emildiği için bu kanal aralığından hız ve debi ölçümlerinin doğru bir şekilde yapılması mümkün değildir. Bu yüzden Şekil 5.2 (b)'de gösterilen 95 mm çaplı ve Bureau of Energy Efficiency (2019)'a göre belirtilen uzunluktaki $(0,75D_e)$ dairesel kanal, dairesel aralığın üzerine yerleştirilmiştir. Bu şekilde dairesel aralığın ölçümler için oluşturduğu karmaşıklık ortadan kaldırılmış ve dairesel kanal içerisinde bir hava akışı oluşturularak, taze hava miktarının belirlenebilmesi için sistem uygun hale getirilmiştir.



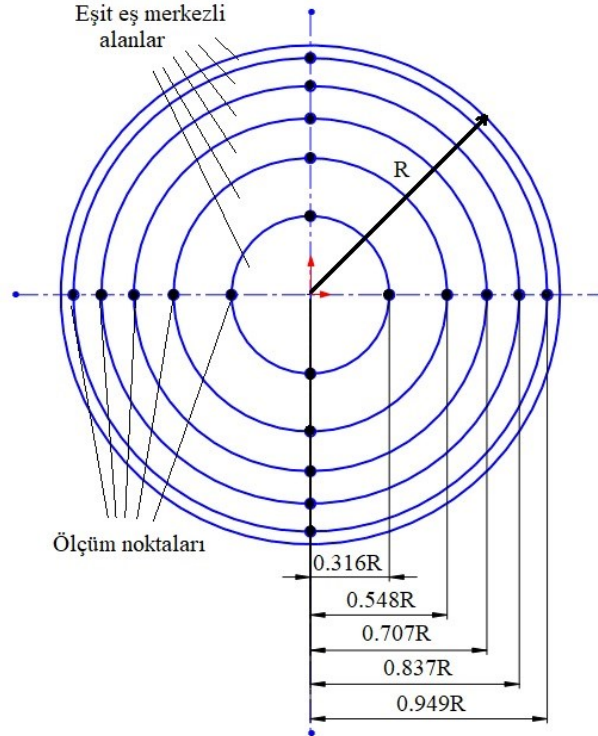
(a)



(b)

Şekil 5.2: (a) AMS Amenity XP kuvözünün taze havayı emdiği kanal aralığı (b) oluşturulan dairesel kanal

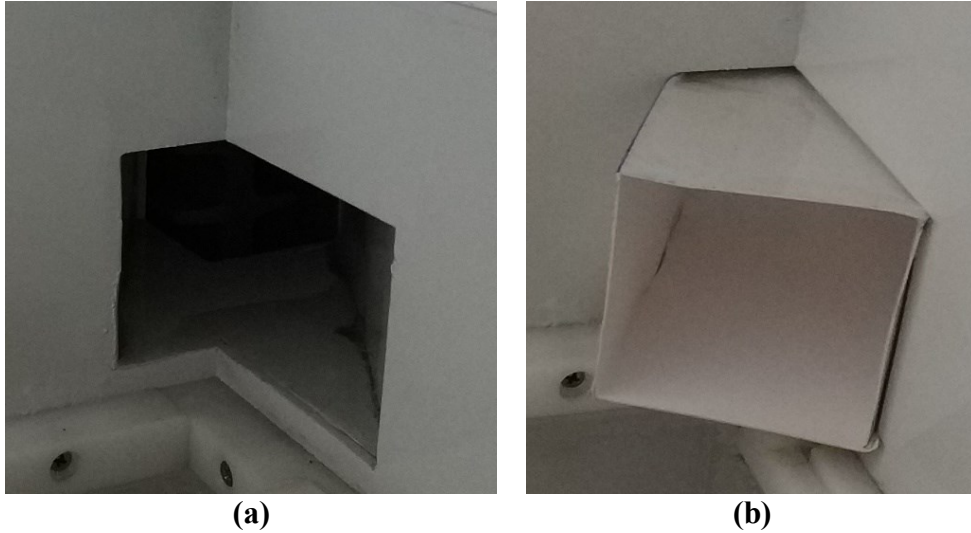
Ölçüm bölgesi, ölçme işlemine uygun hale getirildikten sonra bu bölgedeki hız ölçümlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi çok önemlidir. Çünkü hız değerleri, dairesel kanal içerisindeki her bir noktada farklılık göstermektedir. Ayrıca oluşturulan dairesel kanal, hız sınır tabaka kalınlığının oluşmasını sağlayacak kadar uzun olmadığı için yaklaşık olarak dairesel kanalın orta noktasından yapılan ölçümlerle, ortalama hızın doğru bir şekilde belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden dairesel kanaldaki ortalama hızın belirlenebilmesi için Bureau of Energy Efficiency (2019) kuruluşunun, fanların hacimsel debilerini belirleme de kullandığı hız ölçme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, belirli aralıklarla çizilen çemberler ile ölçüm bölgesinde eş eksenli eşit dairesel alanlar oluşturulur. Eşit dairesel alanlarda, sabit ölçüm noktalarının yerleri belirlenerek bu sabit noktalardan hız ölçümleri yapılır. Ölçülen her bir noktadaki hız değerlerinin toplamı, ölçüm noktası sayısına bölünerek kanal içerisindeki ortalama hız tespit edilir. Bu doğrultuda dairesel kanalın kesit alanına, Şekil 5.3’de belirtilen uzunluklarda 5 adet çember çizilmiştir. Bu çemberlerin yatay ve dikey eksenlere kestiği noktalar işaretlenerek, sabit hız ölçüm noktaları belirlenmiştir.



Şekil 5.3: Dairesel kanalın sabit hız ölçüm noktaları (Bureau of Energy Efficiency, 2019)

5.1.1.2 Kabin ortamından alınan hava miktarının belirlenmesi

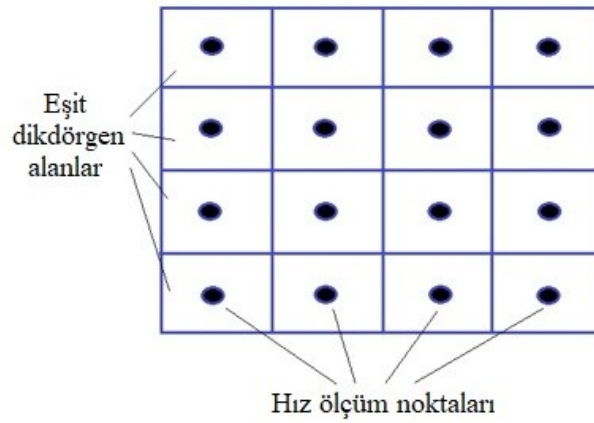
Taze hava ile kabin ortamından alınan havanın karışmasıyla elde edilen toplam karışım havası, otomatik kontrolle kontrol edilen rezistans üzerinden geçirilerek bir miktar daha ısıtılmaktadır. Kuvözün çalıştığı süre boyunca, bu döngü sürekli olarak devam etmekte ve kabin ortamı istenilen sıcaklığa getirilmektedir. AMS Amenity XP kuvözünde kabin ortamından emilen havanın ortalama hızını ve debilerini ölçmekten ziyade, rezistans üzerinden geçirilen toplam karışım havasının ortalama hızını ve debilerini ölçmek daha kolay bir işlemdir. Toplam hava rezistans üzerinden geçtikten sonra Şekil 5.4 (a)'da gösterilen kanal içerisinden geçerek, nemlendirme bölmesine gelmektedir. Bu kanal vasıtasıyla toplam hava miktarı, kolay bir şekilde ölçülebilmektedir. Bu sayede toplam hava miktarından taze hava miktarının çıkartılmasıyla, kabin ortamından emilen hava miktarı kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir. Ancak toplam hava miktarının tespiti için küçük bir problem bulunmaktadır. Şekil 5.4 (a)'da açık bir şekilde görüldüğü üzere, kanalın çıkışı nemlendirme bölmesinin iki kenarının kesiştiği köşeye denk gelmektedir. Bu şekildeki bir geometriden, doğru bir hız ölçümü yapılması mümkün değildir. Bu problemi ortadan gidermek için Şekil 5.4 (b)'de gösterildiği gibi kanalın içerisine 48 x 54 mm² ölçülerinde bir dikdörtgen kanal ilave edilerek, kanal bir miktar uzatılmıştır. Bu şekilde ölçüm bölgesi hız ölçümü için uygun hale getirilmiştir.



Şekil 5.4: a) Toplam hava miktarının geçtiği kanal b) hız ölçümü için uygun hale getirilen dikdörtgen kanal

Taze hava miktarının belirlenmesinde olduğu gibi, dikdörtgen kanal içerisindeki her bir noktadaki hava hızı farklıdır. Bu yüzden ortalama hızın belirlenmesi için taze havanın ortalama

hızının belirlenmesinde kullanılan yöntemin, dikdörtgen kanallar için geçerli olan bölümü kullanılmıştır. Buna göre, ölçüm bölgesi eşit alanlara sahip dikdörtgen alanlara bölünmüştür. Bureau of Energy Efficiency (2019) kuruluşu, dikdörtgen kanallarda ölçüm bölgesinin 16-64 aralığında eşit alanlara bölünmesini tavsiye etmektedir. Bu çalışmada ölçüm bölgesi, 16 adet eşit dikdörtgen alana bölünmüştür ve sabit ölçüm noktaları bölünen dikdörtgenlerin orta noktası olarak işaretlenmiştir (Şekil 5.5). Dairesel kanalda olduğu gibi, her bir noktadaki ölçülen hızlar toplanarak, sabit hız ölçüm nokta sayısına bölünmüş ve dikdörtgen kanaldaki ortalama hız tespit edilmiştir.

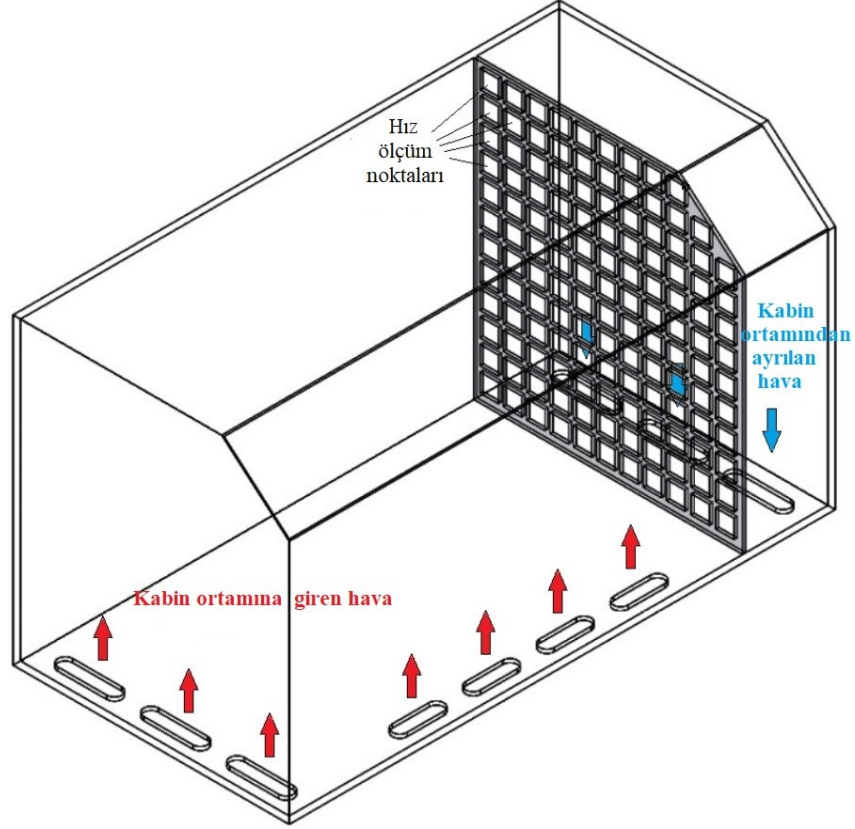


Şekil 5.5: Dikdörtgen kanalın sabit hız ölçüm noktaları (Bureau of Energy Efficiency, 2019)

5.1.1.3 Kabin içerisindeki havanın ortalama hızının belirlenmesi

Kabin içerisindeki ortalama hava hızı, bebeği rahatsız etmeyecek kadar düşük bir hız değerinde olmalıdır. EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) açık bir şekilde belirtildiği gibi, normal kullanımda şilte üzerindeki hava akış hızı $\leq 0,35$ m/s olmak zorundadır. Bu hızın doğru bir şekilde belirlenebilmesi oldukça zordur. Çünkü hava hızı, çok küçük bir değerdir ve küçük akış hızının temas ettiği kesit alanı çok büyüktür. Buna ilaveten hava akışının geçtiği alanda yatak ve yatağın mekanik düzeneği akışı bir miktar engellemektedir (bkz. Şekil 3.2 (a) ve Şekil 3.7 (a)). Ayrıca AMS Amenity XP kuvözünde, kabine olan hava akışı hem kabinin kısa kenarındaki açıklıklardan hem de kabinin uzun kenarındaki açıklıklardan girdiği için kabin içerisindeki havanın ortalama hızının belirlenmesini daha da zorlaştırmaktadır (Şekil 5.6). Literatürde bu şekilde karmaşık bir geometriye sahip ve küçük akış hızına göre çok büyük bir kesit alanı olan yüzeylerden geçen akışkanın ortalama hızının belirlenmesi için bir yöntem bulunamamıştır. Bu yüzden gerçekleştirilen çalışmada ortalama hızın tespiti için kabinin kesit

alanı $3 \times 3 \text{ cm}^2$ kesit alanlara sahip 85 adet küçük karelere bölünmüştür. Bu küçük karelerin merkezleri belirlenerek, sabit ölçüm noktaları işaretlenmiştir. Sabit ölçüm noktalarında ölçülen hızlar toplanarak, ölçüm nokta sayısına bölünmüş ve kabin içerisindeki havanın ortalama hızı doğru bir şekilde belirlenmeye çalışılmıştır (Şekil 5.6). Bu şekilde, ölçüm bölgesinden yapılan birçok ölçümle kabin içerisindeki havanın ortalama hızı doğru bir şekilde tespit edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 5.6: Kabin içerisindeki havanın ortalama hızının belirlenmesi

5.1.1.4 Hız ölçme ekipmanı

Taze, toplam (karışım) ve kabin içerisindeki havanın ortalama hızlarının büyüklüğünün belirlenebilmesi için belirtilen sabit hız ölçüm noktalarında, ısıtmalı tel (hot wire) hız ölçüm metoduna göre çalışan Testo 435-3 anemometre kullanılmıştır. Kuvöz içerisindeki hız değerleri çok küçük olduğu için çok fonksiyonlu ölçüm cihazı (Testo 435-3) ve yüksek hassasiyetli probu (Testo 0635-1025) olan bir anemometre seçilmiştir (Şekil 5.7). Bahsedilen çok fonksiyonlu ölçüm cihazının ve ölçüm probunun teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.7: Testo 435-3 çok fonksiyonlu ölçüm cihazı ve Testo 0635-1025 sıcak tel (hot wire) hız ölçüm probu

Tablo 5.1: Testo 435-3 çok fonksiyonlu ölçüm cihazının ve Testo 0635-1025 sıcak tel (hot wire) hız ölçüm probunun teknik özellikleri

Testo 435-3 ölçüm cihazı		Testo 0635-1025 ısıtmalı tel probu	
Boyutlar	220 x 74 x 46 mm	<u>NTC sıcaklık sensörü</u>	
Çalışma sıcaklığı	-20...+ 50 °C	Ölçüm aralığı	-20...+ 70 °C
Gövde	ABS/TPE/Metal	Doğruluk	± 0,3 °C
Koruma sınıfı	IP54	<u>Isıtmalı tel hız sensörü</u>	
Batarya tipi	Alkali mangan, AA tipi	Ölçüm aralığı	0...20 m/s
Batarya ömrü	200 saat	Doğruluk	± 0,03 m/s
Ağırlık	428 g	Prob çapı	7,5 mm

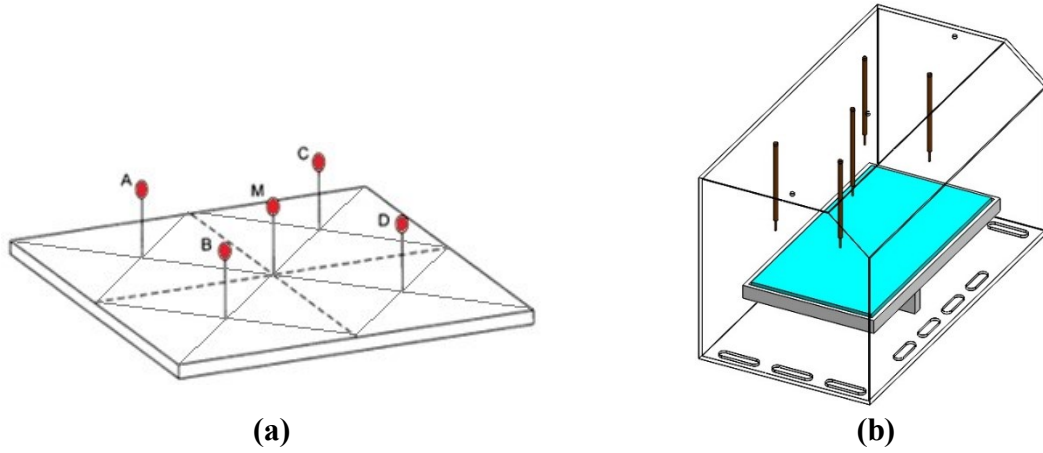
Rezistanslı kuvözün taze, toplam (karışım) ve kabin içerisindeki havanın ortalama hızları, belirlenen sabit ölçüm noktalarından ısıtmalı tel hız ölçüm probuyla 1 dakika boyunca ölçülmüştür. Cihazın, ölçüm süresi boyunca ölçtüğü bütün hızların ortalamasını alma özelliği kullanılarak, her bir noktadaki hızlar belirlenmiştir. Yapılan ölçümlerde hatayı minimize etmek için bu noktalardaki hız ölçümleri 3'er set tekrarlanmıştır. Her bir ortalama hız değeri için ölçüm noktalarında ölçülen hız değerleri toplanarak, sabit hız ölçüm noktası sayısına

bölünmüştür. Her bir ortalama hız değeri 3'er set tekrarlandığı için ortalamaları alınmıştır. Bu şekilde taze, toplam (karışım) ve kabin içerisindeki havanın ortalama hız değerleri belirlenmiştir. Ortalama hızlar belirlendikten sonra, akışın geçtiği kesit alanları ve 25 °C'deki havanın yoğunluğu (1,184 kg/m³) kullanılarak, taze hava ve toplam (karışım) havanın kütleli ve hacimsel debileri belirlenmiştir.

5.1.2 Kuvöz sıcaklıklarının belirlenmesi

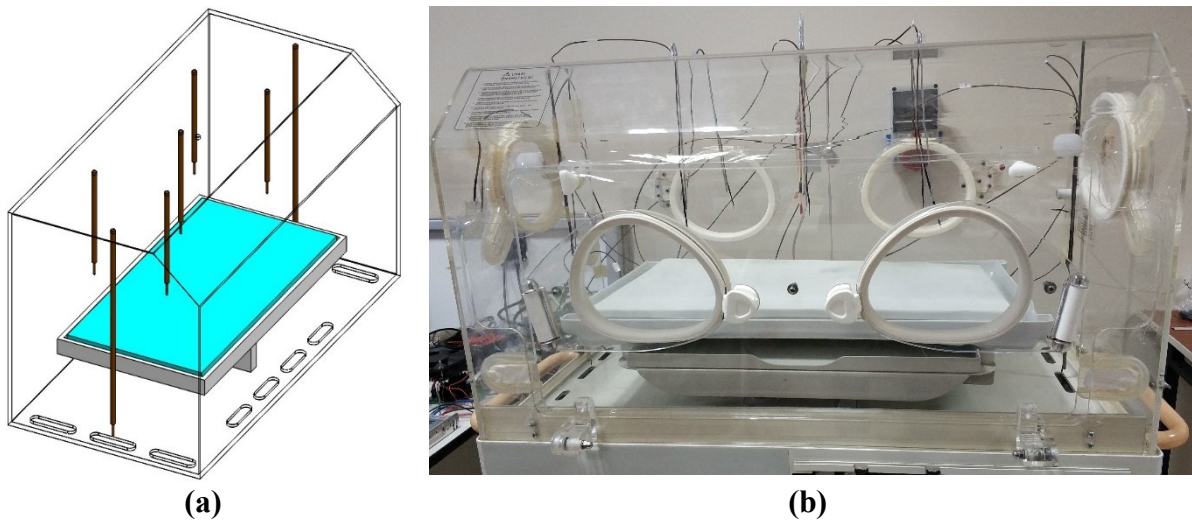
Bir kuvöz sisteminin düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığının gösterilmesi için öncelikle EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) belirtilen sıcaklık kriterlerini yerine getirmek zorundadır. Bu doğrultuda kuvöz içerisindeki sıcaklıkların hassas ve doğru bir şekilde ölçülmesi çok önemlidir. Ayrıca rezistanslı kuvöz sisteminin, kuvözde meydana gelen toplam ısı transferinin hesaplanabilmesi için Bölüm 3'te belirtilen matematiksel modellemedeki denklemlerde kullanılan sıcaklıkların ölçülmesi gerekmektedir. Buna ilave olarak çalışmada, rezistanslı sistemle termoelektrikli sistemin karşılaştırılabilmesi için kritik noktalardaki sıcaklıkların zamana bağlı olarak değişimlerinin kaydedilmesi gerekmektedir.

Rezistanslı kuvöz sisteminin, kuvöz standardında belirtildiği gibi yatak (şilte) üzerinden 10 cm yukarıda bulunan 5 farklı noktanın sıcaklıklarının ölçümü yapılarak, ortalama kuvöz (kabin) sıcaklığının belirlenmesi gerekmektedir (EN 60601-2-19 2011). Bu noktaların belirlenmesi için yatağın kısa ve uzun kenarlarının orta noktaları birleştirilerek, yatağın merkez noktası bulunmalıdır. Merkez noktasının bulunmasıyla birlikte yatak 4 eş alana ayrılmıştır. Bu 4 eş alanın merkezleri belirlenerek, yatağın 10 cm üzerinde 5 farklı ölçüm noktası standartta belirtildiği gibi belirlenmiştir (Şekil 5.8 (a)). Kuvöz sisteminde bu noktaların yerleri tespit edildikten sonra kabinin üst yüzeyinden küçük delikler açılmıştır. Isıl çiftler sabit bir nesne (alüminyum tel) etrafında sabitlenerek, yataktan 10 cm yukarıda olacak şekilde içeri sarkıtılmıştır (Şekil 5.8 (b)). Bu sayede ölçülen 5 farklı noktanın ortalaması alınarak, ortalama kabin sıcaklığı belirlenmiş ve yatağın üzerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri yapılan her bir deney için ayrı ayrı kaydedilmiştir.



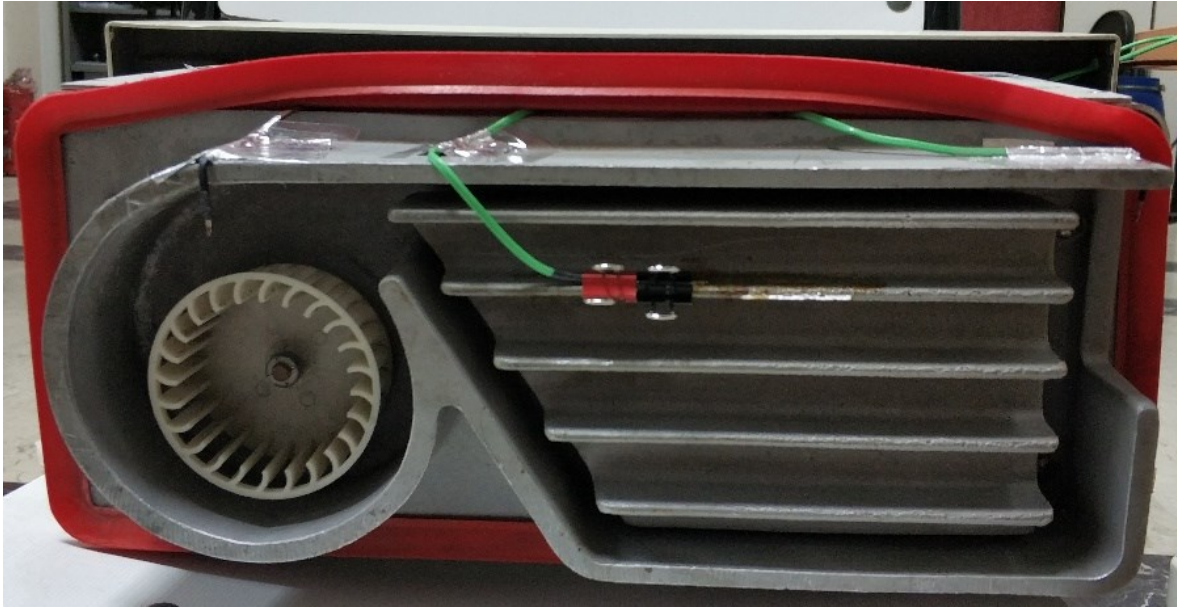
Şekil 5.8: (a) Ortalama kabin sıcaklığı noktaları (b) kuvöz sisteminde ortalama kabin sıcaklığı noktalarının şematik olarak uygulanması

Rezistanslı sistemin hem termoelektrikli sistemle karşılaştırılmasının yapılabilmesi hem de Bölüm 3’de elde edilen kuvözün matematiksel modellenmesi kullanılarak, kuvöz sabit bir sıcaklıkta tutulurken kuvözde meydana gelen ısı transferi miktarlarının belirlenebilmesi için kuvözün bazı kritik noktalarındaki sıcaklık değişimlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu şekilde kuvözden çevreye kaybolan toplam ısı transferi miktarı hesaplanabilecek ve kuvöz sisteminin en çok ısı kaybettiği parçalar belirlenebilecektir. Ek olarak, kuvözden kaybolan toplam ısı miktarına göre, geliştirilen TE ısı pompası sisteminin hangi maksimum güçte çalıştırılacağı ve kaç tane TES modül kullanılacağı konularında fikir elde edilecektir. Bu doğrultuda kabin ortamına giriş ve kabin ortamından ayrılma noktalarındaki sıcaklıkların belirlenmesi için kabin yüzeyinden küçük delikler açılmış ve ısı çiftleri bu noktalara sarkıtılarak, yerleştirilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9: (a) Kabin ortamındaki sıcaklık ölçüm noktalarının şematik gösterimi (b) AMS Amenity XP kuvöz sistemindeki kabin ortamının sıcaklık ölçüm noktaları

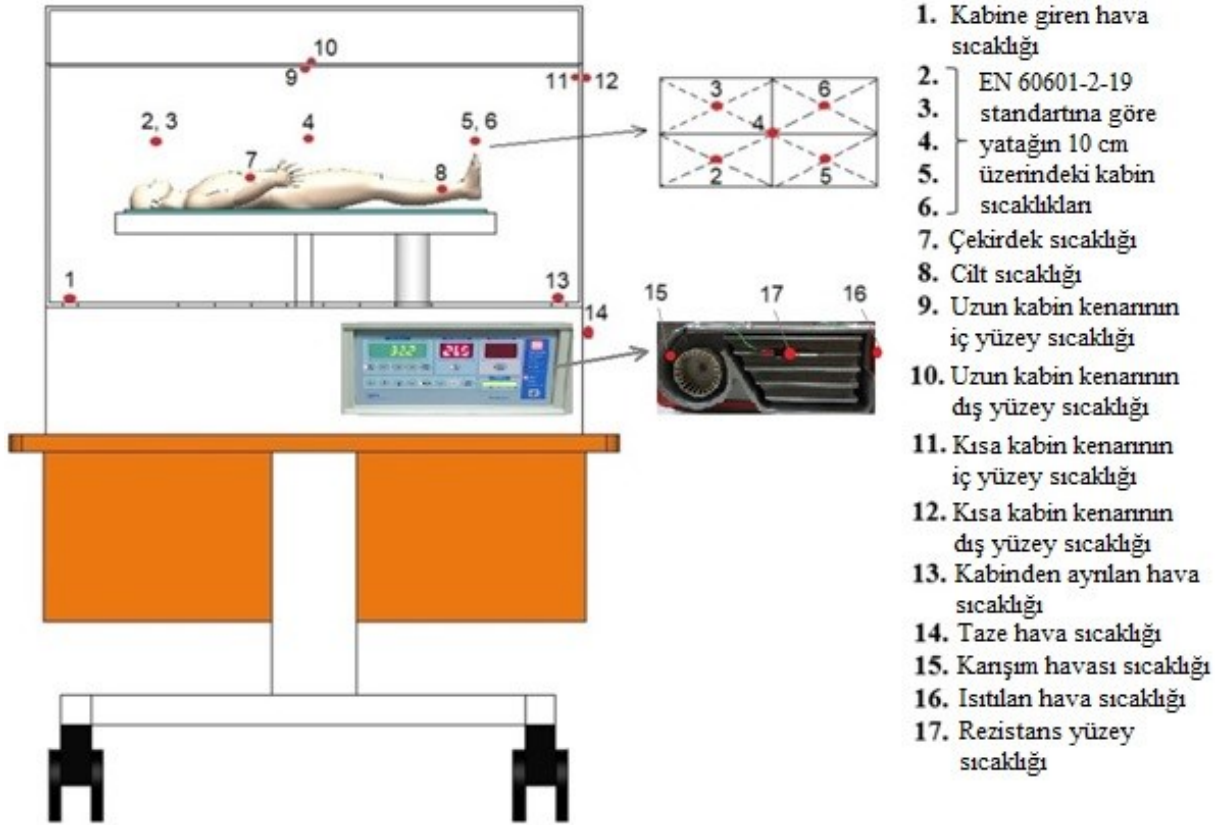
Benzer şekilde matematiksel modelleme kullanılarak, hesaplama yapılabilmesi için kabinin iç yüzey ve dış yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi gerekmektedir. Ancak gerçek uygulama esnasında kabin yüzeylerinin her bir noktasındaki sıcaklık değeri farklıdır. Bu yüzden hem kabinin kısa kenarının hem de uzun kenarının iç ve dış yüzeylerine ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Hesaplamalarda kısa kenar ve uzun kenar yüzeylerinin sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak, kabinin iç ve dış yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu şekilde hesaplamalarda yapılan hata miktarı minimize edilmeye çalışılmıştır. Son olarak, rezistanslı kuvöz sisteminin ısıtılmasını sağlayan rezistans, kuvöz sistemin şüphesiz en kritik parçasıdır. Bu yüzden rezistansın yüzey sıcaklığı bir adet ısı çifti ile her bir deney için anlık olarak kaydedilmiştir. Ayrıca karışım havasının, rezistans elemanına girmeden önceki sıcaklığı ve rezistanstan ısıtıldıktan sonraki sıcaklığının ölçülmesi çok önemlidir. Çünkü rezistans üzerinden geçirilen karışım havasına, rezistans elemanından ne kadar enerji aktarıldığı bu sayede basit bir şekilde belirlenebilmektedir. Bunun için karışım havasının rezistansa girdiği ve çıktığı noktalara ısı çiftleri yerleştirilerek, sıcaklıkları anlık olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.10). Rezistansın ışınımından etkilenmemesini sağlamak için rezistans bölgesine yerleştirilen ısı çiftlerinin etrafı alüminyum folyo ile sarılmıştır.



Şekil 5.10: Kuvözün rezistans bölgesine yerleştirilen ısı çiftleri

Bu tez çalışması, geliştirilen TE ısı pompası sisteminin bebek kuvözlerinde kullanılabilmesinin bir ön araştırması olması sebebiyle gerçek bebeği simüle etmek için manken bebek kullanılmıştır. Gerçek bebeğin çekirdek sıcaklığını temsil etmesi için 36,5 °C su,

maneken bebeğin içerisine ilave edilmiştir. Bu şekilde kuvöz içerisindeki manken bebeğin çekirdek sıcaklığı ve cilt sıcaklığı, yerleştirilen ısıl çift ile ölçölmüştür. Yukarıda açıkladığı gibi rezistanslı kuvöz sisteminin kritik noktalarına toplam 17 adet ısıl çift yerleştirilmiş (şekil 5.11) ve yapılan her bir deneyde meydana gelen sıcaklık değişimleri anlık olarak kaydedilmiştir.



şekil 5.11: Rezistanslı kuvöz sistemine yerleştirilen ısıl çiftlerin ölçüm yerleri

5.1.2.1 Sıcaklık ölçüm ekipmanı

Rezistanslı kuvöz sisteminin kritik noktalarının sıcaklıkları, uygulamalarda en çok kullanılan sıcaklık ölçü elemanı olan ısıl çiftler ile ölçölmüştür. Isıl ift (termokupl), iki farklı alaşımın bir uçlarının kaynaklanması ile oluşturulan basit bir sıcaklık sensörüdür. Genel olarak kaynak edilen uç sıcak nokta, geriye kalan açık iki uç ise soğuk nokta (referans noktası) olarak tanımlanmaktadır. Isıl iftlerde, sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı olarak, soğuk nokta uçlarında milivolt (mV) mertebesinde gerilim üretilir. Üretilen bu gerilime göre sıcaklıklar kalibre edilerek ısıl çift sıcaklık sensörleri oluşturulur. Isıl çiftin soğuk

uçlarındaki gerilim değerleri, ısı çift malzemesinin özelliklerine bağlı olarak belli sıcaklık aralıkları için geçerlidir. Günümüzde -200 °C'den 2320 °C'ye kadar çeşitli sıcaklık aralıklarında kullanılan ısı çift teli çeşitleri bulunmaktadır (Elimko 2019). Kuvöz sistemlerinde sıcaklıklar genellikle dar sıcaklık aralığında (10 - 150 °C) değiştiğinden dolayı T ve K tipi ısı çiftler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, sıcaklıkların ölçülmesi için yüzey ölçümleri ve kalibrasyon işlemlerinde kullanılan E-TC-15-K portatif ısı çiftin T ve K tipleri kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışma bilimsel amaçlı olduğu için sıcaklıkların zamana bağlı olarak bir datalogger aracılığıyla kaydedilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda ısı çiftler, datalogger ve datalogger yazılımı gerçekleştirilen 118M274 nolu 1002 TÜBİTAK proje kapsamında Türkiye'deki Elimko Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Satın alınan cihazların ve ısı çiftlerin teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

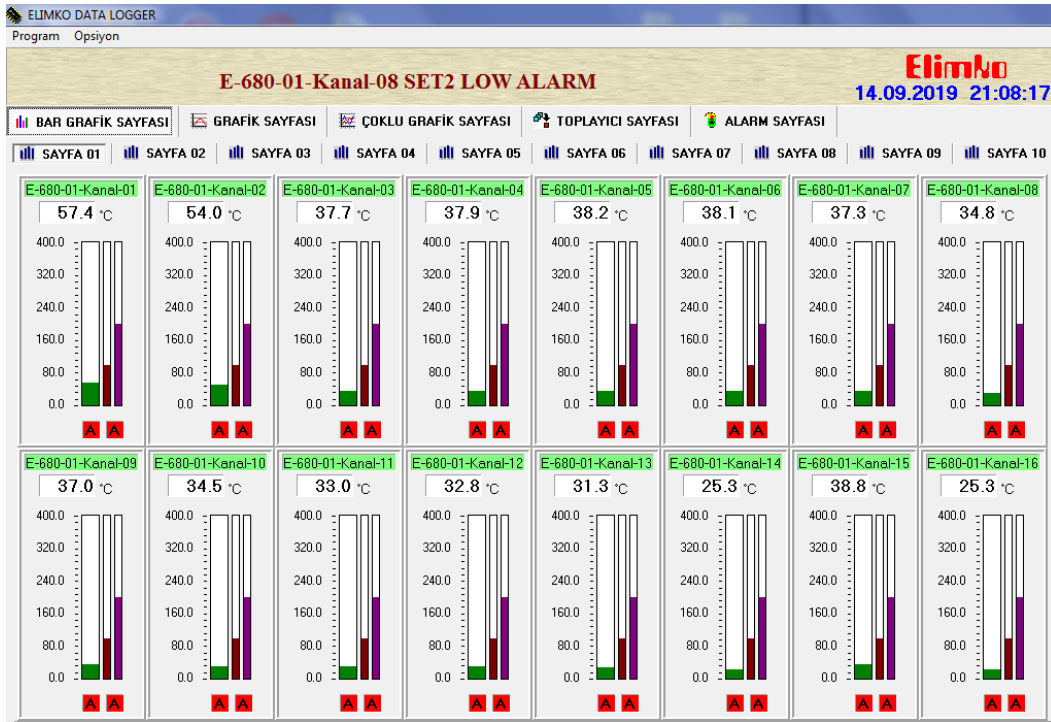
Tablo 5.2: Isıl çiftler ve datalogger cihazının tipi ve teknik özellikleri

Cihaz	Tipi	Teknik özellik
Isıl çift (T tipi)	E-TC15-K-T-K20-TT	<ul style="list-style-type: none"> • Ucu kaynaklı eleman kablosu • Özellikle yüzey ölçümleri ve kalibrasyon işlemleri için uygun • 0,1 °C hassasiyet
Isıl çift (K tipi)	E-TC15-K-K-K20-TT	
Datalogger	E-680-32-2-0-00-1-0	<ul style="list-style-type: none"> • 16 bit çözünürlükte yüksek okuma hassasiyeti • Opsiyonel RS485 Modbus iletişim ara yüzü • Ortak 2 alarm, bağımsız 16 alarm röle çıkışı • Her girişi ayrı programlama olanağı • Her giriş için 2 adet set noktası girme olanağı • EEPROM bellek • Güç sarfıyatı (max.) 7 W

Satın alınan datalogger birbirinden bağımsız 32 adet kanala sahiptir ve E-IB-11 usb çevirici ile bilgisayara veri gönderebilmektedir (Şekil 5.12). Aynı zamanda bir paket yazılım ile her bir kanalın ısı çift tipi, bağlantı noktası, hassasiyeti, vs. ayarları yapılabilmektedir ve ısı çiftlerin ölçtüğü değerler bir arayüz ile bilgisayar ekranından hem grafiksel hem de bar olarak anlık takip edilebilmektedir (Şekil 5.13). Her bir kanalda ölçülen sıcaklık verileri, cihazın çalıştırıldığı tarih ve saate bağlı olarak excel ortamında kaydedilebilmektedir.



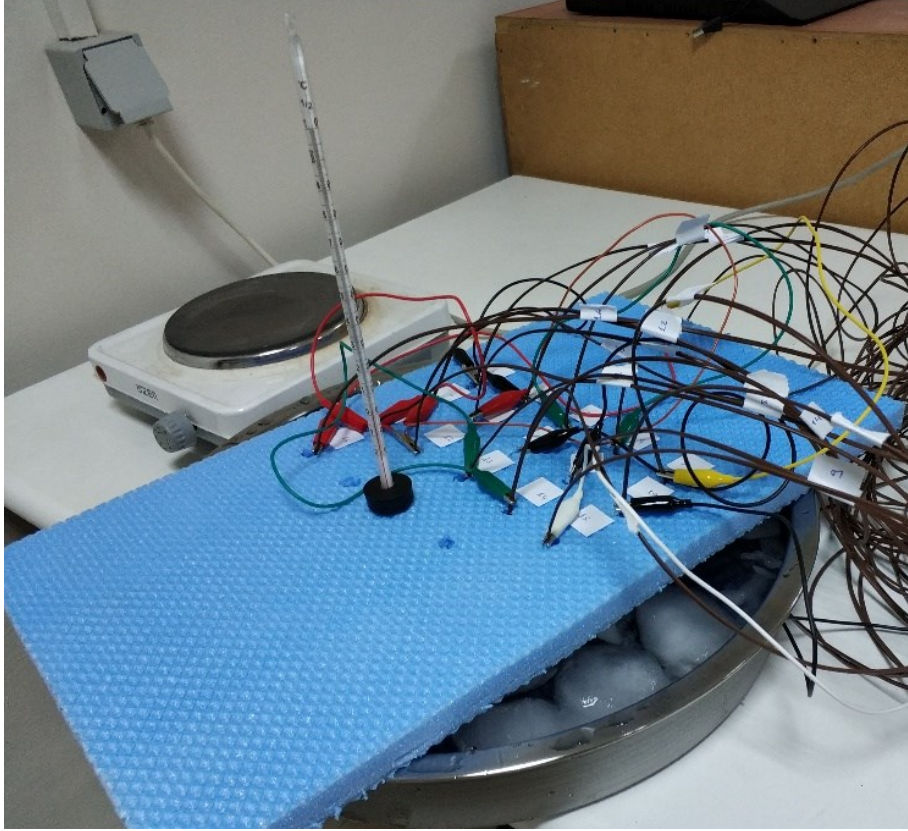
Şekil 5.12: Elimko E-680 serisi 32 kanallı datalogger



Şekil 5.13: 16 kanalın bar olarak anlık sıcaklık değerleri

Rezistanslı kuvöz sisteminin kritik noktalarının sıcaklık değerlerini takip edebilmek için 17 adet ısı çift kullanılmıştır. Seçilen E-TC-15-K portatif ısı çift, her ne kadar hassas bir ısı çift olsa da sonuçta iki farklı malzemenin birbirine kaynağı yapılarak ısı çift oluşturulmaktadır. Dolayısıyla bu kaynak noktasındaki bazı belirsizliklerden dolayı her bir ısı çift herhangi bir sıcaklık değerini küçük farklarla farklı gösterebilir. Bu yüzden her bir ısı çiftin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bunun için 17 adet ısı çift ve ısı çiftlerin kalibre edilmesini sağlayan referans termometresi, buzlu su içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 5.14). Buzlu suyun sıcaklığı referans termometresine göre 2 °C getirilmiş ve 17 adet ısı çiftin ölçtüğü değerler kaydedilmiştir. Ardından buzlu su bir elektrikli ısıtıcı ile kontrollü olarak ısıtılmıştır. Referans termometresine

göre sıcaklık 5 - 80 °C aralığında her bir 5 °C’de sistem kararlı hale geldikten sonra her bir ısı çiftinin gösterdiği sıcaklıklar kaydedilmiştir. Bütün veriler toplandıktan sonra bu değerlerin excel ortamında grafikleri çizilerek, $R^2= 0,999$ olacak şekilde, her bir ısı çifti için eğri uydurma yöntemi ile denklemler çıkartılmıştır. Bu şekilde çalışmada kullanılan 17 adet ısı çiftinin, referans termometresine göre kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14: Isıl çiftlerin kalibrasyon işlemi

5.1.3 Kuvöz gürültü değerlerinin belirlenmesi

Prematüre bebekler, prematürelilik derecesine bağlı olarak bazı organları yeterince gelişmeden dünyaya gözlerini açtıkları için çevrelerinde bulunan her türlü etmene karşı çok duyarlıdırlar. Prematüre bebekler, hayatlarının başında genelde yenidoğan yoğun bakım ünitelerinde (Neonatal Intensive Care Unit, NICU) yaşamlarına devam etmektedir. Bu narin bebekler, özellikle bu yoğun bakım ünitelerinde farklı cihazların çalışması ve alarm seslerinden dolayı yüksek seviyede gürültüye maruz kalabilmektedirler. Yenidoğanlarda yüksek gürültü; işitme bozukluklarına, uyku bozukluklarına ve somatik etkilere neden olabilmektedir. Bu

yüzden özellikle prematüre bebeklerin bulunduğu ortamlarda, kuvözün normal çalışması sırasında gürültü seviyesinin 60 desibeli, kuvözde sesli alarm devreye girdiğinde ise 80 desibeli aşmaması gerektiği EN 60601-2-19 standardında (2011) açık bir şekilde belirtilmektedir. Bu nedenle, çalışmada, hem rezistanslı hemde geliştirilen termoelektrikli sistemin alarmlı ve alarmsız durumlardaki gürültü seviyeleri CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.15). Bu gürültü ölçüm cihazı, usb bağlantısıyla, ölçtüğü verileri bilgisayar ortamına excel dosyası olarak kaydedebilmektedir.



Şekil 5.15: CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazı

Gürültü ölçüm cihazı, bebeğin yattığı yatak merkezinden 10 cm yukarıda olacak şekilde konumlandırılmıştır (EN 60601-2-19 2011). Proje kapsamında yapılan her bir deney için gürültü seviyesi ayrı ayrı ölçülmüştür. CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazının teknik özellikleri Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3: CEM DT-8852 gürültü ölçüm cihazının teknik özellikleri

Ölçüm aralığı	30-130 dB
Hassasiyet	±1,4 dB
Frekans aralığı	31,5 HZ ~ 8 KHZ
Ekran çözünürlüğü	0,1 dB
Dinamik aralık	50 dB
Veri saklama miktarı	32700
Zaman yavaşlatma	Hızlı (125 ms) / yavaş (1 s)
Ağırlık / Ebat	350 g / 278 x 76 x 50 mm

5.1.4 Rezistanslı sistemin harcadığı aktif gücün belirlenmesi

Gerçekleştirilen çalışma bilimsel amaçlı bir çalışma olduğu için kuvöz düzeneğinde yapılan her bir deneye ait akım, voltaj ve güç değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca tez kapsamında rezistanslı sistemle, geliştirilen termolektrikli sistemin harcadığı enerji değerleri karşılaştırılarak, verimleri araştırılmıştır. Bu yüzden sistemlerin harcadığı akım, voltaj ve aktif güç miktarları 118M274 nolu 1002 TÜBİTAK projesi kapsamında satın alınan Entes MPR 45S enerji analizörü cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 5.16). Cihazın teknik özellikleri Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4: Entes MPR 45S enerji analizörü cihazının teknik özellikleri

Çalışma gerilimi	50 ~ 270 V AC/DC
Çalışma frekansı	45-65 Hz
Ölçme gerilim girişi (V_{in})	5 – 300 VAC 45-65 Hz (L-N) 5 – 480 VAC (L-L)
Ölçme akım girişi (I_{in})	0,05 – 5,5 A
Ölçme güç aralığı	0...9999 MW
Ölçme enerji aralığı	9999999,9 k/M (Wh, VArh)
Gerilim doğruluğu	%0,5
Akım doğruluğu	%0,5
Aktif güç ve aktif enerji doğruluğu	%1
Reaktif güç ve reaktif enerji doğruluğu	%2
Ölçüm zamanı aralığı	1-60 dk ayarlanabilir
Haberleşme (izolasyonlu)	MODBUS RTU (RS-485)
Haberleşme hızı (baud rate)	2400 – 115200 bps
Dahili bellek	16 MB
Boyutlar	96 x 96 x 50 mm



Şekil 5.16: Entes MPR 45S enerji analizör cihazı

Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, rezistanslı kuvöz cihazı ve ölçüm cihazları bir çoğaltıcıya bağlanarak sistemin bütün güç tüketimi tek bir hatta toplanmıştır. Bu hat, enerji analizörü üzerinden geçerek şebeke voltajına bağlanmaktadır. Bu şekilde rezistanslı kuvöz sisteminin harcadığı toplam akım, voltaj ve aktif güç değerleri Entes MPR 45S enerji analizörüyle ölçülmektedir. Ölçülen değerler RS485 usb çevirici vasıtasıyla bilgisayar ortamına excel dosyası olarak aktarılmaktadır. Deneyler esnasında, enerji analizör cihazı, 1 dakika boyunca ölçtüğü akım, voltaj ve aktif güç değerlerinin ortalamasını alarak excel dosyasına tarih ve saate bağlı olarak aktarmaktadır. Bu şekilde sistemin harcadığı toplam güç miktarı zamana bağlı olarak belirlenmektedir.

5.1.5 Termal kamera ölçümlerinin belirlenmesi

Bu çalışma gerçekleştirilirken, gerçek bir prematüre bebekle ilgili bir deney yapılmamıştır. Ancak kuvöz sisteminde, mutlaka bebekle ilgili bir çalışma da yapılması gerekmektedir. Bu yüzden gerçek bebeği simüle etmek amacıyla manken bir bebek satın alınmıştır. Bu şekilde kuvöz içerisinde yapay bir bebekli ortam oluşturularak, bebekli ve bebeksiz durumlarda kuvözde meydana gelen sıcaklık değişimleri termal kamera görüntüleriyle belirlenmiştir. Ayrıca kabinin hem uzun kenarının hem de kısa kenarının iç ve dış yüzeylerine birer tane ısı çift yerleştirilerek, sıcaklıkların kaydedildiğinden daha önce bahsedilmiştir. Ancak

kuvözün kabin yüzeylerindeki her bir noktada sıcaklık dağılımları farklılık göstermektedir. Bu noktada kuvözün hem bebekli ve bebeksiz durumlar için hem de sistemin kabin yüzeyindeki dolayısıyla kabin içerisindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenebilmesi için Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü alt yapısında bulunan Flir Thermovision A20M kızılötesi termal kamera ile görüntüleri alınmıştır (Şekil 5.16). Termal kamera, yüzey sıcaklığını ölçen ısı çiftlerinden birinin sıcaklığına göre ayarlanmıştır. Termal kameranın ölçtüğü yerin yayıcılık (emissivity) değeri 0,78, alınan görüntülerin sıcaklık skalası 20-50 °C ve kuvöz ile aralarındaki mesafede 3,1 m olacak şekilde kalibrasyonu yapılmıştır.

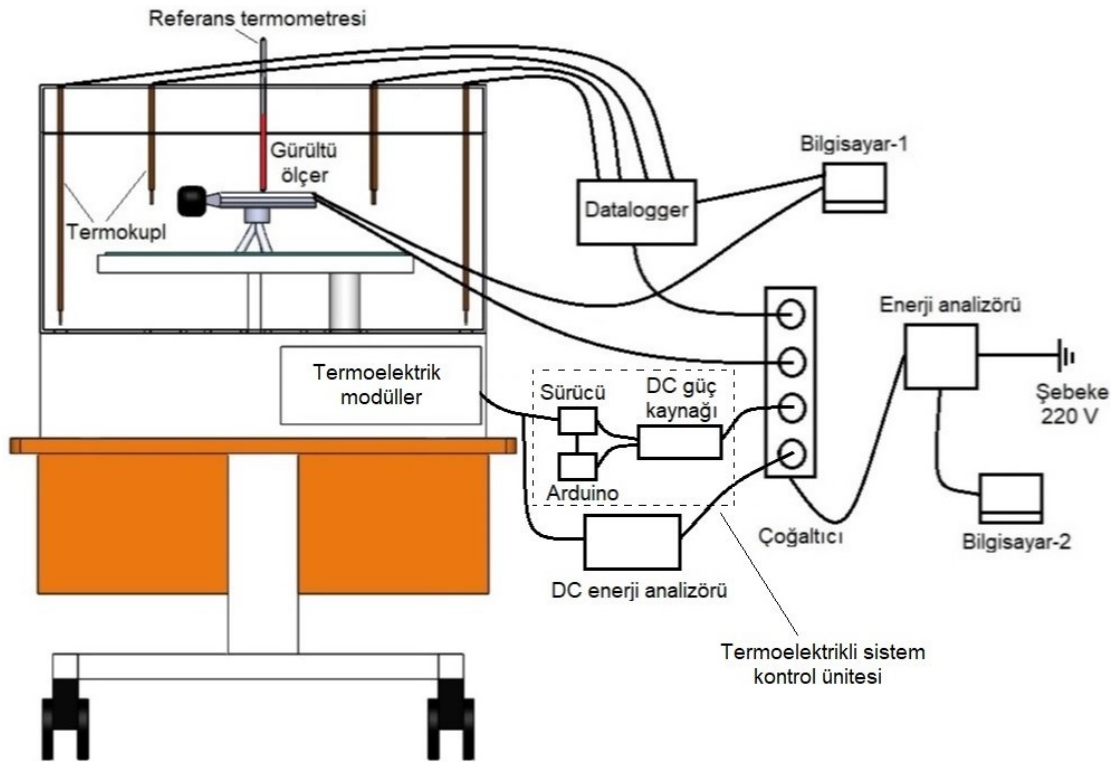


Şekil 5.16: Flir Thermovision A20M kızılötesi termal kamera cihazı

5.2 Termoelektrikli Kuvöz Sistemin Tasarım Parametreleri

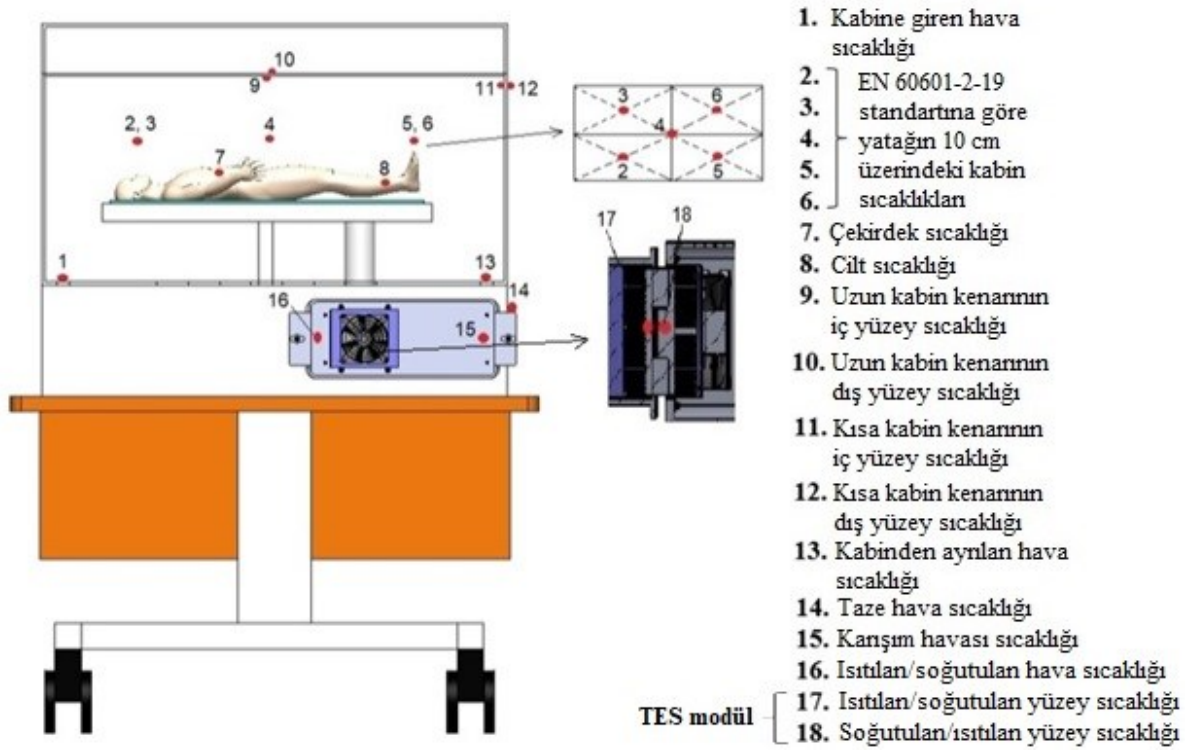
Bu tez kapsamındaki temel amaç; rezistanslı kuvöz sisteminin genel tasarımı değiştirilmeden, rezistans elemanı ve kontrol ünitesinin çıkartılarak aynı şartlarda rezistanslı

sistemden hem daha verimli ve daha hassas sıcaklık kontrolü olan hem de rezistanslı sistemdeki yaşanan eksiklikleri ve problemleri ortadan kaldıran kuvöz sistemi geliştirmektedir. Bu yüzden önceki bölümde detaylı bir şekilde açıklanarak belirlenen rezistanslı kuvöz sistemin tasarım parametreleri, termoelektrik ısı pompası sisteminin korunum denklemlerinde kullanılarak, termoelektrikli kuvöz sistemi geliştirilmiştir. Bu çalışmada, her iki sistemin ısı, hidrolik, vb. bütün performans parametreleri birbiriyle karşılaştırıldığı için rezistanslı kuvöz sistemin tasarım parametrelerini belirlemede kullanılan yöntemler ve ölçüm cihazları, geliştirilen yeni kuvöz sisteminde de aynı şekilde kullanılmıştır. Geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminde, ısıtma ve soğutma işlemleri TES modüller ile gerçekleşmektedir. TES modüller, DC akımla çalıştığından dolayı mevcut deney düzeneğine bir DC güç kaynağı ve TES modüllerin harcadığı akım, voltaj ve aktif gücü gösteren bir DC güç analizörü eklenmiştir. Ayrıca TE ısı pompası sistemi, otomatik kontrolle kontrol edileceği için sisteme bir mikroişlemci (Arduino) ve TES modüllerin ısıtma ve soğutma modları akım yönünün değiştirilmesiyle sağlandığı için de sisteme sürücü (driver) eklenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda termoelektrikli kuvöz sisteminin tasarım parametrelerin belirlenebilmesi için Şekil 5.17'deki deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 5.17:Termoelektrikli kuvöz sistemine ait deney düzeneğinin şematik gösterimi

Rezistanslı kuvöz sisteminin sıcaklık ölçüm noktalarından farklı olarak, termoelektrikli kuvöz sisteminde 17. ısıl çiftin görev fonksiyonu değişmiş ve sisteme 18. ısıl çift eklenmiştir. TES modüle uygulanan akımın yönü değiştirildiğinde, TES modülün ısıtma ve soğutma yüzeyleri yer değiştirmektedir. Bu yüzden ısıtma ve soğutma modunda 17. ve 18. ısıl çiftlerin ölçtüğü değerler, farklı anlamlar taşımaktadır (Şekil 5.18).

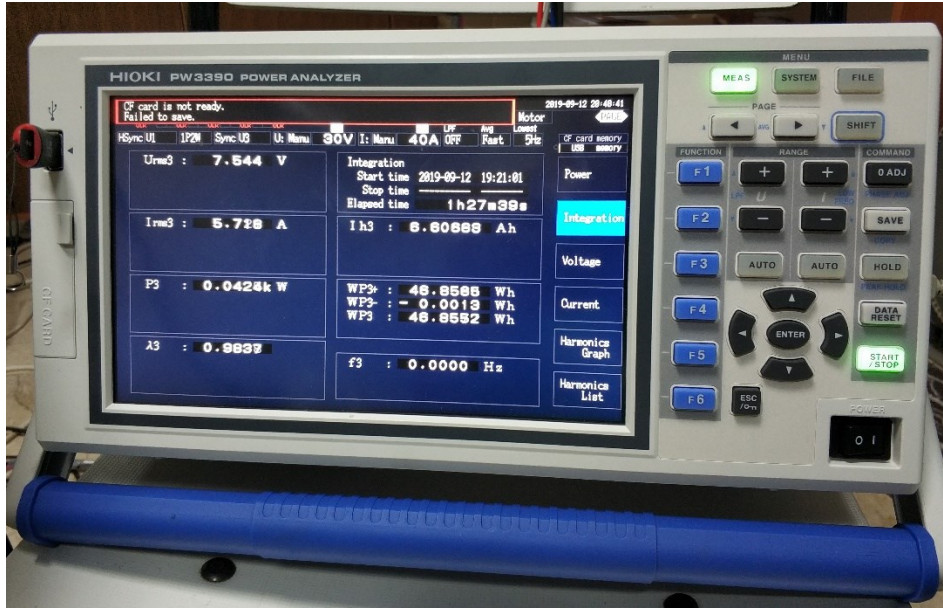


Şekil 5.18: Termoelektrikli kuvöz sistemine yerleştirilen ısıl çiftlerin ölçüm yerleri

5.2.1 TES modüllerin harcadıkları aktif güçlerin belirlenmesi

Termoelektrikli kuvöz sisteminde harcanan toplam akım, voltaj ve güç değerleri; Şekil 5.17'deki deney düzeneği bağlantılarında gösterildiği gibi, Entes MPR 45S enerji analizörüyle ölçülmektedirler. Ancak bu enerji analizörü sadece AC akımla çalışan sistemlerin harcadığı enerji değerlerini ölçebilmektedir. Termoelektrikli kuvöz sisteminde ısıtma ve soğutma işlemleri, TES modüllerle sağlanmaktadır. TES modüller de DC akımla çalıştığı için termoelektrikli kuvöz sistemine bir DC güç analizörü eklemek gerekmektedir. Bunun için Pamukkale Üniversite Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü alt yapısında bulunan HIOKI PW3390 güç analizörü ile TES modüllerin harcadığı akım, voltaj ve aktif güç değerleri,

gerçekleştirilen her bir deney için anlık olarak ölçülerek excel ortamında kaydedilmiştir (Şekil 5.19). Ölçülen elektriksel değerlerin RMS (Root Mean Square) değerleri alınmıştır. Güç analizörünün teknik özellikleri Tablo 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.19: HIOKI PW3390 güç analizör cihazı

Tablo 5.5: HIOKI PW3390 güç analizörü cihazının teknik özellikleri

Gerilim ölçüm aralığı	15-1500 V
Akım ölçüm aralığı	0,1 -20 kA (akım probuna bağlı olarak)
Güç ölçüm aralığı	0,0150 W - 39.600 MW
Gerilim ölçüm doğruluğu	±0,04 % rdg. ±0,05 % f.s.
Akım ölçüm doğruluğu	±0,04 % rdg. ±0,05 % f.s. + current sensor accuracy
Güç ölçüm doğruluğu	±0,04 % rdg. ±0,05 % f.s. + current sensor accuracy
Veri gönderim hızı	50 ms
Ekran yenilenme hızı	200 ms
Veri kayıt aralığı	50 ms-500 ms, 1 s-30 s, 1 min-60 min
Haberleşme	LAN, USB, RS-232C, CF card
Çalışma güç gereksinimleri	100 - 240 V AC, 50/60 Hz, 140 VA max.
Boyutlar / ağırlık	340 × 170 × 156 mm / 4,6 kg

5.3 Belirsizlik Analizi

DeneySEL çalışmalarda, elde edilen sonuçlar kadar önemli olan bir diğer nokta da ölçülen ve hesaplanan sayısal değerlerin doğruluğu ve güvenilirliğidir. Bunun için Holman (2012) tarafından yayınlanan standart prosedürlere göre, tez kapsamında hesaplanan değerlerin belirsizlik analizleri hesaplanmıştır. Belirsizlik analizinde hesaplanan değerlerin formülasyonları ve gerekli sayısal değerleri tez içerisinde ve aynı zamanda Yeler ve Köseoğlu (2020)'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmada belirtildiği gibi, termoelektrik malzeme özellikleri (Seebeck katsayısı, elektriksel özdirenç ve ısı iletim katsayısı) Lee (2017) tarafından geliştirilen efektif malzeme özellikleri konsepti kullanılarak belirlenmiştir. Efektif malzeme özelliklerini belirlemek için ise kullanılan TES modüllerinin katalogunda verilen maksimum parametreler gereklidir. Termoelektrik üreticilerinin, TES modülünün maksimum parametrelerini belirlemek için genellikle Keithley multimetre ölçüm sistemlerini kullandıkları belirlenmiştir. Bu nedenle, maksimum parametreleri ölçen cihazlardaki hata oranlarının I_{max} 'da %0,5, boyutlarda %1 ve sıcaklıklarda $\pm 0,3$ °C olduğu kabul edilerek belirsizlik analizi yapılmıştır. Ayrıca, tez kapsamında kurulan deney düzeneğinde kullanılan ölçüm cihazlarının doğruluğu hız için $\pm 0,03$ m/s, boyutlar için %1 ve akım ve gerilim için ise %0,5'dir. Bu doğrultuda ölçülen ve hesaplanan büyüklüklerdeki belirsizlikler Tablo 5.6'de verilmiştir ve Tablo 5.6' da elde edilen değerlerin nasıl hesaplandığı EK D'de detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 5.6: Ölçülen ve hesaplanan sayısal değerlerdeki belirsizlikler

Değişkenler	Belirsizlik (%)
Hacimsel debilerdeki belirsizlikler	
Taze havanın geçtiği kesit alanı (A_{cev})	%2
Karışım havasının geçtiği kesit alanı (A_{mix})	%1,41
Taze havanın hacimsel debisi (\dot{V}_{cev})	%11,08
Karışım havasının hacimsel debisi (\dot{V}_{mix})	%2,17
TE ısı pompası sistemindeki belirsizlikler	
p ve n tipi malzemelerin kesit alanı (A)	%2
Maksimum sıcaklık farkı (ΔT_{max})	%0,56
Maksimum soğutma gücü ($\dot{Q}_{c,max}$)	%0,7
Efektif TE performans katsayısı (Z^{**})	%0,6

Efektif Seebeck katsayısı (α^{**})	%0,87
Efektif elektriksel öz direnç (ρ^{**})	%2,45
Efektif ısı iletim katsayısı (k^{**})	%2,89
TES modülün iç direnci (R)	%3,31
TES modülün termal iletkenliği (K)	%3,64
TES modüllerin ısıtma gücü (\dot{Q}_h)	%1,71
TES modüllerin soğutma gücü (\dot{Q}_c)	%6
TES modüllerin güç tüketimi (\dot{W})	%0,7
Isıtma performans katsayısı ($COP_{\text{ısıtma}}$)	%1,84
Soğutma performans katsayısı ($COP_{\text{soğutma}}$)	%6,03

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve BULGULAR

EN 60601-2-19 standardında (2011), prematüre bebek kuvözlerinde maksimum hava sıcaklığı 38 °C olarak belirtilmiştir. Herhangi bir durumdan dolayı kabin içerisindeki hava sıcaklığı 38 °C'yi geçtiğinde, kuvöz işitsel ve görsel uyarı vermek zorundadır ve bu durumda, kuvözde, ısıtıcıyı devre dışı bırakacak bir ısıl kesici (termostat) bulunmak zorundadır. Ancak çok nadir görülen bazı özel durumlarda kabin hava sıcaklığını 39 °C'ye kadar arttırmak gerekebilir. Bu yüzden genelde kuvöz tasarımcıları, kuvöze kullanıcının özel müdahalesi ile 38 °C'deki termostatu devre dışı bırakabilen bir sistem eklerler. Ancak kuvöz standardında, kabin havası sıcaklığının hiçbir durumda kesinlikle 39 °C'yi geçmemesi gerektiği açık bir şekilde vurgulanmaktadır. Bu yüzden kuvöz tasarımcıları, kabin hava sıcaklığı 39 °C'yi geçtiğinde, ısıtıcıyı devre dışı bırakan ikinci bir termostatu kuvöze yerleştirmek zorundadırlar. Yerleştirilen bu ikinci termostat, hiçbir şekilde devre dışı bırakılamamaktadır.

Prematüre bebekler, prematürelilik derecesine bağlı olarak bazı organları yeterince gelişmeden doğdukları için vücut sıcaklıklarını tam olarak düzenleyemezler. Bunun için yenidoğan prematürelerin vücut sıcaklığını kontrol edebilmesine yardımcı olmak için çevre ortamının sıcaklığı, bebeğin en az oksijen tüketimi ve metabolik harcama yaptığı sıcaklık olan nötral ortam sıcaklığında olmalıdır. Nötral ortam sıcaklıkları, bebeğin doğum ağırlığına ve doğum yaşına göre Tablo 2.1'de detaylı olarak verilmişti. Bu tablo dikkatli bir şekilde incelendiğinde, bebeğin yaşına ve doğum ağırlığına bağlı olarak, hava sıcaklığı kademeli olarak 35 °C'den 30'ye düşürülmektedir. Bu yüzden tedavi altında bulunan bir bebeğin, sıcaklığın 30 °C olan bir ortamda, vücut sıcaklığını kararlı bir şekilde sabit tutabiliyor olması, herhangi bir cihazdan yardım almadan kendi yaşamını sürdürebileceği anlamı taşımaktadır (Tol 2005).

Yukarıda açıklanan durumlarla, bebek kuvözünün çalıştırılabileceği sıcaklıkların alt ve üst sınır değerleri yaklaşık olarak ortaya çıkmaktadır. Kuvöz uygulamalarında bu bilgileri göz önünde bulunduran kuvöz tasarımcıları, kabin hava sıcaklığını 28-39 °C aralığında ayarlanabilen kuvözler geliştirmişlerdir. Tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kabin hava sıcaklığının alt değeri 30 °C ve üst değeri ise 38 °C olmasına karar verilmiştir. Alt ve üst sınır değerler belirlendikten sonra, tasarlanan herhangi bir kuvözün uygunluğunu denetleyen EN 60601-2-19 standardında (2011), kuvözün standarda uygun olup olmadığı ile ilgili yapılan bütün deneylerin 32 °C ve 36 °C kabin hava sıcaklığında yapıldığı görülmektedir. Bu bilgi de dikkate alınarak tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin, kabin hava sıcaklığının 30 °C-32

°C-34 °C-36 °C ve 38 °C'lerin bütün kombinasyonlarında yapılmasının uygun olacağı düşünülmüştür. Ayrıca kuvöz sistemlerinin tersinir etkilerini araştırmak için histerezis deneylerinin de (32-30 °C, 34-30 °C ...) yapılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda rezistanslı kuvöz sisteminin ve tez kapsamında geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin kabin havasını ısıtma deneyleri için Tablo 6.1'de verilen 25 adet deney yapılmıştır. Tablo 6.1'deki deney adları için yazılan ilk değer, kuvöz kabin havasının kararlı rejimdeki ilk sıcaklığını ve yazılan son değer ise kuvözün ısıtılarak veya doğal yollarla soğutulularak (histerezis deneylerde) kararlı rejime getirildiği durumdaki son kabin havası sıcaklığını göstermektedir.

Tablo 6.1: Tez kapsamında yapılan ısıtma deneylerinin listesi

Deney adları				
25-30 °C	25-32 °C	25-34 °C	25-36 °C	25-38 °C
30-32 °C	32-34 °C	34-36 °C	36-38 °C	
30-34 °C	32-36 °C	34-38 °C	38-36 °C	
30-36 °C	32-38 °C	36-34 °C		
30-38 °C	34-32 °C	38-34 °C		
32-30 °C	36-32 °C			
34-30 °C	38-32 °C			
36-30 °C				
38-30 °C				

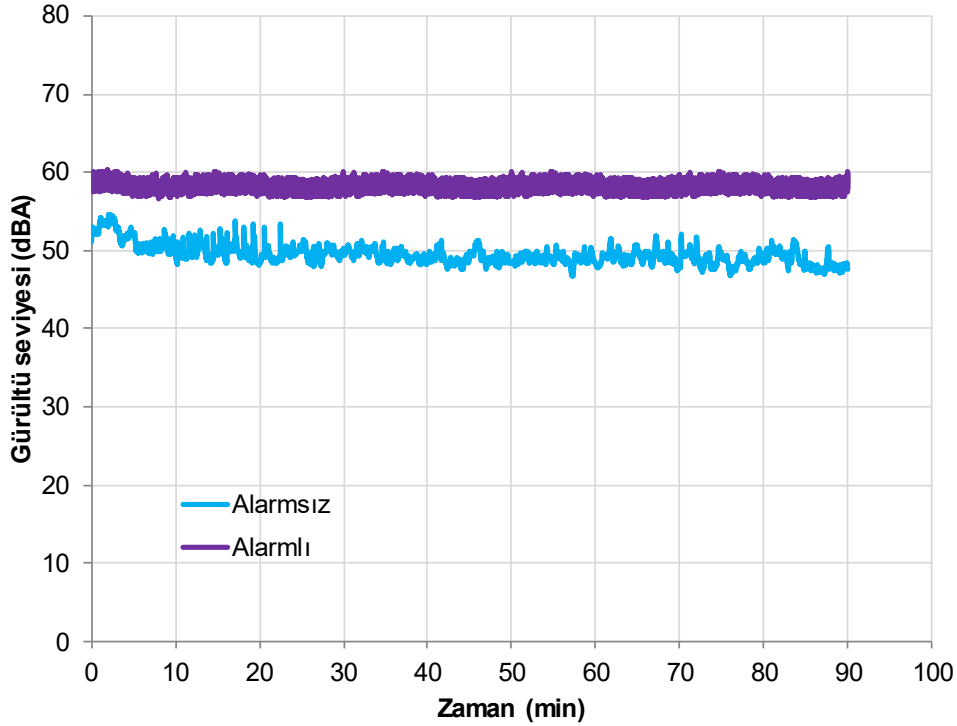
EN 60601-2-19 standardında (2011), kabin içi hava sıcaklığı çevre sıcaklığından en az 3 °C fazla olmadığı durumlarda, rezistanslı kuvözün istenilen hedefi gerçekleştirilmesi mümkün olamayabileceği belirtilmiştir (Tol 2005). Bu yüzden EN 60601-2-19 standardında (2011) belirtildiği üzere, çevre ortamı sıcaklığının 21-26 °C olduğu ortamlarda rezistanslı kuvözlerin çalıştırılması tavsiye edilmektedir. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında rezistanslı kuvöz sistemiyle termoelektrikli kuvöz sisteminin karşılaştırılması yapıldığı için çevre sıcaklığı sabit bir değer olmak zorundadır. Bütün bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda, yapılan bütün deneylerde çevre sıcaklığının $25 \pm 0,5$ °C olmasına karar verilmiştir. Çevre ortamının belirlenen sıcaklıkta sabit tutulması, Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünün laboratuvarlarında bulunan fan-coil sistemiyle sağlanmıştır. Tez kapsamında yapılan bütün deneylerde çevre sıcaklığı (taze hava girişi sıcaklığı), 14 nolu ısıtma çift vasıtasıyla deney boyunca kaydedilmiştir.

6.1 Rezistanslı Kuvöz Sisteminde Yapılan Deneyler

Rezistanslı kuvöz sisteminin deneylerine başlamadan önce, sistemin çevre ortamından aldığı taze havanın ortalama hızı, karışım havasının (kabin ortamından emilen hava + taze hava) ortalama hızı ve kabin içerisindeki ortalama hava hızı Bölüm 5.1.1'deki yöntemle göre belirlenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda ortalama taze hava hızı 0,273 m/s, ortalama karışım hava hızı 1,81 m/s ve kabin içerisindeki ortalama hava hızı 0,0929 m/s olarak tespit edilmiştir. Ortalama hızlar belirlendikten sonra, akışın geçtiği kesit alanları kullanılarak taze havanın hacimsel debisi 0,001936 m³/s ve karışım havasının hacimsel debisi 0,004692 m³/s olarak hesaplanmıştır. Karışım havası miktarından taze hava miktarının çıkartılmasıyla, kabin ortamından emilen havanın hacimsel debisi 0,002756 m³/s olarak belirlenmiştir. AMS Amenity XP kuvözünde, kabin ortamından emilen hava miktarıyla alınan taze hava miktarı orantılandığında 1,42 değeri elde edilmektedir. Bu sayının fiziksel anlamı; yaklaşık olarak 3 birim kabin ortamından alınan havayla, 2 birim çevre ortamından alınan taze havanın karıştırılarak, 5 birim karışım havası oluşturduğunu göstermektedir. Kabin ortamında bebek olduğunda solunumdan dolayı bir miktar CO₂ oluşmaktadır. Bu oluşan CO₂ miktarının, kabin içerisinden tahliye edilmesi gerekmektedir. Bölüm 3.1.5'de bu konu detaylı bir şekilde tartışılmıştı ve normal koşullar altında kabin havasının, yaklaşık olarak saatte altı kez yeniden sirküle ettirilmesi gerektiği ve toplam havanın yaklaşık olarak 1/6'sının (%16,6) çevreden emilen taze hava, yaklaşık 5/6'sının (%83,3) ise kabin içinden emilen hava olması gerektiğinin altı çizilmişti (Chapple 1938, Cau 2010). AMS Amenity XP kuvözünün hacmi 0,198 m³ olduğuna göre, saatte toplam kabin içerisine alınan taze hava miktarı 6,969 m³'tür. Dolayısıyla kabin ortamı, saatte yaklaşık olarak 35 kez yeniden taze havayla sirküle edilmekte ve kabin içerisine alınan toplam havanın 2/5'i (%40) çevreden emilen taze hava olduğu için kabin içerisinde hiçbir şekilde CO₂ birikmemektedir. Rezistanslı kuvöz sisteminin sirkülasyon sayısı ve alınan taze hava miktarı, literatürdeki değerlerin çok üzerinde olduğu için uygundur.

Prematüre bebekler için kabin içerisindeki gürültü seviyesinin öneminden daha önce Bölüm 5.1.3'de bahsedilmişti. EN 60601-2-19 standardında (2011) kuvözün normal çalışması esnasında kabin içi gürültü seviyesinin 60 desibeli, kuvözde sesli alarm devreye girdiğinde ise kabin içi gürültü seviyesinin 80 desibeli geçmemesi gerekmektedir. AMS Amenity XP kuvözünün mevcut sisteminin kabin içerisindeki gürültü seviyelerinin 90 dakika sonundaki ortalamaları, alarmsız durumda 49,49 dBA ve alarmlı durumda 58,19 dBA olarak ölçülmüştür.

Dolayısıyla rezistanslı sistemin gürültü değerleri, standarttaki değerlerin altında olduğu için uygundur. Gürültü seviyesinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Rezistanslı kuvöz sistemin gürültü seviyesinin zamana bağlı olarak değişimi

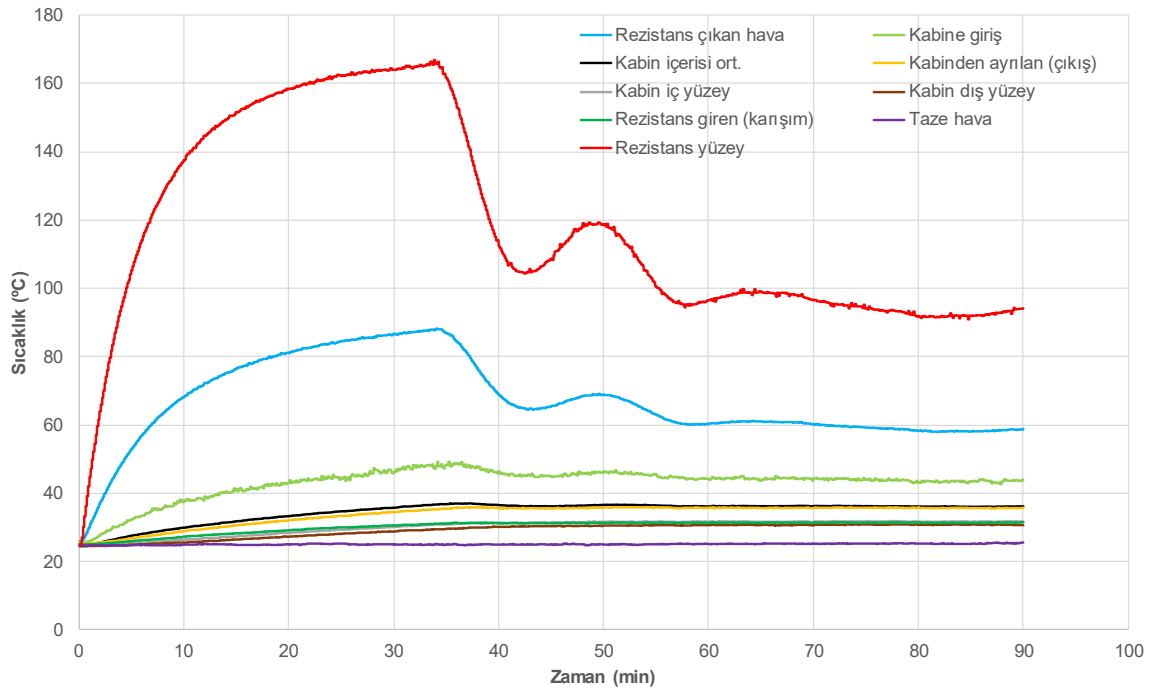
Rezistanslı kuvöz sisteminin kritik noktalarına 17 adet kalibre edilmiş ısı çift yerleştirilmiştir. Isıl çiftler aracılığıyla ölçülen sıcaklık değerleri, datalogger ile anlık olarak kaydedilmiştir. Kuvözün harcadığı elektrik miktarının belirlenmesi için sisteme enerji analizörü bağlanmıştır. Bu şekilde rezistanslı kuvöz sistemi, planlanan deneyler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 6.2). Rezistanslı kuvöz sisteminin kendisine ait bir K tipi ısı çift bulunmaktadır ve kuvözün sıcaklık kontrolünü, bu sensörün okuduğu değere göre yapmaktadır. Çalışmada, iki sistemin doğru bir şekilde karşılaştırılmasının gerçekleştirilebilmesi için deneylerin referans termometresine göre yapılması gerekmektedir. Bu yüzden referans termometresinin gösterdiği deney sıcaklıklarına (30 °C, 32 °C, 34 °C, 36 °C ve 38 °C) göre, kuvözün üzerinde bulunan ısı çift değerlerinin kaç olacağı deneme yanılma yapılarak, deneylere başlamadan önce belirlenmiştir. Bu şekilde rezistanslı kuvöz sisteminin otomatik kontrol sistemine girilen deneme yanılma sıcaklık değerleriyle, deney sıcaklıkları (30 °C, 32 °C, 34 °C, 36 °C ve 38 °C) referans termometresine göre elde edilmiştir.



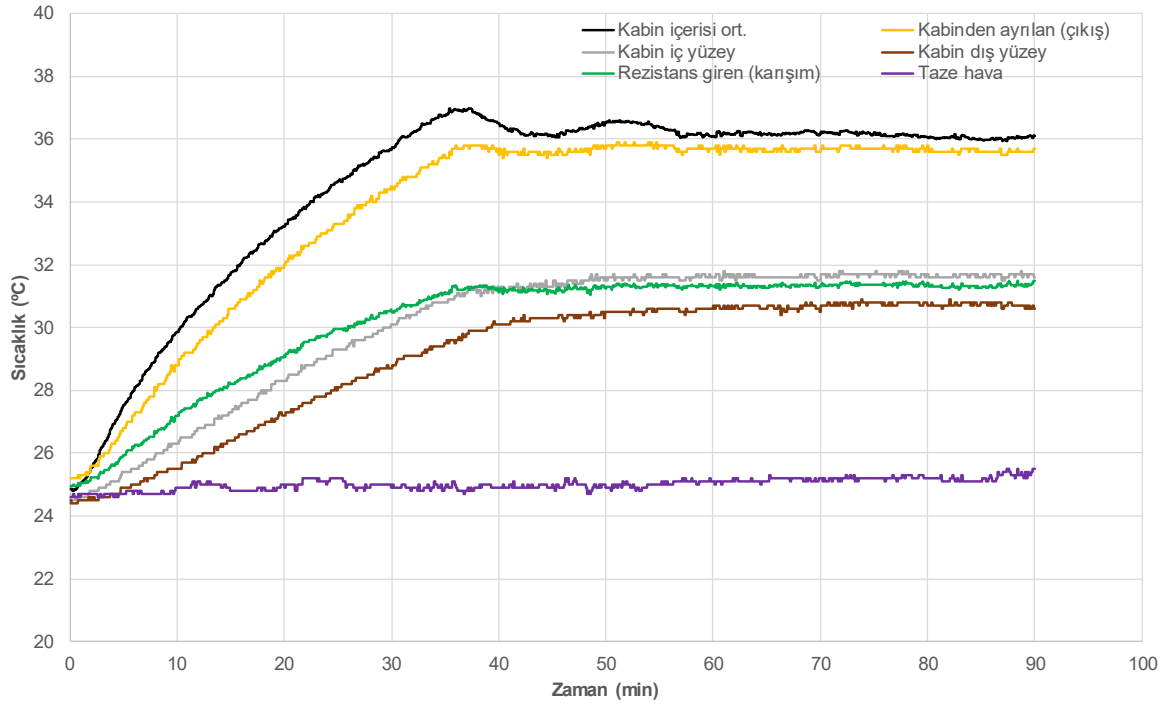
Şekil 6.2: Rezistanslı kuvöz sistemi deney düzeneği

Rezistanslı kuvöz sisteminin herhangi bir deney sırasında kararlı hale gelebildiği maksimum süre, en yüksek deney sıcaklığı olan 38 °C'ye göre belirlenmiştir. Kuvöz, çevre sıcaklığının $25 \pm 0,5$ °C olduğu bir ortamda, referans termometresine göre 38 °C'ye ayarlanarak, kuvöz sisteminin tam olarak kararlı hale geldiği süre 90 dakika olarak belirlenmiştir. Bütün deney verilerinin doğru bir şekilde değerlendirilip, karşılaştırılabilmesi için bütün deneylerde standart adımlar yapılmalıdır. Bu yüzden rezistanslı kuvöz sisteminin bütün deneylerinde, kaydedilen veriler (sıcaklık, akım, voltaj ve aktif güç değerleri) 90'ar dakika boyunca kaydedilerek, deneyler arasında standardizasyon sağlanmıştır. Tez kapsamında yapılan her bir deneyin verilerini zamana bağlı olarak vermek hem gereksiz yer işgal edecek hem de daha önemlisi karmaşıklık oluşturacaktır. Bu yüzden tez kapsamında yapılan deneylerden 25-36 °C deneyinde elde edilen bütün veriler zamana bağlı olarak grafiksel verilmiştir (Şekil 6.3 ve 6.4). Kuvöz sistemlerinde kullanıcı tarafından ayarlanan sıcaklık kuvöz içerisinde oluşturulduktan sonra, ayarlanan sıcaklıkta kabin ortamının sıcaklığını kararlı bir şekilde muhafaza etmektedir. 25-36 °C deneyinin deney süresi boyunca kaydedilen verilerinden kabin ortamının ortalama sıcaklığının kararlılığına göre, sistemin kararlı hale geldiği süre belirlenmiştir. Kuvözlerde, sistem kararlı hale ulaştıktan sonra ölçüm verilerinde çok küçük değişimler olmaktadır. Bu

yüzden sistemin kararlı hale ulaştığı süreden itibaren deney süresi boyunca ölçülen verilerin ortalaması alınarak 25-36 °C deneyinin kararlı haldeki bütün verileri tespit edilmiştir. Benzer işlemler, rezistanslı kuvöz sisteminin bütün deneyleri için de yapılmıştır ve bütün deneylerin kararlı hal süresi boyunca ölçülen ortalama verileri Tablo 6.2’de toplanarak çalışma karmaşıklığından arındırılmıştır. Rezistanslı kuvöz sisteminin harcadığı elektriksel verilerden olan voltaj değerleri bu tabloda belirtilmemiştir. Çünkü Türkiye’deki elektrik hatlarındaki voltaj değeri 220 voltur ve sabittir. EN 60601-2-19 standardına (2011) göre, kabin içerisindeki sıcaklıkların ölçülmesi için yatağın 10 cm üzerinde bulunan 5 farklı noktadan sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu noktadaki sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak, kabin içerisi ortalama adı altında tek bir değer olarak verilmiştir (Tablo 6.2). Ayrıca kabinin iç ve dış yüzey sıcaklıkları hem kabinin kısa kenarına hem de kabinin uzun kenarına yerleştirilen 2 adet ısı çifti ile ölçülmektedir. Benzer şekilde kısa ve uzun kenardaki iç ve dış yüzey sıcaklıklarının ortalamaları alınarak, kabin iç yüzey ve dış yüzey sıcaklığı adı altında tek değer olarak verilmiştir (Tablo 6.2). Rezistanslı kuvöz sisteminde en kritik eleman şüphesiz ki rezistanstır. Bu yüzden taze + kabin ortamlarından emilen karışım havasının; rezistans elemanına girmeden önceki sıcaklığı, rezistansın yüzey sıcaklığı ve karışım havasının rezistans üzerinden geçirildikten sonraki sıcaklığı Tablo 6.2’de ayrı ayrı verilmiştir.

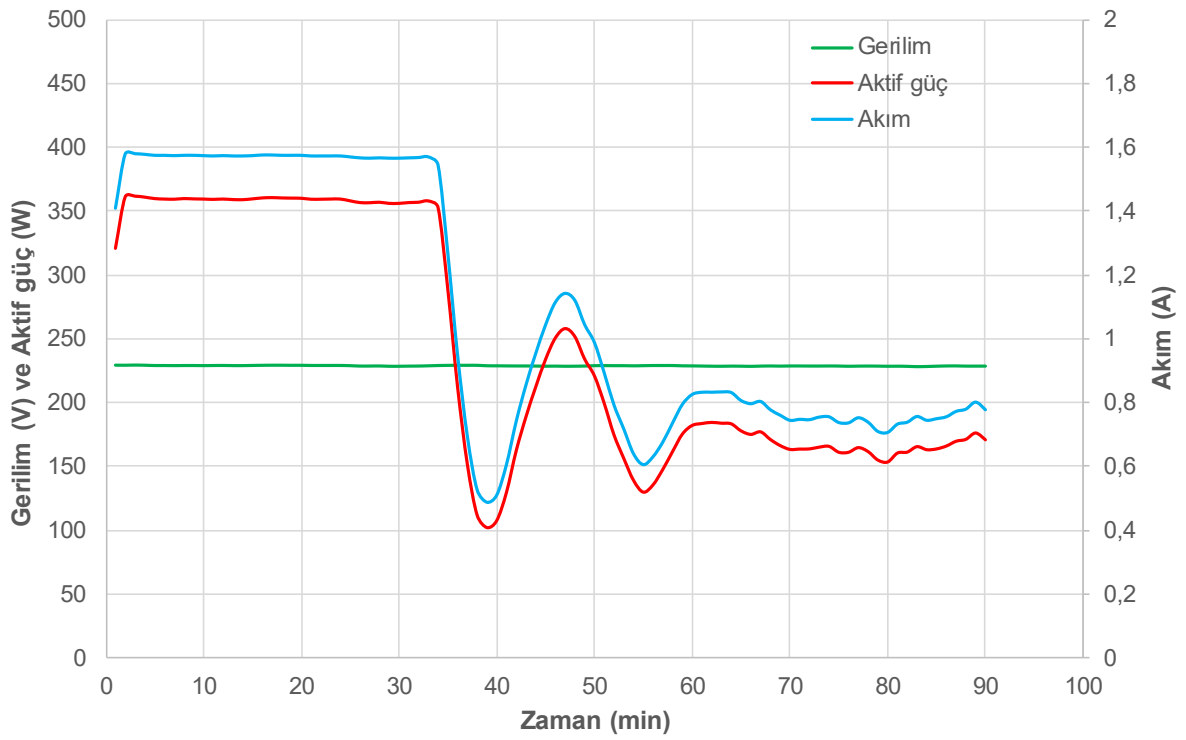


(a)



(b)

Şekil 6.3: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi



Şekil 6.4: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri

Tablo 6.2: Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki değerleri

			KARARLI HALDEKİ ELEKTRİKSEL VERİLER ve SICAKLIK DEĞERLERİ											
Referans sıcaklık (°C)	Deney adı	Deney süresi (min)	Kararlı hale gelme süresi (min)	Akım (A)	Aktif güç (W)	Kabine giriş (°C)	Kabin içerisi ort. (°C)	Kabinden ayrılan (çıkış) (°C)	Kabin iç yüzey (°C)	Kabin dış yüzey (°C)	Taze hava (°C)	Rezistans giren (karışım) hava (°C)	Rezistans çıkan hava (°C)	Rezistans yüzey (°C)
30	25-30	90	47	0,426	86,6	32,92	30,05	30,1	28,63	28,07	25	27,99	39,93	53,97
	30-32	90	45	0,52	108,21	36,59	32,18	31,99	30,16	29,38	25,33	29,24	45,52	65,89
	30-34	90	35	0,66	140,3	40,6	34,32	33,96	31,58	30,48	25,01	30,27	53,48	82,92
	30-36	90	38	0,779	169,73	43,98	36,5	35,9	33,01	31,71	25,07	31,43	60,98	98,31
	30-38	90	44	0,869	193,57	47,71	38,31	37,6	34,24	32,71	25,42	32,57	66,52	109,46
	32-30	90	49	0,419	85,62	32,3	29,94	29,84	28,35	27,8	24,9	27,8	39,33	53,19
	34-30	90	48	0,391	76,94	32,55	30,02	30,09	28,66	28,12	25,16	28,06	37,81	48,58
	36-30	90	60	0,385	78,76	32,57	30,05	30,1	28,6	28,07	24,9	27,96	37,81	48,93
32	38-30	90	76	0,372	72,91	31,98	29,93	30,21	28,71	28,15	25,27	28,17	36,39	45,57
	25-32	90	50	0,535	111,7	36,54	32,21	32	30	29,27	24,9	29,09	46,25	67,23
	32-34	90	47	0,627	135,33	40,03	34,28	33,97	31,52	30,52	25,3	30,39	51,76	78,96
	32-36	90	32	0,752	163,95	43,74	36,25	35,79	32,86	31,62	25,45	31,52	58,74	93,79
	32-38	90	40	0,866	192,97	47,51	38,31	37,63	34,26	32,75	25,47	32,61	65,89	108,2
	34-32	90	30	0,5	104,5	36,16	32,14	32,03	30,05	29,29	25,23	29,22	44,53	63,79
	36-32	90	41	0,487	101,64	36,02	32,18	32,07	30,1	29,35	25,4	29,32	44,05	62,57
34	38-32	90	52	0,484	102,25	35,76	32,09	31,98	30,05	29,33	25,39	29,26	43,45	61,07
	25-34	90	52	0,663	142,9	39,68	34,2	33,68	31,29	30,29	25,18	30,17	53,34	82,52
	34-36	90	42	0,747	161,87	43,09	36,11	35,64	32,78	31,56	25,5	31,45	57,73	91,58
	34-38	90	34	0,872	192,67	46,94	38,31	37,62	34,26	32,68	25,41	32,58	65,76	107,78
	36-34	90	25	0,601	129,63	39,51	34,25	33,95	31,51	30,5	25,47	30,45	50,55	76,37
36	38-34	90	46	0,61	131,02	39,32	34,23	33,91	31,53	30,54	25,5	30,45	50,05	75,46
	25-36	90	57	0,766	168	43,92	36,12	35,66	32,7	31,46	25,18	31,33	59,48	94,96
	36-38	90	29	0,845	187,5	46,95	38,1	37,48	34,07	32,59	25,45	32,52	64,49	105,09
38	38-36	90	37	0,728	159,27	43,15	36,2	35,75	32,81	31,58	25,5	31,52	57,21	90,27
	25-38	90	70	0,981	220,9	49,04	38,54	37,94	34,04	32,14	24,59	32,43	71,37	119,98

6.1.1 Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneyler

Bebek kuvöz sistemlerinin pratik uygulamasında, prematüre bebek, kuvöz sistemine yerleştirilmeden en az 45 dakika önce kuvöz sistemi çalıştırılır ve bu süre zarfında uzmanlar tarafından belirlenen sıcaklığın kuvöz içerisinde kararlı bir şekilde oluşturulması beklenir. Kuvöz sisteminin kararlılığa ulaştığından emin olunduktan sonra kuvözün kabini açılarak, prematüre bebek kuvöz sistemine yerleştirilir. Bebek kuvöz sistemine yerleştirildikten sonra kabin kapatılır. Bu işlem sırasında doğal olarak kuvözün kabini açılıp kapandığı için uzmanlar tarafından belirlenen kararlı kuvöz sıcaklığında belli bir süre dalgalanma yaşanır. Bu dalgalanmanın sonucunda kuvöz sistemi yeniden kararlı hale ulaşır. Bu bahsedilen durumda, kuvöz sıcaklığında yaşanan sıcaklık dalgalanmasının büyüklüğü ve kuvöz sisteminin yeniden kararlılığa ulaşma süresi, kullanılan kuvözün performans ve otomatik kontrol parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Hem bu olayın etkisini araştırmak hem de rezistanslı kuvöz sistemiyle geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin performanslarını karşılaştırmak için kararlı haldeki rezistanslı kuvöz sistemine model bebeğin yerleştirilmesi sırasında ve sonrasında kuvöz sisteminin kararlı durum ve dinamik davranışları yapılan deneylerle incelenmiştir.

Daha önce belirtildiği gibi, model bebek ile yapılan deneylerde bebeğin iç kısmına su ilave edilerek, bebeğin çekirdek sıcaklığı 36,5 °C getirilmiştir. Bebeğin kütlesi, ilave edilen sıcak su miktarına göre 3 kg olarak ayarlanmıştır. Ardından 36,5 °C çekirdek sıcaklığına ve 3 kg kütleye sahip model bebek, yaklaşık 45 dakika önce çalıştırılan ve kararlı halde bulunan rezistanslı kuvöz sistemine yerleştirilmiştir. Bebeğin çekirdek sıcaklığında ve cilt sıcaklığında meydana gelen sıcaklık değişimlerini takip edebilmek için 7 ve 8 nolu ısı çiftler model bebeğin üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 6.5). Yapılan deneylerde standardizasyon sağlamak için açılan kabin 1 dakika boyunca açık tutulduktan sonra kapatılmıştır. Bu şekilde pratik uygulamadaki gerçek durum simüle edilerek, bebeğin sıcaklık değişimleri ve kararlı rejimi bozulan rezistanslı kuvöz sistemin dinamik davranışları araştırılmaya çalışılmıştır. Tez kapsamında, daha önce bebeksiz durumda yapılan 25 adet deneyin bebekli durumda da ayrı ayrı yapılmasından ziyade, sadece 30 °C, 32 °C, 34 °C, 36 °C ve 38 °C'lerde kararlı halde bulunan ortamlar için toplam 5 adet deneyin araştırma konusu için yeterli olacağı düşünülmüştür.

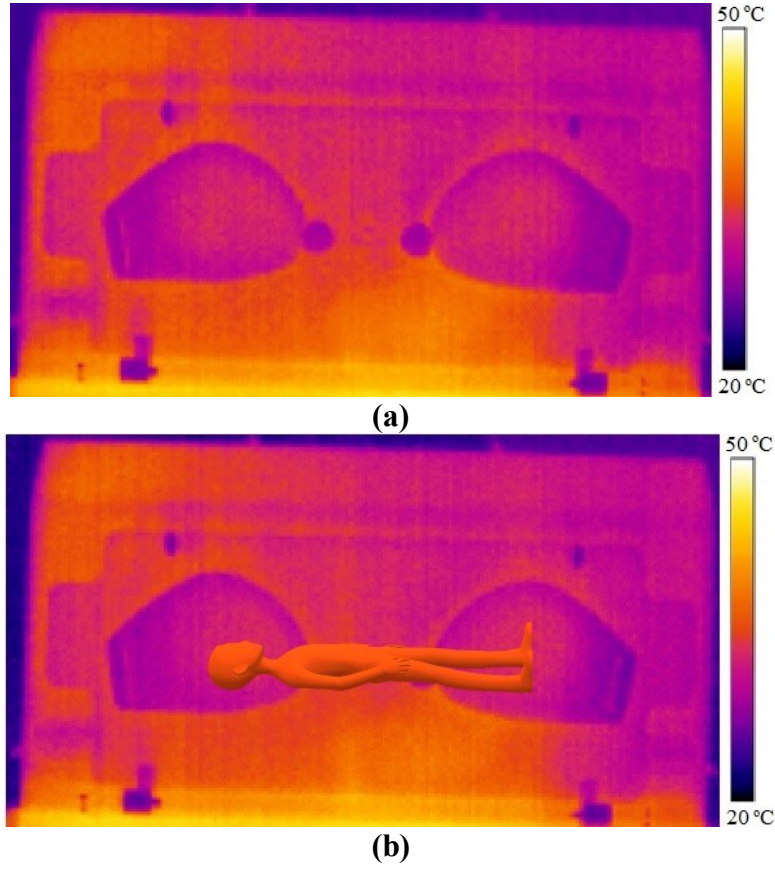


Şekil 6.5: Rezistanslı kuvöz sisteminin model bebekli deney düzeneği

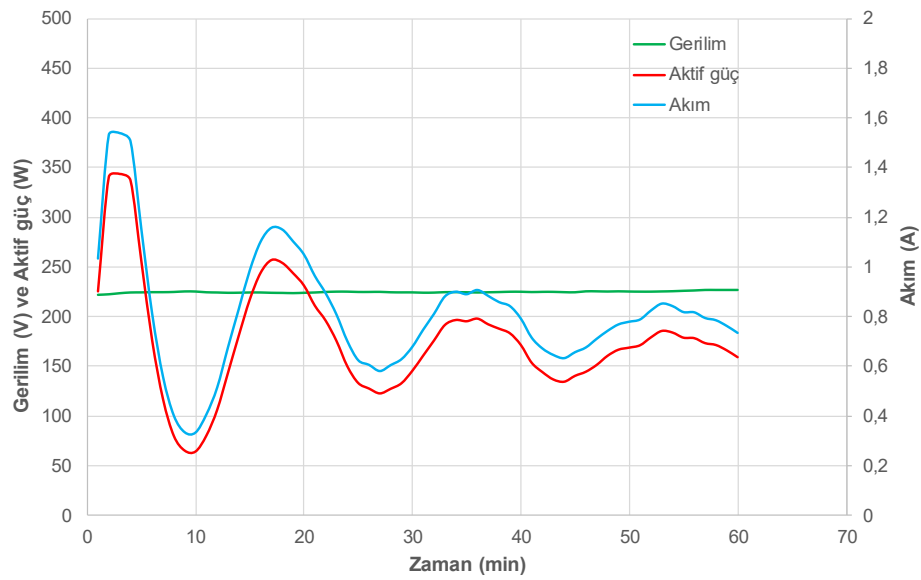
Model bebekli deneylere başlamadan önce yapılan ön deneylerde, kabin açılarak kararlılığı bozulan kuvöz sisteminin, maksimum 60 dakika içinde yeniden kararlılığa ulaştığı tespit edilmiştir. Bu yüzden bebekli deneylerde kaydedilen ölçümlerin süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Ayrıca bebekli deneylerde, bebeğin çekirdek sıcaklığından dolayı oluşan katkısını gözlemlemek için belirlenen deney sıcaklıklarında kuvöz sistemi kararlı hale geldikten sonra bebek yerleştirilmeden önce 1 dakika boyunca termal kamera görüntüsü alınmıştır (Şekil 6.6 (a)). Ardından kabin açılarak, kabinin açık tutulduğu 1 dakika içerisinde model bebek kuvöz sistemine yerleştirilmiş ve bebeğin sıcaklıklarını takip eden ısı çiftleri bebeğin yüzeyine yapıştırıldıktan sonra kabin kapatılmıştır. Daha sonra kuvöz sisteminin 60 dakika boyunca bütün sıcaklık ve elektriksel verileri kaydedilmiştir. 60 dakika sonrasında kabinin tekrar termal kamera ile 1 dakikalık görüntüsü alınarak, bebekli deney sonlandırılmıştır (Şekil 6.6 (b)). Benzer işlemler 5 adet model bebekli deney için de ayrı ayrı uygulanmıştır.

Bebeksiz deneylerde olduğu gibi, rezistanslı sistemde model bebekle yapılan bütün deneylerin sıcaklık ve elektriksel verilerinin zamana bağlı değişimlerinin verilmesinden ziyade, sadece 25-36 °C bebekli deneyinin bütün verilerinin zamana bağlı değişimleri grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 6.7 ve 6.8). Diğer model bebekle yapılan deneylerin verileri, sistemin kararlı rejime ulaştığı süreye bağlı olarak, sistemin kararlı hal boyunca ölçülen verilerinin ortalaması alınarak Tablo 6.3’de toplu olarak belirtilmiştir. Model bebek, gerçek bir bebek olmadığı için

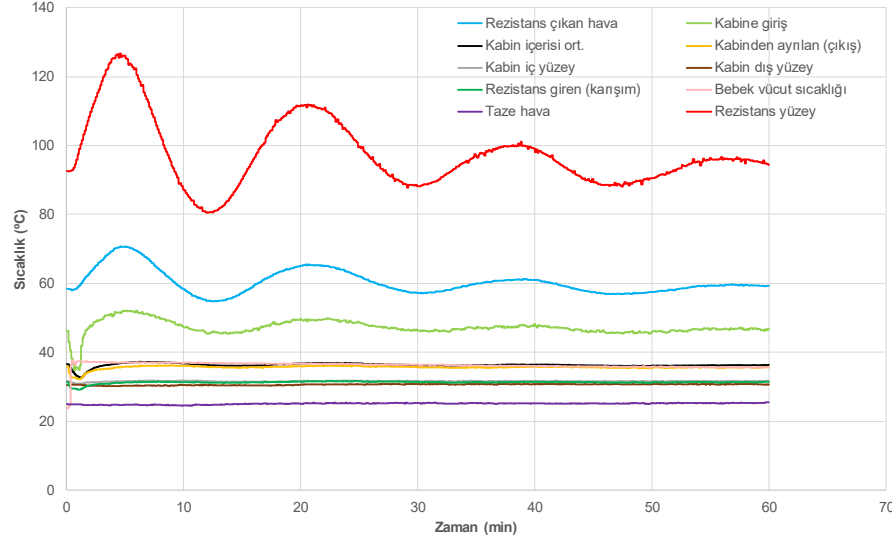
ölçülen çekirdek ve cilt sıcaklıkları hemen hemen aynı değerleri ($T_{cs} \approx T_{\text{çs}} - 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$) göstermiştir. Bu yüzden Tablo 6.3’de sadece bebeğin çekirdek sıcaklığı verilmiştir.



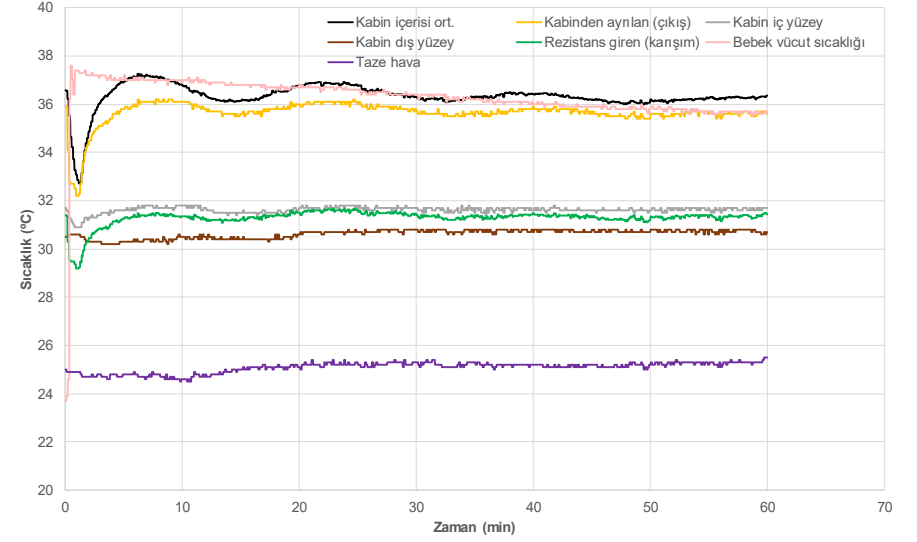
Şekil 6.6: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekli 25-36 °C deneyinin termal kamera görüntüleri (a) bebek yerleştirilmeden önce (b) bebek yerleştirildikten 60 dakika sonra



Şekil 6.7: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri



(a)



(b)

Şekil 6.8: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekle yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi

Tablo 6.3: Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekle yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki verileri

		KARARLI HALDEKİ ELEKTRİKSEL VERİLER ve SICAKLIK DEĞERLERİ												
Deney adı	Deney süresi (min)	Kararlı hale gelme süresi (min)	Akım (A)	Aktif güç (W)	Kabine giriş (°C)	Kabin içeri ort. (°C)	Kabinden ayrılan (çıkış) (°C)	Kabin iç yüzey (°C)	Kabin dış yüzey (°C)	Bebeğin çekirdek (°C)	Taze hava (°C)	Rezistans giren (karışım) hava (°C)	Rezistans çıkan hava (°C)	Rezistans yüzey (°C)
25-30	60	37	0,369	73,65	33,59	30,48	30,26	28,91	28,35	34,58	25,29	28,21	37,6	47,89
25-32	60	40	0,538	114,68	39,69	32,47	32,3	30,23	29,37	34,75	25,3	29,41	46,43	67,84
25-34	60	42	0,649	139,13	40,16	34,37	33,93	31,42	30,35	35,04	25,18	30,32	52,25	80,38
25-36	60	46	0,778	162,95	46,31	36,18	35,57	32,6	31,35	35,74	25,24	31,3	58,42	93,07
25-38	60	50	0,872	192,73	52,23	38,24	37,36	33,88	32,34	35,95	25,48	32,46	66,36	109,01

6.2 Termoelektrikli Kuvöz Sisteminde Yapılan Deneyler

Termoelektrikli kuvöz sistemine ait deneylere başlamadan önce TE ısı pompası sisteminin optimizasyonu yapılarak sistemin bütün geometrik uzunluk ve performans parametreleri belirlenmiştir. Ardından belirlenen geometrik uzunluklara sahip optimum TE ısı pompası sisteminin tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Üretilen optimum TE ısı pompası sistemi, rezistanslı kuvöz sistemindeki rezistans elemanı ve rezistanslı sistemin otomatik kontrolünün yapıldığı ünite çıkartılarak, kuvöz sistemine yerleştirilmiştir. Bu şekilde optimum TE ısı pompası ile çalışan termoelektrikli kuvöz sistemi geliştirilmiştir. Son olarak da rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan deneyler, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminde de yapılmıştır.

6.2.1 Optimum TE ısı pompası sisteminin belirlenmesi

Daha öncede belirtildiği gibi, çalışmanın temel amacında, rezistanslı kuvöz sisteminin tasarımı değiştirilmeden, rezistans elemanı ve kontrol ünitesinin çıkartılarak çıkartılan hacme geliştirilen TE ısı pompası sisteminin yerleştirilerek, termoelektrikli kuvöz sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yani geliştirilen TE ısı pompası sistemi için sabit bir hacim bulunmaktadır. Bu yüzden çoğu mühendislik uygulamasında olduğu gibi, geliştirilen sistemin tasarımında kısıtlı optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bölüm 4.3’de detaylı bir şekilde açıklandığı üzere, TE ısı pompası sistemi kendi içerisinde TES modül, kanatçıklı yüzeyler ve kanatçıklı yüzeyin üzerinde bulunan fanlardan oluşan komplike bir sistemdir (bkz. Şekil 4.7). AMS Amenity XP kuvözünün tasarımına göre, TE ısı pompası sisteminin kuvözün iç kısmında bulunan kanatçıklı yüzeylerinin yerleştirilebileceği maksimum uzunluklar; genişlik (W)= 10,4 cm, uzunluk (L)= 13 cm ve yükseklik (b)= 4 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 6.9). Kanatçıklı yüzeylerin, genişlik (W) ve uzunluğu (L) ne kadar büyükse, kanatçıklı yüzeylerden olan ısı transferi o kadar büyük olduğu bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla TE ısı pompası sisteminin kuvözün iç tarafta kalan kanatçıklı yüzeylerin genişliği 10,4 cm ve uzunluğu 13 cm olarak belirlenmiştir. Bölüm 4.3.2.1’de detaylı olarak açıklandığı üzere, Nu sayısı için kullanılan eşitliğin geçerli olabilmesi için kanatçıklı yüzeylerinin üzerinden herhangi bir hava sızıntısı olmaması gerekmektedir (bkz. Şekil 4.13). Bu yüzden kanatçıklı yüzeylerin etrafı kapatılmıştır ve yapılan tasarım gereği (üretim kısıtlaması) kanatçık yüksekliği (b) 2 cm olarak belirlenmiştir.

Termoelektrikli sistemlerde sadece akım yönünün değiştirilmesiyle ısı atılan ve ısı çekilen yüzeyler değiştirilebilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen TE ısı pompası sistemi, kuvözün ihtiyaçları doğrultusunda hem ısıtma hem de soğutma amaçlı kullanıldığı ve aynı zamanda da hacim kısıtlaması söz konusu olduğu için TE ısı pompası sisteminin her iki tarafında bulunan kanatçıklı yüzeylerin aynı geometrik uzunluklara sahip olmasına karar verilmiştir.



Şekil 6.9: TE ısı pompası sisteminde iç tarafta bulunan kanatçıklı yüzeylerin yerleştirilebileceği sınırlı kuvöz hacmi

Bölüm 6.1’de, rezistanslı kuvöz sisteminde taze havanın hacimsel debisi $0,001936 \text{ m}^3/\text{s}$ ve karışım havasının hacimsel debisi $0,004692 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak belirlenmişti. Tez kapsamında termoelektrikli kuvöz sistemi ile rezistanslı kuvöz sistemi birebir olarak karşılaştırıldığı için TE ısı pompası sisteminde kuvözün iç kısmında kalan radyal fan, taze hava ve karışım havası değerlerini, rezistanslı sistemdeki aynı hacimsel debilerde sağlamalıdır. TE ısı pompası sistemlerinde havadan havaya çalışan termoelektrikli sistemlerin kanatçıklı yüzeylerinin üzerinde genelde aksel fanlar bulunmaktadır. Kuvöz sisteminde dolaştırılan karışım havası (taze hava + kabin ortamından emilen hava + varsa ilave O_2) bir radyal fan ile sağlanmaktadır. Bu yüzden termoelektrikli kuvöz sisteminde kullanılan TE ısı pompası sisteminin, kuvözün iç kısmına bakan yüzeyinde radyal fan kullanılmak zorundadır (bkz. Şekil 4.16). Bu radyal fanın PWM ile dönme hızı ayarlanarak istenilen hacimsel debi, geliştirilen kuvöz sistemine basılmıştır. TE ısı pompası sistemin diğer tarafında bulunan fan için herhangi bir kısıtlama yoktur. Bu yüzden bu taraftaki fan için kanatçık geometrisine uygun olarak bir aksel fan seçilmiş ve seçilen fanın kataloğundan maksimum PWM değeri için hacimsel debisi $0,0126 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak belirlenmiştir.

Termoelektrikli kuvöz sisteminde, rezistanslı sistemdeki gibi kabini ısıtma işini başarabilmesi için en az kaç tane TES modüle ihtiyaç olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bebek kuvözleri çoğunlukla ısıtma amaçlı kullanılmaktadır. Bu doğrultuda Bölüm 3’de belirtilen kuvöz sisteminin matematiksel modellemesini kapsayan bir MATLAB® yazılımı (EK A) oluşturulmuştur. Bu yazılım da temel amaç; kuvözün herhangi bir kararlı sıcaklıkta çalışabilmesi için ihtiyacı olan ısı transferi miktarını belirlemektir. Kuvöz tasarımları genelde kabin hava sıcaklığı 36 °C olan ortama göre yapıldığı için rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneylerden 25-36 °C deneyinin ölçülen sıcaklık ve elektriksel verileri, EK A’daki MATLAB® yazılımında girdi olarak kullanılmıştır. Bu yazılım kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, AMS Amenity XP kuvözünün, çevre sıcaklığının 25 °C ve kabin hava sıcaklığının ise 36 °C olduğu kararlı bir durumda çalışabilmesi için 149,09 W ısı gücüne ihtiyacı olduğu belirlenmiştir. 25-36 °C model bebekli deneyde, rezistanslı kuvöz sisteminin kararlı rejimde harcadığı elektriksel güç ise Entes MPR 45S enerji analizörü vasıtasıyla deneysel olarak ortalama 162,95 W olarak ölçülmüştür. Bu iki değer arasındaki küçük fark, matematiksel modellemede yapılan kabullerden ve deney sırasındaki cihazların ölçme hassasiyetinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mühendislik problemlerinin çoğunda, bu şekildeki küçük farklar önemsizdir ve bu değerlerin birbirleriyle örtüştüğü kabul edilir. Böylelikle Bölüm 3’te yapılan kuvözün matematiksel modellemesinin doğruluğu kanıtlanmış ve TES modülünün sayısını belirleyecek olan ortalama ısı gücü belirlenmiştir.

Bu tez konusu kapsamında, öğretim üyesi yetiştirme programı (ÖYP) desteği kullanılarak TE modüllerin ve TE sistemlerin çalışma mantıklarının anlaşılabilir ve geliştirilebilmesi için P&N Technology Co. Ltd. firmasından birçok TE modüller ve TE sistemler satın alınmış ve satın alınan TE cihazlar, Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü altyapısına kazandırılmıştır. Belirlenen ortalama ısıtma gücünü karşılayabilmesi ve aynı zamanda TE ısı pompası sisteminin soğutma modunda çalıştırıldığında gerekli soğutma gücünü sağlayabilmesi için laboratuvarında bulunan TES modüllerden TEC1-127140 kodlu TES modülü seçilmiştir. Seçilen TES modülün katalogunda verilen performans parametreleri Tablo 6.4’te gösterilmiştir. P&N Technology firması, TES modüllerinin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için TES modül kataloglarında verilen maksimum voltaj ve maksimum akım değerlerinin altında çalıştırılmasını tavsiye etmektedir. Bu nedenle tez kapsamında geliştirilen optimum TE ısı pompası sisteminde kullanılan TEC1-127140 modülünün maksimum durumda 14 V çalışma voltajında çalıştırılmasına karar verilmiştir.

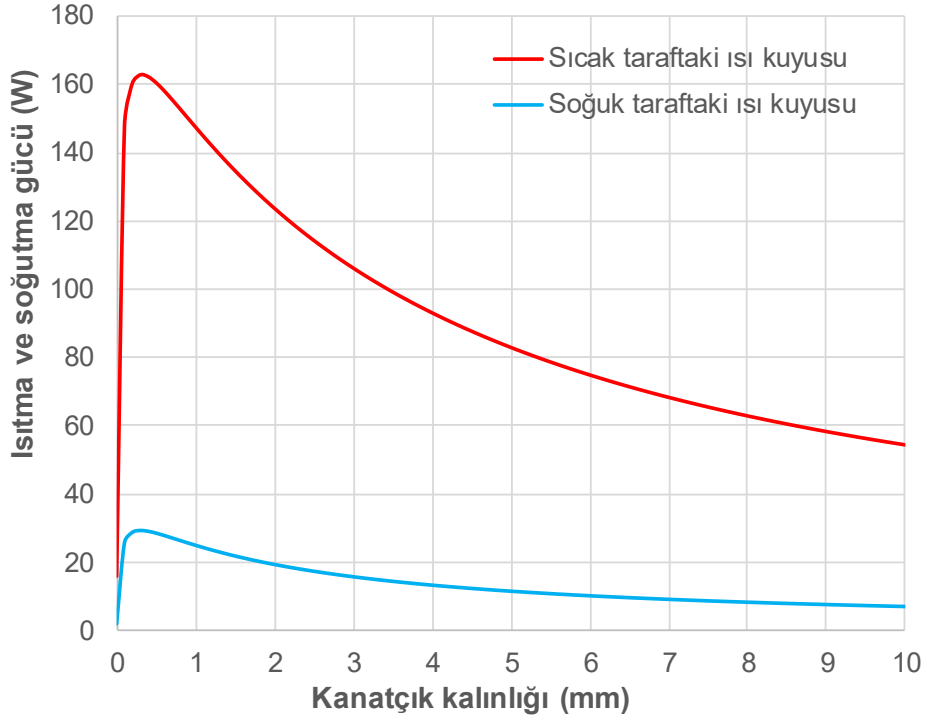
Tablo 6.4: TEC1-127140 kodlu TES modülünün katalogunda verilen maksimum parametreler (P&N Technology 2019)

TEC1-127140		
Sıcak yüzey sıcaklığı (°C)	25 °C	50 °C
$Q_{c,max}$ (W)	127	138
ΔT_{max} (°C)	67	75
I_{max} (A)	14,8	16,34
V_{max} (V)	14,45	16,4
R_{module} (Ω)	0,903	1,02
n	127	

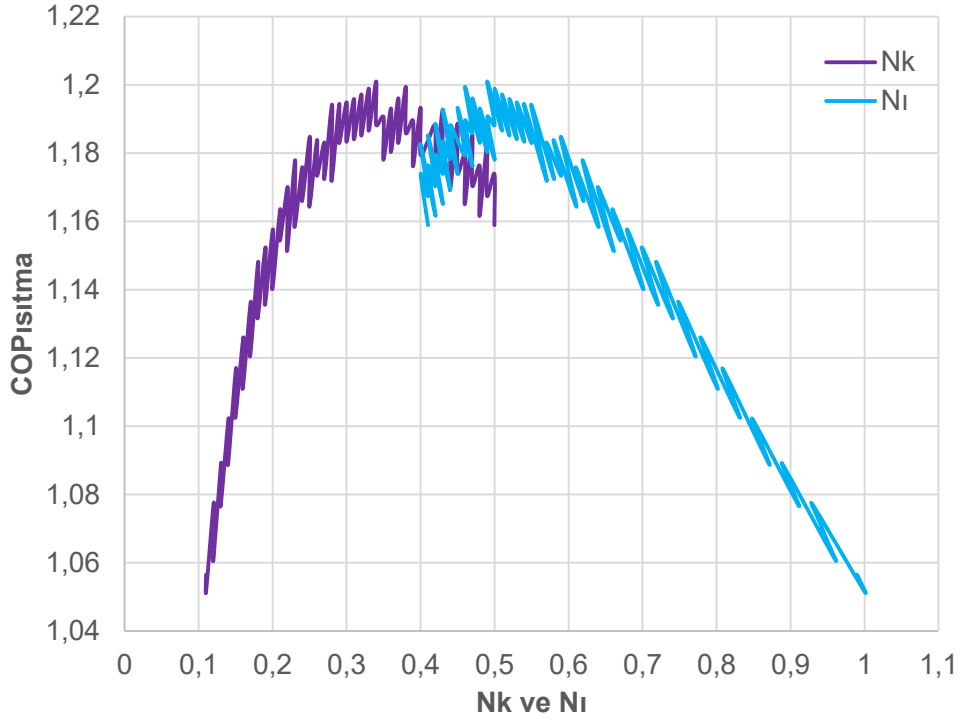
Yukarıda detaylı bir şekilde açıklandığı üzere; kuvözün ısıtma durumundaki ortalama ısı gücü (162,95 W), TE ısı pompası sisteminde kullanılan TES modül, TES modülün her iki tarafında bulunan kanatçıklı yüzeylerin geometrik uzunlukları ve fanların hacimsel debileri belirlenmiştir. Bu büyüklükler belirlendikten sonra, kuvözde kullanılan TE ısı pompası sisteminin sınırlı hacimdeki optimizasyonu için tez kapsamında, temeli Bölüm 4.3'deki matematiksel modellemeye dayanan bir MATLAB® yazılımı geliştirilmiştir (EK C). Geliştirilen bu yazılım kullanılarak, termoelektrikli kuvöz sisteminin maksimum ısıtma yüküne göre optimizasyonu yapılmıştır (Şekil 6.10 (a)). Problemin fiziği gereği, maksimum ısıtma yükünde maksimum $COP_{ısıtma}$ olamayabileceği için maksimum ısıtma gücü yakınlarında (± 5 alt ve üst değerleri arasında) maksimum $COP_{ısıtma}$ 'ya veren değer bulunarak, optimizasyon tamamlanmıştır (Şekil 6.10 (b)). Bu şekilde maksimum ısıtma yükü yakınlarında maksimum $COP_{ısıtma}$ sağlayan optimum parametreler, EK C'de geliştirilen MATLAB® yazılımı sayesinde belirlenmiştir (Tablo 6.5).

Yapılan optimizasyonun sonucu olarak, çevre sıcaklığı 25 °C ve kabin hava sıcaklığı 36 °C olduğu bir ortamda kuvöz sisteminin kararlı rejimini sürdürmek için gereken ısıtma gücünü (162 W), tek bir TEC1-127140 modülle sağlayabildiği açık bir şekilde Tablo 6.5'de görülmektedir. Ancak AMS Amenity XP rezistanslı kuvöz sisteminin belirtilen ortam şartlarında, kararlı rejime ulaşmadığı zaman diliminde, kabin havası sıcaklığı ayarlanan sabit 36 °C değerine çıkartılırken, kuvözün maksimum gücü olan 368 W elektrik enerjisini tüketmektedir (bkz. Şekil 6.4). Bu nedenle geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin, sisteme

girilen herhangi bir sıcaklığı sağlayabilmesi için en az 2 adet TEC1-127140 modülünün kullanılması gerektiği ortaya çıkmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 6.10: (a) Isıtma ve soğutma güçlerinin kanatçık kalınlığına göre değişimi (b) COP_{ısıtma} değerinin N_k ve N_i boyutsuz parametrelerine göre değişimi (Yeler ve Koseoglu 2020)

Tablo 6.5: TE ısı pompası sisteminin giriş parametreleri ve optimizasyon işlemi sonucundaki elde edilen optimum çıkış parametreleri (Yeler ve Koseoglu 2020)

Giriş parametreleri		Çıkış parametreleri		
Bebek kuvözünün parametreleri		Optimum TE ısı pompası sistemin parametreleri		
Kabin havası sıcaklığı (°C)	36		Sıcak ısı kuyusu	Soğuk ısı kuyusu
Çevre havası sıcaklığı (°C)	25	Ortalama hava hızı (m/s)	2,25	3,02
Sınırlı kuvöz hacmi ($W \times L \times b$) (cm)	10,4 x 13 x 2	Isı taşınım katsayısı (W/m ² .K)	21,14	34,6
Hacimsel debi (m ³ /s)	0,004692	Kanatçık yüksekliği (cm)	2	2
TEC1-127140 modülün maksimum parametreleri		Kanatçıklar arası boşluk (mm)	3,6	2,0
Sıcak yüzey sıcaklığı (°C)	50	Kanatçık kalınlığı (mm)	0,3	0,3
$\dot{Q}_{c,max}$ (W)	138	Isı gücü (W)	158,02	26,44
ΔT_{max} (°C)	75	Toplam ısı kuyusu yüzey alanı (m ²)	0,1518	0,2465
I_{max} (A)	16,34	Bütün kanatçıklı yüzey verimi (%)	91,3	86,27
V_{max} (V)	16,4	N_h	2,51	
R_{module} (Ω)	1,02	N_l	0,49	
n	127	N_k	0,34	
Pellet kesit alanı (mm ²)	2	$COP_{ısıtma}$	1,2	
Pellet uzunluğu (mm)	1	Termoçift sayısı (p&n)	110,4	
TEC1-127140 modülün efektif malzeme özellikleri		Elektriksel güç tüketimi (W)	131,57	
α^{**} (μV/K)	334,17	Modülün soğuk yüzey sıcaklığı (°C)	21,4	
ρ^{**} (Ω.cm)	1,014x10 ⁻³	Modülün sıcak yüzey sıcaklığı (°C)	89,9	
k^{**} (W/m.K)	4,513	Akım (A)	13,23	
Z^{**} (1/K)	2,44x10 ⁻³	Voltaj (V)	9,93	
Kanatçıklı yüzeylerin malzeme parametreleri				
Taban (base) kalınlığı (mm)	8			
Isı iletim katsayısı (W/m.K)	177			

Tablo 6.5’ de optimizasyon işleminin sonucunda elde edilen optimum parametrelerin bazılarında üretim kısıtlamaları ve uygulama kolaylığı bakımından, bazılarında ise eldeki sınırlı koşullardan dolayı küçük değişiklikler yapılmak durumunda kalınmıştır. TE ısı pompası sisteminin optimizasyonu sonucunda kanatçıklar arası boşluk; sıcak taraf kanatçıklı yüzeyde 3,6 mm, soğuk taraf kanatçıklı yüzeyde 2,0 mm ve kanatçık kalınlığı her iki kanatçıklı yüzey için 0,3 mm olarak elde edilmişti. Bu geometrik uzunluklara sahip bir ısı kuyusu, uygulamalarda yaygın olarak kullanılmadığı için ticari ısı kuyusu satan Türkiye’deki firmalarda bulunmamaktadır. İstenilen geometrik özelliklerde özel ısı kuyusu üretimi yaptırmak ise oldukça maliyetlidir. Bu nedenle tez kapsamındaki ısı kuyularının, hassas bir CNC freze ile talaş kaldırılarak üretilmesinin en uygun yol olacağı düşünülmüştür. Ancak CNC frezeyle, kanatçık kalınlığı (t) en küçük 1 mm ve kanatçıklar arası boşluk (z) en az 2 mm işlenebilmektedir. Bu yüzden her iki ısı kuyusunun standart olması ve üretim kolaylığı bakımından, $t= 1$ mm, $z= 2$ mm ve $b= 20$ mm olacak şekilde üretilmiştir. Ayrıca dikkat edilirse Tablo 6.5’deki optimizasyon 1 adet TEC1-127140 modülü için yapılmıştır. Ancak hesaplamalar sonucunda termoelektrikli kuvöz sisteminin istenilen ısıtmayı sağlayabilmesi için en az 2 adet TEC1-127140 modülü ile çalıştırılması gerektiği ortaya çıkmıştır. Termoelektrik kuvöz sisteminin 2 adet modülle çalışması dezavantaj gibi görünmesine rağmen aslında bu problem için bir avantajdır. Çünkü tek bir TES modülle sistem çalıştırıldığında oldukça yüksek akım (13,23 A) çekmektedir. Bu değer, modülün maksimum akım parametresine (16,34 A) oldukça yakındır ve bu yüksek akım, TES modülün çok kısa sürede yanmasına sebep olabilmektedir. Termoelektrikli kuvöz sistemi tarafından tüketilen toplam akım, iki tane TES modülü tarafından paylaşıldığında bu sorun ortadan kalkmaktadır. Bu sayede hem kararlı hem de kararsız çalışma periyodu durumunda geliştirilen sistem, daha sağlıklı ve daha verimli çalışır. Buna ilaveten TES modüllerinin sıcak yüzeyi, modül başına düşen akımın azalması nedeniyle daha az ısınarak istenen hedefe ulaşabilir. Ayrıca TES modüllerde yüksek akımla sistem çalıştırıldığında Joule ısı çok fazla artacağı için modülün verimini (COP) azalmaktadır. Bütün bahsedilen bu kısıtlamalar, tez kapsamında geliştirilen MATLAB® yazılımında optimizasyon algoritmasına eklenmiş ve termoelektrikli kuvöz sisteminin yeniden optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen değerler Tablo 6.6’da verilmiştir. Tablo 6.6’da, TE ısı pompası sisteminin 2 adet TES modülle çalıştırılmasının avantajları açık bir şekilde görülmektedir. Bir önceki optimizasyonda modülden geçen akım 13,23 A iken, yeni optimizasyon sonucu modül başına düşen akım 7,83 A olmuştur. Buna bağlı olarak sıcak

yüzeyin sıcaklığı düşmüş, COP verimi artmış ve Joule ısısı azaldığı için de Peltier ısısı daha fazla etkin hale gelmiştir. Bu yüzden soğuk taraftan çekilen ısı gücü de artmıştır.

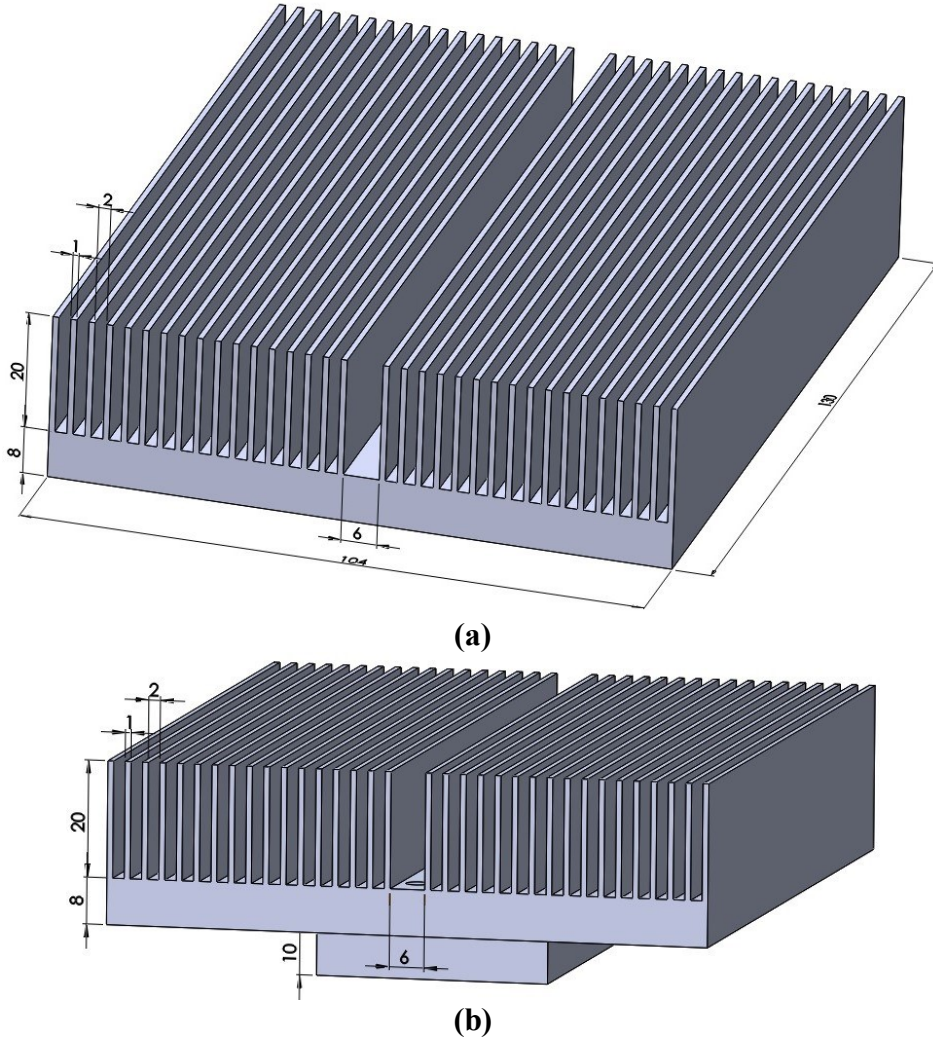
Tablo 6.6: 2 adet TEC1-127140 modüle sahip TE ısı pompası sisteminin optimizasyon sonucu elde edilen optimum çıkış parametreleri

	Sıcak ısı kuyusu	Soğuk ısı kuyusu
Ortalama hava hızı (m/s)	2,18	3,02
Isı taşınım katsayısı (W/m ² .K)	17,3	34,6
Kanatçık yüksekliği (cm)	2	2
Kanatçıklar arası boşluk (mm)	2	2
Kanatçık kalınlığı (mm)	1	1
Isı gücü (W)	160,64	59,34
Toplam ısı kuyusu yüzey alanı (m ²)	0,1907	0,1907
Bütün kanatçıklı yüzey verimi (%)	97,5	95,3
N_h		1,94
N_l		0,29
N_k		0,34
COP_{istma}		1,58
Termoçift sayısı (p&n)		242,42
Elektriksel güç tüketimi (W)		101,28
Modülün soğuk yüzey sıcaklığı (°C)		20,26
Modülün sıcak yüzey sıcaklığı (°C)		60,95
Akım (A)		15,66
Voltaj (V)		6,46

6.2.2 Optimum TE ısı pompası sisteminin üretimi ve tasarımı

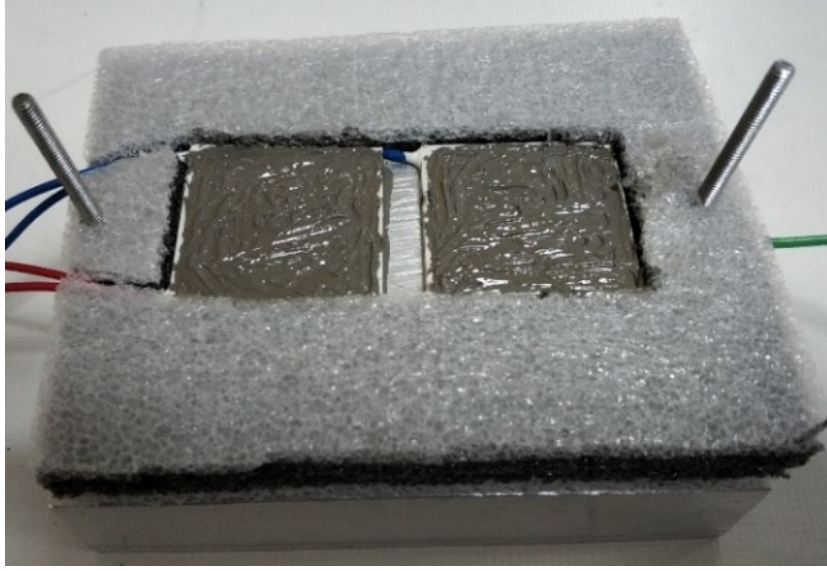
TE ısı pompası sisteminin ilk optimizasyonu sonucunda elde edilen kanatçıklar arası boşluk ve kanatçık kalınlıklarını üretmek maliyetli olduğu için MATLAB®'de yazılan optimizasyon algoritmasına ikinci optimizasyonda kullanılan kısıtlamalar eklenerek, ilk yapılan optimum konfigürasyonuna çok yakın ısı transfer performansına sahip ısı kuyuları üretilmiştir. Her iki ısı kuyusuna $t = 1$ mm, $z = 2$ mm ve $b = 20$ mm boyutlarında CNC freze tezgâhı kullanılarak üretilmiştir. Isı kuyusu malzemesi olarak, yüksek ısı iletkenliği ve talaş kaldırılarak işlenebilirliği iyi olan 6063 serisi alüminyum tercih edilmiştir. Kanatçık malzemesi alüminyum lama (kütük) olarak satın alınmış ve Denizli'de bulunan SG Kalıp Makine firmasında işlenerek, ısı kuyuları üretilmiştir (Şekil 6.11). Üretilen ısı kuyularından bir tanesine, hem TES modülleri rahat bir şekilde yerleştirebilmek için hem de soğuk ve sıcak

yüzeylerin birbirinden etkilenmesini önlemek için ek bir taban (10 mm) ilave edilmiştir (Şekil 6.11 (b)).



Şekil 6.11: Üretilen kanatçıklı yüzeyler (a) tabansız (b) tabanlı (Yeler ve Koseoglu 2020)

Termoelektrikli kuvöz sisteminin kanatçıklı yüzeylerinin arasına TES modüller yerleştirilerek, TE ısı pompası sistemi oluşturulmaya başlanmıştır. TES modüllerin yüzeylerinden atılan ve çekilen ısıların, kanatçıklı yüzeylere etkin bir şekilde iletilebilmesi için termal macun kullanılmıştır. İki katı yüzey arasında iletimle iyi bir ısı transferi sağlanması, ısı iletim katsayısı oldukça yüksek olan bir termal macunun yüzeylere uygulanmasıyla mümkündür. Bu yüzden termal macun olarak Arctic Silver 5 tercih edilmiştir. Termal macun hem TES modüllerin seramik yüzeylerine hem de kanatçıklı yüzeylerin tabanlarına (base) uygulandıktan sonra, iki yüzey arasındaki ısı transferini yalıtım için araya bir yalıtım malzemesi (EPDM sünger levha) yerleştirilmiştir (Şekil 6.12 (a)). Ardından TE ısı pompası sisteminin civata ve somunlar ile mekanik bağlantıları yapılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 6.12 (b)).



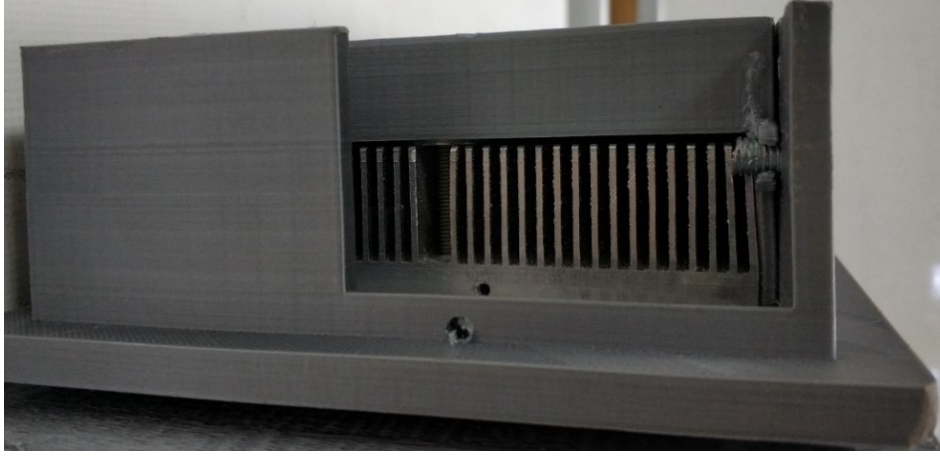
(a)



(b)

Şekil 6.12: Kanatçıklı yüzeylerle TES modüllerin birleştirilmesi (a) termal macun uygulaması (b) mekanik olarak sıkıştırılması (Yeler ve Koseoglu 2020)

TES modüller ve sistemler, aslında bir katı hal ısı pompası gibi, bir ortamdan çektiği ısıyı bir miktar iş harcayarak başka bir ortama atarak çalışırlar. Bu yüzden bu sistemlerin performanslarının belirlenmesi için her iki yüzeydeki sıcaklıkların bilinmesi gerekmektedir. Bunun için her iki kanatçıklı yüzeyin tabanlarına matkapla 2 mm çapında ve 15 mm derinliğinde ısıl çift yuvaları açılmıştır. TE ısı pompası sisteminin bütün montajı yapıldıktan sonra bu noktalara ısıl çiftler yerleştirilerek, TES modüllerin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları her bir deneyde anlık olarak kaydedilmiştir (Şekil 6.13).



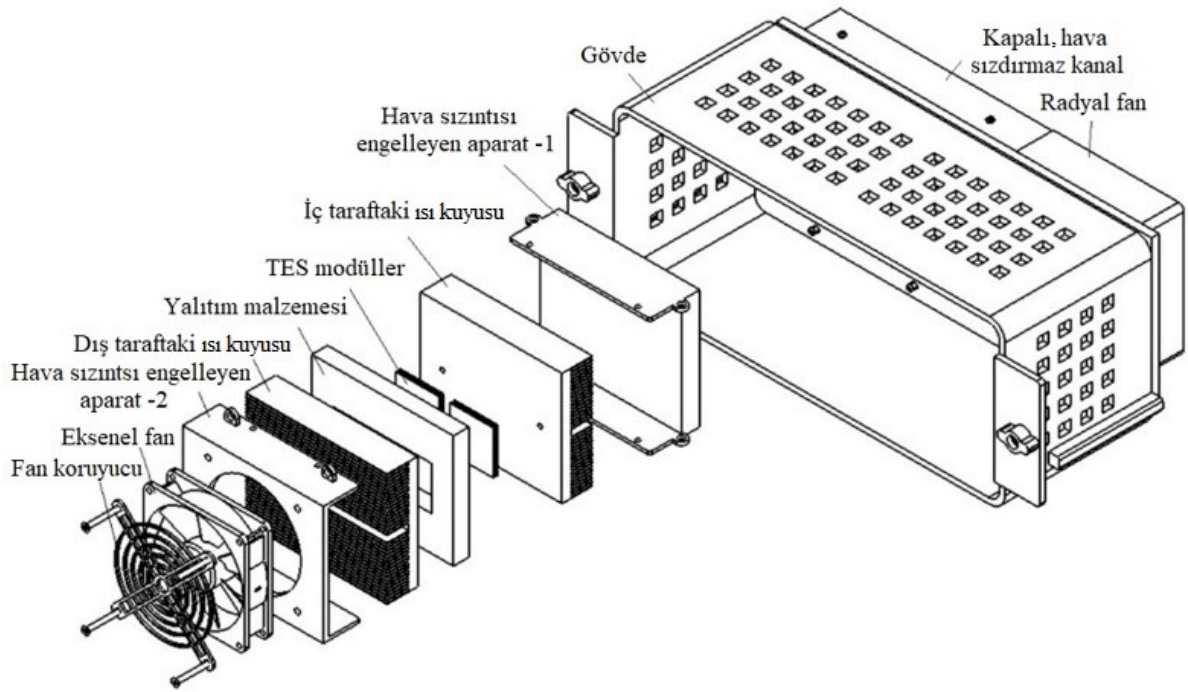
Şekil 6.13: Tabansız kanatçıklı yüzeye açılan ısı çift yuvası

TE ısı pompası sisteminin matematiksel modellenmesi sırasında, Nu sayısı için kullanılan eşitliğin geçerli olabilmesi için kanatçıklı yüzeylerin üzerinde herhangi bir hava sızıntısı olmaması gerektiği daha önce vurgulanmıştı (bkz. Şekil 4.13). Bu yüzden kanatçıklı yüzeylerin etrafından ve üst yüzeylerinden herhangi bir hava sızıntısı olmaması için alt ve üst gövde tasarlanmıştır. Tasarlanan gövdeler, Pamukkale Üniversite Makine Mühendisliği bölümünün altyapısında bulunan 3-D yazıcılar ile basılarak üretilmiştir. TE ısı pompası sisteminde kuvözün dış kısmında kullanılması için kanatçık geometrisine uygun olarak 92 x 92 x 25 mm boyutlarında 24 V ile çalışan bir DC eksenel fan seçilmiştir. Seçilen eksenel fanın devir sayısı PWM ile kontrol edilebilmektedir. Üretilen gövde, seçilen eksenel fan, TES modül ve kanatçıklı yüzeyleri içeren parçalar sisteme monte edilerek (radyal fan hariç) TE ısı pompası sistemi oluşturulmuştur (Şekil 6.14).

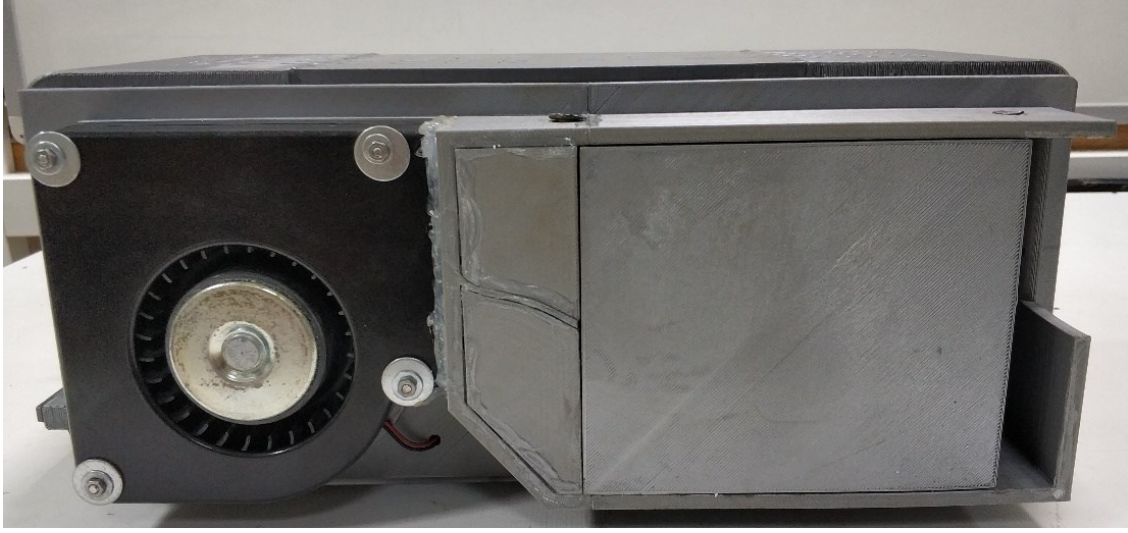


Şekil 6.14: Radyal fan hariç olarak oluşturulan TE ısı pompası sistemi

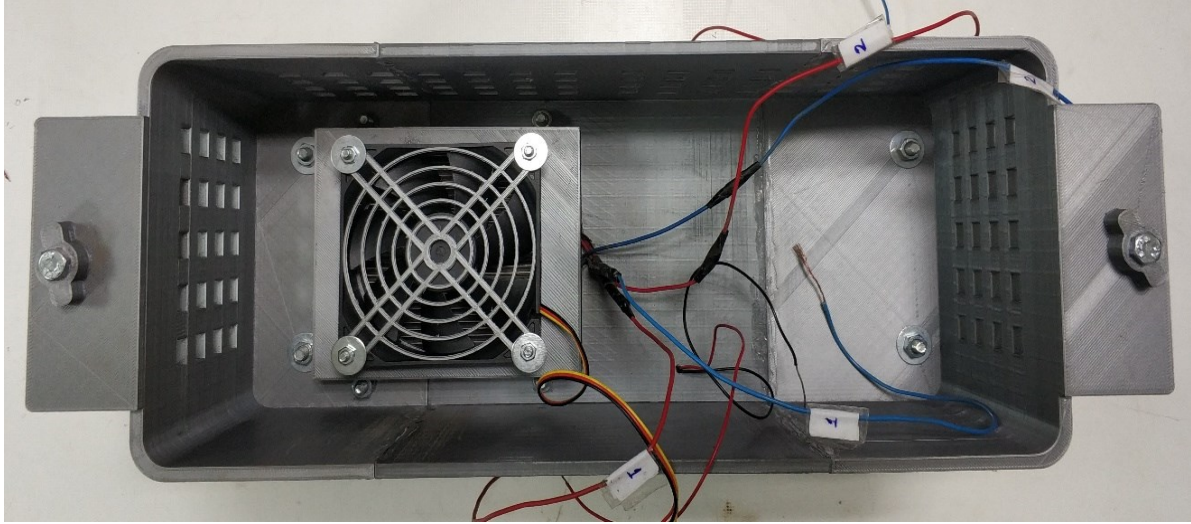
Tez çalışması kapsamındaki temel hedefe göre geliştirilen TE ısı pompası sistemi, rezistanslı kuvözün, rezistans elemanı ve otomatik kontrol ünitesinin çıkartılarak boşaltılan hacmine, modüler bir şekilde yerleştirilebilecek tarzda tasarlanmıştır. Bu yüzden TE ısı pompası sisteminin modüler şekilde gövde tasarımı yapılarak, 3-D yazıcı ile üretilmiştir (Şekil 6.15 (a)). Üretilen modüler gövdeye, radyal fan hariç olarak oluşturulan TE ısı pompası sistemi monte edilmiştir. Son olarak da taze havayı ve kabin ortamındaki havayı emerek kuvözün hava sirkülasyonunu sağlayan radyal fan, oluşturulan modüler yapıya yerleştirilmiştir. Radyal fan olarak sistemin hacimsel debisini ($0,004692 \text{ m}^3/\text{s}$) sağlayabilecek, $120 \times 120 \times 32 \text{ mm}$ boyutlarında 24 V ile çalışan ve devir sayısı PWM ile kontrol edilebilen bir radyal fan tercih edilmiştir. Radyal fanın basma ağzında herhangi bir hava sızıntısı olmaması için basma ağzının çevresine silikon çekilmiştir (Şekil 6.15 (b)). Bu şekilde radyal fan ile emilen karışım havası, hava sızıntısı olmayacak şekilde tasarlanan PLA (polilaktik asit) malzemeleri sayesinde, sadece TE ısı pompası sisteminin kanatçıklı yüzeylerine temas edebilmektedir. Böylece termoelektrikli kuvözün ısıtmasını ve soğutmasını sağlayacak optimum TE ısı pompası sistemi, modüler olarak tez kapsamında geliştirilmiştir (Şekil 6.15).



(a)



(b)

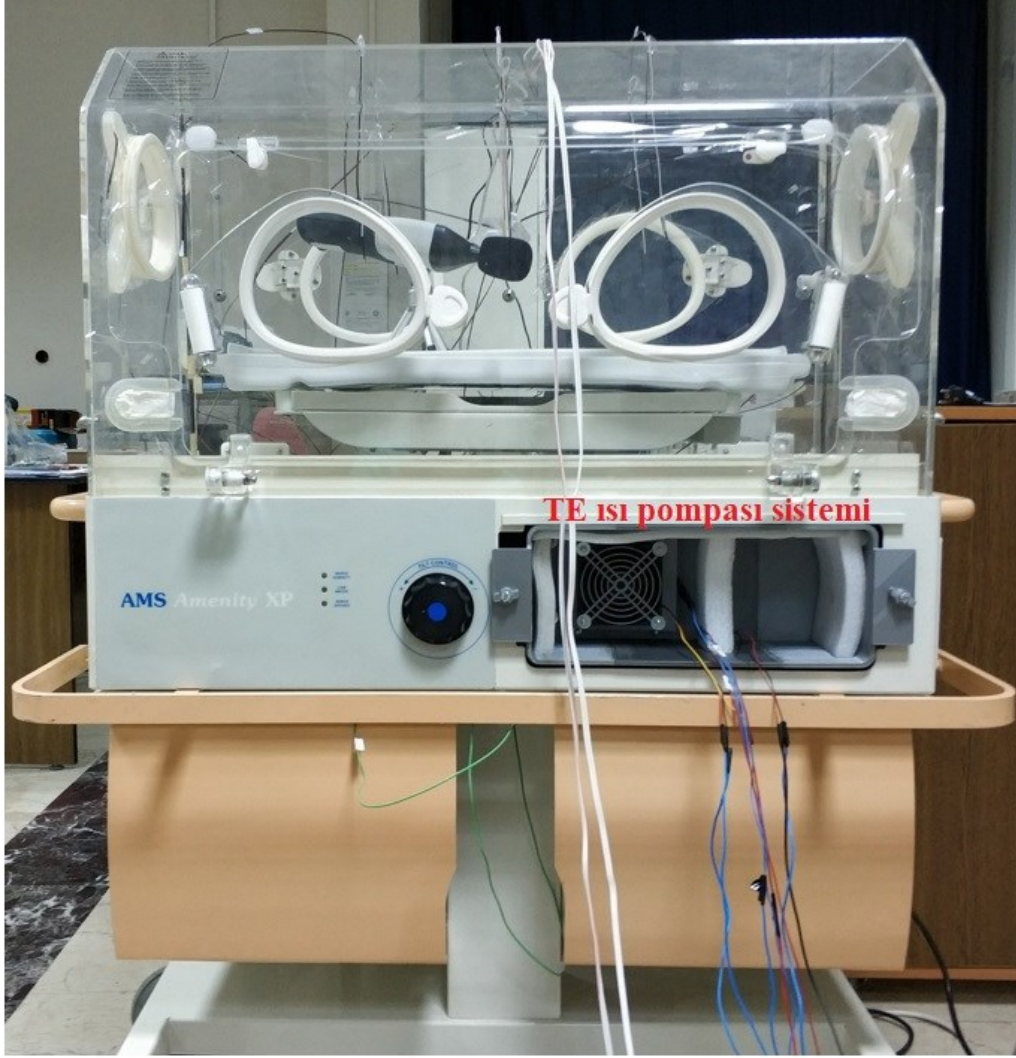


(c)

Şekil 6.15: Geliştirilen optimum TE ısı pompası sistemi (a) bütün alt parçaları (b) kuvöz içerisinde kalan radyal fan bölümü (c) kuvöz dış kısmına bakan eksenel fan bölümü (Yeler ve Koseoglu 2020)

6.2.3 Geliştirilen optimum TE ısı pompası sistemin otomatik kontrolü

Optimum TE ısı pompası sistemi modüler bir şekilde oluşturulduktan sonra AMS Amenity XP kuvözünde bulunan rezistans elemanı ve kontrol ünitesi sistemi çıkartılarak boşaltılan hacme, geliştirilen modüler TE ısı pompası sistemi entegre edilmiştir (Şekil 6.16).



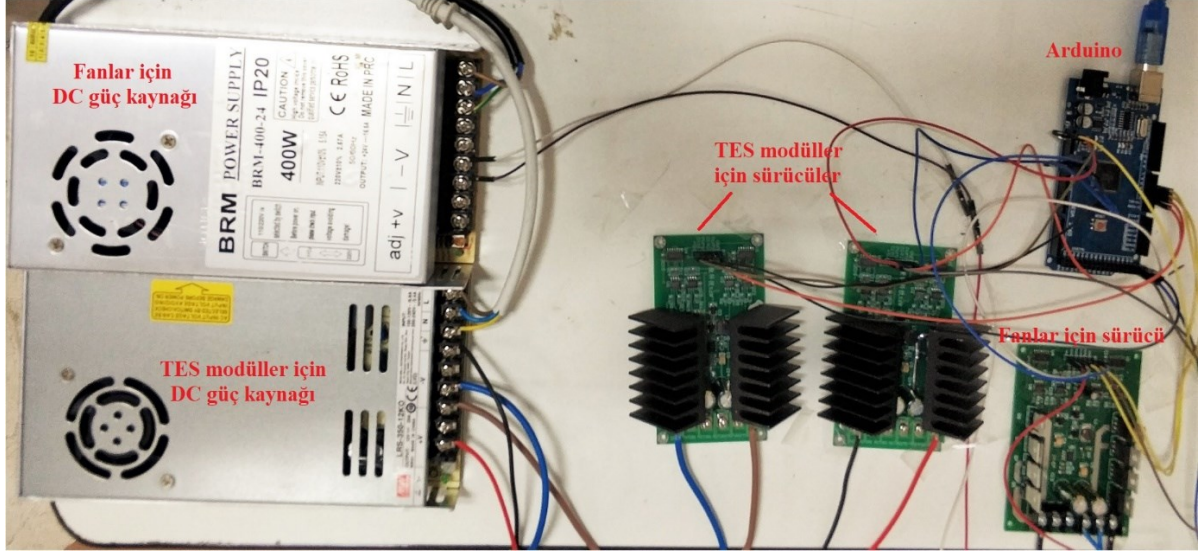
Şekil 6.16:Termoelektrikli kuvöz sistemi deney düzeneği

Geliştirilen TE ısı pompası sisteminde, rezistanslı kuvöz sistemindeki hacimsel debilerin sağlanabilmesi için fanların kontrol edilmesi ve aynı zamanda kuvözde hassas sıcaklık kontrolünün yapılabilmesi için TES modüllerinin güçlerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda termoelektrikli kuvöz sisteminin kontrol elemanı olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır (Şekil 6.17 (a)). TE ısı pompası sisteminde bulunan fanlar ve TES modüller, DC gerilimle çalışmaktadırlar. Sistemde, tercih edilen fanlar 24 V ve TES modüller 14 V ile çalıştığı için 2 ayrı DC güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle fanlar için 24 V BRM-400-24 DC güç kaynağı ve TES modüller için ise MeanWell LRS-35-12 DC güç kaynağı satın alınmıştır (Şekil 6.17 (a)). Özellikle, TES modüller çalışırken yüksek akım ve voltaj çekecekleri için DC güç kaynağının yüksek verimli (%85) ve anahtarlamalı güç kaynağı (Switch Mode Power Supply, SMPS) olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca bu tez çalışmasında kullanılan TES

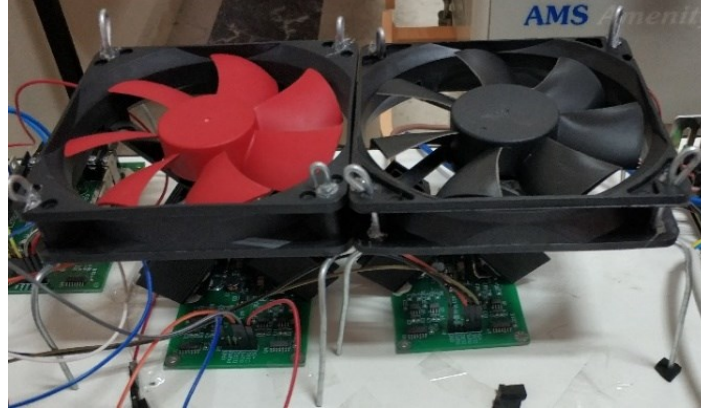
modüllerinin 14 V ile çalıştırılması planlandığı için MeanWell LRS-35-12 DC güç kaynağının çalışma voltajı, ayar vidası kullanılarak 14 V'a ayarlanmıştır.

Çalışmada, TE ısı pompasıyla çalışan termoelektrikli kuvöz sistemi, rezistanslı kuvöz sistem ile birebir karşılaştırıldığı için ilk olarak termoelektrikli kuvöz sisteminde hava sirkülasyonunu sağlayan radyal fanın hacimsel debisini $0,004692 \text{ m}^3/\text{s}$ olacak şekilde sağlayan PWM değerinin ayarlanması gerekmektedir. Diğer taraftan, TE ısı pompası sisteminin dış kısmında kalan aksel fanın hacimsel debisi ile ilgili bir kısıt bulunmamaktadır. Fakat bu çalışmada, aksel fanın devir sayısı da PWM ile kontrol edilmek istenmiştir. TE ısı pompası sisteminde kullanılan fanlar 24 V ile çalışmaktadır. Dolayısıyla kullanılan kontrol elemanının (Arduino) fanları kontrol edebilmesi için bir sürücüye (driver) ihtiyaç bulunmaktadır. Bu doğrultuda her iki fanı da aynı anda kontrol edebilen 5-35 V 15 A çift taraflı motor sürücüsü satın alınmıştır (Şekil 6.17 (a)).

Termoelektrikli kuvöz sisteminde, istenilen ısıtma ya da soğutma ihtiyacı TES modüllerle karşılanmaktadır. Geliştirilen TE ısı pompası sisteminde kullanıcının tercihine göre, TES modüllerin ısıtma veya soğutma modunda çalıştırılabilmesi için TES modüllere uygulanan voltajın yönünün değiştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanıcı tarafından ayarlanan sıcaklık değerine bağlı olarak kontrol elemanı, TES modüllerin gücünü kontrol ederek ilk önce ayarlanan sıcaklığı kabin içerisinde oluşturmalı ardından ise ayarlanan sıcaklıkta kuvözü kararlı rejimde tutmaya çalışmalıdır. Bunun için TES modüllerin akım yönünün değiştirilmesine (H köprüsü) olanak sağlayan, TES modüllerin çekeceği yüksek elektrik enerjisini (maksimum durumda 14 V ve 25 A) karşılayan ve kontrol elemanının TE ısı pompası sistemini kontrol etmesini sağlayan bir sürücüye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu doğrultuda 2 TES modülün kontrolünü aynı anda sağlayan 5-35 V 30 A çift taraflı motor sürücüsü satın alınmıştır (Şekil 6.17 (a)). Gerçekleştirilen ön deneylerde, TES modüllerin çektikleri yüksek akım ve voltajın satın alınan sürücü üzerinden geçmesinden kısa bir süre sonra 5-35 V 30 A çift taraflı motor sürücünün kayda değer bir şekilde ısındığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden 5-35 V 30 A çift taraflı motor sürücüdün 2 adet kullanılmış ve sürücülerin, her bir TES modül için ayrı ayrı bağlantıları yapılmıştır. Buna ilaveten, sürücülerin her hâlükârda ısınmasını engellemek için 2 adet 120 x 120 x 25 mm boyutlarındaki 12 V aksel fan, sürücüler üzerine bir düzenekle bağlanmıştır (Şekil 6.17 (b)).



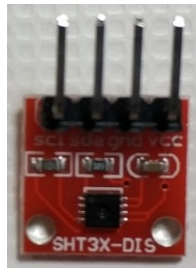
(a)



(b)

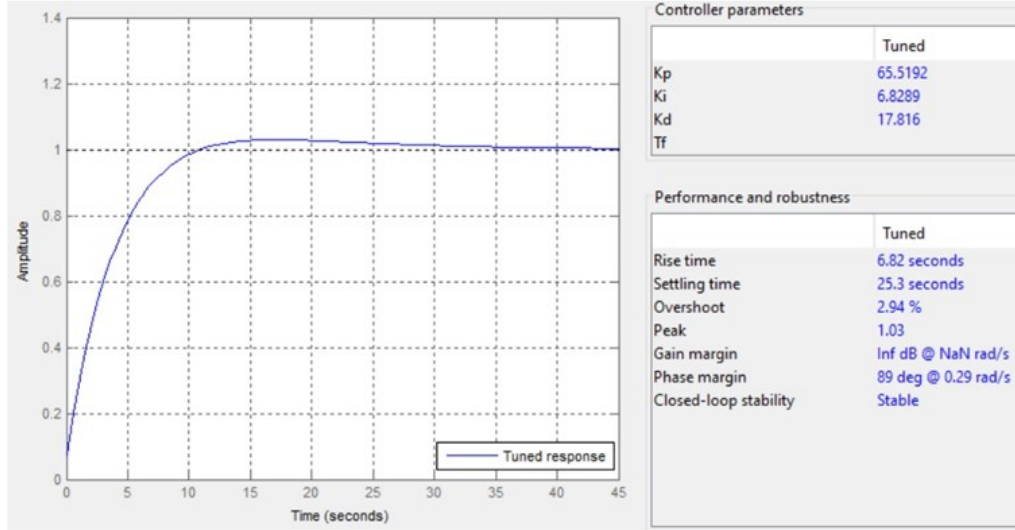
Şekil 6.17: (a) TE ısı pompası sisteminin kontrol ünitesi (b) 5-35 V 30 A çift taraflı motor sürücülerin ısınmasını engellemek için kurulan düzenek

TE ısı pompası sisteminin, kabin içerisindeki sıcaklığı Arduino ile kontrol edebilmesi için sıcaklığın bir sıcaklık sensörü ile ölçülerek, Arduino ile haberleşmesi gerekmektedir. Bunun için hassasiyeti yüksek ($\pm 0,3$ °C ve ± 1 RH) olan Sensirion SHT31 sıcaklık ve bağıl nem sensörü kullanılmıştır (Şekil 6.18). Sensirion SHT31 sıcaklık sensörü, EN 60601-2-19 kuvöz standardına (2011) göre kabinin merkez noktasına (M), yataktan 10 cm yukarıda olacak şekilde yerleştirilmiştir.

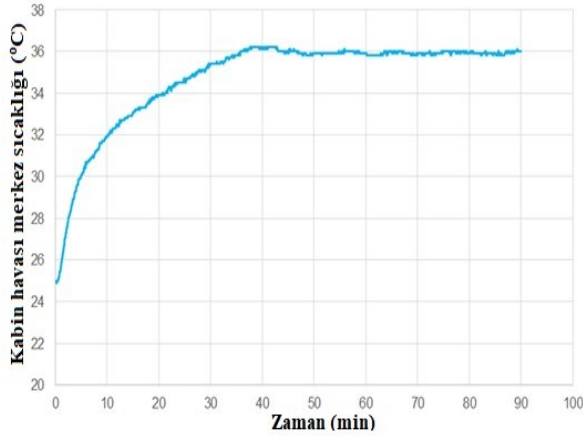


Şekil 6.18: Sensirion SHT31 sıcaklık ve bağıl nem sensörü

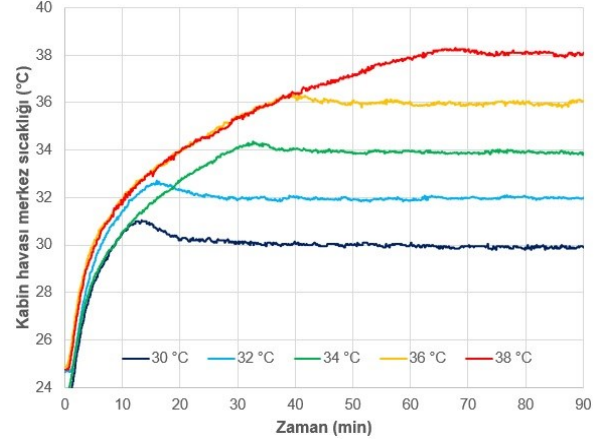
Optimum TE ısı pompası sistemiyle çalışan termoelektrikli kuvöz sisteminin, kullanıcı tarafından ayarlanan sıcaklığı algılayarak hızlı bir şekilde otomatik kontrolle sağlaması gerekmektedir. Kuvöz standartında, çevre sıcaklığının 21-26 °C olduğu bir ortamda, kabin içi hava sıcaklığının 36 °C'ye gelme süresinin 45 dakikadan küçük olması istenmektedir (EN 60601-2-19 2011). Bu yüzden tez kapsamında geliştirilen optimum TE ısı pompası sistemi, PID ile kontrol edilmiştir. PID kontrolörün, sistemin sıcaklığını hassas bir şekilde kontrol edebilmesi, hassas bir şekilde belirlenen PID katsayılarıyla (K_P , K_I ve K_D) mümkündür. PID katsayılarının belirlenmesinde birçok yöntem kullanmasına rağmen en hassas çözüm, sistemin transfer fonksiyonunun bulunması ile olmaktadır. Bu yüzden Bölüm 4.4'de detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere, MATLAB®/Simulink yazılımı kullanılarak geliştirilen kuvöz sistemi blok diyagramlarıyla matematiksel olarak modellenmiş ve AMS Amenity XP kuvözünün çevre sıcaklığının 25 °C ve kabin havasının ise 36 °C olduğu bir ortam için transfer fonksiyonları, her iki ölçüm modu için ayrı ayrı bulunmuştur (bkz. Bölüm 4.4.2.3). Bu tez çalışması, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin ön çalışması olduğu için ve aynı zamanda gerçek bir prematüre bebekle deney yapılmayacağı için TE ısı pompası sistemi, sadece hava sıcaklığı ölçüm modunda kullanılmıştır. Bu yüzden hava sıcaklığı ölçüm modunun transfer fonksiyonu, MATLAB® yazılımının PID Tuning arayüzünde çağrıldıktan sonra, sistemin performansı ve kararlılığı için yükselme ve yerleşme zamanlarının en kısa süre, sistemin ayarlanan referans (setpoint) değerini minimum seviyede aşması, sistemin herhangi bir duruma karşı vereceği tepkisinin olabildiğince hızlı ve sistemin geçici davranışının mümkün mertebe salınım yapmadan ayarlanan sıcaklığa geldiğinde hemen yakalaması kriterleri dikkate alınarak PID katsayıları belirlenmiştir. Bu kriterler ve kuvöz standardındaki 45 dakika parametresi dikkate alınarak, birim basamak girdi için TE ısı pompası sisteminin PID katsayıları $K_P= 65,5192$, $K_I= 6,8289$ ve $K_D= 17,816$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 6.19 (a)). Arduino yazılımı içerisindeki PID kütüphanesi kullanılarak, otomatik kontrol yazılımı oluşturulmuş ve bulunan PID katsayıları yazılımda tanımlanmıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminde, geliştirilen TE ısı pompası sisteminin kabin havası merkez sıcaklığını 36 °C'ye getirirken ki sistemin sıcaklık kontrolü ve davranışı deneysel olarak Şekil 6.19 (b)'de elde edilmiştir. Şekil 6.19 (a) ve (b)'de, MATLAB® PID Tuning yazılımında elde edilen kontrol davranışıyla, gerçek sistemin deneysel olarak elde edilen kontrol davranışının mükemmel bir şekilde örtüştüğü açık bir şekilde görülmektedir. Bu da kuvözün transfer fonksiyonunun doğruluğunu dolayısıyla kuvöz sisteminin matematiksel modellemesinin doğruluğunu ispatlamaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.19: (a) MATLAB® PID Tuning ile PID katsayılarının elde edilmesi (b) termoelektrikli kuvözde kabin havası merkez sıcaklığının 36 °C'ye getirilmesi esnasındaki PID kontrolü ve davranışı (c) termoelektrikli kuvözün diğer kabin havası merkez sıcaklıklarına getirilmesi esnasındaki PID kontrolleri ve davranışları

EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) çevre sıcaklığının 21-26 °C olduğu bir ortamda, kabin içi hava sıcaklığının 36 °C'ye gelme süresinin 45 dakikadan küçük olması istenmekteydi. Termoelektrikli kuvöz sisteminin standartta belirtilen bu şartı sağladığı Şekil 6.19 (b)'de açık bir şekilde görülmektedir. Kuvözün transfer fonksiyonu, kabin havası merkez sıcaklığı 36 °C durumuna göre elde edildiği için diğer kuvöz sıcaklıklarında (özellikle 30 °C ve 32 °C) aşım miktarı (overshoot) 36 °C'deki değere göre bir miktar daha fazla olmaktadır (Şekil 6.19 (c)). Ancak PID kontrol sistemi çok kısa bir sürede tepki vererek, istenilen her kuvöz sıcaklığında (30-38 °C) 0,05 °C sıcaklık hassasiyeti ile sistemi kontrol etmeyi başarabilmektedir (Şekil 6.20).

COM3		
Temperature = 32.01 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 102.40 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 109.16 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 110.22 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.46 PWM
Temperature = 32.01 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 102.41 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 113.08 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.47 PWM
Temperature = 32.01 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 102.41 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 113.09 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.48 PWM
Temperature = 31.97 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 113.51 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 101.13 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 106.36 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 106.36 PWM
Temperature = 31.97 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 113.54 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 105.07 PWM
Temperature = 31.97 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 110.73 PWM
Temperature = 31.97 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 108.37 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 105.13 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.61 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 110.38 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.62 PWM
Temperature = 31.98 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 110.39 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 103.64 PWM
Temperature = 32.01 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 102.58 PWM
Temperature = 32.00 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 109.34 PWM
Temperature = 32.01 C	Setpoint = 32.00 C	PID_output_value = 102.57 PWM
Temperature = 31.97 C	Setpoint =	

Otomatik Kaydırma Zaman damgasını göster Yeni Satır

Şekil 6.20: Kabin havası merkez sıcaklığı 32 °C iken termoelektrikli kuvöz sisteminin sıcaklık kontrolü hassasiyeti

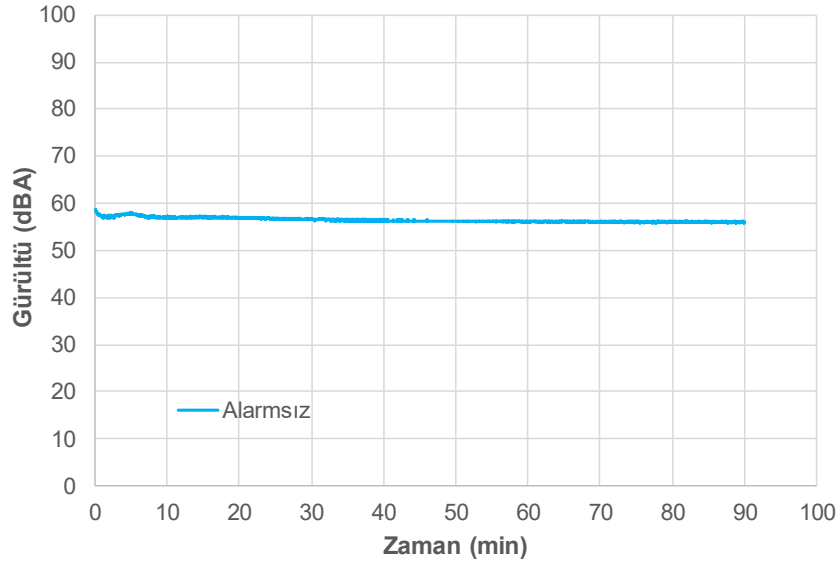
6.2.4 Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan kabin ortamını ısıtma deneyleri

Bu tez çalışması kapsamında, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi ile rezistanslı kuvöz sisteminin birebir karşılaştırılabilmesi için termoelektrik kuvöz sistemin hidrolik parametreleri (ortalama hava hızları, hacimsel debiler, vs.), rezistanslı kuvöz sistemindeki değerlerle aynı olmalıdır. Rezistanslı kuvöz sisteminde yapılan ölçümler sonucunda ortalama taze hava hızı 0,273 m/s, ortalama karışım havası hızı 1,81 m/s, kabin içerisindeki ortalama hava hızı 0,0929 m/s, taze havanın hacimsel debisi 0,001936 m³/s ve karışım havasının hacimsel debisi 0,004692 m³/s olarak belirlenmişti. Arduino kullanılarak termoelektrikli kuvöz sisteminde hava sirkülasyonunu sağlayan radyal fanın dönüş hızı, PWM ile ayarlanabilmektedir. Bu şekilde radyal fanın PWM değeri değiştirilerek rezistanslı kuvöz sistemindeki hidrolik parametreleri sağlayan PWM değeri, deneme yanılma yöntemiyle 240

olarak bulunmuştur. Termoelektrikli kuvöz sisteminin radyal fanı bu PWM değeriyle çalışırken, ortalama taze hava hızı 0,270 m/s, ortalama karışım havası hızı 1,78 m/s, kabin içerisindeki ortalama hava hızı 0,0925 m/s, taze havanın hacimsel debisi 0,001912 m³/s ve karışım havasının hacimsel debisi 0,004613 m³/s olarak ölçülmüştür. Bu şekilde her iki sistemin hidrolik parametreleri de yaklaşık olarak aynı değere getirilmiş ve böylelikle sistemlerin aynı hidrolik parametrelerde karşılaştırılması sağlanmıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminin diğer tarafında bulunan aksel fanı ise herhangi bir kısıtlama olmadığı için ve aynı zamanda geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminde ısıtma ve soğutma tek bir cihazla yapılabildiği için aksel fanın maksimum PWM değerinde (255) çalıştırılmasına karar verilmiştir.

Termoelektrikli kuvöz sisteminin hidrolik parametreleri, rezistanslı kuvöz sisteminin parametreleriyle aynı değere getirildikten sonra rezistanslı sistemde yapılan her bir deney termoelektrikli kuvöz sisteminde de yapılmıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminde de rezistanslı kuvöz sisteminde yapıldığı gibi, herhangi bir deney sırasında kararlı hale gelebildiği maksimum süre, en yüksek deney sıcaklığı olan 38 °C'ye göre belirlenmiştir. Kuvöz çevre sıcaklığının 25±0,5 °C olduğu bir ortamda, referans termometresine göre kabin havası 38 °C'ye ayarlanarak kuvöz sisteminin tam olarak kararlı hale geldiği süre, rezistanslı kuvöz sistemindeki gibi 90 dakika olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde bütün deney verilerinin doğru bir şekilde değerlendirilip karşılaştırılabilmesi için bütün deneylerde standart adımlar yapılmıştır. Bu yüzden rezistanslı kuvöz sistemindeki gibi, termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan bütün deneylerde kaydedilen veriler (sıcaklık, akım, voltaj ve aktif güç değerleri) 90'ar dakika boyunca kaydedilerek deneyler arasında standardizasyon sağlanmıştır.

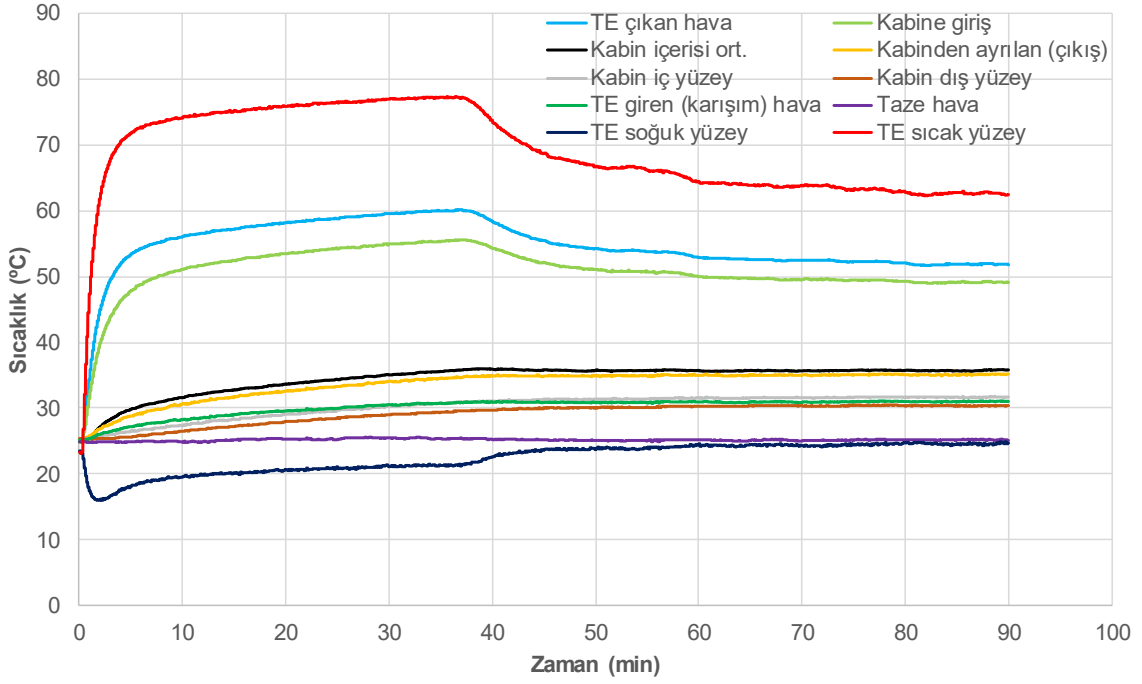
Bu tez kapsamında, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin ön araştırması yapıldığı için geliştirilen kuvöz sistemi akademik amaçlı kullanılmaktadır. Bu yüzden termoelektrikli kuvöz sistemine, kritik durumlarda sesli ve görsel uyarı veren düzenekler kurulmamıştır. Bunun için termoelektrikli kuvöz sisteminin gürültü seviyesi sadece alarmsız durumda ölçülmüştür ve 90 dakikadaki ortalama gürültü seviyesi 56,46 dBA olarak belirlenmiştir. Alarmsız gürültü seviyesinin zamana bağlı değişimi Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



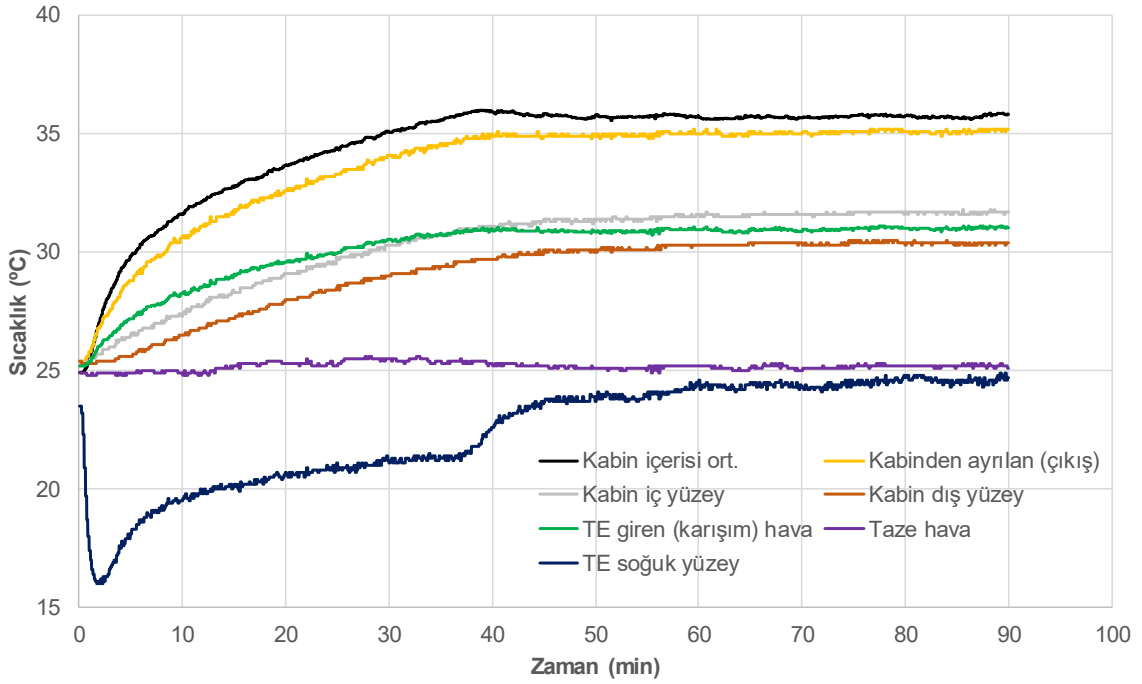
Şekil 6.21: Termoelektrikli kuvöz sisteminin gürültü seviyesinin zamana bağlı olarak değişimi

Rezistanslı kuvöz sisteminden farklı olarak termoelektrikli kuvöz sistemdeki TES modüller, DC gerilimle çalışmaktadır. Bu yüzden termoelektrikli kuvöz sisteminde bulunan TES modüllerin elektriksel verileri (akım, gerilim ve aktif güç), DC güç analizör cihazıyla anlık olarak kaydedilmiştir. Bu sayede TES modüllerin harcadığı elektrik enerjisi miktarları ile kuvöz sistemin toplam harcadığı elektriksel enerji miktarları ayrı ayrı kaydedilmiştir (Şekil 6.23). Ayrıca TES modüller, bir ısı pompası olarak çalıştığı için soğuk yüzeylerden çektiği ısıyı, bir miktar iş harcayarak sıcak tarafa atmaktadırlar. Bu şekilde termoelektrikli kuvöz sistemi, istenilen hedefe daha az miktarda iş harcayarak ulaşabilmektedir. Soğuk taraftan çekilen ısının miktarını belirlemek için gerekli olan malzeme özellikleri (α , ρ ve k), tez kapsamında tanımlanan efektif malzeme özellikleri (α^{**} , ρ^{**} ve k^{**}) kullanılarak elde edilmiştir. Soğuk taraftan çekilen ısıyı belirlemek için gerekli olan TES modüllerin soğuk ve sıcak yüzey sıcaklıkları (T_c ve T_h) ise TE ısı pompası sistemindeki kanatçıklı yüzeylerin tabanlarında bulunan yuvalara yerleştirilen 17 ve 18 nolu ısı çiftleri ile ölçülerek belirlenmiştir. Bu şekilde termoelektrikli sistemin soğuk tarafından çekilen ısı miktarı belirlenmiştir. Rezistanslı kuvöz sistemi deneylerinde yapıldığı gibi, tez kapsamında yapılan her bir deneyin bütün verilerini zamana bağlı olarak vermek hem gereksiz yer işgal edeceği hem de karmaşıklık oluşturacağı için termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan deneylerden sadece 25-36 °C deneyinde elde edilen bütün veriler zamana bağlı olarak grafiksel verilmiştir (Şekil 6.22 ve 6.23). Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan diğer deneylerin verileri, sistemin kararlılığı hali boyunca ölçülen elektriksel ve sıcaklık verilerinin ortalaması alınarak rezistanslı sistemdeki

gibi toplu olarak gösterilmiştir (Tablo 6.7). Rezistanslı sistemdekinden farklı olarak bu tabloya, TES modüllerinin harcadığı elektrik değerleri, TE ısı pompası sisteminin soğuk yüzeyinden çekilen ısı miktarları, TES modüllerin soğuk ve sıcak yüzey sıcaklıkları eklenmiştir.

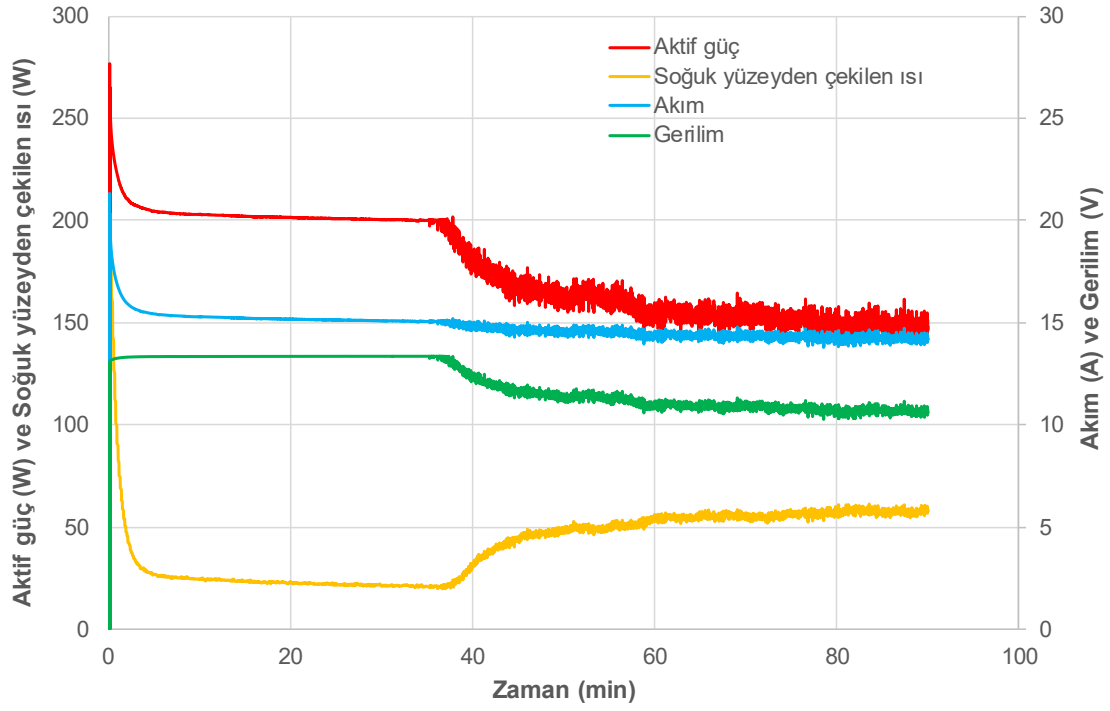


(a)

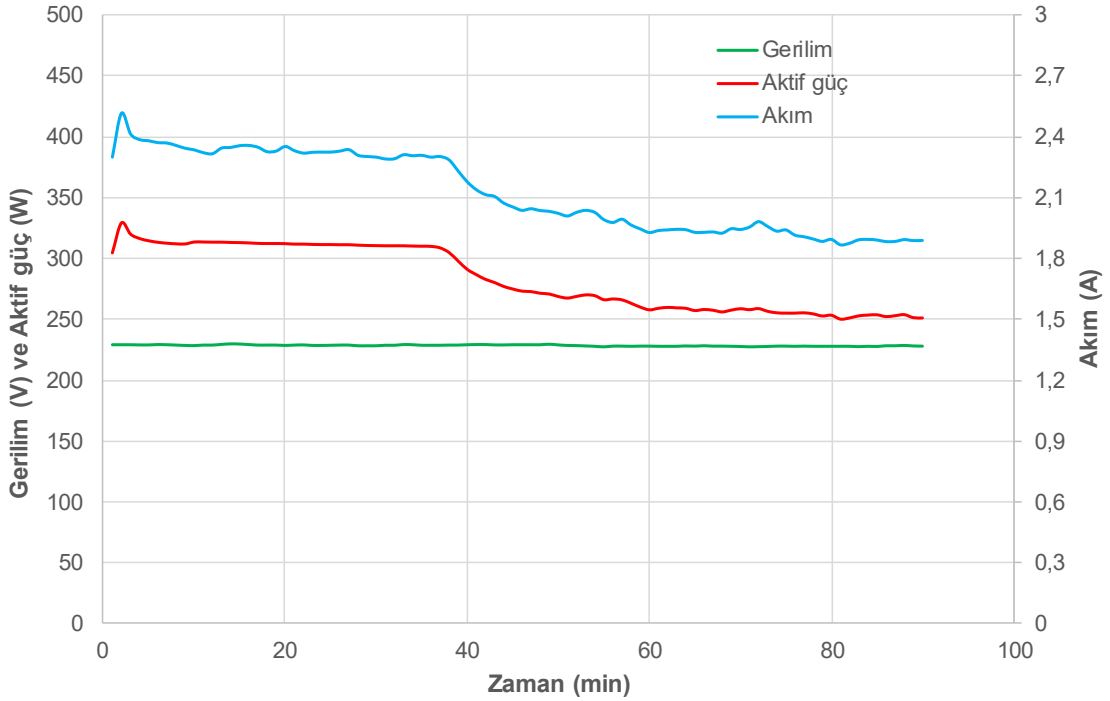


(b)

Şekil 6.22: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi



(a)



(b)

Şekil 6.23: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri (a) TES modüllerin elektriksel verileri ve soğuk yüzeylerden çekilen ısı miktarı (b) termoelektrikli kuvöz sisteminin elektriksel verileri

Tablo 6.7: Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki değerleri

			KARARLI HALDEKİ ELEKTRİKSEL VERİLER							KARARLI HALDEKİ SICAKLIK DEĞERLERİ (°C)									
Referans sıcaklık (°C)	Deney adı	Deney süresi (min)	Kararlı hale gelme süresi (min)	Soğuk yüzey çekilen ısı (W)	TE modüller akım (A)	TE modüller voltaj (V)	TE modüller aktif güç (W)	Toplam sistem akım (A)	Toplam sistem aktif güç (W)	Kabine giriş	Kabin içerisi ort.	Kabinden ayrılan (çıkış)	Kabin iç yüzey	Kabin dış yüzey	Taze hava	TE giren (karışım) hava	TE çıkan hava	TE soğuk yüzey	TE sıcak yüzey
30	25-30	90	18	80,2	12,1	7,8	92,6	1,497	185,04	37,4	29,8	29,53	28,29	27,81	24,6	27,49	38,66	24,11	44,38
	30-32	90	10	77,8	12,7	8,49	106	1,597	200,67	40,54	31,78	31,46	29,75	29,09	24,97	28,78	42,07	24,63	48,59
	30-34	90	16	69,9	13,6	9,6	128	1,78	227,12	44,66	33,65	33,2	31,08	30,15	25,23	29,91	46,75	24,73	55,36
	30-36	90	28	54,3	14,5	11	157	2,03	261,71	49,89	35,69	35,03	32,27	30,99	25,06	30,91	52,76	24,07	64,25
	30-38	90	42	37,1	14,9	12,2	179	2,206	286,87	54,54	37,6	36,74	33,52	31,95	25,28	32,01	58,17	23,3	72,05
	32-30	90	11	81,1	10,6	6,52	68	1,28	153,82	35,03	29,86	29,85	28,73	28,3	25,13	27,9	35,89	24,56	38,95
	34-30	90	15	79,6	10,1	6,12	60,9	1,22	144,41	34,29	29,78	29,74	28,77	28,36	25,22	27,94	35,04	24,51	37,36
	36-30	90	33	80,3	10,3	6,32	64,3	1,235	149,22	34,83	29,96	29,97	28,75	28,27	25,07	27,95	35,61	24,57	38,28
38-30	90	37	78,4	9,66	5,82	55,6	1,196	138,63	33,91	29,82	29,82	28,77	28,32	25,29	28,01	34,54	24,59	36,35	
32	25-32	90	19	75,3	12,8	8,7	109	1,517	204,29	41,5	31,98	31,62	29,85	29,09	25,12	28,94	43,22	25,07	50,44
	32-34	90	10	69,7	13,5	9,52	126	1,747	224,7	44,65	33,7	33,24	31,01	30,04	25,14	29,9	46,7	24,85	55,17
	32-36	90	21	56,9	14,3	10,8	151	1,963	254,75	49,48	35,79	35,16	32,37	31,08	25,16	31,03	52,27	24,52	63,18
	32-38	90	33	38,8	14,7	12,1	175	2,165	282,61	54,35	37,62	36,79	33,57	32,01	25,4	32,09	57,93	23,65	71,38
	34-32	90	11	79,4	11,9	7,72	90,1	1,456	180,72	39,14	31,78	31,61	29,96	29,27	25,35	29,03	40,44	25,05	45,38
	36-32	90	14	79,5	11,6	7,42	84,2	1,422	173,31	38,44	31,74	31,62	29,99	29,3	25,32	29,02	39,61	25,04	43,94
	38-32	90	18	79,5	11,3	7,19	80,3	1,39	167,89	38,06	31,78	31,69	30,04	29,34	25,35	29,07	39,15	25,07	43,01
34	25-34	90	32	61,2	14	10,3	142	1,888	244,46	46,9	33,94	33,32	31,01	29,96	24,99	29,88	49,48	24,18	59,87
	34-36	90	13	55,4	14,3	10,9	152	1,931	256,18	49,71	35,93	35,25	32,4	31,07	24,99	31,01	52,46	24,28	63,52
	34-38	90	26	38,4	14,8	12,1	176	2,14	282,37	54,29	37,99	37,06	33,6	31,95	25,06	32,11	57,63	23,36	71,04
	36-34	90	10	72	13,2	9,17	119	1,66	214,76	43,8	33,8	33,45	31,2	30,18	25,12	30,01	45,7	24,92	53,1
	38-34	90	14	74,3	12,9	8,77	111	1,573	205,54	43,04	33,94	33,56	31,23	30,19	25,3	30,15	44,66	25,21	51,37
36	25-36	90	40	52,3	14,4	11,1	157	1,962	261,78	50,3	35,73	35,02	32,24	30,99	25,16	30,95	53,27	24,18	65,07
	36-38	90	13	41,4	14,7	11,9	171	2,088	278,16	53,91	37,86	37	33,67	32,11	25,14	32,1	57,28	23,94	70,42
	38-36	90	10	63,4	13,9	10,1	137	1,8	237,84	47,73	35,84	35,28	32,58	31,3	25,28	31,15	50,11	25,18	59,52
38	25-38	90	70	35,7	14,7	12,2	177	2,11	285,24	54,9	37,86	36,97	33,66	32,13	25,37	32,18	58,68	23,53	72,59

6.2.4.1 Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneyler

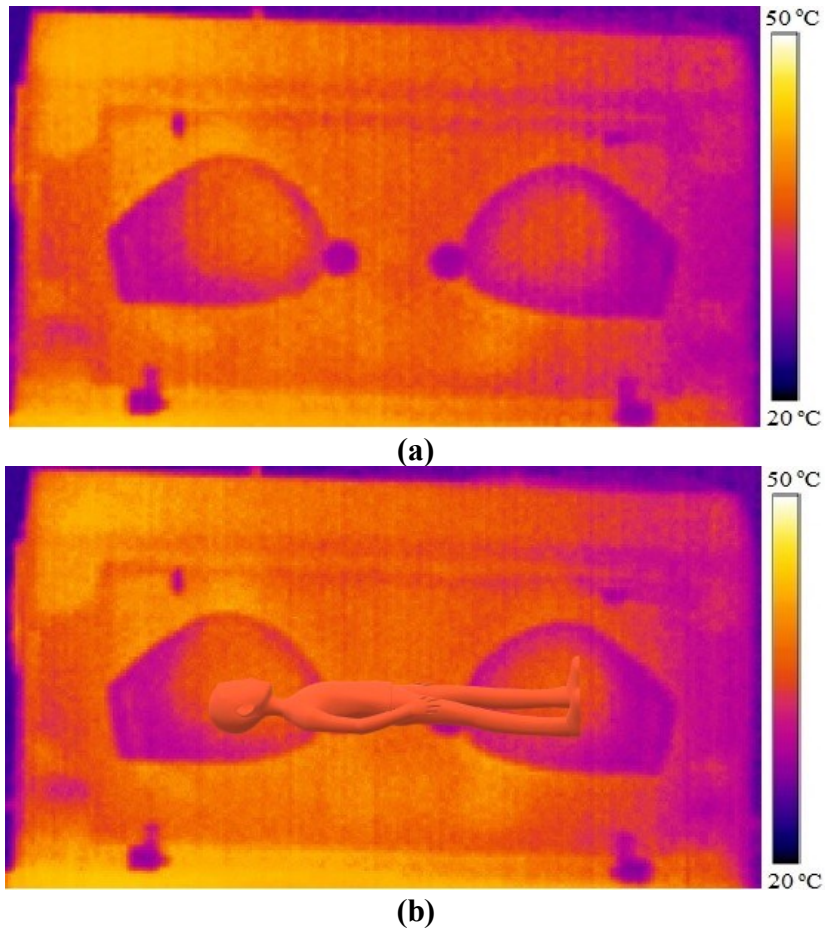
Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebekle yapılan deneylerde olduğu gibi, kararlı halde bulunan termoelektrikli kuvöz sistemine, bebeğin yerleştirilmesi sırasında ve sonrasında termoelektrikli kuvöz sisteminin kararlı durum davranışları, sistemin tepkisi ve yaşanan sıcaklık dalgalanması, gerçekleştirilen deneylerle incelenmiştir (Şekil 6.24). Rezistanslı kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan deneyler, termoelektrikli kuvöz sisteminde de aynı şartlarda ve aynı sıcaklıklarda yapılmıştır. Yine benzer şekilde sistemin kararlı haldeyken, bebeksiz durumdaki termal kamera görüntü alınmıştır (Şekil 6.25 (a)). Ardından model bebek kuvöz sistemine yerleştirilerek, sistemin 60 dakika içerisindeki bütün elektriksel ve sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Son olarak da 60 dakika sonunda yeniden kararlı hale gelen sisteme ait kabin ortamının, bebekli olarak termal kamera görüntüsü alınmıştır (Şekil 6.25 (b)).



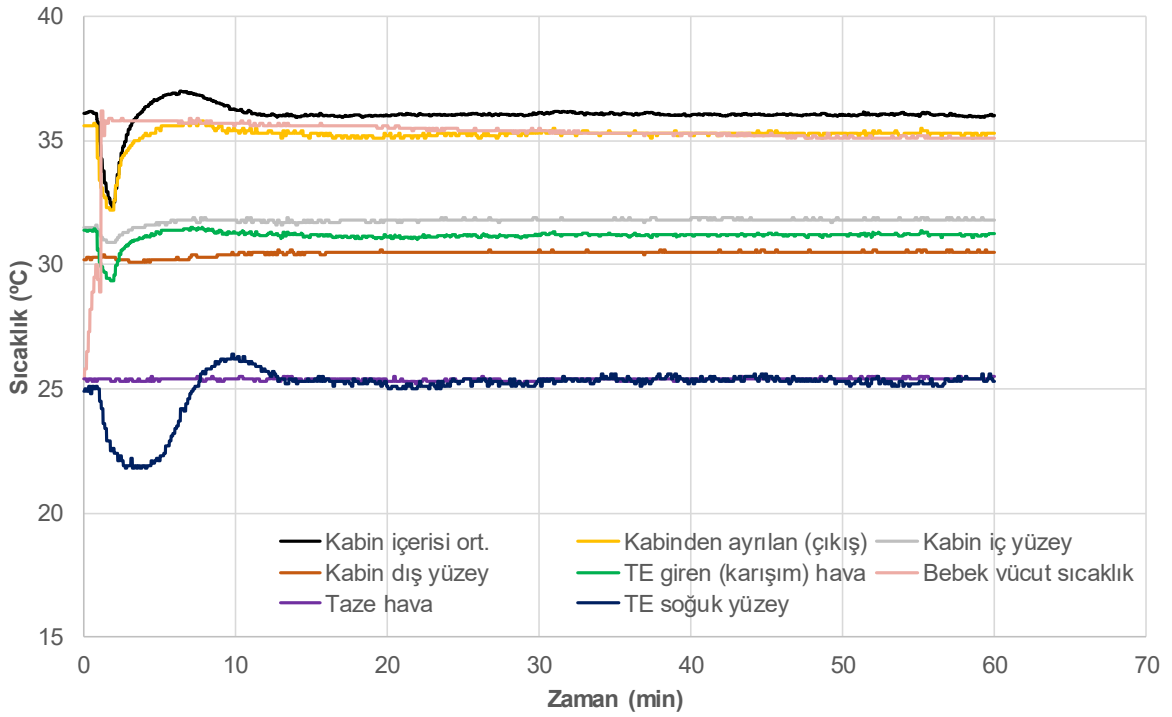
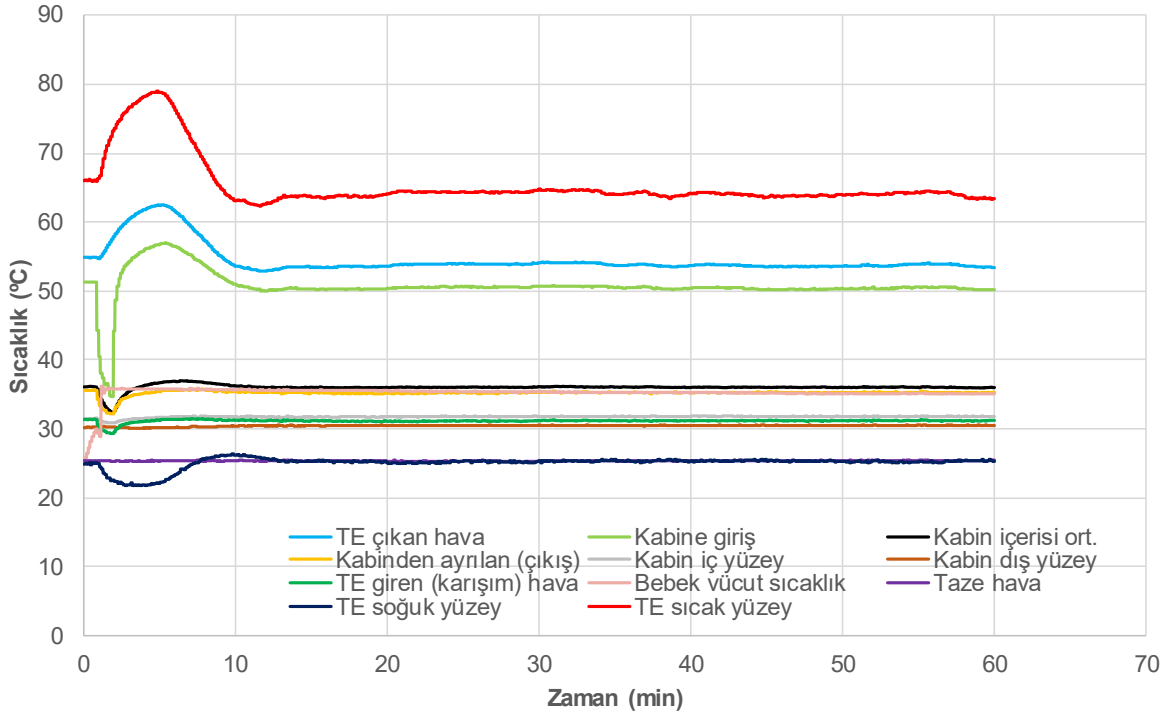
Şekil 6.24: Termoelektrikli kuvöz sisteminin model bebekli deney düzeneği

Tez kapsamında yapılan diğer deneylerde olduğu gibi, termoelektrikli kuvöz sisteminde de model bebekle yapılan bütün deneylerin sıcaklık ve elektriksel verilerinin zamana bağlı değişimlerinin verilmesinden ziyade, sadece 25-36 °C bebekli deneyinin bütün verilerinin

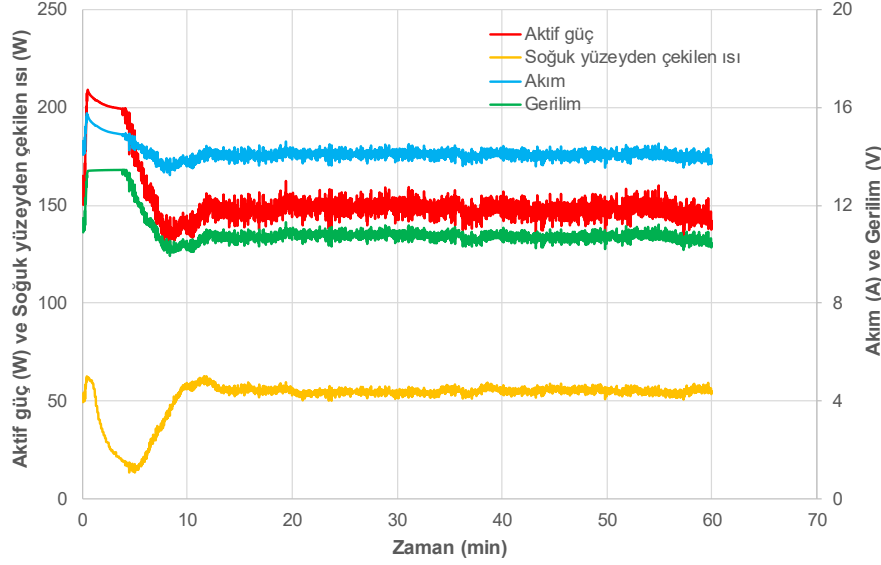
zamana bağılı değişimleri grafiksel olarak verilmiştir (Şekil 6.26 ve 6.27). Model bebekle yapılan diğer deneylerin verileri, sistemin kararlı rejim boyunca ölçülen verilerinin ortalaması alınarak Tablo 6.8’de toplu olarak gösterilmiştir. Rezistanslı kuvöz sistemindeki gibi model bebek, gerçek bir bebek olmadığı için ölçülen çekirdek ve cilt sıcaklıkları hemen hemen aynı değerleri ($T_{cs} \approx T_{\text{çs}} - 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$) göstermiştir. Bu yüzden Tablo 6.8’de sadece bebeğin çekirdek sıcaklığı verilmiştir. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminde bebesiz olarak yapılan deneylerde olduğu gibi, TES modüllerinin harcadığı elektriksel veriler ve modüllerin soğuk yüzeyinden çekilen ısı miktarları ile termoelektrikli kuvöz sisteminin harcadığı toplam elektriksel enerji miktarları ayrı ayrı ölçülerek Şekil 6.27 ve Tablo 6.8’de gösterilmiştir.



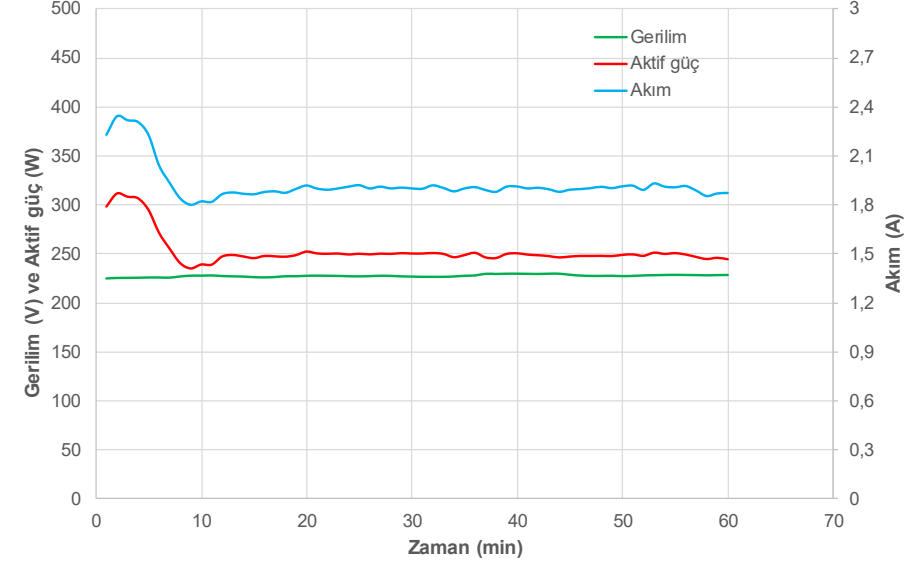
Şekil 6.25: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekli 25-36 °C deneyinin termal kamera görüntüleri (a) bebek yerleştirilmeden önce (b) bebek yerleştirildikten 60 dakika sonra



Şekil 6.26: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekle yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimleri (a) ölçülen bütün sıcaklıklar (b) ölçülen bazı sıcaklıkların büyütülerek değişimlerinin gözlenmesi



(a)



(b)

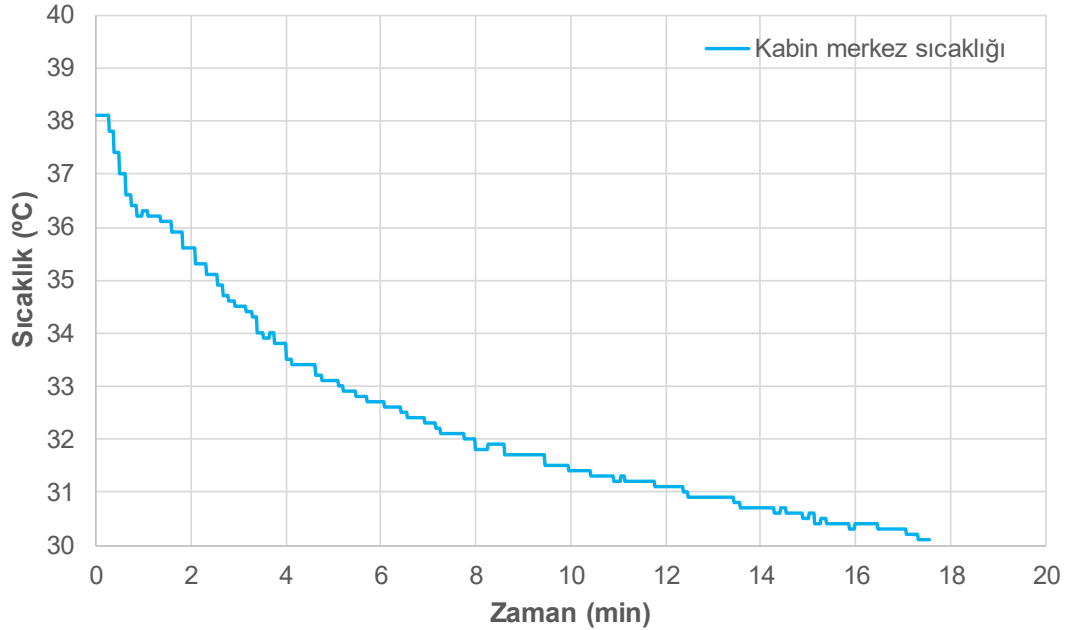
Şekil 6.27: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyinin zamana bağlı olarak elektriksel verilerinin değişimleri (a) TES modüllerin elektriksel verileri ve soğuk yüzden çekilen ısı miktarı (b) termoelektrikli kuvöz sisteminin elektriksel verileri

Tablo 6.8: Termoelektrikli kuvöz sisteminde model bebekle yapılan bütün deneylerin kararlı haldeki verileri

		KARARLI HALDEKİ ELEKTRİKSEL VERİLER							KARARLI HALDEKİ SICAKLIK DEĞERLERİ (°C)										
Deney adı	Deney süresi (min)	Kararlı hale gelme süresi (min)	Soğuk yüzey çekilen ısı (W)	TE modüller akım (A)	TE modüller voltaj (V)	TE modüller aktif güç (W)	Toplam sistem akım (A)	Toplam sistem aktif güç (W)	Kabine giriş	Kabin içerisi ort.	Kabinden ayrılan (çıkış)	Kabin iç yüzey	Kabin dış yüzey	Bebeğin çekirdek	Taze hava	TE giren (karışım) hava	TE çıkan hava	TE soğuk yüzey	TE sıcak yüzey
25-30	60	15	77,8	9,89	6,04	59	1,174	140,86	34,6	29,97	29,6	28,39	27,79	34,36	25	27,7	35,6	24,6	38,4
25-32	60	13	76,6	11,9	7,88	92,5	1,446	181,3	40,1	31,97	31,6	29,82	29	34,63	25,1	28,9	41,8	25,1	47,1
25-34	60	14	69,6	13,1	9,22	119	1,63	212,9	44,9	33,97	33,4	31,16	30,07	34,96	25,3	30,1	47,2	25,5	54,8
25-36	60	11	55,2	14,1	10,7	148	1,895	248,11	50,4	36,04	35,3	32,41	31,06	35,1	25,4	31,2	53,7	25,3	64
25-38	60	10	39,2	14,5	11,9	170	2,052	273,53	54,8	37,97	37	33,58	31,96	35,9	25,2	32,2	59,3	24,8	71,8

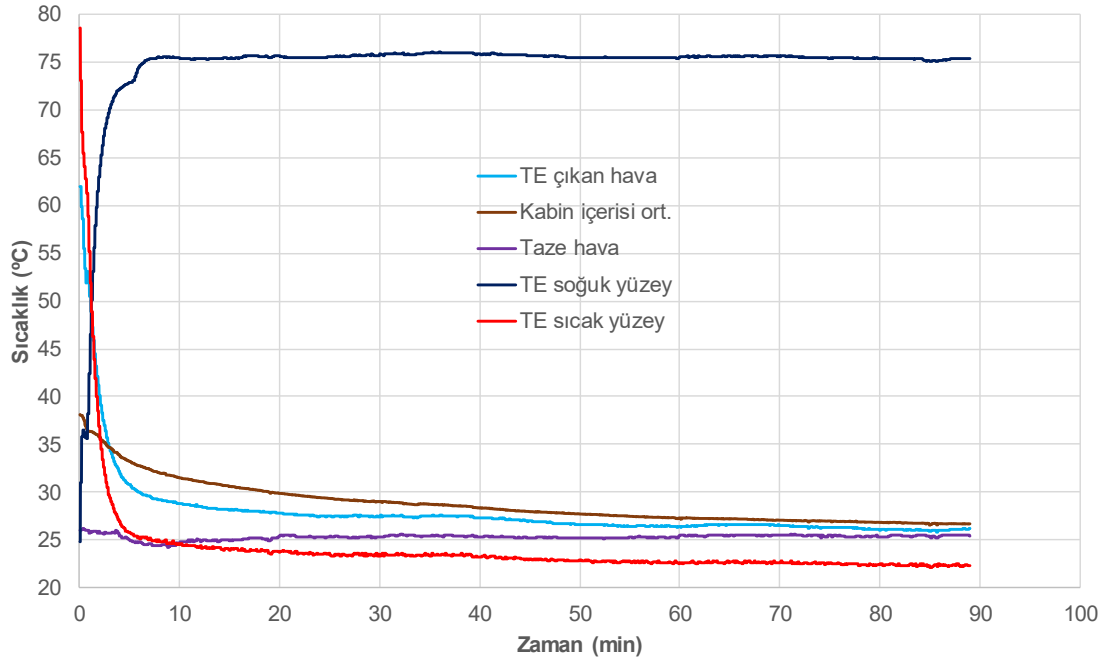
6.2.5 Termoelektrikli kuvöz sisteminde kabin ortamına ait soğutma deneyleri

TES modüller bir ısı pompası gibi çalıştığı için TES modüle bir DC akım uygulandığında, uygulanan akımın yönüne bağlı olarak modülün bir yüzeyinde ısı atımından dolayı ısıtma, diğer yüzeyinde ısı çekmeden dolayı soğutma işlemleri gerçekleştirebilmektedirler. Termoelektrikli kuvöz sisteminin en büyük avantajlarından biri, sadece TES modüllerin akım yönünün değiştirilmesiyle, çok hızlı bir şekilde ısınan ve soğuyan yüzeylerinin yer değiştirmesidir. Bu şekilde prematüre bebekler hiç rahatsız edilmeden, vücut sıcaklıkları düzenlemesine yardımcı olunabilmekte ve bebeğin yaşayabileceği herhangi bir sağlık problemine (hipertermi ya da hipotermi) karşı hemen müdahale edilebilme imkânı olabilmektedir. Bu doğrultuda termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma performansını araştırmak için çevre sıcaklığının $25\pm 0,5$ °C olduğu bir ortamda, kabin havası sıcaklığı 38 °C çıkartılmış ve sistem kararlı hale ulaşincaya kadar ısıtma modunda çalıştırılmıştır. Ardından termoelektrikli kuvöz sistemi soğutma moduna alınarak sistemin 38 °C'den 30 °C'ye kadar olan soğutma hızı belirlenmiştir (Şekil 6.28).



Şekil 6.28: Termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma modundaki soğutma performansı

Rezistanslı kuvöz sistemlerinin, çevre sıcaklığı 20-26 °C aralığında bulunan ortamlarda çalıştırılması gerekmektedir. Çünkü kuvöz standardında (EN 60601-2-19 2011) açık bir şekilde belirtildiği gibi, rezistanslı kuvözlerin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için kabin havası sıcaklığının çevre sıcaklığından en az 3 °C fazla olması gerekmektedir. Dolayısıyla çevre sıcaklığının çeşitli nedenlerden dolayı belirtilen sıcaklık aralığından yüksek olduğu ortamlarda, rezistanslı kuvöz sistemleri görevlerini yerine getiremezler. Bu noktada, çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda termoelektrikli kuvöz sistemleri soğutma moduna alınarak çalışabilmekte ve böylece kuvözden beklenen görevleri yerine getirebilmektedirler. Bu doğrultuda çevre sıcaklığının 25,5 °C olduğu bir ortamda kabin havası sıcaklığı 38 °C iken, termoelektrikli kuvöz sistemi soğutma moduna alınarak kabin havası sıcaklığı 20 °C'ye ayarlanmıştır. Bu şekilde hem termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma performansı hem de TES modüllerin soğuk ve sıcak yüzey sıcaklıklarının değişim hızı araştırılmıştır. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminin, kabin havası sıcaklığı, çevre sıcaklığının (25,5 °C) altına inmesi durumundaki davranışları incelenmiştir (Şekil 6.29).



Şekil 6.29: Termoelektrikli kuvöz sistemin sıcak ve soğuk taraftaki yüzeylerinin sıcaklık değişimleri ve çevre sıcaklığının altındaki bir ortamda soğutma performansı

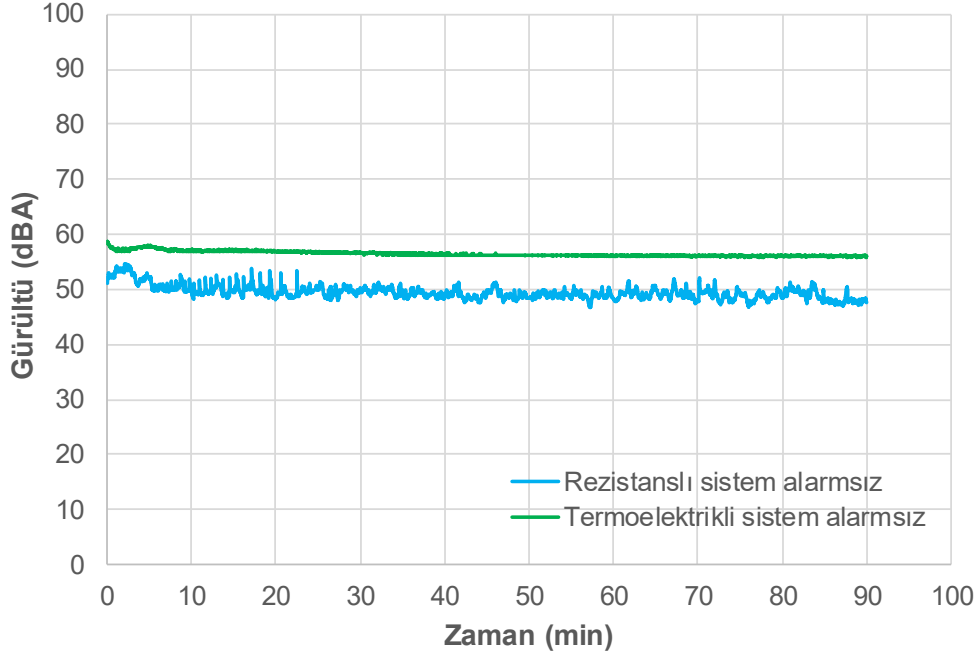
6.3 Kuvöz Sistemlerinin Karşılaştırılması

Tez çalışması kapsamında, rezistanslı ve termoelektrikli kuvöz sistemlerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilip karşılaştırılabilmesi için toplam 62 adet deney yapılmış ve her iki kuvöz sistemi geniş ölçekli ve kapsamlı bir şekilde araştırılmaya çalışılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, kuvöz sistemlerinin ısıtma ve soğutma performansları olarak iki ana başlık altında toplanmıştır. Tez kapsamında yapılan bütün deneylerin sonuçlarını tartışmak gereksiz yer işgal edeceği ve karmaşıklar oluşturacağı için kuvöz sistemlerinin ısıtma performansları tek bir deneyde (25-36 °C deneyi) detaylı bir şekilde grafiksel olarak karşılaştırılarak, tartışılmıştır. Kuvöz sistemlerinin soğutma performansları ise kabin havası sıcaklığının 38 °C'den 30 °C'ye düşürülmesi esnasındaki soğutma hızları karşılaştırılmıştır. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminin kabin havası sıcaklığı, çevre sıcaklığının altında bir değere ayarlandığında sistemin soğutma performansı analiz edilmiştir. Karşılaştırmalardan çıkan sonuçlar detaylı bir şekilde yorumlanarak, elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Ayrıca tez kapsamındaki araştırma konusuyla ilgili gelecekteki yapılması gereken çalışmalar hakkında tavsiye ve öneriler sunulmuştur.

6.3.1 Rezistanslı kuvöz sistemle termoelektrikli kuvöz sisteminin bebeksiz durumdaki ısıtma performanslarının karşılaştırılması

Prematüre bebekler için gürültü seviyesi çok önemlidir ve EN 60601-2-19 kuvöz standardında (2011) belirtildiği üzere; alarmsız durumda 60 dBA, alarmlı durumda ise 80 dBA altında olmak zorundadır. Bu yüzden rezistanslı kuvöz sistemi ile termoelektrikli kuvöz sisteminin gürültü seviyeleri 90 dakika boyunca ölçülerek karşılaştırılmıştır (Şekil 6.30). Rezistanslı kuvöz sisteminin alarmsız durumdaki gürültü seviyesinin ortalaması 49,49 dBA iken, termoelektrikli kuvöz sisteminin gürültü seviyesinin ortalaması 56,46 dBA olarak belirlenmiştir. Termoelektrikli kuvöz sisteminde, TES modüller çok sessiz olarak çalışmasına rağmen TE ısı pompası sisteminin her iki yüzeyinde bulunan fanlardan ve aynı zamanda modüler TE ısı pompası sistemi tam olarak ızalasyonlu kapalı bir hacme alınmadığından dolayı gürültü seviyesi, rezistanslı kuvöz sisteminden bir miktar fazladır. Bu gürültü seviyesi TE ısı pompası sisteminde iyi bir ses yalıtımı yapılarak ve daha kaliteli ve gürültüsüz

çalışan fanlar seçilerek azaltılabilir. Ancak bu durumda bile, her iki kuvöz sisteminin gürültü seviyesi, alarmsız durumda 60 dBA altında olduğu için EN 60601-2-19 kuvöz standardıyla (2011) uyumludur.



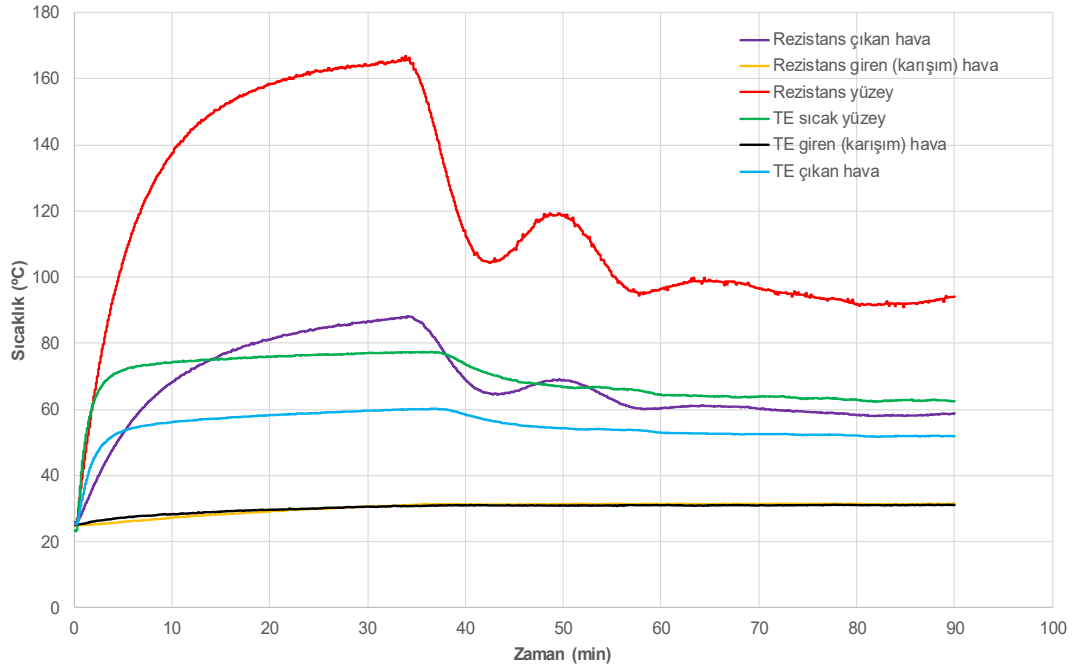
Şekil 6.30: Rezistanslı sistemle termoelektrikli sistemin alarmsız durumdaki gürültü seviyeleri

Rezistanslı kuvöz sistemi ile termoelektrikli kuvöz sisteminin kabini ısıtma davranışları incelendiğinde, ilk olarak ısıtma elemanlarının yüzey sıcaklıkları arasındaki fark göze çarpmaktadır (Şekil 6.31 (a)). Rezistanslı kuvöz sisteminin, ayarlanan sıcaklığı sağlayabilmek için yüzey sıcaklığı maksimum 164,9 °C'ye çıkarken, termoelektrikli sistem aynı hedefi yüzey sıcaklığı maksimum 76,9 °C sıcaklığa ulaşarak başarmıştır. Bu kadar yüksek fark olmasının sebebi; ısıtma elemanı olan rezistansın, enerjisini karışım havasına taşınım ile ısı transferi olarak aktaramamasıdır. Termoelektrikli kuvöz sisteminde yapılan kanatçık optimizasyonu ile hava, çok sayıda kanatçıklı yüzeye temas ederek geçerken (bkz. Şekil 6.12 ve 6.13), rezistanslı kuvöz sisteminde rezistansın üzerinde bulunan 4-5 kanatçıkla bu işi yapmaya çalışmaktadır (bkz. Şekil 5.10). Zaten, her iki sistemin ısıtma elemanlarının termal dirençlerine bakıldığında yukarıda açıklanan durumu destekledikleri görülmektedir. Elektrik rezistansının termal direnci 0,321 °C/W olarak hesaplanırken, TE ısı pompası sisteminin sıcak taraftaki ısı kuyusunun termal direnci 0,181 °C/W olarak belirlenmiştir.

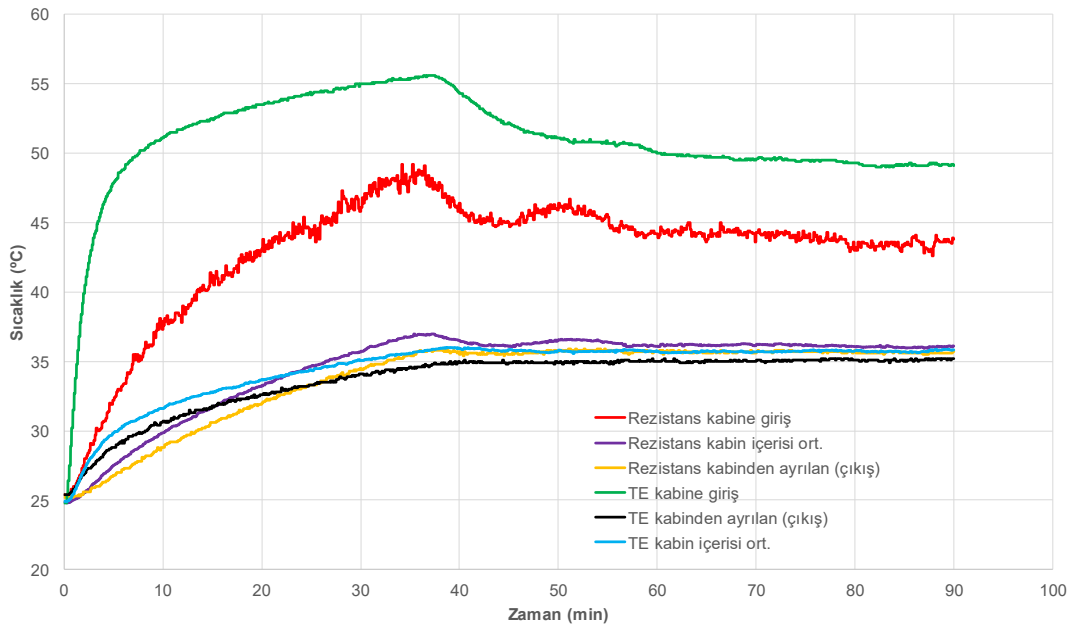
Kabin içerisindeki ortalama hava sıcaklıklarına bakıldığında, termoelektrikli kuvöz sistemi 40. dakika da kararlı rejime ulaşırken, rezistanslı kuvöz sistemi 57. dakika civarında kararlı rejime ulaşmaktadır (Şekil 6.31 (b)). Şekil 6.31 (b)'de asıl enterasan olan durum ise; rezistanslı kuvöz sisteminde hava, kabine daha düşük bir sıcaklıkta girerek istenilen hedefi gerçekleştirirken, termoelektrikli kuvöz sistemi aynı hedefi kabin içerisine daha yüksek sıcaklıkta hava girmesiyle sağlayabilmiştir. Rezistanslı kuvöz sisteminin daha düşük bir sıcaklıkta bunu başarabilmesinin sebebi, rezistans yüzey sıcaklığı çok yüksek sıcaklıklara çıktığında, gerçekleşen ışınila ısı transferi değeri de önemli derecede artmaktadır. AMS Amenity XP kuvözünün alt aksamlarındaki parçalarının çoğu metal olduğu için de kuvözün alt parçaları ışınila ısınmaktadır. Bu sayede rezistanslı sistem, kabin ortamına daha düşük bir sıcaklıkta giren havayla hedefi sağlayabilmektedir. Aynı durum termoelektrikli kuvöz sistemi için geçerli değildir. Çünkü termoelektrikli kuvöz sisteminde ısıtmayı sağlayan TES modüller, rezistans gibi çok yüksek sıcaklıklara çıkamadığı için ışınila ısı transferi daha az olmaktadır. Ayrıca TE ısı pompasının tasarımı gereği herhangi bir hava sızıntısı olmaması için sıcak hava akışı kapalı bir kanal içerisinden sağlanmaktadır (bkz. Şekil 6.15 (b)). Sıcak hava akışını sağlayan kapalı kanalın (gövde) malzemesi PLA olduğu için ve PLA malzemesinin ısı iletim katsayısı metale göre çok düşük olduğu için içerisinden geçen sıcak havanın sıcaklığı korunmaktadır. Bu yüzden termoelektrikli kuvöz sisteminde kabine giren hava sıcaklığı daha yüksek olmaktadır. Bu şekilde her iki kuvöz sistemi de aynı hedefi farklı yollarla sağlamaktadırlar.

Bütün bunlara ek olarak, 25-36 °C deneyinde termoelektrikli kuvöz sistemi ayarlanan sıcaklığı 0,05 °C hassasiyetle sağlarken, rezistanslı kuvöz sisteminin 0,1 °C hassasiyetle sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca rezistanslı kuvöz sistemi ayarlanan sıcaklığı kabin içerisinde oluştururken, kabin içerisindeki ortalama merkez sıcaklığında maksimum 0,8 °C sıcaklık dalgalanması olduğu görülmüştür. Aynı durumun termoelektrik kuvöz sisteminde maksimum 0,3 °C olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 6.31 (a)). Dolayısıyla termoelektrikli kuvöz sistemi, Tablo 2.1'de bebeğin ağırlığına ve gestasyonel yaşına bağlı olarak verilen nötral ortam sıcaklıklarını daha yüksek hassasiyetle ve daha az sıcaklık dalgalanmasıyla oluşturmuştur. Rezistanslı kuvöz sisteminde, kuvözü ısıtmak için rezistans çok yüksek yüzey sıcaklıklarına çıktığı için kabin içerisnde yüksek sıcaklık dalgalanmasına ve hassasiyette daha fazla kaybın yaşanmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda rezistanstaki bu yüksek yüzey

sıcaklığı, kuvözde herhangi bir sorun olması durumunda, çevrede bulunan nesnelere, cihazlar ve hatta içerisindeki prematüre bebek için bir tehdit oluşturabilmektedir. Kısaca geliştirilen TE ısı pompası sisteminin ısıtma performansı ve sıcaklık hassasiyeti, rezistanslı kuvöz sisteminden üstündür.



(a)



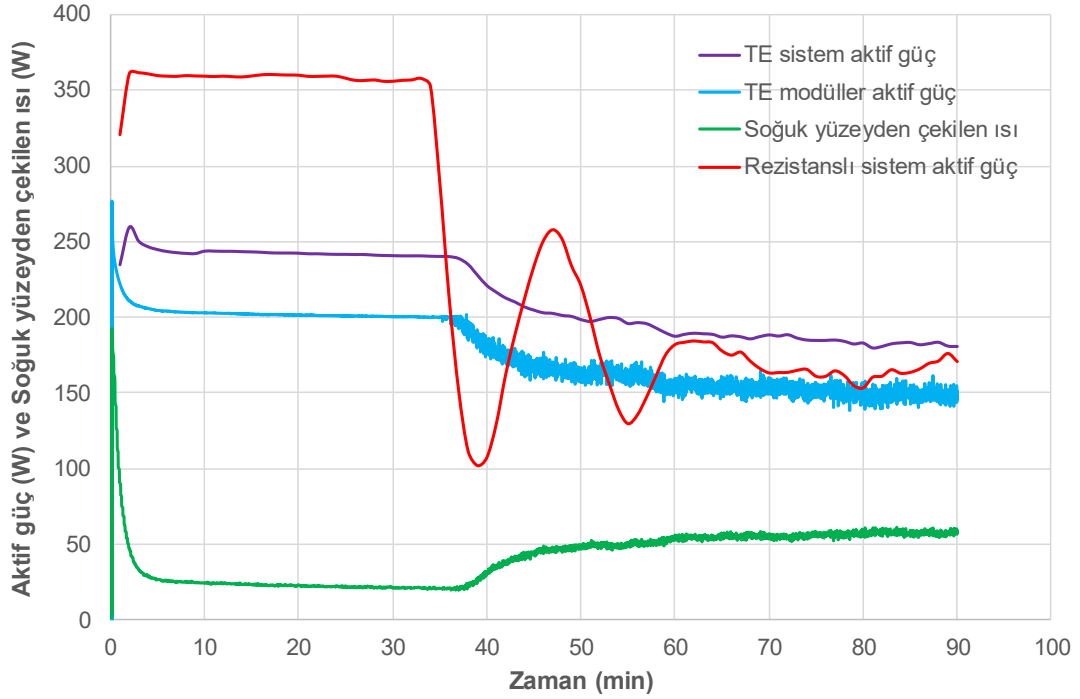
(b)

Şekil 6.31: 36 °C kabin havası sıcaklığında her iki kuvöz sisteminin (a) ısıtma elemanlarının yüzey sıcaklığı ve ısıtma elemanlarına giren-çıkan havaların zamana bağlı sıcaklık değişimleri (b) kabin ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimleri

Aynı şartlarda bulunan her iki kuvöz sisteminin istenilen hedefe ulaşmak için harcadıkları güçlerine bakıldığında, kayda değer farklar görülmektedir. Rezistanslı kuvöz sistemi kabin hava sıcaklığını 36 °C’de tutabilmek için deney süresi boyunca toplam 1315,3 kJ elektriksel enerji harcamıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminde, TES modüllerin harcadığı elektriksel gücü ölçen DC güç analizörü 59 W ve sürücülerin soğumasını sağlayan fanlar ise 11 W olmak üzere toplamda 70 W elektriksel güç harcamaktadır. Gerçek bir uygulamada kullanılan termoelektrikli kuvöz sisteminde, DC güç analizörü olmayacağı ve aynı zamanda daha iyi bir sürücü tasarımıyla sürücülere ekstra soğutma ihtiyacı gerekmeyeceği için kuvöz sisteminin harcadığı toplam elektriksel güç miktarından bu değer (70 W) çıkartılarak, Şekil 6.32’de gösterilen veriler elde edilmiştir. Bu durumda, termoelektrikli kuvöz sisteminin deney süresi boyunca toplam harcadığı elektriksel enerji 1153,3 kJ olarak belirlenirken, TES modüllerin harcadığı elektriksel enerji ise 953,85 kJ olarak ölçülmüştür. Bu arada oluşan elektriksel enerji farkı, AC gerilimi DC gerilime çevirirken oluşan kayıplardan oluşmaktadır. Bu dönüşüm kaybının azaltılması için tez kapsamında olabildiğince yüksek verimli (%85) MeanWell LRS-350-12 DC güç kaynağı kullanılmıştır. TES modüller bir ısı pompası gibi çalıştığı için deney süresi boyunca, çevre ortamından soğuk yüzey aracılığıyla toplam **221,8 kJ enerji kazanılmıştır**. Sonuç olarak, deney süresi boyunca termoelektrikli kuvöz sisteminin rezistanslı olandan 162 kJ daha az elektrik enerjisi tükettiği görülmektedir. Eğer termoelektrikli kuvöz sistemi, transport kuvözlerde olduğu gibi, doğrudan DC akımla çalıştırıldığında ise bu sefer dönüşüm kaybı olmadığı ve sadece TES modüller enerji harcayacağı için termoelektrikli kuvöz sistemi 361,45 kJ daha az elektriksel enerji harcayacaktır.

Şekil 6.31 ve 6.32’de görüldüğü gibi, her iki kuvöz sistemide belli bir zaman sonra kararlı hale ulaşmakta ve kararlı hale ulaştıktan sonra, sistemlere bozucu bir etki yapılmadığı sürece sabit bir elektrik enerjisiyle sürekli olarak çalışmaktadırlar. Kuvöz sistemlerinin sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesi için kararlı rejimdeki elektriksel enerji değerleride karşılaştırılmıştır. Rezistanslı kuvöz sistemi yaklaşık olarak 57. dakikadan sonra kararlı hale ulaşmakta (Şekil 6.31 (a) ve 6.32) ve kararlı rejimde ortalama 168 W elektriksel güç harcamaktadır. Termoelektrikli kuvöz sistemi yaklaşık olarak 40. dakikadan sonra kararlı hale ulaşmakta (Şekil 6.31 (a) ve 6.32) ve kararlı rejimde ortalama 191,78 W elektriksel güç harcamaktadır. Benzer şekilde TES

modüller ortalama 157 W güç harcamakta ve soğuk yüzeyden ortalama 52,3 W ısı gücü kazanılmaktadır. Kararlı halde, rezistanslı kuvöz sistemi, termoelektrikli kuvöz sistemine göre ortalama 23,78 W daha az güç harcamıştır. Eğer termoelektrikli kuvöz sistemi, transport kuvözlerde olduğu gibi, DC gerilimle beslenmesi durumunda ise termoelektrikli kuvöz sistemi, rezistanslı kuvöz sistemine göre ortalama 11 W daha az güç tüketecektir.



Şekil 6.32: Rezistanslı ve termoelektrikli kuvöz sistemlerinin 25-36 °C deneyi boyunca harcanan aktif elektriksel güç miktarlarının ve TES modüllerden çekilen ısı miktarının değişimleri

Termoelektrikli kuvöz sistemindeki TES modüllerin deney süresi boyunca $COP_{ısıtma}$ değeri 1,23 olarak bulunmuştur. Elektrik rezistansın $COP_{ısıtma}$ değerinin 1 olduğu bilinen bir olgudur. Bu değerlerin anlamı verilen 1 birimlik elektriksel enerjiye karşı rezistans 1 birim ısı enerjisi üretirken, TES modüller 1,23 birimlik ısı enerjisi üretmektedir. Dolayısıyla termoelektrikli kuvöz sistemi, deney süresi boyunca daha az güç harcayarak aynı işi yapabirmiştir. Ancak kuvöz sistemlerinin deney boyunca $COP_{ısıtma}$ değerlerine bakmak yerine sistem kararlı hale ulaştıktan sonraki $COP_{ısıtma}$ değerlerine bakmak daha doğrudur. Çünkü uygulamadaki kuvözler kararlı hale ulaştıktan sonra, bozucu bir etki olmadığı sürece uzun süre aynı şekilde çalışmaktadırlar. Deneysel ölçümler sonucunda, kararlı rejimde soğuk yüzeyden ortalama 52,3 W ısı gücünün kazanıldığı ve TES modüllerin de $COP_{ısıtma}$ değerinin

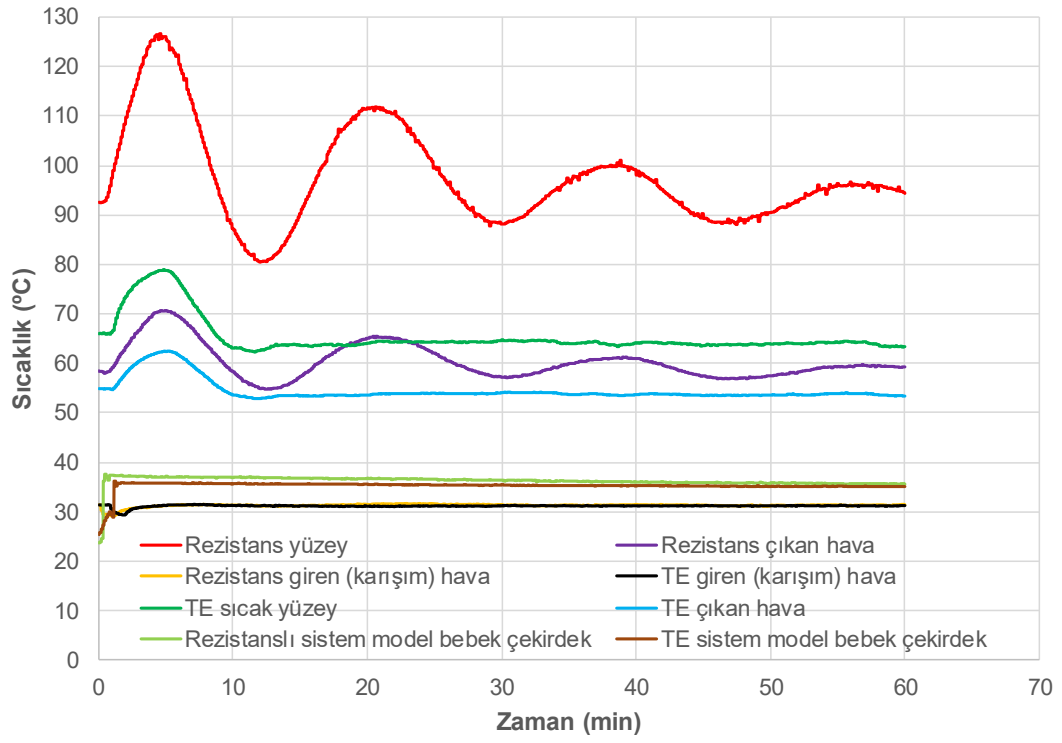
yaklaşık 1,4 olduğu belirlenmiştir. Kararlı durum için TE ısı pompası sistemindeki TES modüllerinin maksimum ısıtma yükü civarındaki maksimum $COP_{ısıtma}$ değerine göre yapılan optimizasyon sonucunda; soğuk yüzeyden çekkilen ısı değeri 59,34 W ve $COP_{ısıtma}$ değeri 1,58 bulunmuştu (bkz. Tablo 6.6). Buradan optimizasyon sonucu elde edilen verilerle, deneysel ölçüm verilerinin büyük oranda örtüştüğü görülmektedir. Aradaki fark ise optimizasyon işleminde yapılan bazı kabullerden, optimizasyonda elde edilen termoçift sayısı (n) ile kullanılan TES modüllerin termoçift sayılarının aynı olmamasından ve deneysel sistemdeki ölçüm cihazlarının hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte burada açık bir şekilde görülmeyen fakat bu farkın oluşmasına en fazla katkıda bulunan etkinin, TES modüllerin PWM ile çalıştırılması olduğu anlaşılmıştır. PWM, kare sinyalin bir periyotta açık-kapalı kalma süresini (duty cycle) yüksek frekansta kontrol ederek bir sisteme verilen voltajı, analog bir sinyal gibi ayarlayabilmektedir. Böylece elde edilen ortalama voltaj, aynı değer DC voltajına eşdeğer olarak sisteme verilebilmektedir. Bu olgu, elektronikte ve birçok mühendislik uygulamasında mükemmel bir şekilde çalışmaktadır. Ancak bu olgu, TES modüllerin çalışma prensiplerine tam olarak uygun değildir. Çünkü TES modüllerde, PWM ile yüksek hızda aç-kapa yapılarak sisteme sağlanan ortalama voltaj ile doğrudan sisteme sağlanan DC voltaj arasında büyük bir fark vardır. Termoelektrik sistemin ideal denklemleri göz önüne alındığında, bu farkın önemi daha iyi anlaşılmaktadır. İdeal denklemlerdeki TES modüllerin malzeme özellikleri (Seebeck katsayısı, elektriksel özdirenç, termal iletkenlik), akım ve sıcaklıklar PWM'nin olumsuz etkisinden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle PWM ile çalıştırılan ve kontrol edilen TES sistemler, her zaman doğrudan DC voltaj ile beslenen TES sistemlere göre daha az verimli olmaktadır. Bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için DC voltajı doğrudan TES modüllere iletebilen TES kontrolörlerin (TEC controller) kullanılması tavsiye edilmektedir (RMT Ltd. 2019, Meerstetter Engineering 2019, Yeler ve Koseoglu 2020). Bu şekilde optimizasyon sonucu elde edilen $COP_{ısıtma}$ değeri, termoelektrikli kuvöz sisteminde elde edilebilir.

Kısaca özetlemek gerekirse, termoelektrikli kuvöz sisteminin $COP_{ısıtma}$ değeri, rezistanslı kuvöz sisteminden her zaman daha büyüktür. Ancak termoelektrikli kuvöz sisteminin elektrik enerji harcama durumuna, iki tane faktör olumsuz etkilemektedir. Bunlardan biri, AC voltajı DC voltajı dönüşüm sırasında yaşanan kayıplardır. Diğeri ise TES modüllerin PWM ile çalıştırılması ve kontrol edilmesidir. Bu 2 olumsuz

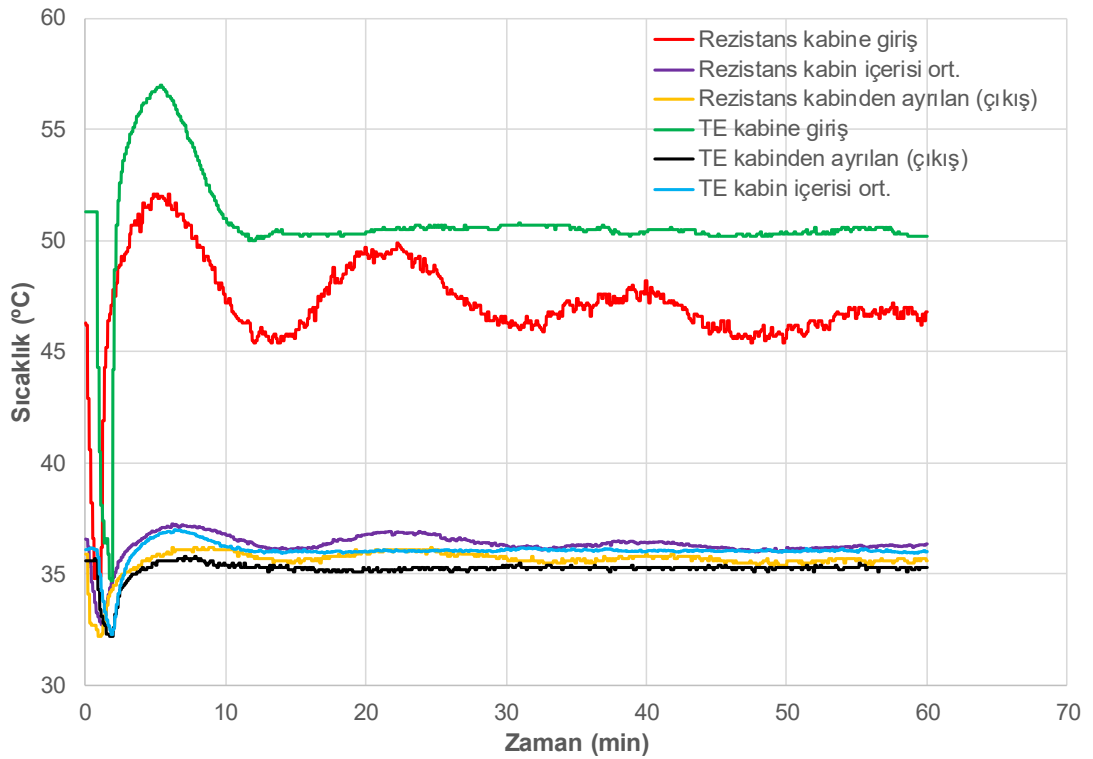
faktörün etkinliğine bağlı olarak harcanan elektriksel enerji miktarları değişmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan ve geliştirilen sistemlerle, her iki kuvöz sistemin elektriksel güç harcamaları incelendiğinde; deney süresi boyunca harcanan elektriksel güçlere bakıldığında termoelektrikli kuvöz sistemi daha üstünken, kuvöz sistemlerinin kararlı hale ulaştıktan sonra harcadıkları elektriksel güçlere bakıldığında ise rezistanslı kuvöz sistemi çok az bir farkla (23,78 W) termoelektrikli kuvöz sisteminden daha üstündür.

6.3.1.1 Rezistanslı kuvöz sistemle termoelektrikli kuvöz sisteminin model bebekli durumdaki ısıtma performanslarının karşılaştırılması

Kararlı rejimdeki kuvözlere, model bebeği kabine yerleştirme işlemi yapılarak, gerçek bir durum simüle edilmeye çalışılmıştır. Bu deneylerle hem bebeğin çekirdek sıcaklığı değişimleri hem de kararlı rejimi bozulan sistemlerin, yeniden kararlı hale ulaşırken ki tepki ve davranışları araştırılmaya çalışılmıştır. Her iki kuvöz sisteminin sıcaklık davranışları bebensiz durumdakine çok benzediği için bebekli durumda kayda değer bir fark görülememiştir (Şekil 6.31 ve 6.33). Benzer şekilde model bebeğin çekirdek sıcaklığı değişimleri incelendiğinde, küçük farklar görülmektedir. Fakat bu küçük farklar dikkate alınacak kadar önemli değildir (Şekil 6.33 (a)). Ancak kararlı rejimi bozulan kuvöz sistemlerinin, yeniden kararlı hale ulaştığı süreler dikkate alındığında kayda değer farklar olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Termoelektrikli kuvöz sisteminde kabin içerisindeki ortalama sıcaklık yaklaşık 11. dakikadan sonra yeniden kararlı hale ulaşırken, rezistanslı kuvöz sisteminde bu durumun yaklaşık 46. dakika civarlarında gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 6.33 (b)). Bu durum ile termoelektrikli kuvöz sistemin tepkisinin rezistanslı kuvöz sistemininkinden 4 kat daha hızlı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminin yeniden kararlı hale ulaşırken, çok az bir salınım ve sıcaklık dalgalanmasıyla hemen ayarlanan sıcaklığı kabin içerisinde oluşturduğu görülmektedir. Buna karşın rezistanslı kuvöz sistemi yeniden kararlı hale ulaşırken, 3 kez salınım yapmakta ve her salınımda belli bir miktar sıcaklık dalgalanması olduğu görülmektedir (Şekil 6.33 (b)). Buradan da termoelektrikli kuvöz sisteminin tepkisinin ve kontrol davranışının rezistanslı kuvöz sistemden üstün olduğu açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır.



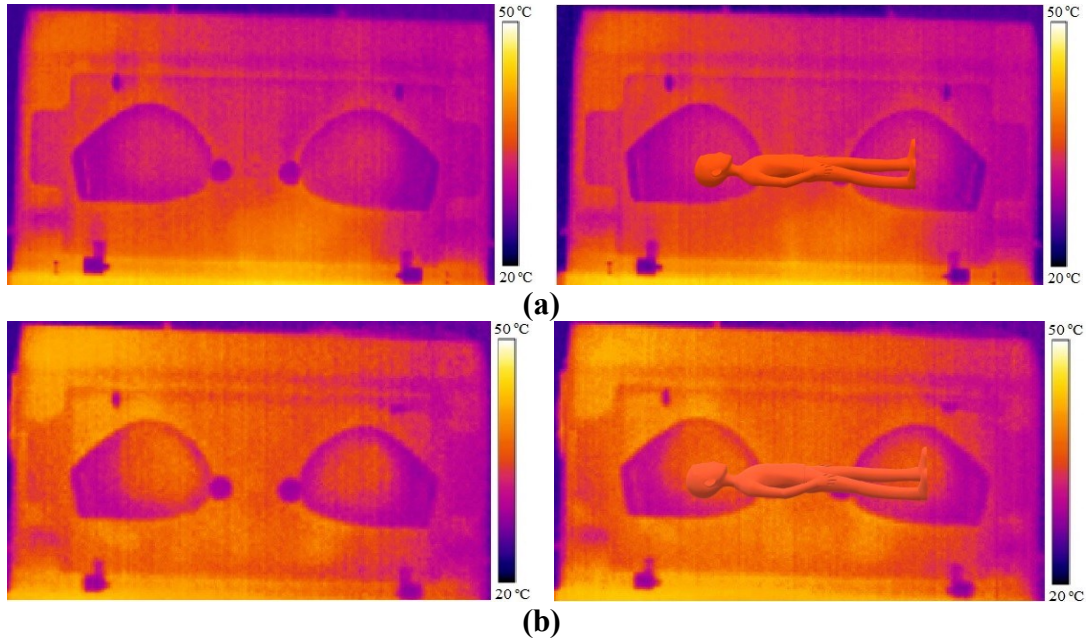
(a)



(b)

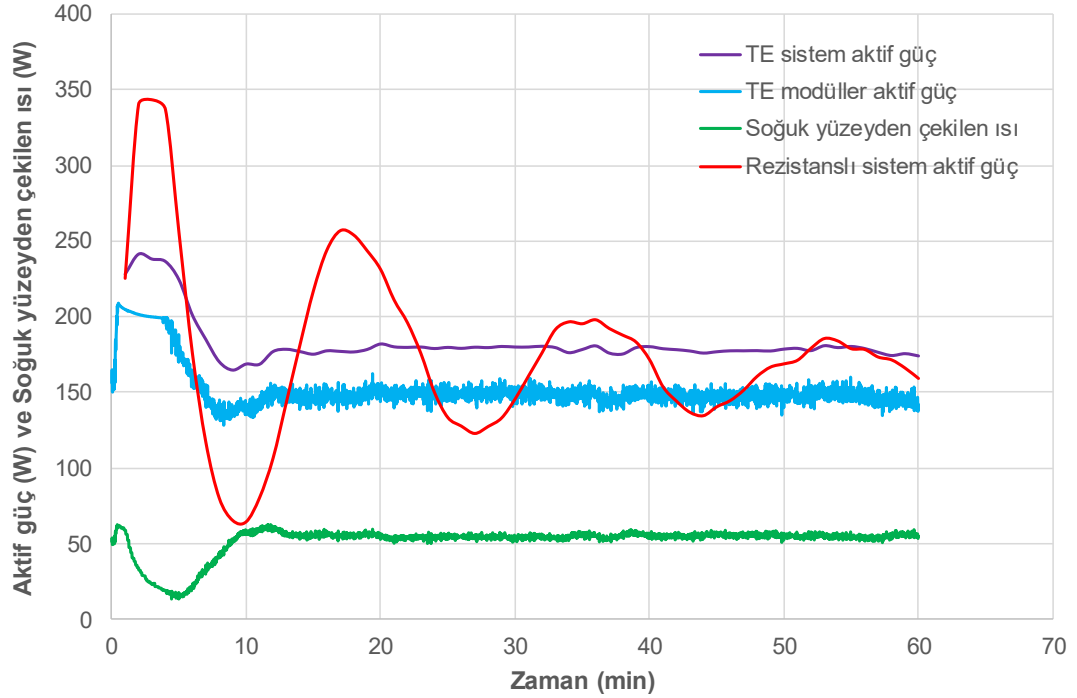
Şekil 6.33: Bebekli durumda 36 °C kabin havası sıcaklığında her iki kuvöz sisteminin (a) ısıtma elemanlarının yüzey sıcaklığı ve ısıtma elemanlarına giren-çıkan havaların zamana bağlı sıcaklık değişimleri (b) kabin ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimleri

Model bebekle yapılan deneylerde, hem bebeğin çekirdek sıcaklığından dolayı kabin ortamına yaptığı katkısını gözlemlemek için hem de kabin yüzeylerindeki sıcaklık dağılımını bir başka deyişle kabin ortamının sıcaklık dağılımını gözlemlemek için kuvöz sistemlerinin belirli kabin havası sıcaklıklarında, bebekli ve bebeksiz durumlarda termal kamera görüntüleri alınmıştır. Kuvöz sistemlerinin termal kamera görüntüleri karşılaştırıldığında, her iki sistemin bebekli ve bebeksiz durumdaki kabin ortamlarına bakıldığında kayda değer bir fark gözükmemektedir. Ancak termoelektrikli kuvöz sistemin kabin ortamına ait sıcaklık dağılımının, rezistanslı kuvöz sistemininkine göre daha sıcak ve daha homojen olduğu açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 6.34). Termoelektrikli kuvöz sisteminde kabin ortamının daha sıcak olmasının sebebi, Şekil 6.31 ve 6.33’de açık bir şekilde görüldüğü üzere, termoelektrikli sistemde kabine giren havanın daha sıcak olmasıdır.



Şekil 6.34: 25-36 °C deneyinin model bebekli ve bebeksiz termal kamera görüntüleri (a) rezistanslı kuvöz sistemi (b) termoelektrikli kuvöz sistemi

Model bebek ile yapılan deney süresi boyunca, rezistanslı kuvöz sistemi toplam 635,44 kJ elektriksel enerji harcamıştır. Buna karşın termoelektrikli kuvöz sisteminde 657,85 kJ ve TES modüllerde 547,1 kJ elektriksel enerji harcanmıştır. Benzer şekilde deney süresi boyunca termoelektrikli kuvöz sistemi, soğuk yüzey aracılığıyla çevre ortamından **187 kJ enerji kazanmıştır**. Model bebek ile yapılan bu deneyde, 60 dakika boyunca termoelektrikli kuvöz sisteminin $COP_{ısıtma}$ değeri 1,34 olarak belirlenmiştir (Şekil 6.35).



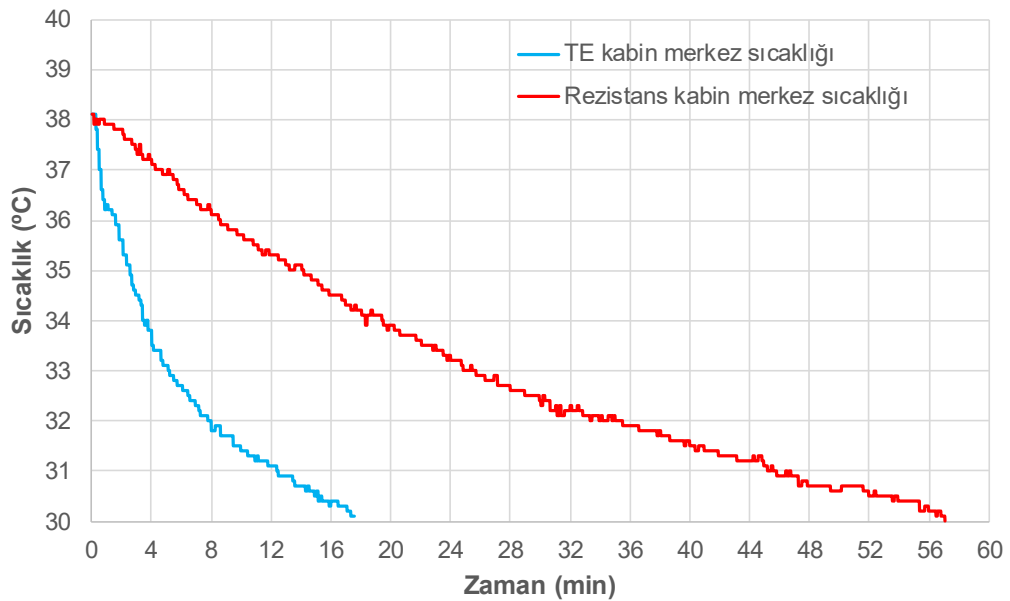
Şekil 6.35: Rezistanslı ve termoelektrikli kuvöz sistemlerinin model bebek ile yapılan 25-36 °C deneyi boyunca harcanan aktif güç miktarlarının ve TES modüllerden çekilen ısı miktarının değişimleri

6.3.2 Rezistanslı kuvöz sisteminin doğal soğuma hızı ile termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma performansının karşılaştırılması

Şu an kullanılan rezistanslı kuvöz sistemleri, prematüre bebeğin sadece hipotermi yaşaması durumuna karşı ısıtma ve nemlendirme fonksiyonlarını yerine getirmektedir. Bebeğin hipertermi yaşaması durumunda ise ya mevcut rezistanslı kuvöze soğutma battaniyesi ikinci bir cihaz olarak eklenmekte ya da rezistanslı kuvöz sisteminin sıcaklığı düşürülerek bebeğin vücut sıcaklığının düşmesi beklenmektedir. Soğutma battaniyesinin kuvöz sistemine yerleştirilebilmesi veya soğutma battaniyesinin ikinci bir kuvöz sistemine kurularak bebeğin ikinci kuvöz sistemine taşınması sırasında; bebek hareket ettirilerek, rahatsız edilmektedir. Ayrıca her iki durumda kuvözün kabini açılıp kapandığı için ayarlanan sıcaklık ve bağıl nem değerlerinde belli bir süre dalgalanmalar yaşanmaktadır. Diğer taraftan, rezistanslı kuvözün sıcaklığı düşürüldüğünde ise ya istenilen hızda soğutma etkisi elde edilememekte ya da rezistanslı kuvöz istenilen sıcaklığa düşmeyebilmektedir. Bu

noktada prematüre bebeklerde yaygın olarak görülen problemlerden biri olan hipotermi ve hipertermi sorununa aynı cihaz ile çözüm bulunması önem arz ettiğinden dolayı tez çalışması kapsamında termoelektrikli kuvöz sistemi geliştirilmiştir. Termoelektrikli kuvöz sisteminde kullanılan TES modüller sayesinde, kuvöze uygulanan akımın sadece yönünün değiştirilmesiyle geliştirilen kuvöz, çok hızlı bir şekilde tek bir cihaz ile ısıtma ve soğutma fonksiyonlarını yerine getirebilmektedir.

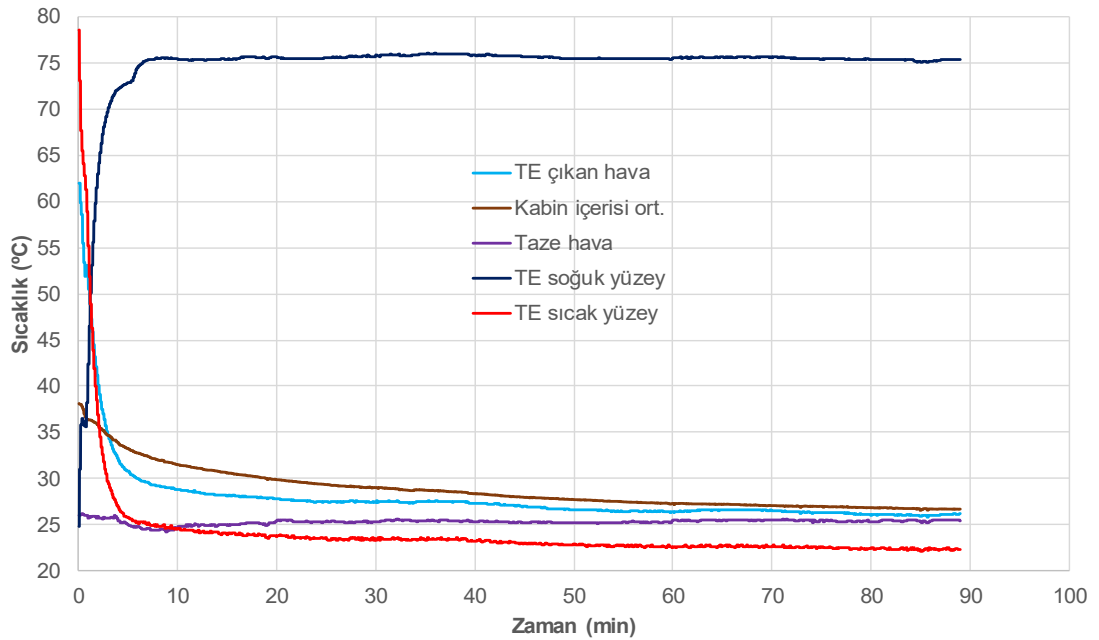
Rezistanslı kuvöz sistemlerinde soğuma, çevre ortamı kuvözden nispeten daha düşük sıcaklıklarda olduğu için doğal taşınım mekanizmasıyla gerçekleşir. Termoelektrikli kuvöz sistemlerinde ise TES modülün akım yönünün değiştirilmesiyle, sistem soğutma modunda çalışabilmektedir. Her iki kuvöz sisteminin soğutma performanslarını karşılaştırmak için çevre sıcaklığının $25\pm 0,5$ °C olduğu bir ortamda, sistemlerin kabin havası sıcaklığı 38 °C'ye çıkartılmıştır. Her iki kuvöz sistemi de kararlı rejime ulaştıktan sonra sistemlerin kabin havası sıcaklığı, çevre havası sıcaklığına ayarlanarak 38 °C'den 30 °C'ye soğutma hızları karşılaştırılmıştır (Şekil 6.36). Termoelektrikli kuvöz sisteminin kabin havası merkez sıcaklığı, yaklaşık 18 dakikada 38 °C'den 30 °C'ye gelirken, rezistanslı kuvöz sistemi yaklaşık olarak 58 dakika sonunda 30 °C'ye inebilmiştir. Buradan, termoelektrikli kuvöz sisteminin rezistanslı kuvöz sisteminden 3,2 kat daha hızlı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.36: Kuvöz sistemlerinin 38 °C'den 30 °C'ye soğutma hızlarının değişimi

Şu anki rezistanslı kuvözler genellikle çevre sıcaklığı 20-30 °C aralığında bulunan ortamlarda çalıştırılmak üzere tasarlanmıştır (Tol 2005). Tasarlanan bu sıcaklık değerlerini hastane ortamlarında elde etmek mümkündür ve bu sıcaklıklarda rezistanslı kuvözler rahatlıkla çalışabilmektedir. Ancak kuvözün kullanıldığı yerin coğrafi konumuna ve iklim şartlarına göre ya da prematüre bebeğin teknolojik donanımlı bir hastaneye transport kuvöz ile taşınması esnasında, çevre sıcaklığı tasarlanan bu değerlerin dışında olabilmektedir. Böyle durumlarda, günümüzdeki rezistanslı kuvözlerin istenilen sıcaklık ve bağıl nemi kabin içerisinde sağlaması mümkün değildir. Ayrıca EN 60601-2-19 standardında (2011), kabin içi hava sıcaklığı çevre sıcaklığından en az 3 °C fazla olmadığı durumlarda, kuvözün istenilen hedefi gerçekleştirmesinin mümkün olamayabileceği belirtilmiştir (Tol 2005). Böyle durumlarda, termoelektrikli kuvöz sistemleri soğutma moduna alınarak 20-30 °C aralığından daha yüksek çevre koşullarında, istenilen kuvöz sıcaklığını rahatlıkla sağlayabilirler. Bu durumu araştırmak için çevre sıcaklığının 25,5 °C olduğu bir ortamda, kabin havası sıcaklığı 38 °C iken, termoelektrikli kuvöz sistemi soğutma moduna alınarak kabin havası sıcaklığı 20 °C'ye ayarlanmıştır (Şekil 6.37). Deneye başlamadan önce TES modüller ısıtma modunda çalıştırıldığı için 0. dakika da sıcak taraftaki yüzey 78,6 °C ve soğuk taraftaki yüzey 24,8 °C sıcaklığında olduğu görülmektedir. Termoelektrikli kuvöz sistemi soğutma moduna alınır alınmaz, sıcak tarafın yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde düşmekte ve soğuk tarafın yüzey sıcaklığı artmaktadır. 70 saniyenin sonunda TES modüllerin soğuk ve sıcak taraflardaki yüzey sıcaklıkları eşitlenmektedir (Şekil 6.37). 7 dakika gibi kısa bir süre sonunda, TES modüllerin soğuk tarafının yüzey sıcaklığı 75 °C'ye ulaşmakta ve sıcak tarafının yüzey sıcaklığı 25 °C'ye düşmektedir. TES modüllerin soğuk ve sıcak taraflardaki yüzeylerin sıcaklığı, ilk 7 dakika içinde hızlı bir şekilde değiştiği için buna bağlı olarak kabin içerisindeki ortalama hava sıcaklığı ve TE ısı pompası sistemine temas ederek çıkan karışım havası sıcaklığı hızlıca azalmaktadır. İlk 7 dakikadan sonra TES modüllerin soğuk taraf yüzey sıcaklığı, deney boyunca sabit bir şekilde kalırken, kabin havasının soğutma işleminin gerçekleştiği TES modüllerin sıcak yüzey tarafında ise karışım havasının sıcaklığı çok yavaş bir şekilde azalmaya devam etmekte ve 90 dakika sonunda TES modüllerin sıcak taraftaki yüzey sıcaklığı 22,2 °C'ye düşmektedir (Şekil 6.37). Bu noktada, termoelektrik sistemler bir katı hal ısı pompası gibi çalıştığı için termoelektrik ısı pompası sisteminin soğutma gücü, kuvözden kaybedilen ısı transferinin büyüklüğüne ve çevre ortamı sıcaklığına bağlı olarak değişir. Özellikle

yüksek çevre ortamı sıcaklıklarında çalışan termoelektrik kuvöz sistemlerinde, çevre sıcaklığı 30 °C'nin altına düşmeyeceği için TES modüllerinin soğuk taraftaki yüzey sıcaklığı gerçekleştirilen deneyde olduğu gibi 22,2 °C'ye düşmesine gerek olmayacaktır. Bu durumda, TES modüllerinin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) daha az olacağından dolayı TE ısı pompası sisteminin soğutma gücünü belirleyen Peltier etki daha büyük olacaktır. Bu yüzden geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemiyle, çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda kuvözün soğutma modunda çalışarak, istenilen hedefi başarabileceği öngörülmektedir.



Şekil 6.37: Termoelektrikli kuvöz sisteminde TES modüllerin sıcak ve soğuk taraftaki yüzeylerinin sıcaklık değişimleri ve geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin çevre sıcaklığının altındaki bir ortamda soğutma performansı

Tez çalışması kapsamında yapılan bu deney ile geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin hem soğutma performansı hem de TES modülün soğuk ve sıcak yüzeylerindeki sıcaklıkların değişimi araştırılmıştır. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminin kabin havası sıcaklığı çevre sıcaklığının (25,5 °C) altına inmesi durumundaki davranışları incelenmiştir. Çevre sıcaklığı 25,5 °C ve kabin ortamının sıcaklığı 20 °C olarak ayarlandığı bir ortamda; AMS Amenity kuvözün çevre ortamından ısı kazanımı yaklaşık olarak 71 W civarındadır. Belirtilen koşullarda TES modüllerin soğutma gücü ise ortalama 31 W civarındadır. Bu durumda TES modüller kabin ortamından 31 W ısı çekerken, çevre ortamından kabine 71 W ısı girişi olmaktadır. Dolayısıyla belirtilen şartlarda çalışan termoelektrikli kuvöz sistemi,

hiçbir zaman kabin içerisindeki hava sıcaklığını ayarlanan 20 °C sıcaklığına düşürememektedir (Şekil 6.37).

Bu çalışmada açık bir şekilde vurgulandığı üzere, tez kapsamında tasarlanan TE ısı pompası sistemi, AMS Amenity XP kuvözünün tasarımını değiştirmeden, sınırlı hacim için kabini ısıtma moduna göre ($COP_{ısıtma}$) optimize edilerek geliştirilmiştir. Dolayısıyla geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma performansının daha da artırılması veya soğuk tarafın yüzey sıcaklığının daha da düşürülmesi gerektiği bir durum söz konusu olduğunda, TE ısı pompası sisteminin çevre sıcaklığına ve kuvözden kaybolan ısı transferi büyüklüğüne bağlı olarak yeniden optimize edilmesi gerekmektedir. Yeniden optimizasyon yapılarak TE ısı pompası sisteminin daha iyi soğutabilmesi için de ısının atıldığı tarafta kanatçıklı yüzeylerin alanının artırılması, kanatçıklı yüzeylerin ısı dirençlerinin azaltılması veya ısı taşınım katsayısını arttıran etmenlerin (fan hızının artırılması, kullanılan akışkanın değiştirilmesi, vb.) uygulanması gerekmektedir. Bu bahsedilen etmenlerin her birisi ayrı bir araştırma konusudur. Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamında geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin araştırması burada sonlandırılmıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma modunun kullanılacağı şartlara bağlı olarak, bahsedilen etmenlerin etkisinin araştırılmasına daha sonraki çalışmalarda devam edilecektir.

7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Prematüre bebek kuvözleri, yeni doğanların ihtiyaç duyduğu uygun sıcaklık, bağıl nem ve oksijen seviyelerini kontrollü bir şekilde düzenleyerek; anne karnındaki gibi bebeğin minimum oksijen tüketimi ve en az metabolik harcama yaptığı nötral ortamı, yapay olarak oluşturan tıbbi cihazlardır. Günümüzde kullanılan kuvöz sistemlerinde, ısıtma elemanı olarak rezistans kullanılmaktadır. Rezistanslı kuvözlerin çalışma prensibi ve sıcaklık hassasiyetinden dolayı prematüre bebeklerin birtakım sağlık problemleri yaşadıkları tespit edilmiştir. Bu doğrultuda rezistanslı kuvöz sistemlerinde yaşanan tüm problemleri ortadan kaldırmak ve daha iyi sıcaklık kontrolü sağlamak için termoelektrik ısıtma ve soğutma prensibi ile çalışan bir termoelektrikli kuvöz sistemi geliştirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, rezistanslı kuvöz sistemiyle geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin birbiriyle karşılaştırılabilmesi için ticari bir kuvöz üzerinde deney düzeneği kurularak çevre sıcaklığı $25\pm 0,5$ °C ve kabin havası sıcaklığı 30 °C, 32 °C, 34 °C, 36 °C ve 38 °C olduğu ortamlarda toplam 62 adet deney yapılmıştır. Yapılan her bir deney için her iki kuvöz sisteminin gürültü seviyesi değerleri, sıcaklık değerleri, harcadıkları elektriksel güç değerleri anlık olarak ölçülüp kaydedilmiştir. Buna ilaveten, model bir bebek ile her iki sistemin dinamik davranışları ve termal kamera görüntüleri alınarak sistemler geniş ölçekli ve kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar, kuvöz sistemlerinin ısıtma ve soğutma performansları olarak iki ana başlık altında toplanmıştır. Kuvöz sistemlerinin tez kapsamında yapılan bütün ısıtma performansları deneylerinin sonuçlarını tartışmak gereksiz yer işgal edeceği ve karmaşık oluşturacağı için kuvöz sistemlerinin ısıtma performansları tek bir deneyde (25-36 °C deneyi) detaylı bir şekilde grafiksel olarak karşılaştırılarak tartışılmıştır. Sistemlerin diğer ısıtma performansları deneylerinin sonuçları, sistemlerin kararlı rejim boyunca ölçülen değerlerinin ortalamaları alınarak oluşturulan tablolarda toplu olarak verilmiştir. Kuvöz sistemlerinin soğutma performansları, kabin havası sıcaklığının 38 °C'den 30 °C'ye düşürülmesi esnasındaki soğutma hızları karşılaştırılması ve sistemlerin kabin havası sıcaklığı, çevre sıcaklığının altında bir değere ayarlandığı durumdaki sistemlerin soğutma performanslarının karşılaştırılması deneylerinin analizleri

yapılarak araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda kapsamlı bir şekilde özetlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi ile prematüre bebeklerin hem ısıtma hem de soğutma ihtiyaçları aynı cihaz üzerinde sağlanmıştır. Bu şekilde, bebeğe herhangi bir dokunma olmadan bebeğin bütün ihtiyaçları karşılanmış ve kuvöz içerisinde yatan bebek hiç rahatsız edilmemiştir. Ayrıca ısıtma ve soğutma tek bir cihazla gerçekleştirilebildiğinden dolayı kuvözün kabini herhangi bir şekilde açma veya kapatma olmamıştır. Bu sayede, kuvözde ayarlanan sıcaklıkta herhangi bir dalgalanma meydana gelmemiştir. Geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi, çevre sıcaklığından bağımsız olarak dünyanın her bölgesinde rahatlıkla çalışabilecek özelliktedir. Fakat geliştirilen TE ısı pompası sisteminin kullanıldığı yerin coğrafi konum koşullarına ve kullanıldığı kuvözden oluşan ısı transferlerine bağlı olarak yeniden optimize edilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Bununla birlikte termoelektrikli kuvöz sistemi, nötral ortam sıcaklıklarını daha yüksek hassasiyetle ve daha az sıcaklık dalgalanmasıyla oluşturmuştur. Ayrıca termoelektrikli kuvöz sisteminin kararlı rejimi bozulduğunda yeniden kararlı hale ulaşırken ki davranışlarına bakıldığında, çok az bir salınım ve sıcaklık dalgalanmasıyla hemen ayarlanan sıcaklığı kabin içerisinde oluşturduğu görülmektedir. Buradan da geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin ısıtma performansı, sıcaklık hassasiyeti, dinamik tepkisi ve kontrol davranışının rezistanslı kuvöz sistemindenkinden üstün olduğu ortaya çıkmıştır.

Kuvöz sistemlerinin verimlerine bakıldığında, termoelektrikli kuvöz sisteminin $COP_{ısıtma}$ değeri, rezistanslı kuvöz sisteminden her zaman daha büyüktür. Ancak termoelektrikli kuvöz sisteminin elektrik enerji harcama durumunu iki tane faktör olumsuz etkilemektedir. Bunlardan biri, AC voltajın DC voltaja dönüştürülmesi sırasında yaşanan kayıplardır. Diğeri ise TES modüllerin PWM ile çalıştırılması ve kontrol edilmesidir. Bu iki olumsuz faktörün etkinliğine bağlı olarak harcanan elektriksel enerji miktarları değişmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan ve geliştirilen sistemlerle her iki kuvöz sistemin elektriksel güç harcamaları incelendiğinde; deney süresi boyunca harcanan elektriksel güçlere bakıldığında termoelektrikli kuvöz sistemi daha üstünken, kuvöz sistemlerinin kararlı hale ulaştıktan sonra harcadıkları elektriksel güçlere bakıldığında ise rezistanslı kuvöz sistemi çok az bir farkla (23,78 W) termoelektrikli kuvöz sisteminden daha üstündür.

Aşağıda tez kapsamında model bebekle ve bebeksiz olarak yapılan kabin ortamını ısıtma deneylerinden biri olan ve çalışma kapsamında detaylı bir şekilde grafiksel olarak karşılaştırılan 25-36 °C deneyinin sayısal verileri ve performansları, kısaca özetlenmiştir. Ayrıca sistemlerin kabin ortamını soğutma davranışlarının araştırıldığı deneylerde elde edilen sayısal veriler ve performanslar da kısaca özetlenmiştir.

25-36 °C deneylerinin sonuçları:

- Kuvöz sistemlerinin normal çalışma esnasındaki kabin içi ortalama gürültü seviyeleri karşılaştırıldığında; rezistanslı kuvözün ortalama gürültü seviyesi 49,49 dBA ölçülürken, termoelektrik kuvözün gürültü seviyesi ise ortalama 56,46 dBA olarak ölçülmüştür. Her iki kuvöz sisteminin ortalama gürültü seviyesi EN 60601-2-19 standardında (2011) belirtilen değerin (60 dBA) altında olduğu için uygundur.

- Rezistanslı kuvöz sistemi, ayarlanan 36 °C kabin havası sıcaklığını sağlayabilmek için rezistans yüzey sıcaklığını maksimum 164,9 °C'ye çıkarırken, termoelektrikli kuvöz sistemi aynı hedefi yüzey sıcaklığını maksimum 76,9 °C değerine ulaştırarak başarmıştır. Termoelektrikli kuvöz sistemi 40. dakika da ayarlanan kabin havası sıcaklığını kararlı rejime ulaştırırken, rezistanslı kuvöz sistemi 57. dakika da kararlı rejime ulaştırabilmiştir. Her iki sistemde kararlı rejime ulaştıktan sonra kabin içerisindeki ortalama sıcaklık değerleri birbirine yakın olmasına rağmen termoelektrikli sistemin kabin içerisindeki sıcaklık dağılımı daha sıcak ve daha homojendir. Bununla birlikte termoelektrikli kuvöz sistemi ayarlanan sıcaklığı 0,05 °C hassasiyetle sağlarken, rezistanslı kuvöz sisteminin 0,1 °C hassasiyetle sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca rezistanslı kuvöz sistemi ayarlanan sıcaklığı kabin içerisinde oluştururken, kabin içerisindeki ortalama merkez sıcaklığında maksimum 0,8 °C sıcaklık dalgalanması olduğu görülmüştür. Aynı durumun termoelektrik kuvöz sisteminde maksimum 0,3 °C olduğu gözlemlenmiştir.

- Kuvöz sistemleri tarafından deney süresi (90 dakika) boyunca tüketilen elektrik enerjileri karşılaştırıldığında; rezistanslı kuvöz sistemi toplam 1315,3 kJ elektriksel enerji harcarken, termoelektrikli kuvöz sistemi ise toplam 1153,3 kJ elektriksel enerji harcamıştır. Termoelektrikli kuvöz sisteminde ısıtma ve soğutmaya sağlayan TES modüller bir katı hal ısı pompası olarak çalıştığı için deney süresi boyunca çevre ortamından soğuk yüzey aracılığıyla toplam 221,8 kJ enerji kazanılmıştır. Buna karşın TES modüllerde 953,85 kJ elektriksel iş harcanmıştır. Bu doğrultuda deney süresi

boyunca termoelektrikli kuvöz, rezistanslı kuvözden 162 kJ daha az elektrik enerjisi tüketmiştir. Ayrıca termoelektrikli kuvöz, transport kuvözlerde olduğu gibi, doğrudan DC akımla çalıştırıldığı durumda ise termoelektrikli kuvöz bu seferde rezistanslı kuvözden 361,45 kJ daha az elektrik enerjisi tüketmektedir. Diğer taraftan, aynı deney ortamında kuvöz sistemlerinin kararlı rejime ulaştıktan sonraki elektriksel güçleri karşılaştırıldığında; rezistanslı kuvöz, termoelektrikli kuvözden ortalama 23,78 W daha az elektriksel güç tüketmektedir. Bununla birlikte, transport kuvözlerde olduğu gibi, termoelektrikli kuvözün doğrudan DC gerilimle çalıştırıldığı durumda ise termoelektrikli kuvöz, rezistanslı kuvözden ortalama 11 W daha az elektriksel güç tüketmektedir.

- Rezistanslı kuvöz sistemindeki elektrik rezistansın deney süresi boyunca $COP_{\text{ısıtma}}$ değeri 1 iken, termoelektrikli kuvöz sistemindeki TES modüllerin $COP_{\text{ısıtma}}$ değeri 1,23 olarak belirlenmiştir. Termoelektrikli kuvöz sistemi kararlı hale ulaştıktan sonraki $COP_{\text{ısıtma}}$ değeri ise 1,4 civarındadır.

- Model bebek ile pratikte uygulanan durumun simülasyon deneyinde, kararlı rejimi bozulan kuvöz sistemlerinin yeniden kararlı hale ulaştığı süreler incelendiğinde; termoelektrikli kuvöz sistemi kabin içerisindeki ortalama sıcaklığı yaklaşık 11. dakikadan sonra yeniden kararlı hale ulaştırırken, rezistanslı kuvöz sisteminin aynı işlemi yaklaşık 46. dakika civarlarında gerçekleştirebildiği gözlemlenmiştir. Buradan da termoelektrikli kuvöz sistemin tepkisinin (dinamik davranışı), rezistanslı kuvöz sistemininkinden 4 kat daha hızlı olduğu anlaşılmaktadır.

- Kuvöz sistemlerinin termal kamera görüntüleri incelendiğinde, her iki sistemin bebekli ve bebedsiz durumdaki kabin ortamı hava sıcaklıklarında dikkate değer bir fark görünmemektedir. Ancak termoelektrikli kuvöz sistemin kabin ortamının sıcaklık dağılımının, rezistanslı kuvöz sisteminkine göre daha sıcak ve daha homojen olduğu tespit edilmiştir.

Soğutma deneylerinin sonuçları:

- Her iki kuvöz sistemi kararlı rejime ulaştıktan sonra sistemlerin kabin havası sıcaklığı çevre havası sıcaklığına ayarlanarak 38 °C'den 30 °C'ye soğutma hızları karşılaştırıldığında; termoelektrikli kuvöz sistemi, kabin havası merkez sıcaklığını yaklaşık olarak 18 dakikada 38 °C'den 30 °C'ye getirirken, rezistanslı kuvöz sisteminin yaklaşık olarak 58 dakika sonunda 30 °C'ye düşerebildiği tespit edilmiştir.

Buradan da termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma hızının, rezistanslı kuvöz sistemininkinden 3,2 kat daha hızlı olduğu anlaşılmaktadır.

• Rezistanslı kuvöz sistemleri, genellikle çevre sıcaklığı 20-30 °C aralığında bulunan ortamlarda çalıştırılmak üzere tasarlanmıştır (Tol 2005). Dolayısıyla çevre sıcaklığı herhangi bir şekilde bu değer aralığının dışına çıktığı bir durumda, rezistanslı kuvöz sistemleri görevlerini yapamamaktadırlar. Fakat termoelektrikli kuvöz sistemleri böyle bir durumla karşılaştığında sistem, soğutma modunda çalıştırılarak yüksek çevre sıcaklığı koşullarında istenilen kuvöz sıcaklığını rahatlıkla sağlayabilmektedir. Tez kapsamında geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi, çevre sıcaklığının $25 \pm 0,5$ °C ve kabin havası sıcaklığının 38 °C olduğu bir ortamda, soğutma moduna alınmış ve kabin havası sıcaklığı 20 °C'ye ayarlanmıştır. 7 dakika gibi kısa bir süre sonunda, TES modüllerinin soğuk tarafının yüzey sıcaklığı 75 °C'ye ulaşmakta ve sıcak tarafının yüzey sıcaklığı 25 °C'ye düşmektedir. Yaklaşık 18 dakika sonra ise ortalama kabin havası sıcaklığı 30 °C'nin altına inmekte ve 90 dakika sonrasında TES modüllerinin soğuk tarafının yüzey sıcaklığı 22,2 °C'ye düşmektedir. Bu şekilde AMS Amenity XP kuvözünden kaybolan ısı transferi büyüklüğüne ve çevre ortamı sıcaklığına bağlı olarak, termoelektrikli kuvöz sisteminin soğutma gücü değişmektedir. Bu noktada özellikle çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda çalışan termoelektrikli kuvöz sistemlerinde, TES modüllerin soğuk tarafının yüzey sıcaklığı 30 °C'den aşağı düşmesine gerek kalmayacağı için soğutma gücünü belirleyen Peltier etki daha büyük olacaktır. Bu yüzden geliştirilen termoelektrikli kuvöz sisteminin, çevre sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda kuvözün soğutulmasını sağlayarak, istenilen hedefi başarabileceği öngörülmektedir. Ancak sistemin bu soğutma performansı, termoelektrikli kuvözün çalıştırıldığı çevre ortamı sıcaklığına ve kuvözden olan ısı transferi büyüklüğüne bağlı olarak değiştiği için bu şartlarda çalışacak bir kuvöz sistemindeki TE ısı pompası sisteminin, yeniden optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulgular ve tecrübeler ışığında, termoelektrikli kuvöz sistemlerinin modellenmesi ve geliştirilmesi konularına yönelik bundan sonra yapılabilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

1) TES modülün PWM ile çalıştırılması ve kontrol edilmesi, sistemin verimli bir şekilde çalışmasına olumsuz yönde etki ettiği için doğrudan sisteme DC gerilimi sağlayan TES denetleyicilerinin (TEC controller) kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu konuyu araştıran bir çalışma yapılabilir.

2) Bu tez kapsamında, sistemlerin sadece ısıtma ve soğutma performansları incelenmiştir. Kuvöz sistemlerinde, kabin içerisinde istenilen sıcaklığın oluşturulmasının yanında bağıl nem de önemlidir. Bu şekilde geliştirilen kuvöz sistemine bağıl nemin etkisi dâhil edilerek, araştırılabilir.

3) Bu çalışmada yapılan deneyler çevre sıcaklığı sabit bir değer ($25\pm 0,5$ °C) alınarak gerçekleştirilmiştir. Özellikle transport kuvözlerin kullanımını esnasında çevre sıcaklığı, kuvözün kullanıldığı coğrafi konuma ve mevsimlere göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla kuvözlerde çevre sıcaklığının etkisini dikkate alan bir çalışma yapılabilir.

4) Tez kapsamında geliştirilen termoelektrikli kuvöz sistemi, kuvözü ısıtma durumuna göre optimize edilerek tasarlanmıştır. Ancak bazı özel durumlar için kuvözün soğutma modunda çalıştırılması gerektiği belirtilmiştir. Bu durumlar için geliştirilen TE ısı pompası sisteminin soğutma performansının daha da artırılması gerekebilir. TES modüllerin soğutma modunda daha iyi soğutabilmeleri, TES modüllerinin ısının atıldığı taraflarındaki ortam şartlarına bağlıdır. Bu parametreye dikkate alarak geliştirilen TE ısı pompası sisteminin, soğutma performansı araştırılabilir.

5) Geliştirilen TE ısı pompası sistemi modifiye edilerek perioperatif hipotermi ve terapötik hipotermi durumlarında da kullanılabilir. Bu konuyu inceleyen bir çalışma yapılabilir.

8. KAYNAKLAR

Acunaş, B., Uslu, S. ve Baş, A. Y. “Türk Neonatoloji Derneği Yüksek Riskli Bebek İzlem Rehberi”, *Turkish Archives of Pediatrics*, 53, 180–195, (2018).

Adams, A. K., Ralph, A. N., Edward, F. B. and Cesar, A. E., “Use of infrared thermographic calorimetry to determine energy expenditure in preterm infants”, *Am J Clin Nutr*, 71, 969–977, (2000).

Ahmed, A., Cabello, J., Patel, D., Russo, D., Tseng, K., Facas, G. and Busha, B. F., “Low Cost Transportable Infant Incubator”, *Proc. IEEE Annu. Northeast Bioeng. Conf. NEBEC*, 165–166, (2013).

Allred, D. D., “SCT-93 short course on thermoelectrics: An overview of thermoelectricity”, *Technical Report*, The International Thermoelectric Society, (1993).

Altan, U., “Bulut Tabanlı Çoklu Akıllı Kuvöz İzleme Sistemi Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, (2019).

Al-Taweel, Y. A., “A simulation model of infant incubator feedback system with humidification and temperature control”, Master Thesis, *Auckland University of Technology*, Yeni Zelanda, (2006).

AMS Amenity XP, “AMS Amenity XP bebek kuvözü kullanım kılavuzu (revizyon 2)”, GE Klinik Sistemler Tic. A.Ş., Ankara, (2005).

Anatychuk, L. I. and Kobylyansky, R. R., “Thermoelectric device for treatment of radiculitis and spinal massage”, *9th European Conference on Thermoelectrics*, AIP Conf. Proc., 1449, 509-511, (2012).

Antonucci, R., Porcella, A. and Fanos, V., “The Infant Incubator in the Neonatal Intensive Care Unit: Unresolved Issues and Future Developments”, *J. Perinat. Med.*, 37, 587-598, (2009).

Armand, L., Stephane, D., Erhani, R., Glusko-Charlet, A., Durand, E., Haraux, E., Ghyselen, L., Libert, J. P. and Tourneux, P., “Warming the premature infant in the delivery room: Quantification of the risk of hyperthermia”, *Medical Engineering and Physics*, 59, 70-74, (2018).

Balaban, E., “Yenidoğan Yoğun Bakım Ünitesinde Prematüre Bebek Annelerine Verilen Eğitimin Anne Özgüvenine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Marmara Üniversitesi, İstanbul, (2016).

Ballıkaya, S., “CoSb₃ Bazlı Katkılı Skutteruditelerin Transport Özellikleri”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, (2010).

Bansal, H., Mathew, L. and Gupta, A., “Controlling of temperature and humidity for an infant incubator using microcontroller”, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4, 6, (2015).

Bayram, N., “Riskli pretermelerde transport edilen ve edilmeyen grupların morbidite ve mortalite yönünden karşılaştırılması”, *Uzmanlık Tezi*, Bakırköy Kadın Doğum ve Çocuk Hastalıkları Eğitim ve Araştırma Hastanesi, İstanbul, (2006).

Bell, E. F., “Infant incubators and radiant warmers”, *Early Human Development*, 8, 351-375, (1983).

Beşli, N., *Sayısal Elektronik Giriş Ders Notları-Yarıiletkenler*, Harran Üniversitesi, <http://eng.harran.edu.tr/~nbesli/>, (2012).

Bilgen, Y., “Band Teorisi ve Fermi-Dirac Dağılımı[online]”, (21 Mayıs 2020), <https://yusufbilgen.wordpress.com/2019/01/04/band-teorisi-ve-fermi-dirac-dagilimi/>, (2019).

Biswas, K., He, J., Zhang, Q., Wang, G., Uher, C., Dravid, V. P. and Kanatzidis, M. G., “Strained endotaxial nanostructures with high thermoelectric figure of merit”, *Nat. Chem.*, 3, 160-166, (2011).

Biswas, S. K., Mia, M. M. A., Islam, R. and Sinha, S., “Design of a low cost non electrical type baby incubator for developing country”, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7, 11, (2016).

Bureau of Energy Efficiency, “Energy performance assessment of fans and blowers[online]”, (11 Haziran 2019), <https://www.beeindia.gov.in/sites/default/files/4Ch6.pdf>.

Canbak, Y., “Çok düşük doğum ağırlıklı yeni doğanlarda mortalite ve morbidite oranları”, *Uzmanlık Tezi*, Okmeydanı Eğitim ve Araştırma Hastanesi Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Kliniği, İstanbul, (2009).

Cau, N., “A fluidodynamic and acoustic investigation of infant incubators”, Ph. D Thesis, *Dottorato Di Ricerca in Ingegneria Industriale*, University of Cagliari, Cagliari, (2010).

Champier, D., “Thermoelectric generators: A review of applications”, *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181, (2017).

Chapple, C. C., “An incubator for infants[online]”, (26 Kasım 2018), <http://www.neonatology.org/classics/chapple.html>, (1938).

Chen, A., “Thermal energy harvesting with thermoelectrics for self-powered sensors: with applications to implantable medical devices, body sensor networks and aging in place”, Ph. D. Thesis, *University of California*, Berkeley, ABD, (2011).

Clamond, M. C., “On a new thermoelectric pile”, *Journal of the Society of Telegraph Engineers*, 4(11), 253-257, (1875).

Çağlar, S., “Preterm bebeklerde doğum sonrası gelişen hipotermiyi önlemeye yönelik uygulanan girişimlerin etkinliği”, Doktora Tezi, *Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, (2011).

Çalışkan, Ş., “Yenidoğan ünitelerine özgü kuvöz tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2013).

Çengel, Y. A., *Isı ve Kütle Transferi (Pratik Bir Yaklaşım)*, İzmir: İzmir Güven Kitapevi, (2010).

Çınar, D. N. ve Dede, C., “Yenidoğanda Hipotermi”, *Fırat Sağlık Hizmetleri Dergisi*, 1(2), 76-82, (2006).

Das, S., Chakraborty, A., Ray, J. K., Bhattacharjee, S. and Neogi, B., “Study on different tuning approach with incorporation of simulation aspect for Z-N (Ziegler-Nichols) rules”, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2, 8, (2012).

Degorre, C., Décima, P., Dégrugilliers, L., Ghyselen, L., Bach, V., Libert, J. P. and Tourneux, P., “A mean body temperature of 37°C for incubated preterm infants is associated with lower energy costs in the first 11 days of life”, *Acta Paediatrica*, 104, 581-588, (2015).

Demirarslan, E., “Total diz artroplastisi yapılan hastalarda ameliyat sonrası hipotermi kontrolünde yün battaniye ile birlikte elektrikli battaniye kullanımının değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, *Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, (2015).

DiSalvo, F. J., “Thermoelectric cooling and power generation”, *Science*, 285, 703-706, (1999).

Dix, G. P., Dobry, J. T., Thaddeus J. and Guinn, P., “Snap-III-Thermoelectric generator radiological safety analysis”, *U.S. Atomic Energy Commission*, (1959).

Drager, “Neonatal Cooler – MiraCradle[online]”, (21 Mayıs 2020), https://www.draeger.com/en_za/Hospital/Neonatal-Therapeutic-Hypothermia/MiraCradle-Neonatal-Cooler, (2020).

Dresselhaus, M. S., Chen, G., Tang, M. Y., Yang, R., Lee, H., Wang, D., Ren, Z., Fleurial, J. P and Gogna, P., “New directions for low-dimensional thermoelectric materials”, *Adv. Mater.*, 19, 1043-1053, (2007).

Duru, M., “Terapötik hipotermi”, *XI Ulusal Acil Tip Kongresi*, Antalya, (2015).

Elimko, “Termokupllar İle İlgili Genel Bilgiler[online]”, (15 Eylül 2019), <http://www.elimko.com.tr/files/TermokupllarGenelBilgiler.pdf>.

EN 60601-2-19, “Medical electrical equipment - Part 2-19: Particular requirements for the basic safety and essential performance of infant incubators”, *Standart*, (2011).

Feki, E., Zermani, M. A. and Mami, A., “GPC temperature control of a simulation model infant-incubator and practice with arduino board”, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8, 6, (2017).

Ferreira, M. S. and Yanagihara, J. I. “A Transient Three-Dimensional Heat Transfer Model of the Human Body”, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 36, 718–724, (2009).

Fred, C., Ford, S., Wagner, D. and Vanbrackle, L., “Intraoperatively Acquired Pressure Ulcers and Perioperative Normothermia: A Look at Relationships”, *AORN Journal*, 251-260, (2012).

Gentherm Incorporated, “User guide climate control sleep for You and Me[online]”, (20 Haziran 2017), http://www.gentherm.com/sites/default/files/files/Gentherm_White_MCU_Kit.pdf, (2010).

Gentherm, “Kool-Kit Neonate | Hyper-Hypothermia | Gentherm[online]”, (19 Ekim 2019), <https://www.gentherm.com/en/medical/hyper-hypothermia/kool-kit-neonate>.

Ginalski, M. K., Nowak, A. J. and Wrobel, L.C., “Modelling of heat and mass transfer processes in neanatology”, *Biomedical Materials*, 3, 034113, (2008).

Ginevri, “Incubators: how to choose the best, Ginevri sensible guide to the choice of an Incubator”, *Report*, (2010).

Goldsmid, H. J. and Douglas, R. W., “The use of semiconductors in thermoelectric refrigeration”, *British J. Appl. Phys.*, 5, 386, (1954).

Goldsmid, H. J., *Electronic Refrigeration*, Pion Limited, London, (1986).

Goldsmid, H. J., *Introduction to Thermoelectricity*, Dordrecht: Springer, (2010).

Gökmen, Z., “Perinatal Asfiksi ve Doğum Travmaları”, *Turkiye Klinikleri J Fam Med-Special Topics*, 9(1), 37-40, (2018).

Gören, A., “Kontrol Sistemleri: Kontrolcüler[online]”, (11 Eylül 2019), Docplayer. <https://docplayer.biz.tr/12043081-Kontrol-sistemleri-kontrolculer-yrd-doc-dr-aytac-goren.html>.

Gray, P. H., Paterson, S., Finch, G. and Hayes, M., “Cot-nursing using a heated, water-filled mattress and incubator care: A randomized clinical trial”, *Acta Paediatrica*, 93, 350-355, (2004).

Gross, L. W. and Schramm, J. E., “Snap-III-Thermoelectric generator environmental test volume-III”, *Martin Nuclear Division*, (1960).

Güler, N. F. and Ahiska, R., “Design and testing of a microprocessor-controlled portable thermoelectric medical cooling kit”, *Applied Thermal Engineering*, 22, 1271–1276, (2002).

Halıcı, F. ve Gündüz, M., *Örneklerle Isı Geçişi/Isı Transferi*, İstanbul: Birsen Yayınevi, (2013).

Harman, T. C., Walsh, M. P., Laforge, B. E. and Turner, G. W. “Nanostructured thermoelectric materials”, *J. Electron. Mater.*, 34(5), 19-22, (2005).

Hicks, L. D. and Dresselhaus, M. S., “Effect of quantum-well structures on the thermoelectric figure of merit”, *American Physical Society, Physical Review B*, 47-12727, (1993).

Holman, J. P., *Experimental Methods For Engineers (8th ed)*, New York: McGraw-Hill, (2012).

Hsu, K. F., Loo, S., Guo, F., Chen, W., Dyck, J. S., Uher, C. and Kanatzidis, M. G., “Cubic $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$: bulk thermoelectric materials with high figure of merit”, *Science*, 303, 818, (2004).

Ioffe, A. F., *Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling*, London:

Infosearch Limited, (1957).

Ishak, M. D. N. F., Jamil, A. M. M. and Ambar, R., “Arduino Based Infant Monitoring System”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 226, 1-6, (2017).

Javed, H. and Mahmood, A., “A Study of Thermodynamics and Bond Graph Modelling of Evaporation in Infant Incubator, *IEEE*, (2013).

Joseph, J. V., “Dysmaturation of Premature Brain: Importance, Cellular Mechanisms, and Potential Interventions”, *Pediatric Neurology*, 95, 42-66, (2019).

Kapıdere, M., “Mikrodenetleyici kontrollü termohipoterm tıp cihazı ve gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2005).

Karamitaheri, H., “Thermal and Thermoelectric Properties of Nanostructures”, Ph. D. Thesis, *Technischen Universität Wien*, Wien, (2013).

Kingdon, C. C., Mitchell, F., Bodamer, O. A. F. And Williams, A. F., “Measurement of carbon dioxide production in very low birth weight babies”, *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed.*, 83: F50–F55, (2000).

Knobel, R. B., “Thermal Stability of the Premature Infant in Neonatal Intensive Care”, *Newborn Infant Nurs. Rev.*, 14, 72–76, (2014).

Knobel, R. B., Holditch-Davis, D. and Schwartz, T. A., “Optimal body temperature in transitional extremely low birth weight infants using heart rate and temperature as indicators”, *Journal of Obstetric, Gynecologic, and Neonatal Nursing*, 39, 3-14, (2010).

Korones, S. B., “An Encapsulated History of Thermoregulation in the Neonate”, *NeoReviews*, 5(3), 78-85, (2004).

Kowal, C. D. and Bertino, J. R., “Possible Benefits of Hyperthermia to Chemotherapy”, *Cancer Research*, 39, 2285 –2289, (1979).

Kösa, E. ve Çınar, N., “Prematüre bebeklerde hipotermimin önlenmesi: plastik örtü kullanımı”, *Balikesir Sağlık Bilimleri Dergisi*, (2014).

Krucińska, I., Skrzetuska, E. and Kowalski, K., “Application of a Thermal Mannequin to the Assessment of the Heat Insulating Power of Protective Garments for Premature Babies”, *Autex Research Journal*, 19, 134-146, (2019).

Kuşdemir, A. T., “Açık batın cerrahisinde perioperatif hipoterminin önlenmesi açısından üç farklı hasta ısıtma yönteminin karşılaştırılması”, *Uzmanlık Tezi, Cerrahpaşa Tıp Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul*, (2015).

Kutman, H. G. K., Oğuz, Ş. S. ve Uraş, N., “Altın Dakikalar: Prematüre Bebeğin Doğum Salonunda Yönetimi”, *Jinekoloji-Obstetrik ve Neonatoloji Tıp Dergisi*, 12(4), 162-166, (2015).

Lacoste, R., “PID control without math”, *Circuit Cellar*, 221,54-61, (2008).

LeBlanc, M. H., “The physics of thermal exchange between infants and their environment”, *AAMI Technology Assessment Report*, 21, 11-15, (1987).

Lee, H., *Thermal Design Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers and Solar Cells*, John Wiley & Sons, Inc, (2010).

Lee, H., *Thermoelectrics Design and Materials*, ABD: John Wiley& Sons Ltd, (2017).

Li, H., Tang, X., Zhang, Q. and Uher, C., “High performance $\text{In}_x\text{Ce}_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$ thermoelectric materials with in situ forming nanostructured InSb phase”, *Appl. Phys. Lett.*, 94, 102114, (2009).

Lieberman, H., “Incubator Baby Shows: a Medical and Social Frontier”, *Soc. Hist. Educ.*, 35, 81–88, (2001).

Lorthe, E., Torchin, H., Delorme, P., Ancel, P. Y., Marchand-Martin, L., Foix-L'Hélias, L., Benhammou, V., Gire, C., d'Ercole, C., Winer, N., Sentilhes, L., Subtil, D., Goffinet, F. and Kayem, G., “Preterm premature rupture of membranes at 22–25 weeks' gestation: perinatal and 2-year outcomes within a national population-based study (EPIPAGE-2)”, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 219, 298.e1-298.e14, (2018).

Mackey, J. A., “Thermoelectric energy conversion: Advanced thermoelectric analysis and materials development”, Ph. D. Thesis, *The University of Akron*, ABD, (2015).

Mamur, H., “Termoelektrik jeneratörün elektriksel, termoelektriksel ve ısı parametrelerinin incelenmesi için bilgisayarlı bir veri edinim ve test sisteminin gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara*, (2013).

Marlow, “Products-Power Generators[online]”, (21 Mayıs 2020), <https://www.marlow.com/products/power-generators>, (2020).

Mccall, E. M., Alderdice, F., Halliday, H. L., Vohra, S. and Johnston, L.,

“Interventions to prevent hypothermia at birth in preterm and/or low birth weight infants”, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (2018).

McLean, D. A., “The use of cold and superficial heat in the treatment of soft tissue injuries”, *British Journal of Sports Medicine*, 23, 53–54, (1989).

Meerstetter Engineering, “Meerstetter - Videos | Compendium[online]”, (19 Ekim 2019), <https://www.meerstetter.ch/compendium/videos>.

Molgat-Seon, Y., Daboval, T., Chou, S. and Jay, O., “Assessing neonatal heat balance and physiological strain in newborn infants nursed under radiant warmers in intensive care with fentanyl sedation”, *European Journal of Applied Physiology*, 114, 2539-2549, (2014).

Nayeri, F. and Nili, F., “Hypothermia at birth and its associated complications in newborns: a follow up study”, *Iranian J Publ Health*, 35(1), 48-52, (2006).

Nisha, Z. A. and Elahi, A. H. M. F., “Low cost neonatal incubator with smart control system”, *IEEE*, 978-1-4799-6399-7, (2014).

Nolas, G. S., Slack, G. A., Cohn, J. L. and Schujman, S. B., “The next generation of thermoelectric materials”, *Proceedings of the 17th International Conference on Thermoelectrics*, 294-297, (1998).

Nourani, A., Ayatollahi, H. and Mirnia, K., “A Smart Phone Application for the Mothers of Premature Infants”, *Innovation and Research in BioMedical Engineering*, 40, 263-269, (2019).

Okumuş, N., “Türkiye’de Yoğun Bakım Hizmetlerinin Gelişimi ve Planlama Sunumu [online]”, (15 Haziran 2019), http://www.yogunbakim.org.tr/yb2016/sunum/N_OKUMUS.pdf, (2016).

Onalo, R., “Neonatal hypothermia in sub-Saharan Africa: A review”, *Nigerian Journal of Clinical Practice*, 16, 129-138, (2013).

Özçavıt, Ç., “PID Denetleyiciler[online]”, (09 Eylül 2019), ElektrikPort. <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/pid-denetleyiciler/11787#ad-image-0>.

Özdemirci, E., “Yenidoğan Kuvözleri İçin Performans Test Ünitesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilişim Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2013).

Özgün, H., “Termoelektrik Jeneratörlerin Çok Düşük Sıcaklıklarda Teorik ve Deneysel Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Enerji Enstitüsü*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, (2009).

P&N Technology, “Thermoelectric Module- Standart Module[online]”, (19 Eylül 2019), <http://www.pengnantech.com/thermoelectric-module-TEC1-127140.html>.

Peltier, J. C. A., “Nouvelles experiences sur la caloricité des courants électrique”, *Annales de Chimie et de Physique*, 56, 371-386, (1834).

Pierre, F. P. P., Gueguen, A., Wu, C., Hogan, T. and Kanatzidis, M. G., “High figure of merit in nanostructured n-type $KPb_{m}SbTe_{m+2}$ thermoelectric materials”, *Chem. Mater.*, 22, 1046-1053, (2010).

Polozine, A., Sirotinskaya, S. and Schaeffer, L., “History of development of thermoelectric materials for electric power generation and criteria of their quality”, *Materials Research*, 17(5), 1260 – 1267, (2014).

Rhyee, J. S., Lee, K. H., Lee, S. M., Cho, E., Kim, S. I., Lee, E., Kwon, Y. S., Shim, J. H. and Kotliar, G., “Peierls distortion as a route to high thermoelectric performance in $In_4Se_{3.8}$ crystals”, *Nature*, 459, 965-968, (2009).

RMT Ltd, “Application Tips | RMT Ltd[online]”, (19 Ekim 2019), http://www.rmtltd.ru/technology/tips/dc_or_pwm.php.

Rojas, R. D., Bell, E. F. and Dove, E. L., “A mathematical model of premature baby thermoregulation and infant incubator dynamics”, *Transactions on Biomedicine and Health*, 3, 1743-3525, (1996).

Rosenberg, Y., Gelbstein, Y. and Dariel, M. P., “Phase separation and thermoelectric properties of the $Pb_{0.25}Sn_{0.25}Ge_{0.5}Te$ compound”, *J. Alloys Compd.*, 526, 31-38, (2012).

Rowe, D. M., *CRC Handbook of Thermoelectrics*, ABD: CRC Press LLC, (1995).

Rowe, D. M., *Thermoelectric Handbook: Macro to Nano*, ABD: Taylor & Francis Group LLC, (2006).

Sağlık Bakanlığı, “67414668-610 Sayılı Yazılı Soru Önergesi Cevaplandırılması [online]”, (19 Aralık 2017), Sağlık Bakanlığı Türkiye Halk Sağlığı Kurumu, <http://www2.tbmm.gov.tr/d24/7/7-19609sgc.pdf>, (2014).

- Sağlık İstatistikleri, “Sağlık İstatistikleri Yıllığı 2018[online]”, (15 Haziran 2019), <https://www.saglik.gov.tr/TR,62400/saglik-istatistikleri-yilligi-2018-yayinlanmistir.html>, (2018).
- Sallam, A. T., “Kuvöz Analiz Cihazı Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, (2018).
- Sambrook, J. and Russell, D., *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*, Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 3rd ed., (2001).
- Sauer, P. J. J., Dane, H. J. and Visser, H. K. A., “New standards for neutral thermal environment of healthy very low birth-weight infants in week one of life”, *Arch Dis Child*, 59, 18-22, (1984).
- Schwartz, H. J. and Shure, L. I., “Survey of electric power plants for space applications”, *Fifty-Eight National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers*, Philadelphia, (1965).
- Scopes, J. W., “Measurement in neonatal pediatrics: The external environment of the newborn baby”, *Proc. R. Soc. Med.*, 60, 1102-1105, (1967).
- Seebeck, T. J., “Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz, abhandlungen der physikalischen klasse der königlichen akademie derwissenschaften zu berlin, aus den jahren 1822 und 1823”, *Technical report*, Academy of Sciences in Berlin, (1821).
- Selek, M. H., “Raspberry Pi Kullanılarak Bebek Kuvözü İzleme Sistemi Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, (2018).
- Seo, J. H., “Medical chilling device designed for hypothermic hydration graft storage system: Design, thermohydrodynamic modeling, and preliminary testing”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(2), 571-577, (2015).
- Shraddha, D., “Convulsion and neonatal hyperthermia[online]”, (19 Ekim 2019), <https://www.slideshare.net/TheShraddha/convulsion-and-neonatal-hyperthermia-99361330>.
- Simon, B. N., “Computer simulation of infant-incubator system dynamics”, *Department of Biomedical Engineering*, The University of Akron: Akron, Ohio, p. 163, (1991).
- Simon, B. N., Reddy, N. P. and Kantak, A., “A theoretical model of infant incubator dynamics”, *Journal of Biomechanical Engineering*, 116, 263-269, (1994).

Singla, S. K. and Singh, V., “Design of a Microcontroller Based Temperature and Humidity Controller for Infant Incubator”, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 5, 704–708, (2015).

Snyder, G. J. and Toberer, E. S., “Complex thermoelectric materials”, *Nat.Mater.*, 7, 105-114, (2008).

Sodemann, M., Nielsen, J., Veirum, J., Jakobsen, M. S., Bial, S. and Aaby, P., “Hypothermia of newborns in associated with excess mortality in the first 2 months of life in Guinea- Bissau, West Africa”, *Tropical Medicine and International Health*, 13(8), 980-986, (2008).

SRM (Sri Ramaswami Memorial) Üniversitesi, “Therapeutic&Surgical Instruments, Baby incubator, radiant warmer and photo therapy unit [online]”, (14 Kasım 2017), http://www.srmuniv.ac.in/sites/default/files/downloads/unit_1_incubator_radiant_warmer_phototherapy_unit.pdf.

Stolwijk, J., “Mathematical model of thermoregulation”, *Physiological and Behavioral Temperature Regulation*, Springfield, (1970).

Şırın, M., “Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri[online]”, (15 Mayıs 2019), <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/kapali-cevrim-kontrol-sistemleri/16465#ad-image-0>, (2019).

Teertstra, P., Yovanovich, M. M. and Culhamet, J. R., “Analytical forced convection modeling of plate fin heat sinks”, *Fifteenth IEEE Semi-Therm Symposium*, 34-41, (1999).

Telkes, M., “The efficiency of thermoelectric generators. I.”, *Journal of Applied Physics*, 18(12), 1116-1127, (1947).

Thomson, W., “Account of researches in thermo-electricity”, *Proceedings of the Royal Society of London*, 7, 49-48, (1854).

Tol, Ö., “Mikrodenetleyici kontrollü bebek kuvözü tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Selçuk Üniversitesi, Konya, (2005).

Ultman, J. S., “Computational model for insensible water loss from the newborn”, *Pediatrics*, 79, 760-765, (1987).

Wang, F. J., Chang, J. C., Lin, K. C. and Yau, Y. H., “Performance testing of a thermoelectric cooler for medical application”, *Advanced Materials Research*, 255-260, 1537-1540, (2011).

- Watkinson, M., “Temperature control of premature infants in the delivery room”, *Clinics in Perinatology*, 33, 43–53, (2006).
- Weirich, T. L., “Hypothermia/Warming Protocols: Why Are They Not Widely Used in the OR?”, *AORN Journal*, 87, 333-344, (2008).
- Wescott, T., “PID without a PhD”, *Embedded Systems Programming*, 86-108, (2000).
- Wheldon, A. E. and Rutter, N., “The heat balance of small babies nursed in incubators and under radiant warmer”, *Early Human Development*, 6, 131-143, (1982).
- World Health Organization (WHO), “Thermal protection of the newborn: a practical guide [online]”, (19 Aralık 2017), Maternal and Newborn Health-Safe Motherhood Unit Division of Reproductive Health, Geneva, Switzerland, http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/63986/1/WHO_RHT_MSM_97.2.pdf, (1997).
- World Health Organization (WHO), “WHO Recommendations on Interventions to Improve Preterm Birth Outcomes”, *Report*, (2015).
- World Health Organization (WHO), “WHO-Born Too Soon: The Global Action Report on Preterm Birth”, *Report*, (2012).
- Wrobel, L. C., Ginalski, M. K., Nowak, A. J., Ingham, D. B. and Fic, A. M., “An overview of recent applications of computational modelling in neonatology”, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368, 2817–2834, (2010).
- Yamashita, O., Ochi, T. and Odahara, H., “Effect of the cooling rate on the thermoelectric properties of p-type $(\text{Bi}_{0.25}\text{Sb}_{0.75})_2\text{Te}_3$ and n-type $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.94}\text{Se}_{0.06})_3$ after melting in the bismuth-telluride system”, *Mater. Res. Bull.*, 44, 1352-1359, (2009).
- Yavuz, A. H., “Bulanık mantık denetimli termoelektrik beyin soğutucusu”, Doktora Tezi, *Bilişim Enstitüsü*, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2009).
- Yavuz, C., Yılmaz, S. ve Kaya, M., “The design of computer controlled cold and hot therapy device with thermoelectric module”, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 3, 221–226, (2013).
- Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Optimization and Experimental Validation of a Modular Thermoelectric Heat Pump System for a Premature Baby Incubator”, *Journal of Electronic Materials*, 49, 4053–4066, (2020^a).

Yigit, A., “The Computer-Based Human Thermal Model”, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 25, 969–977, (1998).

Yilmazoglu M. Z. and Biyikoglu, A., “A Newborn Incubator with a Laminar Flow Unit”, *ASHRAE Winter Conference Papers*, (2017).

Yüzden, G. E., “Ameliyat döneminde aktif ve pasif ısıtmanın istenmeyen hipotermi üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bolu, (2016).

Zaylaa, A. J., Rashid, M., Shaib, M. and El Majzoub, I., “A Handy Preterm Infant Incubator for Providing Intensive Care: Simulation, 3D Printed Prototype, and Evaluation”, *J. Healthc. Eng.*, 1-14, (2018).

Zenciroğlu, A. ve Koç, O., “Sağlık Bakanlığı Yenidoğan Yoğun Bakım Hemşireliği Kurs Kitapçığı”, *Sağlık Bakanlığı*, Ankara, 167-174, (2013).

Zermani, M. A., Feki, E. and Mami, A., “Building Simulation Model of Infant-Incubator System with Decoupling Predictive Controller”, *Irbm.*, 35, 189–201, (2014).

Zhao, D. and Tan, G., “A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications”, *Applied Thermal Engineering*, 66, 15-24, (2014).

EKLER

9. EKLER

EKA - Termoelektrikli Prematüre Bebek Kuvöz Sisteminin Matematiksel

Modelleme Kodu

```
clc
clear all

m=4;           %Bebegin kütle (kg)
M_dmh=24.8;    %1 haftalik bebegin nötral ortam şartlarındaki dinlenme
               %metabolizma hızı (W/m2)
EHH=3.333;    %Esinlenilmiş hava hacmi (ml/kg.s)
GA=28;        %Bebegin gestasyonel yaşı (hafta)
age=1;        %Bebegin doğumdan sonraki yaşı (gün)
fi_cikis=100; %Solunan havanın çıkış bağıl nemi (%)
fi_giris=30;  %Solunan havanın giriş bağıl nemi (%)
bf=0.00353;  %Kan akış hızı parametresi (1/s)
f=0.045;     %Sürtünme faktörü
O2_ilave=0;  %ilave O2 miktarı (%)
h_fg=2419000; %35 C'deki suyun gizli ısı (J/kg)
P_t=101.325; %25 C'deki atmosfer basıncı (kPa)
D_kure=0.08; %yaklaşık bebek çapı (m)
g=9.81;      %yer çekimi ivmesi (m^2/s)
V_hh=0.03;   %hava hızı (m/s)

%Bebegin ihtiyaç duyduğu ısı miktarının belirlenmesinde kullanılan deneysel ölçüm
%ısıcaklıkları
T_ccs= 36.7;  %Çekirdek sıcaklığı (C)
T_cs= 35;     %Cilt sıcaklığı (C)
T_hs= 36.5;  %Kabin içi tutulması istenen hava sıcaklığı (C)
T_cccv=25;   %Kuvözü yerleştirilen ortamın sıcaklığı (C)
T_ys=T_hs;   %Yatak sıcaklığı (C)
T_dsi=31.7;  %Duvarın iç yüzey sıcaklığı (C)
T_dsd=30.7;  %Duvarın dış yüzey sıcaklığı (C)
T_ds=(T_dsi+T_dsd)/2; %Duvar sıcaklığı (C)
T_khs=T_hs;  %Kabin ortamına geri dönen havanın sıcaklığı (C)
T_O2=25;     %Oksijen gazının sıcaklığı (C)
th_c=0.0005; %Cilt kalınlığı (m)

%Durum değişkenleri için başlangıç koşulları
T_ccsi = 36.7; % Çekirdek sıcaklığı başlangıç değeri (C)
T_csi = 35;   % Deri sıcaklığı başlangıç değeri (C)
T_hsi = 36.5; % Kabin hava sıcaklığı başlangıç değeri (C)
T_ysi = T_hsi; % Yatak sıcaklığı başlangıç değeri (C)
T_dsii = 31.2; % Kabin duvarları sıcaklığı başlangıç değeri (C)
```

%Deneyssel olarak ölçülen hacimsel debiler

Fi_kh=0.002756; %Kabin ortamına geri dönen havanın hacimsel debisi (m³/s)
Fi_ccev=0.001936; %Çevre (taze) havanın hacimsel debisi (m³/s)
Fi_O2 =0; %Oksijen gazının hacimsel debisi (m³/s)

%İdeal gaz sabitleri

R_O2=0.2598; %kj/kg.K
R_N2=0.2968; %kj/kg.K
R_u=8.3144; %Üniversel gaz sabiti (kJ/kmol.K)

%Deneyssel ölçülen kuvöz boyutları

th_y=0.02735; %Yatak kalınlığı (m)
th_d=0.006; %Pleksiglas malzemesinin kalınlığı (m)

%Kabin ölçüleri

W=45; L=89; H=49.5; % cm

%Yatak ölçüleri

WW=31.5; LL=60; % cm
m_y=0.2575; % Yatağın (Şilte) kütlesi (kg)

%Işınım katsayıları

sigma=5.67*10⁻⁸; %Stephan-Boltzmann sabiti (W/m².K⁴)
epsilon_c=1.00; %cildin ışınım yayılım katsayısı
epsilon_d=0.86; %kabin duvarlarının ışınım yayılım katsayısı

%Havanın viskozite değerleri

Mu_h=1.895*10⁻⁵; %35 'deki havanın dinamik viskozitesi (kg/m.s)
Mu_c=1.8996*10⁻⁵; %36 C (cilt yüzey sıcaklığındaki) havanın dinamik viskozitesi (kg/m.s)
Mu_kyh=1.849*10⁻⁵; % 25 C (kabin duvarı yüzey sıcaklığındaki)havanın dinamik viskozitesi (kg/m.s)
V_kinematik=1.608*10⁻⁵; %30 C'deki havanın kinematik viskozitesi (m²/s)

%Çeşitli ısı iletim katsayıları

K_ccik=0.51; %Çekirdek ısı iletim katsayısı (W/m.C)
K_yik=0.04184; %yatağın ısı iletim katsayısı (W/m.C)
K_hik=0.02625; %35 C'deki havanın ısı iletim katsayısı (W/m.C)
K_plex=0.2; %pleksiglas malzemesinin ısı iletim katsayısı (W/m.C)

%Çeşitli özgül ısılar

Cp_h=1007; %35 C'deki havanın özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_k=3840; %kanın özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_plex=1297; %pleksiglas malzemesinin özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_cc=3470; % çekirdeğin özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_c=3766; % derinin özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_y=1757; % yatağın (şilte) özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_kh=Cp_h; %Kabin ortamına geri dönen havanın özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_ccev=Cp_h; %Çevre (taze) havasının özgül ısısı (J/kg.C)

Cp_mix=Cp_h; %Karışan (Geri dönen hava+çevre(taze) hava+oksijen) havanın
özgül ısısı (J/kg.C)
Cp_O2=925.2; %25 C'deki O2 özgül ısısı (J/kg.C)

%Çeşitli yoğunluklar

ro_h=1.145*10^-6; %35 C'deki havanın yoğunluğu (kg/ml)
ro_cc=1080; %çekirdek yoğunluğu (kg/m^3)
ro_k=1.06*10^-3; %kan yoğunluğu (kg/ml)
ro_c=1000; %cilt yoğunluğu (kg/m^3)
ro_su=0.001; %suyun yoğunluğu (kg/ml)
ro_plex=1190; %pleksiglas malzemesinin yoğunluğu (kg/m^3)
ro_kh=ro_h*10^6; %Kabin ortamına geri dönen havanın yoğunluğu (kg/m^3)
ro_ccev=ro_h*10^6; %Çevre havasının yoğunluğu (kg/m^3)
ro_O2=1.355; %15 C'deki O2 yoğunluğu (kg/m^3)

%%%%%% BEBEĞİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ %%%%%%%%%%%
%%%%%% ÇEKİRDEK TABAKASININ MODELLEMESİ %%%%%%%%%%%

S_bya=m^0.75/10.8; %Bebeğin yüzey alanı (m^2)
Q_met=M_dmh*S_bya %Metabolizma ısısı üretim hızı (W)
T_shcc=T_ccs; %Solunan havanın çıkış sıcaklığı (C)
T_shg=T_hs; %Solunan havanın giriş sıcaklığı (C)
Q_s_duyulur=EHH*m*Cp_h*ro_h*(T_shcc-T_shg) %Bebeğin solunumundan
dolayı oluşan duyulur ısı transfer hızı (W)

P_doyma_cikis=0.133*(2.234*T_ccs-18.104); %Çıkan hava içerisindeki suyun
doyma basıncı (kPa)
P_doyma_giris=0.133*(2.234*T_hs-18.104); %Giren hava içerisindeki suyun
doyma basıncı (kPa)
P_su_buhari_cikis=P_doyma_cikis*(fi_cikis/100); %Çıkan havanın su buharının
kısmi basıncı (kPa)
P_su_buhari_giris=P_doyma_giris*(fi_giris/100); %Giren havanın su buharının
kısmi basıncı (kPa)
W_shcc=(0.622*P_su_buhari_cikis)/(P_t-P_su_buhari_cikis); %Solunan havanın
çıkış mutlak nemi (kg su buharı/ kg kuru hava)
W_shg=(0.622*P_su_buhari_giris)/(P_t-P_su_buhari_giris); %Solunan havanın
giriş mutlak nemi (kg su buharı/ kg kuru hava)
Q_s_gizli=EHH*m*h_fg*ro_h*(W_shcc-W_shg) %Bebeğin
solunumundan dolayı oluşan gizli ısı transfer hızı (W)
Q_dci=((T_ccs-T_cs)*K_ccik*S_bya)*(ro_cc*S_bya)/m %Bitişik tabakalar
(dokular) ile cilde iletimle olan ısı transfer hızı (W)
V_kh=80*m;
Q_cckt=(T_ccs-T_cs)*ro_k*bf*Cp_k*V_kh %Bebek çekirdek tabakasından kan
ile taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

m_c=th_c*ro_c*S_bya; %Cilt kütlesi (kg)
m_cc=m-m_c; %Çekirdek kütlesi (kg)

Q_cc_net=Q_met-Q_s_duyulur-Q_s_gizli-Q_dci-Q_cckt %Çekirdek tabakasından
olan net ısı transfer hızı (W)

%% CİLT (DERİ) TABAKASININ MODELLEMESİ %%%

A_cyt=0.1*S_bya; %Yatak ile temas eden cildin yüzey alanı (m²)

Q_cyi=A_cyt*K_yik*(T_cs-T_ys)/th_y %Cilt ve yatak arasında iletimle olan ısı transfer hızı (W)

Re_kctk=(ro_h*10⁶*V_hh*D_kure)/Mu_h; %Cilt ve kuvöz ortamı arasındaki Re sayısı

Pr_kctk=Mu_h*Cp_h/K_hik; %Cilt ve kuvöz ortamı arasındaki Pr sayısı

Nu_kctk=2+((0.4*Re_kctk^(0.5)+0.06*Re_kctk^(2/3))*Pr_kctk^(0.4)*(Mu_h/Mu_c)^(1/4)); %Cilt ve kuvöz ortamı arasındaki Nu sayısı

h_kctk=Nu_kctk*K_hik/D_kure %Cilt ve kuvöz ortamı arasındaki ısı taşınım sayısı (W/m².C)

A_kmy=0.9*S_bya; %Kabin içerisindeki havaya maruz kalan bebeğin yüzey alanı (m²)

Q_kct=h_kctk*A_kmy*(T_cs-T_hs) %Cilt ve kuvöz ortamı arasında taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

P_doyma=(2.234*T_hs-18.104); %Hava içerisindeki suyun doyma basıncı (Torr)

P_H2O=P_doyma*(fi_giris/100); %Suyun kısmi basıncı (Torr)

Buharlasma=(6.5*exp(168/(age+11.8))*exp(-5.2*GA/(age+12.2))+4.8)*(2-(P_H2O/23));

Q_ckb=h_fg*m*Buharlasma*ro_su/86400 %Cilt ve kuvöz ortamı arasında buharlaşmayla olan ısı transfer hızı (W)

A_i=0.9*0.55*S_bya; %Kabin duvarlarını gören bebeğin yüzey alanı (m²)

Q_cki=A_i*sigma*epsilon_c*((T_cs+273.15)⁴-(T_ds+273.15)⁴) %Cilt ve kuvöz (kabin) duvarları arasında ışınlama ile olan ısı transfer hızı (W)

Q_c_net=Q_dci+Q_cckt-Q_cyi-Q_kct-Q_ckb-Q_cki %Cilt tabakasından olan net ısı transfer hızı (W)

%% KUVÖZ KABİNİNİN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ %%%

h_kdt=6.94 %Kabin ortamı duvarlar arasındaki ısı taşınım sayısı (W/m².C)

A_kdy=(2*H*10⁻²*L*10⁻²)+(2*W*10⁻²*H*10⁻²)+(W*10⁻²*L*10⁻²);

%Kabin duvarlarının toplam yüzey alanı (m²)

Q_kdt=h_kdt*A_kdy*(T_hs-T_ds) %Kuvöz ortamı ve kabin duvarları arasında gerçekleşen taşınım ile ısı transfer hızı (W)

A_yat=WW*10⁻²*LL*10⁻²; %Yatağın alanı (m²)

A_net=A_yat-A_cyt; %Bebek tarafından kaplanmayan yatağın alanı (m²)

Q_kyt=h_kdt*A_net*(T_hs-T_ys) %Kuvöz ortamı (havası) ve yatak arasında olan taşınım ile ısı transfer hızı (W)

Q_ht=0; %TE sistem çıkışı kuvöz ihtiyacını karşılayan ısı transfer hızı (W)

Q_kabin_net=Q_kct+Q_ckb+Q_ht+Q_s_gizli+Q_s_duyulur-Q_kdt-Q_kyt %Kabin ortamındaki net ısı transfer hızı (W)

%% KABİN DUVARLARININ MATEMATİKSEL MODELLEMESİ%%

$A_{kd}=(2*H*10^{-2}*L*10^{-2})+(2*W*10^{-2}*H*10^{-2})+(W*10^{-2}*L*10^{-2});$

%Kabin duvarlarından (Hafif eğimli yüzey ihmal edilerek) ısının geçtiği toplam kesit alanı (m²)

$Q_{di}=K_{plex}*A_{kd}*(T_{dsi}-T_{dsd})/(th_d)$ %Kabin duvarlarından çevreye iletimle ısı transfer hızı (W)

%%Kabinin yatay (Üst) yüzey

$T_{ort}=(T_{dsd}+T_{ccev})/2;$ %Dış ortam film sıcaklığı (C)

$Beta=1/(T_{ort}+273);$ %Hacimsel genleşme katsayısı (1/K)

$Acc=L*10^{-2}*W*10^{-2};$ %Akışın temas ettiği yüzey alanı (m²)

$PP=2*(L+W)*10^{-2};$ %Akışın temas ettiği yüzeyin çevresi (m)

$L_{c_yatay}=Acc/PP;$ %Akışı temsil eden karakteristik uzunluk (m)

$Grashof_yatay=(g*Beta*(T_{dsd}-T_{ccev}))*(L_{c_yatay})^3/(V_{kinematik})^2;$

%Yatay yüzeydeki Grashof sayısı

$Pr_{yatay}=\mu_h*Cp_h/K_{hik};$ %Yatay yüzeydeki Prandtl sayısı

$Ra_{yatay}=Grashof_yatay*Pr_{yatay};$ %Yatay yüzeydeki Rayleigh sayısı

$Nu_{yatay}=0.27*(Ra_{yatay})^{(1/4)};$ %Yatay yüzeydeki Nusselt sayısı

$h_{dcct_yatay}=Nu_{yatay}*K_{hik}/L_{c_yatay}$ %Yatay yüzeydeki doğal taşınım ısı taşınım katsayısı (W/m².K)

%%Kabinin düşey kısa kenar

$L_{c_dusey_kisa}=49.5*10^{-2};$ %Akışı temsil eden karakteristik uzunluk (m)

$Grashof_dusey_kisa=(g*Beta*(T_{dsd}-T_{ccev}))*(L_{c_dusey_kisa})^3/(V_{kinematik})^2;$ %Düşey kısa yüzeydeki Grashof sayısı

$Pr_{dusey_kisa}=\mu_h*Cp_h/K_{hik};$ %Düşey kısa yüzeydeki Prandtl sayısı

$Ra_{dusey_kisa}=Grashof_dusey_kisa*Pr_{dusey_kisa};$ %Düşey kısa yüzeydeki Rayleigh sayısı

$Nu_{dusey_kisa}=(0.825+((0.387*(Ra_{dusey_kisa})^{(1/6)}))/(1+(0.492/Pr_{dusey_kisa})^{(9/16)})^{(8/27)}))^{(1/2)};$ %Düşey kısa yüzeydeki Nusselt sayısı

$h_{dcct_dusey_kisa}=Nu_{dusey_kisa}*K_{hik}/L_{c_dusey_kisa}$ %Düşey kısa yüzeydeki doğal taşınım ısı taşınım katsayısı (W/m².K)

%%Kabinin düşey uzun kenar

$h_{dcct_dusey_uzun}=h_{dcct_dusey_kisa}$ %Düşey uzun yüzeydeki doğal taşınım ısı taşınım katsayısı (W/m².K)

%%Doğal taşınım mekanizmasıyla çevreye olan ısı transferleri miktarları

$A_{dcct_yatay}=89*10^{-2}*42*10^{-2};$ %Kabinin yatay (üst) alanı (m²)

$Q_{dcct_yatay}=h_{dcct_yatay}*A_{dcct_yatay}*(T_{dsd}-T_{ccev})$ %Yatay yüzeyden doğal taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

$A_{dcct_dusey_kisa}=42*10^{-2}*49.5*10^{-2};$ %Kabinin düşey kısa kenar yüzey alanı (m²)

$Q_{dcct_dusey_kisa}=h_{dcct_dusey_kisa}*A_{dcct_dusey_kisa}*(T_{dsd}-T_{ccev})$
%Düsey kısa kenardan doğal taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

$A_{dcct_dusey_uzun}=89*10^{-2}*49.5*10^{-2};$ %Kabinin düsey uzun kenar yüzey alanı (m²)

$Q_{dcct_dusey_uzun}=h_{dcct_dusey_uzun}*A_{dcct_dusey_uzun}*(T_{dsd}-T_{ccev})$
%Düsey uzun kenardan doğal taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

$Q_{dcct}=Q_{dcct_yatay}+2*Q_{dcct_dusey_kisa}+2*Q_{dcct_dusey_uzun}$
%Kabinin toplam dış yüzeyinden çevreye doğal taşınım ile olan ısı transfer hızı (W)

$Q_{dcci}=A_{kdy}*sigma*epsilon_d*((T_{dsd}+273.15)^4-(T_{ccev}+273.15)^4)$
%Kabin duvarları ve çevre ortamı arasında ışınım ile olan ısı transfer hızı (W)

$Q_{kabin_duvarlari_net}=Q_{kdt}+Q_{cki}-Q_{dcct}-Q_{di}-Q_{dcci}$ %Kabin duvarlarındaki net ısı transfer hızı (W)

%%% YATAĞIN (ŞİLTE) MODELLEMESİ %%%
 $Q_{yatak_net}=Q_{kyt}+Q_{cyi}$ %Yataktaki net ısı transfer hızı (W)

%%% FANIN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ %%%
 $m_{kh_kutlesel_debi}=ro_{kh}*Fi_{kh};$ %Kabin ortamına geri dönen havanın kütleli debisi (kg/s)

$m_{ccev_kutlesel_debi}=ro_{ccev}*Fi_{ccev};$ %Çevre (taze) havanın kütleli debisi (kg/s)

$m_{O2_kutlesel_debi}=ro_{O2}*Fi_{O2};$ %Oksijen gazının kütleli debisi (kg/s)
 $m_{mix_kutlesel_debi}=m_{kh_kutlesel_debi}+m_{ccev_kutlesel_debi}+m_{O2_kutlesel_debi};$ %Karışan (Geri dönen hava+çevre(taze) hava+oksijen) havanın kütleli debisi (kg/s)

$m_h_kutlesel_debi=m_{kh_kutlesel_debi}+m_{ccev_kutlesel_debi}$
%Kabin (Geri dönen hava+çevre(taze) hava) havasının kütleli debisi (kg/s)

$T_{mix}=(ro_{kh}*Fi_{kh}*Cp_{kh}*T_{khs})+(ro_{ccev}*Fi_{ccev}*Cp_{ccev}*T_{ccev})+(ro_{O2}*Fi_{O2}*Cp_{O2}*T_{O2})/((ro_{kh}*Fi_{kh})+(ro_{ccev}*Fi_{ccev})+(ro_{O2}*Fi_{O2}))*Cp_{mix}$ %Karışan (Geri dönen hava+çevre(taze) hava+oksijen) havanın sıcaklığı (C)

$Y_{N2}=0.79-O2_ilave;$ %Havanın içerisindeki azot gazı miktarı (%)

$Y_{O2}=0.21+O2_ilave;$ %Havanın içerisindeki oksijen gazı miktarı (%)

$V_{kabin}=W*H*L*10^{-6};$ %Kabinin hacmi (m³)

$m_h=((Y_{O2}*P_t/R_{O2})+(Y_{N2}*P_t/R_{N2}))*V_{kabin}/(T_{hs}+273)$ %Kabin havasının kütlesi (kg)

%%% TE ELEMANNIN MATEMATİKSEL MODELLEMESİ %%%
 $Q_{ihtiyac}=Q_{cc_net}+Q_{c_net}+Q_{kabin_net}+Q_{yatak_net}+Q_{kabin_duvarlari_net}$
 $Q_{te_is}=abs(Q_{ihtiyac})$

$T_{sonsuz_h_g}=T_{mix};$

$T_{sonsuz_h_c}=(Q_{te_is})/(m_{mix_kutlesel_debi}*Cp_h)+T_{sonsuz_h_g}$

EK B - Hava Sıcaklığı Ölçüm Modu İçin Durum Uzayı (State-Space) Kodu

```
clear all
run Kuvoz_System
sim('Simulink_Incubator_Open_Loop_Ths')
[A,B,C,D]=linmod('Simulink_Incubator_Open_Loop_Ths')
PLANT_AIR=ss(A,B,C,D)
sisotool(PLANT_AIR)
```


EK C - TE Isı Pompası Sisteminin Optimizasyon Kodu

```
clc
clf
clear all
syms t Tcc Thh Ni Nk T1star T2star

%%%%%%%%%%%% VERİLENLER %%%%%%%%%%%%%
W_h=10.4; %cm
W_c=10.4; %cm

L_h=13; %cm
L_c=13; %cm

b_h=2; %cm
b_c=2; %cm

V_h_hacdebi=0.004692; %m^3/s
V_c_hacdebi=0.0126; %m^3/s

% Kanatçık malzemesi Alüminyum
ro_al=2702; %kg/m^3
k_al=177; % W/m*K

% Heatsink base (Alüminyum blok)boyutları
W_al_h= 10.4; % cm
L_al_h= 13; % cm
t_al_h= 0.8; % cm

W_al_c= 10.4; % cm
L_al_c= 13; % cm
t_al_c= 0.8; % cm

W_al_cc= 4; %cm Soğuk taraftaki ek alüminyum blok
L_al_cc= 9; %cm
t_al_cc=1; %cm

T_h_ic_ortam_kuvoz= 36; %C
T_c_dis_ortam_kuvoz= 25; %C

%Heatsink base (Alüminyum blok)alanı
A_base_h=W_al_h*10^(-2)*L_al_h*10^(-2); %m^2
A_base_c=W_al_c*10^(-2)*L_al_c*10^(-2); %m^2
A_base_cc=W_al_cc*10^(-2)*L_al_cc*10^(-2); %m^2

% Film sıcaklıkları
T_h_film=(T_h_ic_ortam_kuvoz+T_h_tahmin)/2;
k_h_air=27.9*10^-3; %W/m*K
V_h_kinematik_air=17.89*10^-6; %m^2/s
```

Pr_h_air=0.704;
ro_h_air=1.1014; %kg/m³
cp_h_air=1008; %J/kg*K

T_c_film=(T_c_dis_ortam_kuvuz+T_c_tahmin)/2;
k_c_air=25.5*10⁻³; %W/m*K
V_c_kinematik_air=15.09*10⁻⁶; %m²/s
Pr_c_air=0.709;
ro_c_air=1.2114; %kg/m³
cp_c_air=1007; %J/kg*K

%%%%%%%%%% HEATSİNK HESABI %%%%%%%%%%

%Akışın aktığı karakteristik uzunluk

L_h_karakteristik_uz=L_h*10⁽⁻²⁾/2; %m

L_c_karakteristik_uz=L_c*10⁽⁻²⁾/2; %m

%Akışın geçtiği dik kesit alanları

A_h_dik_kesit_alan=b_h*W_h*10⁽⁻⁴⁾; %m

A_c_dik_kesit_alan=b_c*W_c*10⁽⁻⁴⁾; %m

% Akışın hız değerleri (2 ye ayrıldığı için 0.5 ile çarptık)

U_h=V_h_hacdebi/A_h_dik_kesit_alan % m/s

U_c=0.5*V_c_hacdebi/A_c_dik_kesit_alan % m/s

%Reynold sayıları (AKIŞ 5*10⁵ küçük o yüzden LAMİNER)

Re_h=U_h*L_h_karakteristik_uz/V_h_kinematik_air;

Re_c=U_c*L_c_karakteristik_uz/V_c_kinematik_air;

%Optimum fin kanat boşluğu

z_h_opt=L_h_karakteristik_uz*3.24*(Re_h)^(-1/2)*(Pr_h_air)^(-1/4) % m

z_c_opt=L_c_karakteristik_uz*3.24*(Re_c)^(-1/2)*(Pr_c_air)^(-1/4) % m

%%%%%%%%%% Azaltılmış Re sayısı ve Isı taşınım katsayısı değerleri

%%%%%%%%%

Re_star_h=((U_h*z_h_opt)/V_h_kinematik_air)*(z_h_opt/L_h_karakteristik_uz);

% Sıcak taraftaki azaltılmış Re sayısı

Re_star_c=((U_c*z_c_opt)/V_c_kinematik_air)*(z_c_opt/L_c_karakteristik_uz); %

Soğuk taraftaki azaltılmış Re sayısı

h_h=(k_h_air/z_h_opt)*((Re_star_h*Pr_h_air/2)⁽⁻³⁾+(0.664*(Re_star_h)^(1/2)*(Pr_h_air)^(1/3)*(1+(3.65/(Re_star_h)^(1/2)))^(1/2))⁽⁻³⁾)^(-1/3)

h_c=(k_c_air/z_c_opt)*((Re_star_c*Pr_c_air/2)⁽⁻³⁾+(0.664*(Re_star_c)^(1/2)*(Pr_c_air)^(1/3)*(1+(3.65/(Re_star_c)^(1/2)))^(1/2))⁽⁻³⁾)^(-1/3)

%OPTİMİZASYON HEATSİNK_h ve HEATSİNK_c

n=1; m=1;

n_h_matris = []; n_c_matris = []; % boş olarak oluşturulan matrisler

m_h_fin_matris = []; m_c_fin_matris = [];

beta_h_matris = []; beta_c_matris = [];

ita_h_fin_matris = []; ita_c_fin_matris = [];

A_h_fin_matris = []; A_c_fin_matris = [];

A_h_total_matris = []; A_c_total_matris = [];

ita_h_overal_matris = []; ita_c_overal_matris = [];

```

ita_h_heatsink_matris = []; ita_c_heatsink_matris = [];
Q_h_total_matris = []; Q_c_total_matris = [];
R_h_total_matris = []; R_c_total_matris = [];

tt=0:0.0001:0.01;

for t_h_fin_kalinlik=tt
n_h_fin_sayisi=W_h*10^(-2)/(z_h_opt+t_h_fin_kalinlik); %Fin kanat sayısının fin
kanat kalınlığı cinsinden yazılması
m_h_fin_kutle=n_h_fin_sayisi*ro_al*L_h*10^(-2)*b_h*10^(-2)*t_h_fin_kalinlik;
% fin kanatlarının kütlelerinin fin kanat kalınlığı cinsinden yazılması
beta_h=b_h*10^(-2)*((2*h_h*(L_h*10^(-2))+t_h_fin_kalinlik))/(k_al*L_h*10^(-
2)*t_h_fin_kalinlik)^(1/2);
ita_h_fin_verim=(tanh(beta_h))/(beta_h); % fin kanat kalınlığı cinsinden tek bir
kanat verimliliği
A_h_fin_alan=2*((L_h*10^(-2))+t_h_fin_kalinlik)*b_h*10^(-2); % fin kanat
kalınlığı cinsinden tek bir kanadın yüzey alanı
A_h_total_alan=n_h_fin_sayisi*(A_h_fin_alan+(L_h*10^(-2)*z_h_opt)); % fin
kanat kalınlığı cinsinden hem kanatların hemde boşlukların toplam yüzey alanı
ita_h_yuzey_verim=1-((n_h_fin_sayisi*A_h_fin_alan/A_h_total_alan)*(1-
ita_h_fin_verim)); % fin kanat kalınlığı cinsinden toplam yüzey verimi
ita_h_heatsink_verim=((1/ita_h_yuzey_verim)+(h_h*A_h_total_alan*t_al_h*10^(-
2)/k_al*A_base_h))^(-1); %base kanlığından oluşan dirence dahil ederek fin kanat
kalınlığı cinsinden heatsink_h'in toplam verimi
Q_h_total=ita_h_heatsink_verim*A_h_total_alan*h_h*(T_h_tahmin-
T_h_ic_ortam_kuvoz); % fin kanat kalınlığı cinsinden toplam ısı transferi
R_h_total=(1/(ita_h_heatsink_verim*h_h*A_h_total_alan))+t_al_h*10^(-
2)/(k_al*A_base_h); %fin kanat kalınlığı cinsinden toplam ısıl direnç

n_h_matris(1,n)=n_h_fin_sayisi; % elde edilen her bir n_h_fin_sayisi değerini ilk
başta boş olarak oluşturulan (n_h_matris = []);matrisin içerisine yazarak bütün
değerleri bir matris olarak hafızasında tutuyor.
m_h_fin_matris(1,n)= m_h_fin_kutle;
beta_h_matris(1,n)= beta_h;
ita_h_fin_matris(1,n)= ita_h_fin_verim;
A_h_fin_matris(1,n)= A_h_fin_alan;
A_h_total_matris(1,n)= A_h_total_alan;
ita_h_overal_matris(1,n)= ita_h_yuzey_verim;
ita_h_heatsink_matris(1,n)=ita_h_heatsink_verim;
Q_h_total_matris(1,n)= Q_h_total;
R_h_total_matris(1,n)= R_h_total;
n=n+1;
end

for t_c_fin_kalinlik=tt
n_c_fin_sayisi=W_c*10^(-2)/(z_c_opt+t_c_fin_kalinlik); %Fin kanat sayısının fin
kanat kalınlığı cinsinden yazılması
m_c_fin_kutle=n_c_fin_sayisi*ro_al*L_c*10^(-2)*b_c*10^(-2)*t_c_fin_kalinlik; %
fin kanatlarının kütlelerinin fin kanat kalınlığı cinsinden yazılması

```

```

beta_c=b_c*10^(-2)*((2*h_c*(L_c*10^(-2))+t_c_fin_kalinlik)/(k_al*L_c*10^(-2)*t_c_fin_kalinlik))^(1/2);
ita_c_fin_verim=(tanh(beta_c))/(beta_c); % fin kanat kalınlığı cinsinden tek bir kanat verimliliği
A_c_fin_alan=2*((L_c*10^(-2))+t_c_fin_kalinlik)*b_c*10^(-2); % fin kanat kalınlığı cinsinden tek bir kanadın yüzey alanı
A_c_total_alan=n_c_fin_sayisi*(A_c_fin_alan+(L_c*10^(-2)*z_c_opt)); % fin kanat kalınlığı cinsinden hem kanatların hemde boşlukların toplam yüzey alanı
ita_c_yuzey_verim=1-((n_c_fin_sayisi*A_c_fin_alan/A_c_total_alan)*(1-ita_c_fin_verim)); % fin kanat kalınlığı cinsinden toplam yüzey verimi
ita_c_heatsink_verim=((1/ita_c_yuzey_verim)+(h_c*A_c_total_alan*t_al_c*10^(-2)/k_al*A_base_c)+(h_c*A_c_total_alan*t_al_cc*10^(-2)/k_al*A_base_cc))^(-1); %base kanlığından oluşan dirence dahil ederek fin kanat kalınlığı cinsinden heatsink_c'in toplam verimi
Q_c_total=ita_c_heatsink_verim*A_c_total_alan*h_c*(T_c_dis_ortam_kuvoz-T_c_tahmin); % fin kanat kalınlığı cinsinden toplam ısı transferi
R_c_total=(1/(ita_c_heatsink_verim*h_c*A_c_total_alan))+t_al_c*10^(-2)/(k_al*A_base_c)+(t_al_cc*10^(-2)/(k_al*A_base_cc)); %fin kanat kalınlığı cinsinden toplam ısı direnç

n_c_matris(1,m)=n_c_fin_sayisi; % elde edilen her bir n1 değerini ilk başta boş olarak oluşturulan (n_c_matris = []);matrisin içerisine yazarak bütün değerleri bir matris olarak hafızasında tutuyor.
m_c_fin_matris(1,m)= m_c_fin_kutle;
beta_c_matris(1,m)= beta_c;
ita_c_fin_matris(1,m)= ita_c_fin_verim;
A_c_fin_matris(1,m)= A_c_fin_alan;
A_c_total_matris(1,m)= A_c_total_alan;
ita_c_overal_matris(1,m)= ita_c_yuzey_verim;
ita_c_heatsink_matris(1,n)=ita_c_heatsink_verim;
Q_c_total_matris(1,m)= Q_c_total;
R_c_total_matris(1,m)= R_c_total;
m=m+1;
end

%%%%%%%%%% HEATSİNK_h OPTİMUM DEĞERLERİ %%%%%%%%%%%
indexmax_h=find(max(Q_h_total_matris)== Q_h_total_matris); %
Q_h_total_matris fonksiyonunun max noktasının hem x eksenindeki hem de y eksenindeki değerini indexmax_h atıyor.
t_h_fin_kalinlik_opt= tt(indexmax_h) %Max Q_h_total_matris fonksiyonunun x eksenindeki değerini t_h_fin_kalinlik_opt olarak atıyor.
opt_Qh_heatsink= Q_h_total_matris(indexmax_h) %Max Q_h_total_matris fonksiyonunun y eksenindeki değerini opt_Qh_heatsink olarak atıyor.
% opt_Qh_heatsink=max(Q_h_total_matris) %%Max Q_h_total_matris fonksiyonunun y eksenindeki değerini opt_Qh_heatsink olarak atamanın 2.yolu
n_h_fin_sayisi_opt= W_h*10^(-2)/(z_h_opt+t_h_fin_kalinlik_opt); %optimum fin kanat kalınlığındaki Fin kanat sayısı
m_h_fin_kutle_opt=n_h_fin_sayisi_opt*ro_al*L_h*10^(-2)*b_h*10^(-2)*t_h_fin_kalinlik_opt; % optimum fin kanat kalınlığındaki fin kanatlarının kütlesi

```

```

beta_h_opt=b_h*10^(-2)*((2*h_h*(L_h*10^(-2)+t_h_fin_kalinlik_opt))/(k_al*L_h*10^(-2)*t_h_fin_kalinlik_opt))^(1/2);
%optimum fin kanat kalınlığındaki beta değeri
ita_h_fin_verim=(tanh(beta_h_opt))/(beta_h_opt); % optimum fin kanat kalınlığındaki tek bir kanadın verimliliği
A_h_fin_alan_opt=2*((L_h*10^(-2))+t_h_fin_kalinlik_opt)*b_h*10^(-2); % optimum fin kanat kalınlığındaki tek bir kanadın yüzey alanı
A_h_total_alan_opt=n_h_fin_sayisi_opt*(A_h_fin_alan_opt+(L_h*10^(-2))*z_h_opt) % optimum fin kanat kalınlığındaki hem kanatların hemde boşlukların toplam yüzey alanı
ita_h_yuzey_verim_opt=1-((n_h_fin_sayisi_opt*A_h_fin_alan_opt/A_h_total_alan_opt)*(1-ita_h_fin_verim))
% optimum fin kanat kalınlığındaki toplam yüzey verimi
ita_h_heatsink_verim_opt=((1/ita_h_yuzey_verim_opt)+(h_h*A_h_total_alan_opt*t_al_h*10^(-2)/k_al*A_base_h))^(-1) % base kalınlığındaki dirence hesaba katılıp, optimum fin kanat kalınlığındaki heatsink_h'in toplam verimi
Q_h_total_opt=ita_h_heatsink_verim_opt*A_h_total_alan_opt*h_h*(T_h_tahmin-T_h_ic_ortam_kuvuz); % optimum fin kanat kalınlığındaki toplam ısı transferi
R_h_total_opt=(1/(ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt))+t_al_h*10^(-2)/(k_al*A_base_h); %optimum fin kanat kalınlığındaki toplam ısı direnci

```

```

%%%%%%%%%% HEATSİNK_c OPTİMUM DEĞERLERİ %%%%%%%%%%%
indexmax_c=find(max(Q_c_total_matris)==Q_c_total_matris); % Q_c_total_matris fonksiyonunun max noktasının hem x eksenindeki hem de y eksenindeki değerini indexmax_c atıyor.

```

```

t_c_fin_kalinlik_opt= tt(indexmax_c) %Max Q_c_total_matris fonksiyonunun x eksenindeki değerini t_c_fin_kalinlik_opt olarak atıyor.
opt_Qc_heatsink= Q_c_total_matris(indexmax_c) %Max Q_c_total_matris fonksiyonunun y eksenindeki değerini opt_Qc_heatsink olarak atıyor.
% opt_Qc_heatsink=max(Q_c_total_matris) % %Max Q_c_total_matris fonksiyonunun y eksenindeki değerini opt_Qc_heatsink olarak atamanın 2.yolu
n_c_fin_sayisi_opt=W_c*10^(-2)/(z_c_opt+t_c_fin_kalinlik_opt); %optimum fin kanat kalınlığındaki Fin kanat sayısı
m_c_fin_kutle_opt=n_c_fin_sayisi_opt*ro_al*L_c*10^(-2)*b_c*10^(-2)*t_c_fin_kalinlik_opt; % optimum fin kanat kalınlığındaki fin kanatlarının kütlesi
beta_c_opt=b_c*10^(-2)*((2*h_c*(L_c*10^(-2)+t_c_fin_kalinlik_opt))/(k_al*L_c*10^(-2)*t_c_fin_kalinlik_opt))^(1/2);
%optimum fin kanat kalınlığındaki beta değeri
ita_c_fin_verim=(tanh(beta_c_opt))/(beta_c_opt); % optimum fin kanat kalınlığındaki tek bir kanadın verimliliği
A_c_fin_alan_opt=2*((L_c*10^(-2))+t_c_fin_kalinlik_opt)*b_c*10^(-2); % optimum fin kanat kalınlığındaki tek bir kanadın yüzey alanı
A_c_total_alan_opt=n_c_fin_sayisi_opt*(A_c_fin_alan_opt+(L_c*10^(-2))*z_c_opt) % optimum fin kanat kalınlığındaki hem kanatların hemde boşlukların toplam yüzey alanı
ita_c_yuzey_verim_opt=1-((n_c_fin_sayisi_opt*A_c_fin_alan_opt/A_c_total_alan_opt)*(1-ita_c_fin_verim))
% optimum fin kanat kalınlığındaki toplam yüzey verimi
ita_c_heatsink_verim_opt=((1/ita_c_yuzey_verim_opt)+(h_c*A_c_total_alan_opt*t_al_cc*10^(-2)/k_al*A_base_c)+(h_c*A_c_total_alan_opt*t_al_cc*10^(-2)/k_al*A_base_c))^(-1) % base kalınlığındaki dirence hesaba katılıp, optimum fin kanat kalınlığındaki heatsink_h'in toplam verimi

```

2)/k_al*A_base_cc))⁽⁻¹⁾% base kalınlığındaki dirence hesaba katılıp, optimum fin kanat kalınlığındaki heatsink_c'in toplam verimi

Q_c_total_opt=ita_c_heatsink_verim_opt*A_c_total_alan_opt*h_c*(T_c_dis_ortam_kuvoz-T_c_tahmin); % optimum fin kanat kalınlığındaki toplam ısı transferi

R_c_total_opt=(1/(ita_c_heatsink_verim_opt*h_c*A_c_total_alan_opt))+(t_al_c*10⁽⁻²⁾)/(k_al*A_base_c))+(t_al_cc*10⁽⁻²⁾)/(k_al*A_base_cc)); %optimum fin kanat kalınlığındaki toplam ısı direnç

%%%%%%%%%% Q=m.c*deltaT formülü hesaplayabilmek için kütleli debinin hesabı

A_h_akis_kesit_alan=n_h_fin_sayisi_opt*(b_h*10⁽⁻²⁾)*z_h_opt % sıcak taraftaki akışkanın heatsink_h'dan geçtiği boşlukların toplam alanı

A_c_akis_kesit_alan=n_c_fin_sayisi_opt*(b_c*10⁽⁻²⁾)*z_c_opt %soğuk taraftaki akışkanın heatsink_c'dan geçtiği boşlukların toplam alanı

m_h_kutlesel_debi=ro_h_air*U_h*A_h_akis_kesit_alan % sıcak taraftaki akışkanın kütleli debisi

m_c_kutlesel_debi=ro_c_air*U_c*A_h_akis_kesit_alan % soğuk taraftaki akışkanın kütleli debisi

figure (1)

plot(tt,Q_h_total_matris,'g+-')

xlabel('opt fin kalınlığı, m')

ylabel('Isıtma gücü, W')

hold on

% plot(tt,Q_c_total_matris,'r+-')

grid on

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% TERMOELEKTRİK MODÜL HESAPLAMA %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% VERİLENLER%%%%%%%%%%

% P&N TECH - TEC1-127140 modülün Th=25 C için özellikleri

Q_TE_max=138; %W

deltaT_TE_max= 75; % C

I_TE_max= 16.34; % A

V_TE_max= 16.4; % V

R_TE_module= 1.02; % ohm

n_TE_module=127;

%R_TE_module=(2*ro_element*L_element_leg)/(A_element_area)

%%% L_element_leg ve A_element_area verilmemiş biz TAHMİN ettik.

L_element_leg=1; % mm

A_element_area=2; % mm²

G_element_geometric_factor=((A_element_area)/(L_element_leg))*10⁽⁻³⁾; % m

%%%%%%%%%% HESAPLAMA %%%%%%%%%%%

Z_star=(2*deltaT_TE_max)/((50+273)-(deltaT_TE_max))²

alpha_star=

(2*Q_TE_max)/(n_TE_module*I_TE_max*((50+273)+(deltaT_TE_max)))

```

ro_star=(alpha_star*((50+273)-
(deltaT_TE_max))*G_element_geometric_factor)/(I_TE_max)
k_star=((alpha_star^2)/(ro_star*Z_star)
Tstar=(T_c_dis_ortam_kuvoz+273)/(T_h_ic_ortam_kuvoz+273);
Nh=(ita_c_heatsink_verim_opt*h_c*A_c_total_alan_opt)/(ita_h_heatsink_verim_opt
*h_h*A_h_total_alan_opt);
B=Z_star*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273);

n=1;
m=1;
p=1;
s=1;
T1matris = []; % boş matris oluşturularak for döngüsünden sonra hesaplanacak
T1matris değerlerini hafızasında tutuyor.
T2matris = []; % boş matris oluşturularak for döngüsünden sonra hesaplanacak
T2matris değerlerini hafızasında tutuyor.

t1=0.1:0.01:1;
t2=0.1:0.01:0.5;

for Nk=t2
    for Ni=t1
        d1= Nh*(Tstar-T1star)/Nk == (Ni*T1star)-(0.5*(Ni)^2/B)+(T1star-T2star);
        d2= (T2star-1)/Nk == (Ni*T2star)+(0.5*(Ni)^2/B)+ (T1star-T2star);

        [T1, T2] = solve(d1,d2); % d1 ve d2 denklemleri çözüyor ve çözümleri
        sembolik olarak T1 ve T2 içerisine atıyor.
        T11 = double(T1); % d1 ve d2 denklemlerinin sembolik olan çözümü bizim
        anlayabileceğimiz şekilde sayılara dönüştürerek (double komutuyla) değerleri T11
        atıyor.
        T22 = double(T2);
        T1matris(1,n)=double(T1); % sembolik çözüm olarak elde edilen T1
        değerlerini sayılara dönüştürerek (double komutuyla) her bir for döngüsündeki değeri
        T1matris(1,n)içerisinde saklıyor.
        T2matris(1,n)=double(T2);
        Q1star(1,n)=Nh*(Tstar-T1matris(1,n)); % For döngüsündeki her bir değer için
        Q1star değerlerini Q1star(1,n)içerisinde saklıyor.
        Q2star(1,n)=T2matris(1,n)-1;
        Wnstar(1,n)=Q2star(1,n)-Q1star(1,n); % For döngüsündeki her bir değer için
        Wnstar değerlerini Wnstar(1,n)içerisinde saklıyor.
        COP(1,n)=Q2star(1,n)/Wnstar(1,n); % For döngüsündeki her bir değer için
        COP değerlerini COP(1,n)içerisinde saklıyor.

        Qhh(1,n)=Q2star(1,n)*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(T_h_ic
        _ortam_kuvoz+273); % TE modülün sıcak tarafından atılan herbir ısı miktarı
        Qhh(1,n) içerisnde saklıyor.

        if Qhh(1,n)<opt_Qh_heatsink+5 && Qhh(1,n)>opt_Qh_heatsink-5 % TE
        sıcak tarafındaki atılan ısı heatsink_h'in '+','-' 5 büyük ise

```

Qhhhh (1,m)= Qhh(1,n); % İf şartını sağlayan Qhh(1,n) değerlerini Qhhhh(1,m) içerisinde saklıyor. Bu değerden [M,I] = max(COP_isitmaaa) max indeks numarası belirleniyor.

Qcccc(1,m)=Q1star(1,n)*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273);

Wnnnn (1,m)=Qhhhh (1,m)-Qcccc (1,m);

COP_isitmaaa(1,m)=Qhhhh (1,m)/Wnnnn (1,m);

Qhhh (1,p)= Qhh(1,n); % if döngüsüne sağlayan her bir Qhh(1,n) değeri Qhhh (1,p) içerisinde saklanıyor.

Qccc(1,p)=Q1star(1,n)*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273);

Wnnn (1,p)=Qhhh (1,p)-Qccc (1,p);

COP_isitma(1,p)=Qhhh (1,p)/Wnnn (1,p);

COP_sogutma(1,p)=Qccc (1,p)/Wnnn (1,p);

Nkk(1,p)=Nk;

TT (s,1)=Qhhh (1,p); % Qhhh değerleri tek bir değişken TT içerisinde excell dosyası olarak sıralanıyor.

TT (s,2)=COP_isitma(1,p);

TT (s,3)=Qccc(1,p);

TT (s,4)=COP_sogutma(1,p);

p=p+1;

s=s+1;

end

T(n,1)=Ni; % For döngüsündeki her bir Ni değerini T değişkeni içerisinde 1. sütunda saklıyor.

T(n,2)=Nk;

T(n,3)=T11;

T(n,4)=T22;

T(n,5)=Q2star(1,n);

T(n,6)=COP(1,n);

n=n+1;

m=m+1;

end

end

[M,I] = max(COP_isitma); % Max COP_isitmaaa değerini ve bu kaçınıcı döngüde olduğunu bulup, max değeri M ve kaçınıcı döngüdeki olan değeri I içerisine atıyor.

T1star_opt=T1matris(1,I) % Max COP_isitmaaa olduğu değeri T1matris içerisinden alıp T1star_opt olarak atıyor.

T2star_opt=T2matris(1,I)

Ni_opt = T(I,1) %Max COP_isitmaaa olduğu değeri T değişkeni içerisinde saklanan Ni değerleri içerisinden alıp Ni_opt olarak atıyor.

Nk_opt = T(I,2)

COP_COP_isitmaaa_max=COP(1,I) %Max COP_isitmaaa olduğu yerdeki COP değerini COP_isitmaaa_max olarak atıyor.

Q1star_COP_isitmaaa_max=Q1star(1,I);

Q2star_COP_isitmaaa_max=Q2star(1,I);

Wnstar_COP_isitmaaa_max=Wnstar(1,I);

Nv_Qh_h_h_max=Wnstar_COP_isitmaaa_max/(Ni_opt*Nk_opt);

n_termocift_sayisi=Nk_opt*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(L_element_leg*10^(-3))/(k_star*A_element_area*10^(-6)) % Max COP_isitmaaa 'da optimum termoelektrik çift sayısı

Qc=Q1star_COP_isitmaaa_max*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273) % Max COP_isitmaaa 'da Soğuk taraftan çekebilene ısı

Qh=Q2star_COP_isitmaaa_max*ita_h_heatsink_verim_opt*h_h*A_h_total_alan_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273) % Max COP_isitmaaa 'da Sıcak taraftan atılan ısı

Wn=Qh/COP_COP_isitmaaa_max % Max COP_isitmaaa 'da TE harcanan güç

Tc=(T1star_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273))-273 % Max COP_isitmaaa 'da TE soğuk yüzey sıcaklığı

Th=(T2star_opt*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273))-273 %Max COP_isitmaaa 'da TE sıcak yüzey sıcaklığı

I=Ni_opt*k_star*(A_element_area*10^(-6))/(alpha_star*(L_element_leg*10^(-3))) %Max COP_isitmaaa 'da Bu şartları sağlaması için verilmesi gereken akım değeri

V=Nv_Qh_h_h_max*n_termocift_sayisi*alpha_star*(T_h_ic_ortam_kuvoz+273)

%Max COP_isitmaaa 'da Bu şartları sağlaması için verilmesi gereken voltaj değeri

T_h_heatsink_giris_sicaklik=((T_h_tahmin+273)-

(Qh/(m_h_kutlesel_debi*cp_h_air)))-273 %Max COP_isitmaaa 'da Heatsink_h havanın giriş sıcaklığı

T_c_heatsink_cikis_sicaklik=((T_c_dis_ortam_kuvoz+273)-

(Qc/(m_c_kutlesel_debi*cp_c_air)))-273 %Max COP_isitmaaa 'da Heatsink_c havanın çıkış sıcaklığı

Qc_gercek_heatsink=ita_c_heatsink_verim_opt*A_c_total_alan_opt*h_c*(T_c_dis_ortam_kuvoz-Tc) % Max COP_isitmaaa 'da heatsink_c den çekilen gerçek ısı

Qh_gercek_heatsink=ita_h_heatsink_verim_opt*A_h_total_alan_opt*h*(Th-T_h_ic_ortam_kuvoz) %% Max COP_isitmaaa 'da heatsink_h dan atılan gerçek ısı

figure(2)

plot (Nkk,COP_isitma,'g+-')

grid on

xlabel('Nkk')

ylabel('COP_isitma')

hold on

EK D – Belirsizlik Analizi Hesaplamaları

Hacimsel debilerdeki belirsizlik analizi

Hız ölçümlerindeki hata oranı: $\pm 0,03$ m/s

Uzunluk ölçümlerindeki hata oranı: $\pm \%1$

$V_{mix} = 1,81$ m/s

$V_{\text{cev}} = 0,273$ m/s

$$A_{mix} = x \cdot y$$

$$\frac{W_{A_{mix}}}{A_{mix}} = \sqrt{\left(\frac{W_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{W_y}{y}\right)^2} = \sqrt{(0,01)^2 + (0,01)^2} = 0,0141 = \%1,41$$

$$A_{\text{cev}} = \pi \cdot R_c^2$$

$$\frac{W_{A_{\text{cev}}}}{A_{\text{cev}}} = 2 \cdot \frac{W_{R_c}}{R_c} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 = \%2$$

$$\dot{V}_{mix} = V_{mix} \cdot A_{mix}$$

$$\frac{W_{\dot{V}_{mix}}}{\dot{V}_{mix}} = \sqrt{\left(\frac{W_{V_{mix}}}{V_{mix}}\right)^2 + \left(\frac{W_{A_{mix}}}{A_{mix}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,03}{1,81}\right)^2 + (0,0141)^2} = 0,0217 = \%2,17$$

$$\dot{V}_{\text{cev}} = V_{\text{cev}} \cdot A_{\text{cev}}$$

$$\frac{W_{\dot{V}_{\text{cev}}}}{\dot{V}_{\text{cev}}} = \sqrt{\left(\frac{W_{V_{\text{cev}}}}{V_{\text{cev}}}\right)^2 + \left(\frac{W_{A_{\text{cev}}}}{A_{\text{cev}}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,03}{0,273}\right)^2 + (0,02)^2} = 0,1108 = \%11,08$$

Termoelektrik ısı pompası sistemindeki belirsizlik analizi

Sıcaklık ölçümlerindeki hata oranı : $\pm 0,3$ °C

Uzunluk ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \%1$

Akım ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \% 0,5$

Voltaj ölçümlerindeki hata oranı : $\pm \% 0,5$

TEC1-127140 modülün kataloğundaki maksimum değerleri

$$T_h = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{c,max} = 138 \text{ W}$$

$$\Delta T_{max} = 75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_{max} = 16,34 \text{ A}$$

$$\dot{Q}_{c,max} = V \cdot I$$

$$\frac{W_{\dot{Q}_{c,max}}}{\dot{Q}_{c,max}} = \sqrt{\left(\frac{W_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2} = \sqrt{(0,005)^2 + (0,005)^2} = 0,00707 = \%0,7$$

$$\Delta T_{max} = T_h - T_c$$

$$\frac{W_{\Delta T_{max}}}{\Delta T_{max}} = \sqrt{\left(\frac{W_{T_h}}{\Delta T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_c}}{\Delta T_{max}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,3}{75}\right)^2 + \left(\frac{0,3}{75}\right)^2} = 0,0056 = \%0,56$$

$$W_{\Delta T_{max}} = 0,0056 \cdot \Delta T_{max} \cong 0,42 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha^{**} = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{c,max}}{n \cdot I_{max} \cdot (T_h + \Delta T_{max})}$$

$$\frac{W_{\alpha^{**}}}{\alpha^{**}} = \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_{c,max}}}{\dot{Q}_{c,max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{I_{max}}}{I_{max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_h}}{T_h + \Delta T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{\Delta T_{max}}}{T_h + \Delta T_{max}}\right)^2}$$

$$\frac{W_{\alpha^{**}}}{\alpha^{**}} = \sqrt{(0,00707)^2 + (0,005)^2 + \left(\frac{0,3}{398}\right)^2 + \left(\frac{0,42}{398}\right)^2} = 0,00875 = \%0,87$$

$$A = x^2$$

$$\frac{W_A}{A} = 2 \cdot \frac{W_x}{x} = 2 \cdot 0,01 = 0,02 = \%2$$

$$\rho^{**} = \frac{\alpha^{**} \cdot (T_h - \Delta T_{max}) \cdot A}{l \cdot I_{max}}$$

$$\frac{W_{\rho^{**}}}{\rho^{**}} = \sqrt{\left(\frac{W_{\alpha^{**}}}{\alpha^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_h}}{T_h - \Delta T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{W_{\Delta T_{max}}}{T_h - \Delta T_{max}}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{W_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{W_{I_{max}}}{I_{max}}\right)^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{\rho^{**}}}{\rho^{**}} &= \sqrt{(0,00875)^2 + \left(\frac{0,3}{248}\right)^2 + \left(\frac{0,42}{248}\right)^2 + (0,02)^2 + (0,01)^2 + (0,005)^2} \\ &= 0,0245 = \%2,45 \end{aligned}$$

$$Z^{**} = \frac{2 \cdot \Delta T_{max}}{(T_h - \Delta T_{max})^2}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{Z^{**}}}{Z^{**}} &= \sqrt{\left(\frac{W_{\Delta T_{max}}}{\Delta T_{max}}\right)^2 + \left((-2) \cdot \frac{W_{T_c}}{T_c}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,42}{75}\right)^2 + \left((-2) \cdot \frac{0,3}{248}\right)^2} = 0,00609 \\ &= \%0,6 \end{aligned}$$

$$k^{**} = \frac{(\alpha^{**})^2}{\rho^{**} \cdot Z^{**}}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{k^{**}}}{k^{**}} &= \sqrt{\left(2 \cdot \frac{W_{\alpha^{**}}}{\alpha^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_{\rho^{**}}}{\rho^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_{Z^{**}}}{Z^{**}}\right)^2} \\ &= \sqrt{(2 \cdot 0,00707)^2 + (0,0245)^2 + (0,00609)^2} = 0,0289 = \%2,89 \end{aligned}$$

$$R = \rho^{**} \cdot \frac{l}{A}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_R}{R} &= \sqrt{\left(\frac{W_{\rho^{**}}}{\rho^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2} = \sqrt{(0,0245)^2 + (0,01)^2 + (0,02)^2} = 0,0331 \\ &= \%3,31 \end{aligned}$$

$$K = k^{**} \cdot \frac{A}{l}$$

$$\frac{W_K}{K} = \sqrt{\left(\frac{W_{k^{**}}}{k^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{W_l}{l}\right)^2} = \sqrt{(0,0289)^2 + (0,02)^2 + (0,01)^2} = 0,0364$$

$$= \%3,64$$

$$\dot{Q}_c = \underbrace{n \cdot \alpha \cdot T_c \cdot I}_x - \underbrace{n \cdot \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R}_y - \underbrace{n \cdot K \cdot (T_h - T_c)}_z$$

$$W_{\dot{Q}_c} = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2 + (W_z)^2}$$

$$x = n \cdot \alpha \cdot T_c \cdot I$$

$$\frac{W_x}{x} = \sqrt{\left(\frac{W_{\alpha^{**}}}{\alpha^{**}}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_c}}{T_c}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2} = \sqrt{(0,00875)^2 + \left(\frac{0,3}{297,6}\right)^2 + (0,005)^2}$$

$$= 0,01 = \%1$$

$$W_x = 0,01 \cdot x = 0,01 \cdot 187,17 = 1,871 \text{ W}$$

$$y = n \cdot \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R$$

$$\frac{W_y}{y} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{W_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{W_R}{R}\right)^2} = \sqrt{(2 \cdot 0,005)^2 + (0,0331)^2} = 0,0344 = \%3,44$$

$$W_y = 0,0344 \cdot y = 0,0344 \cdot 70,709 = 2,432 \text{ W}$$

$$z = n \cdot K \cdot (T_h - T_c)$$

$$\frac{W_z}{z} = \sqrt{\left(\frac{W_K}{K}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_h}}{T_h - T_c}\right)^2 + \left(\frac{W_{T_c}}{T_h - T_c}\right)^2} = \sqrt{(0,0364)^2 + \left(\frac{0,3}{37,9}\right)^2 + \left(\frac{0,3}{37,9}\right)^2}$$

$$= 0,038 = \%3,8$$

$$W_z = 0,038 \cdot z = 0,038 \cdot 43,444 = 1,65 \text{ W}$$

$$W_{\dot{Q}_c} = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2 + (W_z)^2} = \sqrt{(1,871)^2 + (2,432)^2 + (1,65)^2} = 3,483 \text{ W}$$

$$\frac{W_{\dot{Q}_c}}{\dot{Q}_c} = \frac{3,483 \text{ W}}{58 \text{ W}} = 0,06 = \%6$$

$$W = V \cdot I$$

$$\frac{W_W}{W} = \sqrt{\left(\frac{W_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{W_I}{I}\right)^2} = \sqrt{(0,005)^2 + (0,005)^2} = 0,00707 = \%0,7$$

$$COP_{soğutma} = \frac{\dot{Q}_c}{W}$$

$$\frac{W_{COP_{soğutma}}}{COP_{soğutma}} = \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_c}}{\dot{Q}_c}\right)^2 + \left(\frac{W_W}{W}\right)^2} = \sqrt{(0,06)^2 + (0,00707)^2} = 0,0603 = \%6,03$$

$$\dot{Q}_h = \dot{Q}_c + W$$

$$\frac{W_{\dot{Q}_h}}{\dot{Q}_h} = \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_c}}{\dot{Q}_h}\right)^2 + \left(\frac{W_W}{\dot{Q}_h}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{3,483}{202}\right)^2 + \left(\frac{0,00707}{202}\right)^2} = 0,0171 = \%1,71$$

$$COP_{isitma} = \frac{\dot{Q}_h}{W}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{COP_{isitma}}}{COP_{isitma}} &= \sqrt{\left(\frac{W_{\dot{Q}_h}}{\dot{Q}_h}\right)^2 + \left(\frac{W_W}{W}\right)^2} = \sqrt{(0,0171)^2 + (0,00707)^2} = 0,0184 \\ &= \%1,84 \end{aligned}$$

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman YELER

Doğum Yeri ve Tarihi : Tire/İzmir – 15.01.1989

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : oyeler@pau.edu.tr

İletişim Adresi : Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü

Yayın Listesi

• Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Optimization and Experimental Validation of a Modular Thermoelectric Heat Pump System for a Premature Baby Incubator”, *Journal of Electronic Materials*, 49, 4053–4066, (2020).

Konferans listesi

• Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Determination and Validation of Effective Material Properties from Manufacturer Provided Maximum Parameters of a Thermoelectric Cooler”, *6th International Symposium on Engineering, Artificial Intelligence and Applications*, Girne, (2019).

• Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Extraction of Realistic Material Properties of a Thermoelectric Generator from Provided Maximum Performance Parameters”, *6th International Symposium on Engineering, Artificial Intelligence and Applications*, Girne, (2019).

- Yeler, O. and Koseoglu, M. F., “Determination of Thermal Output Parameters and Material Properties of Thermoelectric Cooling Modules Using Experimental Maximum Parameters”, *22nd Congress on Thermal Science and Technology*, Kocaeli, (2019).

- Yeler, O., Bulut, Y. and Koseoglu, M. F., “Investigation of Efficiencies of Linear and SMPS Power Supplies in Thermoelectric Cooler Systems”, *2nd International Conference on Technology and Science*, Burdur, (2019).