

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASKERİ KARA ARAÇLARINDA TERMAL
DENGELERİN BELİRLENMESİ VE SİLİKA
JEL DESTEKLİ İKLİMLENDİRME
SİSTEMİNİN TEORİK VE DENEYSEL
MODELENMESİ

Burak DİBEK

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Özden AĞRA

Ocak, 2025

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASKERİ KARA ARAÇLARINDA TERMAL DENGELERİN
BELİRLENMESİ VE SİLİKA JEL DESTEKLİ
İKLİMLENDİRME SİSTEMİNİN TEORİK VE DENEYSEL
MODELLENMESİ**

Burak DİBEK tarafından hazırlanan tez çalışması 13.01.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Özden AĞRA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Özden AĞRA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alihsan KOCA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Nurullah KAYACI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Özden AĞRA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Askeri Kara Araçlarında Termal Dengelerin Belirlenmesi ve Silika Jel Destekli İklimlendirme Sisteminin Teorik ve Deneysel Modellenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Burak DİBEK

İmza



Bu çalışma, FNSS Savunma Sistemleri A.Ş tarafından desteklenmiştir.



*Aileme,
Sevgili Eşime
ve
Oğullarım Furkan ve Kaan'a*

TEŞEKKÜR

Lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimlerim boyunca bilgisi, tecrübesi ve örnek kişiliği ile bana her konuda her zaman yol gösteren, akademik ve profesyonel kariyerimin her anında desteğini sunan, tez çalışmalarımı derin uzmanlığı ve çok değerli yorumları yönlendiren değerli danışmanım Sn. Prof. Dr. Özden AĞRA ‘ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince çok kıymetli yorum ve fikirleri ile her daim yanımda olan, yol gösteren, çözüm üreten ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer öğretim üyeleri Sn. Prof. Dr. İsmail TEKE, Sn. Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ ve Sn. Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU ‘na çok kıymetli katkıları dolayı en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca birlikte çalışma fırsatı bulduğumuz ve her zaman bilgi ve tecrübesini paylaşan kıymetli çalışma arkadaşım Halil Can ÖZAYDIN ‘a, tez çalışmalarım boyunca uzmanlığı ile kıymetli katkılarını sağlayan Akay DUMATOĞLU ‘na, bu uzun çalışma süresi boyunca bana destek sağlayan tüm ekip arkadaşlarıma, iş arkadaşlarıma ve yöneticilerime teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde sonsuz emeği ve hakkı olan, her daim yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer babam Hüsamettin DİBEK ‘e, sevgili annem Müslüme DİBEK ‘e, çok değerli ağabeylerim Çağatay DİBEK ve Samet DİBEK ‘e ve onların kıymetli ailelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun yolda her an her saniye maddi manevi yanımda olsan, sevgisi ile bana ilerlememi sağlayan enerjiyi veren, uzmanlığı ile çalışmama katkı sağlayan sevgili eşim Doç. Dr. Münevver İLGÜN DİBEK ‘e ve onun kıymetli ailesi İLGÜN ailesine, son olarak varlıkları ile hayatıma anlam katan ve tüm çalışmalarımın temel sebebini oluşturan en kıymetlilerim oğullarım Furkan DİBEK ve Kaan DİBEK ‘e dünyamı güzelleştirdikleri için sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Burak DİBEK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
2 TEMEL KAVRAMLAR	5
2.1 Askeri Zırhlı Araçlar	5
2.1.1 Hareket Kabiliyetine Göre Zırhlı Araçlar	5
2.1.2 Görevlerine Göre Zırhlı Araçlar	7
2.2 Zırhlı Araçlarda Konvansiyonel Klima Sistemi.....	10
2.3 Noktasal Soğutma	12
2.4 Termal Konfor.....	12
2.5 Isı Transfer Mekanizmaları.....	15
2.6 CLO Tanımı ve Askeri Üniformanın CLO Değerinin Belirlenmesi.....	16
2.7 Efektif Sıcaklık Kavramı	19
2.8 Bağıl Nemim Termal Konfor Üzerindeki Etkisi	20

2.9 Nem Alma Sistemleri ve Katı Nem Alıcı Silika Jel.....	21
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	25
3.1 Termal Konfor Literatür Araştırması	25
3.2 Silika Jel Literatür Araştırması	34
4 ANALİTİK ÇALIŞMALAR	38
4.1 Kabuller ve 3 Boyutlu Modelleme	40
4.2 Kafa Üzerinde Gerçekleşen Isı Transferi	43
4.3 Gövde Üzerinde Gerçekleşen Isı Transferi	46
4.4 CFD Çalışması ile Kafanın Modellenmesi	47
4.5 CFD Analizlerinin Deneysel Olarak Doğrulanması	55
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	61
5.1 Deney Düzenegi	61
5.2 Deneylerin Yapılması	65
5.3 Regresyon Analizi	73
5.4 Silika Jel Deneyleri	74
5.4.1 Yatay Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler	84
5.4.2 Eğimli Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler	91
5.4.1 Dikey Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler	97
6 SONUÇ	100
6.1 Termal Denge Eğrileri	101
6.2 Noktasal Soğutma Tekniğinde Üfleme Mesafesinin Önemi.....	108
6.3 Silika Jel ile Aktif Nem Alma.....	112
6.4 Hibrit Sistem Önerileri.....	117
6.5 Öneriler	120
KAYNAKÇA	123
A TUTANAK	127



SİMGE LİSTESİ

A	Alan [m^2]
RH	Bağıl nem [%]
P	Basınç
σ	Boltzmann's sabiti [W/m^2K^4]
l	Boy [m]
dk	Dakika
E	Deriden evaporatif ısı kaybı [W/m^2]
C	Deriden konveksiyon ile olan ısı kaybı [W/m^2]
R	Deriden radyasyon ile olan ısı kaybı [W/m^2]
Q_{sk}	Deriden toplam ısı transferi [W/m^2]
μ	Dinamik viskozite [Ns/m^2]
A_D	DuBois yüzey alanı [m^2]
h	Entalpi [kJ/kg]
ΔH	Entalpi farkı
$D_{gövde}$	Gövde Çapı [m]
g	Gram
V	Hız [m/s]
R	Isı transfer direnci [m^2K/W]
Q	Isı transfer hızı [W]
D_{kafa}	Kafa çapı [m]
ν	Kinematik viskozite [m^2/s]
clo	Kıyafet ısı direnç birimi
kg	Kilogram
D_{AB}	Kütle difüzyon katsayısı [m^2/s]
$\dot{m}$	Kütle transfer hızı [kg/s]
Met	Metabolik hız [W]
M	Metabolik hıza bağlı üretilen enerji [W/m^2]

m	Metre
E_{res}	Nefesten evaporatif ısı transferi [W/m^2]
C_{res}	Nefesten taşınım ile ısı transferi [W/m^2]
R_{et}	Nem geçirgenliği [m^2kPa/W]
Nu	Nusselt boyutsuz sayısı
Pr	Prandtl boyutsuz sayısı
Re	Reynolds boyutsuz sayısı
s	Saniye
$^{\circ}C$	Santigrat derece
Sc	Schmidt boyutsuz sayısı
Sh	Sherwood boyutsuz sayısı
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$, K]
Q_{res}	Solunum ile toplam ısı transferi [W/m^2]
A	Surface area [m^2]
h	Taşınım ısı transfer katsayısı [W/m^2K]
k	Termal iletkenlik [W/mK]
R_{ct}	Üniforma termal direnci [m^2K/W]
R_{et}	Üniforma nem geçirgenlik direnci [m^2Pa/W]
S	Vücut ısı depolama oranı [W/m^2]
W	Watt
W	Yapılan iş sonucu harcanan enerji [W/m^2]
ε	Yüzey emicilik katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Paletli askeri zırhlı araçlara örnekler	6
Şekil 2.2 Tekerlekli askeri zırhlı araçlara örnekler.....	7
Şekil 2.3 Zırhlı askeri ambulans aracı	8
Şekil 2.4 Zırhlı askeri keşif ve gözetleme aracı.....	8
Şekil 2.5 Zırhlı askeri hava savunma sistemi aracı	9
Şekil 2.6 Zırhlı askeri iş makinası aracı	9
Şekil 2.7 Orta sınıf ağırlıklı tank aracı	9
Şekil 2.8 Tank-Savar Silah Taşıyıcı Araç	10
Şekil 2.9 Askeri Zırhlı Muharebe Aracı	10
Şekil 2.10 Askeri zırhlı bir araçta bulunan konvansiyonel klima sistemi ve sistemin bileşenleri	11
Şekil 2.11 Askeri zırhlı araçta örnek bir noktasal soğutma üfleci yerleşimi.....	11
Şekil 2.12 Termal konforu etkileyen parametreler	13
Şekil 2.13 Orijinal askeri üniforma test numunesi ve SDL ATLAS M259B Test Cihazı	19
Şekil 2.14 Silika jel örnekleri	23
Şekil 2.15 Silika jel tekerleği ile rejenerasyon prosesi	24
Şekil 3.1 Psikrometrik Diyagram	28
Şekil 3.2 0.5 Clo için efektif sıcaklık diyagramı	29
Şekil 4.1 Analitik modele için temel teşkil edecek insan modeli	41
Şekil 4.2 Baş ve gövde özelinde sadeleştirilmiş model.....	41
Şekil 4.3 Kafa Üzerinde Şartlandırılmış Hava Akışı.....	43
Şekil 4.4 Nefes Alıp Verme Isı Transferi	45
Şekil 4.5 Gövde üzerinde gerçekleşen ısı transferinin şematik şekli	46
Şekil 4.6 Üniforma direnci ile nem geçirme.....	47
Şekil 4.7 CFD analizlerinden örnek görsel.....	48
Şekil 4.8 25cm mesafe, 20 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği.....	52
Şekil 4.9 25cm mesafe, 20 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği.....	52

Şekil 4.10 25cm mesafe, 25 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği	53
Şekil 4.11 25cm mesafe, 25 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği	53
Şekil 4.12 25cm mesafe, 30 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği	54
Şekil 4.13 25cm mesafe, 30 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği	54
Şekil 4.14 Personel kafasının 3 boyutlu modellenmesi ve ölçüm alanı	55
Şekil 4.15 Kafa bölgesi hava özellikleri ölçüm noktaları.....	56
Şekil 4.16 Deney düzeneğinde portatif soğutucu ve ısı tabancası.....	56
Şekil 4.17 Deney düzeneğinde hava emiş motoru ve DC güç kaynağı.....	57
Şekil 4.18 Hava özellikleri ölçüm düzeneği.....	57
Şekil 4.19 Üfleç çıkışında pitot tüpü ve sıcaklık sensörü yerleşimi	58
Şekil 4.20 Deney düzeneğinde anemometre yerleşimi ve ölçüm mekanizması....	58
Şekil 4.21 CFD analizlerine göre personel kafası bölgesinde hava hızı dağılımı .	59
Şekil 4.22 DeneySEL ölçümlere göre personel kafası bölgesinde hava hızı dağılımı	59
Şekil 5.1 Termal konfor deney düzeneği.....	61
Şekil 5.2 Toprak testi içerisinde su doldurulmadan öncesi ve sonrası	63
Şekil 5.3 Toprak testinin terleme benzeşimi deney düzeneği	64
Şekil 5.4 Toprak testi üzerinde sıcaklık sensörleri yerleşimi	65
Şekil 5.5 Hassas terazi ile testi ağırlığının ölçümü.....	66
Şekil 5.6 Testi ağırlığının zamana bağlı değişimi grafiği.....	66
Şekil 5.7 Termal konfor deneyleri ölçümleri.....	67
Şekil 5.8 Analitik model ile belirlenen toplam ısı transferi değeri ile deneysel olarak gerçekleşen toplam ısı transferi değerlerinin arasındaki hata oranı dağılımı	69
Şekil 5.9 Termal Denge Eğrisi Örneği	73
Şekil 5.10 Silika jel ile aktif nem alma ön deney düzeneği şematığı	78
Şekil 5.11 Silika jel ile aktif nem alma ön deney düzeneği.....	78
Şekil 5.12 Silika jel ile aktif nem alma denemesi.....	80
Şekil 5.13 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sıcaklık ve bağıl nem değişimleri	81
Şekil 5.14 Silika jel ile aktif nem alma deneyi kademeli değişimde sıcaklık ve bağıl nem değişimleri	82
Şekil 5.15 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sonrası sıcaklık dağılımı	83
Şekil 5.16 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sonrası silika jellerin neme doyma görüntüsü.....	83

Şekil 5.17 Silika jel ile aktif nem alma deneyleri sonrası silika jel parçacıkları arasında nem dağılımının değişimi	84
Şekil 5.18 Yatay olarak yerleştirilen silika jel kitli deney düzeneği şematiği.....	85
Şekil 5.19 Yatay olarak yerleştirilen silika jel kitli deney düzeneği	86
Şekil 5.20 Yatay yerleşim silika jel kiti deney sonu görüntüsü.....	87
Şekil 5.21 Yatay yerleşim silika jel kiti deneyleri verilerin değişimi grafiği.....	87
Şekil 5.22 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi.....	88
Şekil 5.23 Yatay yerleşim silika jel kiti – 710gr	88
Şekil 5.24 710gr yatay yerleşim silika jel kiti deneyi verileri	89
Şekil 5.25 Yatay yerleşim keseli silika kiti görseli	90
Şekil 5.26 Yatay yerleşim keseli silika kiti deneyi verileri	90
Şekil 5.27 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi.....	91
Şekil 5.28 Silika jel kitinin eğimli olarak pozisyonlanması	92
Şekil 5.29 Eğimli silika jel kiti deneyleri verileri.....	92
Şekil 5.30 Eğimli silika jel kiti yerleşimi – 710gr.....	93
Şekil 5.31 710gr eğimli silika jel kiti deneyi verileri	94
Şekil 5.32 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi.....	95
Şekil 5.33 Üç bölge silika jel kiti yerleşimi	96
Şekil 5.34 Eğimli yerleşimde silika jel kitinin eğim açısının gösterimi	96
Şekil 5.35 Dikey olarak silika jel kitinin pozisyonlanması	97
Şekil 5.36 Dikey konumlandırılmış konik tasarımlı silika jel kiti.....	98
Şekil 6.1 25cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri.....	102
Şekil 6.2 50cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri.....	103
Şekil 6.3 75cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri.....	103
Şekil 6.4 Personel tüm vücudu üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferine kafa ve gövde üzerinde gerçekleşen ısı transferi miktarlarının oranları	106
Şekil 6.5 Personel üzerinde gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarının toplam ısı transferi miktarına dağılımı.....	107
Şekil 6.6 Personel kafası üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferinde ısı transfer mekanizmalarının dağılımı.....	107
Şekil 6.7 Üfleme mesafesine göre etkili ısı transfer yüzey alanının değişimi.....	110
Şekil 6.8 En etkili ısı transferi için optimum üfleme mesafesinin gösterimi	110
Şekil 6.9 1 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı	111

Şekil 6.10 6 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı	111
Şekil 6.11 10 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı	112
Şekil 6.12 Farklı silika jel eğimi açılarında nem alma ve hava hızı değerleri.....	115
Şekil 6.13 Silika jel kiti eğimine göre hava hızı değişimi	116
Şekil 6.14 T Silika jel kiti eğimine göre silika jel nem alma farkı değişimi	116
Şekil 6.15 Hal değişimi ve hal değişim enerjisi	119
Şekil 6.16 Farklı erime/donma sıcaklıklarına göre faz değiştiren malzeme çeşitleri	119
Şekil 6.17 Faz değiştiren malzemelerin farklı şekillerde paketlenme örnekleri..	120



TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Görünür sıcaklık verileri	30
Tablo 4.1	Kabuller	42
Tablo 4.2	Kafa üzerinde bölgesel üfleme havası hızı değerleri örnek tablosu	49
Tablo 4.3	Kafa üzerinde bölgesel üfleme havası sıcaklığı değerleri örnek tablosu	50
Tablo 4.4	Personelin kafası ve gövdesi üzerinde gerçekleşen ortalama sıcaklık ve hava hızı değerleri	50
Tablo 4.5	Deneysel ölçümler ile CFD analizi sonuçlarının karşılaştırılması.....	60
Tablo 5.1	Deney düzeneği ekipmanları	62
Tablo 5.2	Deney şartları.....	68
Tablo 5.3	Analitik değerler ile ölçümlenen değerler ve hata oranı	68
Tablo 5.4	Analitik model ile çözümleme yapılan farklı hava özellikleri ve üfleme mesafesi değerleri.....	70
Tablo 5.5	Farklı aktiviteler için genel ısı üretimleri	71
Tablo 5.6	Regresyon analizi sonuçları	73
Tablo 5.7	Farklı eğim açılarında gerçekleşen bağıl nem farkı ve hava hızı değerleri dağılımı.....	97
Tablo 6.1	Silika jel deneyleri sonuçları.....	114

ÖZET

Askeri Kara Araçlarında Termal Dengelerin Belirlenmesi ve Silika Jel Destekli İklimlendirme Sisteminin Teorik ve Deneysel Modellenmesi

Burak DİBEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Özden AĞRA

Askeri zırhlı kara araçları, kullanım amaçları ve tasarımsal özellikleri itibarıyla sivil araçlardan farklıdır. Bu araçlarda, araç içi tüm ortamın iklimlendirilmesi yerine, genellikle içerideki personele doğrudan şartlandırılmış hava sağlayan noktasal soğutma tekniği kullanılmaktadır. Ancak konvansiyonel klima sistemleri, motor tahrikli buhar sıkıştırırmalı çevrimlere dayanmakta ve araç motoru çalışmadığında soğutma yapamamaktadır. Bu durum, askeri operasyonlarda araç motorunu çalıştırmadan araçta beklemesi gereken personel için ikincil bir iklimlendirme sistemine ihtiyaç doğurmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, askeri araçlarda noktasal soğutma tekniklerini optimize ederek motor çalışmadığında belirli süreli (ör. 30 dakika) termal konfor sağlayacak analitik bir model geliştirmek ve alternatif soğutma yöntemlerinin uygulanabilirliğini değerlendirmektir. Bu kapsamda, mevcut literatürde yer alan

eksiklikleri gidermeye yönelik hem teorik hem de deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin amacı, hipotezleri ve literatür özeti sunulmuştur. Bu bölüm, çalışmanın genel çerçevesini ve araştırma sorularını kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır.

İkinci bölümde, askeri zırhlı araçlar, kullanılan konvansiyonel klima sistemleri ve temel kavramlar ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, iki temel başlıkta, termal konfor ve noktasal soğutma tekniği ile silika jel ve katı nem alıcılar konusunda yapılan literatür araştırmaları ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, askeri zırhlı araçlardaki noktasal soğutma tekniğini modelleyen bir analitik model geliştirilmiş ve farklı üfleme havası özelliklerinin ve üfleme mesafelerinin toplam ısı transferine etkisi incelenmiştir. Bu model ile farklı üfleme koşullarında personelden uzaklaştırılabilecek toplam ısı miktarı belirlenebilmektedir.

Beşinci bölümde analitik modelin doğrulanması ve analizler sonunda ısı transferinde en etkili parametre olduğu belirlenen bağıl nemli askeri araç iklimlendirme sisteminde silika jel ile aktif olarak düşürülebilirliği üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde, sonuç ve tartışmalara yer verilmiştir. Deneysel olarak doğrulanan analitik model, noktasal soğutma tekniği ile asgari termal şartları sağlayacak üfleme havası şartları ve bu şartlara bağlı termal denge eğrileri sunulmuştur. Ayrıca, noktasal soğutmada üfleme mesafesinin kritik etkisi analiz edilmiş ve silika jelin farklı tekniklerle kullanımına yönelik avantaj / dezavantajlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Termal konfor, noktasal soğutma, askeri araç, ısı ve kütle transferi, silika jel

ABSTRACT

Determination of Thermal Balances in Military Land Vehicles and Theoretical and Experimental Modelling of Silica Gel Supported Air Conditioning System

Burak DİBEK

Department of Mechanical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Özden AĞRA

Design and purpose differentiate military armored land vehicles from civilian vehicles. These vehicles use spot cooling technique instead of conditioning the entire interior. Conventional engine-driven air conditioning systems cannot cool when the engine is off. Military personnel who must stay in the vehicle without starting the engine need a secondary climate control.

By optimizing spot cooling techniques in military vehicles, this thesis develops an analytical model that delivers thermal comfort for a certain length (e.g., 30 minutes) when the engine is off and evaluates different cooling methods.

The thesis has six chapters. The first chapter contains the thesis purpose, hypotheses, and literature summary. This section presents the overall framework of the study and the research questions.

The second section covers military armored vehicles, conventional air conditioning systems, and basic terms.

Under two subheadings, the third section comprises literature reviews on thermal comfort and spot cooling techniques, as well as silica gel and solid desiccants.

In the fourth section, an analytical model was developed to simulate the spot cooling technique, and the effect of different blowing air characteristics and blowing distances on total heat transfer was examined. This model determines the overall heat transfer removed from personnel under different blowing conditions.

In the fifth chapter, after the verification of the analytical model, experimental studies were conducted on the reduction of the relative humidity, which was determined to be the most effective parameter in heat transfer, using silica gel in the military vehicles.

The sixth section presents result and discussions. The experimentally proven analytical model shows the blowing air conditions that will provide the minimum thermal conditions for spot cooling and the thermal balance curves that depend on them. The critical effect of blowing distance in spot cooling and the pros/cons of using silica gel with different methods have also been examined.

Keywords: Thermal comfort, spot cooling, military vehicle, heat and mass transfer, silica gel

1.1 Literatür Özeti

Askeri zırhlı muharebe araçları sivil araçlardan kullanım amaçları ve fiziksel yapıları gereği ayrılan, farklı askeri operasyonlara uygun olarak farklı özelliklerde tasarlanan ve üretilen araçlardır. Her geçen gün bu araçların kullanım amaçları çeşitlenmekte ve dolayısı ile amacına uygun olarak araçların tasarım çözümlerinin de özelleşmesi gerekmektedir. Bazı askeri operasyonlar gereği bu araçların belirli bölgelerde konumlanarak belirli bir süre için beklemesi ve bu bekleme süresi içerisinde de araç içerisindeki askeri personelin bazı görevleri araçtan çıkmadan ve araç motorunu çalıştırmadan tamamlaması gerekmektedir. Özellikle dış ortam sıcaklığının yüksek olduğu zamanlarda hem dış ortamdan gelen hem de araç içerisindeki ekipmanlardan kaynaklanan ısı girdisi ile araç iç ortam sıcaklığı yükselmekte ve araç içerisindeki personel için olumsuz ortam şartlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Araç motoru çalıştırılmadığı için de aracın mevcut klima sistemi araç içerisindeki personel için soğuk hava sağlayamamaktadır. Bu durumda araç içerisindeki askeri personel için gerekli minimum termal konfor şartlarının belirlenmesi ve alternatif bir sistem ile araç içerisindeki askeri personelin termal konforunun azami düzeyde sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla belirli bir süre için araç içerisindeki personelin termal konforunu sağlamak amacı ile tasarlanacak olan alternatif bir iklimlendirme sistemi için araç içerisindeki personelden gerekli ısıyı uzaklaştırabilecek hedef çalışma değerleri termal konfor çalışmaları ile belirlenmektedir. Ayrıca personele sağlanacak iklimlendirme havasının soğutulması yerine bağıl neminin düşürülmesi tekniği ile de personelden ısı uzaklaştırmak için katı nem alıcı silika jeller bir alternatif çözüm olmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Tüm dünya genelinde ülkeler, sınırlarını koruma ve vatandaşlarına güvenli bir yaşam ortamı sunma amacıyla çeşitli savunma teknolojileri geliştirmektedir. Bu teknolojiler arasında, tarihsel süreç boyunca zırhlı askeri muharebe araçları önemli bir yer tutmuştur. Askeri kara araçları, teknik açıdan özelleştirilmiş taşıtlar olarak değerlendirilebilir ve bu bağlamda, sivil otomotiv araçlarında olduğu gibi bu araçlarda da ısıtma, soğutma ve iklimlendirme sistemleri bulunmaktadır. Ancak, askeri araçların kullanım koşulları ve işlevleri, sivil otomobillerden büyük ölçüde farklılık göstermektedir. Tarihsel olarak bu araçlarda öncelik savunma ve muharebe kabiliyetlerine verilmiştir. Bununla birlikte, teknolojik ilerlemeler ve insan sağlığına artan önem doğrultusunda araç içi konfor, askeri zırhlı araçlar için de giderek daha önemli hale gelmiştir.

Zırhlı askeri araçlar, yapısal ve işlevsel özellikleri nedeniyle sivil taşıtlardan farklı bir yapıya sahiptir. Bu araçlarda, operasyonel dayanıklılık, balistik koruma ve göreve özgü özelleştirme gibi faktörler ön plandadır. Özellikle sıcak iklim koşullarında personelin termal konforunu sağlamak amacıyla, tüm aracın soğutulması yerine noktasal soğutma (spot cooling) teknikleri sıklıkla tercih edilmektedir. Bu teknik, şartlandırılmış havayı doğrudan personelin üzerine yönlendirerek hem enerji hem de zaman tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin, yaz aylarında uzun süre güneş altında kalan büyük bir zırhlı aracın iç ortam havasını istenen termal koşullara getirmek ciddi bir süre ve yüksek kapasiteli bir klima sistemi gerektirebilir. Ancak, noktasal soğutma sistemiyle aracın iç ortamını tamamen soğutmak yerine personelin bireysel termal konforu sağlanarak daha verimli bir çözüm elde edilebilmektedir.

Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan iklimlendirme sistemleri, genellikle araç motorundan tahrik edilen buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimlerini içermektedir. Noktasal soğutma uygulamalarında, bu sistemden elde edilen soğuk hava doğrudan personelin baş ve yüz bölgesine yönlendirilerek etkin bir termal konfor sağlanmaktadır. Ancak, bu araçların muharebe dışında kontrol üssü, veri merkezi veya komuta merkezi gibi yeni işlevlerle kullanılması, iklimlendirme sistemleri açısından farklı senaryoların değerlendirilmesini gerektirmektedir. Örneğin, motorun çalışmadığı durumlarda personelin araç içinde belirli bir süre boyunca

görev yapması gerektiğinde mevcut klima sistemlerinin aktif olarak çalıştırılamaması önemli bir sorun teşkil etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, motor çalışmadığı durumlarda belirli bir süre (30 dakika) boyunca askeri personelin termal konforunu sağlamak için noktasal soğutma tekniğine dayalı bir analitik model geliştirmek ve bu modeli kullanarak personelden uzaklaştırılabilecek ısı miktarının; üfleme havasının hızı, sıcaklığı, bağıl nem oranı ve üfleme noktası ile personel arasındaki mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemektir. Ayrıca, personelin termal konforunu artırmak amacıyla uygulanabilecek alternatif soğutma teknikleri üzerine de araştırmalar yapılmıştır.

Bu bağlamda, genellikle pasif nem alıcı olarak kullanılan bir katı nem alıcı türü olan silika jelin, aktif bir nem alıcı olarak iklimlendirme sistemlerinde kullanılabilirliği incelenmiş ve farklı uygulama tekniklerinin avantajları ile dezavantajları değerlendirilmiştir. Literatürde bu ihtiyaca yönelik kapsamlı bir araştırmanın bulunmaması, çalışmanın askeri zırhlı araçlarda iklimlendirme sistemi tasarımlarına yönelik katkısını önemli kılmaktadır.

1.3 Hipotez

Noktasal soğutma (spot cooling) tekniği, hedeflenen bir objeden veya ortamdaki ısı uzaklaştırılması prensibine dayanan bir ısı transfer yöntemidir. Bu teknik, genel anlamda bölgesel soğutma olarak değerlendirilebilir. Eğer hedef obje bir insan ise, insan vücudundan ısı uzaklaştırmanın farklı mekanizmaları ve yöntemleri bulunmaktadır. İlk akla gelen çözüm genellikle kişiye, vücut sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta hava üflenmesi olsa da, bu yöntem insan vücudundan ısı uzaklaştırmanın tek yolu değildir. Noktasal soğutma tekniği ile gerçekleştirilen bu süreç, yalnızca bir "soğutma" prosesi değil, aynı zamanda bir ısı ve kütle transferi prosesi olarak ele alınmalıdır.

İnsan vücudu, yaşayan, metabolik aktiviteler yoluyla ısı üreten, terleme ve solunum gibi doğal mekanizmalarla ısı ve nem kaybını düzenleyen, aynı zamanda iç ve dış sıcaklıklarını belirli bir dengede tutması gereken bir biyolojik sistemdir. Bu bağlamda, noktasal soğutma uygulandığında, insan vücudu üzerinde birden fazla ısı transferi mekanizması etkin hale gelmektedir. Bu mekanizmaların doğru bir şekilde anlaşılması ve bu mekanizmaları etkileyen parametrelerin titizlikle analiz

edilmesi, soğutma havasının yalnızca sıcaklık değerine odaklanmaksızın, farklı tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine olanak sağlayabilir. Örneğin, bir kişiye soğuk hava üflemeden hatta vücut sıcaklığından daha sıcak, ancak düşük bağıl neme ve yüksek hıza sahip bir hava üflenerek bile vücut üzerinden ısı uzaklaştırılması mümkün olabilmektedir. Bu yaklaşım, geleneksel sistemlerin ötesinde yenilikçi soğutma tasarımlarının geliştirilmesine ve mevcut sistemlerin enerji verimliliğinin optimize edilmesine katkı sağlayabilir.

Bu kapsamda oluşturulan araştırma hipotezleri;

Hipotez 1:

Noktasal soğutma tekniği, geleneksel tam kabin soğutma yöntemlerine kıyasla enerji tüketimini azaltarak termal konforu sağlayabilir.

Hipotez 2:

Noktasal soğutma ile yüksek sıcaklık altında bulunan bireylerin performansı ve termal konforu artırılabilir.

Hipotez 3:

Noktasal soğutma tekniği ile, insan vücudundan yeterli miktarda ısı uzaklaştırılabilmesi için yalnızca soğuk hava kullanımı zorunlu değildir; bağıl nemi düşürülmüş ve hızı artırılmış görece daha sıcak hava ile de etkin bir ısı uzaklaştırma sağlanabilir.

2 TEMEL KAVRAMLAR

2.1 Askeri Zırhlı Araçlar

İnsanoğlunun hayatta kalma içgüdüğü gereği koruma ve korunma ihtiyacı insanlığın başından beri hep var olmuştur. En başlarda dış tehditlere karşı gelişen bu ihtiyaç daha sonra sivilleşmenin artması ile birlikte insanların kendilerini ve kendilerine ait olanları da koruma ihtiyacına evrilmiştir. İlerleyen süreçle ülkelerin ve sınırların oluşması ile birlikte de koruyuculuk ya da güvenlik görevini üstlenen askerlik mesleği ortaya çıkmıştır. Bu mesleğe mensup askerlerin ya da güvenlik personelinin kullanımı için de özel olarak askeri ekipmanlar, cihazlar geliştirilmiş ve geliştirilmektedir.

Şüphesiz ki tüm ülkeler hem vatandaşlarını hem de ülke sınırlarını korumak ve güvenliği sağlamak ile sorumludur. Bu yüzden de farklı sınıflarda olmak üzere çok çeşitli askeri teknolojiler geliştirilmektedir.

Üzerinde yaşadığımız kara kıtaları gereği en büyük teknoloji alanlarından birisi askeri kara teknolojileridir. Kara sistemlerinin başında gelen sistemlerden birisi de askeri zırhlı kara araçlarıdır.

Askeri zırhlı kara araçları farklı kullanım senaryoları ve görev gerekliliklerine göre çok farklı yapılarda farklı şekillerde üretilmektedir. Temelde bir kara aracı, hareketlilik çözümü olarak sivil araçlar ile benzer alt yapıda olsa da “askeri şartlar ve gereksinimler” gereği yapısal, boyutsal, dayanıklılık ve görev anlamında farklılaşmaktadır.

2.1.1 Hareket Kabiliyetine Göre Zırhlı Araçlar

Askeri kara araçları farklı boyutlarda ve dolayısı ile farklı ağırlıklarda üretilmektedir. Balistik olarak korunaklı olmaları için özel gövdeleri, ekstra gövde

üzeri balistik zırhları ve üzerlerinde taşıdıkları ekipmanlar ve silahlar düşünüldüğünde ağırlıkları tonlarca olabilmektedir. Bu da bu ağırlıktaki araçların hangi zeminde nasıl hareket edebileceklerinin düşünülmesini gerektirmektedir. Ülkelerin genel sınır yapıları ve coğrafik durumları düşünüldüğünde bu araçların kullanım alanları yer yer şehirleşmiş, özel yollara sahip alanlar olabilirken, yer yer de zorlu zemin şartlarına sahip engebeli araziler olabilmektedir. İşte bu noktada tasarlanan bu zırhlı askeri araçların hareket kabiliyeti çözümü kritik önem taşımaktadır.

Askeri zırhlı kara araçlarında hareket kabiliyeti genel olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

- Tekerlekli Zırhlı Askeri Araçlar
- Paletli Zırhlı Askeri Araçlar

Paletli araçlar uzun yıllardır zorlu zemin şartlarında engebeli arazilerde sıklıkla tercih edilen araçlardır. Bu araçlarda kullanılan palet çözümü dozer, kepçe gibi makinaları da düşünüldüğünde benzer mantık ile kaygan olabilecek, hareketi zorlaştıracak, hendek çukur tümsek gibi engebelerin çok olduğu arazilerde araç yükünü ve hareket kabiliyetini zemin üzerinde yayıp hareketi kolaylaştırmak üzerine kurulu bir çözümdür. Paletli zırhlı askeri kara araçlarına örnekler Şekil 2.1 [1] 'de görülmektedir.



Şekil 2.1 Paletli askeri zırhlı araçlara örnekler

Tekerlekli askeri zırhlı kara araçları ise sivilleşmenin artması ile şehirleşmenin yaygınlaşması sonucu engebeli arazilerin dışında şehirleşmiş bu alanlarda da zırhlı askeri araçlara olan ihtiyaç sonucu üretilen ve geliştirilen araçlardır. Ayrıca gelişen askeri teknolojiler ile birlikte daha hızlı, manevra yeteneği daha gelişmiş, konfor ihtiyacı daha yüksek araçlara olan ihtiyacın artması ile gelişimlerini

sürdürmüşlerdir. Şöyle ki bu araçlar 4-6-8 tekerlekli gibi çözümlerle geliştirilirken paletli araçlara göre daha yüksek hızlara çıkabilme, farklı süspansiyon teknolojileri ile farklı zeminlerde daha avantajlı kullanım sunma, daha konforlu olma gibi üstünlüklere sahip olabilmektedir. Ancak tabi bu kavramlar her zaman avantajdır denilemez. Bu kavramların ne zaman avantaj ne zaman dezavantaj oldukları araç için düşünülen görev senaryosuna göre değişmektedir. Bu noktada da zırhlı askeri araçların görevlerine göre sınıflandırılması gündeme gelmektedir. Tekerlekli zırhlı askeri kara araçlarına örnekler Şekil 2.2 [1] 'de görülmektedir.



Şekil 2.2 Tekerlekli askeri zırhlı araçlara örnekler

2.1.2 Görevlerine Göre Zırhlı Araçlar

Askeri zırhlı kara araçları denilince araç adlandırmasında da zırhlı ibaresi bulunduğu için sıkça araçların “savaş” aracı olduğu ve dolayısı ile “savaştığı” düşünülmektedir. Savaş denildiğinde ise sıklıkla karşılıklı ateş gücüne dayalı çatışmanın olduğu bir durum hayal edilmektedir. Ancak aslında bunu savaştan çok barışı koruma ve güvenliği sağlama olarak düşünmek gerekir. Pek tabi doğal olarak korumak için önce korunmak gerekmektedir. İşte bu korunma gereksinimi bu araçların zırhlı olmasını gerektirmektedir.

Barışı ve güvenliği korumak ise bazen barış ve güvenliği tehdit eden unsurlara karşı harekete geçmeyi gerektirmektedir. Bu harekete geçme durumu ise stratejik olarak yönetilmesi gereken ve içerisinde birçok farklı plan barındıran bir durumdur. Bu sebeple de farklı çokça plana uygun görevler oluşturulmakta ve bu görevlere uygun olarak da zırhlı askeri kara araçları tasarlanmakta ve üretilmektedir.

Askeri zırhlı kara araçlarından beklenti her şeyden önce ilk olarak bir hareketlilik çözümüdür. Yani gerek personelin gerek bazı sistemlerin gerekse de mühimmatların ya da ekipmanların bir yerden bir yere taşınması, hareket ettirilmesi içindir. Bu da araçların her zaman ateşli çatışmaya gireceği bir durumdan çok

durum ve şartlar ne gerektiriyorsa o durum ve şartlarda fayda sağlamalarını gerektirmektedir.

Bu anlamda genel olarak bu araçlar zırhlı personel taşıyıcı ve zırhlı muharebe araçları olarak sınıflandırılmaktadır. Zırhlı personel taşıyıcılar daha çok farklı görev ve sorumluluklara sahip personelin bu görev ve sorumluluklarını güvenli bir şekilde yerine getirebilmeleri ve yine güvenle seyahat edebilmelerini sağlayan araçlardır. Bu araçlar farklı kullanıcı sistemleri ile donatılmakta ve bu sistemler farklı amaçlara hizmet edebilmektedir. Örneğin bazen bu araçlar direkt olarak mümkün olan en yüksek sayıda personeli güvenli görev alanına taşımaya odaklanırken, bazen de ambulans aracı olarak görev yapmaktadır. Benzer şekilde bazen dozer bıçağı, kurtarma vinci, mayın işaretleme sistemi gibi faydalı bir sistemi taşıyarak yardımcı rol üstlenirken bazen de radar ve sensör cihazları ile donatılarak komuta ve gözetleme aracı olarak görev yapmaktadır. Yani aslında ana amacı ağır muharebe sahasında sıcak çatışmada bulunmak yerine görev odaklı kullanılan araçlardır. Bu araçlara bazı örnekler aşağıda Şekil 2.3 [1], Şekil 2.4 [1], Şekil 2.5 [1] ve Şekil 2.6 [1] 'da verilmektedir.



Şekil 2.3 Zırhlı askeri ambulans aracı



Şekil 2.4 Zırhlı askeri keşif ve gözetleme aracı



Şekil 2.5 Zırhlı askeri hava savunma sistemi aracı



Şekil 2.6 Zırhlı askeri iş makinası aracı

Zırhlı muharebe araçları ise daha çok muharebe alanında ateş gücüne dayalı görev ve sorumluluklar için kullanılan araçlardır. Bu araçlar üzerine güçlü ya da özelleştirilmiş ateş gücüne sahip silahlar, silah kuleleri ya da ekipmanlar entegre edilmekte ve benzer şekilde kendilerine doğru gelen zararlı etkene karşı da gerekli korumayı sağlayabilecek yapıda tasarlanmakta ve üretilmektedir. Bu araçlara ait bazı örnekler de Şekil 2.7 [1], Şekil 2.8 [1] ve Şekil 2.9 [1] ‘da görülmektedir.



Şekil 2.7 Orta sınıf ağırlıklı tank aracı



Şekil 2.8 Tank-Savar Silah Taşıyıcı Araç



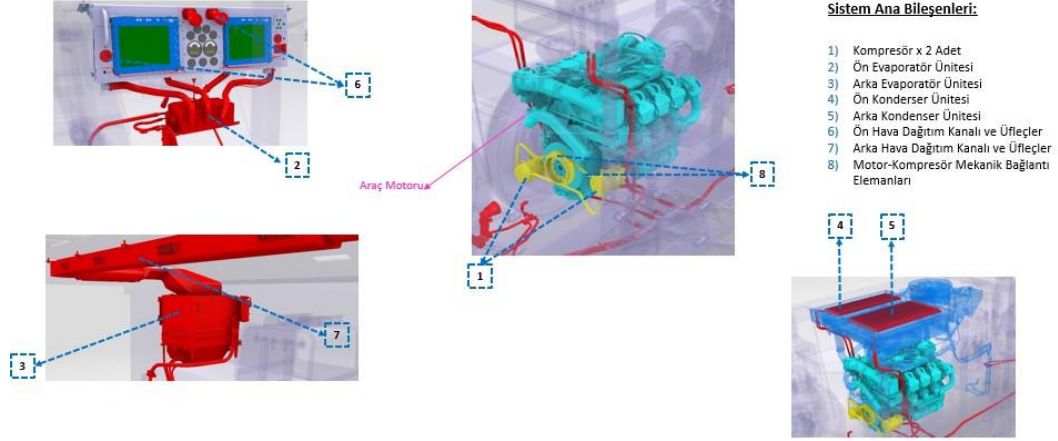
Şekil 2.9 Askeri Zırhlı Muharebe Aracı

2.2 Zırhlı Araçlarda Konvansiyonel Klima Sistemi

Askeri zırhlı kara araçlarında bulunan geleneksel klima sistemleri buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimi tekniğine dayalı olup genellikle araç motorunun bağlı olduğu kayış kasnak sistemi tarafından tahrik edilen bir kompresör, bir evaporatör, bir kondenser ve bir genişleme vanasından oluşmaktadır. Askeri zırhlı bir araçta bulunan klima sistemi örneği Şekil 2.10 [1] 'da gösterilmektedir.

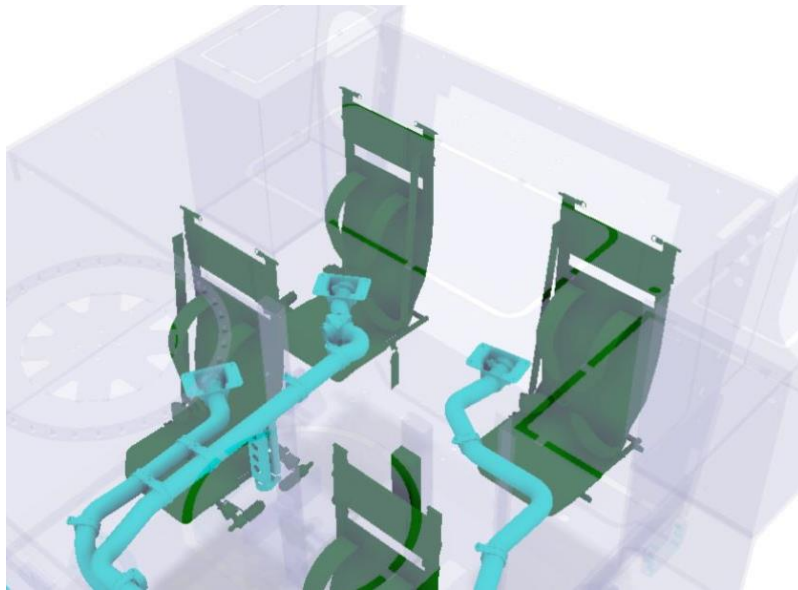
Bu sistem aslında sivil otomotiv araçlarındaki ile benzer bir sistemdir. Araç motoru bir kayış kasnak mekanizması ile klima sisteminin kompresörünü tahrik eder ve sistemin soğutma çevrimi de aktif olmuş olur. Sivil araçlardan farklı olan kısmı ise zırhlı askeri araçların boyutları, gövde yapıları, üretim malzemeleri, araç içi ekipman ve ısı kaynakları, kullanım senaryoları ve içerideki personelin kıyafeti ve

özel korumaları gibi durumlar düşünüldüğünde araç içinde genel bir soğutma yapılması değil noktasal soğutma (spot cooling) tekniği ile personele direkt üfleme yapılmasıdır.



Şekil 2.10 Askeri zırhlı bir araçta bulunan konvansiyonel klima sistemi ve sistemin bileşenleri

Soğutma sisteminin soğutucu çevrimi sivil araçlarımızdaki ile benzer tekniğe dayansa da iklimlendirme sisteminin hava dağıtımı ve beslemesi kısmı noktasal soğutma tekniğine dayandığı için sistemin performans ve tasarım kriterleri tamamen farklılaşmak durumundadır. Şekil 2.11 [1] 'de örnek bir askeri zırhlı araçta her personel için ayrı olarak yerleştirilmiş noktasal soğutma (spot cooling) hava üfleci yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Askeri zırhlı araçta örnek bir noktasal soğutma üfleci yerleşimi

Askeri zırhlı araçlarda görev yapan askeri personel özel kıyafet ve üniformalara sahip olmaktadır. Benzer askeri üniformalar düşünüldüğünde genel olarak askeri personelin dış çevre ortama açık alanı sadece baş bölgesi olmaktadır. Bu sebeple de noktasal soğutma sistemi personelin yüzüne üfleme yapacak şekilde yerleştirilir. Ortalama bir insanın tüm vücut yüzey alanı düşünüldüğünde kafa yüzey alanının vücut yüzey alanına oranı neredeyse %5-6 mertebesinde dir. Bu da noktasal soğutma sisteminin performansının ne kadar dikkatli hesaplanması ve belirlenmesi gerektiğinin önemini ortaya koymaktadır.

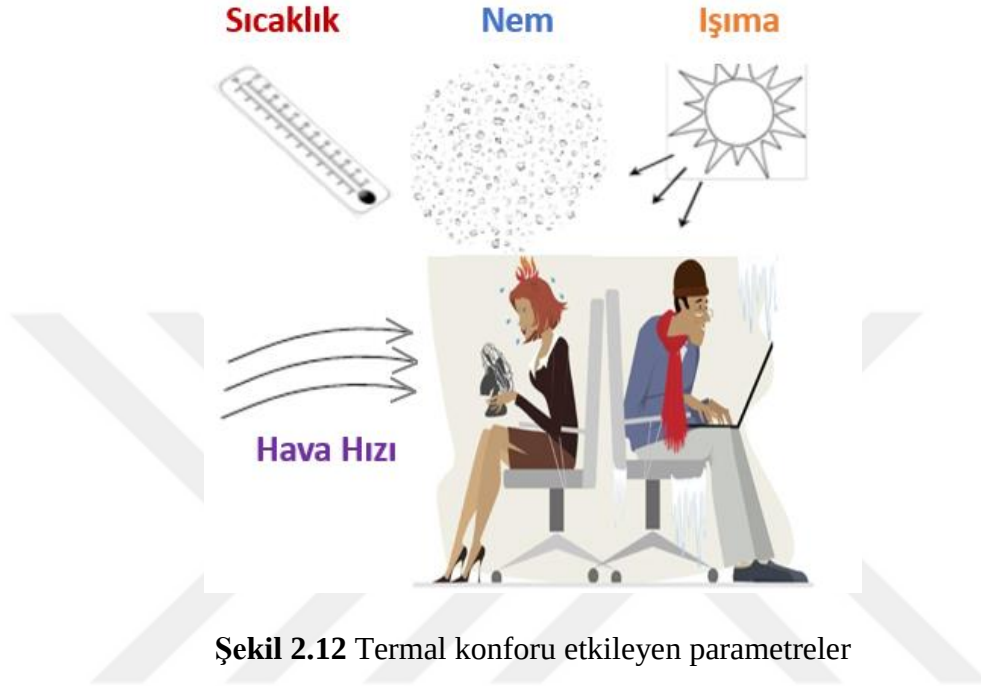
2.3 Noktasal Soğutma

Noktasal soğutma isminden sanki farklı bir soğutma tekniğ i gibi bir anlam çıkıyor olsa da aslında soğutulmak ya da üzerinden ısı uzaklaştırılmak istenen objeye/hedefe şartlandırılmış havanın direkt olarak üflenmesi tekniğidir. Yani üflen en havanın nasıl şartlandırıldığından hangi teknikler ile hangi şartlara getirildiğinden bağımsız olarak şartlandırılan havanın soğutma amacına uygun olarak nasıl yönlendirildiğ ine / beslendiğ ine dair bir tekniktir.

2.4 Termal Konfor

EN ISO7730 standardında termal konfor, zihnin termal çevreden olan memnuniyeti olarak betimlenmektedir [2]. Şüphesiz bu betimleme insanın içerisinde bulunduğ u her durum ve şart için geçerli olmak ile birlikte net bir değ ere işaret etmemektedir. Bu da bu durumun hem kiş iye hem de kişinin içinde bulunduğ u çevre şartlarına göre değ işkenlik gösterebileceğ inden dir. Yani termal konfor birçok farklı parametreye göre tanımlanabilir. Bu parametrelerin bazıları kişinin kendisi ile ilgili olup bazıları da çevre ortam ile ilgili parametrelerdir. Yani bu parametreleri iç ve dış parametreler olarak ayırabiliriz. İç parametreler daha çok kiş i özelinde kişinin cinsiyeti, boyu, kilosu, sağık durumu, metabolik aktivitesi, psikolojik hali vb. parametrelerken, dış parametreler kişinin içerisinde bulunduğ u ortam havasının sıcaklığı, bağıl nemi, hareket hız ı, ortam yüzeylerinin sıcaklıkları olarak sayılabilir. Bunun yanında insanın fiziksel özelliklerinin yanında kişinin psikolojik hali, duygu ve hisleri gibi konular da konfor ve de termal konfor anlamında önemli parametrelerdir.

Termal konforu kişinin çevresine karşı sıcak ya da soğuk hissi algısı olarak düşünürsek üzerine odaklanılacak konu insana neyin sıcak ya da soğuk hissettirdiği olacaktır. Bu anlamda dış parametrelerden sıcaklık, nem, hava hızı ve radyasyon ile ısı transferi değerleri termal konforu etkileyen ana parametreler olarak değerlendirilebilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Termal konforu etkileyen parametreler

Bu anlamda termal konfor kişinin yaş, cinsiyet, kilo gibi kişisel özellikleri ve üzerinde giydiği kıyafetler ve metabolik durumu ile birlikte çevresi ile olan ilişkisi olarak düşünülmelidir. Bu şekilde düşünüldüğünde de anlaşılması gereken terimler önem kazanmaktadır.

ASHRAE, Standart 55-2013'te [3] göre insanın bazı aktiviteler sırasında ürettiği enerji değerleri "Met" birimi cinsinden ve W/m^2 birimi cinsinden verilmektedir. 1 Met değeri yaklaşık olarak $58,2 W/m^2$ olarak alınabilir. Bu değer kişinin vücut yüzey alanı (m^2) başına ürettiği enerjiyi verir. Kişinin vücut yüzey alanı değeri ise DuBois yüzey alanı olarak (A_D) adlandırılan değer ile belirlenir.

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,725} \cdot l^{0,725} \quad (1.1)$$

Bu denklemde m kişinin kilogram (kg) cinsinden ağırlığını, l ise kişinin metre (m) cinsinden boyunu temsil etmektedir. Kişinin ağırlığına ve boyuna göre hesaplanan bu vücut yüzey alanı değeri kişinin aktivitesine bağlı olarak tanımlı ürettiği enerji ile çarpılarak kişinin ilgili aktivite altında ürettiği enerji elde edilebilir.

Bu noktada insanın ürettiği bu enerjiyi vücuttan uzaklaştırması gerekmektedir. Bu enerjinin bir kısmını iş olarak uzaklaştırırken bir kısmını da çevre ile ısı transferi yaparak dengelemektedir. Çevre ortam şartları da bu denge mekanizmasında kritik önem taşımaktadır.

Gerekli bu denge denklemi Denklem (2) eşitliği ile verilmektedir [4].

$$M - W = \dot{Q}_{sk} + \dot{Q}_{res} = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S \quad (1.2)$$

Bu denklemde;

M: Metabolik hıza bağlı üretilen enerji (W/m²)

W: Yapılan iş sonucu harcanan enerji (W/m²)

$\dot{Q}_{sk}$: İnsanın derisi üzerinden olan toplam ısı transferi hızı değeri (W/m²)

$\dot{Q}_{res}$: İnsanın solunum yapması ile olan toplam ısı transferi hızı değeri (W/m²)

C: Deriden konveksiyon ısı kaybı (W/m²)

R: Deriden radyasyon ısı kaybı (W/m²)

E: Deriden evaporatif ısı kaybı (W/m²)

C_{res} : Nefesten taşınım ısı kaybı (W/m²)

E_{res} : Nefesten evaporatif ısı kaybı (W/m²)

S : Vücut ısı depolama oranı (W/m²)

Termal konfor kişinin içerisinde bulunduğu çevre ortamından olan termal memnuniyetidir. Bu memnuniyet de iç ve dış parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. İç parametreler kişinin cinsiyeti, yaşı, kilosunu, boyu, metabolik durumu, psikolojik hali gibi kişi özelindeki parametreler olurken dış parametreler de çevre ortam havasının sıcaklığı, havanın hareket hızı, havanın bağıl nemi, çevre ortam yüzeylerinin sıcaklıkları gibi kişiyi çevreleyen ortam özelindeki parametrelerdir. Kişi özelindeki parametreler daha sübjektif olabilirken dış parametreler daha standartlaştırılabilen parametrelerdir.

Bu anlamda termal konforu etkileyen ısı transfer mekanizmaları; taşınım, iletim ve radyasyon olmaktadır. Bu mekanizmalar ise hem duyulur hem de gizli ısı transferi olarak gerçekleştirilmektedir.

Duyulur ısı transferi şu şekilde gerçekleşmektedir;

- İnsanın derisi ve çevre ortam havası arasında taşınım ile ısı transferi
- İnsanın derisi ve çevre ortam yüzeyleri arasındaki radyasyon ile ısı transferi
- İnsan iç ortamı ve solunum havası arasında duyulur ısı transferi

Gizli ısı transferleri ise şu şekilde gerçekleşmektedir;

- İnsan iç ortamı ve solunum havası arasında nem geçişi ile gerçekleşen gizli ısı transferi
- İnsan deri yüzeyinden terlemeye bağlı olarak gerçekleşen buharlaşma gizli ısı transferi

2.5 Isı Transfer Mekanizmaları

Bilindiği üzere insan, sıcakkanlı canlılar sınıflandırmasındadır. Yani içerisinde bulunduğu ortam sıcaklığı şartları ne olursa olsun vücut sıcaklığını belirli bir değer aralığında tutmak zorunda olan bir canlı türüdür. Bu sebeple insan metabolizmasına bir ısı reaktörü benzetmesi yapılabilir ve bu metabolizmanın hayatta kalabilmesi için iç organ sıcaklıklarının $37^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kalması gerekmektedir [5, 6].

Şüphesiz ki insan iç organlarının bu sıcaklıkta sabit kalabilmesi için insanın çevresi olan ısı transferi kritik öneme sahiptir. İşte bu noktada insan ile çevresi arasında farklı ısı transferi mekanizmaları oluşmaktadır.

Şöyle ki insan deri yüzeyi ile çevre ortam arasında taşınım ve iletim ile ısı transferleri meydana gelecektir. Eğer insan vücudu üzerinde bir kıyafet var ise de bu durumda kıyafet bir yalıtım elemanı olarak değerlendirilecektir.

Bunun yanında çevre ortam ile insan arasında ışıma ile de ısı transferi meydana gelecektir. Yine insan vücudu parçası üzerinde kıyafet yoksa bu ısı transferi deri yüzeyi ile çevre ortam yüzeyleri arasında gerçekleşirken, kıyafet var ise de kıyafet yüzeyi ile çevre ortam yüzeyleri arasında gerçekleşecektir.

Bahsedilen bu 3 ısı transferi mekanizmasında değerlendirmeler ısı transferinin insan dış yüzeyi çevre ortam arasında gerçekleşmesine göre yapılmaktadır. Ancak, bunlardan farklı olarak dış ortam havası ile vücut iç ortamının direkt olarak ısı transferi yapabildiği bir durum daha vardır; o da solunumdur.

İnsanın ortamdaki soluduğu hava direkt olarak akciğerlere ulaşarak aslında vücut iç sıcaklığı ile temas etmiş olur. Solunum sırasında ise duyulur ve gizli olmak üzere iki ısı transferi meydana gelir. Duyulur ısı transferi solunan havanın sıcaklığı ile vücut iç sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkından dolayı oluşan ısı transferi iken, gizli ısı transferi ise nefes alındıktan sonra solunum havasına vücut içerisinde transfer edilen nem ile oluşan ısı transferidir.

Solunum ile akciğerlere giren havanın sıcaklık ve bağıl nem değerleri ne olursa olsun, solunan hava vücuttan tekrar atılırken, vücut iç sıcaklığı ile aynı sıcaklıkta (37 °C) ve doymuş olarak (% 100 bağıl nemde) vücuttan uzaklaştırılır [7]. Bu da solunan havanın hem sıcaklığı hem de bağıl nemi değerlerinin önemini ortaya koymaktadır.

Yukarıda anlatılan vücut dış yüzeyi ile insanın çevresi arasında iletim, taşınım ve radyasyon ile gerçekleşen ısı transferi mekanizmaları vücut ile çevresi arasında gerçekleşen duyulur ısı transferini vermektedir. Ancak aynı solunumda olduğu gibi vücut ile çevresi arasında duyulur ısı transferinin yanın da bir de gizli ısı transferi de gerçekleşmektedir.

İnsan derisi sürekli nefes alan bir mekanizmaya sahiptir. Bu da aslında insanın her daim terlediği anlamına gelir. Terleme terimi genel olarak vücudun termal dengesini sağlamak için deri üzerindeki gözeneklerden sıvı atımı olarak düşünülebilir. Ancak bu kabulde genel olarak ıslak terlemeden bahsedilir. Yani halk arasında genel kullanımı terlemenin “ıslak terleme” olduğu şeklindedir. Ancak aslında her zaman ıslak bir etki yapmasa da vücut deri tabakamız üzerinde hep bir doymuş su buharı tabakası oluşmaktadır. Bunun yanında çevre ortam havası ve bağıl nemi özelliklerince de ikinci bir ortam havası insanı sarmalamaktadır. Bu da insan vücut derisi üzerindeki doymuş hava tabakası ile çevre ortam havası arasında oluşan basınç farkı ile bir kütle (nem) transferini meydana getirmekte, bu kütle transferine bağlı olarak da buharlaşma gizli ısı transferi oluşmaktadır. Bu da vücut ile çevresi arasındaki çok önemli bir ısı transferi miktarına sebep olmaktadır [8].

2.6 CLO Tanımı ve Askeri Üniformanın CLO Değerinin Belirlenmesi

İnsanlar farklı ortamlarda farklı tercihlere göre kıyafet seçimi yaparlar. Tabi bu kıyafet seçimlerinin altında moda, bir amaca uygunluk, güzel görünme gibi sosyolojik etmenler olmakla birlikte rahat hissetme yani bir konfor içinde olma durumu da ana gerçeklerden birisidir. Konfor kavramı çok geniş anlamlara gelen bir kavram olmakla birlikte, termal konfor hissi konfor kavramının en önemli alt konfor başlıklarından birisidir.

İnsan ile çevre ortam arasında olan yüzey deridir. Yani deri vücudun dış ortama açılan yüzüdür. Deri ve deri altı oluşumun tabi ki vücut ve çevresi ile olan ısı transferinde etken olduğu birçok durum olsa da insan vücudu çıplakken deri her zaman vücudun iç sıcaklığını sabit tutabilecek kadar koruyucu olmamaktadır. Ayrıca insan derisi vücut üzerinde bir koruyucu tabaka olsa da tüm fiziksel şartlara da dayanabilecek yapıda değildir. Bu sebeple gerek fiziksel korunma gerek termal korunma sebebi ile olsun, insanoğlu derinin de üzerinde ikinci bir koruyucu tabakaya ihtiyaç duyar ve de bu sebeple kıyafetler geliştirilmiştir. Tabi bu ihtiyaç psikolojik, etik ve sosyolojik gibi sebepler ile evirilerek günümüzde ticaret, araştırma, bilim vb. birçok farklı konuda ilerlemektedir.

Kıyafetler üzerine yapılan bilimsel ilerlemenin önemli bir tarafında da kıyafetlerin termal özellikleri üzerine yapılan çalışmalar yer almaktadır. Kıyafet en nihayetinde deri üzerinde ikinci bir tabaka olarak vücut için bir yalıtım tabakası olarak görev yapar. Yalıtımın da iki ortam arasında oluşacak bir ısı transferinde etkili ana parametrelerden birisi olması sebebi ile kıyafetler için bir termal yalıtım değeri belirlenmesi gerekli olmaktadır. Burada termal yalıtım kavramını da iki türlü düşünmek gerekir. Birincisinde ısının iletim yolu ile geçişine dair kıyafetin oluşturduğu dirençtir. Yani duyulur ısı transferine karşı direnci olarak düşünülebilir. İkinci ise kıyafetlerin hava ve dolayısı ile nem (su buharı) geçirgenliğidir. İnsanın terleme mekanizması düşünüldüğünde deri yüzeyinde oluşan terleme kaynaklı su buharı zerreciklerinin kıyafetten geçişine olan direnci de ikinci bir termal direnç mekanizması olarak düşünülebilir. Çünkü su buharının geçişi de aslında buharlaşma gizli ısıısının geçişi olacaktır. Bu anlamda kıyafetin nem geçirgenliği direnci gizli ısı transferine olan direncin bir göstergesi olarak gibi yorumlanabilir.

İşte kıyafetlerin termal özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda ve değerlendirmelerde kullanılan bu iki direnç değeri ISO11092 standardınca [9] ölçülebilmektedir.

Duyulur ısı geçişine yani iletimle ısı transferi değerine ilişkin direnç değeri “clo” adı verilen birim ile belirtilmektedir. 1 clo 0,155 m²K/W değerine eşit olup kişi üzerindeki ilgili kıyafetlerin direnç değeri 1 clo değerine oranla ifade edilmektedir. 0 clo çıplak bir insan üzerindeki termal direnci ifade ederken, 1 clo değeri 21 °C sıcaklıkta, % 50 bağıl nemden daha az bir bağıl nemde ve hava hızı hareketinin 0,1 m/s olduğu bir odada dinlenen bir kişinin termal konforunu sağlayacak giysinin termal yalıtım değerine karşılık gelmektedir. Termal konfor hesaplamalarında kişi üzerindeki tüm kıyafet parçalarının clo değerlerinin belirlenmesi ve hepsinin toplamının alınarak durumun değerlendirilmesi gerekmektedir.

Askeri üniformalar farklı askeri birlikler için ihtiyaca ve askeri şartlara özel olarak geliştirilen tekstil malzemelerinden imal edilirler. Bu malzemeler ilgili askeri şartlarda askerleri hem koruyan hem de onların konforlu kalmalarını (mümkün olduğunca) sağlayan malzemelerdir. Bu malzemelerin genel özelliklerinde su tutmama, çabuk kuruma, aşınma ve sürtünmeye dayanma, kolay temizlenebilme, termal izi azaltma, esneklik vb. özellikler yer alırken termal geçirgenlik ya da termal yalıtım da başka kritik özelliklerinden olmaktadır.

Sıcak / ılıman mevsim şartlarına göre olan ile soğuk / serin mevsim şartlarına göre olan askeri üniforma malzemeleri bu noktada ayrışmaktadır. Sıcak şartlar için tasarlanmış malzemelerin ısı ve nem geçirgenlikleri daha yüksek olurken soğuk şartlar için tasarlanmış malzemelerin ısı ve nem geçirgenlikleri daha düşüktür. Tabi termal direnç açısından kalınlık ısı transferi yolunu belirlediği için yazlık kumaş daha ince olurken kışlık kumaş daha kalın olmaktadır.

Bu tez çalışmasında odaklanılan askeri operasyon şartı yaz şartlarında ihtiyaç duyulan bir iklimlendirme sistemine olan ihtiyaca yönelik olduğu için bu çalışma kapsamında da yazlık askeri üniforma malzemesinin ısı ve nem geçirgenliği ISO11092 standardına göre SDL ATLAS M259B göre test edilmiştir. Testler sonucunda üniforma malzemesinin ısı direnç (R_{ct}) (m²K/W) ve su buharı direnci (R_{et}) (m²Pa/W) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2.13 Orijinal askeri üniforma test numunesi ve SDL ATLAS M259B test cihazı

2.7 Efektif Sıcaklık Kavramı

Efektif sıcaklık kavramı termal konfor çalışmalarında öne çıkan en önemli kavramlardan birisidir. Efektif sıcaklık bir ortam havasının sıcaklığının, ortam havasının hızı ve bağıl nemi ile birlikte aslında “hissedilen” sıcaklık olarak ifade edilmesidir diyebiliriz.

Hava sıcaklığı ifade edilirken genel olarak °C cinsinden ya da K cinsinden sıcaklık değerleri ifade edilir. Ancak aslında havanın canlılar tarafından algılanmasında sıcaklığın yanında bağıl nemi ve hareket hızı da önemli yer tutar. Bu anlamda türetilen efektif sıcaklık kavramı havanın sıcaklığının yanında bağıl nemi ve hızı ile birlikte etki ettiği sıcaklık değerini belirten değerdir.

A. Rahman çalışmasında efektif sıcaklığın belirlenmesine yönelik pratik bir yöntem sunmaktadır [10]. Bu yöntemde iki ayrı diyagram kullanılarak hava sıcaklığı, hava hızı, hava bağıl nemi ve kişinin giysi durumuna göre parametrelerin etkileri görülebilir.

Önce psikrometrik diyagram kullanılarak ortam havasının kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nemi kullanılarak ortam havası yaş termometre sıcaklığı bulunur. Sonra ikinci diyagram üzerinde yaş termometre, hava hızı, kuru termometre sıcaklıkları kullanılarak efektif sıcaklık değeri bulunur. Elde edilen bu efektif sıcaklık değeri kişinin ilgili hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızında üzerinde 0,5 clo termal dirence sahip kıyafet varken hissettiği sıcaklık olmaktadır.

2.8 Bağıl Nemim Termal Konfor Üzerindeki Etkisi

Bağıl nem kısaca havanın içindeki su buharı miktarının havanın içinde hapsedebileceği maksimum su buharına oranı olarak adlandırılabilir. Bağıl nem kavramı havanın termo-fiziksel özelliklerini tanımlayan ana 3 parametreden birisidir.

Termal konfor çalışmalarında ise en önemli parametrelerden birisidir. Bağıl nem 0 ila 100 arasında bir değerle % cinsinden ifade edilmektedir. 0 'a ne kadar yakın ise içerisine su buharı almak için o kadar müsait, 100 'e ne kadar yakın ise de “doygun” duruma gelmeye o kadar yakın demektir. %0 bağıl nem havanın içerisinde hiç su buharı bulunmadığı havanın tamamen kuru olduğu anlamına gelmekte, %100 bağıl nem değeri ise havanın içerisine daha fazla su buharı hapsedemeyeceği yani “doyduğu” anlamına gelir.

Bu değer termal konfor çalışmalarındaki önemi ise kritiktir. Çünkü eğer bir insan üzerine üflenen havanın ya da insanın içerisinde bulunduğu havanın bağıl nem değeri düşük ise bu durum o havanın insan derisi üzerinde terleme sonucu oluşan nemi çok daha kolay bir şekilde kendi içerisine alacağı anlamına gelir. Tabi insan derisi üzerinde meydana gelen terleme kaynaklı su zerreciklerinin buhar fazına geçmesi için insan derisi üzerinden ısı çekmesi ile mümkün olmaktadır. Bu da aslında terleme mekanizmasının doğal amacını göstermektedir.

İnsan vücudu termal regülasyonunu sağlayabilmek amacı ile vücuttan daha fazla ısı enerjisinin uzaklaşması için ter üretir. Bu ter damlacıkları da vücuttan uzaklaşmak için deri yüzeyinden ısı çeker ve buhar fazına geçer. Bu faz değişimi için gerekli ısı da vücuttan sağlandığı için vücut ısı kaybederek kendi termal dengelemesini sağlamış olur.

Burada önemli bir durum olarak vücut üzerinde bulunan ter zerrecikleri faz değiştirdiğinde deri üzerinde ince bir buhar tabakası oluşturur. Bu buhar tabakası eğer deri dışındaki ortam havası tarafından çekilebilirse o zaman bu terleme ve hal değişimi döngüsü devam eder. Burada bu mekanizmayı tetikleyen etken de deri üzerinde meydana gelen buhar filmi tabakasının kısmi buhar basıncı ile ortam havasının kısmi buhar basıncı arasındaki farktır. Bu fark ne kadar yüksek olursa bu “nem geçişi” yani “kütle transferi” o kadar yüksek/hızlı olur. Bu fark ne kadar düşük ise de bu geçiş o kadar az/yavaş olur.

Özetle tüm bunlar ortam havasının “biraz daha su buharı alacak” yerinin olup olmaması iloe alakalıdır. Ortam havasının bağıl nemi doyma noktasına geldiğinde yani %100 olduğunda artık içerisinde daha fazla su buharı alamayacağı için insan ile arasındaki nem transferi yani “kütle transferi” biter. Bu da vücudun doğal termal denge mekanizması olan terleme mekanizmasının işlevini azaltır. Bu sefer buhar fazdaki su buharı (ter) ortam havası tarafından alınmadığı için deri yüzeyinde “ıslak” terlemede artış meydana gelir. Ancak faz değişimindeki yüksek enerji geçişi meydana gelmediği için de ıslak terlemeyi vücut artırmak durumunda kalır ve vücudun termal dengelenmesinin sağlanması zorlaşır. Bu da termal konforun bozulmasına sebep olur.

Bir havanın bağıl nemi sıcaklığı ile ters orantılı olarak değişir. Yani bir havanın içerisine su buharı eklenmeden sadece sıcaklığı artırılırsa bağıl nemi düşer. Çünkü sıcaklık artışı ile birlikte havanın nem tutma kapasitesi artar.

Bu da sıcak havanın insandan daha fazla “kütle transferi” ile ter çekeceği anlamına gelir. Ancak bu noktada yanlış bir algı oluşmaması önemlidir. Hava sıcaklığının artması ile bir yandan insandan ortama olan kütle transferi kaynaklı buharlaşma ısı transferi artmakta ama diğer yandan da insan ile ortam havası arasında olan duyulur ısı transferi azalmakta ve hatta deri sıcaklığının üzerindeki bir ortam havası içerisinde insana doğru bir ısı transferi olacaktır.

İşte tam bu noktada termal konfor hesaplamaları önem kazanmaktadır. Sıcaklık ve bağıl nemin her daim birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir ki ayrı ayrı değerlendirildiklerinde oluşacak hatalı yaklaşımın önüne geçilebilsin.

2.9 Nem Alma Sistemleri ve Katı Nem Alıcı Silika Jel

Hava içerisindeki su buharı nem olarak adlandırılır. Nem bazı durumlarda arzu edilen bir kavram iken bazı durumlarda da kaçınılmaya çalışılan bir durumdur. Termal konfor açısından ise nem çok düşük seviyede olduğunda insan için “kuruluk” hissi oluşturur, yüksek olduğunda ise hissedilir sıcaklığı yükselttiği ve aynı zamanda terlemenin vücuttan buharlaşmasını zorlaştırdığı için de “bunalma” hissi oluşturabilir. Bu anlamda termal konfor açısından nemin ne çok düşük ne de çok yüksek olması beklenir.

Diğer bir yandan farklı endüstriyel uygulamalarda nemin hiç olmaması gereken durumlar olabilirken farklı prosesler için de çok yüksek neme ihtiyaç duyulabilir.

Havadaki nem miktarını artırmak nemi azaltmaktan daha kolay bir prosestir. Hava içerisine nem bir su kaynağı ile doğru teknik ile beslenirse bağıl nem miktarı artırılabilir. Ancak havadaki nemin azaltılması için gaz halden sıvı hale bir hal değişimi prosesinin olması gerekir.

Hava içindeki nem aslında suyun gaz fazında yani su buharı olarak bulunur. Nem alma sistemleri genellikle ise hava içerisindeki su buharının yoğuşturulması prensibine dayanır. Yoğuşma ise gaz fazdan sıvı faza geçiştir. Dolayısı ile bu faz geçişinin gerçekleşmesi için gaz fazdan enerji çekilmesi diğer bir söyleyiş ile gaz fazın soğutularak sıvı faza geçişin sağlanması gerekir.

Bunu yapabilmek için de en yaygın yöntem havanın çığ noktası sıcaklığının altında bir sıcaklığa soğutulması ve dolayısı ile hava içerisindeki su buharının yoğuşması ve sonrasında gerekirse tekrar havanın arzu edilen sıcaklığa ısıtılmasıdır.

Ya da benzer mantık ile havanın çığ noktası sıcaklığının altındaki bir soğuk yüzey ile temas ettirilmesi ve o temas ile hava içindeki su buharının çığ noktası sıcaklığı altına soğuyarak yoğuşması prensibine dayanır. Bu prensipte nem alma işlemine aktif nem alma diyebiliriz.

Araç iklimlendirme (klima) sistemlerinde de bu prensip ile nem alma işlemi sağlanır. Ancak bu prensip ile nem alma işlemi yapılması için bir “soğuk” kaynağa ihtiyaç vardır. Dolayısı ile bir soğutma işlemine ihtiyaç duyulur. Bu da bir soğutma çevrimini gerekli kılar. Ancak soğutma çevrimi demek enerji tüketimi demektir. Otomotiv araçlarında araç motoru çalışırken iklimlendirme sistemi diğer bir deyiş ile klima sistemi araç motoru tarafından tahrik edilir dolayısı ile soğutma çevriminin ihtiyaç duyduğu enerji araç motorundan sağlanır.

Ancak bu tez çalışmasında olduğu gibi araç motoru çalışmadığı durumda hava şartlandırma ihtiyacı olduğunda soğutma çevrimindeki enerji tüketimi olmadan bir nem alma işlemine ihtiyaç duyulacaktır.

Soğutarak nem alma işlemine aktif nem alma demiştik. Bir başka nem alma tekniği de “katı nem alıcı” malzemelerin kullanımı olabilir.

Katı nem alıcı malzemeler özel geliştirilmiş bazı malzemeler olup hava içerisinde bulunan su buharını kendi üzerinde tutabilen malzemelerdir. Bu malzemelerin en yaygın örneği silika jel olarak adlandırılan malzemelerdir.

Silika jel laboratuvar ortamında üretilmiş bir çeşit sodyum silikat malzemesidir. Bu malzeme çoğunlukla pasif bir nem tutucu olarak gıda, kimya, ilaç, makine endüstrisi, lojistik ve depolama, tekstil, kozmetik, elektronik, otomotiv vb. birçok sektörde kullanılan malzemelerdir. Her ne kadar isminde jel geçse de aslında çoğunlukla granüler ve sert yapıdadır.

Bu malzemeler bir ortam havası ile temas halinde olduğu sürece ortam havası içerisindeki su buharı kendi üzerine çeker ve tutar. Bu özelliği ile de nem alıcı malzeme olarak adlandırılır. Tabi ki bu malzemenin de nem alma kapasitesi sonsuz değildir. Her bir granül (boncuk) yapı belirli bir oranda nem tutabilir. Kapasitesinin en üst sınırına ulaştığında “doymuş” olarak adlandırılır ve tekrar nem alma özelliği kazanması için ısıtılarak tuttuğu nemin bırakılması sağlanır. Isıtıldıktan sonra tekrar nem alma özelliği kazanır ve bu döngü sonsuza yakın olarak tekrarlanabilir.

Endüstriyel uygulamalarda silika jellerin bazı renkli türleri vardır. Bu türleri nem tutuculuğu en yüksek seviyede iken farklı bir renkte olup, nem tuttukça değişir ve neme doyduğunda tamamen farklı bir renge dönüşür. Daha sonra ısıtılıp tuttuğu nemden arındırıldığında tekrar rengi ilk rengine döner. Bu renk indikatörü de malzemenin nem tutuculuk kapasitesinin durumunu göstermek için geliştirilmiş bir tekniktir.



Şekil 2.14 Silika jel örnekleri

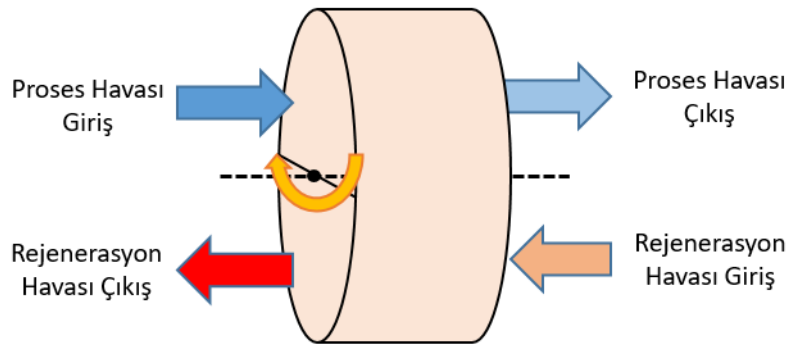
Silika jeller genel olarak pasif nem alıcılar olarak kullanılan malzemelerdir ve genelde bir kapalı hacim içerisinde konumlandırılıp belirli bir hava kütlesinin nemini belirli bir seviyede tutmak amacı ile kullanılırlar.

Silika jelin aktif bir nem alıcı olarak kullanıldığı sistemlerde ise silika jelin kullanım formu daha farklıdır. Bazı klima sistemlerinde ya da endüstriyel proseslerde bir tekerlek/tambur formunda kullanılan silika jel, bal peteği benzeri yapılarla özel bir formda kullanılır. Bu formda kullanımında silika jel emdirilmiş materyaller bir filtre gibi tasarlanır ve içerisinden hava geçmesine izin vererek içinden geçen havadaki su buharı taneciklerini tutarak üzerinde hapseder.

Silika jel malzemesi rejeneratif bir malzemedir. Yani havadaki su buharını kendi üzerinde hapsettikten sonra rejenerasyon sıcaklığına kadar ısıtılırsa üzerinde tuttuğu su buharını tekrar serbest bırakır ve ilk haline geri döner.

Bu anlamda silika jelin kullanımında rejenerasyon prosesi de düşünülmelidir. Çünkü rejenerasyon yapmadan silika jel kütlesi ile doğru orantılı olacak şekilde üzerinde tutabileceği maksimum su buharı miktarı bellidir. Rejenere edilmeyen silika jellerin atılarak sürekli olarak yenisi ile değiştirilmesi gerekecektir. Bu da hiçbir sürekli proses için ekonomik ve uygulanabilir pratik bir çözüm olmayacağı anlamına gelir.

Silika jelin genel tekerlek/tambur kullanımı da silika jelin rejenerasyon ihtiyacına pratik bir çözüm olarak geliştirilmiştir. Genel uygulamada silika jel tekerleği bir rotor vasıtası ile döndürülür. Prosesin başında tekerleğin bir kısmından proses havası geçer ve silika jel proses havası içindeki nemi kendi üzerine hapseder. Sonra silika jel tekerleği döndürülerek ilk proses havasının geçtiği kısımdan sıcak rejenerasyon havası geçirilir ve silika jel üzerindeki su buharının tekrar dışa atılması sağlanır. Bu döngü tekerleğin döndürülmesi ile tekrarlanır ve böylece sürekli proses kullanımına bir çözüm geliştirilmiş olunur.



Şekil 2.15 Silika jel tekerleği ile rejenerasyon prosesi

3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Termal Konfor Literatür Araştırması

İnsan metabolizmasının hayatta kalabilmesi için besin alması ve oksijen ile solunum yapması gerekmektedir. İnsan aldığı besinler ve yaptığı solunum ile enerji üretmekte ve bu enerjinin bir kısmını işe dönüştürüp bir kısmını da çevreye ısı olarak vermektedir. Prof. Dr. E. Specht insanı bir ısı teknik reaktörü olarak tanımlamaktadır [12].

İnsan metabolizmasının hayatta kalıp konforlu yaşayabilmesi için vücut iç organlarının belirli bir sıcaklıkta olması gerekir. Bu da insanın çevresi ile olan ısı transferinin önemli olduğu anlamına gelmektedir. Bu noktada termal konfor olarak adlandırılan terim devreye girmektedir. EN ISO7730 standardında termal konfor, zihnin termal çevreden olan memnuniyeti olarak betimlenmektedir [2].

İnsan vücudunun belirli bir termal dengede kalması şarttır. Bu da insanın metabolik aktiviteler sırasında ürettiği enerjiyi kendi termal dengesini korumak için vücuttan atması ile mümkün olmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında, termal konfor çalışmalarında bazı çalışmaların ısı transferi mekanizmalarını bir bütün olarak incelemekte olduğuna bazılarının ise detaylı incelemeleri gösteren çalışmalar olduğuna rastlanmıştır.

M. Bilgili ve arkadaşları [12] ısı transfer mekanizmalarından solunum ile olan ısı kaybının üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında hafif aktivite seviyesinde olan bir kişinin farklı mevsimlerdeki gün içerisinde solunum yolu ile gerçekleştirdiği duyulur ve gizli ısı kayıplarını hesaplayarak karşılaştırmalar yapmışlardır. Çalışmalarında Türkiye / Adana ili Çukurova Üniversitesi Balcalı yerleşkesi bölgesindeki çevre havası sıcaklık ve bağıl nem değerleri Ekim, Ocak,

Nisan ve Temmuz ayları için toplanmış ve ısı transferi hesaplamaları bu değerlere göre yapmışlardır. Hesaplamalarında sürekli rejim enerji dengesi modeline göre vücut iç sıcaklığını 36,8 °C ve deri sıcaklığını 33,7 °C olarak kabul etmişlerdir ve kişinin metabolik ısı üretimini 1 met (58,2 W/m²) kabul etmişlerdir.

Çalışma sonucunda çevre ortam sıcaklığının artması ile solunum yoluyla gerçekleşen duyulur ısı transferinin azaldığı, çevre ortam havasının bağıl neminin azalması ile solunum yoluyla gerçekleşen gizli ısı transferinin arttığı görülmüştür. Çalışmada solunum yoluyla gerçekleşen gizli ısı transferinin duyulur ısı transferinden çok daha yüksek olduğu tespit edilirken solunum ile toplam ısı kaybının mevsimlere göre değişiklik gösterirken bazı mevsimlerde insan üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferinde önemli bir yere sahip olabildiğini göstermişlerdir.

Dış ortam hava sıcaklığı ve bağıl nemi ne olursa olsun solunum ile akciğerlere giren hava vücuttan tekrar atılırken vücut iç sıcaklığı ile aynı sıcaklıkta (37 °C) ve doygun olarak (%100 bağıl nemde) vücuttan uzaklaştırılır [7]. Bu da aslında neden farklı ortam havası şartlarına göre nefes alıp verme esnasında gerçekleşen ısı transferi değerinin kişinin çevresi ile yaptığı toplam ısı transferi içindeki oranının değiştiğini açıklamaktadır. Solunum ile vücuda giren havanın sıcaklığının vücut iç sıcaklığı olan 37 °C ile arasındaki fark ne kadar fazla ise ve benzer olarak solunum ile vücuda giren havanın bağıl nemi ne kadar düşük ise aslında gerçekleşecek ısı transferi miktarları da o denli büyük olacaktır.

Bu çalışma bu yönü ile de ortam çevre havasının sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin insan konfor parametreleri üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.

İ. Atmaca ve A. Yiğit [13] en önemli konfor parametreleri olan ortam havası sıcaklığı, hava hızı, bağıl nem miktarı, ışıyım sıcaklığı ve insanın metabolik aktivite seviyesinin insanın konforuna olan etkilerini incelemişlerdir.

Sıcaklık etkisini incelemek üzere insanın en büyük deri parçası olan sırt bölgesi üzerine inceleme yapmışlar ve ortam sıcaklığının artması ve azalması ile deri sıcaklığının tepkisinin nasıl olduğunu, termal konforu sağlamak üzere vücudun terleme tepkilerini gözlemlemişlerdir. Çalışmada sıcaklık etkisi anlamında hava hızının 0,2 m/s bağıl nemin ise %50 olduğu bir ortamda sakin oturan bir birey için (~1 met = 60 W/m²) ortam havası sıcaklığı 24 °C iken deri yüzey sıcaklığının nötr

değeri olan 33,2 °C ‘de sabit kaldığını, ortam hava sıcaklığının 26 °C ‘ye çıkması ile deri sıcaklığında bir miktar yükselme ile terlemenin başladığını, ortam havası sıcaklığının 20 °C ve 22 °C değerlerine düşmesi ile deri sıcaklığında daha etkili bir düşüşün olduğunu görmüşlerdir. Buradan yaz şartlarında 24 °C ‘nin altındaki sıcaklıkların konforsuz bir hisse sebep olacağına vurgu yapmışlardır.

Hava hızının etkisini incelemek üzere ise ortam havası sıcaklığı 24 °C sıcaklıkta %50 bağıl nemde sabit, vücut metabolik aktivitesi yine 60 W/m² olarak kabul edilmiştir. Ortam havası hızının 0,2 m/s olduğu durumda sırt bölgesi deri sıcaklığının nötr değeri olan 32 °C değerinde sabit kaldığını ancak hava hızının 0,4 m/s ve 0,6 m/s hızlara çıkarıldığında deri sıcaklığının 1,2 °C ve 1,8 °C azaldığını görmüşlerdir. Böylece yüksek ortam havasının konforsuz bir hisse sebep olacağına vurgu yapmışlardır.

Nem etkisini incelemek üzere ise ortam havası sıcaklığı 24 °C sıcaklıkta ve 0,2 m/s hızda sabit tutulmuş, vücut metabolik aktivitesi yine 60 W/m² olarak kabul edilmiştir. Çalışmada ortam havası sıcaklığının ısı konfor için kabul edilebilir aralıkta olması şartı ile bağıl nemin konfor üzerinde hava hızı ve sıcaklık kadar etken olmadığı ancak yüksek sıcaklıklara çıkıldığında özellikle giyimli vücut parçalarında önemli bir etken olduğu vurgulanmıştır.

Işınımın etkisini incelemek üzere ise ortam havası hızı, bağıl nemi ve metabolik aktivite sabit tutulurken vücudun belirli bölgelerine yakın farklı sıcaklıklardaki yüzeylerin ışıyım ısı transferi ile konfor üzerinde etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır.

Termal konfor konusu iklimlendirme sistemleri üzerine çalışan mühendislerin ilgi alanı olduğu kadar tıp dünyası bilim adamlarının da ilgi alanı olmaktadır. K. Öngel ve H. Mergen [14] ısı konfor parametrelerinin insan vücuduna etkilerine yönelik bir araştırma çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında vücudun fizyolojik mekanizmasını tanımlarken vücut iç sıcaklığını 37±0,5 °C, deri yüzey sıcaklığını ise ortalama 31,5 °C – 33,5 °C olarak tanımlamışlardır.

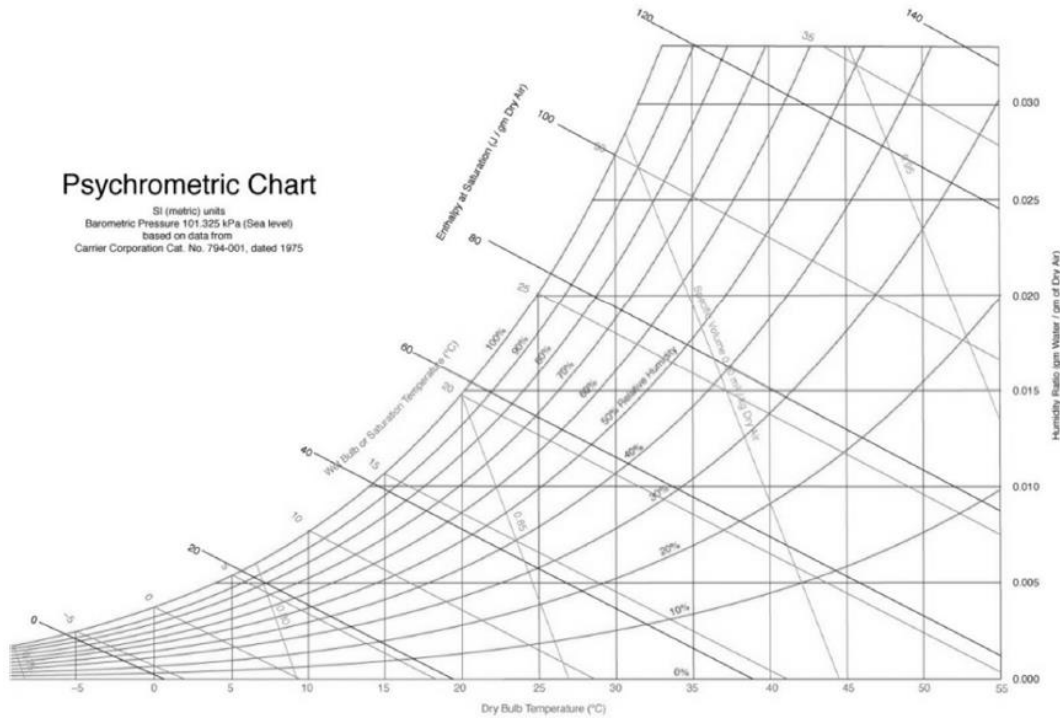
Termal konfor konusunda birçok çalışma ortam havası sıcaklığı, bağıl nemi ve hızı üzerine durmakta ve bunların termal konfor üzerine olan etkilerini incelemektedir. Bu parametreler ayrı ayrı etken olabilmekle birlikte aslında bir bütün olarak bir

araya geldiklerinde termal konfor durumunu tamamlamaktadır. Tam bu noktada efektif sıcaklık denilen değerin önemi ortaya çıkmaktadır.

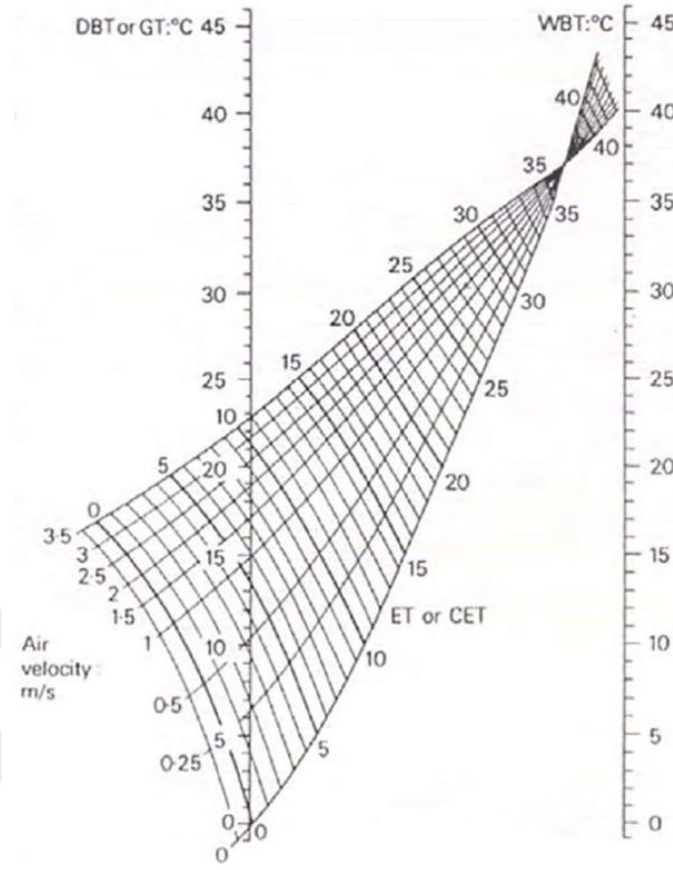
A. Rahman [10] efektif sıcaklığın belirlenmesi konusunda yaptığı çalışmada iki alternatif efektif sıcaklık hesaplama yönetiminden bahsetmektedir. Herkes için erişilebilir olması açısından iki ayrı diyagramın (Şekil 3.1 [10] ve Şekil 3.2 [10]) kullanıldığı yöntem ile hava sıcaklığı, hava hızı, hava bağıl nemi ve kişinin giysi durumuna göre parametrelerin etkileri görülebilir.

Bu metotta önce psikrometrik diyagram yardımı ile ortam havasının sıcaklığı ve bağıl nemi kullanılarak ortam havası yaş termometre sıcaklığı bulunur. Sonra ikinci diyagram üzerinde yaş termometre, hava hızı, kuru termometre sıcaklıkları kullanılarak efektif sıcaklık değeri bulunur.

Aslında bu bulunan efektif sıcaklık değeri kişinin ilgili hava sıcaklığı, nemi ve hızında üzerinde 0,5 clo termal dirence sahip kıyafet varken hissettiği sıcaklık olarak da düşünülebilir. Bu da aslında bir iklimlendirme sistemi tasarımında öncü yönlendirme olması açısından çok faydalıdır.



Şekil 3.1 Psikrometrik Diyagram



Şekil 3.2 0.5 Clo için efektif sıcaklık diyagramı

Bu çalışma ile de görülebilmektedir ki ilgili tüm parametrelerin termal konfor üzerindeki pozitif ve negatif etkileri ile birlikte toplam bir sonuca varılmaktadır. Şöyle ki normal bir ofis şartında yüksek hava hızları, konfor anlamında negatif etkide bulunurken hava sıcaklığının yüksek olduğu bir ortamda yüksek sıcaklığın negatif etkisini giderip konfor sağlayabilmektedir. Bu da alışılmışın dışındaki ortamlarda ya da şartlardaki iklimlendirme sistemlerinin tasarımında büyük önem arz etmektedir.

Ayrıca yine Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi, Çevresel Veri ve Bilgi Servisi ve Ulusal İklim Değişikliği Merkezi tarafından paylaşılan ve oda sıcaklığının bağıl nem ile kişi üzerindeki hissedilen sıcaklık ile değerlerini gösteren Tablo 3.1 [15] ile de bağıl nemin hissedilen sıcaklık üzerindeki etkisi ortaya koyulmaktadır.

Tablo 3.1 Görünür sıcaklık verileri

Görünür Sıcaklık Verileri									
Kaynak: Ulusal Okyanus Atmosferi İdaresi, Çevresel Veri ve Bilgi Servisi ve Ulusal İklim Değişikliği Merkezi (ABD) (Soruçe: National Oceanic Atmosphere Administration, Enviromental Data and Information Service and National Climate Change Center (USA))									
Oda °C	% Bağıl Nem								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
24	22	22	23	24	24	24	25	26	26
23	20	21	22	22	23	23	24	24	25
22	19	19	20	21	22	22	23	23	24
21	18	18	19	19	20	21	21	22	22
20	17	18	18	19	19	20	21	21	22
19	16	17	17	18	18	19	19	19	20
18	16	16	16	17	17	18	18	18	19
17	14	14	15	16	16	16	17	17	17
16	13	14	14	14	15	15	16	16	16
Gerçek ve Görünür Sıcaklık Arasında Değişim Yok									
-2	Gerçek oda sıcaklığından 2 °C daha düşük				1	Gerçek oda sıcaklığından 1 °C daha büyük			
-1	Gerçek oda sıcaklığından 2 °C daha düşük				2	Gerçek oda sıcaklığından 2 °C daha büyük			

Paylaşılan bu tabloda özellikle 24 °C ve %50 bağıl neme sahip bir odada, bağıl nemin %20 seviyelerine düşmesi ile birlikte hissedilen sıcaklıkta 2 °C kadar farklar ortaya çıktığı görülmektedir [15].

Çevresel faktörler üzerine çalışmalar olduğu gibi kişisel kullanım örneğın kıyafet ve tekstil malzemelerinin termal özellikleri üzerine de birçok çalışma bulunmaktadır. Bir kıyafetin ya da kumaşın iplik yapısının, dikiş tipinin, kumaş katmanları arası boşlukların, birleşim şekillerinin, nem geçirgenliğinin vb. teknik özelliklerinin termal konfor üzerine birçok etkisi bulunmaktadır. Kumaş nemi ne kadar iyi iletirse deri yüzeyi ile dış ortam havası arasında su buharı geçişini kolaylaştırmakta ve gizli ısı transferini artırmaktadır. Aynı şekilde kumaşın termal iletkenliği ne kadar yüksek ise vücut ile çevre ortam arasında ısı transferi artmaktadır. Bunlar da sıcak ortam şartlarında termal konfora pozitif etki eden parametrelerdir [16].

Bu anlamda kişinin üzerine giydiği kıyafet ve o kıyafetin termo-fiziksel özellikleri vücut ile çevre arasındaki ısı transferinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu konuda A. Marmaralı ve N. Oğlakçioğlu yaptıkları bir çalışmada giysiler için ısıl konfor tanımlaması yapıp, yüksek ısıl konfor seviyeleri için önemli noktaları belirleyip,

pamuk lifi, tencel lifi, viskon lifi, iplik büküm değeri gibi parametrelerin konfora olan etkilerini incelemişlerdir [17].

Giysiler kişi üzerinde aslında bir termal yalıtım malzemesi olarak görev almaktadır. Normalde insan vücudu üzerinde hiç kıyafet olmasa deri yüzeyi direkt olarak dış ortam havası ile temas halinde olacaktır ve dolayısı ile ısı transferi mekanizmaları da deri yüzeyi ile ortam arasında gerçekleşecektir. Ancak kişi kıyafet giydiğinde kıyafet artık ortam ile deri yüzeyi arasında ek bir tabaka olarak görev almaktadır. Bu durumda da meydana gelecek ısı transferi mekanizmalarının ayrı ayrı incelenmesi gerekecektir. A. Yiğit çalışmasında kişi üzerindeki ısı transferinin çok katmanlı olarak gerçekleşmesini incelemiştir [18].

Bazı durumlarda kişinin içerisinde bulunduğu ortama, potansiyel metabolik durumuna, ortam içindeki görevine ya da aktivitesine ve ortam içinde bulunma süresi gibi durumlara göre iklimlendirme sisteminin parametreleri belirlenmektedir. Bu anlamda farklı türde iklimlendirme sistemleri de bulunmaktadır. Sivil şartlarda bir ev, ofis, iş yeri, yaşam alanı, sosyal alanlar vb. yerlerin iklimlendirilmesinde genellikle ortam iklimlendirmesi olarak adlandırılan teknik kullanılır. Ortam iklimlendirmesinde ilgili ortamda bulunacak insanların durumuna ve o insanların yapacağı ortalama aktivite durumlarına göre ortam havası gerekli şartlara getirilir.

Diğer bir yandan bazı durumlarda bir ortamı tamamen iklimlendirmek hem teknik hem maliyet hem de fiziksel açıdan istenmeyebilir ya da uygun olmayabilir. Bu gibi durumlarda bölgesel iklimlendirme çözümlerine başvurulur. Bu çözümde hedef insan ya da nesneleri kapsayacak sınırlı özel şartlandırılmış alanlar oluşturulur.

Noktasal soğutma (spot cooling) da tüm ortamın iklimlendirilmesinden ziyade belirli bir hedefin (kişi ya da bölge) soğutulması için kullanılan sistemlerden birisidir. Genel iklimlendirme sistemlerine göre daha az kullanım alanı olsa da özel şartlar dâhilinde en faydalı iklimlendirme tekniklerinden birisi olabilmektedir. Bu teknik bir hedefe yoğun şartlandırılmış hava akışı beslemesi ile termal çözümün sağlanması olarak ifade edilebilir.

Noktasal soğutmanın kullanıldığı çözümlerde, hedefin fiziksel özellikleri, hedefe yönlendirilen havanın termo-fiziksel özellikleri, hedefe yönlendirilen havanın yönlendirme şekli, hedef ile üfleç arasındaki mesafe, tekniğin kullanıldığı ortamın özellikleri vb. parametrelerin doğru ve iyi bir şekilde belirlenmesi çok önemlidir.

Literatürde bu tarz parametrelerin detaylı çalışıldığı, irdelendiği ve analiz edildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda noktasal soğutma etkisine alınacak hedef kişi ve şartlandırılmış havanın yönlendirildiği üfleç ortama benzer bir hacim içerisinde modellenmekte ve farklı akış analizi teknikleri ile farklı üfleme havası şartlarında hedefin hangi bölgesinde ısı transferinin nasıl ve ne kadar gerçekleştiği irdelenmektedir. Bu çalışmalara örnek olarak S. Zhu ve arkadaşları bir oda içerisinde farklı pozisyonlarda bulunan bir kişi üzerinde noktasal soğutma tekniği ile meydana gelen ısı transferi mekanizmalarını incelemiş ve oda içerisinde 3 boyutlu olarak konumlandırılan insan modelin üzerine kişinin vücudunun hangi bölgesinde nasıl bir ısı dağılımı olacağını incelemişlerdir [19]. Yine başka bir örnek çalışmada ise E. Wolfe ve arkadaşları bir otomobil içerisinde noktasal soğutma tekniğinin farklı üfleç konumlarına ya da üfleme tekniklerine göre otomobil içerisindeki kullanıcı üzerinde nasıl etkilerinin olacağını belirlemek amacı ile HAD (CFD) analizleri yapmış ve geleneksel bir klima sistemi ile denedikleri bu yeni uygulamayı mukayese etmişlerdir. Özellikle üfleme havası hızının araç içindeki kullanıcı üzerinde meydana gelen toplam ısı transferi üzerine etkilerini ortaya koymuşlardır [20]. Bir başka örnek çalışmada ise A.E. Kabeel ve arkadaşları bir traktör kabininde noktasal soğutma tekniği kullanımında kabine besleme havasının giriş ve çıkış yerlerinin farklı durumlarını analiz etmiş ve ek olarak soğutma havasının üfleme hızının kabin içerisindeki kullanıcı üzerindeki ısı dağılımında nasıl bir etkisi olacağını incelemişlerdir. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak kabin içerisindeki kullanıcı görece olarak daha basit modellenmiş ve daha çok kabin içerisindeki hava akışı ve bu havanın bölgesel özellikleri üzerine odaklanılmıştır [21]. Geniş bir alanda kısıtlı bir hacmi soğutma etkisine almaya yönelik yapılan uygulamalara örnek olarak ise M.R. Min ve Q. Hong'un deneysel çalışması gösterilebilir. Bu çalışmada 18-25 yaş aralığındaki 53 erkek 49 kadın gönüllü üzerinde noktasal soğutma hava beslemesinin dik eksen ve yatay eksen üzerinde yapıldığında gönüllüler üzerindeki soğutma etkisinin nasıl olduğu incelenmiştir. Farklı ortam şartlarında farklı üfleme havası özellikleri ile 336'sı dikey 270'i yatay eksen ve hava üfleme şartına göre deneyler yapılmıştır. Ayrıca kişilerin bu üfleme havası şartları altında psikolojik durumlarını da anlamak için gönüllülerden kalp atışı hızı ve kan basıncı değerlerini de ölçümlemişler ve çalışmanın sonunda farklı üfleme pozisyonunda farklı üfleme havası özelliklerine göre en etkili konfor alanlarını belirlemişlerdir [22].

Verilen bu örnek çalışmalardan da anlaşıldığı üzere noktasal soğutma tekniğinin kullanımında besleme havasının sağlandığı üflecın şekli ve pozisyonu, üfleç ile soğutulmak istenen hedefin birbirlerine göre konumu ve üfleme havasının ile içerisinde bulunan ortam havasının özellikleri noktasal soğutma tekniğinin verimini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca bu uygulamada eğer soğutulmak istenen (ya da burada üzerinden ısı transferi ile ısı uzaklaştırılmak istenen de denilebilir) hedef obje bir insan ise bu noktasal soğutmaya maruz kalan insanın vücudu üzerindeki sıcaklık dağılımı da yine önemli bir etken olmaktadır. Çünkü termal konfor kavramı sadece insanın ürettiği enerjinin kişiden uzaklaştırılması değil aynı zamanda insanın bu soğutma tekniği altında nasıl hissettiği ile de alakalıdır.

İşte bu sebepten noktasal soğutma üzerine yapılan bilimsel çalışmalarda noktasal soğutmaya maruz kalacak insanın nasıl ve hangi kabuller ile modellendiği çalışmanın etkinliği açısından önemli bir ölçüt haline gelmektedir. Yukarıda örnek verilen çalışmalar gibi insanın farklı şekillerde ve farklı kabullerle modellediği farklı birçok çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarında insanın deri yüzeyi ile çevresi arasındaki ısı transferi üzerine odaklanılırken, bazılarında ise insanın vücut içinden başlayarak deri dış yüzeyine kadar vücut içi dokularda da meydana gelecek ısı transferi değerleri de irdelenmiştir. Bir örnek olarak D. Lai ve Q. Chen çalışmalarında insan vücudunu çok bölgeli bir şekilde ve vücut iç ortamından başlayarak dışa doğru ısı transferi etkilerini analiz ederek farklı şartlar altında soğutma etkisini analiz etmişlerdir [23]. Başka bir çalışmada ise C. Albuquerque ve J.I. Yanagihara insanı bölgesel 15 bölgeye ayırmış ve bu bölgeleri dikdörtgenler prizması ya da silindirler olarak basitleştirilmiş geometrik bir yaklaşım ile incelemiştir [24].

Özetle termal konfor çalışmalarında insanın metabolik aktivitesi sonucu ürettiği enerji ve bu enerjiyi vücudundan ne kadar uzaklaştırabildiği öne çıkan 2 ana faktördür. Bu noktada vücuttan uzaklaştırılacak enerji için ise insan ile çevresi arasında meydana gelecek ısı transferi kritik önem kazanmaktadır. Gerekli olan ısı transferinin sağlanması amacı için ise çeşitli iklimlendirme sistemi çözümleri geliştirilmiştir. Bu çözümlerden noktasal soğutma (spot cooling) tekniği ise belirli şartlar altında en efektif tekniklerden birisi olarak öne çıkmaktadır. Bu tekniğin ne kadar efektif olduğunun anlaşılması için ise kişi üzerinde meydana gelecek ısı transferi miktarının hesaplanabilmesi için bir takım analitik hesaplamalar, analizler

ve deneysel çalışmalar yapılmış ve bu tekniğin etkin kullanımına yönelik faydalı sonuçlar ortaya çıkarılmıştır. Her geçen gün de yapılan çalışmalar ışığında daha yeni daha farklı çalışmalar ile bu tekniğe ve bu tekniğin kullanımına yönelik önemli sonuçlar ortaya çıkarılmaktadır.

3.2 Silika Jel Literatür Araştırması

Silika jellerin genel kullanım tekniklerine bakıldığında çoğunlukla kapalı hacimler içerisindeki havanın bağıl nemini kontrol altında tutmak amacı ile granül yapıdaki formları ile kullanıldığı görülmektedir. Bu genel kullanımın yanında ayrıca silika jel endüstride petek şeklinde bir tambur yapısında da kullanılmaktadır.

Bir klima sistemi için yükler duyulur ve gizli yük olmak üzere iki yüke ayrılabilir. Bir klimanın istenen iç mekân koşullarını koruyabilmesi için bu iki yükü de dengelemesi gerekir. Bu yüklerden gizli ısının giderilmesi için işlem havası çığ noktası sıcaklığının altına kadar soğutulur bu sayede hava içerisindeki su buharının yoğunlaşması sağlanır ve nemden arındırılan hava tekrar istenen sıcaklığa ısıtılır [25]

Klima sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılması amacı ile havadaki gizli ve duyulur ısının birbirinden ayrıştırılması üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır ve bu çalışmalarda ortak yaklaşım katı nem alıcıların klima sistemine bir nem alıcı teker şeklinde dâhil edilerek gizli ısı yükünün katı nem alıcı sayesinde azaltılmasıdır [26, 27, 28].

H. Lee ve arkadaşları [29] çalışmalarında mobil klima sistemlerinde soğutma çevriminin enerji tüketimini azaltmak amacı ile sistemi silika jel ile destekleyerek gizli ısı yükünü azaltmayı dolayısı ile de soğutma çevrimindeki soğutma yükünü azaltmayı amaçlamışlardır. Çalışmanın sonunda klima sisteminin güç tüketiminde %26,3 'lük bir düşüş elde etmişlerdir. Ancak tekniğin uygulanabilirliği ve teknik limitleri üzerine de önemli çıktıları paylaşmışlardır.

Silika jel ya da diğer katı nem alıcı malzemelerin bir teker/tambur formunda klima sistemlerinde kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak silika jel malzemesinin granül formunda bir paketleme (filtreleme) şeklinde kullanımının tambur formunda kullanımına göre dinamikleri oldukça farklıdır.

Katı nem alıcılar iklimlendirme sistemlerine genellikle maliyet etkin bir çözüm olduğu için paket yatak şekilde entegre edilirler. Ancak paket yatak çözümünde yüksek basınç düşüşü ve yüksek çıkış havası sıcaklıkları ile karşılaşılır. A. Zouaoui ve arkadaşları [30] yaptıkları deneysel çalışmalarında farklı hava hızlarında basınç düşümü ve sıcaklık artışı değerlerinin nasıl değiştiğini göstermişlerdir. J. San ve arkadaşları [31] da aynı çapta ama farklı uzunluktaki borular içerisinde hazırladıkları silika jel yatakları ile yaptıkları deneysel çalışmalarda boru boyunun basınç düşüşü ve sıcaklık artışı üzerindeki etkilerini göstermişlerdir.

C. Chen ve arkadaşları [32] çalışmalarında silika jelin akışkan yatak tekniği ile kullanımını incelemişler ve akışkan yatak kullanımı ile paket yatak kullanımını kıyaslamasını yapmışlardır. Çalışma sonucunda akışkan yatak kullanımı ile paket yatak kullanımına göre hem basınç düşüşünde hem de çıkış havası sıcaklığında ciddi bir düşüş elde etmişlerdir. Akışkan yatak uygulamasındaki pozitif katkının da nem alıcılar üzerinden geçen hava hızının artması ile arttığını vurgulamışlardır. Ek olarak iki farklı granül çapında yaptıkları denemelerde büyük granül yapısında olan nem alıcılarda yüzme etkisinin daha az olması sebebi ile küçük granül yapıdaki kullanıma göre basınç düşüşü ve nem alma performansı açısından büyük granüllü yapıdaki nem alıcıların daha dezavantajlı olduğunu göstermişlerdir.

A. Hamed ve arkadaşları [33] akışkan yatak tekniği kullanarak silika jel ile nem alma prosesi üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında prosesin izotermal olarak gerçekleştiği kabulü ile analitik bir model oluşturmuşlar ve deneysel çalışmalar ile bu analitik modelin doğruluğunu test etmişlerdir. Çalışma sonucunda oluşturdukları modelin nem alma prosesinin başında daha uyumlu olduğunu ancak prosesin ilerleyen aşamalarında analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın arttığını belirtmişlerdir. Deneysel çalışmalarında prosesin ilk başladığı anda en yüksek seviyede olduğunu ancak proses süresi içerisinde azalarak neredeyse bir denge şartına geldiğini göstermişlerdir.

Silika jellerin akışkan yatak tekniği ile kullanımında bazı ana parametreler doğrudan etkili olmaktadır. Bu ana parametreler, akışkan yatağın oluşturulduğu yapının çapı, yüksekliği ve akışkan yatak etkisini yapan hava hızıdır. Akışkan yatak oluşturulması ile bu ana parametrelerin de etkisi ile farklı akış rejimleri oluşmaktadır. S. Shaul ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında [34] farklı boru çapı

ve yüksekliklerine göre oluşabilecek akış rejimlerini belirledikleri bir çalışma ile bu ana parametrelerin etkilerini göstermişlerdir.

Katı-gaz akışkan yatağın oluşturulması sadece silika jellerin kullanımı için değil geçmişten günümüze çokça çalışılmış bir konudur. Bu çalışmalarda farklı etkenler sebebi ile oluşacak farklı akış rejimlerinin belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır [35, 36, 37, 38, 39]. Çünkü oluşacak olan katı-gaz akışkan rejimi doğrudan ilgili sistemin performansını etkileyecek bir sonuç olmaktadır. Bu yüzden araştırmacılar için katı-gaz iki fazlı akış rejimini önceden tahmin edebilmek faydalı olmaktadır.

Silika jel klima sistemlerinde enerji tüketiminin azaltılmasında etkili bir yardımcıdır. Genel kullanım formlarına ek olarak silika jelin farklı kompozit materyaller içinde kullanılması ile de veriminin artırılması konusunda da çalışmalar bulunmaktadır.

C. Chen ve arkadaşları [40] yaptıkları çalışmalarında silika jel ile poliakrilik asit ve sodyum poliakrilatı birleştirerek bir kompozit malzeme elde etmişler ve bu malzemenin paket yatak bir silika jele göre performansının kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda oluşturdukları kompozit malzemenin nem alma kapasitesinin sadece silika jel malzemedan %41 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yaptıkları hava akışı tasarımı sayesinde basınç düşümünde de %31 daha düşük değerler elde etmişlerdir.

C. X. Jia ve arkadaşları [41] yaptıkları çalışmalarında biri silika jelden diğeri de kompozit katı nem alıcı malzemedan üretilmiş iki bal peteği nem alıcı tekerin performanslarını deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda yeni geliştirilen kompozit nem alıcı tekerleğin yaklaşık %50 daha iyi bir nem alma performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Bunun yanında çalışmalarında katı nem alıcıların performansı etkileyen en önemli parametrelerden birinin de giriş havası bağıl nem değeri olduğunu belirtmişlerdir.

Dünyada enerji tüketimi konusundaki farkındalık her geçen gün artmaktadır. Konvansiyonel yapılaşmadan sürdürülebilir sıfır enerjili yapılara geçiş konusunda da farkındalık dünyada oluşmaya başladı. Bu geçiş için en önemli çözümlerden birisi olabilecek olan katı nem alıcıların yakın zamanda hangi teknolojiler ve sistemlerle daha etkili olabileceği konusunda J. Shamim ve arkadaşları [42]

yaptıkları araştırmalarında kompozit malzemeler, yeni sistem tasarımları ve onların da gelişim alanlarına dair analizlerini paylaşmışlardır.



4 ANALİTİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yapılan tüm çalışmalar Prof. Dr. Özgür Şevket ATAYILMAZ danışmanlığındaki doktora öğrencisi Halil Can ÖZAYDIN ile birlikte gerçekleştirilmiştir [Ek-A].

Zırhlı bir askeri aracın içinde çok fazla sayıda ısı üreten elektronik cihaz bulunmaktadır. Ayrıca zırhlı araçlar balistik koruma ihtiyaçlarından dolayı güçlü özel metal alaşımlardan yapılmış gövde ve zırh yapısına sahiptirler. Bu malzemeler de özellikle yaz şartlarında yoğun güneş altında ciddi şekilde ısınmakta ve tekrar soğutulması ciddi bir soğutma yükü ve yüke bağlı olarak ciddi bir soğutma süresi gerektirir. Ek olarak zırhlı araçların bazılarında yine balistik ve askeri operasyonel ihtiyaçlarından dolayı araç motoru sivil otomotivlerdekinden farklı olarak aracın orta kısmında araç içerisinde bulunur. Motor da çalışması esnasında araç içerisine ciddi bir ısı yükü sağlar. Tüm bunlardan dolayı askeri zırhlı araçların klima sistemi ciddi önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında odaklanılan kullanım senaryosunda, askeri bir araç operasyona gitmeden önce güvenli bölgede iken aracın klima sistemi ile araç içerisindeki hava, askerlerin rahatlıkla oturabileceği termal konforun sağlandığı duruma getiriliyor. Askeri personellerin araçla gerekli görevi icra etmek üzere operasyona bölgesine intikal süresince araç motoru ve aktif klima sistemi çalıştığı için askeri personel termal konfor anlamında sorun yaşamıyor. Sonra aracın görev noktasına gelip tanımlı görev sebebi ile araç motorunu kapatıp bekleme yapması gerekebilir. Bekleme yaparken de askeri zorunluluktan dolayı motoru çalışmayan bu araçtan personelin belli bir süre (30dk kadar) araçtan çıkmaması istenir. İşte bu noktada araç içi oluşan ısı yükleri araç içindeki sıcaklığın hızlıca artmasına sebep olur. Bu

da araç içindeki askeri personelin termal konforunun zaman ile bozulması anlamına gelir.

Araç içerisindeki iç ortam havası sıcaklığı 29 °C 'ye ulaştığında artık askeri standartlara göre personele bir klima sistemi ile besleme yapılması gerekmektedir [22].

Normal şartlarda soğutulmuş iklimlendirme havasının insan üzerine direkt olarak üflenmemesi gerekir. Ancak şartlar normalden olağan üstü şartlara geçtiğinde insanın da refleks olarak direkt klima havasını kendi üzerine hatta yüzüne çevirmek gibi bir genel yaklaşımı olur. Bu refleksi daha iyi anlamak için güneş altında beklemiş bir araca binildiğinde ya da normal seyahat ederken artan ısı güneş yükü ile kişinin terlemeye başlaması neticesinde “rahatlamak” için klima üfleçlerini yüzüne çevirmesini düşünebiliriz.

Bu refleksin altındaki sebepleri değerlendirdiğimizde ise şu maddeleri genel olarak sıralayabiliriz;

- Öncelikle insan üzerinde kıyafetleri varken dahi dış ortama açık olan ana bölgesi insanın yüzüdür (kafasıdır). Kıyafetler ise insan vücudu üzerinde termal direnç oluşturmaktadır. Doğal olarak insan ilk “hızlı rahatlama” ihtiyacı hissettiğinde bu termal dirençlerden arınmış olan yüz bölgesinden ısı transferi yapmak isteyecektir.
- Diğer bir konu da araç içerisinde personelin rahat nefes alabilmesidir. Her ne kadar normal şartlarda nefes ile olan ısı alış verişi ihmal edilebilir görülsede bu gibi olağan üstü durumlarda kritik bir önem taşımaktadır. Bu sebeple havanın direk yüze üflenmesi aslında üflenene soğuk havanın vücudun iç bölgesi ile de temas ettirilip yine “rahatlatıcı” etkisine erişmeye yönelmesini sağlamaktadır.
- Ortam sıcaklığı arttıkça vücut termal dengeyi sağlayabilmek için ter miktarını artıracaktır. Ancak kıyafet altındaki vücut bölgelerinde terin buharlaşması karşısında kıyafetlerin direnci vardır. Ama yüz/baş bölgesi yine bu dirençten uzak olan yerdir ve terin buharlaşması ile insana ilk “rahatlatıcı” etki yine burada olacaktır.
- Ter konusunda psikolojik bir etki de; terleme arttıkça ve terin buharlaşma hızı düştükçe ıslak terleme insan vücudu üzerinde damlacık oluşumuna

neden olacak ve bu damlacıklar da yer çekimi etkisi ile vücut üzerinde hareket edecektir. Bu damlacıklar ilk oluşmaya başladığında kıyafet tarafından emilir ve kıyafet belli bir ıslaklığa ulaşana kadar insana “konforsuz” hissettirmez. Ancak yüz/baş bölgesinde oluşan damlacıkları emecek bir kıyafet olmadığı için kişinin yüzü üzerinde bu damlacıklar ve onların hareketi kişide konforsuzluk hissi oluşturacaktır. Ama bu damlacıklar kurduğunda kişi anlık olarak “rahatlama” duygusuna kavuşur.

- Askeri üniforma giymiş personelin giydiği üniformada en hızlı ve en etkili ısı transferi yapabileceği bölgesi yüz/baş bölgesidir. Çünkü zaten vücudunun geri kalan yerleri üniforma ve aksesuarlar ile kapalıdır.

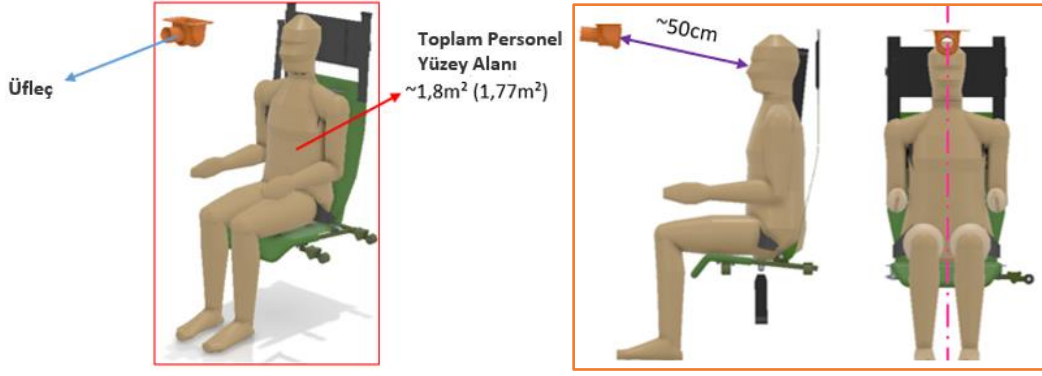
Tüm bu sebepler düşünüldüğünde bu olağan üstü durumlar kısa süreli bir periyod için de olsa şartlandırılmış hava askeri araç içerisindeki personelin yüzüne üflenerek personelden “gerekli” ısı transferinin sağlanması hedeflenir.

Bu anlamda çalışmanın temelinde önce “gerekli” olan bu ısı transferi miktarının anlaşılabilmesi için bir analitik model hazırlanarak askeri zırhlı araç içerisinde askeri üniforma giyen bir personelin noktasal soğutma etkisi altında iken üzerinden meydana gelen ısı transferi mekanizmalarının hesaplanarak personelden uzaklaştırılan toplam ısı transferinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

4.1 Kabuller ve 3 Boyutlu Modelleme

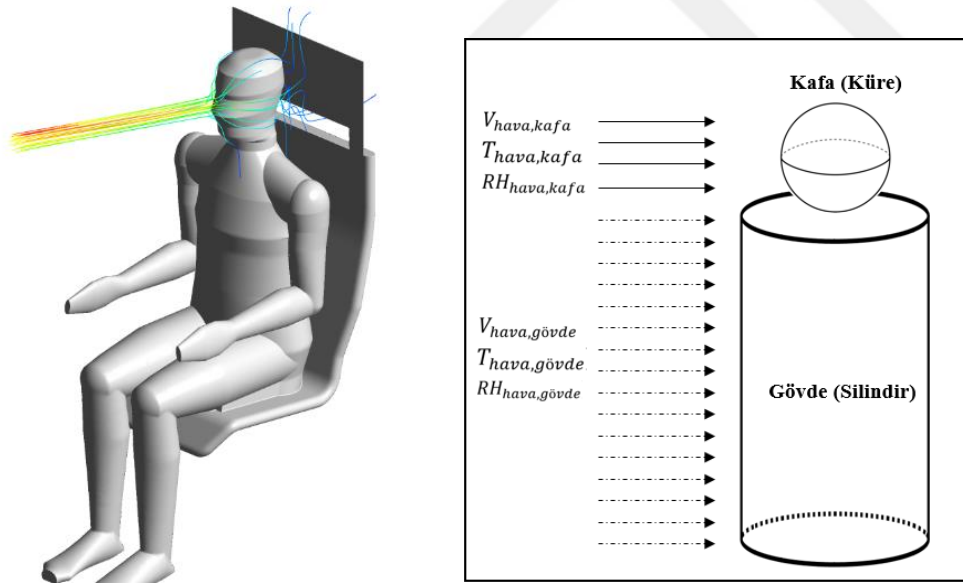
Hesaplamalarda kullanılmak üzere bu tezin odaklandığı askeri kullanım senaryosunu doğru benzeştirmek için bazı kabuller yapılmış ve zırhlı araç içerisindeki personel ve noktasal soğutmanın gerçekleştirildiği üfleç 3 boyutlu olarak gerçeğini yansıtacak şekilde modellenmiştir.

3 Boyutlu modelleme (CAD) yazılımları kullanılarak askeri araç içerisindeki personel araçtaki koltuk üzerinde aynı pozisyonda oturur şekilde modellenmiş ve gerçeği ile birebir aynı boyutlardaki üfleç araçtaki ile aynı konumda pozisyonlanmıştır. Askeri personel ise standart bir erkek insanı simule edecek şekilde 1,8 m² yüzey alanına sahip olarak modellenmiştir.



Şekil 4.1 Analitik modele için temel teşkil edecek insan modeli

Oturarak simüle edilen asker figüründe insanın sadece yüz bölgesi açık olduğu için böyle bir yerleşim ve pozisyonlamada şartlandırılmış hava direkt olarak personelin başına üflenmekte ve personelin başı aktif soğutma hava akışı içinde kalmaktadır. Ancak başın dışında vücudun diğer bölgeleri ise bu noktasal soğutma alanının dışında kalmakta ve üfleçten çıkan havanın etkisi ile aktif soğutma alanına göre çok daha az bir hava hareketliliği altında ve şartlandırılmış havadan ziyade araç içi ortam havasının etkisinde kalmaktadır.



Şekil 4.2 Baş ve gövde özelinde sadeleştirilmiş model

Bu yüzden çözümlemeyi sadeleştirmek ve daha odaklı bir analitik model kurmak maksadı ile hesaplamalarda personelin başı küre, vücudun geri kalanı da bir silindir olarak modellenmiştir. Böylece başı temsil eden küre aktif noktasal soğutma etkisi altında kalacak ve vücudun geri kalanını temsil eden silindir de araç içi ortam

havasının etkisinde ve çok daha düşük bir hava hareketliliği etkisinde olacaktır. Analitik modelde de çözümleme bu iki alan özelinde ayrı ayrı yapılmıştır.

Bu kabullere ek olarak askeri zırhlı araç içerisindeki askeri personelden uzaklaştırılan ısı transferinin belirlenmesi amacı ile bazı ek kabuller de yapılmıştır. Bu kabuller aşağıda Tablo 4.1 'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Kabuller

Şartlar	Değerler	Açıklamalar
Personel deri yüzey sıcaklığı	33 °C	İnsan deri yüzey sıcaklığı 33 °C'de sabit kabul edilmiştir.
Araç içi ortam havası sıcaklığı	29 °C	Araç içi ortam havası sıcaklığı 29 °C'de sabit kabul edilmiştir. Askeri araçlarda ortam havası sıcaklığı 29 °C'ye ulaştığında klima gereksinimi ortaya çıkar.
Araç içi ortam yüzeyleri sıcaklığı	29 °C	Araç içi ortam yüzeyleri sıcaklığı 29 °C'de sabit kabul edilmiştir.
Araç içi ortam havası bağıl nemi	25%	Askeri standartlara göre araç içi ortam havası bağıl nemi %25 olarak kabul edilmiştir.
Noktasal soğutma üfleme havası sıcaklığı	$T_{\text{üfleme}}$	Üfleç çıkışındaki hava sıcaklık değeri olup değişken olarak alınmıştır.
Noktasal soğutma üfleme havası bağıl nemi	$RH_{\text{üfleme}}$	Üfleç çıkışındaki hava bağıl nem değeri olup değişken olarak alınmıştır.
Üfleç çıkışı üfleme havası hızı	$V_{\text{üfleme}}$	Üfleç çıkışındaki ortalama hava hızı değeri olup değişken olarak alınmıştır.
Vücut iç organ sıcaklığı	37 °C	Vücut iç organ sıcaklığı 37 °C'de sabit kabul edilmiştir.
Nefes havası vücuttan çıkış bağıl nemi	100%	Vücuttan çıkan nefes havası her zaman %100 bağıl nemde olmaktadır.
Deri yüzeyi üzerinde nem tabakası bağıl nemi	100%	Deri üzerinde bir ıslak terleme olmasa dahi oluşan ince film tabakasında deri yüzey sıcaklığı ile aynı sıcaklıkta doymuş su buharı oluşmaktadır.
Askeri üniformanın termal direnci	R_{ct} *	* R_{ct} değeri EN ISO 11092:2014 standardına göre ölçülmüş olup gizlilik sınıflandırmasından dolayı değer olarak paylaşılamamaktadır.

Tablo 4.1 Kabuller (devamı)

Askeri üniformanın nem geçirgenlik direnci	$R_{et, \text{üniforma}}$ **	** Ret, üniforma değeri EN ISO 11092:2014 standardına göre ölçülmüş olup gizlilik sınıflandırmasından dolayı değer olarak paylaşılamamaktadır.
Toplam vücut yüzey alanı	$A_D = 1,8 \text{ m}^2$	Personelin toplam vücut yüzey alanı $1,8 \text{ m}^2$ olarak kabul edilmiştir.
Kafa yüzey alanı	$A_{kafa} = 0,1 \text{ m}^2$	Personelin sadece kafasının toplam yüzey alanı $0,1 \text{ m}^2$ olarak kabul edilmiştir.
Gövde yüzey alanı	$A_{gövde} = 1,7 \text{ m}^2$	Personelin gövde (baş hariç vücut) toplam yüzey alanı $1,7 \text{ m}^2$ olarak kabul edilmiştir.

Personel üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferi değeri aşağıdaki denklem aracılığı ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{toplam} = \dot{Q}_{kafa} + \dot{Q}_{gövde} \quad (3.1)$$

4.2 Kafa Üzerinde Gerçekleşen Isı Transferi

Noktasal soğutma tekniği ile şartlandırılmış hava direkt olarak personelin kafasına üflenmektedir. Personel kafası üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferi eşitlik 3.2 ile hesaplanabilir.

$$\dot{Q}_{kafa} = \dot{Q}_{taş, kafa} + \dot{Q}_{rad, kafa} + \dot{Q}_{evap, kafa} + \dot{Q}_{nefes} \quad (3.2)$$

Personelin kafası üzerinde aktif bir zorlanmış taşınım meydana gelecektir. Personelin kafasına da $0,1 \text{ m}^2$ kafa yüzey alanını verecek bir küre modellemesi ile yaklaşmıştır. Buna göre de personel kafası üzerinde gerçekleşen ısı transferi miktarının belirlenmesi için küre üzeri zorlanmış akış korelasyonlarından faydalanılmıştır.

**Şekil 4.3** Kafa Üzerinde Şartlandırılmış Hava Akışı

Hesaplamalarda kullanılmak üzere önce ortalama hava sıcaklığı hesaplanır.

$$T_{ortalama} = (T_{hava,kafa} + T_{deri,kafa})/2 \quad (3.3)$$

Taşıyım Isı Transferi hesapları için Reynolds ve Nusselt boyutsuz sayıları hesaplanıp sonrasında taşıyım ısı transferi katsayısı hesaplanarak toplam taşıyım ısı transferi hesaplanır.

Küre geometrileri için Nu sayısı eşitlik 3.5 ile hesaplanmıştır [43].

$$Re_{hava,kafa} = \frac{V_{hava,kafa} \times D_{kafa}}{\nu_{hava,kafa}} \quad (3.4)$$

$$Nu_{küre,kafa} = 2 + [0,4Re_{hava,kafa}^{1/2} + 0,06Re_{hava,kafa}^{2/3}]Pr_{hava,kafa}^{0,4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s}\right)^{1/4}, \quad (3.5)$$

$3,5 < Re < 3,5 \times 10^8$
 $0,7 < Pr < 380$

μ : Dinamik viskozite

$$h_{hava,kafa} = \frac{k_{hava,kafa}}{D_{kafa}} Nu_{küre,kafa} \quad (3.6)$$

$$\dot{Q}_{taş,kafa} = h_{hava,kafa} A_{kafa} (T_{deri,kafa} - T_{hava,kafa}) \quad (3.7)$$

Radyasyon ısı transferi için ise deri yüzeyi ile çevre ortam yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı etkili olacaktır ve eşitlik 3.9 ile hesaplanmıştır.

$$D_{AB} = D_{H_2O-air} = 1,87 \times 10^{-10} \frac{T_{ortalama}^{2,072}}{P} \quad (3.8)$$

$$\dot{Q}_{rad,kafa} = \varepsilon A_{kafa} \sigma (T_{deri,kafa}^4 - T_{yüzey,araç içi}^4) \quad (3.9)$$

Deri yüzey sıcaklığı 33 °C ‘de ve çevre ortam yüzey sıcaklıkları da 29 °C ‘de sabit kabul edilmiştir.

Taşıyım ve radyasyon duyulur ısı transferleri olurken gizli ısı transferi mekanizması olarak da terleme yani buharlaşma ile olacak ısı transferinin hesaplanması gerekir.

Terleme aslında bir kütle transferi olarak değerlendirilebilir. Bu sebeple burada Schmidt ve Sherwood sayılarının hesaplanmasından faydalanılmalıdır.

$$S_c = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} Sh_{küre,kafa} &= 2 \\ &+ \left[0,4 Re_{hava,kafa}^{1/2} \right. \\ &\left. + 0,06 Re_{hava,kafa}^{2/3} \right] Sc^{0,4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s} \right)^{1/4} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$0,7 < Sc < 380$$

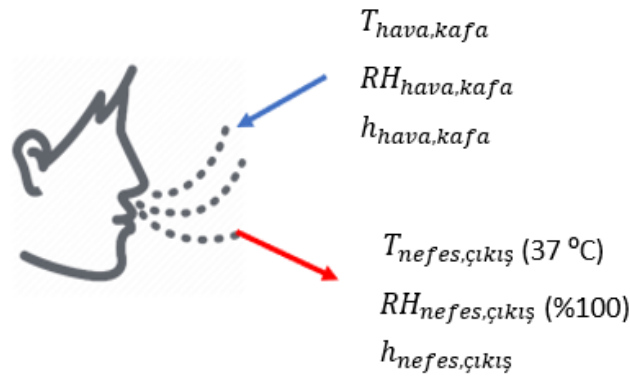
$$h_{kütlet,kafa} = \frac{Sh_{küre,kafa} D_{AB}}{L} \quad (3.12)$$

$$\rho_{v,s} = \frac{P_{v,kafa}}{R_v T_{kafa}} \quad (3.13)$$

$$\dot{m}_v = h_{kütlet,kafa} A_{kafa} (\rho_{v,kafa} - \rho_{v,\infty}) \quad (3.14)$$

$$\dot{Q}_{evap,kafa} = \dot{m}_v h_{fg} \quad (3.15)$$

Nefes alıp verme ile olan ısı transferi normal şartlarda ihmal edilebilir olsa da bu senaryodaki gibi olağan üstü durumlarda kritik öneme sahip olmaktadır. Bu durumda nefes alıp verme ile sağlanan ısı transferi eşitlik 3.16 ile hesaplanmıştır.



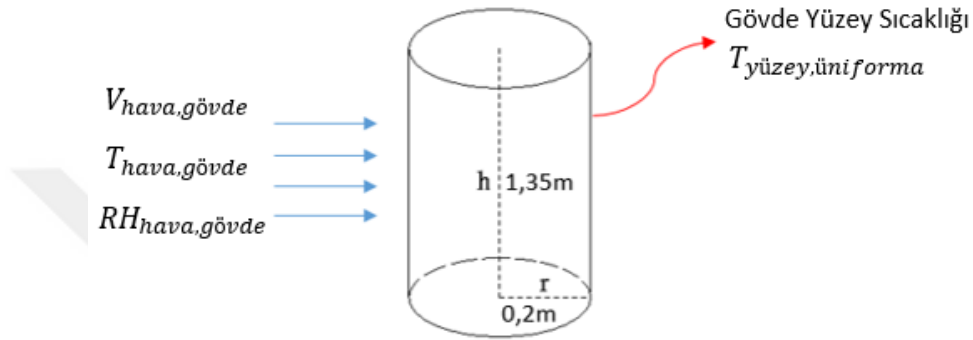
Şekil 4.4 Nefes Alıp Verme Isı Transferi

$$\dot{Q}_{exhale} = \dot{m}_{nefes} (h_{nefes,çıkış} - h_{hava,kafa}) \quad (3.16)$$

4.3 Gövde Üzerinde Gerçekleşen Isı Transferi

Personel kafası aktif noktasal soğutma hava akışı etkisinde kalırken, personel gövde araç içi ortam havasının gövde üzerine çok daha düşük bir hareket hızı etkisi altında kalmaktadır. Gövde üzerinden gerçekleşecek toplam ısı transferi eşitlik 3.17 ile hesaplanır.

$$\dot{Q}_{gövde} = \dot{Q}_{taş,gövde} + \dot{Q}_{rad,gövde} + \dot{Q}_{evap,gövde} \quad (3.17)$$



Şekil 4.5 Gövde üzerinde gerçekleşen ısı transferinin şematik şekli

Gövde üzerinde etkili taşınım ısı transferi hesaplanırken yine Reynolds ve Nussetlt boyutsuz sayılarından yararlanılır ancak bu sefer silindir üzeri zorlanmış akış korelasyonlarından yararlanılır [23].

$$Re_{hava,gövde} = \frac{V_{hava,gövde} \times D_{gövde}}{\nu_{hava,gövde}} \quad (3.18)$$

$$Nu_{gövde,silindir} = \frac{h_{hava,gövde} D_{gövde}}{k} \quad (3.19)$$

$$= 0,3 + \frac{0,62 Re_{hava,gövde}^{1/2} Pr_{hava,gövde}^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr_{hava,gövde})^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_{hava,gövde}^{5/8}}{282.000}\right)^{4/5}\right]$$

$$, Re Pr > 0,2$$

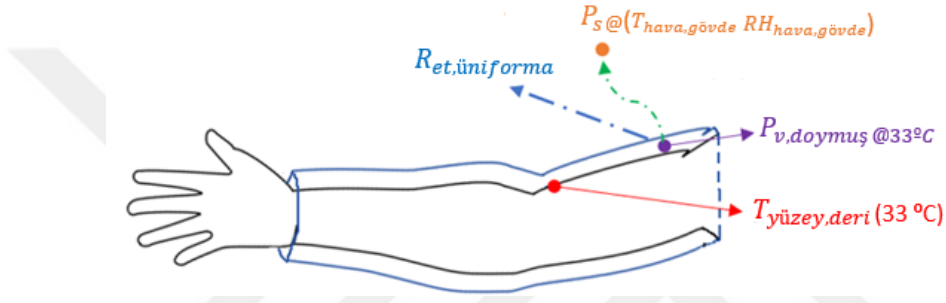
$$h_{hava,gövde} = \frac{k_{hava,gövde}}{D_{gövde}} Nu_{silindir,gövde} \quad (3.20)$$

$$\dot{Q}_{taş,gövde} = \frac{A_{gövde}(T_{yüzey,uniforma} - T_{hava,gövde})}{R_{ct} + \frac{1}{h_{hava,gövde}}} \quad (3.21)$$

Gövde üzerinde etkili radyasyon ısı transferi ise vücut üzerinde üniforma giyilmiş olduğu için üniforma yüzeyi ile araç iç ortam yüzeyleri arasında gerçekleşecektir.

$$\dot{Q}_{rad,gövde} = \varepsilon A_{gövde} \sigma (T_{yüzey,uniforma}^4 - T_{yüzey,araç içi}^4) \quad (3.22)$$

Gövde üzerinden gerçekleşen ısı transferine geldiğimizde ise burada üniformanın nem geçirme direnci ve basınç farkı dikkate alınmalıdır [44, 45, 4].



Şekil 4.6 Üniforma direnci ile nem geçirme

$$\dot{Q}_{evap,gövde} = \Delta P \cdot A_{gövde} / R_{et,üniforma} \quad (3.23)$$

4.4 CFD Çalışması ile Kafanın Modellenmesi

Yukarıdaki bölümlerde analitik modelde kullanılan korelasyonlara yer verilmiş ve hangi şartların dikkate alınarak bu hesaplamaların yapılacağı konusuna açıklık getirilmiştir. Ancak bu hesaplamalarda kullanmak üzere bilinmesi gereken kritik iki değer bulunmaktadır. Bu iki değer de üfleçten personel kafasına üflenen havanın üfleçten çıktıktan sonra sıcaklığının ve hızının personelin kafasına ulaştığında hangi değerde olacağı ve kafa üzerine üflenen havanın gövde üzerinde nasıl bir hareket hızına ve sıcaklığına etkisi olacaktır.

Bu değerlerin belirlenmesi için ise hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu analizlerde önemli parametreler şu şekilde sıralanabilir;

- Üfleç boyutları ve şekli

- Personel ile üfleç arası mesafe
- Üfleçten çıkan havanın sıcaklığı
- Üfleçten çıkan havanın hızı
- Üfleçten çıkan havanın bağıl nemi

Bu parametrelerden üfleç boyutu ve şekli askeri zırhlı araçta kullanılan üflecin birebir aynısının 3 boyutlu olarak modellenmesi ile sabitlenmiştir.

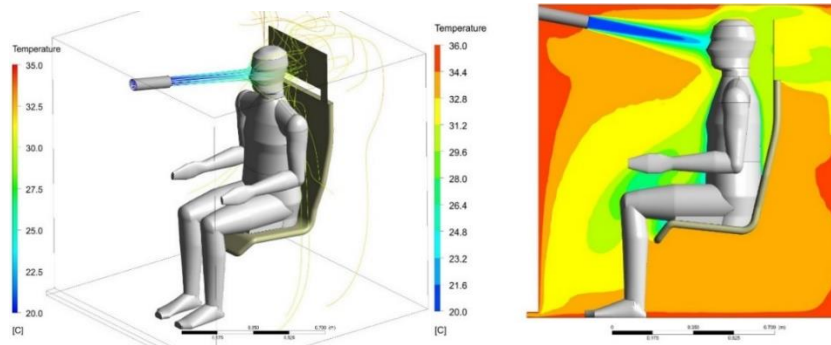
Ancak oluşturulan analitik model için farklı durum ve şartlar altında personel üzerinden gerçekleşen toplam ısı transferi değerlerinin belirlenmesi için diğer 4 parametre değişken olarak tutulmuştur.

Bu değişkenler de şu şekilde belirlenmiştir;

- Personel ile üfleç arası mesafe 25cm, 50cm, 75cm olmak üzere 3 farklı değerde
- Üfleçten çıkan havanın (üfleme havasının) sıcaklığı 20°C ila 40°C arasında 21 farklı değerde
- Üfleçten çıkan havanın (üfleme havasının) hızı 1 m/s ila 10 m/s arasında 10 farklı değerde
- Üfleçten çıkan havanın (üfleme havasının) bağıl nemi %10 ila %90 arasında 9 farklı değerde

Tüm bu değişken bu farklı değerlerde kullanıldığında 5670 farklı şart için zırhlı araç içindeki askeri personelden uzaklaştırılabilecek toplam ısı transferi değerleri belirlenmiştir.

Ancak bu hesaplamalar yapılırken üfleme havası özelliklerinin personele geldiğinde hangi değerlerde olduğu da CFD analizleri ile belirlenmiştir.



Şekil 4.7 CFD analizlerinden örnek görsel

Üfleme havası üfleçten çıktıktan sonra personele doğru giderken doğal konik benzeri bir kesit ile yol alacak ve akışın merkezi ile dışa doğru gidildikçe akış hızlarında azalma olacaktır. Aslında bu anlamda üfleme havasının personelin kafası ulaştığında her noktada aynı hızda olmayacağı aşikârdır.

Benzer şekilde bu üfleme havasının etkisi ile az da olsa araç içi ortam havası da hareketlenecek bu hareketlilik de gövde üzerinde etkili olacaktır. Ek olarak personelin yüzüne isabet eden üfleme havası oradan biraz da personelin gövdesine doğru yönelecektir.

Tüm bunların etkilerini doğru anlamak ve hesaplamalarda kullanmak üzere hem personel kafası hem de gövdesi farklı bölgelere ayrılarak o bölgelerdeki hava özellikleri incelenmiştir. Daha sonra bu değerlerin gövde ve kafa üzerindeki ortalamaları alınarak hesaplamalarda ortalama değerler kullanılmıştır. Böylece sanki gövde de kafa da homojen bir hava akışı altındaymış kabulü yapılmıştır. CFD analizleri sonucunda ortalama hız ve sıcaklıkları belirlemek için yapılan bölgesel analiz değerlerine örnekler Tablo 4.2 ve Tablo 4.3 'te sunulmaktadır.

Tablo 4.2 Kafa üzerinde bölgesel üfleme havası hızı değerleri örnek tablosu

Üfleme hızı : 1 m/s								
Üfleme Sıcaklığı : 20 °C								
	0,05	0,07	0,11	0,12	0,11	0,07	0,05	
0,04	0,08	0,14	0,19	0,21	0,19	0,14	0,08	0,04
0,07	0,14	0,23	0,29	0,31	0,29	0,23	0,14	0,06
0,1	0,21	0,34	0,42	0,44	0,43	0,34	0,21	0,1
0,13	0,26	0,42	0,55	0,6	0,56	0,43	0,26	0,13
0,13	0,27	0,42	0,51	0,49	0,51	0,42	0,26	0,13
0,11	0,22	0,35	0,45	0,45	0,45	0,35	0,22	0,1
0,07	0,15	0,24	0,32	0,34	0,32	0,24	0,15	0,07
	0,08	0,13	0,18	0,19	0,18	0,13	0,08	

Tablo 4.3 Kafa üzerinde bölgesel üfleme havası sıcaklığı değerleri örnek tablosu

Üfleme hızı : 1 m/s								
Üfleme Sıcaklığı : 20 °C								
	28,95	28,41	27,96	27,84	27,98	28,45	29,01	
29,1	28,42	27,67	27,12	26,93	27,14	27,71	28,48	29,11
28,68	27,75	26,84	26,08	25,79	26,1	26,85	27,78	28,72
28,25	27,12	25,92	24,78	24,31	24,79	25,94	27,14	28,25
27,94	26,66	25,19	23,62	22,89	23,62	25,19	26,69	27,96
27,91	26,59	25,07	23,56	22,96	23,55	25,1	26,62	27,92
28,12	26,95	25,69	24,53	24,1	24,54	25,71	26,99	28,15
28,55	27,62	26,67	25,91	25,62	25,92	26,69	27,65	28,56
	28,38	27,7	27,19	26,99	27,21	27,73	28,41	

Bu ortalama değerlerin belirlenmesi için de üfleme sıcaklığı 20 °C, 25 °C ve 30 °C; üfleme hızı da 1 m/s, 6 m/s, 10 m/s olacak şekilde CFD analizleri yapılmış ve ara değerlerdeki değişkenler için iterasyon grafikleri oluşturularak ara değerler hesaplanmıştır.

Aşağıda CFD analizleri ile farklı üfleç-personel arası mesafelerde farklı üfleç çıkış hızı ve sıcaklıklarına göre elde edilen kafa ve vücut bölgesi ortalama hız ve sıcaklık değerleri Tablo 4.4 'de sunulmuştur.

Tablo 4.4 Personelin kafası ve gövdesi üzerinde gerçekleşen ortalama sıcaklık ve hava hızı değerleri

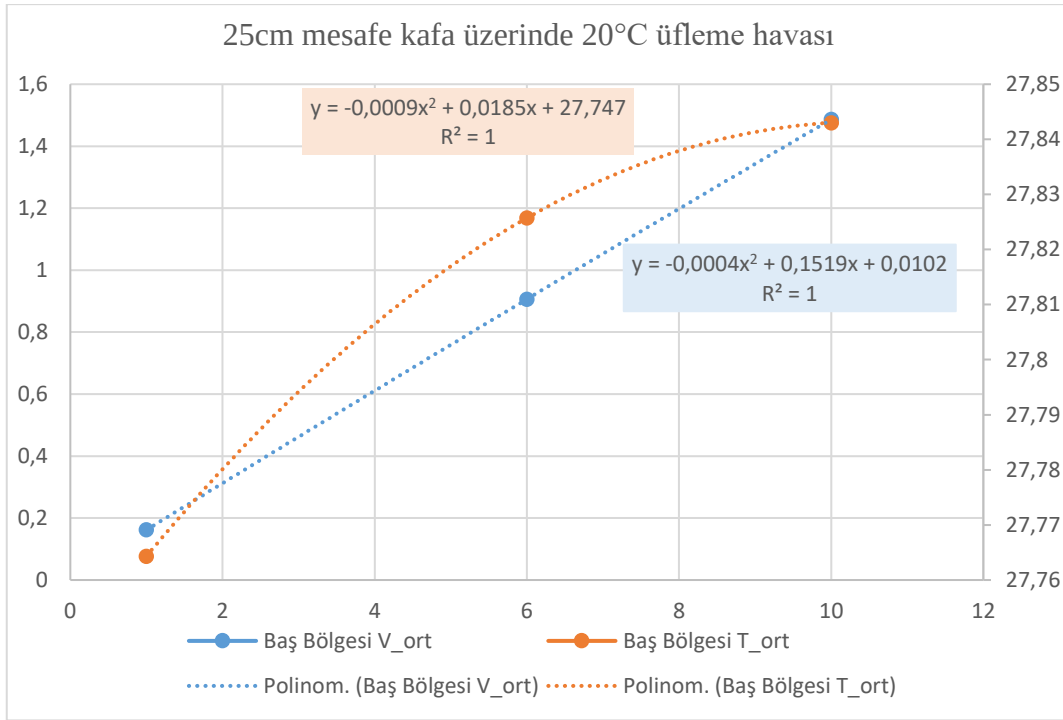
Mesafe	Üfleç Çıkış Sıcaklığı (°C)	Üfleç Çıkış Hızı (m/s)	Baş Bölgesi Ortalama Hız (m/s)	Baş bölgesi Ortalama Sıcaklık (°C)	Gövde Bölgesi Ortalama Hız (m/s)	Gövde Bölgesi Ortalama Sıcaklık (°C)
25cm	20	1	0,16	27,76	0,01	29,61
25cm	20	6	0,91	27,83	0,08	27,62
25cm	20	10	1,49	27,84	0,14	27,28
25cm	25	1	0,16	28,57	0,01	31,06
25cm	25	6	0,90	28,60	0,08	29,88

Tablo 4.4 Kafa ve gövde üzerinde gerçekleşen ortalama sıcaklık ve hava hızı değerleri (devamı)

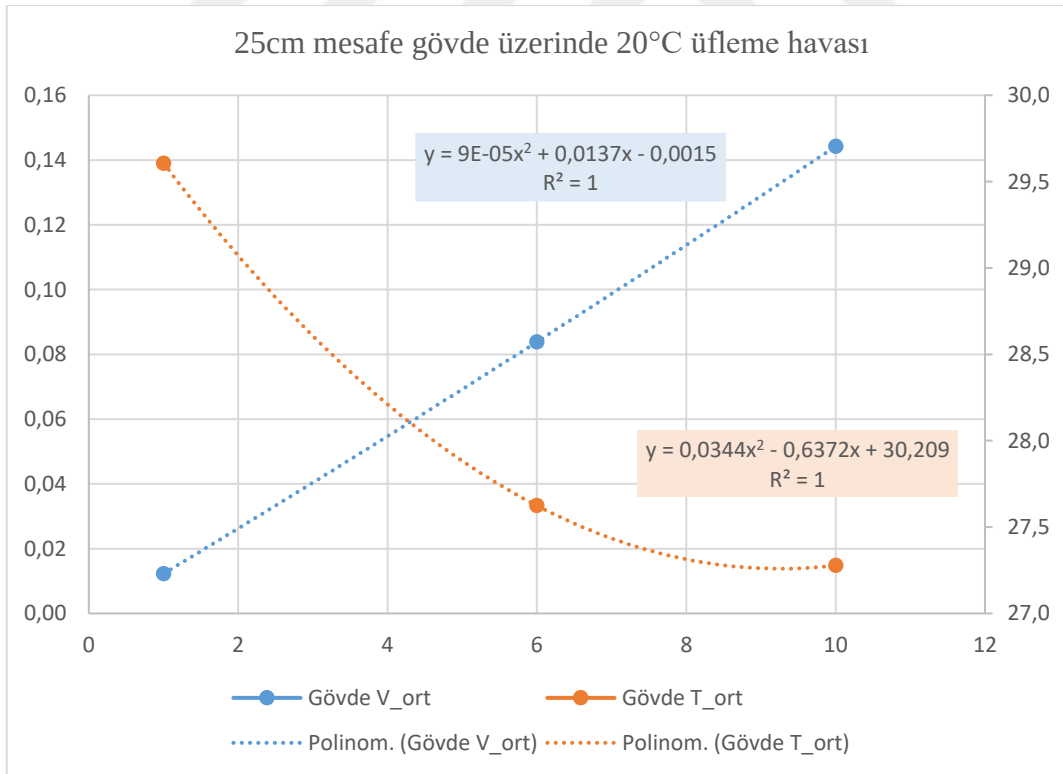
25cm	25	10	1,48	28,60	0,14	29,66
25cm	30	1	0,16	29,37	0,01	32,65
25cm	30	6	0,90	29,36	0,08	32,10
25cm	30	10	1,48	29,36	0,14	32,00
50cm	20	1	0,23	26,78	0,02	29,50
50cm	20	6	1,28	26,93	0,08	27,70
50cm	20	10	2,08	26,98	0,14	27,20
50cm	25	1	0,23	28,13	0,01	31,10
50cm	25	6	1,28	28,19	0,08	29,90
50cm	25	10	2,08	28,21	0,14	29,60
50cm	30	1	0,23	29,46	0,01	32,70
50cm	30	6	1,27	29,44	0,07	32,20
50cm	30	10	2,07	29,44	0,13	32,00
75cm	20	1	0,26	26,67	0,02	29,30
75cm	20	6	1,53	26,52	0,10	27,80
75cm	20	10	2,55	26,50	0,17	27,30
75cm	25	1	0,25	28,10	0,02	31,00
75cm	25	6	1,51	28,02	0,10	30,10
75cm	25	10	2,50	28,02	0,17	29,70
75cm	30	1	0,25	29,50	0,02	32,60
75cm	30	6	1,50	29,48	0,10	32,20
75cm	30	10	2,49	29,48	0,17	32,00

CFD analizleri ile elde edilen bu değerlerden, üfleç çıkışındaki ara sıcaklık ve hız değerlerine göre de kafa ve gövde üzerinde etkili olan ortalama hız ve sıcaklık değerlerini belirlemek için fonksiyon grafikleri oluşturulmuştur.

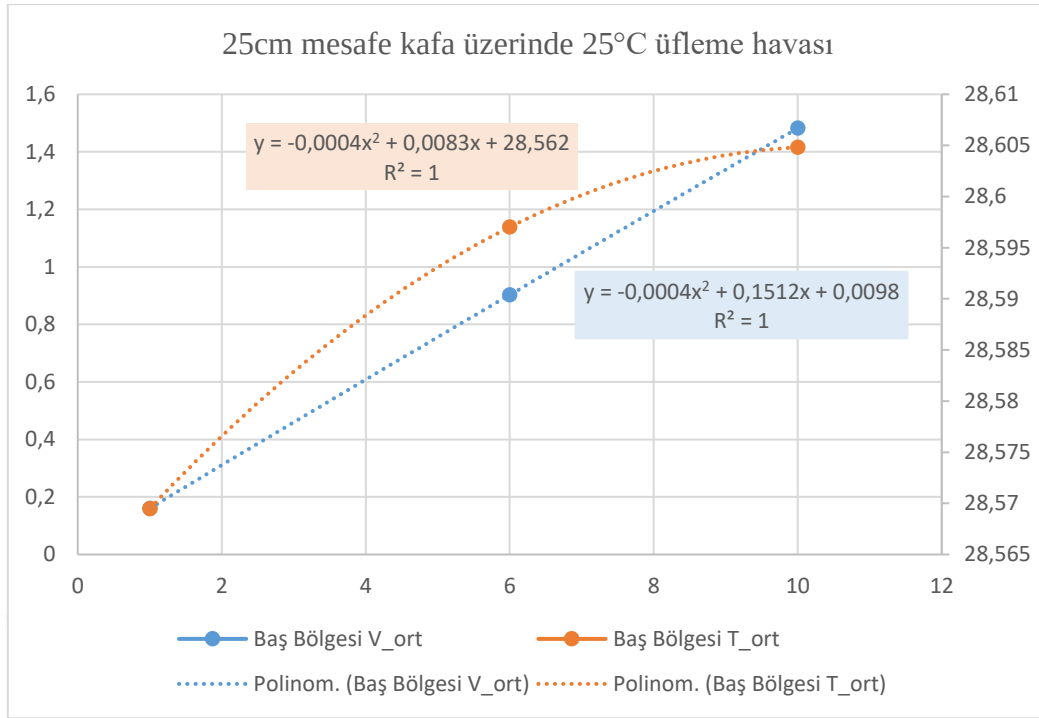
Oluşturulan fonksiyon grafiklerinden 25cm üfleme mesafesinde, 20 °C, 25 °C ve 30 °C üfleme sıcaklıklarına göre oluşturulan grafikler Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 'te gösterilmektedir. Benzer grafikler ayrıca 50cm ve 75cm üfleme mesafesinde 20 °C, 25 °C ve 30 °C üfleme sıcaklıklarına göre de oluşturulmuş ve analitik çözümlemede kullanılmıştır.



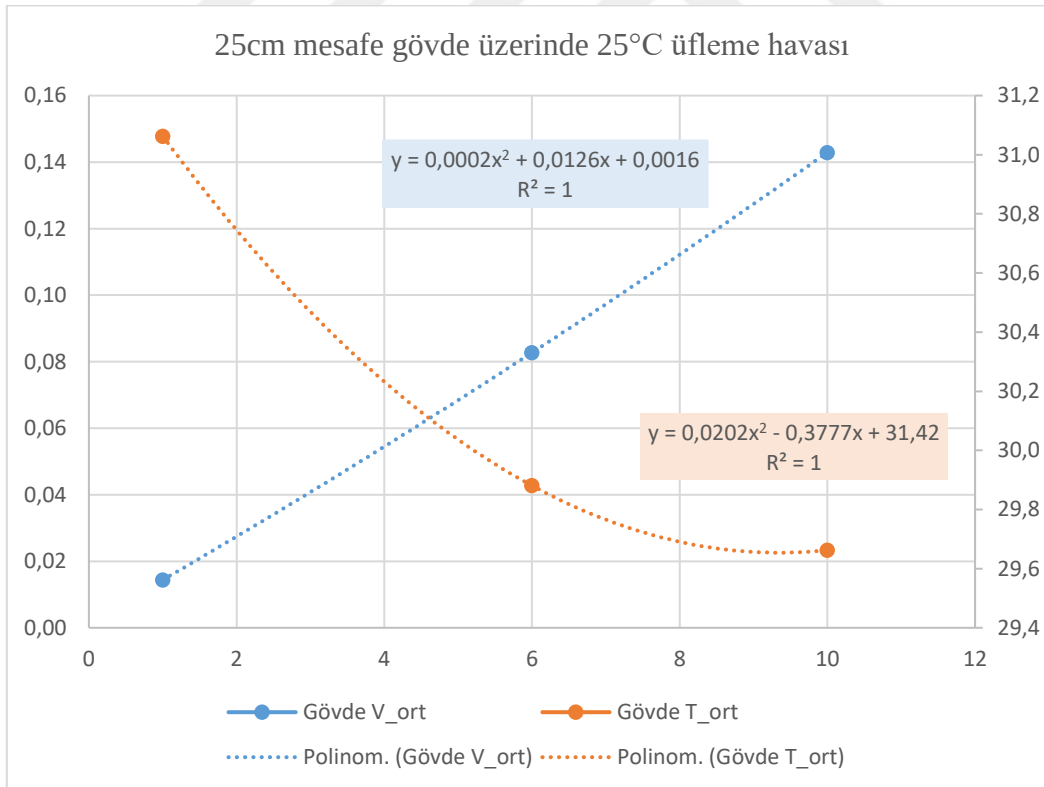
Şekil 4.8 25cm mesafe, 20 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği



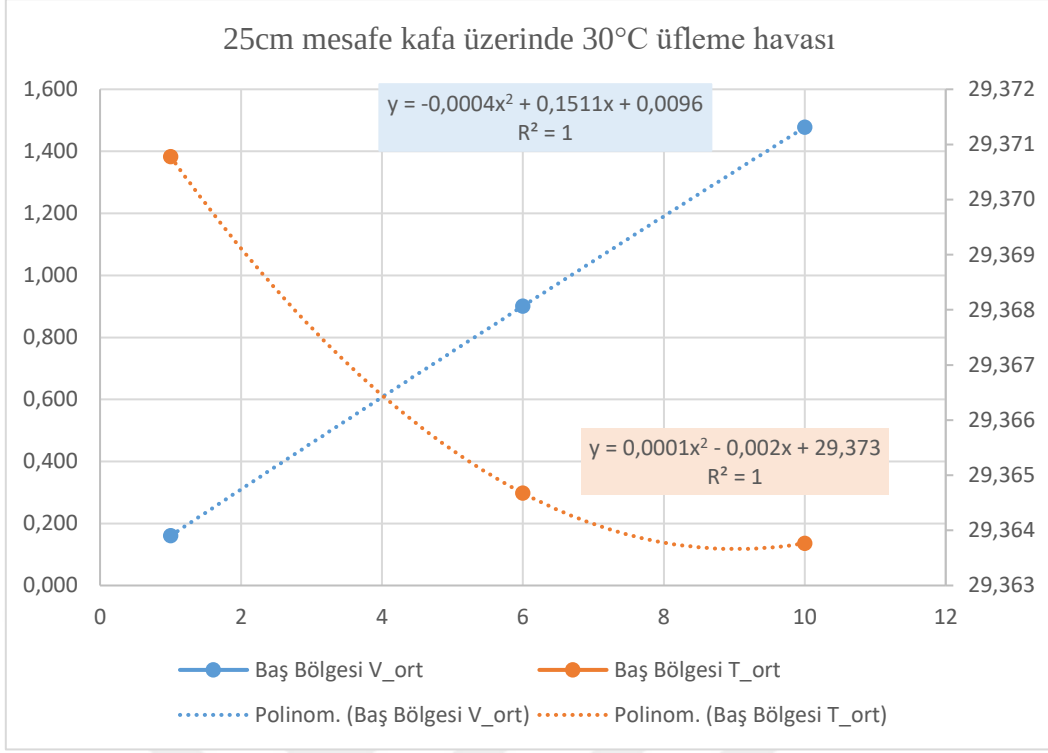
Şekil 4.9 25cm mesafe, 20 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği



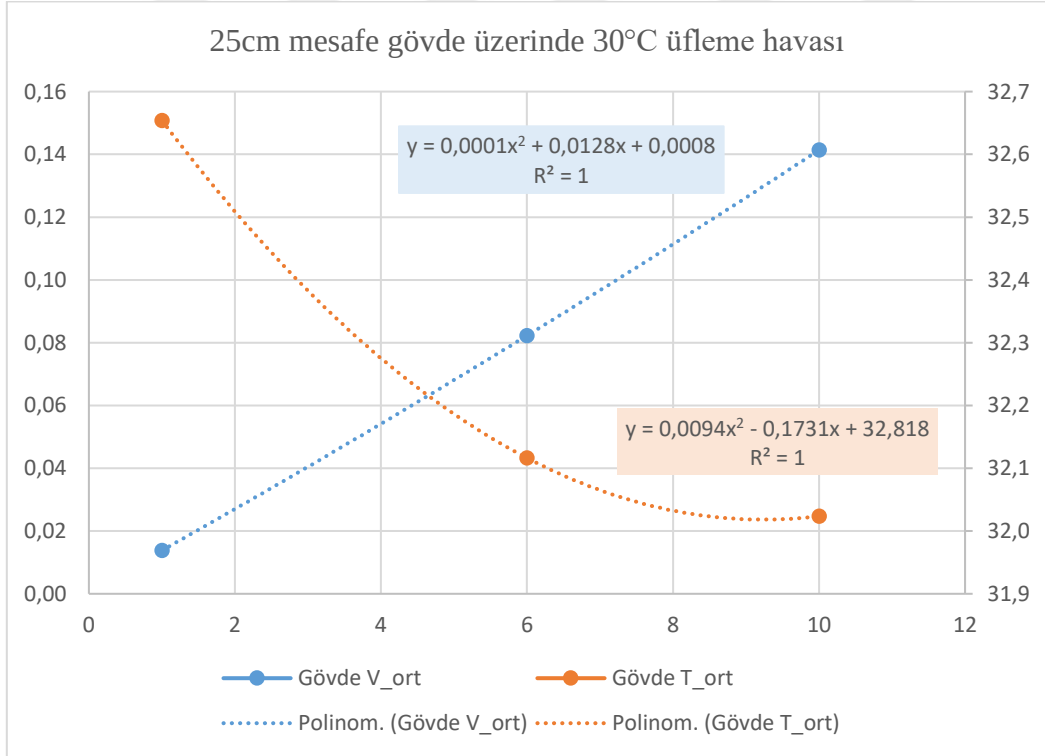
Şekil 4.10 25cm mesafe, 25 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği



Şekil 4.11 25cm mesafe, 25 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği



Şekil 4.12 25cm mesafe, 30 °C üfleme havası - kafa üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği



Şekil 4.13 25cm mesafe, 30 °C üfleme havası - gövde üzerinde etkili hava akışının hız ve sıcaklık değişimi grafiği

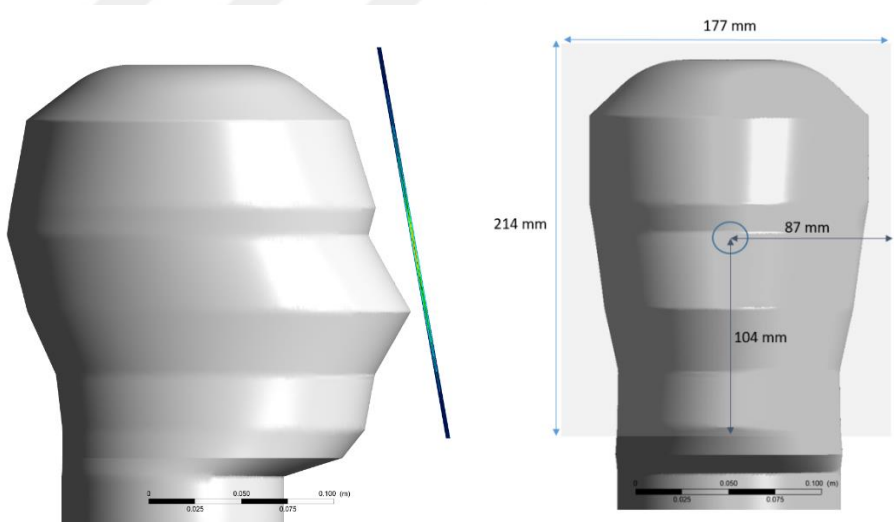
Bu grafikler kullanılarak da toplamda 5670 farklı şart için bu değerler kümesi elde edilmiştir. Bu değerler de hazırlanan analitik modele yüklenerek 5670 farklı şart için personelden uzaklaştırılan toplam ısı transferi miktarı belirlenmiştir.

Bu çalışma kapsamındaki kabullere göre bu özellikler CFD analizleri ile belirlenmiştir ancak fiziksel olarak da bu analizlerin doğrulanması çalışmanın güvenilirliği açısından önem taşıyacaktır.

4.5 CFD Analizlerinin Deneysel Olarak Doğrulanması

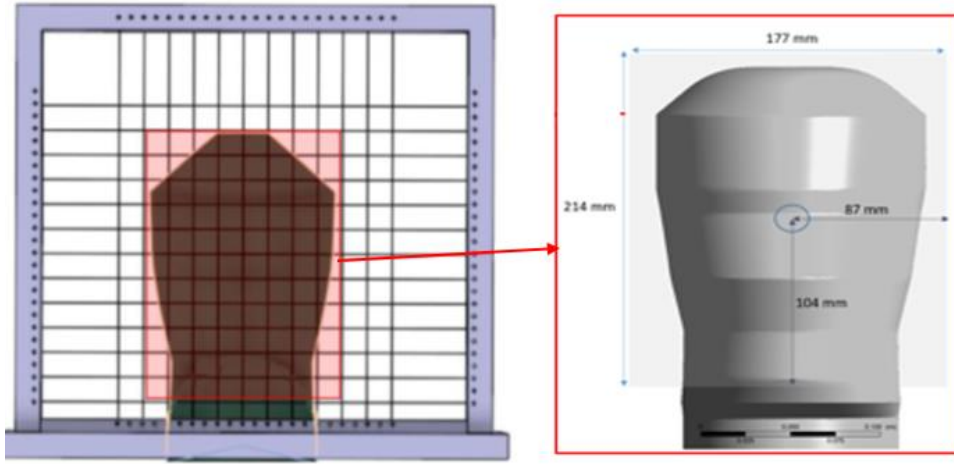
Analitik modele girdi sağlayan CFD analizlerini doğrulamak için deney düzeneğinde bir ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Bu kapsamda modellenen personel datasında personelin kafası x ve y ekseninde bölgelere ayrılmış ve her bölge merkezi için önce CFD analizinden hız ve sıcaklık verileri alınmıştır. Sonra kurulan deney düzeneği ile aynı noktalarda üfleme havasının gerçekte ne değerlerde olduğu ölçülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3 boyutlu olarak modellenen test mankeninin kafası için bir ölçüm alanı belirlenmiştir.



Şekil 4.14 Personel kafasının 3 boyutlu modellenmesi ve ölçüm alanı

Sonra bu ölçüm alanı farklı küçük ölçüm alanlarına bölünerek ölçüm noktaları belirlenmiştir.



Şekil 4.15 Kafa bölgesi hava özellikleri ölçüm noktaları

Belirlenen bu noktalardan deneysel olarak ölçümlerin yapılabilmesi için bir deney düzeneği düzenlenmiştir. Laboratuvarda kurulan deney düzeneğinde askeri zırhlı araçtaki ile aynı şekilde bir üfleme havası oluşturabilecek düzenek hazırlanmıştır. Üfleme havası için gerekli olan soğuk hava kaynağı mobil klimadan sağlanmış olup, üfleme havası ise askeri zırhlı araçtaki ile aynı olan bir emiş motoru (fan) sayesinde sağlanmıştır. Emiş motorunun emme kısmına mobil klimadan çıkan soğuk hava yönlendirmiştir. Üretilen soğuk hava üzerinde hassas ayar yapmak için bir elektrikli sıcak hava tabancası da fanın emiş kısmına yerleştirilmiştir. Fan tarafından üflenlen hava askeri zırhlı araçtaki ile aynı bir hava kanalı sayesinde üflece taşınmıştır.



Şekil 4.16 Deney düzeneğinde portatif soğutucu ve ısı tabancası



Şekil 4.17 Deney düzeneğinde hava emiş motoru ve DC güç kaynağı

Fanın kontrolü bir DC güç kaynağı ile sağlanmış ve güç kaynağı üzerinde akım ve voltaj ayarlaması yapılarak üfleme havasının hızının istenilen şartlara getirilmesi sağlanmıştır.

Üfleç personelin kafasının olduğu konumda bulunan test düzeneğine havayı üflemek üzere zırhlı araçtaki ile aynı konuma yerleştirilmiştir. Üflecin karşısında da ölçümlerin alınacağı veri toplama düzeneği yerleştirilmiştir.



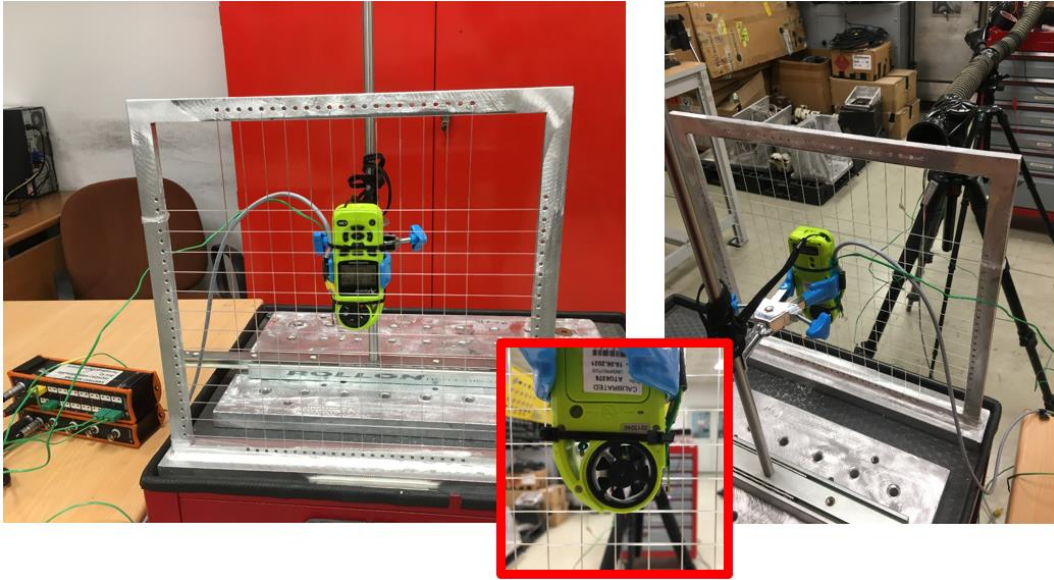
Şekil 4.18 Hava özellikleri ölçüm düzeneği

Üfleç çıkışına pitot tüpü ve termokupl yerleştirilerek üfleme havasının üfleç çıkışındaki hız ve sıcaklığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.19 Üfleç çıkışında pitot tüpü ve sıcaklık sensörü yerleşimi

CFD analizleri ile aynı noktalardan ölçüm almak için ise düzenekte raylı bir sistem kurulmuş ve üflenlen havanın test noktasına ulaştığındaki özelliklerini ölçmek için kullanılacak cihazın her bir ölçüm noktasındaki hassas hareketi bu raylı hareket sistemi ile sağlanmıştır.



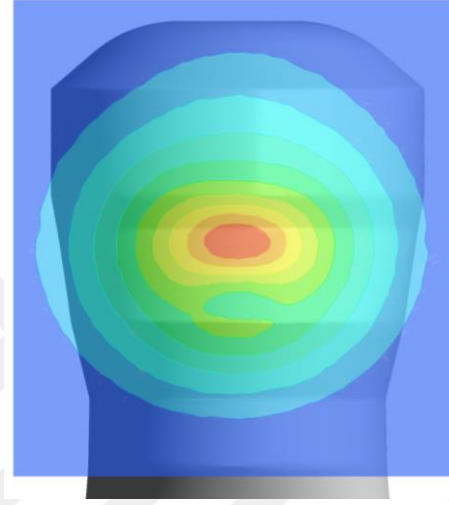
Şekil 4.20 Deney düzeneğinde anemometre yerleşimi ve ölçüm mekanizması

Kurulan deney düzeneği ile CFD analizlerinde kullanılan üfleme havası şartları oluşturularak 50cm üfleme mesafesine göre her bir ölçüm noktasından test bölgesine ulaşan havanın özellikleri ölçülmüştür.

Ölçüm noktalarındaki değerlerinin dağılımları deneysel ve CFD sonuçları ile mukayese edilmiştir.

CFD analizlerinde kullanılan üfleme havası şartları deney düzeneğinde de oluşturularak her bir ölçüm noktasından test bölgesine ulaşan havanın özellikleri ölçümlenmiştir.

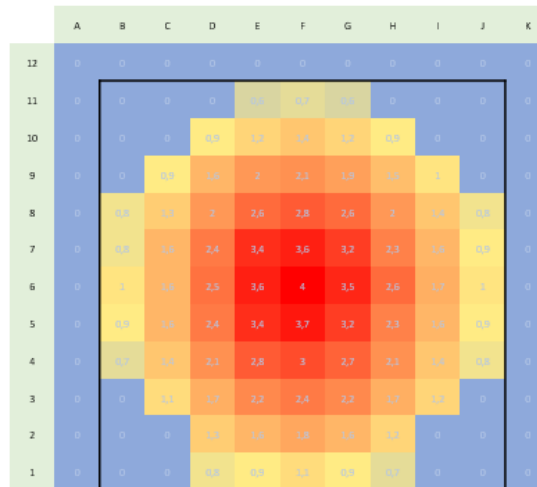
CFD analizlerine göre böyle bir ölçüm dağılımında elde edilen analiz çıktısına bir örnek Şekil 4.21 'de görülmektedir.



Şekil 4.21 CFD analizlerine göre personel kafası bölgesinde hava hızı dağılımı

Şekil 4.21 'de de görüleceği üzere akışın merkezinde görece daha yüksek hızlar olurken dairesel bir kesitte büyüyen çapta hız değerleri azalmaktadır.

Deneysel çalışmada her noktadan ölçülen değerler CFD analizindeki gibi renk kodları ile ifade edildiğinde ise bir örnek görsel Şekil 4.22 'de sunulmaktadır.



Şekil 4.22 Deneysel ölçümlere göre personel kafası bölgesinde hava hızı dağılımı

CFD analizi görseli ile deneysel ölçümlerin görseli incelendiğinde benzer sonuçlar vermektedir. Farklı üfleme havası hızlarına göre yapılan deneysel ölçümler ile CFD analizinden elde edilen değerler Tablo 4.5 'te sunulmaktadır. Sonuçlara bakıldığında deneysel ölçümler ile CFD analizi sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmekte ve CFD analizlerinin güvenilirliği anlaşılmaktadır.

Tablo 4.5 Deneysel ölçümler ile CFD analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Üfleme Havası Hızı (m/s)	Deneysel Olarak Ölçülen Ortalama Hız (m/s)	CFD Analizi ile Belirlenen Ortalama Hız (m/s)
4	0,8	0,9
5,1	1	1,1
7,7	1,5	1,6
10,3	2,3	2,1

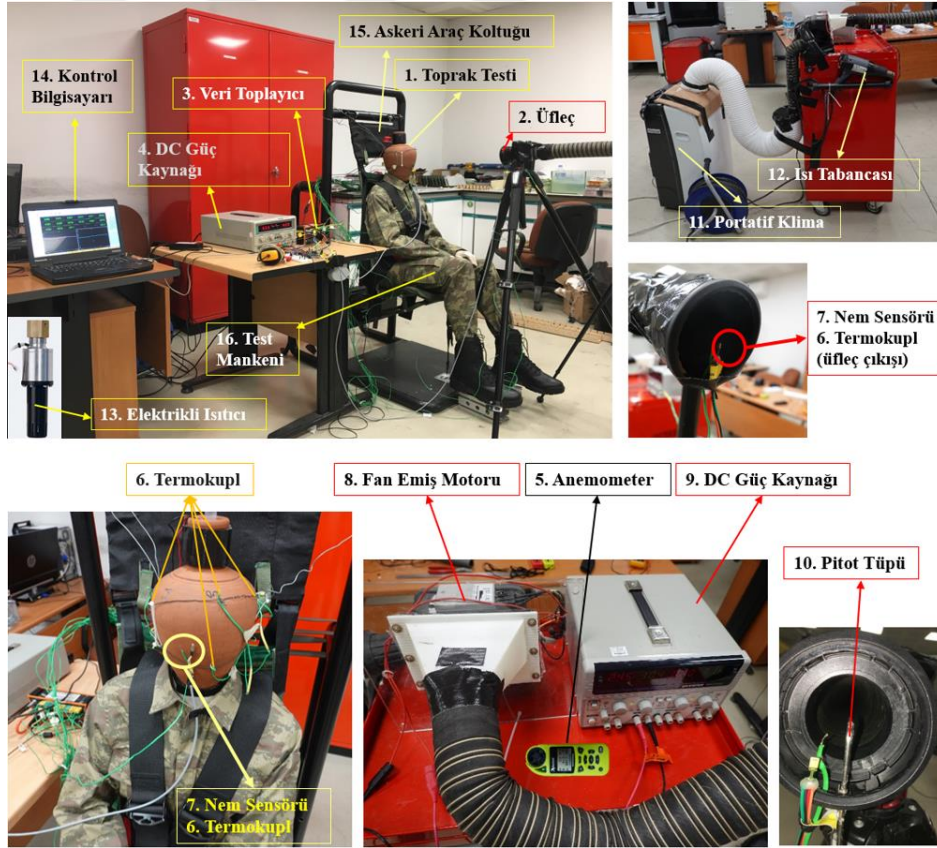
5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Deney Düzeneği

Bu tez çalışması kapsamında kurulan analitik model ile askeri zırhlı bir aracın içindeki askeri personelden noktasal soğutma tekniği kullanılarak farklı üfleme havası şartlarına ve farklı üfleç-personel arası mesafelere göre personelden uzaklaştırılacak toplam ısı transferi değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Kurulan analitik modelin deneysel olarak doğrulanabilmesi için zırhlı araç içerisindeki bir askeri personel üzerinde meydana gelen ısı transferinin benzeşiminin yapılabilmesi için Şekil 5.1 'de görülen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 5.1 Termal konfor deney düzeneği

Zırhlı askeri araç içi ortamı simule eden bir test odasında askeri araçtaki ile birebir aynı personel koltuğu üzerine bir manken konumlandırılmış ve mankene orijinal askeri üniforma giydirilmiştir. Mankenin kafası bir toprak testi ile değiştirilmiş ve toprak testi üzerine testi ortalama yüzey sıcaklığını ölçebilmek için termokupllar yerleştirilmiştir. Testi içine bir elektrikli ısıtıcı yerleştirilmiş ve ısıtıcının testi ortalama yüzey sıcaklığını personelin deri sıcaklığı ile aynı ($33\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) sıcaklıkta tutması sağlanmıştır.

Tüm veriler bir veri toplama sistemi ile kayıt altına alınmış ve veri akışı bir bilgisayar ile anlık olarak takip edilmiştir.

Aynı zamanda test odası ortam sıcaklığı ve nemi de kayıt altına alınarak test odasının araç içi ortam havası şartları ile aynı özelliklerde olması sağlanmıştır.

Üfleme sağlayan fan bir DC güç kaynağı ile kontrol edilmiş ve üfleme hızı deney şartlarına göre ayarlanabilir hale getirilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan cihazlara ait bilgiler Tablo 5.1 'de sunulmaktadır.

Tablo 5.1 Deney düzeneği ekipmanları

No	Ekipman	Marka	Model	Özellik / Hassasiyet
1	Toprak Testi	-	-	-
2	Üfleç	Webasto	Dairesel Üfleç	-
3	Veri Toplayıcı	Dewesoft	Krypton 16xTH	-
4	DC Güç Kaynağı	GWInstek	GPC-3060D	60V / 6A, 360W
5	Anemometre	Kestrel	5200	$\pm 1,04\%$
6	Termokupl	-	K type	$\pm 0.50\%$
7	Nem Sensörü	Sensirion	SHT85	± 1.5
8	Fan Emiş Motoru	Spal	009-B70-74D	0-560 m ³ /h
9	DC Güç Kaynağı	GWInstek	GPS-4303	60V / 3A, 180W
10	Pitot Tüpü	Magnesense	MS-311--Dwyer	$\pm 1\%$
11	Portatif Klima	Arçelik	12210 P	12000 Btu/h
12	Isı Tabancası	Steinel	HG 2310	2300W
13	Elektrikli Isıtıcı	Nomaccon	NPT-302	350W

Tablo 5.1 Deney düzeneği ekipmanları (devamı)

14	Kontrol Bilgisayarı	Panasonic	Thoughbook CF-54	-
15	Askeri araç koltuğu	-	-	-
16	Test Mankeni	-	Manken	-

Kurulan deney düzeneğinde insanın terleme mekanizmasının simüle edilmesi amaçlandı. Çünkü bu çalışmanın odağındaki senaryoda terleme kaynaklı evaporatif ısı transferinin toplam ısı transferi üzerinde ciddi bir yeri olmaktadır. Normalde bu tarz termal konfor deneylerinde özel geliştirilmiş termal mankenler kullanılabilmektedir. Bu termal mankenler bir insan vücudunu benzetebilecek şekilde terleme mekanizmasına sahip mankenlerdir. Ancak bu çalışma özelinde noktasal soğutma etkisinde kalan kısım personelin sadece kafası olacağı için bu çalışmanın deneysel doğrulama aşaması için farklı bir yöntem denenmiştir.

Denenen bu yöntemde insanın kafasının benzeşimi insan kafası ile benzer boyut ve şekildeki bir toprak testi ile sağlanmıştır. Sırlanmamış toprak testiler eski zamandan günümüze kadar özellikle sıcak bölgelerde bir soğutma teknolojisinin olmadığı zaman ya da durumlarda içerisine koyulan suyu ya da başka bir sıvıyı doğal bir şekilde serin tutmaya yarayan eşyalardır. Testiler gözenekli toprak yapısı sayesinde içerisine koyulan suyu emerek dış yüzeyinde nemli bir tabaka oluşturur. Bu tabaka da aynı terin insan derisinden buharlaşarak uzaklaşması gibi testi yüzeyinden buharlaşarak testiden buharlaşma gizli ısınısını çeker. Bu durumda da dolayısı ile testi içerisindeki sıvının soğumasını sağlamış olur. Gözenekli yapısı ile içindeki suyu ne fazla ne az geçirerek bu döngüyü devam ettirir.



Şekil 5.2 Toprak testi içerisinde su doldurulmadan öncesi ve sonrası

Deneysel çalışma için özel toprak testler imal ettirilmiş ve bu testler termal konfor testlerinde kullanılacak olan mankenin kafası ile yer değiştirilmiştir. Ancak öncelikle bu testlerin yeteri kadar terlemeyi benzetip benzetemediğinin doğrulanması gerekmiştir.

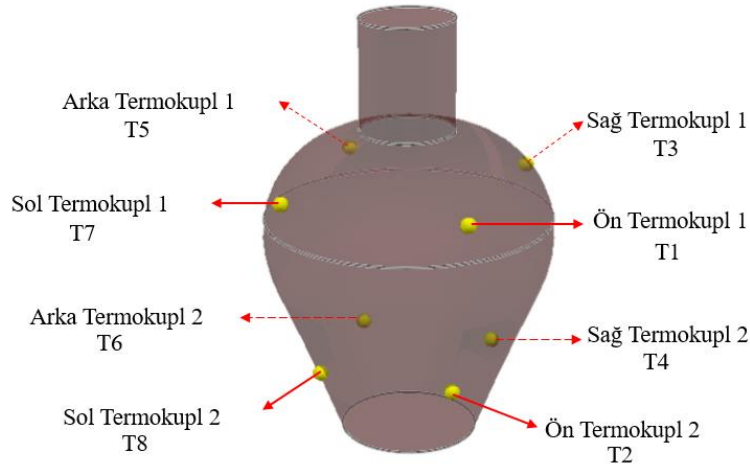
Bu doğrulamanın deneysel olarak yapılması için de deney düzeneğinde askeri personeli benzeştiren manken yerine önce özel olarak ürettirilen testi yerleştirilmiş ve deney düzeneği Şekil 5.3 'teki gibi hazırlanmıştır.



Şekil 5.3 Toprak testinin terleme benzeşimi deney düzeneği

Deneysel çalışmada aktif noktasal soğutma alanı personelin kafası üzerinde etkili olduğu için personelin kafasını ve özellikle de kafada oluşacak terlemeyi benzeştirmek için toprak testi kullanılmıştır. Ancak toprak testinin kullanımında önce testinin gözenekli su geçirgenliği yapısının insanın terleme hızının benzeşimini yapmaya yeterli olup olmadığının doğrulanması önemlidir. Bu sebeple araç iç ortam şartlarının benzeştirildiği test odası içerisinde üfleme havası şartlarının sağlanarak üzerine üflendiği toprak testi bir hassas terazi üzerine konumlandırılarak anlık olarak toprak testi içerisindeki su miktarındaki azalmanın kayıt altına alınması sağlanmıştır.

Toprak testi üzerinde 8 farklı noktadan toprak testinin yüzey sıcaklığını ölçmek amacı ile termokupllar eklenmiştir. Toprak testi içerisine ise bir adet elektrikli ısıtıcı koyularak testi içerisindeki suyun kontrollü bir şekilde ısıtılması sağlanmıştır. Tüm sensörlerden alınan veriler bir veri toplama sistemi ile anlık olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.4 Toprak testi üzerinde sıcaklık sensörleri yerleşimi

5.2 Deneylerin Yapılması

Butez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar aşağıda tanımlandığı şekilde sırası ile gerçekleştirilmiştir;

- CFD Analizlerinin deneysel olarak doğrulanması
- Personel kafasından gerçekleşen terlemeyi benzeştirmesi amacı ile kullanılan toprak testi ile terleme benzeşiminin deneysel olarak doğrulanması
- Hazırlanan analitik modelin deneysel olarak doğrulanması ve termal konfor testlerinin yapılması

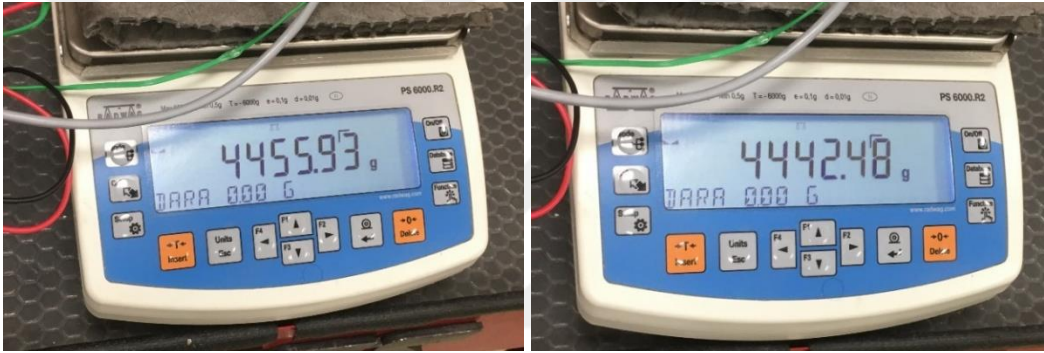
CFD analizlerinin deneysel olarak doğrulanması konusundaki deneysel çalışmalara 4.5 başlığı altında yer verilmiştir.

Toprak testi ile personel kafasından olan terlemenin benzeştirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışmada toprak testi içerisindeki bir ısıtıcı ile su ısıtılır ve testi dış yüzeyindeki ortalama sıcaklığın 33 °C 'ye gelmesi sağlanır. Testi üzerine şartlandırılmış hava üflenmeye başladığında ise testi yüzey sıcaklığında yüzeydeki suyun buharlaşması ile bir düşüş olacağından bu düşüşü dengelemek için elektrikli ısıtıcı tekrar ısıtma yaparak testinin yüzey sıcaklığının 33 °C'de sabit kalmasını sağlar. Testi yüzey sıcaklığı 33 °C'de dengede kaldığında aslında testi üzerinden uzaklaştırılan toplam ısı transferi değerinin ısıtıcının verdiği toplam enerjiye eşit olacağından dolayı hassas terazi ile toprak testiden eksilen su miktarı kayıt altına

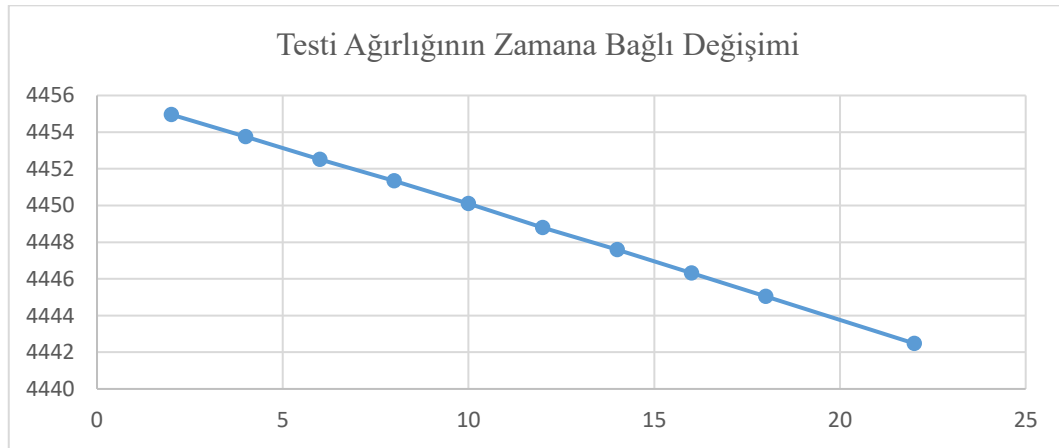
alınır ve analitik modele göre hesaplanan “buharlaşma kütlesi” ile kayıt altına alınan toplam azalmanın eşit olması kontrol edilir.

Deneysel çalışmalar sonucunda bu değerler karşılaştırıldığında 22 dakikalık test süresi sonrasında bu tez çalışması kapsamında hazırlanan analitik modele göre hesaplanan toplam ısı transferi değeri 32,44 Watt olurken, ısıtıcının dengeyi sağlamak için verdiği gücün de 33,61 Watt olduğu tespit edilmiştir. Burada %3,6 ‘lık bir sapma ile analitik model deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Diğer bir yandan da testi içerisindeki su miktarının azalması incelendiğinde 22 dakikalık test süresince testiden 0,010 g/s ‘lık bir azalma olurken analitik modele göre hesaplanan buharlaşma kütlesi 0,011 g/s ‘dir. 22 dakika sonunda sadece 2,08 g ‘lık bir sapma ile analitik model ile deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir.



Şekil 5.5 Hassas terazi ile testi ağırlığının ölçümü



Şekil 5.6 Testi ağırlığının zamana bağlı değişimi grafiği

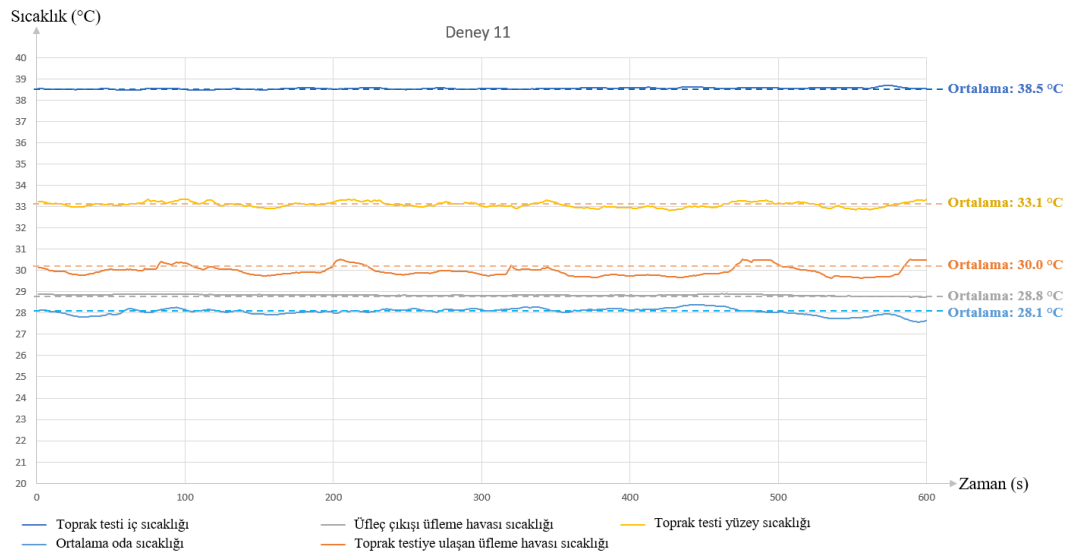
Hem CFD analizlerinin hem de testinin terleme mekanizmasını benzeştirebilmesinin deneysel olarak doğrulanmasından sonra artık sıra analitik modelin doğrulanmasına gelmiştir. Hazırlanan analitik model askeri bir zırhlı araç içerisindeki askeri personelin kafasına doğru direkt olarak üflenene noktasal

soğutma havası ile personel üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferi değerini farklı üfleme havası şartlarına ve farklı personel-üfleç arası mesafeye göre hesaplayabilen bir modeldir. Tabi bu senaryoda ısı transferinin büyük ve aktif bölümü personelin kafası üzerinde gerçekleşecektir. Bu sebeple de bu çalışma kapsamında personel kafasında gerçekleşecek olan toplam ısı transferi değerinin analitik model ile hesaplanmış değerlerinin deneysel olarak doğrulanması ihtiyacı doğmuştur.

Testlere başlamadan önce test odası askeri zırhlı araç ile aynı ortam şartlarına getirilmiş ve oda yüzeylerinin de aynı şartlara gelmesi için uzunca bir süre beklenmiştir. Test odası içi zırhlı araç ile aynı şartlara geldiğinde toprak testi içerisindeki ısıtıcı çalıştırılarak testi ortalama yüzey sıcaklığının $33\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye gelmesi sağlanmıştır. Sonra üfleme havası şartları portatif soğutucu ve elektrikli ısı tabancası kullanılarak ilgili test şartına getirilmiş ve manken üzerine hava üfleme başlatılmıştır. Üflemenin başlaması ile testi yüzeyinde olan sıcaklık düşüşü, testi içindeki ısıtıcı ile tekrar olması gerektiği yere getirilip dengeye ulaştığında ilgili test için veri kaydı başlatılmıştır.

Yaklaşık 10 dakika boyunca her test şartı için ortalama testi yüzey sıcaklığı, üfleç çıkışındaki üfleme havası sıcaklığı, testiye ulaşan havanın sıcaklığı, testi içerisindeki su sıcaklığı, test odası ortalama sıcaklığı kayıt altına alınmıştır.

Örnek bir veri kaydı grafiği Şekil 5.7 'de sunulmaktadır.



Şekil 5.7 Termal konfor deneyleri ölçümleri

Deney süresi sonunda ısıtıcının testi yüzey sıcaklığını sabit tutmak için harcadığı enerjinin testiden uzaklaştırılan toplam ısı transferi değerine eşit olması

gerekecektir. Paralelde de bu veriler hazırlanan analitik modele girilerek analitik olarak gerçekleşmesi gereken toplam ısı transferi değeri hesaplanmıştır.

Bu deneyler 13 farklı test şartı için tekrarlanmış ve analitik olarak hesaplanan toplam ısı transferi değerleri ile deneysel olarak ölçümlenen toplam ısı transferi değerleri karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneylere ait test şartları aşağıdaki Tablo 5.2 'de sunulmuştur.

Tablo 5.2 Deney şartları

Deney No	$T_{üfleme}$ (°C)	$V_{üfleme}$ (m/s)	$RH_{üfleme}$ (%)	$T_{ort,yüzey}$ (°C)
1	31,1	5,1	25,3	33,3
2	19,5	3,3	36,6	33,1
3	34,4	5,4	21,3	33,5
4	25,2	4,0	28,6	33,3
5	14,4	2,2	43,7	33,3
6	31,4	7,5	24,6	33,5
7	35,7	10,0	22,6	33,4
8	34,9	10,3	22,4	33,1
9	34,8	10,3	22,8	33,5
10	31,1	6,0	23,8	33,0
11	28,8	1,0	24,4	33,1
12	30,2	1,0	23,2	33,2
13	29,4	3,0	23,0	33,9

Testler sonucunda elde ölçülen değerler ile analitik olarak hesaplanan değerler ise Tablo 5.3 'teki şekildedir.

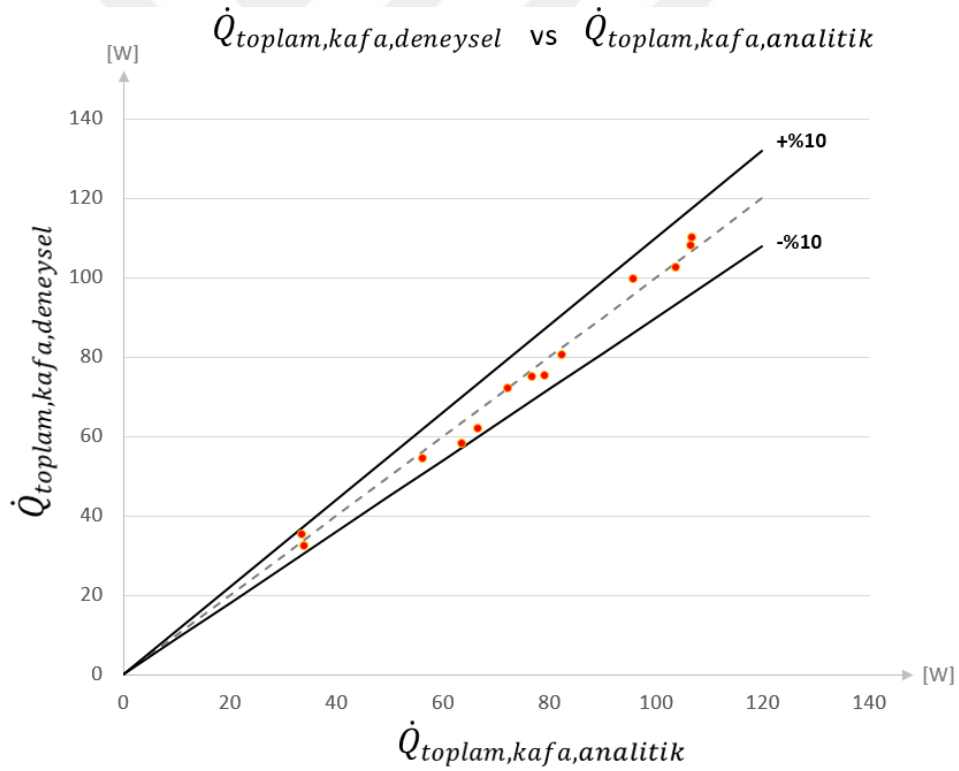
Tablo 5.3 Analitik değerler ile ölçümlenen değerler ve hata oranı

Deney No	$\dot{Q}_{evap}$	$\dot{Q}_{rad}$	$\dot{Q}_{taş}$	$\dot{Q}_{top,kafa,analitik}$	$\dot{Q}_{top,kafa,deneysel}$	Yanılısma
1	90.1%	3.5%	6.4%	76.8 W	75.0 W	2,40%
2	84.8%	3.9%	11.3%	66.6 W	63.8 W	4,39%
3	91.9%	3.6%	4.5%	79.1 W	77.8 W	1,67%
4	87.0%	3.7%	9.2%	72.2 W	72.0 W	0,28%
5	82.4%	4.8%	12.8%	56.2 W	54.4 W	3,31%

Tablo 5.3 Analitik değerler ile ölçümlenen değerler ve hata oranı (devamı)

6	91,1%	3,0%	5,9%	95,8 W	98,4 W	-2,64%
7	93,4%	2,6%	4,1%	1068 W	110,2 W	-3,09%
8	95,1%	2,5%	2,5%	103,7 W	102,4 W	1,27%
9	94,4%	2,7%	3,0%	106,6 W	107,9 W	-1,20%
10	91,7%	3,1%	5,2%	82,4 W	80,4 W	2,49%
11	86,7%	7,7%	5,6%	35,0 W	35,2 W	-0,57%
12	86,5%	7,8%	5,6%	34,0 W	32,3 W	5,26%
13	88,0%	4%	7,1%	63,6 W	61,0 W	4,26%

Sonuçlardan da görüldüğü üzere deneylerde yaklaşık $\pm \%5$ 'lık bir yanılsama ile deneysel çalışma sonuçları ile analitik hesaplama ile elde edilen sonuçlar örtüşmektedir.



Şekil 5.8 Analitik model ile belirlenen toplam ısı transferi değeri ile deneysel olarak gerçekleşen toplam ısı transferi değerlerinin arasındaki hata oranı dağılımı

Bu deneyler sonucunda bu tez çalışması kapsamında, bir askeri zırhlı araç içerisindeki askeri personelden noktasal soğutma tekniği kullanılarak

uzaklaştırılabilir toplam ısı transferi değerinin hesaplanmasını sağlayan analitik modelin yüksek bir doğruluk oranı ile çalıştığı tespit edilmiştir ve analitik model kullanılarak farklı üfleme havası koşullarında personelden uzaklaştırılabilir toplam ısı transferi miktarı hesaplanabilmektedir. Bu sayede de geniş bir üfleme havası özellikleri yelpazesine göre askeri personelden uzaklaştırılacak toplam ısı transferi sonuçları elde edilebilecektir.

Bu analitik model kullanılarak daha önce CFD analizleri çalışmalarında da kullanılan ve Tablo 5.4 'te görülen farklı giriş havası özelliklerine göre analitik model ile çözümleme yapılmıştır.

Bu farklı giriş havası değerlerinin her biri ile olan kombinasyonları da çözümlenerek toplamda 5670 farklı üfleme havası şartı için toplam ısı transferi miktarı değerleri belirlenmiştir.

Tablo 5.4 Analitik model ile çözümleme yapılan farklı hava özellikleri ve üfleme mesafesi değerleri

Personel – Üfleç arası mesafe	Üfleç çıkışı üfleme havası sıcaklığı	Üfleç çıkışı üfleme havası hızı	Üfleç çıkışı üfleme havası bağlı nemi
25cm	20 °C	1 m/s	%10
50cm	21 °C	2 m/s	%20
75cm	22 °C	3 m/s	%30
	23 °C	4 m/s	%40
	24 °C	5 m/s	%50
	25 °C	6 m/s	%60
	26 °C	7 m/s	%70
	27 °C	8 m/s	%80
	28 °C	9 m/s	%90
	29 °C	10 m/s	
	30 °C		
	31 °C		
	32 °C		
	33 °C		
	34 °C		
	35 °C		
	36 °C		

Tablo 5.4 Çözümleme yapılan farklı hava özellikleri ve üfleme mesafesi değerleri
(devamı)

	37 °C		
	38 °C		
	39 °C		
	40 °C		

Belirlenen bu 5670 farklı ısı transferi değeri arasından ise personelden uzaklaştırılması “gerekli” ısı transferi miktarına göre bir filtreleme yapılması gerekmektedir. Bunun için de bu “gerekli” ısı transferi miktarının belirlenmesi için aslında askeri araç içerisindeki personelin üreteceği ısı miktarı hakkında bir kabul yapmak gerekecektir.

Bu kabulü yaparken de ASHRAE El kitabından [24] faydalanılmıştır. ASHRAE ‘de bazı farklı aktiviteler için bir insanın vücut yüzey alanı m^2 ‘si başına üreteceği metabolik ısı değerleri verilmektedir (Tablo 5.5 [3,4]). Bu değerler arasında normal bir araba kullanımı için 60 ila 115 W/m^2 değeri; bir ağır vasıta taşıt kullanımı için 185 W/m^2 değeri verilmektedir. Askeri zırhlı araç içindeki personel için bir değerlendirme yapıldığında ise personelin aracı sürmeyeceği ancak araç içerisinde bir takım askeri görevleri yerine getirmek için bakım, planlama, sistem kurulumu, silah hazırlığı vb. aktiviteleri yerine getireceği ve bu aktiviteleri içerisinde yaptığı aracın fiziksel şartları düşünüldüğünde personelin üreteceği metabolik enerjinin normal bir araç kullanma ile ağır vasıta bir araç kullanma değerleri arasında olacağı varsayılmıştır. Buna göre de askeri personelden uzaklaştırılması gereken ısı transferi miktarının 270W ($150 W/m^2 \times 1,8 m^2$) olması “gerekli” olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 5.5 Farklı aktiviteler için genel ısı üretimleri

Aktivite	W/m^2	met
Sürüş / Uçuş		
Araba	60 - 115	1,0 – 2,0
Uçak, Rutin	70	1,2

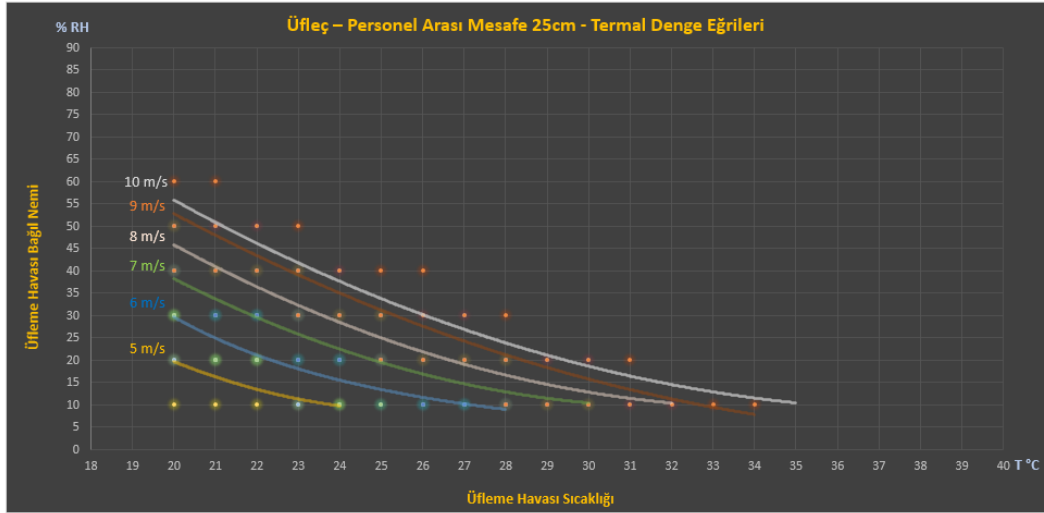
Tablo 5.5 Farklı aktiviteler için genel ısı üretimleri (devamı)

Uçak, Aletli İniş	105	1,4
Uçak, Savaş	140	1,7
Ağır Araç	185	2,1

Hesaplanan 5670 farklı toplam ısı transferi değeri arasında kabul edilen bu 270W ve yakını değerlerin elde edildiği şartlar filtrelenmiş ve termal konfor eğrilerinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen termal konfor eğrileri askeri bir zırhlı araç için iklimlendirme sistemi tasarlayacak mühendislere yol göstermesi amacı ile hazırlanmıştır. Şöyle ki, üfleme havası sıcaklığının farklı özelliklerine ve farklı üfleç ile personel arasındaki mesafe değerlerine göre noktasal soğutma tekniği ile üflenen iklimlendirme havasının personel üzerinden uzaklaştırdığı toplam ısı miktarı değeri değişmektedir. Bu tez çalışması kapsamında ele alınan kullanım senaryosu için araç motoru çalışmadığı durumunda aracın iklimlendirme sistemi aktif bir “soğutma” yapamayacağından personelden gerekli ısı miktarını uzaklaştırabilecek üfleme şartlarının geniş bir yelpazede belirlenmesi ve bu şartlara göre alternatif çözümler bulunmasıdır.

Bu anlamda üfleç ile personel arasındaki 3 farklı mesafeye göre 3 farklı termal konfor eğrileri grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerde farklı üfleme havası hızlarında, hangi üfleme havası bağıl nemi ve üfleme havası sıcaklığı değerleri eşleşmeleri ile 270W ısı transferi miktarının personelden uzaklaştırıldığı gösterilmiştir. Oluşturulan grafiklere bir örnek Şekil 5.9 ‘da görülmektedir.



Şekil 5.9 Termal Denge Eğrisi Örneği

5.3 Regresyon Analizi

Termal denge eğrileri aslında 4 farklı ana değişken üzerine kurgulanmıştır. Bu değişkenlerin her biri ayrı ayrı da toplam ısı transferi değerinde etkili olurken, birbirleri ile olan farklı kombinasyonları da yine önemli etkiler yapabilmektedir. Bu sebeple de bu konuda yapılacak çalışmalara ışık tutması amacı ile bu değişkenlere dair bu çalışma kapsamında bir regresyon analizi yapılmıştır.

Bu çalışmada çözümlenen 5670 şart ve sonuçları incelendiğinde, dört değişkenin (sıcaklık, bağıl nem, hız ve mesafe) ısı transferini tahmin etme yeteneğini değerlendirmek için çoklu regresyon kullanılmıştır. Normallik, doğrusallık, çoklu bağlantılılık ve eş varyans varsayımlarının ihlal edilmediğinden emin olmak için ön analizler yapılmıştır. Sıcaklık, bağıl nem, hız ve mesafe değişkenlerinin birlikte ısı transferi ile yüksek ve anlamlı bir ilişki gösterdiği bulunmuştur.

Tablo 5.6 Regresyon analizi sonuçları

DEĞİŞKEN	B	STANDART HATA	β	P	KİSMİ KORELASYON
SABİT	391,92	1,18	-	0,00	-
SICAKLIK	-3,58	0,03	-0,53	0,00	-0,84

Tablo 5.6 Regresyon analizi sonuçları (devamı)

BAĞIL NEM	-100,2	0,73	-0,64	0,00	-0,88
HIZ	6,84	0,06	0,49	0,00	0,82
MESAFE	-0,46	0,01	-0,23	0,00	-0,57
R= .94	R2 = .88				
F(4,5422) =104084.72	p=.00				

(R=.94, R2 = .88, p<.01)

Burada tüm değişkenler personelden gerçekleşen toplam ısı transferindeki varyansın %88'ini açıklamaktadır. Bu yüksek oran aslında bu 4 ana parametrenin askeri araç içerisindeki personel üzerinde gerçekleşen ısı transferini tanımlamakta yeterli olduğunu göstermektedir.

Regresyon analizi sonuçlarına göre toplam ısı transferinin tahmini için elde edilen regresyon denklemi (matematiksel model) aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{toplam}} = 391,92 + (-3,58) \text{ Sıcaklık} + (-100,92) \text{ Bağıl Nem} + \\ (6,84) \text{ Hava Hızı} + (-0,46) \text{ Üfleç Personel Arası Mesafe} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Bu regresyon denkleminde de görüldüğü üzere toplam ısı transferi üzerinde en etkili parametre bağıl nemdir. Bağıl nem değerinde oluşacak bir birimlik değişimin toplam ısı transferi değeri üzerinde 100,92 birimlik bir etkisi olacağı görülmektedir. Bu sebeple de termal denge eğrisi grafikleri oluşturulduktan sonra çalışmanın devam eden bölümlerinde bağıl nem kontrolü üzerine odaklanılmış ve bu amaçla silika jel malzemesinin aktif nem alıcı olarak kullanımına dair çalışmalar yapılmıştır.

5.4 Silika Jel Deneyleri

Nem, günlük hayatta farklı ihtiyaçlar dâhilinde bazen istenmeyen bazen ise istenen bir parametre olarak karşımıza çıkar. Nemin ya da nemliliğin değerlendirilmesinde

ise iklimlendirme sistemlerinde bağıl nem kavramını kullanırız. Bağıl nem ise basitçe bir hava kütlelerinin içerisinde barındırdığı su buharı miktarının, bu hava kütlelerinin o şartlarda maksimum olarak içerisinde barındırabileceği maksimum su buharına oranı olarak tanımlanır. Bu değer de bir oran olduğu için % cinsinden ifade edilir ve aslında çok basitçe havanın su buharına doygunluğunun yüzdesel değeri olarak da tanımlanabilir.

Tabi bu değer incelenen ya da ele alınan hava kütlelerinin termo-fiziksel özelliklerine göre değişkenlik gösterir. Çünkü havanın farklı sıcaklık değerlerinde tutabileceği maksimum su buharı değerleri de değişkenlik gösterir. Dolayısı ile maksimum değer değiştiğinde mutlak anlık değer bu maksimum değere oranı da değişkenlik gösterir.

İklimlendirme ya da konfor çalışmalarında ise havanın bağıl neminin belirli sınırlar dâhilinde olması beklenir. Örneğin bir ev ya da ofis ortamı ele alındığında konforlu bir ortam için o ortamdaki havanın bağıl neminin genelde %50 civarında olması beklenir. Ortam havasının bağıl neminin çok düşük olması insan “kuruluk” hissini tetiklemesi yüksek olması ise “bunalma” hissini tetiklenmesine sebep olur. Tabi değerlendirilmeye alınan ortam ev değil de örneğin bir metal ya da metalik bileşenli bir malzeme deposu olarak düşünüldüğünde ise ortam havası bağıl neminin düşük bir değerde olması beklenir. Çünkü nem aslında su buharıdır dolayısı ile gaz fazındaki su anlamına gelir. Su ise bazı metaller ve elektronik cihazlar üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Ya da benzer şekilde değerlendirmeye alınan ortamın bir tekstil ya da gıda deposu olduğunu düşündüğümüzde yine arzu edilen ortamın düşük bağıl neme sahip bir ortam olması beklenebilir. Çünkü nem olarak adlandırdığımız su aslında farklı bakteri ve mikroorganizma oluşumlarını destekleyici bir faktöre de dönüşebilir.

İşte bu ve benzeri ihtiyaçlar sebebi ile birçok farklı alanda ortam bağıl neminin düşürülmesi ya da yükselmesinin engellenmesi adına farklı “nem alma” çözümleri geliştirilmiştir. Bu geliştirilen çözümlerden en yaygın olarak kullanılanlardan birisi ise “silika jel” adı verilen kimyasal malzemedir. Silika jeller genellikle boncuk/granül yapıda bulunan sert parçacıklı bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin genel kullanım alanı ise kapalı bir ortamdaki nemin kontrol altında tutulması ya da düşürülmesi şeklindedir. Bu malzeme yapısı gereği temas

ettiği ortam havası içerisindeki su buharı moleküllerinin kendi üzerinde tutup hapsedmektedir.

Ancak tabii bu su buharı moleküllerini yakalayıp kendi bünyesinde hapsedme özelliğinin belirli bir sınırı vardır. Bu malzeme o sınıra gelene kadar ortamdaki su buharı miktarını kendi üzerine alır, sınıra ulaştığında yani “doygunluğa eriştiğinde” ise bu özelliğini yerine getiremez olur. Daha sonra eğer bu malzeme belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılırsa bu sefer tuttuğu su moleküllerini bırakır ve tekrar soğuduğunda tekrar su buharı tutma özelliğini kazanır. Bu anlamda da bu malzemeler için ömürsüz bir malzemedir yaklaşımı yapılabilir.

Silika jel malzemesi birçok farklı alanda aslında “pasif” bir nem alıcı olarak kullanılmaktadır. Örneğin ilaç şişesinin içerisine belirli miktarda bulunan silika jel ilaç şişesi içerisindeki havada bağıl nemin zaman içerisinde artmasını engeller. Ya da başka bir örnekte örneğin deniz aşırı bir taşımacılık düşünelim. Deniz ortamı çok nemli olduğu için taşımacılıkta kullanılan konteynerler içerisindeki ürünlerin bu nemden olumsuz etkilenmeleri istenmez. Bu sebeple konteynerler içerisinde bulunan belirli miktarda silika jeller yolculuk sırasında konteyner içerisindeki nemin zararlı bir seviyeye erişmesini engellerler. Aslında bu örneklerden de anlaşılacağı üzere silika jel aslında bir pasif nem tutucu olarak zamana yayılı bir performans gösterir.

Bu tez çalışmasında ise silika jelin askeri zırhlı kara araçlarının iklimlendirme sistemlerinde “aktif” bir nem tutucu olarak kullanılıp kullanılamayacağı üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Çünkü genellikle iklimlendirme sistemlerinde kullanılan “nem alma” tekniği bir soğutma tekniği vasıtası ile havanın çığ sıcaklığı değerinin altına kadar soğutulması ve içerisindeki nemin yoğunlaşarak havadan uzaklaştırılması şeklindedir. Eğer istenen hedef hava sıcaklığı bu çığ sıcaklığından daha yüksek bir değer ise hava tekrar ısıtılabilir.

Sunulan bu tez çalışması kapsamında ele alınan kullanım senaryosunda araç motorunun çalışmaması planlanmaktadır. Dolayısı ile havadaki nemi ortamdaki bir soğutma prosesi ile uzaklaştırmak mümkün olmayacaktır. Ancak eğer havadaki nemi bu soğutma prosesi olmadan uzaklaştırmanın bir yolu olursa o zaman bu çalışma konusunda odaklanılan ihtiyaç için alternatif bir sistem tasarımı mümkün

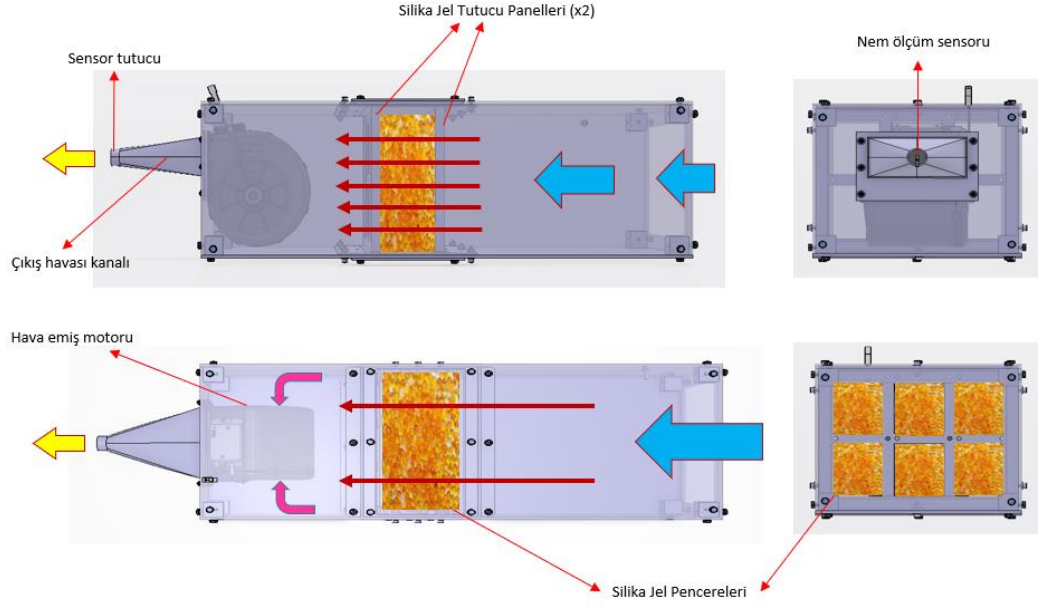
olabilecektir. Bu anlamda bu çalışmada silika jel malzemesinin askeri zıhlı kara araçlarında “pasif” olarak değil de “aktif” bir nem alıcı olarak kullanılıp kullanılmayacağı deneysel olarak çalışılmıştır.

Aktif nem alma ile kastedilen ise bir hava akışı üzerinde havadaki nemin anlık olarak tutulup havadan uzaklaştırmasıdır.

Bu çalışma kapsamında öncelikle silika jellerin “aktif” bir nem alıcı olarak kullanılmasının mümkün olup olmayacağına dair öncelikle ön deneysel çalışma yapılmıştır.

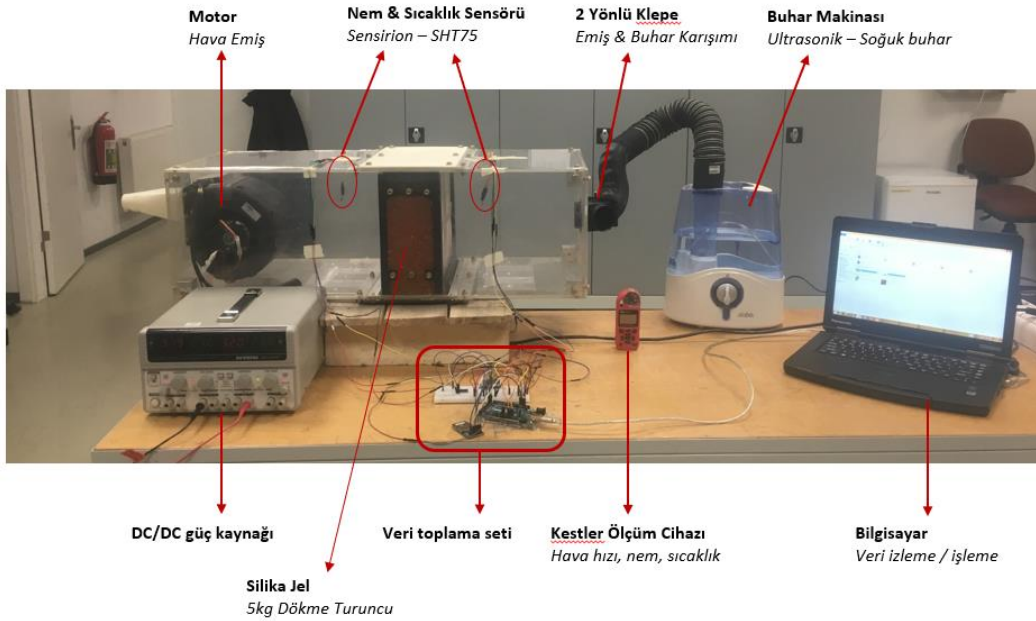
Silika jel partikülleri temas ettiği hava içerisindeki su buharı moleküllerini yakalama ve tutma kabiliyetine sahiptir. Ancak ticari olarak genel anlamda 3-5mm çapta boncuk şeklinde üretilen bir silika jel taneciğinin üzerinden hızlandırılmış olarak geçen bir hava akışı düşünüldüğünde bu boyutta bir silika jel tanesine havanın temas etme süresi her bir tanecik için milisaniyeler mertebesinde olacaktır. Çok miktardaki silika jel boncuklarını bir araya getirip bir hava filtresi gibi bir yapı dahi kurulsa yine de bu silika jel kütlesinin içerisinde havanın geçmesi milisaniyeler mertebesinde olacaktır. Bu sebeple bu çok kısa süre içerisinde silika jel taneciklerinin ne kadar hızlı “nem tutma” özelliği gösterebileceğini anlamak için bir deney düzeneği hazırlanmıştır.

Kurgulanan deney düzeneğine ait şematik resim Şekil 5.10 ‘da sunulmaktadır. Bir hava kanalı oluşturularak bu kanalda hava akış yönüne dik bir kesitte silika jel bloğu oluşturulması planlanmıştır. Sonra kanalın çıkış tarafına bir hava emiş motoru koyulması ve bu motor sayesinde kanalın diğer tarafından nemli havanın silika jel bloğunun içerisinde geçecek şekilde emilmesi planlanmıştır. Kanalın hem giriş hem de çıkış bölgelerinde ise havadaki sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin değişimini gözlemlemek üzere nem/sıcaklık sensörleri yerleştirilmiştir.



Şekil 5.10 Silika jel ile aktif nem alma ön deney düzeneği şematığı

Şekil 5.10 'da tasarlanan deney düzeneği Şekil 5.11 'de gösterildiği gibi kurulmuştur.



Şekil 5.11 Silika jel ile aktif nem alma ön deney düzeneği

Sistemden veri toplamak için bir arduino veri toplama sistemi tasarlanmış ve hazırlanmıştır. Bir bilgisayar ile toplanan veriler anlık olarak kayıt altına alınmıştır. Havanın çıkış bölgesindeki hızı ise anemometre cihazı ile ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Hava emiş motoru ise bir DC güç kaynağı ile kontrol edilerek sürülmüştür.

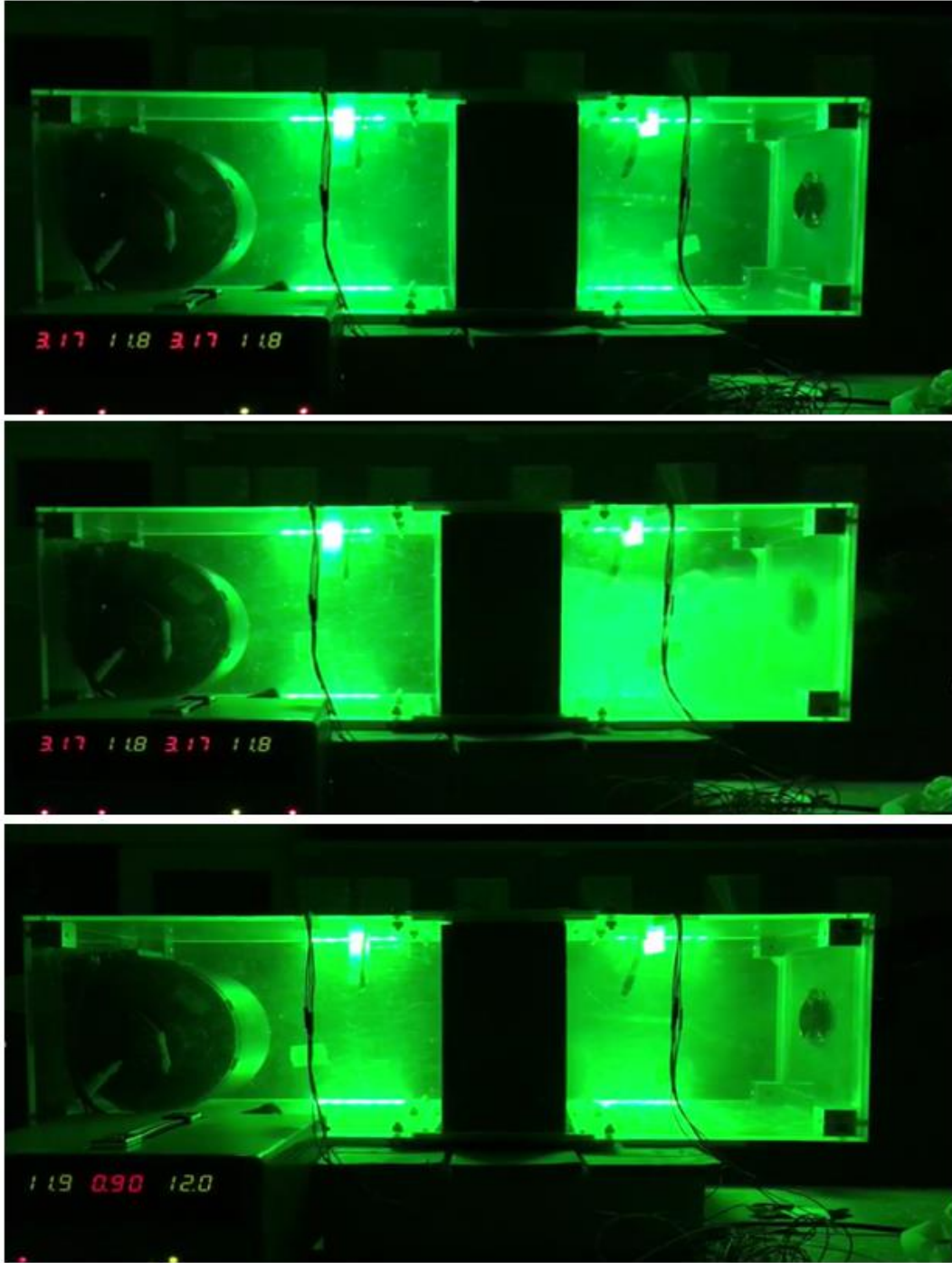
Deneyler sırasında dökme turuncu silika jeller kullanılmıştır. Bu silika jel malzemesinin özelliği ise henüz üzerinde hiç nem tutmamışken renginin turuncu olması ancak hava ile temas ederek havadan nem tutmaya başladığında yavaş yavaş renginin turuncudan yeşile dönmesi ve doygunluğa ulaştığında da renginin koyu yeşile dönmesidir. Yani aslında kullanılan silika jeller içerisinde doygunluğunu gösteren bir renk indikatörüne sahiptir.

Silika jellerin öncesinde yoğun bir nem kütlesi oluşturabilmek amacı ile de bir soğuk buhar makinası ile kanalın giriş bölgesine su buharı beslemesi yapılmıştır. Besleme hattı üzerindeki iki yönlü klape ile de aynı zamanda ortamdan hava emişi de yapılması sağlanmıştır.

Deneyler esnasında silika jel bloğun önündeki ve ardındaki bölgede nem değişiminin de gözle görülebilir olması için deney düzeneği yeşil ışık ile donatılmış ve deney sırasında test odası karanlık hale getirilip havadaki nem değişiminin gözlemlenebilmesi sağlanmıştır.

Deneyler yapılırken önce hava kanalında silika jelin giriş bölgesine su buharı beslemesi yapılarak o bölmenin yüksek nemli bir ortam olması sağlanmıştır. Sonra hava emiş motoru çalıştırılarak silika jel içerisinden yoğun su buharı-hava karışımının geçmesi sağlanmış ve silika jel çıkışındaki bölgede havanın bağıl nemi ölçülmüştür. Deneylerde kayıt edilen bu değişimi anlatan görseller ise aşağıda Şekil 5.12 'de sunulmaktadır.

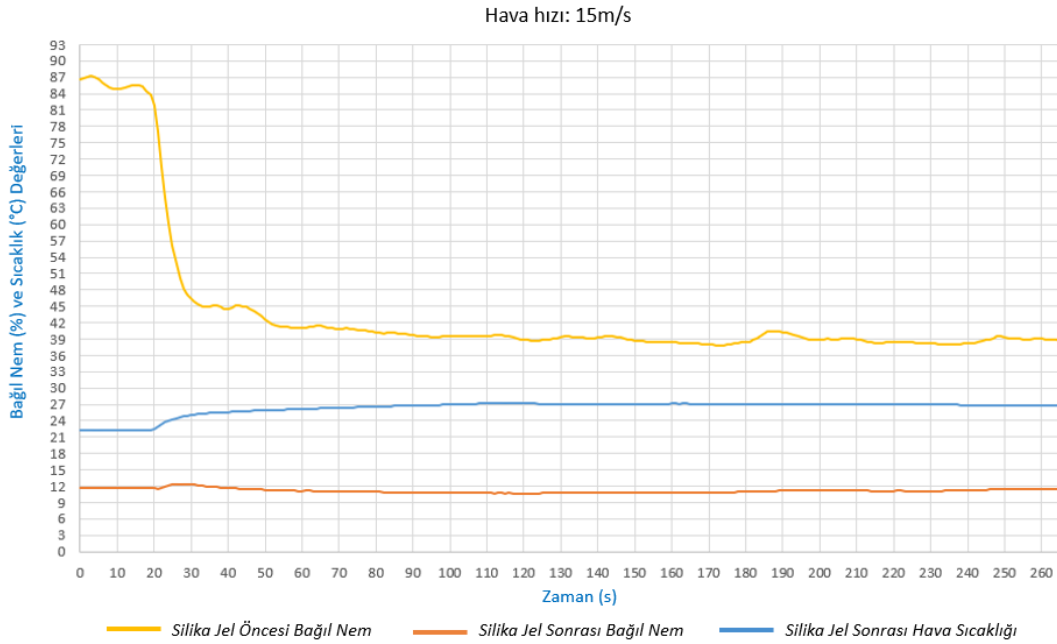
Görsellerden de görüleceği üzere silika jel giriş bölgesinde (sağ taraf) önce çıkış bölgesindeki ile benzer hava özelliği bulunmaktadır. Daha sonra o bölgeye soğuk buhar beslemesi yapılarak içeride yoğun bir sis oluşumu sağlanmıştır. Motor çalıştırılıp havanın silika jel üzerinden geçişi sağlandığında sağ taraftaki yoğun sisin kaybolurken sol tarafta herhangi bir nem/sis oluşumu olmadığı çıplak gözle bile görülmüştür. Sağ tarafta biriken sisin zamanla kaybolmasının sebebi ise soğuk su buharı beslemesi yapan cihazın buhar üretme kapasitesinin silika jel üzerinden geçirilen havaya oranla daha düşük kalmasıdır. Ancak bu kapasite yüksek olsaydı da silika jel çıkışındaki hava özelliği yine aynı olacaktı. Bu da toplanan veriler ile görülmektedir.



Şekil 5.12 Silika jel ile aktif nem alma denemesi

.Silika jel giriş bölgesine yapılan su buharı (sis) beslemesi ile o bölgede %85 mertebesine getirilen bağıl nem miktarı silika jel üzerinden havanın geçişi ile hızlıca % 40 mertebesine düşmüş ve orada su buharı beslemesi ile ortam havasından yapılan hava girişi bir dengeye ulaşmıştır. Ancak burada önemli olan silika jel öncesinde havanın bağıl nemi %85 mertebesinde iken de %40 mertebesinde iken de silika jel çıkışında bu değer çok yavaş bir artış trendine rağmen %12

mertebesinde olmaktadır. Buradan da silika jellerin nem tutma performansının giriş koşulundaki nem miktarından bağımsız hep aynı maksimum performansta olduğu görülmüştür (Şekil 5.13).

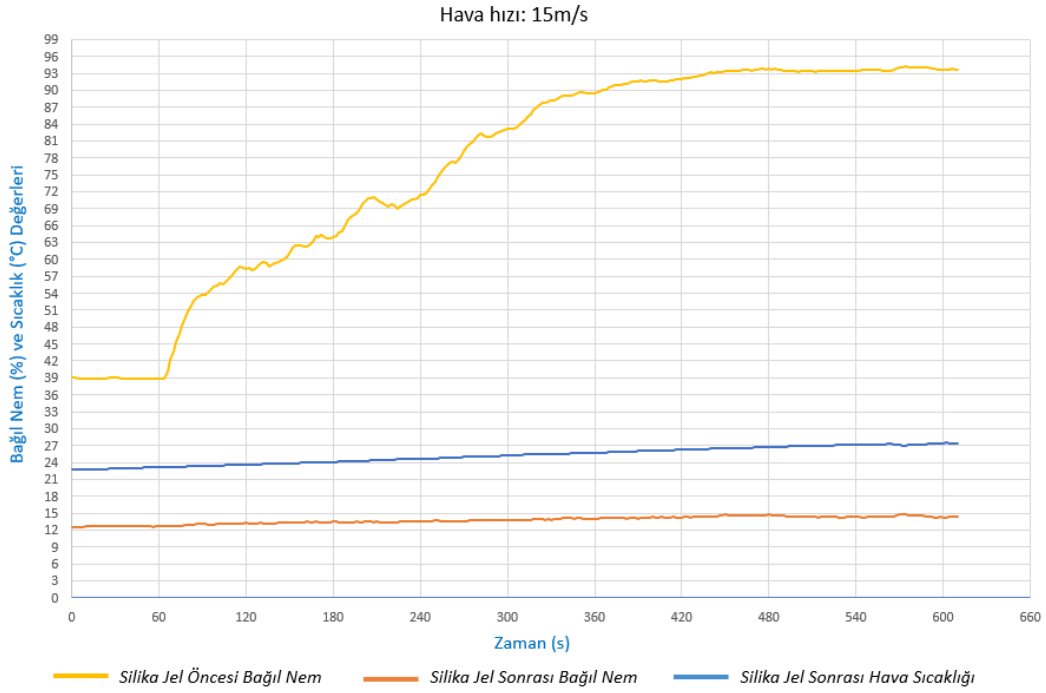


Şekil 5.13 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sıcaklık ve bağıl nem değişimleri

Ancak burada önemi olabilecek bir değişim ise silika jelden geçen havanın sıcaklığındaki bir miktar artıştır. Teste başlarken 22 °C olan hava sıcaklığı silika jellerde nem alma prosesi sonrasında 27 °C seviyesine yükselmiştir.

Bu ölçümlerin ardından hem silika jel öncesinde giriş havasının bağıl nem miktarının çıkıştaki bağıl nem miktarına etkisine olup olmadığının daha iyi anlaşılması için hem de daha uzun bir test süresinde havanın sıcaklığında olan artışın ne seviyede olacağının anlaşılması için bu sefer farklı bir deney seti daha uygulanmıştır.

Bu deney setinde bu sefer silika jel öncesi giriş odasındaki nem (su buharı) kademeli olarak artırılmış ve su buharı besleme kapasitesi de yükseltilmiştir. Deney süresi de 10 dakikalık bir süreye uzatılmıştır.



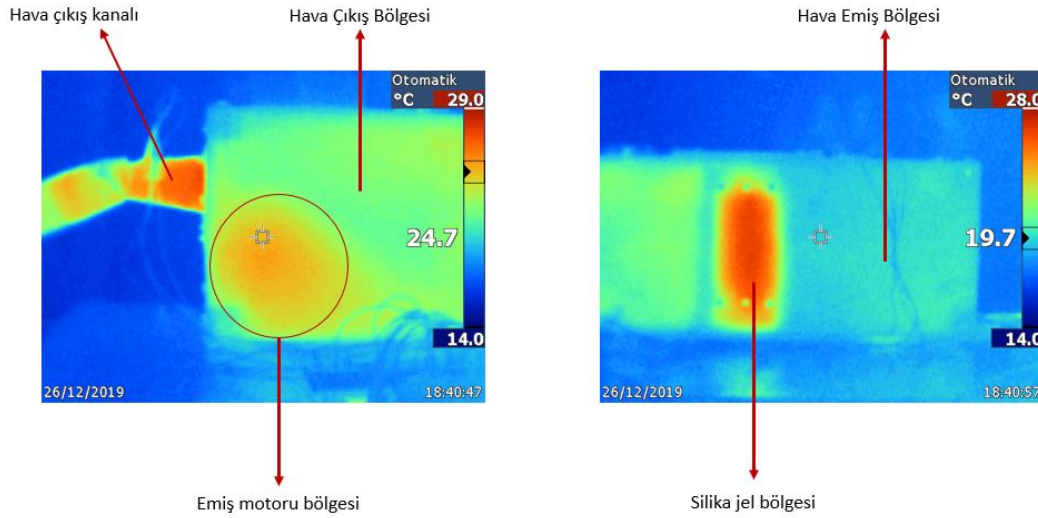
Şekil 5.14 Silika jel ile aktif nem alma deneyi kademeli değişimde sıcaklık ve bağıl nem değişimleri

Yapılan bu deneylerde de yine görülmüştür ki giriş havasındaki nem miktarından bağımsız olarak silika jel çıkışında nem miktarı benzer seviyede çok küçük bir artış trendi ile olmaktadır. Yine silika jel sonrasında hava sıcaklığındaki artış ise test süresinin uzaması ile birlikte daha net olarak görülmektedir.

Burada hem sıcaklıktaki artış hem de silika jel sonrasındaki bağıl nemdeki küçük artış hem silika jelin zaman ile doygunluğa eriştikçe performansının değişeceğini hem de yine zamana bağlı olarak ısı birikiminin de artacağını göstermektedir.

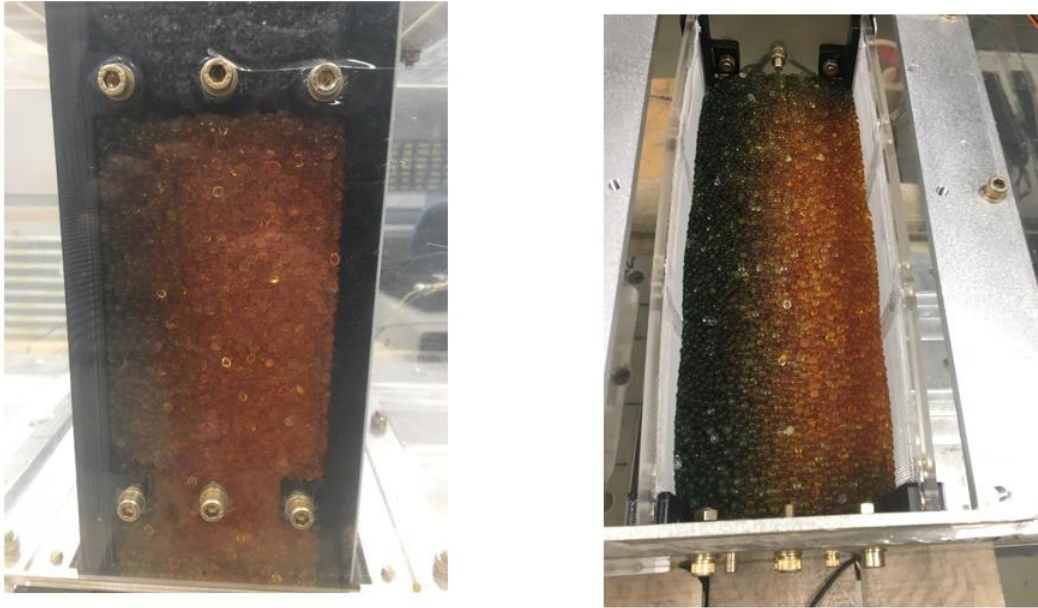
Özellikle sıcaklıktaki bu artışın daha net incelenmesi için ise test sırasında termal kamera ile giriş ve çıkış bölgeleri inceleme altına alınmıştır.

Termal kamera ile alınan görüntülerden de (Şekil 5.15) silika jellerin havadaki nemi tutarken ısındığı net olarak görülmektedir. Aslında bu durum buharlaşma gizli ısısının silika jellere transfer olduğunu ve ısınan silika jeller üzerinden havanın da geçerken ısındığını göstermektedir. Tabi çıkış bölgesindeki hava sıcaklığının artışına biraz da emiş motorundan yayılan ısı etkili olmaktadır.



Şekil 5.15 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sonrası sıcaklık dağılımı

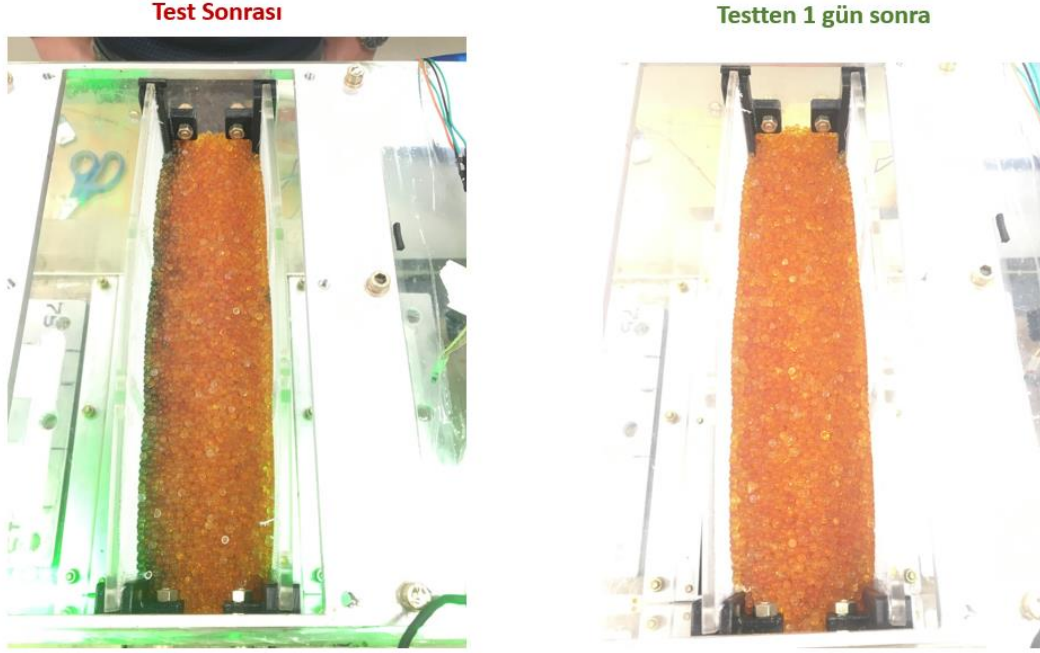
10 dakikalık test sonrasında silika jellerin nem doygunluğunun incelenmesi için ise silika jel yükleme kapağı açılarak görsel muayene yapılmıştır.



Şekil 5.16 Silika jel ile aktif nem alma deneyi sonrası silika jellerin neme doyma görüntüsü

Bu görsellerden de açıkça görülmektedir ki silika jel tanecikleri ilk nemli havaya temas etme yüzeyinden içe doğru sıra ile doygunluğa ulaşmaktadır. Bu da aslında silika jellerin çıkışındaki bağıl nemin hep benzer seviyede kalmasını açıklamaktadır. Silika jel miktarı toplam nem alabilme kapasitesini süre olarak uzatmaktadır. Ancak miktarı artırmanın çıkıştaki bağıl nemi daha da düşürmeye önemli bir etkisi olmamaktadır.

Bunlara ek olarak bir diğerk önemli bulgu olarak ise testler sonrası yaklaşık 1 gün sonra bu silika jel bloğun durumu tekrar incelendiğinde yeşil olan silika jellerin üzerlerinde tuttuğu nemi diğerk silika jel parçacıkları ile paylaştığı ve tüm bloğun bir doygunluk dengesine ulaştığı görölmüştür.



Şekil 5.17 Silika jel ile aktif nem alma deneyleri sonrası silika jel parçacıkları arasında nem dağılımının değişimi

Bu deneyler sonrasında açıkça silika jelin “aktif” bir nem alıcı olarak kullanılabileceği ancak böyle bir kullanım için konunun sıcaklık artışı, basınç düşüşü, silika jel miktarı ve nem tutma kapasitesi anlamında dikkatli irdelenmesi gerektiği görölmüştür.

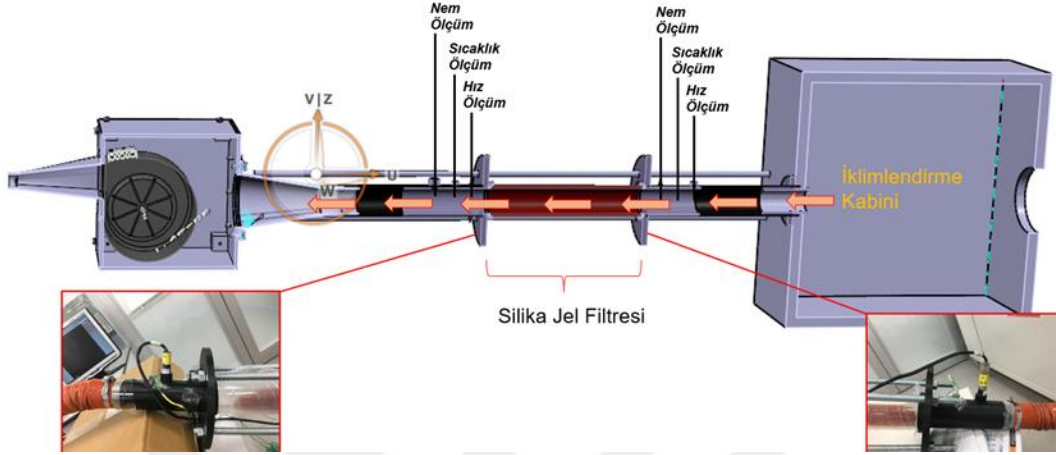
Silika jel malzemesi kullanılarak bir nem alma sistemi tasarımında bu malzemenin kullanım tekniğine göre sıcaklık değişimi, akıştaki basınç kaybı, doğru silika jel miktarı ve kullanılan tekniğe göre silika jelin nem alma kapasitesinin değişiminin iyi belirlenmesi gerekir.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında silika jelin aktif bir nem alıcı olarak kullanımına dair farklı teknikler kurgulanmıştır.

5.4.1 Yatay Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler

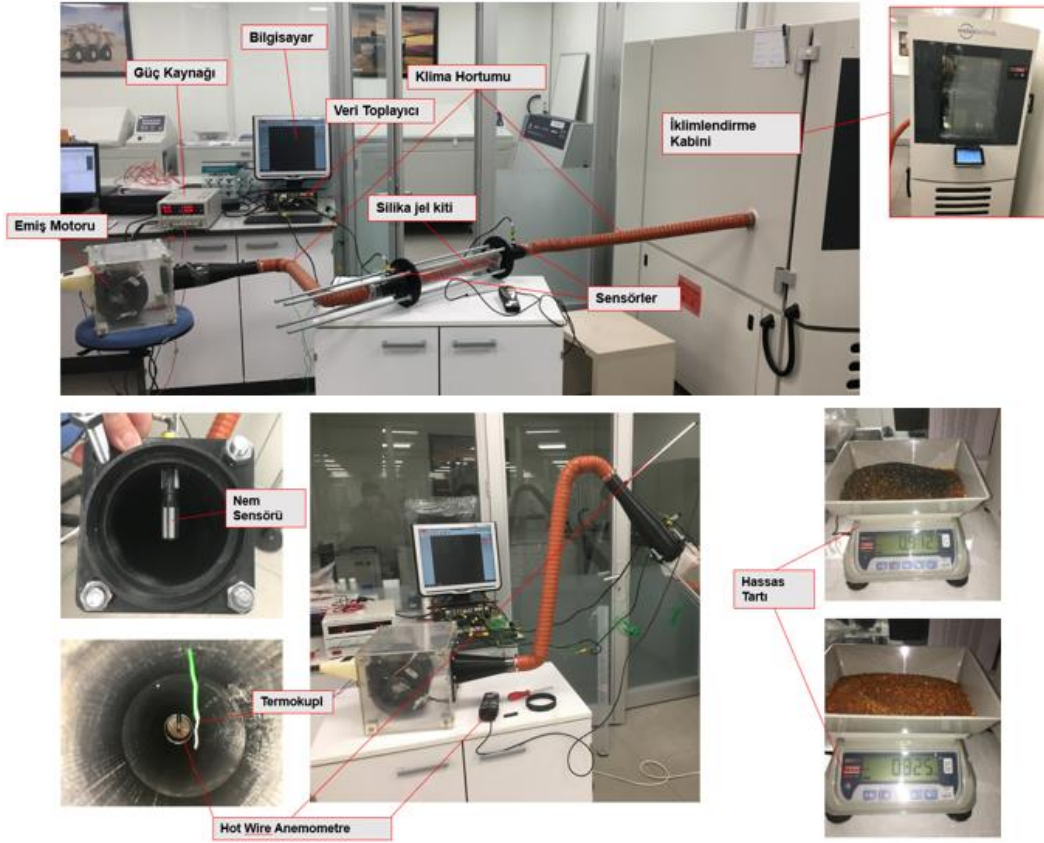
Tasarlanan deney düzeneğinde oluşturulan hava akışının “silika jel kiti” olarak adlandırılan bir bölgeden geçirilmesi planlanmıştır. Silika jel kitine girişten önce

havanın farklı sıcaklık ve bağıl nem değerlerine getirilebileceği ve testler esnasında da bu şartların kontrol altında tutulabileceği bir sistem planlanmıştır. Testler esnasında hava akışındaki sıcaklık, bağıl nem ve hız değerlerinin değişiminin sensörler ile belirlenerek kayıt altına alınması planlanmıştır. Bu yaklaşım ile basitçe aşağıdaki Şekil 5.18 ‘deki gibi bir deney düzeneği kurgulanmıştır.



Şekil 5.18 Yatay olarak yerleştirilen silika jel kitli deney düzeneği şematiği

Deney düzeneğinin fiziksel olarak hazırlanmasında zırhlı araçlardaki ile aynı özelliklerde klima hortumları kullanılarak akış kanalı oluşturulmuştur ve iklimlendirme test kabini ile kontrollü olarak silika jel giriş koşullarının oluşturulması sağlanmıştır. Farklı silika jel kitlerinin uygulanabilmesi için akış kanalının bir bölümü değiştirilebilir bir yapıda tasarlanmış olup kanal içerisindeki hava hareketi yine askeri araçlarda kullanılan bir hava emiş motoru ile sağlanmıştır. Hava emiş motoru bir DC güç kaynağı ile kontrollü olarak sürülecek şekilde hazırlanmıştır. Kanal içerisindeki nem ölçümleri nem sensörleri, sıcaklık ölçümleri termokupllar ve hız ölçümleri ise hot wire anemometre cihazları ile sağlanmıştır. Testler esnasında verilerin kayıt altına alınması veri toplayıcı ile sağlanmış ve veri yönetimi bilgisayar ekranından izlenmiştir. Testler esnasında silika jellerin tuttuğu nem miktarının belirlenmesi için ise test öncesi ve test sonrası silika jellerin ağırlıklarını belirlemek üzere hassas tartı kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait görsel Şekil 5.19 ‘da görülmektedir.

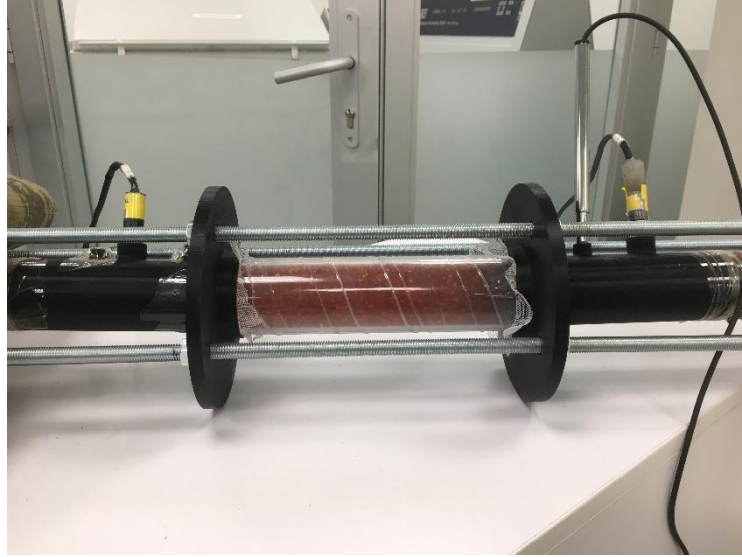


Şekil 5.19 Yatay olarak yerleştirilen silika jel kitli deney düzeneği

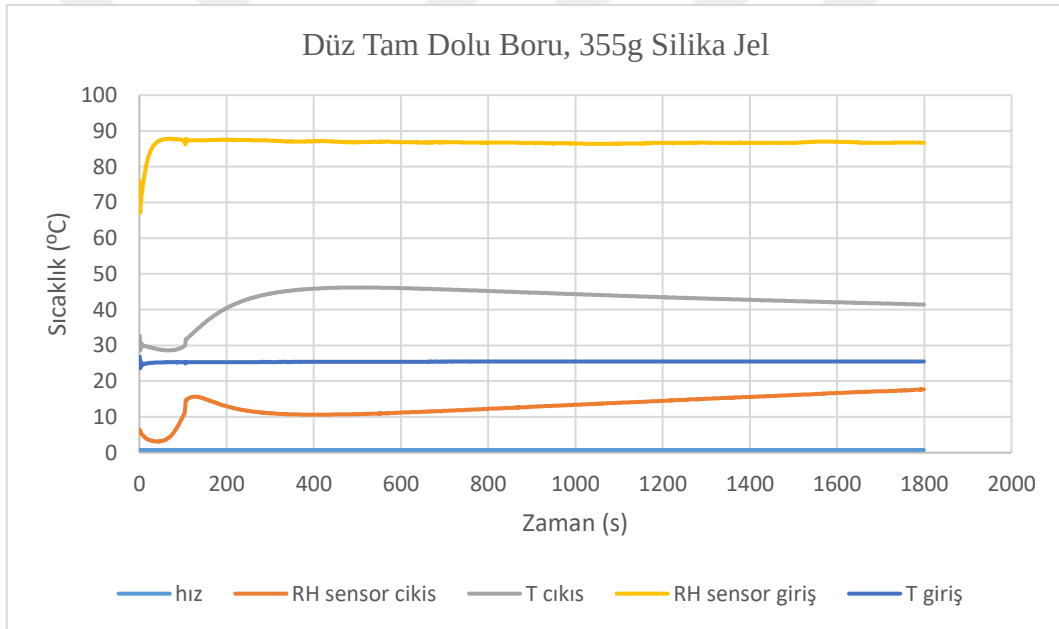
Bu deney düzeneği kullanılarak silika jel kiti olarak adlandırılan bölgede farklı miktar, şekil ve pozisyonlarda silika jel kitleri uygulanmış ve hangi durumda bağıl nem, hız ve sıcaklık değişimlerinin nasıl etkilendiği analiz edilmiştir.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce silika jel kitine havanın giriş şartlarına dair bir hedef değer belirlenmiştir. Bu değer belirlenirken yüksek nemli bir tropik iklimde sahip bir bölgede araç dışından alınan havanın sanki araç içerisinde hazırlanmış olan silika jel kitinden geçirileceği varsayılmıştır. Bunun için de Endonezya gibi bir ülkedeki durum ele alınmıştır. Testler esnasında da bu sebeple giriş şartları için hava sıcaklığı 26 °C, hava bağıl nemi ise %85 olarak kurgulanmıştır.

Testlere ilk olarak bir boru içerisine 355 gram silika jelin (tam dolu) doldurulduğu kit ile başlanmıştır. 30 dakika boyunca bu silika jel kiti üzerinden hava geçirilmiş ve 30 dakika boyunca silika jel çıkışında havanın özelliklerinin nasıl değiştiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.20 Yatay yerleşim silika jel kiti deney sonu görüntüsü



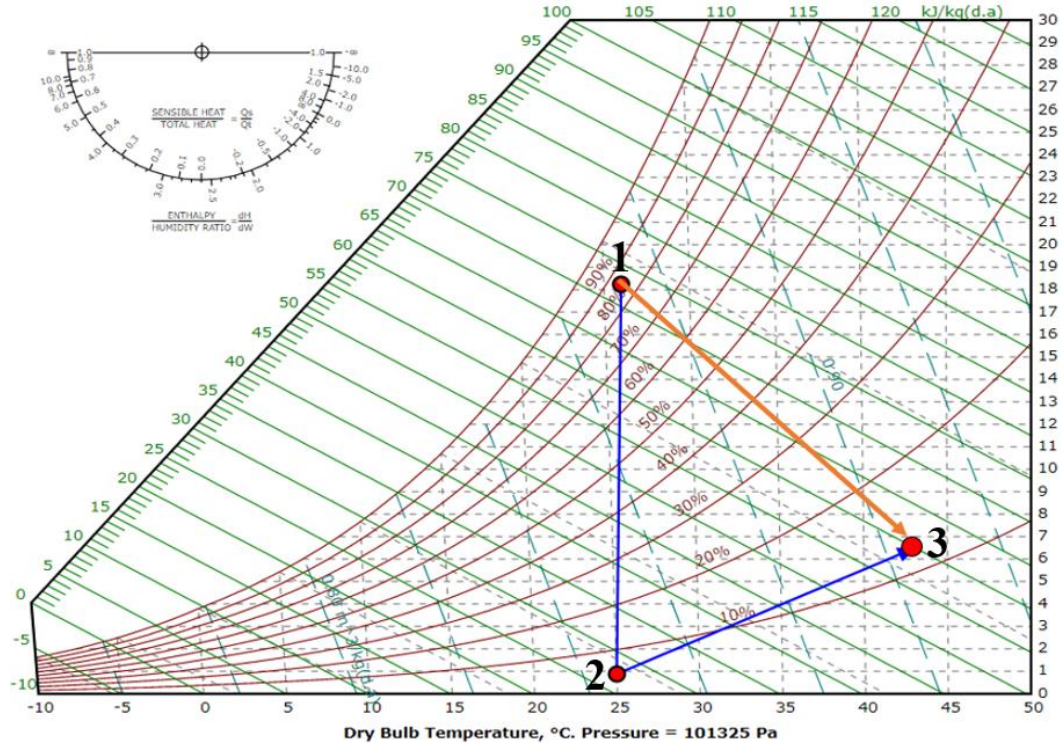
Şekil 5.21 Yatay yerleşim silika jel kiti deneyleri verilerin değişimi grafiği

Testler sırasında silika jel kiti çıkışında havanın bağıl neminin %10-18 aralığında değiştiği, sıcaklık değerinin ise ortalama olarak 41 °C civarında olduğu görülmüştür. Test süresi boyunca ise toplamda 32 gram nem silika jel üzerinde tutulmuştur. Deney süresi sonunda hava sıcaklığındaki artış ise 16 °C civarında olmuştur.

Ancak bu deneyde önemli bir konu olarak silika jel üzerinden geçen hava hızının yaklaşık 0,76 m/s civarında kaldığı görülmüştür. Bu da silika jellerin kit içerisinde

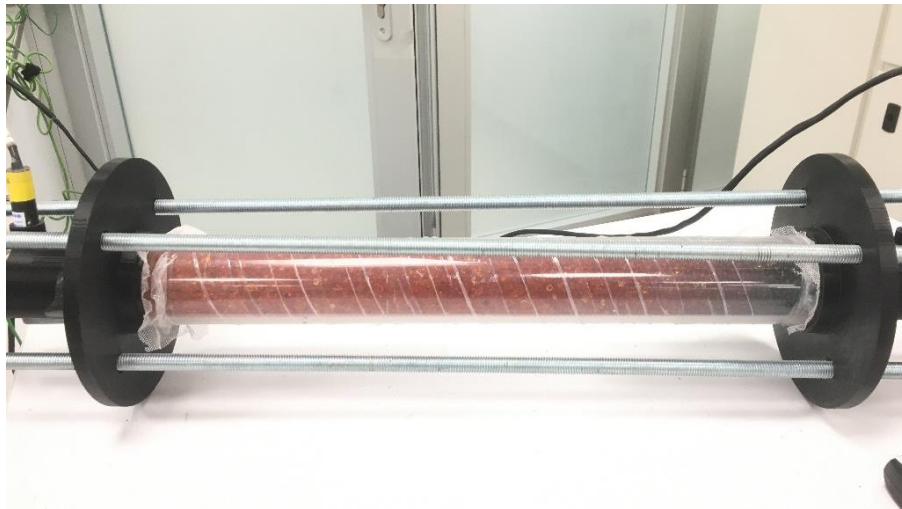
tam dolu bir halde durduğunda hava akışını ciddi derecede bloke ettiğini ve basınç düşüşüne sebep olduğunu göstermektedir.

Deneyler çalışmada silika jel kitinden çıkan havanın özellikleri psikrometrik diyagramda Şekil 4.35 'te gösterilmektedir.

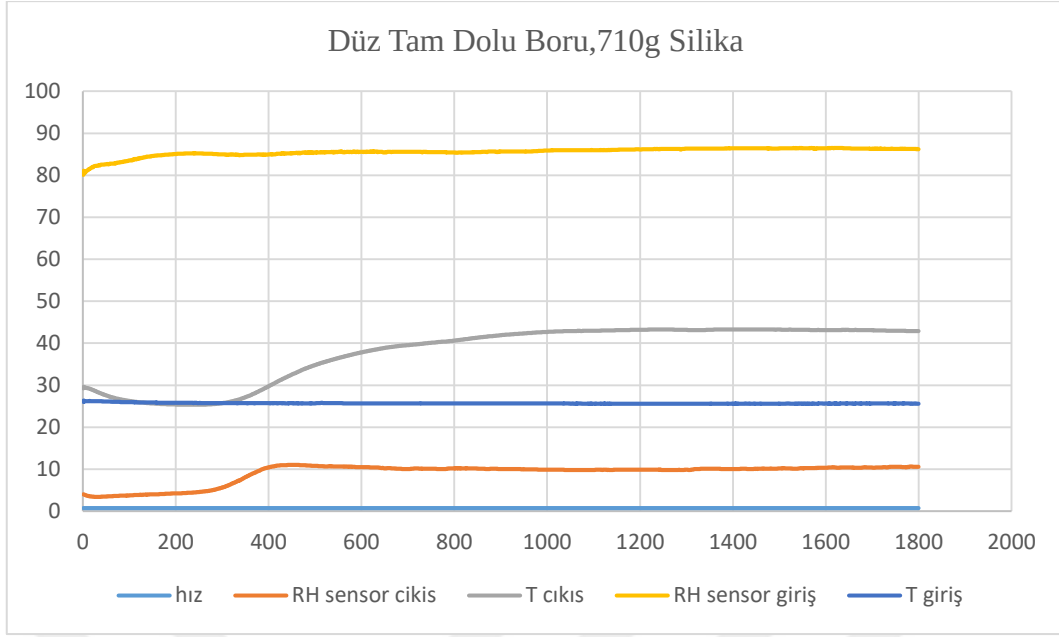


Şekil 5.22 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi

İkinci durumda silika jel kiti tekrar aynı yatay konumlandırmada ancak bu sefer silika jel miktarı 2 katına çıkarılarak (710 gram olarak) deneyler tekrarlanmıştır.



Şekil 5.23 Yatay yerleşim silika jel kiti – 710g



Şekil 5.24 710g yatay yerleşim silika jel kiti deneyi verileri

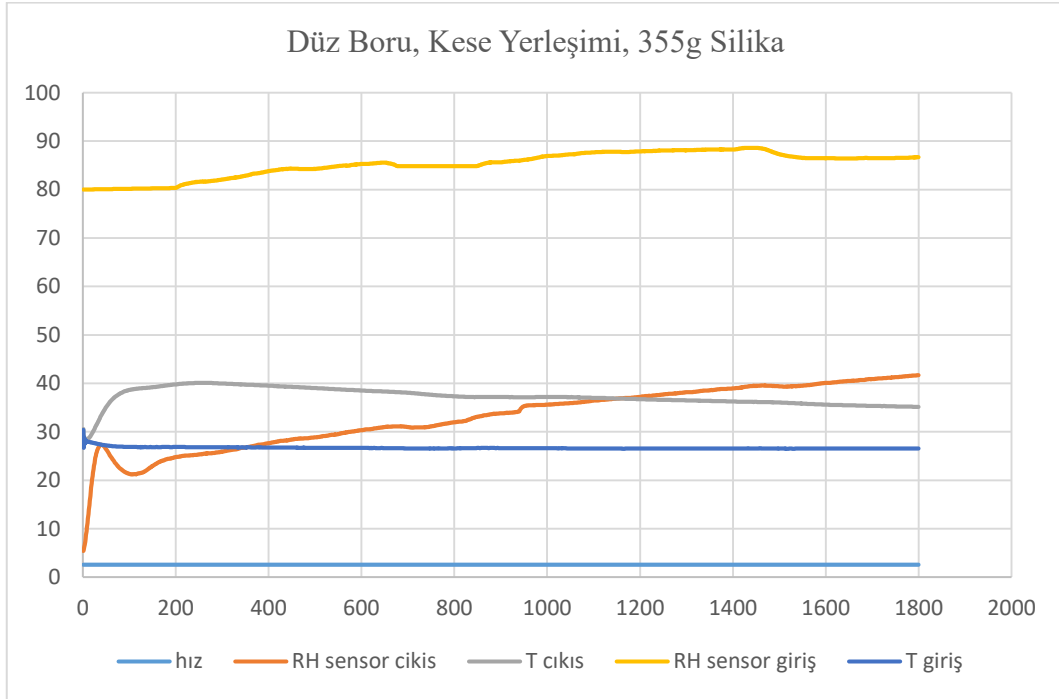
Bu deneylerin sonucunda ise silika jel çıkışındaki bağıl nem değeri biraz daha düşük ve daha stabil kalırken, çıkıştaki hava sıcaklığı bir önceki deney seti ile benzer kalmıştır. Yine silika jel içerisinden geçen havanın hızı da bir önceki deney seti ile benzer kalmıştır.

Ancak bu deney setinde 30 dakika sonunda silika jel üzerinde tutulan toplam nem miktarı 41 gram olmuştur.

Yer düzlemine paralel yani yatay olarak konumlandırılan bu silika jel kitlerinde silika jel filtresi içerisinde silika jel boncukları boru içerisini tamamen doldurdıkları için yüksek bir nem düşüşü sağlanırken; yüksek basınç düşüşü ve hava sıcaklığında artış olduğu tespit edilmiştir. Hem havanın akışını rahatlatmak hem de hava çıkış sıcaklığındaki artışı biraz azaltmak amacı ile bu sefer silika jel kiti içerisine silika jel malzemesi biraz boşluklu bir yerleşime izin verecek şekilde “keseli” yerleşim ile konumlandırılmıştır. Silika jeller irili ufaklı farklı boyutlarda keselere koyularak silika jel borusu içerisine eklenmiştir. Toplamda ise ilk silika jel miktarı ile eşit olacak şekilde 355 gram silika jel kit içerisine yerleştirilmiştir. Yine 30 dk süresince ölçüm yapılmış ve hava özelliklerinin değişimi incelenmiştir.



Şekil 5.25 Yatay yerleşim keseli silika kiti görseli

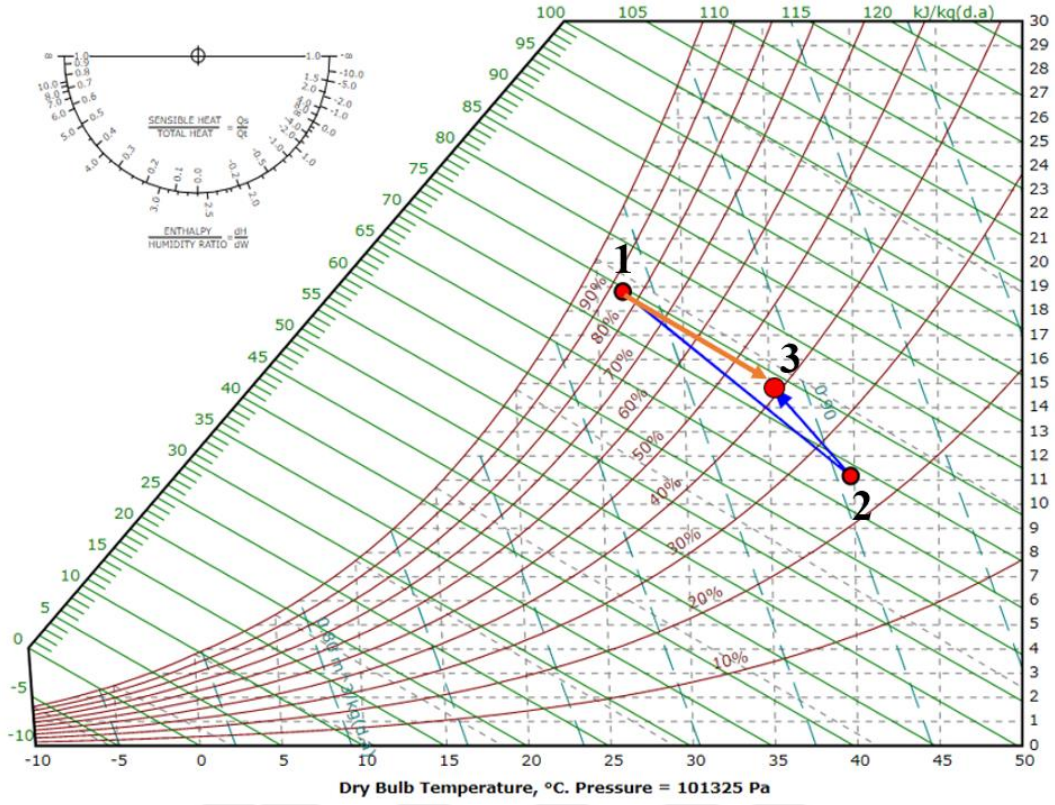


Şekil 5.26 Yatay yerleşim keseli silika kiti deneyi verileri

Bu deneyler sonucunda ise silika jel çıkışındaki havanın bağıl nem miktarının biraz daha yüksek olduğu ancak bu sefer çıkış havası sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Bu deney süresince toplamda 57 gram nem silika jel üzerinde tutulmuş ancak deney süresi sonunda giriş havasının sıcaklığı 10 °C kadar artmıştır. Bunun yanında deney sırasında çıkış havasının bağıl nem değeri ise ortalama olarak %33 civarında olmuştur.

Diğer bir yandan ise silika jeller üzerinden akan havanın hızı ise 3,5 m/s olarak gerçekleşmiştir. Özetle keseli yerleşim ile basınç düşüşü azaltılmış, sıcaklık artışı azaltılmış ancak çıkış havası bağıl nem değeri görece olarak yükselmiştir. Toplamda fiziksel olarak tutulan nem miktarı ise artış göstermiştir.

Bu deney şartlarında ise çıkış havasının özelliklerinin değişimi psikrometrik diyagram üzerinde Şekil 5.27 'deki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 5.27 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi

Yatay olarak silika jel kitlerinin konumlandırılmasında açıkça şu görülmüştür ki eğer tam dolu bir silika jel bloğu üzerinden hava geçirilirse akışta basınç düşüşü artıp hava akış hızı düşerken, çıkıştaki bağıl nem değeri minimum seviyelere erişmektedir. Ancak bunun çıkış havasında sıcaklık artışına sebep olması durumu vardır. Akış bir şekilde boşluklu bir yapı ile rahatlatıldığında ise bu sefer sıcaklık artışı konusunda avantaj elde edilirken bağıl nemi düşürme konusunda fedakârlık yapılması gerekmektedir.

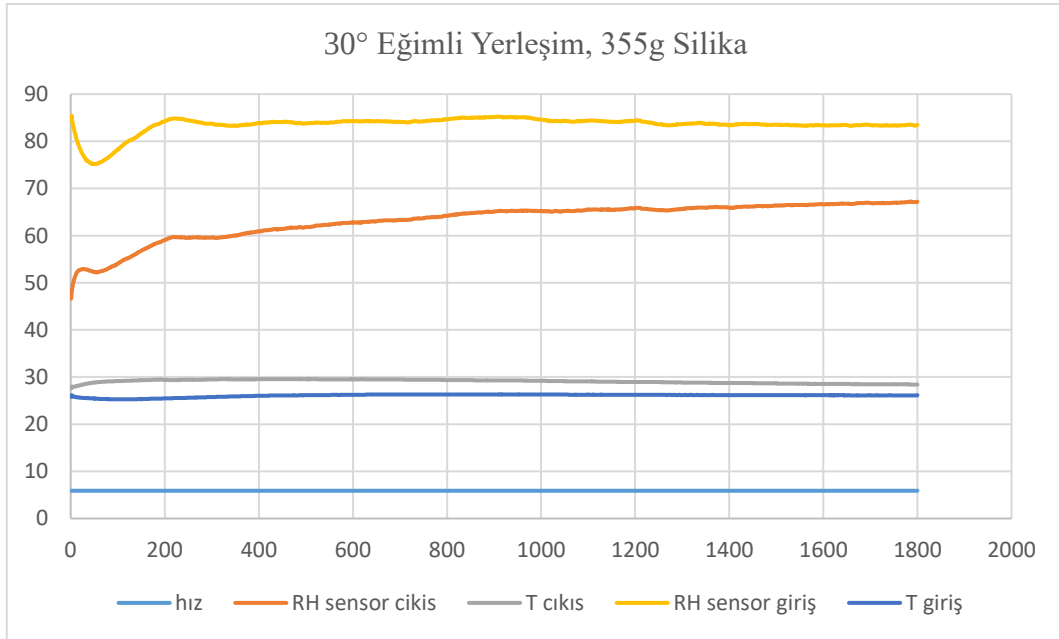
5.4.2 Eğimli Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler

Silika jelin havadan nem alabilmesi için hava ile rahat temas etmesi gerekmektedir. Ne kadar çok silika jel ne kadar çok hava ile temas eder ise havadan o kadar çok nem alacaktır. Yatay konumlandırma deneylerinde sabit silika jel filtrelemesi denenmiş oldu. Ancak çalışmanın bu bölümünde silika jel kitlerinin yer düzlemine paralel değil de eğimli (açılı) bir şekilde konumlandırılarak kit içerisindeki silika jel boncuklarının hava akışı ve yer çekimi etkileri ile yüzen/uçuşan hareketler yaparak “çalkalanması” sağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak silika jel kiti yer düzlemine 30° eğimli olacak şekilde konumlandırılmıştır ve kit içerisinde silika jeller boruyu tam dolduracak şekilde değil hareketliliğe izin verilecek şekilde doldurulmuştur. Yatay konumda deneyleri yapılan miktarda (355 gram) silika jel ancak daha uzun bir boruya doldurulmuştur.



Şekil 5.28 Silika jel kitinin eğimli olarak pozisyonlanması



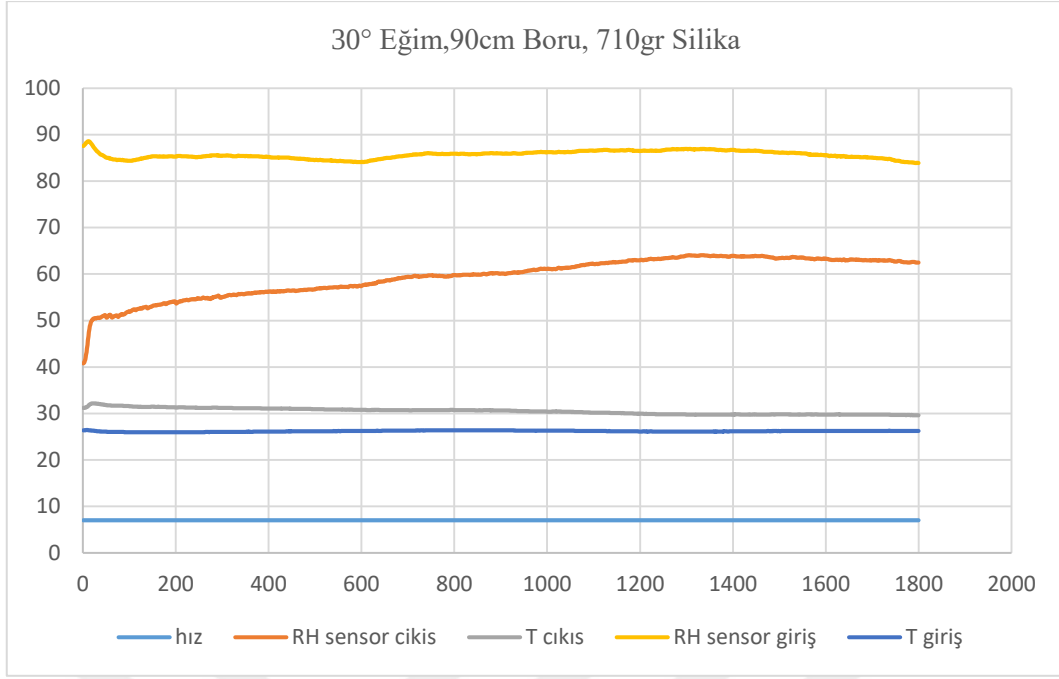
Şekil 5.29 Eğimli silika jel kiti deneyleri verileri

Bu deney sonunda kit çıkışındaki hava sıcaklığı artışı 2,5 °C olurken, deney süresince çıkış havası ortalama bağıl nem değeri %63,2 olarak gerçekleşmiştir. Deney süresince toplamda silika jeller üzerinde 42 gram su buharı tutulmuştur. Havanın silika jel kiti üzerinden akış hızı ise 5,85 m/s olarak gerçekleşmiştir. Deney sırasında silika jel kitinden geçen havanın etkisi ile silika jel boncukları boru içerisinde yukarı doğru hareket edip daha sonra yerçekimi etkisi ile de tekrar aşağı döndükleri görülmüştür. Bu hareket sonucunda da aslında kit içerisindeki tüm silika jel boncuklarının bir sirkülasyon hareketi ile yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu hareketin sonucunda ise havanın sıcaklık artışında ciddi bir düşüş, havanın akış hızında ciddi bir artış görüş görülmürken; çıkış havasında el edilen bağıl nem değerinde önceki deneylere göre görece artış olduğu tespit edilmiştir.

Aynı pozisyon ve konumlandırmada bu sefer silika jel miktarı 2 katına çıkarılarak (710 gram) yeni bir deney seti denenmiştir.



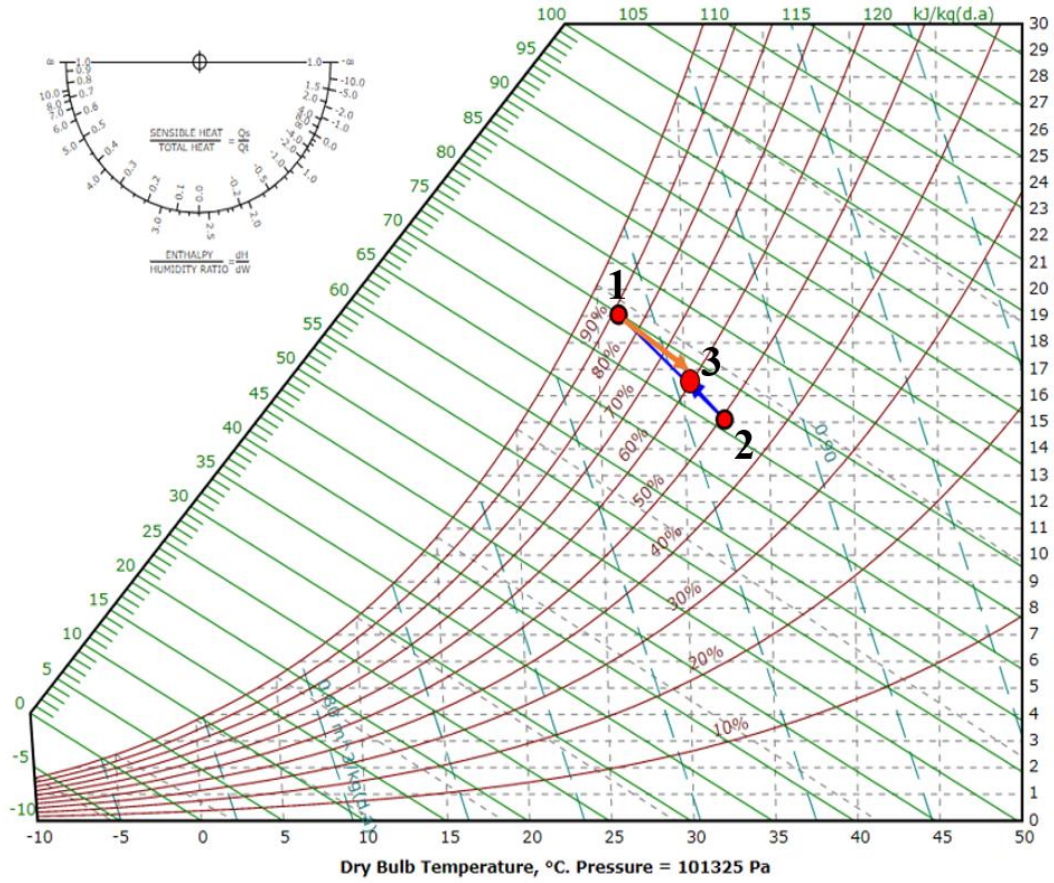
Şekil 5.30 Eğimli silika jel kiti yerleşimi – 710gr



Şekil 5.31 710gr eğimli silika jel kiti deneyi verileri

Bu deneyin sonunda ise çıkış havasının sıcaklığı 3,4 °C artarken, deney süresince çıkış havasının ortalama bağıl nem değeri %59,4 olarak gerçekleşmiştir. Havanın akış hızı ise 7 m/s seviyesine yükselmiştir. Toplamda silika jeller tarafından tutulan nem miktarı ise 58,5 gram olmuştur. Miktarın artırılması ile nem alma kapasitesinde artış olurken bu sefer akış hızında da daha yüksek bir akış elde edilebilmiştir. Hava sıcaklığının artışından küçük bir fedakârlık yapılsa da nem alma kapasitesinden elde edilen kazanım görece olarak daha yüksek olmuştur.

Bu deneye ait olarak havanın özelliklerinin psikrometrik diyagramdaki değişimi ise Şekil 5-32 'de gösterilmektedir.



Şekil 5-32 Deney esnasında hava özelliklerinin psikrometrik diyagram üzerinde değişimi

Aynı miktarda silika jel yine aynı pozisyon ve konumda ama bu sefer daha geniş çaplı bir boru kiti içerisinde konumlandırılarak yeni bir deney seti hazırlanmıştır. Ancak bu deneyler gerçekleştirilirken görülen en önemli nokta kit borusunun çapının artırılması ile kit içerisindeki akan havanın hızı düşmekte ve düşen hava hızı ile silika jel boncuklarının yüzdürülmesi etkisi azalmaktadır. Bu yüzden de silika jel boncuklarının hareketliliğinin azalması ile nem alma özellikleri de zayıflamaktadır.

Benzer şekilde yine eğimli çalışmalara ek olarak bu sefer de silika jel kiti 3 bölge olarak tasarlanmış ve farklı uzunluklardaki bölmelere farklı miktarlarda ancak toplamda yine aynı miktarda silika jel koyulacak şekilde bir ayarlama yapılmıştır.



Şekil 5.33 Üç bölge silika jel kiti yerleşimi

Ancak bu deneyler sonucunda bu bölmeli yerleşimde nem alma kapasitesinde ve hava akış hızı değerlerinde kayda değer bir değişim görülmemekle birlikte toplamda silika jellerin yüzdürülmesi konusunda her bölmede etkin bir hareketlenme de elde edilememiştir.

Sonuç olarak eğimli konumlandırmada en önemli irdelemelerin silika jel kiti içerisindeki silika jel miktarı, kitin pozisyonlandırıldığı eğim açısı ve bunların çıktısı olarak da toplam bağıl nem düşüşü ve hava akış hızı değerlerinin önemli olduğudur.

Eğim açısının farklılaştırılması sonucunda hava hızı ve bağıl nemdeki değişim değerlerinin nasıl etkilendiğini görmek için 30° olan eğim açısı 25° ve 35° olarak da değiştirilmiş ve deneyler tekrarlanmıştır.



Şekil 5.34 Eğimli yerleşimde silika jel kitinin eğim açısının gösterimi

Bu deneyler sonucunda ise elde edilen değerler Tablo 5.7 'de sunulmaktadır.

Tablo 5.7 Farklı eğim aırlarında gerçekleşen bağlı nem farkı ve hava hızı değerleri

Boru Boyu (cm)	Silika Jel Miktarı (g)	Eğim (°)	Hız (m/s)	Nem Farkı (%)
90	750	25	7,5	%31,4
90	750	30	5,8	%40
90	750	35	4	%48

5.4.1 Dikey Olarak Yerleştirilen Silika Jel Kitli Deneyler

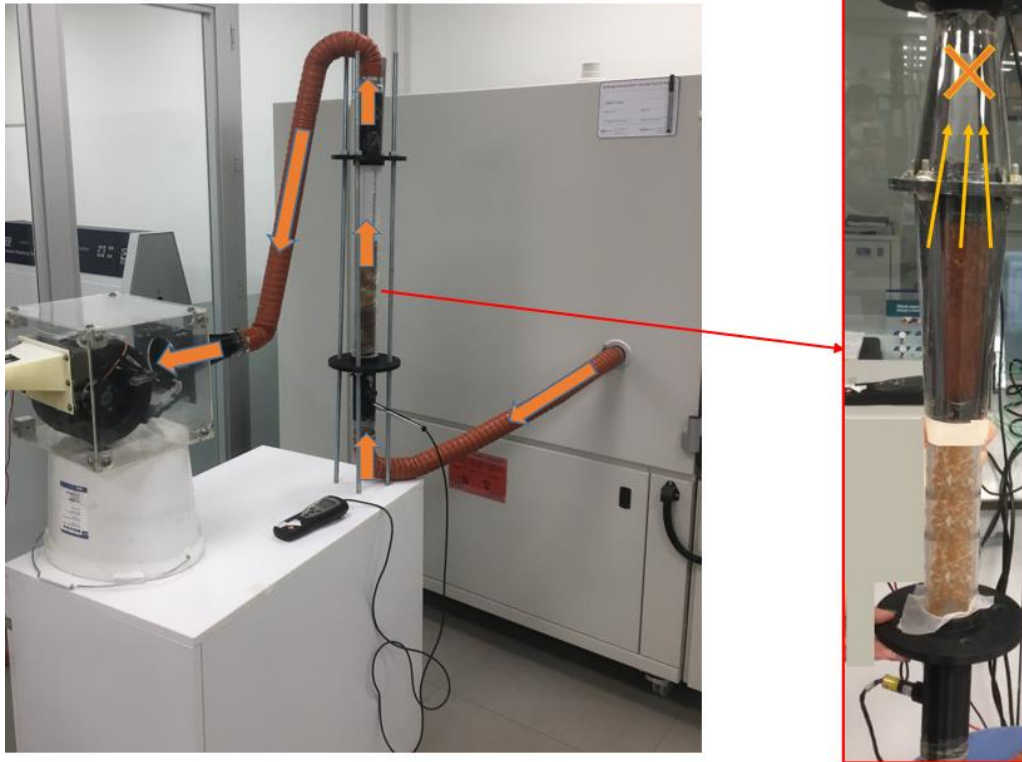
Akışkan yatak etkisini bir farklı şekilde de denemek için silika jel kiti yer düzlemine dik olacak şekilde de konumlandırılarak deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır.



şekil 5.35 Dikey olarak silika jel kitinin pozisyonlanması

Ancak bu havanın akışı etkisi ile silika jel boncuklarının yüzdürülmeye çalışılmasında önce üst üste yığılı şekilde duran silika jel boncuklarından en üsttekiler yukarı doğru hareketlenmekte daha sonra bu hareketlenmeyi sırası ile yukarıdan aşağı doğru diğer silika jel boncukları takip etmektedir. Ancak bu süreçte yukarı doğru çıkan silika jel boncukları kit içerisinde yükselirken kitin uç noktasında tekrar birleşmekte ve belirli miktarda birleşme sağlandığında bu sefer meydana gelen yığın kütlesi yerçekimi etkisi ile tekrar aşağı doğru düşmektedir. Ancak bu durum gerçekleşirken henüz kit içerisindeki tüm boncuklar yukarı hareketi sağlamış olamamaktadır. Yukarıdan tekrar aşağı inen boncukları tekrar yükselmeye çalışmakta ancak bu olay tekrarlandıkça hava akışında anlık boğulmalar meydana gelmektedir. Yani eğimli konumlandırıldığında meydana gelen sıralı ve düzgün çalkalama burada yerini anlık yükselmelere ve stabil olmayan bir hava hareketliliğine bırakmaktadır. Bu da nem alma prosesini direkt olarak olumsuz etkilemektedir.

Bu olumsuz etkiyi çözmek için ise dikey konumlandırılmış silika jel kiti düz boru yerine ortada konik olarak genişleyen ve sonra konik olarak tekrar daralan bir şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 5.36 Dikey konumlandırılmış konik tasarımlı silika jel kiti

Ancak deney düzeneğinde silika jel kiti içerisinde şartlandırılmış havanın geçirilmesini sağlayan motorun kapasitesi belirlidir. Dolayısı ile silika jel kitinden geçirilebilecek maksimum hava debisi de sabit olduğundan, silika jellerin yerleştirildiği borunun çapının arttığı yerlerde havanın hızı düşmektedir. Hava hızındaki bu düşüş de silika jel taneciklerinin yukarı doğru yükseltilerek akışkan yatak elde edilmesi için yetersiz kalmıştır ve silika jel kiti içerisinde akışkan yatak elde edilememesi ile sonuçlanmıştır.



6 SONUÇ

Bu tez çalışması, zırhlı bir askeri araç içerisinde, askeri personelin motor çalıştırılmadan ve dolayısıyla mevcut klima sistemi kullanılmadan yaklaşık 30 dakikalık bir süre boyunca belirli görevleri yerine getirdiği durumlarda, personel için asgari termal konforun sağlanmasına yönelik çözümleri araştırmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, araç içinde oluşan termal yüklerin ve soğutma gereksinimlerinin doğru anlaşılması ve etkin bir çözüm geliştirilmesi, çalışmanın temel hedefini oluşturmaktadır.

Araştırmanın temelinde, bu ihtiyacın termodinamik açıdan doğru anlaşılması yatmaktadır. Bu doğrultuda, araç içinde kullanılan noktasal soğutma tekniğinin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve personel üzerinde gerçekleşen termodinamik süreçler analiz edilmiştir. Tez kapsamında, zırhlı araç içerisindeki askeri personel üzerinde noktasal soğutma tekniği ile gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarını analiz etmek amacıyla bir analitik model geliştirilmiştir. Bu modelin hazırlanmasında, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yazılımlarından yararlanılmıştır. CFD analizleri, araç içi hava akışının ve termal süreçlerin detaylı bir şekilde incelenmesini sağlamış ve analitik modelin temellerini oluşturmuştur. CFD yazılımları kullanılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen analitik model, deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Doğrulan model kullanılarak, personel üzerinde termal konforu sağlayan farklı senaryoları incelemek amacıyla termal denge eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler, farklı üfleme havası sıcaklıkları, bağıl nem oranları ve hava hızlarının, personel üzerinde sağlanan termal konfor üzerindeki etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Termal denge eğrileri, farklı araştırma ve geliştirme alanlarında potansiyel fikirler üretmiştir. Bu bağlamda, noktasal soğutma performansını artırmak için silika jel kullanılarak aktif nem alma üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Silika

jel, araç içindeki bağıl nem oranını düşürmek için aktif nem alıcı bir malzeme olarak kullanılmış ve bu yöntemin etkinliği analiz edilmiştir.

Sonuç olarak yapılan tez çalışması, farklı araştırma alanlarını kapsayan çok yönlü bir yaklaşım izlediği için elde edilen bulgular ve öneriler, tek bir sonuç başlığı altında değil, farklı başlıklar altında ele alınmıştır.

İlk olarak, termal denge eğrileri, noktasal soğutma tekniklerinin askeri zırhlı araçlardaki uygulanabilirliği açısından kritik sonuçlar sunulmuş ve ardından silika jel kullanımının hem enerji verimliliği hem de personel konforunu artırmak açısından yapılan deneysel çalışmalar değerlendirilmiştir.

6.1 Termal Denge Eğrileri

Termal denge eğrileri, farklı üfleç-personel arası mesafelerde, üfleme havasının hızı, bağıl nem oranı ve sıcaklığı gibi parametrelerin değişimine bağlı olarak personelden belirli bir miktarda ısı transferini sağlayan koşulları tanımlayan grafiklerdir. Bu eğriler, askeri zırhlı kara araçlarında görev yapan personelin termal konforunu sürdürebilmesi için gereken üfleme havası özelliklerini doğrudan ortaya koymaktadır. Elde edilen bu grafikler, askeri araç iklimlendirme sistemi tasarımcıları için "doğrudan bilgi sağlayan pratik rehberler" olarak değerlendirilebilir.

Bu grafiklerin oluşturulması sürecinde kullanılan analitik model, yalnızca zırhlı askeri araçlardaki personel için termal denge eğrilerinin çıkarılmasına yönelik değil, aynı zamanda farklı kullanım senaryoları için de uyarlanabilir bir yapıdadır. Analitik modelde, askeri araç ve personel özelinde yapılan kabuller, başka bir uygulama için değiştirilerek farklı koşullara ve ihtiyaçlara uygun çözümlemeler yapılabilmektedir. Böylelikle model, çok yönlü bir kullanım potansiyeline sahiptir.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı üfleç-personel arası mesafeler için termal denge eğrileri oluşturulmuştur. Bu mesafeler, analitik modeldeki temel değişkenlerden biri olarak ele alınmış ve aşağıdaki koşullara göre termal denge analizleri gerçekleştirilmiştir:

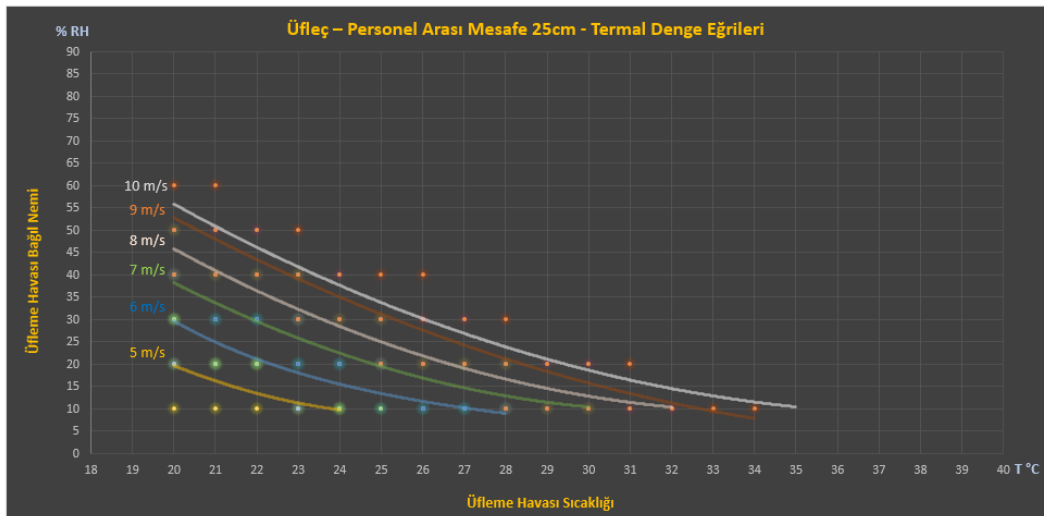
1. Üfleme havası hızı
2. Üfleme havası sıcaklığı
3. Üfleme havası bağıl nem oranı

Üç farklı üfleme mesafesi senaryosu dikkate alınarak, bu değişkenlerin her bir kombinasyonu için termal denge eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler, askeri zırhlı kara araçlarında personelin termal konforunu sağlamaya yönelik sistem tasarımlarında kullanılabilecek önemli bir bilgi kaynağıdır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 'te sunulmuştur.

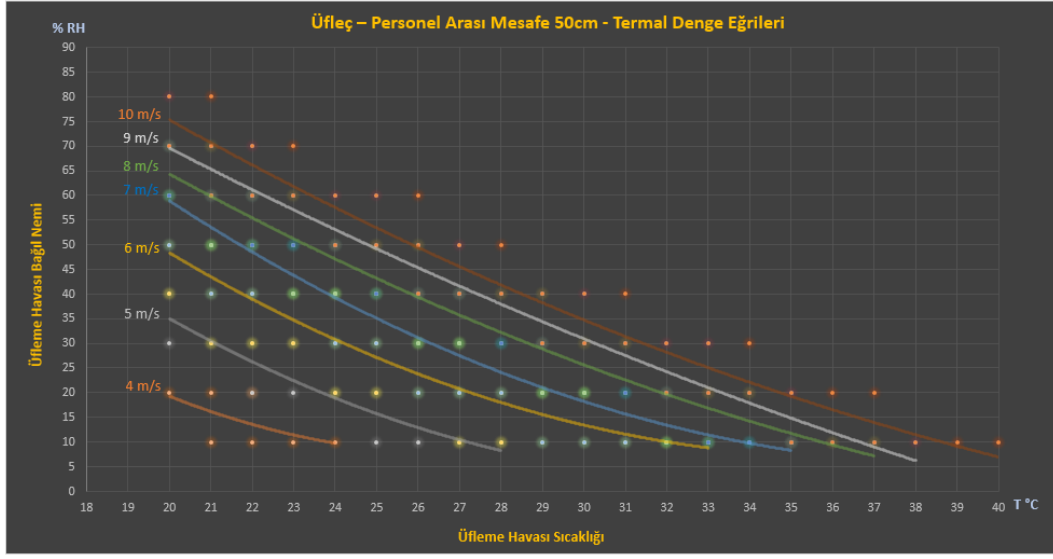
Tez çalışmasında kullanılan analitik model, yüksek esnekliğe sahip bir çözümleme yöntemi sunmaktadır. Model, askeri personel ve araç özelinde yapılmış olmakla birlikte, farklı kullanım senaryoları için de uyarlanabilir özelliktedir. Örneğin, sivil araçlarda veya farklı operasyonel ortam şartlarında benzer termal denge eğrilerinin elde edilmesi için modelin yapılandırması kolaylıkla uyarlanabilir. Bu durum, modelin çok yönlülüğünü ve geniş uygulama potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda geliştirilen termal denge eğrileri hem mevcut iklimlendirme sistemlerinin optimizasyonunda hem de yeni nesil iklimlendirme sistemlerinin tasarımında rehber niteliğinde bir bilgi kaynağı olarak değerlendirilebilir.

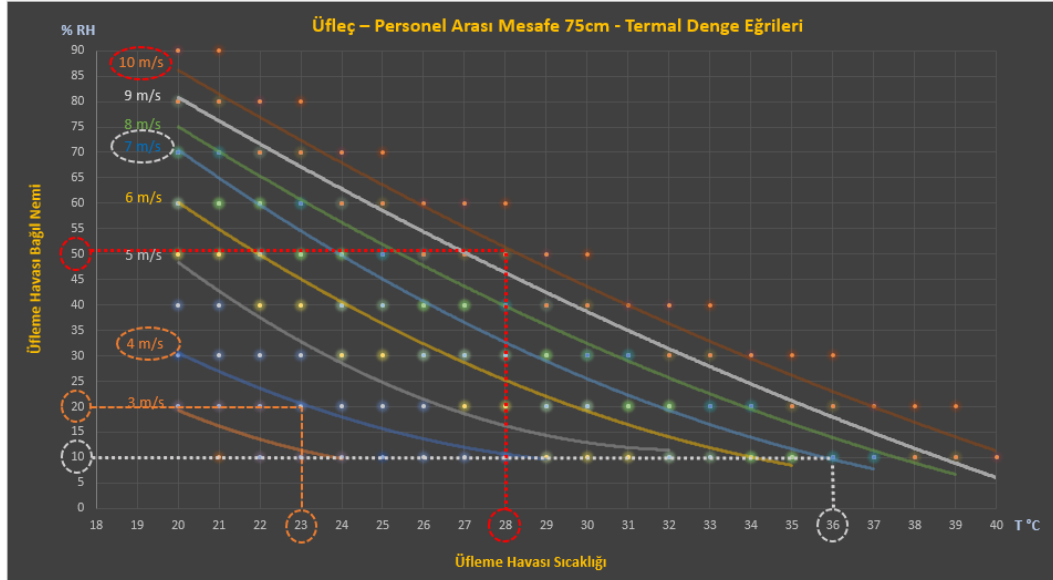
Çalışma kapsamında elde edilen termal denge eğrilerinde, her bir üfleme havası hızı eğrisindeki noktalar, askeri personelden noktasal soğutma tekniği ile yaklaşık 270 W ısı transferinin gerçekleştirilebildiği koşulları tanımlamaktadır. Bu durum, farklı hava hızı, sıcaklık ve bağıl nem kombinasyonlarıyla aynı miktarda ısı transferinin sağlanabileceğini ve dolayısıyla farklı tasarım çözümlerinin mümkün olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.1 25cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri



Şekil 6.2 50cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri



Şekil 6.3 75cm üfleme mesafesine göre termal denge eğrileri

Termal denge eğrilerinin pratik bir kullanımını şu şekilde açıklamak mümkündür:

- **Örnek 1:** Askeri personel ile üfleç arası mesafenin 75 cm olduğu bir durumda, üfleç çıkışında 7 m/s hızla üflenlen havanın sıcaklığı 36 °C ve bağıl nemi %10 olduğunda, personelden yaklaşık 270 W ısı uzaklaştırılabilmektedir.
- **Örnek 2:** Aynı mesafede, üfleme havasının hızı 4 m/s, sıcaklığı 23 °C ve bağıl nemi %20 olduğunda yine personelden 270 W ısı uzaklaştırmak mümkündür.

- **Örnek 3:** Üfleme havasının hızı **10 m/s**, sıcaklığı **28 °C** ve bağıl nemi **%50** olduğunda da benzer şekilde personelden **270 W** ısı transferi sağlanmaktadır.

Bu örnekler, termal denge eğrilerinin ortaya koyduğu önemli bir sonucu göstermektedir: Aynı miktarda ısı transferini sağlamak için farklı üfleme havası özellikleri kullanılabilir ve bu da farklı sistem tasarımı çözümlerinin geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Elde edilen termal denge eğrileri, "sıcak hava ile de serinletmenin mümkün olduğu" çarpıcı bir gerçeğini ortaya koymaktadır. Örneğin, 36 °C sıcaklığındaki bir hava, %10 bağıl nemde ve 7 m/s hızla 75 cm mesafeden personele üflendiğinde, gerekli soğutma etkisi sağlanabilmektedir. Bu durum, özellikle sıcak ama kuru hava koşullarına sahip coğrafyalarda, dış ortam havasının herhangi bir soğutma işlemine gerek kalmaksızın hızlandırılarak personele yönlendirilmesiyle, personelin termal konforunun sağlanabileceğini göstermektedir.

Bu bulgu, geleneksel klima sistemlerinden beklenen "soğuk hava üfleyerek ısı uzaklaştırma" yaklaşımının ötesinde, farklı ısı transfer mekanizmalarının (örneğin, konveksiyon ve evaporasyon) etkinliğini vurgulamaktadır. Düşük bağıl nem oranına sahip, ancak görece sıcak bir havanın hızlandırılarak personele üflenmesi, yalnızca fan etkisi ile yeterli ısı transferinin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bu, noktasal soğutmanın temel avantajlarından birini ortaya koymaktadır: Enerji tüketimini minimize ederek lokal termal konforun sağlanması.

Sivil ortamlarda kullanılan iklimlendirme sistemleri için hava akış hızı, bağıl nem, sıcaklık farkı gibi parametreler genellikle katı sınırlandırmalara tabidir. Ancak askeri zırhlı araçlar gibi geçici süreli termal konfor ihtiyaçlarında bu sınırların esnetilmesi, etkili bir çözüm geliştirmek için önemli avantajlar sunmaktadır. Örneğin, personelin görevi sırasında kısa süreli yüksek hava akış hızlarına veya daha düşük bağıl neme toleransı olabileceği varsayılarak, geleneksel tasarım kısıtlamalarının ötesinde yenilikçi çözümler üretmek mümkün hale gelmektedir.

Termal denge eğrilerinin analizi, farklı senaryolara yönelik esnek tasarım çözümlerinin geliştirilmesi için önemli bir yol haritası sunmaktadır. Bu grafikler, noktasal soğutma tekniğinin avantajlarını vurgulamakta ve enerji verimliliğini optimize eden yenilikçi iklimlendirme sistemlerinin tasarlanmasına yönelik temel

bilgiler sağlamaktadır. Özellikle sıcak ve kuru coğrafi bölgelerde, düşük bağıl neme sahip dış hava koşullarını değerlendirerek etkin bir şekilde soğutma sağlamak mümkün olmakta, böylece sistem tasarımında önemli maliyet ve enerji tasarrufları elde edilmektedir.

Termal denge eğrilerinin analizi, farklı iklimlendirme sistemleri ve tasarım senaryoları için birden fazla araştırma ve uygulama alanı fikrini ortaya koymaktadır. Bu fikirler şu şekilde sıralanabilir:

- Üfleme havasının bağıl neminin düşürülmesi
- Üfleme hızının artırılması
- Üfleme havası sıcaklığının düşürülmesi
- Üfleç ile personel arasındaki mesafenin değiştirilmesi
- Bu parametrelerin birbirleriyle farklı kombinasyonlarının değerlendirilmesi

Termal denge eğrisi grafiklerinden elde edilen bu fikirler, farklı tasarım değişkenlerinin nasıl bir araya getirilebileceğine dair kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. Özellikle üfleme hızı ve bağıl nem gibi parametrelerin etkisi, grafikler üzerinde açıkça gözlemlenebilir.

Termal denge eğrisi grafiklerinde üfleme hızının artması, grafik eğrilerinin altında daha geniş bir alan oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum, bağıl nem ve sıcaklık parametrelerinin daha geniş bir aralıkta uyumlu hale getirilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, üfleme hızının artırılması, bağıl nem ve üfleme havası sıcaklığı gibi parametrelerde daha esnek tasarım değerlerine olanak tanımaktadır. Bu bulgu, noktasal soğutma tekniğinin özellikle askeri araçlarda termal konfor sağlamak için etkili bir çözüm olduğunu net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Bağıl nem ise diğer önemli bir değişken olarak termal denge eğrilerinde dikkate değer bir etkiye sahiptir. Üfleme havasının bağıl nem oranı azaldıkça, daha düşük üfleme hızları veya daha yüksek hava sıcaklıklarıyla termal denge sağlanabilmektedir. Bu durum, bağıl nemin düşürülmesinin, enerji tüketimi ve sistem tasarımı açısından önemli bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.

Analitik model kullanılarak toplamda 5670 farklı koşul için ısı transferi hesaplamaları yapılmıştır. Bu koşullara, personelden yaklaşık 270 W ısı transferi sağlanan durumların filtrelenmesi sonucunda 542 farklı kombinasyon elde edilmiştir. Bu verilerin detaylı analizi sonucunda kafadan ve gövdeden gerçekleşen

ısı transferi miktarı ile ilgili iki dikkat çekici sonuç ortaya çıkmıştır: Personelin toplam vücut yüzey alanı yaklaşık **1,8 m²** olarak kabul edilmektedir. Ancak bu yüzey alanının sadece **%5-6'sını** oluşturan kafa bölgesi (**0,1 m²**) üzerinden gerçekleşen toplam ısı transferinin, tüm vücut üzerinden gerçekleşen toplam ısı transferine oranı ortalama **%33** olarak hesaplanmıştır.

Kafa bölgesinden gerçekleşen bu yüksek oranlı ısı transferinin iki temel nedeni bulunmaktadır:

- Noktasal soğutma tekniği ile üfleme havasının doğrudan kafa bölgesine yönlendirilmesi.
- Araç içindeki ortam havası ve üfleme havası ile doğrudan temas eden en açık bölgenin kafa olması.

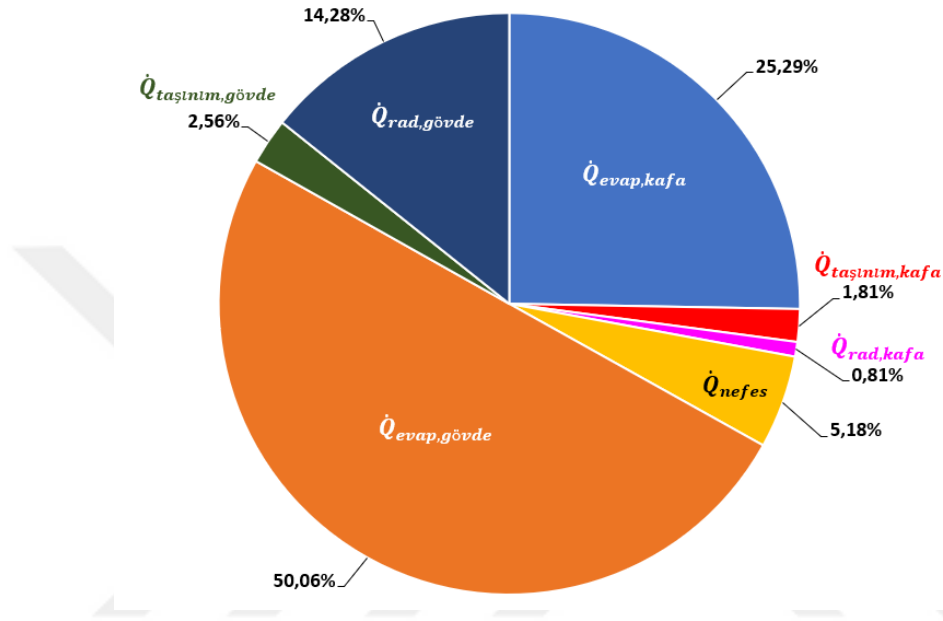
Bu bulgular, noktasal soğutma uygulamalarında kafa bölgesine yapılan üflemenin, toplam termal konforun sağlanmasında kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Kafa bölgesinden bu denli yüksek oranda ısı uzaklaştırılması, bu tekniğin etkinliğini ve enerji verimliliği açısından avantajlarını bir kez daha vurgulamaktadır.



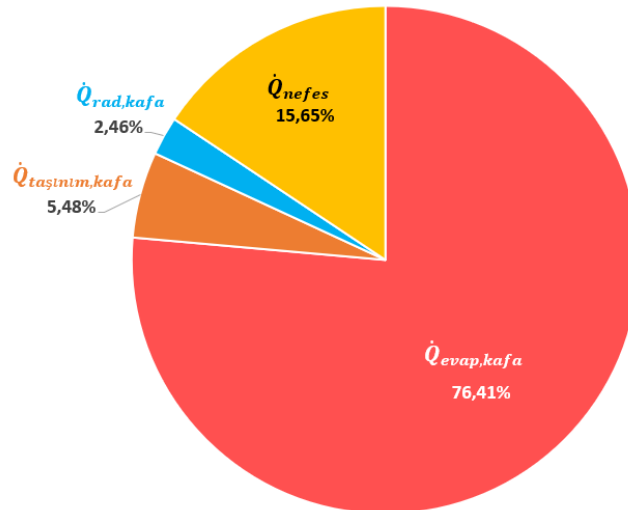
Şekil 6.4 Personelin tüm vücudu üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferine kafa ve gövde üzerinde gerçekleşen ısı transferi miktarlarının oranları

Termal denge eğrileri ve analitik modelin sonuçları incelendiğinde ikinci çarpıcı sonuçta, personel üzerinden gerçekleşen toplam ısı transferinin büyük bir kısmının **evaporatif ısı transferi** yoluyla gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Elde edilen verilere göre, toplam ısı transferinin ortalama **%75 'ten fazlası**, terleme yoluyla gerçekleşen evaporatif ısı transferinden kaynaklanmaktadır.

Bu oran, yalnızca personelin toplam vücut yüzeyi için değil, aynı zamanda kafa bölgesi özelinde incelendiğinde de benzer sonuçlar vermektedir. Kafa bölgesi, vücut yüzey alanının küçük bir kısmını oluştursa da, termal yükün azaltılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle noktasal soğutma tekniği ile doğrudan hava üflenmesi, buharlaşma mekanizmasının etkinliğini artırarak, bu bölgeden gerçekleşen ısı transferini önemli ölçüde desteklemektedir.



Şekil 6.5 Personel üzerinde gerçekleşen ısı transferi mekanizmalarının toplam ısı transferi miktarına dağılımı



Şekil 6.6 Personel kafası üzerinde gerçekleşen toplam ısı transferinde ısı transfer mekanizmalarının dağılımı

Terleme, temel olarak bir kütle transferi mekanizmasıdır ve bu mekanizmada etkili olan temel faktörlerden biri basınç farkıdır. İnsan vücudu, terleme yoluyla ısıyı buharlaşma ile uzaklaştırırken, ortam havasının veya üfleme havasının bağıl nem değeri, bu sürecin etkinliğini belirleyen kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Çoğu termal konfor çalışmasında genellikle göz ardı edilen, ancak bu çalışmada dikkat çekici bir öneme sahip olan bir diğer ısı transferi mekanizması, insanın nefes alıp verme sırasında gerçekleştirdiği ısı transferidir. Solunum yoluyla gerçekleşen bu ısı transferi, çalışmada incelenen şartların ortalamasında, vücuttan uzaklaştırılan toplam ısı transferinin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır.

Bu oran, vücut yüzeyinden taşınım (konveksiyon) yoluyla gerçekleşen ısı transferi oranından daha yüksek bir seviyede yer almaktadır. Bu bulgu, solunumun, özellikle düşük taşınım koşullarında dahi termal yüklerin yönetiminde önemli bir mekanizma olduğunu göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar hem **terleme** hem de **solunum mekanizmalarının** termal konforun sağlanmasında kritik roller oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle bağıl nem oranının düşürülmesi, terleme yoluyla gerçekleşen evaporatif ısı transferini optimize etmekte ve termal konforun etkin bir şekilde sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Diğer yandan, solunum yoluyla gerçekleşen ısı transferinin toplam ısı transferi içindeki kayda değer oranı, bu mekanizmanın termal konfor çalışmalarında daha fazla dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

6.2 Noktasal Soğutma Tekniğinde Üfleme Mesafesinin Önemi

Bu çalışmadan elde edilen üç farklı termal denge eğrisi grafiği incelendiğinde, dikkat çeken ilk bulgulardan biri, üfleç ile personel arasındaki mesafenin artmasıyla daha çeşitli üfleme havası özellikleri kombinasyonlarıyla çözümler elde edilebildiğidir. Bu durum, ilk etapta üfleç ile personel arasındaki mesafenin artırılmasının toplam ısı transferi üzerinde doğrudan olumlu bir etkisi olduğu yönünde bir yorum yapılmasına yol açabilir.

Ancak, çalışmada elde edilen sayısal veriler ve bu verilerden türetilen grafikler sağlanmamış ve bu detaylar açıklanmamış olsaydı, bir kişiye üfleçten uzaklaştıkça daha fazla ısı transferi gerçekleşeceği ve dolayısıyla ortamın daha hızlı bir şekilde termal dengeye ulaşacağı söylendiğinde, bu söylem başta mantıksız bulunabilirdi.

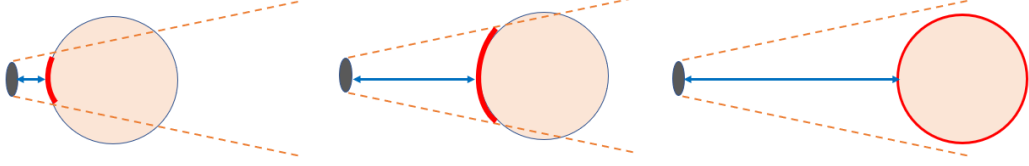
Bunun nedeni, üfleçten uzaklaştıkça üfleçten çıkan havanın kişiye ulaşana kadar daha fazla ısınacağı ve akış hızının kişiye ulaşmadan önce belirgin şekilde azalacağı gerçeğidir. Isı transferi üzerindeki temel parametreler incelendiğinde, düşük hava sıcaklığının ve yüksek hava hızının genellikle ısı transferini olumlu etkilediği bilinmektedir. Bu bağlamda, mesafenin artışıyla ilgili yapılan çıkarımlar, bu genel beklentilere ters düşebilir.

Bu noktada, üfleç ile personel arasındaki mesafe 75 cm iken 25 cm ve 50 cm mesafelerinde elde edilen sonuçlardan daha çeşitli çözüm alanlarının nasıl oluştuğuna dair bir irdelemenin yapılması gerekmektedir. Bu soruya yanıt bulmak amacıyla ek analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, üfleç ile personel arasındaki mesafenin 25 cm, 50 cm ve 75 cm olarak ele alındığı senaryoların yanı sıra, 85 cm ve 95 cm mesafeler için de personelin kafası üzerindeki hava akış hızının ortalama değeri analiz edilmiştir.

Bu analizlerin sonuçları, personelin kafası üzerindeki ortalama hız dağılımının, üfleç ile personel arasındaki mesafe arttıkça bir noktaya kadar arttığını, ancak mesafe belirli bir eşiği aştığında tekrar azalmaya başladığını göstermektedir (bkz. Şekil 6.9, Şekil 6.10, Şekil 6.11)

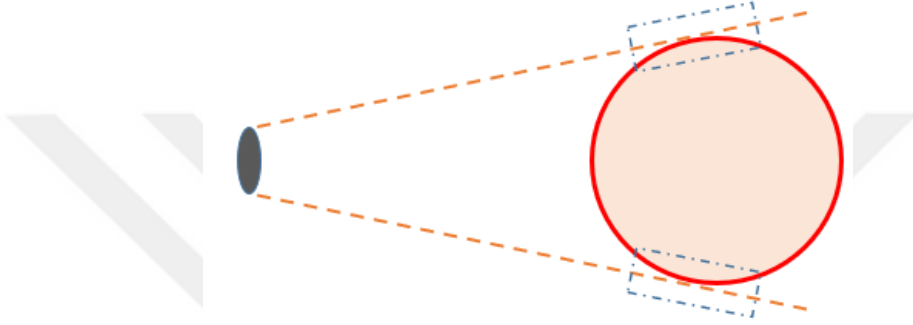
Bu durum, aktif akış alanı kavramı çerçevesinde açıklanabilir. Dairesel kesite sahip bir üfleçten çıkan hava akımı, hareket ederken dairesele sahip konik bir yayılma gösterir. Bu nedenle, üfleçten çıkan hava akışı, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 'de gösterildiği gibi taralı alanlar arasında bir etkili akış alanı oluşturur.

Hedef obje, bu etkili akış alanı içinde konumlandırıldığında, akış alanının obje üzerinde etkili olduğu yüzey alanının mesafeye bağlı olarak değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Obje, üflece daha yakın konumlandığında, akış alanından etkilenen yüzey alanı daha küçük olurken, obje üfleçten uzaklaştırıldıkça etkili yüzey alanı artmaktadır. Ancak, belirli bir mesafeden sonra obje tamamen etkili akış alanı tarafından kapsanmış olsa dahi, akış alanı objenin dışında kalan bölgelere de yayılmaktadır. Bu durum, objenin bulunduğu mesafeye bağlı olarak akış rejimlerinde meydana gelen değişiklikleri ve ısı transfer mekanizmasını etkileyen bir diğer önemli faktörü ortaya koymaktadır.



Şekil 6.7 Üfleme mesafesine göre etkili ısı transfer yüzey alanının değişimi

İşte bu noktada optimum noktanın etkili akış alanını objeyi tamamen kapsayacak olduğu ancak akış alanı çizgilerinin de objenin sınırlarına teğet geçtiği yer olması gerekmektedir. Böyle maksimum ısı transferi etkisi elde edilebilecektir.



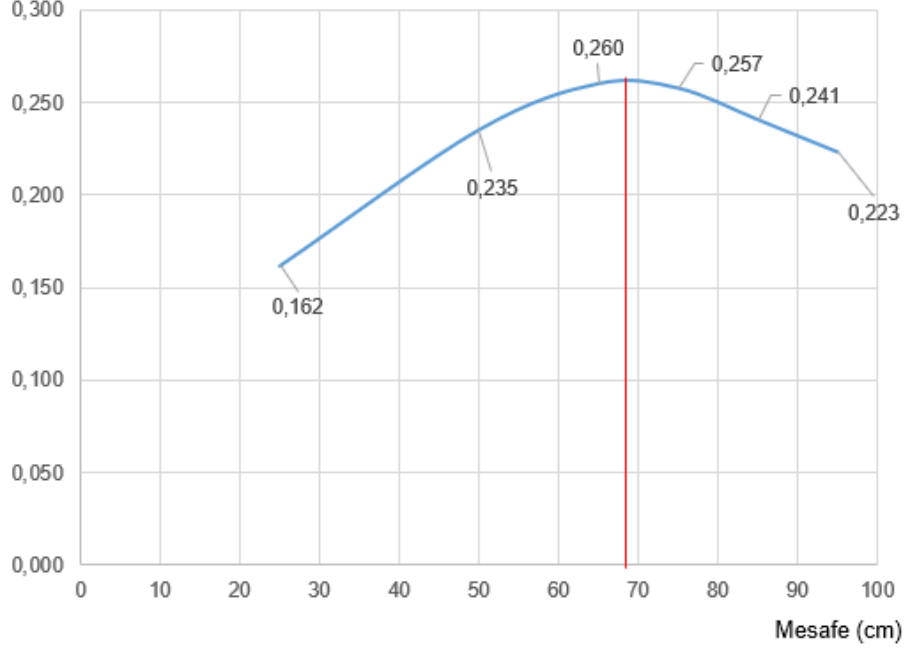
Şekil 6.8 En etkili ısı transferi için optimum üfleme mesafesinin gösterimi

Bu durumda etkili olan diğer bir faktör, görsellerde kesikli çizgi ile gösterilen akış alanı sınırlarının doğru bir şekilde belirlenmesidir. Bu sınırlar, üfleç çıkışındaki hava üfleme hızına doğrudan bağlıdır. Üfleç çıkışındaki hava hızının artması, konik akış yapısının açılma açısını daraltmaktadır. Bu durum, maksimum ısı transfer alanını elde etmek için üfleç ile hedef obje arasındaki mesafenin görece daha uzun olması gerektiğini göstermektedir.

Bu ilişkiyi hem daha iyi anlamak hem de doğrulamak amacıyla, üfleç çıkışındaki üfleme havası hızlarının 1 m/s, 6 m/s ve 10 m/s olduğu durumlar için, 25 cm ile 95 cm mesafeleri arasında personelin kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı grafikleri çıkarılmıştır. Bu grafikler, akış alanı sınırlarının ve hız dağılımlarının mesafeye ve üfleme hızına bağlı değişimini incelemek adına önemli veriler sunmaktadır.

Personel kafası üzerinde
oluşan ortalama hız dağılımı
(m/s)

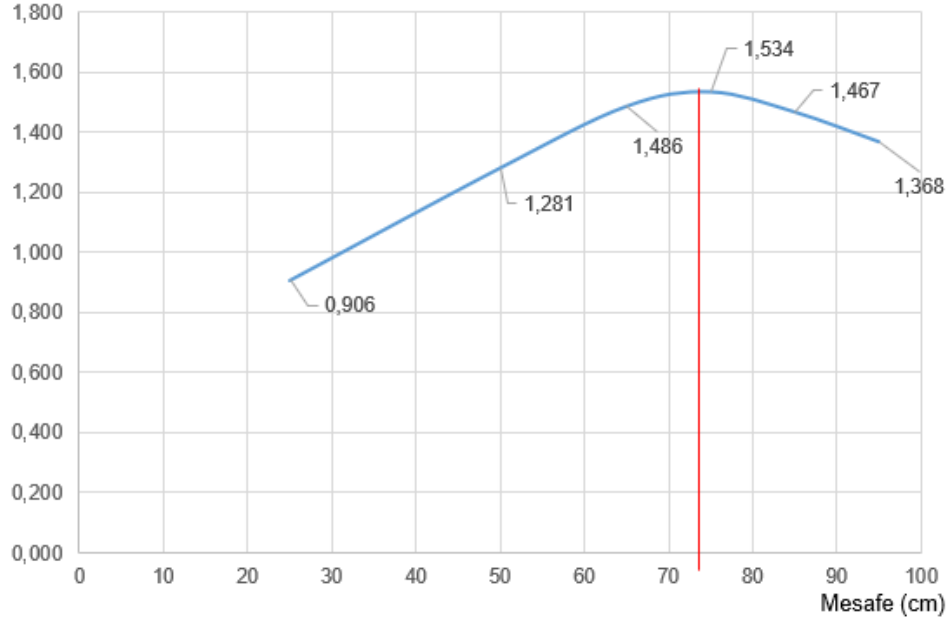
Vüfleme = 1 m/s



Şekil 6.9 1 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı

Personel kafası üzerinde
oluşan ortalama hız dağılımı
(m/s)

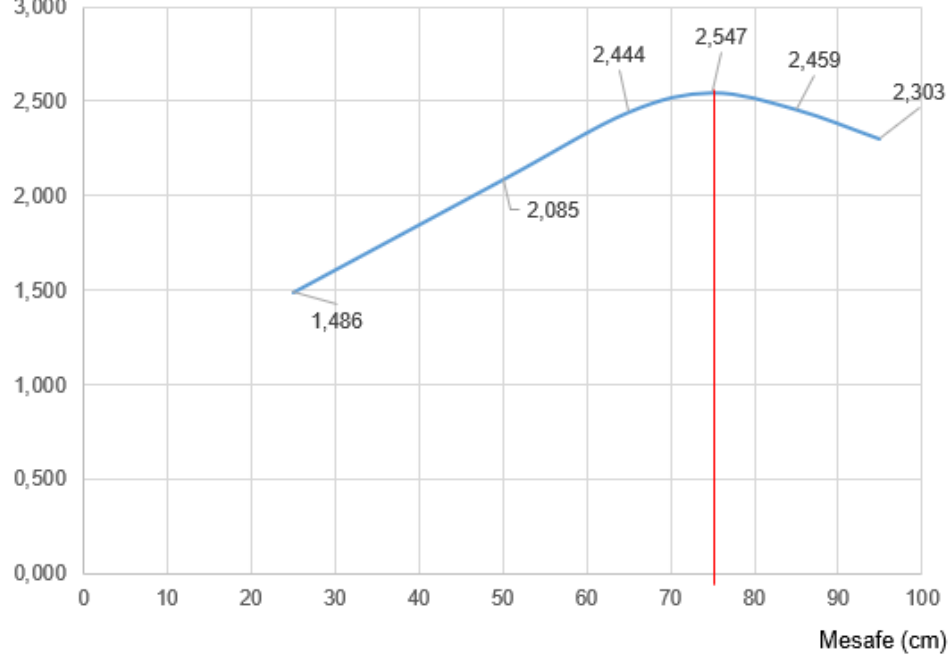
Vüfleme = 6 m/s



Şekil 6.10 6 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı

Personel kafası üzerinde
oluşan ortalama hız dağılımı
(m/s)

Üfleme = 10 m/s



Şekil 6.11 10 m/s üfleme hızında üfleme mesafesine göre personel kafası üzerinde oluşan ortalama hız dağılımı

Elde edilen grafikler, üfleme hızına bağlı olarak optimum mesafe değerinin değiştiğini açıkça göstermektedir. Bu sonuç, noktasal soğutma tekniğinin uygulanması durumunda, soğutulacak objenin boyutunun ve üfleme havası hızının birlikte değerlendirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, optimum üfleç mesafesinin doğru bir şekilde belirlenmesi, hem soğutma verimliliğinin artırılması hem de ısı transfer mekanizmalarının daha etkin bir şekilde yönetilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

6.3 Silika Jel ile Aktif Nem Alma

Regresyon analizi sonuçlarına göre, noktasal soğutma tekniği ile zırhlı askeri araç içerisindeki askeri personelden uzaklaştırılan toplam ısı transferi değerini etkileyen dört ana parametre arasından, en etkili parametrenin üfleme havasının bağıl nem değeri olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, toplam ısı transferi içerisinde yer alan farklı ısı transferi mekanizmalarının ağırlıkları incelendiğinde, en öne çıkan mekanizmanın evaporatif ısı transferi olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, bağıl nem parametresinin önemini bir başka açıdan da ortaya koymaktadır.

Bu bağlamda, aktif bir soğutma sistemi olmadan, havanın bağıl nemini düşürme amacıyla, katı bir nem alıcı malzeme olan silika jel kullanılarak bir iklimlendirme sisteminde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, silika jel malzemesinin böyle bir teknik kullanımı için hem bazı teknik sınırlamalar hem de avantajlar ve dezavantajlar sunmaktadır.

Deneysel çalışmalardan çeşitli çıkarımlar yapılmıştır. Öncelikle, silika jel malzemesi üzerinden geçirilen bir hava akışına oldukça hızlı reaksiyon vererek havadan önemli ölçüde nem çekebilmektedir. Silika jel, genellikle dökme boncuk yapıda üretilen bir malzemedir. Bu boncuk yapılar bir araya getirildiğinde ve hava akışına dik bir filtre gibi konumlandırıldığında, hava akışını önemli ölçüde engellemektedir. Bu durum, basınç düşüşünü artırarak akış hızında ciddi bir azalmaya neden olurken, aynı zamanda nem alma kapasitesini de önemli ölçüde artırmaktadır.

Ancak, hava akışını rahatlatmak için bir tasarıma geçildiğinde, silika jel malzemesinin havanın bağıl nemini düşürme performansında bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum, basınç düşüşü ile nem alma kapasitesi arasında bir getiri-götürü analizi yapılması gerektiğini göstermektedir. Optimum performansı sağlayabilmek için bu iki parametre arasında dikkatli bir dengeleme yapılması gereklidir.

Yapılan deneylerde açıkça görülmektedir ki, silika jel havadan nem çekerken aynı zamanda ısınmaktadır. Bu durum, havadaki nemin buharlaşma gizli ısısının silika jele ve dolayısıyla silika jel ile temas halindeki havaya geçmesiyle açıklanabilir. Sonuç olarak, nem alma süreci sıcaklık artışıyla birlikte gerçekleşmektedir.

Silika jel ile gerçekleştirilen deneylerde, basınç düşüşü, nem alma kapasitesi ve hava akış hızı olmak üzere üç ana parametrenin birbiriyle etkileşim içinde olduğu gözlemlenmiştir. Basınç düşüşünün artması, yüksek nem alma kapasitesine ulaşılmasını sağlarken, aynı zamanda hava hızında düşüşe ve paralel olarak sıcaklık artışına neden olmaktadır.

Öte yandan, silika jel parçacıklarının akış havası içerisinde yüzdürüldüğü yüzer yatak tekniği ile yapılan denemelerde, dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. İlk olarak, fiziksel olarak yüzdürme hareketinin verimli bir şekilde tasarlanması gereklidir. İkinci olarak, bu teknik ile nem alma kapasitesinden fedakârlık yapılması söz konusu olduğundan, basınç düşüşü, hava akış hızı ve nem

alma kapasitesi arasında bir getiri-götürü analizi yapılarak sistem performansı değerlendirilmelidir.

Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları derlenerek Tablo 6.1 oluşturulmuştur. Bu tablo, nem alma kapasitesi ve hava akış hızı gibi temel parametrelerin etkileşimlerini ve bu etkileşimlerin sistem üzerindeki genel etkilerini özetlemektedir.

Tablo 6.1 Silika jel deneyleri sonuçları

Silika Yerleşimi	Emiş Gücü (Watt)	Süre (sn)	Silika Miktarı (g)	Hız (m/s)	Ort RHgiriş (%)	Ort RHçıkış (%)	Tgiriş (°C)	Tçıkış (°C)	1800 sn sonunda toplam Nem alma (g)	1g nem alma karşısında sıcaklık artışı	1800sn sonunda toplam hava geçişi (m³)	grsubuharı /m³hava	Sıcaklık artışı - Nem çekme kapasitesi parametresi
Yatay, Tam Dolu	400	1800	355	0,76	86,7	13,2	26	41,4	32,32	0,476	2,7	12,03	0,04
Yatay, Tam Dolu	400	1800	710	0,75	85,6	9,1	26	43,0	41,41	0,411	2,7	15,62	0,03
Yatay, Keseli	400	1800	355	3,5	84,2	33,0	26	35,1	55,43	0,165	12,4	4,48	0,04
30° eğimli	400	1800	355	5,85	83,5	63,2	26	28,4	42,73	0,056	20,7	2,07	0,03
30° eğimli	400	1800	710	7	85,7	59,4	26	29,6	58,5	0,062	24,7	2,36	0,03

Tablo 6.1’den de görülebileceği üzere, silika jeller havadan ne kadar fazla nem çekerse, o kadar fazla ısınmaktadır. Bu durum, silika jel malzemesinin yerleşim düzeninden veya uygulanan teknikten bağımsız olarak, hal değişim gizli ısısına bağlı bir süreçtir. Dolayısıyla, bu malzemenin bir nem alma sistemi içerisinde kullanılması durumunda, hedeflenen nem alma miktarına göre ortaya çıkacak ısı artışı önceden tahmin edilebilir.

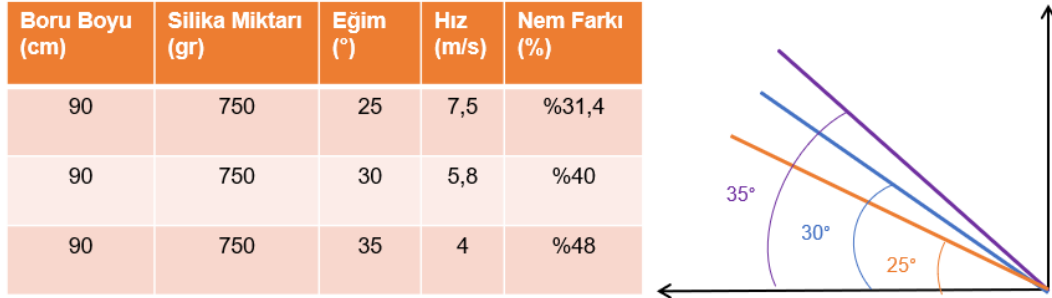
Tablonun son sütununda, nem çekme kapasitesine karşılık gelen sıcaklık artışı oranı değerlendirilmiştir. Bu oran, uygulanan tekniklerden bağımsız olarak her durumda benzer sonuçlar vermektedir. Bu bulgu, silika jel malzemesinin nem alma kapasitesine bağlı olarak oluşacak sıcaklık artışının, sistem tasarımında ve performans tahminlerinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu durum, özellikle termal dengeyi koruma ve sistem performansını optimize etme açısından kritik bir öneme sahiptir.

Silika jel malzemesinin nem alma kapasitesi, bu malzemenin filtre şekli ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle, silika jelin tam dolu bir filtre olarak planlandığı ve miktarının en yüksek seviyede olduğu durumda, havadan alınan nem miktarının maksimum olduğu görülmektedir. Ancak, bu tasarım düşük hava akış hızını beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, hava akış hızını artırmak amacıyla

daha güçlü bir emiş gücü kullanılarak havanın silika jel içinden geçmesi sağlanmalıdır. Bu işlem, enerji tüketiminin artmasına yol açar. Bu bağlamda, tasarımcıların enerji tüketimi ile nem alma kapasitesi arasında bir fayda-maliyet analizi yapmaları gerekmektedir.

Hava hızının kritik olduğu ve akış hızından ödün verilmesinin istenmediği durumlarda, silika jel boncuklarının eğimli bir düzlemde yerleştirilmesi ve yüzer hareket (çalkalama) ile çalıştırılması en uygun çözüm olabilir. Ancak, bu yöntem nem alma kapasitesinin maksimum seviyeye ulaşamaması gibi bir dezavantaj yaratır.

Silika jel kitinin eğimli bir düzende kullanılması durumunda, eğim açısının etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Eğim açısı, hem kullanılan silika jel miktarını hem de üzerinden geçirilen havanın hızını etkileyerek yüzdürme etkisinin oluşumunu belirlemektedir. Bu nedenle, eğim açısının da bir fayda-maliyet analizi ile optimize edilmesi gereklidir. Bu bağlamda, eğim açısının etkisini göstermek amacıyla 25°, 30° ve 35°'lik eğimler için yapılan deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve aşağıdaki tabloda sunulmuştur.



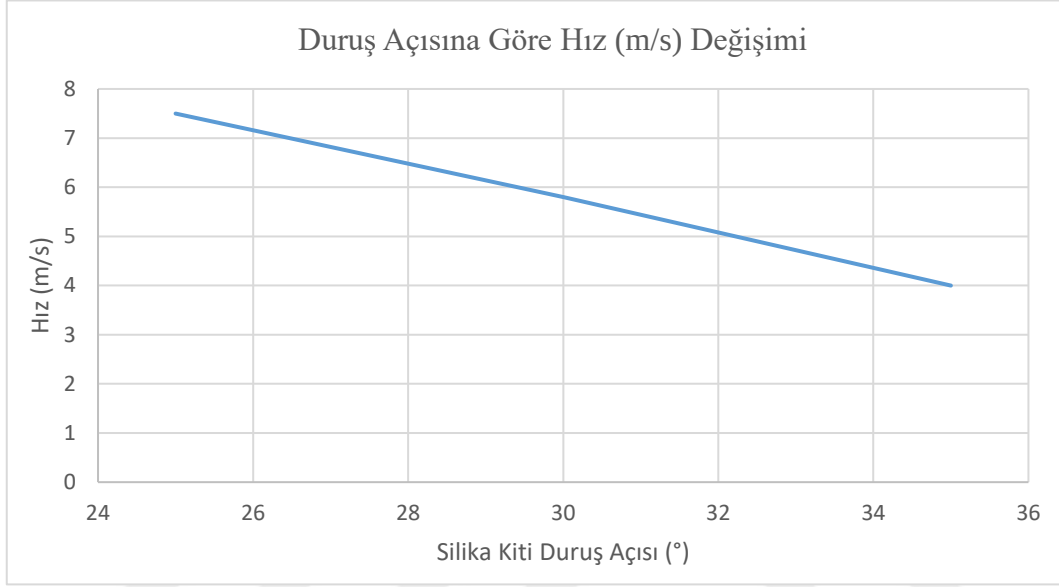
Şekil 6.12 Farklı silika jel eğimi açılarında nem alma ve hava hızı değerleri

Bu tablodan da anlaşılacağı üzere, eğim açısının artması, silika jel boncuklarının çalkalanma etkisini artırmakta ve bu durum nem alma kapasitesini pozitif yönde etkilemektedir. Ancak, buna paralel olarak hava akış hızında bir düşüş gözlemlenmektedir. Ters bir senaryoda, eğim açısının azalmasıyla nem alma kapasitesinde azalma görülmekte ancak hava akış hızı artmaktadır.

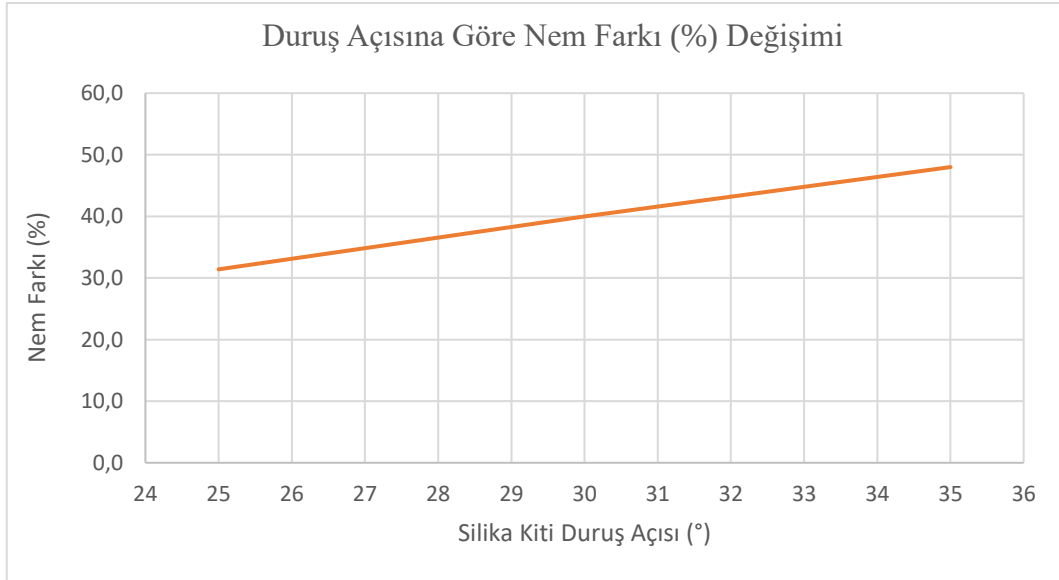
Hava hızı ve nem farkı değişimi, bu tez çalışmasının odaklandığı senaryoda en kritik iki parametre olarak ön plana çıkmaktadır. Termal denge eğrisi grafiklerine bakıldığında, noktasal soğutma tekniği ile yüksek hava üfleme hızı değerlerinin

pozitif bir etki yarattığı açıkça görülmektedir. Benzer şekilde, düşük bağıl nem seviyeleri de sistem performansına olumlu katkı sağlamaktadır.

Hava akış hızının ve nem farkının, silika jel kitinin konumlandırıldığı eğim açısına göre nasıl değiştiği, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te sunulan grafiklerle daha net bir şekilde açıklanmıştır. Bu grafikler, eğim açısının sistem performansı üzerindeki etkilerini daha somut bir biçimde göstermektedir.



Şekil 6.13 Silika jel kiti eğimine göre hava hızı değişimi



Şekil 6.14 Silika jel kiti eğimine göre silika jel nem alma farkı değişimi

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, silika jelin bir nem alıcı olarak böyle bir sistemde kullanılabilmesi için havanın hedef giriş ve çıkış bağıl nem değerleri, giriş ve çıkış sıcaklık değerleri ve üfleme hızı arasında kapsamlı bir fayda-maliyet analizi

yapılması gerekmektedir. Bazı coğrafi koşullarda, silika jel tek başına bir çözüm olarak kullanılabilir ve taze havanın ya da araç içerisindeki havanın silika jel üzerinden geçirilerek personele üflenmesi yöntemi ile yeterli performans sağlanabilir. Ancak, nem alma işlemi sonrasında havanın sıcaklığında meydana gelen artış, silika jelin bu tür sistemlerde tek başına kullanımını sınırlayabilir.

Bu nedenle, silika jelin performansını artırmak ve sıcaklık artışı gibi dezavantajları en aza indirmek amacıyla, ek tekniklerin veya sistemlerin entegrasyonu değerlendirilmelidir. Örneğin, silika jel ile nem alma işlemini destekleyecek soğutma teknolojilerinin entegre edilmesi, sistemin genel verimliliğini artırabilir. Bu yaklaşım, silika jelin sağladığı avantajları daha iyi bir şekilde kullanırken, potansiyel dezavantajların etkisini azaltarak daha etkili bir çözüm sunabilir.

Bu bağlamda, silika jelin kullanımına yönelik yapılan çalışmalarda, hem malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri hem de sistemin operasyonel gereklilikleri dikkate alınarak detaylı bir analiz yapılması önerilmektedir. Bu analizler, silika jelin yalnızca etkin bir nem alıcı olarak değil, aynı zamanda enerji ve termal yönetim açısından optimize edilmiş bir bileşen olarak kullanılmasına olanak tanıyacaktır.

6.4 Hibrit Sistem Önerileri

Bir iklimlendirme sisteminde, fan kullanılarak havanın yönlendirilmesi kesin bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Bu bağlamda, pek çok iklimlendirme sisteminde fan hızının ayarlanmasıyla üfleme hızının kontrolü zaten mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, silika jel kullanımı sayesinde üfleme havasının bağıl nem seviyesinin değiştirilebileceği de görülmüştür. İklimlendirme sisteminin etkinliği açısından, üfleç ile personel arasındaki mesafenin etkisi olduğu anlaşılmış olup, mekanik bir tasarım çözümüyle ayarlanabilir bir üfleç konumunun sağlanması mümkündür. Bu bağlamda, üfleme hızı, bağıl nem ve üfleç ile personel arasındaki mesafe gibi faktörlere odaklanılmıştır.

Regresyon analizi sonuçları, böyle bir iklimlendirme sistemi çözümünde en önemli ikinci parametrenin üfleme havası sıcaklığı olduğunu ortaya koymuştur. Dolayısıyla, üfleme havası sıcaklığına yönelik bir çözümün geliştirilmesi, tüm

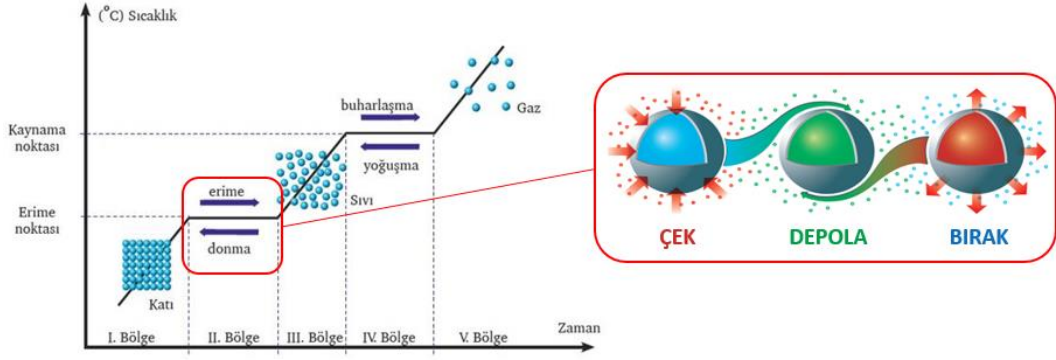
parametreleri bir arada değerlendirebilecek bütüncül bir sistem çözümüne ulaşmak için kritik öneme sahiptir.

Günümüzde, sivil otomotiv araçlarında olduğu gibi askeri zırhlı araçlarda da havanın sıcaklığını düşürmek için soğutma çevrimleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, genellikle araç motorundan aldığı mekanik tahrik ile çalışmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında, araç motorunun çalışmadığı durumlar için alternatif bir çözüm arayışına gidilmiştir.

Bu durumda, aktif bir soğutma çevrimi yerine, ısı transferi temelli bir çözüm önerisi sunulabilir. Böylece, geliştirilecek olan iklimlendirme sisteminde, "soğuk" veya "soğutulmuş" üfleme havası elde etmek mümkün hale gelebilir. Bunun sağlanabilmesi için, iklimlendirme sistemine giren havanın sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa sahip "soğuk" bir kaynağa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, bir "soğuk enerji deposu" olarak kullanılabilecek faz değiştiren malzemeler (PCM, Phase Change Materials), söz konusu sistem için uygun bir çözüm olabilir.

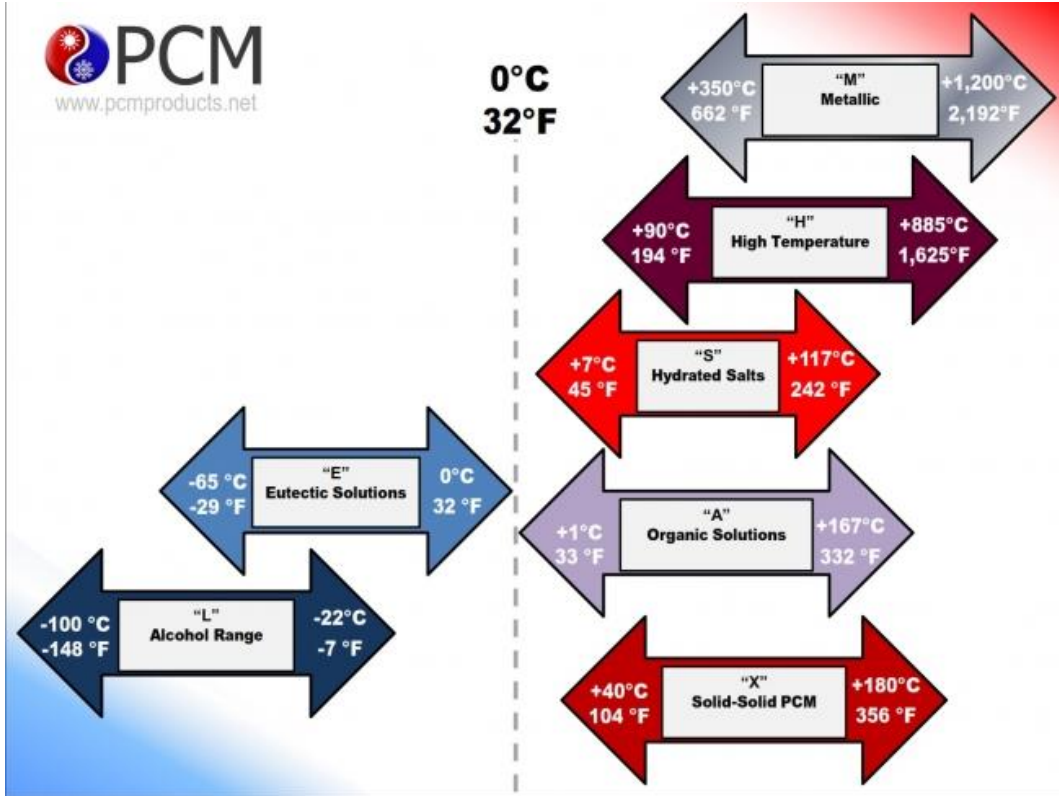
Faz değiştiren malzemeler, düşük sıcaklıkta enerji depolama ve ısı transferi özellikleri sayesinde, sistemin enerji verimliliğini artıracak potansiyele sahiptir. Bu malzemelerin etkin bir şekilde entegre edilmesi, araç motorunun çalışmadığı durumlarda dahi etkili bir soğutma sağlayarak sistemin sürekliliğini ve kullanıcı konforunu artırabilir.

Faz değiştiren malzemeler (PCM, Phase Change Materials), temel olarak katı-sıvı hal değişimi sırasında açığa çıkan veya soğurulan enerjiden yararlanmak amacıyla geliştirilmiş malzemelerdir. Bir maddenin katı halden sıvı hale geçişi, belirli bir hal değişim enerjisini gerektirir. Bu enerji maddeye verildiğinde veya madde bu enerjiyi çevresinden çekebildiğinde, ergime sıcaklığında maddenin sıcaklığı sabit kalır ve alınan enerji, maddenin faz değiştirmesini sağlar. Bu süreç tersinir bir doğaya sahiptir. Zıt yönde düşünüldüğünde, ilgili hal değişim enerjisi maddeden uzaklaştırıldığında, maddenin sıcaklığı donma (ergime) sıcaklığında sabit kalır ve uzaklaştırılan enerji maddenin tekrar katı hale geçmesine neden olur.



Şekil 6.15 Hal değişimi ve hal değişim enerjisi

Faz değiştiren malzemeler, geniş bir sıcaklık aralığında farklı erime ve donma noktalarına sahip olacak şekilde tasarlanmış ve geliştirilmiştir (Şekil 6.16 [46]).



Şekil 6.16 Farklı erime/donma sıcaklıklarına göre faz değiştiren malzeme çeşitleri

Bu malzemeler; ilaç, gıda, sağlık, taşımacılık, inşaat, kimya gibi birçok sektörde, soğutucu veya soğuk enerji kaynağı olarak farklı tekniklerle kullanılmaktadır. Kullanım amacına göre, tuz, toz veya sıvı gibi farklı fiziksel formlarda üretilen bu malzemeler, farklı paketlenme çözümleriyle sistemlere entegre edilebilmektedir (Şekil 6.17 [47, 48]).



Şekil 6.17 Faz değıştiren malzemelerin farklı şekillerde paketlenme örnekleri

Bu tez çalışması kapsamında, silika jel kullanılarak üfleme havasının bağıl nem seviyesinin düşürülmesi sağlanmıştır. Ancak, bu işlem sonucunda üfleme havasının sıcaklığında bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu artış, hedeflenen üfleme sıcaklığına ulaşılması için üfleme havasının sıcaklığının düşürülmesini gerektirebilir. Bu bağlamda, faz değıştiren malzemelerin entegre edildiğı bir sistem tasarımı, etkili bir çözüm sunabilir.

Bir ısı değıştirici kiti tasarımı ile üfleme havası, silika jel kitinden geçtikten sonra veya önce, faz değıştiren malzeme içeren bir ısı değıştiriciden geçirilerek sıcaklığının düşürülmesi sağlanabilir. Araç motoru çalışırken, aracın mevcut iklimlendirme sisteminden sağlanan soğutucu yardımıyla faz değıştiren malzemelerin katı faza geçişı gerçekleştirilebilir. Daha sonra, araç motorunun çalışmadığı durumlarda, bu ısı değıştirici kitinden geçen üfleme havası, faz değıştiren malzeme yardımıyla soğutulabilir.

Bu noktada, kullanılacak faz değıştiren malzemenin seçimi, ısı değıştiricinin tasarımı, faz değıştiren malzeme kitinin silika jel kitinden önce mi yoksa sonra mı konumlandırılacağı gibi konuların detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, sistemin optimum tasarımına yön verecek bilimsel verilerin oluşturulması için, faz değıştiren malzemelerin davranışlarının ve bu malzemelerin silika jel ile birlikte bir sistemde kullanım senaryolarının detaylı bir şekilde çalışılması gereklidir.

Bu çalışma kapsamında yapılacak detaylı analizler ve deneysel sonuçlar, faz değıştiren malzemeler ile silika jel kullanımının entegre edildiğı yenilikçi bir iklimlendirme sistemi tasarımının etkinliğini artırmada önemli bir katkı sağlayacaktır.

6.5 Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında yapılan araştırmalar, öncelikli olarak askeri zırhlı araçların kullanımında ortaya çıkan spesifik bir ihtiyaca yönelik çözüm geliştirme amacı taşımaktadır. Ancak, elde edilen bulgular ve sonuçlar, yalnızca bu özel uygulama alanı ile sınırlı kalmayıp, farklı birçok sektörde ve çeşitli uygulama alanlarında ortaya çıkan sorunların çözümüne ışık tutabilecek niteliktedir.

Bu çalışma, insanı serinletmenin yalnızca üzerine soğuk hava üflemeyle sınırlı olmadığını, aksine insan vücudundan ısı transferi yoluyla enerji uzaklaştırmanın da bir serinletme yöntemi olduğunu göstermiştir. Bu bakış açısıyla, serinletme işleminin, gerektiğinde sıcak hava üflenerek de sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Bu bulgu, iklimlendirme teknolojilerine yönelik yeni ve yenilikçi bir perspektif sunmaktadır.

Ayrıca, pasif nem alıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılan silika jellerin, belirli koşullar altında aktif bir nem alıcı olarak kullanılabileceği deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Bu yaklaşım, silika jelin yalnızca nem kontrolünde değil, enerji verimliliği ve sistem optimizasyonu alanında da yeni kullanım olanaklarını ortaya koymaktadır.

Tez kapsamında oluşturulan analitik model, farklı ihtiyaçlara yönelik termal denge eğrilerinin elde edilmesine olanak sağlamış ve mevcut iklimlendirme sistemlerinin optimizasyonu için uygulanabilir bir yöntem sunmuştur. Bu modelin, özellikle enerji tüketiminin azaltılması ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda önemli katkılar sağlayabileceği görülmüştür. Bu bağlamda, enerji tüketiminin minimize edilmesine yönelik olarak, hem endüstriyel hem de günlük yaşam uygulamalarında dikkate değer bir potansiyel tasarruf sağlanabileceği öngörülmüştür.

Bu çalışmanın bir önerisi olarak, farklı çalışma koşulları ve ihtiyaçlar doğrultusunda termal denge eğrilerinin çıkarılması ve mevcut sistem tasarımlarının bu veriler ışığında optimize edilmesi önerilmektedir. Bu yaklaşım, iklimlendirme sistemlerinin belirli uygulama ihtiyaçlarına göre özelleştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Bir diğer öneri, silika jellerin aktif bir nem alıcı olarak iklimlendirme sistemlerine entegre edilmesidir. Bu entegrasyon, elektronik bir kontrol sistemiyle desteklenerek silika jel öncesi ve sonrası hava özelliklerinin anlık olarak ölçülmesi, bir algoritma ile işlenmesi ve sistemin buna göre reaksiyon göstererek en yüksek verimle

çalışması sağlanabilir. Bu şekilde, nem kontrolü dinamik ve adaptif bir süreç haline gelebilecektir.

Silika jel kullanımında önemli bir konu, boncukların "çalkalanması" hareketidir. Bu hareketin otomatik ve kontrollü bir sistemle sağlanması, sürekli değişken konumlandırma çözümleri sunarak sistemin verimliliğini artırabilir. Örneğin, mekanik bir tasarımla desteklenmiş, hareketli bir silika jel yatağı sistemi bu amaçla kullanılabilir.

Hem silika jelin hem de faz değıştiren malzemelerin aynı sistemde kullanılması durumunda, sistemin kendi kendini yenileyebilme kabiliyeti önem kazanacaktır. Doygunluğa ulaşan silika jellerin, motor odasından alınan sıcak hava ile ısıtılarak tekrar nem çekebilir hale getirilmesi mümkündür. Benzer şekilde, sıvı faza geçen faz değıştiren malzemeler, araç motoru çalışırken normal klima sisteminden elde edilen soğuk hava ile tekrar katı faza geçirilebilir. Bu döngülerin otomatik olarak sağlanması, sistemin sürdürülebilirliğini ve etkinliğini artıracaktır.

Bu teknikler, yalnızca zırhlı veya sivil araç çözümleri için değil, aynı zamanda farklı mekânlarda kullanılan sistemlerde de uygulanabilir. Özellikle noktasal soğutmanın tercih edildiği uygulamalarda, enerji verimliliği açısından bu yöntemlerin önemli faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, bir "soğutma" ihtiyacına yönelik çözümler geliştirilmiş olsa da elde edilen veriler, "ısıtma" ihtiyaçlarına da ışık tutmaktadır. Isı transferi çift yönlü bir süreç olduğu için, bu çalışmadan elde edilen bulgular, ısıtma sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla da değerlendirilebilir. Örneğin, noktasal ısıtma sistemleri üzerinde çalışıldığında, ilgili objeye "yeterli" düzeyde ısıtma sağlanmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, bu tezde elde edilen veriler, hem soğutma hem de ısıtma sistemleri için önemli bir kaynak teşkil edecektir.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, ilerleyen aşamalarda farklı araştırma alanlarına ve yenilikçi sistem tasarımlarına kapı aralayacak fırsatlar sunmaktadır. Günümüz teknolojik gelişmeleriyle birlikte, kontrollü sistem tasarımları sayesinde hem yeni sistem çözümlerinin geliştirilmesi hem de mevcut sistemlerin verimliliğinin artırılması mümkün olacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] FNSS Savunma Sistemleri A.Ş., "FNSS Resmi Web Sitesi." [Online]. Available: <https://www.fnss.com.tr>.
- [2] S. International Organization for, "ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria," 2005.
- [3] A. Ashrae, "Standard 55-2020: Thermal environmental conditions for human occupancy," *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta*, 2020.
- [4] E.-B. Kim and J.-K. Park, "Proposal for a Heat Balance Model Tailored to the Korean Peninsula," *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 50, no. S, pp. 105-115, 2014. DOI: 10.1007/s13143-014-0053-2.
- [5] D. Lai and Q. Chen, "A two-dimensional model for calculating heat transfer in the human body in a transient and non-uniform thermal environment," *Energy and Buildings*, vol. 118, pp. 114-122, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.02.051
- [6] V. Bradshaw, *The building environment: Active and passive control systems*, John Wiley & Sons, 2010.
- [7] M. Nishi, "Breathing of Humans and its Simulation", Master's thesis, University of Erlangen-Nuremberg, Erlangen, Germany, 2014. [Online]. Available: https://unit.aist.go.jp/ieco/ect/pdf/Nishi_Masterthesis.pdf
- [8] E. D. Yıldırım, "A Mathematical Model of The Human Thermal System" Master's thesis, İzmir Institute of Technology, İzmir, Turkey, 2005. [Online]. Available: <https://openaccess.iyte.edu.tr/bitstream/11147/3335/1/T000421.pdf>
- [9] ISO 11092:2014, "Textiles - Physiological effects - Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hotplate test)," 2014.
- [10] A. Rahman, "Effective Temperature Calculations Techniques (Methodology)," 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.30476.77444.
- [11] E. Specht, "Human as heat technical reactor," Otto-von-Guericke-University Magdeburg, Magdeburg, Germany, Jul. 2004. [Online]. Available: <https://paperzz.com/doc/8270712/humans-as-heat-technical-reactor>

- [12] M. Bilgili, B. Şahin, and E. Şimşek, "İnsan vücudundan solunum yoluyla gerçekleşen ısı kaybının analizi", *Tesisat Mühendisliği*, vol. 113, pp. 61-67, 2009.
- [13] İ. Atmaca and A. Yiğit, "Isıl Konfor ile İlgili Mevcut Standartlar ve Konfor Parametrelerinin Çeşitli Modeller ile İncelenmesi," in *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 2009, pp. 543-555. [Online]. Available: http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/9c7d49fe50d4c73_ek.pdf?dergi=1116
- [14] K. Öngel and H. Mergen, "Isıl Konfor Parametrelerinin İnsan Vücudundaki Etkilerine Yönelik Literatür Taraması," *S.D.Ü. Tıp Fakültesi Dergisi*, pp. 21-25, 2009. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/196755>
- [15] HEVAC Humidity Group, "Humidity and its Impact on Human Comfort and Wellbeing in Occupied Buildings," Apr. 2016. [Online]. Available: https://www.feta.co.uk/uploaded_images/files/Humidity%20and%20the%20impact%20on%20human%20comfort%20250416.pdf
- [16] M. Bilgi and F. Kalaoğlu, "Özel Apre Tekniklerinin Askeri Kumaşların Performans ve Konforu Üzerindeki Etkileri," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 4, pp. 343-347, 2010. [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/218185>
- [17] A. Marmaralı and N. Oğlalcıoğlu, *Giysilerde Isıl Konfor*, İzmir, Turkey, 2013
- [18] A. Yiğit, "The Computer-Based Human Thermal Model," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 25, no. 7, pp. 969-977, 1998. DOI: 10.1080/00140139408963659.
- [19] S. Zhu, D. Dalgo, J. Srebric, and S. Kato, "Cooling efficiency of a spot-type personalized air-conditioner," *Building and Environment*, vol. 121, pp. 35-48, 2017. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.05.007.
- [20] D. Gosh, M. Wang, E. Wolfe, K. Chen, S. Kaushik, and T. Han, "Energy Efficient HVAC System with Spot Cooling in an Automobile - Design and CFD Analysis," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, vol. 5, no. 2, 2012. DOI: 10.4271/2012-01-0641.
- [21] A. E. Kabeel, G. I. Sultan, Z. A. Zyada, and M. I. El-Hadary, "Performance study of spot cooling of tractor cabinet," *Energy*, vol. 35, pp. 1679-1687, 2010. DOI: 10.1016/j.energy.2009.12.016
- [22] M. R. Min, "Experimental Study of the Performance and Thermal Comfort of a Spot Cooling System," 1991. [Online]. Available: https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_5614.pdf
- [23] D. Lai and Q. Chen, "A two-dimensional model for calculating heat transfer in the human body in a transient and non-uniform thermal environment," *Energy and Buildings*, vol. 118, pp. 114-122, 2016. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.02.051
- [24] C. Albuquerque and J. I. Yanagihara, "An integrated model of the thermoregulatory and respiratory systems of the human body," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 116, 2020, Art. no. 104683. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104683

- [25] K. Daou, R. Z. Wang, and Z. Z. Xia, "Desiccant cooling air conditioning: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, pp. 55–77, 2006. DOI: 10.1016/j.rser.2004.09.010.
- [26] O. M. Zaki, R. H. Mohammed, O. Abdelaziz, "Separate sensible and latent cooling technologies: A comprehensive review", *Energy Conversion and Management*, vol. 256, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115380>.
- [27] C. X. Jia, Y. J. Dai, J. Y. Wu, R. Z. Wang, "Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system", *International Journal of Refrigeration*, vol. 30, pp. 345-353, 2007.
- [28] M. Goldsworthy, S. D. White, "Limiting performance mechanisms in desiccant wheel dehumidification", *Applied Thermal Engineering*, vol. 44, pp. 21-28, 2012. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.03.046.
- [29] H. Lee, X. Lin, Y. Hwang, R. "Radermacher, Performance investigation on solid desiccant assisted mobile air conditioning system", *Applied Thermal Engineering*, vol. 103, pp. 1370-1380, 2016. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.053.
- [30] A. Zouaoui, L. Zili-Ghedira and S. B. Nasrallah, "Experimental Investigation of Air Dehumidification and Regeneration Operations Using Packed Bed of Silica Gel Particles", *International Journal Of Heat And Technology*, vol. 34, pp. 103-109, 2016. DOI: 10.18280/ijht.340115.
- [31] J. San, G. Jiang, "Modeling and testing of a silica gel packed-bed system", *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1173-1179, 1994.
- [32] C. Chen, G. Schmid, C. Chan, Y. Chiang, S. Chen, "Application of silica gel fluidised bed for air-conditioning systems", *Applied Thermal Engineering*, vol. 89, pp. 229-238, 2015. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.05.058.
- [33] A. M. Hamed, W. R. Abd El Rahman, S. H. El-Eman, "Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed", *Energy*, vol. 35, pp. 2468-2483, 2010. DOI: 10.1016/j.energy.2010.02.042.
- [34] S. Shaul, E. Rabinovich, H. Kalman, "Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio", *Powder Technology*, vol. 228, pp. 264-271, 2012. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.05.029.
- [35] H. T. Bi, J. R. Grace, "Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and upward transport", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, pp. 1229-1236, 1995.
- [36] W. R. A. Goossens, "Classification of fluidized particles by Archimedes number", *Powder Technology*, vol. 98, pp. 48-53, 1998.
- [37] J. Baeyens, D. Geldart, "An investigation into slugging fluidized beds", *Chemical Engineering Science*, vol. 29, pp. 225-265, 1974.
- [38] D. Geldart, "Types of Gas Fluidization", *Powder Technology*, vol. 7, pp. 285-292, 1973.

- [39] E. Rabinovich, H. Kalman, "Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems", *Powder Technology*, vol. 207, pp. 119-133, 2011. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.10.01.
- [40] C. Chen, C. Hsu, C. Chen, S. Chen, "Silica gel polymer composite desiccants for air conditioning systems", *Energy and Buildings*, vol. 101, pp. 122-132, 2015. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.05.009.
- [41] C. X. Jia, Y. J. Dai, J. Y. Wu, R. Z. Wang, "Experimental comparison of two honeycombed desiccant wheels fabricated with silica gel and composite desiccant material", *Energy Conversion and Management*, vol. 47, pp. 2523-2534, 2006. DOI: 10.1016/j.enconman.2005.10.034.
- [42] J. A. Shamim, W. Hsu, S. Soumyadeep, L. Yu, H. Daiguji, "A review of solid desiccant dehumidifiers: Current status and near-term development goals in the context of net zero energy buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110456.
- [43] Cengel YA, Ghajar A. Heat and mass transfer (a practical approach, SI version). McGraw-Hill Education. 2011;671:964.
- [44] M. Yokota, L. G. Berglund, X. Xu, "Thermoregulatory modeling use and application in the military workforce", *Applied Ergonomics*, vol. 45, pp. 663-670, 2014. DOI: 10.1016/j.apergo.2013.09.010.
- [45] Berglund LG, Endrusick T, Yokota M, Santee WR. Portable chem-bio protective dog enclosure and its simulated thermal effects on animals. *Proceedings for the 13th International Conference on Environmental Ergonomics*, 2009.
- [46] Phase Change Material Products Limited, "Phase Change Materials." [Online]. Available: <https://www.pcmproducts.net>
- [47] A. Melcer, E Klugmann-Radziemska, W. S. M. Lewandowski, "Phase change materials available on the market - properties and applications", *Przemysł Chemiczny*, vol. 91, pp. 1733-1742, 2012.
- [48] Rubitherm Technologies GmbH, "Rubitherm Phase Change Materials." [Online]. Available: <https://www.rubitherm.eu>

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. B. Dibek And Ö. Ağra, "Modelling of human thermal comfort in armored military vehicles: An experimental study of removing heat with spot cooling," *Thermal Science and Engineering Progress* , vol.49, pp.1-11, 2024 ,DOI:10.1016/j.tsep.2024.102493.

