YENİ NESİL BİR TAŞIT AYDINLATMA SİSTEMİNİN ISIL KRİTERLER VE YOĞUŞMA ÖNLEME ODAKLI TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

SERCAN BODUROĞLU

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİ NESİL BİR TAŞIT AYDINLATMA SİSTEMİNİN ISIL KRİTERLER VE YOĞUŞMA ÖNLEME ODAKLI TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

SERCAN BODUROĞLU

Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2016

TEZ ONAYI

Sercan BODUROĞLU tarafından hazırlanan **"YENİ NESİL BİR TAŞIT AYDINLATMA SİSTEMİNİN ISIL KRİTERLER VE YOĞUŞMA ÖNLEME ODAKLI TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI"** adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı' nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. A. Alper ÖZALP	
Başkan:	Prof. Dr. A. Alper ÖZALP U.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği	imza
Üye:	Prof. Dr. Muhiddin CAN U.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği	imza
Üye:	Prof. Dr. Ali SÜRMEN B.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği	imza
Üye:	Prof. Dr. Haşmet TÜRKOĞLU G.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği	imza
Üye:	Yar. Doç. Dr. Özgün KORUKÇU U.Ü. Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği	imza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

11/06/2016 **(Tarih)**

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,

- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,

- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,

- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,

- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

14/06/2016



İmza

Ad ve Soyadı

Sercan BODUROĞLU

ÖZET

Doktora Tezi

YENİ NESİL BİR TAŞIT AYDINLATMA SİSTEMİNİN ISIL KRİTERLER VE YOĞUŞMA ÖNLEME ODAKLI TASARIMI VE PROTOTİP İMALATI

Sercan BODUROĞLU

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

Otomotiv dış aydınlatma sistemleri gerek güvenlik, gerek enerji kullanımı, gerekse de görsel dış tasarıma etki etmeleri itibari ile otomobili oluşturan parçaların öne çıkanları arasındadır. Aydınlatma sistemlerinde gelişim teknolojinin her dalında olduğu gibi süreklilik halinde devam etmektedir. Işık kaynaklarında, teknolojide, yöntemlerde ve performansta gelişim eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken farklı problemler ortaya çıkarmıştır. Plastik ham maddelerin kullanılmasıyla sıra dışı geometride far tasarımlarının yapılması far içerisinde sıcaklığın daha dengesiz yayılmasına ve ilave olarak hava akışının yetersiz olduğu birçok pasif bölge oluşumuna sebep olmaktadır. Dolayısıyla günümüz farlarındaki çalışma şartları, lens üzerinde yoğuşma oluşumuna daha elverişli hale gelmiş ayrıca optik prizmasız şeffaf lensin kullanılması oluşan yoğuşmanın fark edilmesini de bir o kadar kolaylaşmıştır.

Bu doktora tez çalışmasında örnek bir taşıt aydınlatma lambası üzerinde yoğuşma oluşumu incelenmiştir. Çalışmada öncelikli olarak bilgisayar ortamında analizlerle yoğuşma oluşumu incelenmiş olup uygulanan test şartnamesine göre bilgisayar ortamında bir yoğuşma analizi metodu geliştirilmiştir. Bu yöntemde yoğuşmanın analizi için ticari Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımlarından FLUENT' in Eulerian Wall Film (EWF) modeli kullanılmıştır. Daha sonra örnek lamba üzerindeki yoğuşmanın azaltılması/önlenmesi için ampul bölgesindeki ısının daha soğuk bölgelere taşınması amacıyla farklı ısı dağıtım yapısı tasarımları gerçekleştirilmiş ve analiz ortamında birbirleriyle kıyaslanmıştır ve en uygun ısı dağıtım yapısının prototipi imal edilerek deneysel olarak da incelenmiştir. Isı dağıtım yapısı ile ampul bölgesindeki yüksek sıcaklık soğuk bölgeye iletilmiş ve lens yüzeyindeki yoğuşma oluşumunu azaltıcı yönde etki meydana gelmiştir. Projede yapılan deneysel çalışmalarda sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra yoğuşmanın zamana bağlı takibi için video kaydı da gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle analiz sonuçları sıcaklık değerleri üzerinden kıyaslandığında %95 mertebesinde yakınsama olduğu tespit edilmiş ve bu yakınsamanın mesh sayısında azalma ile kötüleştiği de ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca yapılan yoğuşma analizi neticesi ile deneysel ortamda tespit edilen yoğuşma miktarlarının zamana bağlı değişimleri ciddi derecede uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv dış aydınlatma sistemleri, Isıl kriter, yoğuşma, Eulerian Wall Film (EWF) modeli, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

2016, xvi + 169 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

THERMAL CRITERIA AND CONDENSATION FOCUSED A NEW GENERATION VEHICLE LIGHTING SYSTEM DESIGN AND PROTOTYPE MANUFACTURING

Sercan BODUROGLU

Uludag University

Science Institute

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. A. Alper OZALP

Automotive lighting systems become prominent among the automobile parts due to safety purposes, energy usage and its effects on the visual exterior design. Evolution on lighting systems are continuously going on similar to every technological segments. Evolution on light sources, technology, methodology and performance brings out different problems which must be handled simultaneously. Linked to plastic raw material usage, facing with extreme headlamp designs provides unbalanced heat transfer inside the lamp and additionally many passive areas with limited air flow. So todays headlamp working conditions become more suitable to have a condensation on lens surface, and also usage of clear lenses without any optical prisms makes it very easy to realize the condensation inside lamp.

In this PhD thesis study, condensation formation was investigated on a sample vehicle lighting lamp. Condensation was firstly investigated on computer simulations and linked to the chosen test conditions a condensation simulation methodology was developed. In this methodology, Eulerian Wall Film (EWF) model of a commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) software FLUENT was used to simulate the condensation. Later on, to lower/prevent the condensation inside the sample lamp with the target to transfer the heat from high temperature bulb area to the low temperature passive area, different heat dissipation structures were modeled and these structures were compared each other in numerical studies and the results are investigated also experimentally as producing a prototype for the most suitable heat dissipation structure. The heat dissipation structure transferred the high heat on bulb area to the lower temperature area and reduced the condensation on the lens surface. Along the experimental studies in project, besides the temperature measurements, and also video recording was performed to investigate the condensation forming in the dedicated time period. %95 convergence was determined when comparing the numerical and experimental temperature results, and also it is found out that as mesh number decreases the convergence also decreases. On the other hand, it was seen that there is a good agreement on condensation forming between numerical and experimental results in the dedicated time period.

Key Words: Automotive exterior lighting system, Thermal criteria, Condensation, Eulerian Wall Film (EWF) model, Computational Fluid Dynamics (CFD)

2016, xvi + 169 sayfa

TEŞEKKÜR

Başta Doktora eğitimim ve tez çalışmalarım boyunca bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım ve beni en iyi şekilde yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. A Alper ÖZALP' e, tez izleme komitesinde görev alan ve büyük katkılarını gördüğüm Sayın Prof. Dr. Muhiddin CAN' a ve Prof. Dr. Nuri KAYANSAYAN' a, SAN-TEZ projemizin denetçisi ve destekçisi Sayın Prof. Dr. Mete ŞEN' e, çalışmalarımda desteklerini hiç esirgemeyen FARBA A.Ş. Ar-Ge merkezi yöneticilerinden Sayın Ersel TURŞUCULAR' a ve Sayın Orhan HAŞAL' a, genel müdür Sayın Serkan YAVUZ' a, genel müdür yardımcısı Sayın Mürsel GÜLEN' e, firma sahibi Sayın Ahmet BAYRAKTAR' a ve emeği geçen bütün FARBA A.Ş. çalışanlarına en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni her zaman destekleyen sevgili annem Cemile BODUROĞLU' na, babam Rıza BODUROĞLU' na, eşim Duygu BODUROĞLU' na, her ne kadar bu süreçte fiziki katkıları olmasa da manevi katkı ve motivasyon sağlayan oğlum Utku BODUROĞLU' na ve kızlarım Alya ile Mina BODUROĞLU' na, bu süreçte yanımda bulunan isimlerini yazamadığım tüm dostlarıma çok teşekkür ederim.

Sercan BODUROĞLU

14/06/2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vii
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
ÇİZELGELER DİZİNİ xvi
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER, KAYNAK ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER 4
2.1. Genel Bilgiler 4
2.1.1. Araç Aydınlatma Sistemlerinin Yıllar İçinde Gelişimi 5
2.2. Kaynak Özetleri 16
2.2.1. Isı Transferine Yönelik Bilimsel Araştırmalar 17
2.2.1.1. Halojen Lambalar Üzerine Bilimsel Araştırmalar 17
2.2.1.2. İleri Işıma Analizi Üzerine Bilimsel Araştırmalar 18
2.2.1.3. Yüzey Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar 20
2.2.1.4. Ampul İçi Gaz Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar 21
2.2.1.5. Ampul Camı Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar 22
2.2.1.6. Isıl Temas Direnci Üzerine Bilimsel Araştırmalar 22
2.2.1.7. Saydam Parçaların Optik Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar 23
2.2.1.8. Termoplastik Elemanlar Üzerine Bilimsel Araştırmalar 24
2.2.1.9. Termal Görüntüleme Üzerine Bilimsel Araştırmalar 25
2.2.2. Yoğuşma Oluşumuna Yönelik Bilimsel Araştırmalar 26
2.2.2.1. Yoğuşma ile Isı Transfer Ölçümleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar 26
2.2.2.2. Yoğuşma Üzerine Nümerik Yürütülmüş Bilimsel Araştırmalar 28

2.2.2.3. Düz Yüzey Üzerinde Yoğuşma Oluşumunun Nümerik Olarak İncelendiği Bilimsel Araştırmalar 30
2.2.2.4. Damlacık Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar 35
2.2.2.5. Film Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar 35
2.2.2.6. Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Geometrik Etkilerin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar 36
2.2.2.7. Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Yüzey Pürüzlülük Etkilerinin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar 36
2.3. Kuramsal Temeller 37
3. MATERYAL ve YÖNTEM 45
3.1. Materyal 45
3.2. Yöntem 47
3.2.1. Malzeme Özellikleri 47
3.2.1.1. Ampul Gazı Özellikleri 47
3.2.1.2. Ampul Camı Özellikleri 49
3.2.1.3. Alüminyum Kaplama Özellikleri 53
3.2.2. Simülasyon Girdileri ve Sınır Şartları 54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 55
4.1. Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışmaları 55
4.1.1. Basit Lamba Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışması 56
4.1.1.1. Reflektör ve Lens Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları 57
4.1.1.2. Lamba İç Hava Sonuçları 59
4.1.1.3. Deneysel Sonuçlar 64
4.1.2. Kompleks Lamba Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışması 67
4.1.2.1. Deneysel Ölçüm 71
4.1.2.2. Farklı Mesh Sayıları ve Deneysel Sonuç Kıyaslaması 74
4.2. Zamana Bağlı Termal Analiz Çalışmaları 80

4.2.1. CFX ile Zamana Bağlı Analiz 80
4.2.2. FLUENT ile Zamana Bağlı Analiz 86
4.3. Yoğuşma Testi 92
4.4. Yoğuşma Analizi 102
4.4.1. Zamandan Bağımsız Ampuller Açık Isıtma Analizi 108
4.4.2. 3 Dakika Ani Soğutma – Yoğuşma Oluşumu Analizi 108
4.4.3. 10 Dakika Ampuller Açık Isıtma Analizi 109
4.5. Yoğuşma Analizi ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması 110
4.6. Yoğuşma Azaltıcı – Önleyici Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları 111
4.6.1. Lamba Dışı Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları 112
4.6.2. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları 116
4.6.2.1. 1. Isı dağıtım yapısı analizleri 118
4.6.2.2. 2. Isı dağıtım yapısı analizleri 121
4.6.2.3. 3. Isı dağıtım yapısı analizleri 122
4.6.2.4. 4. Isı dağıtım yapısı analizleri 124
4.6.2.5. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Denemeleri Kıyaslaması 125
4.6.2.6. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Prototipi Yoğuşma Testi ve Kıyaslaması 134
5. SONUÇ 140
KAYNAKLAR 146
EKLER 158
EK-1 Gradyan ve Diverjans 159
EK-2 Ampul İç Gazı Özellikleri 160
EK-3 Eulerian Wall Film Modeli 165
EK-4 Hata Analizi 167
ÖZGEÇMİŞ 168

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Semboller Dizini

$A_{cell\ wall}$	Yüzeydeki hücre yüzey alanı (m^2)
A_i	i nolu yüzey parçasının alanı (m^2)
A_λ	Dalga boyuna bağlı emicilik
A_{op}	Opak yüzeyin emiciliği
A_{st}	Yarı saydam yüzeyin emiciliği
C_p	Özgül ısı (J/kgK)
d	Işımanın ilerlediği mesafe (m)
D	Su buharının hava içindeki difüzyon katsayısı (m^2/s)
Da	Darcy sayısı
Fr	Froude sayısı
h	Entalpi (J/kg)
h	film yüksekliği
h_k	Hissedilir entalpi (J/kg)
h_o	Spesifik toplam entalpi (J/kg)
i	Spesifik iç enerji (J/kg)
$I_b(r)$	Ortam sıcaklığında siyah cisim ışıma yoğunluğu (W/m^3)
$I(r,\Omega)$	Pozisyona (r) ve yöne (Ω) bağlı ışıma yoğunluk fonksiyonu
J	Difüzyon akısı (kg/m^2s)
Ja	Jacob sayısı
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
k_λ	Dalga boyuna bağlı emilim indeksi
$\dot{m}''$	Kütle akısı (kg/m^2s)
$\dot{m}'''$	Hacimsel kütle kaynağı (kg/m^3s)
M_{ij}	Işıma değişim matrisi
Nu	Nusselt sayısı
n	Ara yüzeyin dik yönü
$\vec{n}$	Yüzeydeki birim dik vektör

n_λ	Dalga boyuna bağlı kırılım indeksi
$\bar{n}_\lambda$	Dalga boyuna bağlı kompleks kırılım indeksi
P	Statik basınç (Pa)
Pr	Prandtl sayısı
q_i	i nolu yüzey parçasının ışıma kaynaklı ısı akısı (W/m^2)
Q_i	i nolu yüzey parçasının ışıma kaynaklı ısı transferi (W)
$\vec{q}_R$	Işıma ile ısı transferi (W/m^3)
Ra	Rayleigh sayısı
Re	Reynolds sayısı
R_{op}	Opak yüzeyin yansıtıcılığı
R_{st}	Yarı saydam yüzeyin yansıtıcılığı
S_h	Işıma kaynaklı ek kaynak terimi (kg/ms^3)
$\vec{S}_M$	Ek momentum kaynak terimi (kg/m^2s^2)
S_{Wk}	Kaynak terimi
t	Zaman (s)
T	Sıcaklık (K)
T_{st}	Yarı saydam yüzeyin geçirgenliği
v	Yüzeye dik yöndeki hız bileşeni (m/s)
V_{cell}	Sayısal hücre hacmi (m^3)
$\vec{V}$	Hız vektörü (m/s)
u, v, w	x, y, z yönlerindeki hız bileşenleri (m/s)
x, y, z	Yön
W	Kütle oranı
We	Weber sayısı

Yunan Harfleri

α_λ	Dalga boyuna bağlı emilim katsayısı
$\alpha_{\lambda,\theta}$	Dalga boyuna ve yöne bağlı emicilik
δ_{ij}	Kronecker delta
ε	Yüzey yayıcılığı

ε_λ	Dalga boyuna bağlı yayıcılık
$\varepsilon_{\lambda,\theta}$	Dalga boyuna ve yöne bağlı yayıcılık
λ	Işıma dalga boyu (m)
κ	Emilim katsayısı
Γ	Difüzyon katsayısı (kg/ms)
μ	Dinamik viskozite (Pa.s)
Ω	Yayılan ışımanın ilerleme yönü
Ω'	Yaklaşan ışımanın ilerleme yönü
θ	Işıma yönü
θ_1	1 nolu ortamın isabet yönü ile yüzey dik yönü arasındaki açı
θ_2	2 nolu ortamın kırılma yönü ile yüzey dik yönü arasındaki açı
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
ρ	Yüzey yansıtıcılığı
σ	Stephan Boltzman katsayısı ($5.67x10^{-8}$ W/m^2K^4)
σ	Saçılma katsayısı
τ	Geçirgenlik
τ_{ij}	Viskoz kayma gerilmesi (Pa)
Ψ	Ampul güç seviyesi (W)
ω	Kütle kısmı
$\forall$	Filaman hacmi (m^3)

Alt İndisler

air	Hava
f	film
h_2o	Su buharı
i, k	Gaz türü
i, j	Yüzey parçası sayısı
l	sıvı
s	yüzey
sat	Doyma

v Su buharı

w Duvar

x, y, z Yön

Kısaltmalar

HAD Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

CFD Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)

CMFD Computational Multi-Fluid Dynamics (Hesaplamalı Çoklu-Akışkanlar Dinamiği)

EWF Eulerian Wall Film Model

HID High Intensity Discharge (Yüksek Yoğunluklu Deşarj)

AFS Adaptive Front-Lighting System (Adaptif Ön Aydınlatma Sistemi)

LED Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)

RTP Rapid Thermal Processing (Hızlı Termal İşleme)

AES Auger Electron Spectroscopy (Auger Elektron Spektroskopu)

XPS X-Ray Photoelectron Spectroscopy (X-Ray Fotoelektron Spektroskopu)

LBM Lattice Boltzman Methodu

CVFEM Control Volume Finite Element Model (Kontrol hacmi sonlu elemanlar yöntemini)

SEM Scaning Electron Microscope (Tarayıcı Elektron Mikroskopu)

RTD Resistance Temperature Detectors (Direnç Sıcaklık Detektörü)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zenon ampulden saçılan fotonlar (Fratty 2015) 4
Şekil 2.2. Araç aydınlatma sistemlerinin zaman içinde değişimi (Fratty 2015) 5
Şekil 2.3. İlk araç aydınlatma sistemi gaz yağı kandili (Fratty 2015) 5
Şekil 2.4. İlk elektrikli araç aydınlatma sistemi (Fratty 2015) 6
Şekil 2.5. İlk çift filamanlı araç aydınlatma ampulü (Fratty 2015) 6
Şekil 2.6. Araçlarda kullanılan ilk ön sis farı (Fratty 2015) 7
Şekil 2.7. Araçlarda sarı far kullanımı (Fratty 2015) 7
Şekil 2.8. Amerikan pazarında kullanılmaya başlanan atom farlar (Fratty 2015) 8
Şekil 2.9. Araçlarda kullanılan ilk viraja duyarlı far (Fratty 2015) 8
Şekil 2.10. Asimetrik far (Fratty 2015) 9
Şekil 2.11. Halojen ampul 9
Şekil 2.12. Projektör far (Fratty 2015) 10
Şekil 2.13. Termoplastik malzemeli far (Fratty 2015) 11
Şekil 2.14. Üçüncü fren lambası (Fratty 2015) 12
Şekil 2.15. Free-form optik far (Fratty 2015) 12
Şekil 2.16. Zenon ampul halojen ampul kıyaslaması (Fratty 2015) 13
Şekil 2.17. AFS far sistemi (Fratty 2015) 14
Şekil 2.18. LED far sistemi (Fratty 2015) 14
Şekil 2.19. Adaptif huzme kontrollü far sistemi (Fratty 2015) 15
Şekil 2.20. Matris huzme kontrollü LED far sistemi (Fratty 2015) 15
Şekil 2.21. Lazer far sistemi (Fratty 2015) 16
Şekil 3.1. ÇAP 70 lambası 46
Şekil 3.2. Atego DRL ve sinyal lambası 46
Şekil 3.3. Ampul iç gazı data hesaplaması 48
Şekil 3.4. Kriptonun dinamik viskozitesinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014) 48
Şekil 3.5. Kriptonun özgül ısısının sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014) 49
Şekil 3.6. Kriptonun ısıl iletkenliğinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014) 49
Şekil 3.7. Ampul camı geçirgenlik – dalga boyu grafiği (Anonim 2006) 50
Şekil 3.8. Sert-camın ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi (Tempel 2002) 50
Şekil 3.9. Sert-camın özgül ısı katsayısının sıcaklıkla değişimi (Tempel 2002) 51

Şekil 3.10. Sert-camın kırılım indisinin dalga boyu ile değişimi (Tempel 2002).....51
Şekil 3.11. Tungsten filamanının yüzey yayıcılık değerinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014).....52
Şekil 3.12. Alüminyum kaplama yayıcılık dalga boyu grafiği (Teodorescu ve ark. 2006) 53
Şekil 3.13. Alüminyum kaplama yayıcılık dalga boyu grafiği (Wen ve Mudawar 2004) 53
Şekil 4.1. ÇAP 70 lambası mesh ağı ve lamba üzerindeki YZ düzlemsel kesit bölgeleri 57
Şekil 4.2. Yüzey sıcaklık dağılımı (a) reflektör ve (b) lens.....58
Şekil 4.3. Ampul yüzeyindeki (a) Kayma gerilmesi (Pa) ve (b) Sıcaklık (°C) değerlerinin açısal değişimi.....60
Şekil 4.4. İç hava L0 kesitindeki (a) Hava akış çizgileri ve (b) Sıcaklık dağılımı 61
Şekil 4.5. İç hava IAD kesitindeki (a) Hava akış çizgileri ve (b) Sıcaklık dağılımı.....64
Şekil 4.6. Basit lamba üzeri termokupl konumları 65
Şekil 4.7. Basit lamba lens sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüsü 66
Şekil 4.8. Atego DRL lambası pasif bölge 67
Şekil 4.9. Atego DRL ve sinyal lambası mesh yapısı.....68
Şekil 4.10. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu gövde sıcaklık dağılımı.....69
Şekil 4.11. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu lens sıcaklık dağılımı 69
Şekil 4.12. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış çizgileri 70
Şekil 4.13. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış hızı 70
Şekil 4.14. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış hızı 71
Şekil 4.15. Atego DRL lambası üzerine takılan termokupllar.....73
Şekil 4.16. Atego DRL lambası sıcaklık ölçümü.....74
Şekil 4.17. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu gövde sıcaklık dağılımı 76
Şekil 4.18. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu lens sıcaklık dağılımı 77
Şekil 4.19. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu iç hava akış çizgileri..78
Şekil 4.20. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu iç hava akış hızı.....78
Şekil 4.21. Atego DRL FLUENT lambası termal analiz sonucu iç hava akış hızı.....78
Şekil 4.22. ANSYS CFX zamana bağlı parametreleri.....81

Şekil 4.23. CFX Zamana bağlı lens sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 84
Şekil 4.24. CFX Zamana bağlı lens sıcaklığı deneysel ve analiz sonucu sapma değerleri 84
Şekil 4.25. CFX Zamana bağlı gövde sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 85
Şekil 4.26. CFX Zamana bağlı gövde sıcaklığı deneysel ve analiz sonucu sapma değerleri 85
Şekil 4.27. FLUENT değişken zaman adımı ayarları 86
Şekil 4.28. FLUENT zamana bağlı CH3 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 87
Şekil 4.29. FLUENT zamana bağlı CH4 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 88
Şekil 4.30. FLUENT zamana bağlı CH5 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 88
Şekil 4.31. FLUENT zamana bağlı CH6 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 89
Şekil 4.32. FLUENT zamana bağlı CH17 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 89
Şekil 4.33. FLUENT zamana bağlı CH19 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 90
Şekil 4.34. FLUENT zamana bağlı lens sıcaklığı değişimi 91
Şekil 4.35. FLUENT zamana bağlı gövde sıcaklığı değişimi 91
Şekil 4.36. Atego DRL lambası test esnasında lens üzerinde oluşan yoğuşma 94
Şekil 4.37. Atego DRL lambası yoğuşma testi ön şartlandırma sıcaklık ölçümleri 95
Şekil 4.38. Atego DRL lambası yoğuşma testi 20 dakika ampuller açık sıcaklık ölçümleri 95
Şekil 4.39. Atego DRL lambası yoğuşma testi 3 dakika ani soğutma sıcaklık ölçümleri 96
Şekil 4.40. Atego DRL lambası yoğuşma testi 10 dakika ampuller açık ve sonrası sıcaklık ölçümleri 96
Şekil 4.41. Yoğuşma test düzeneği 97

Şekil 4.42. Yoğuşma testi – 3 dakika ani soğuma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü 98
Şekil 4.43. Yoğuşma testi – 10 dakika ısıtma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü ... 98
Şekil 4.44. Atego DRL lambası - nem ölçüm probu takılmış hali 99
Şekil 4.45. Yoğuşma testi boyunca bağıl nem ölçüm değerleri 100
Şekil 4.46. Ani soğutma analizi CH3 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 104
Şekil 4.47. Ani soğutma analizi CH4 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 105
Şekil 4.48. Ani soğutma analizi CH5 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 105
Şekil 4.49. Ani soğutma analizi CH6 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 106
Şekil 4.50. Ani soğutma analizi CH17 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 106
Şekil 4.51. Ani soğutma analizi CH19 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması 107
Şekil 4.52. 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi 109
Şekil 4.53. 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi 110
Şekil 4.54. Yoğuşma dağılımı – analiz ve deneysel sonuçların kıyaslanması 111
Şekil 4.55. Atego DRL lambası arka yüzeydeki soğutucu tasarımı 112
Şekil 4.56. Gövde pasif bölge üzerindeki ilave ölçüm noktaları 113
Şekil 4.57. Lamba içi ısı dağıtım yapısı denemeleri 117
Şekil 4.58. 1. ısı dağıtım yapısı – bakır malzeme – 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü 118
Şekil 4.59. 1. ısı dağıtım yapısı – bakır malzeme – 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü 119
Şekil 4.60. 1. ısı dağıtım yapısı – alüminyum alaşım malzeme – 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü 120
Şekil 4.61. 1. ısı dağıtım yapısı – alüminyum alaşım malzeme – 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü 120
Şekil 4.62. 2. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü 121

Şekil 4.63. 2. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü 122
Şekil 4.64. 3. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü 123
Şekil 4.65. 3. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü 123
Şekil 4.66. 4. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü 124
Şekil 4.67. 4. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü 125
Şekil 4.68. Atego DRL lambası analiz datası üzerindeki kesitler ve noktaları..... 126
Şekil 4.69. Atego DRL lambası analiz datası noktasal kıyaslama – Sıcaklık/Zaman .. 127
Şekil 4.70. Atego DRL lambası analiz datası noktasal kıyaslama – Film kalınlığı/Zaman 128
Şekil 4.71. Atego DRL lambası py730 kesiti 129
Şekil 4.72. Dikey kesit sıcaklık profillerinin kıyaslanması 131
Şekil 4.73. Dikey kesit film kalınlığı profillerinin kıyaslanması..... 131
Şekil 4.74. Yatay kesit sıcaklık profillerinin kıyaslanması..... 132
Şekil 4.75. Yatay kesit film kalınlığı profillerinin kıyaslanması 132
Şekil 4.76. Atego DRL lambasının YX düzlemindeki konumu 134
Şekil 4.77. Isı dağıtım yapısı prototipi..... 135
Şekil 4.78. Prototip yoğuşma testi – 3 dakika ani soğutma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü..... 136
Şekil 4.79. Prototip yoğuşma testi – 10 dakika ısıtma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü..... 137
Şekil 4.80. Prototip yoğuşma dağılımı – analiz ve deneysel sonuçların kıyaslanması 138
Şekil EK-3.1. Yüzey üzerindeki ince sıvı film modeli (Anonim 2015)..... 165

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kuartzın ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Logerais ve Bouteville 2010)....52

Çizelge 3.2. Tungsten filaman termodinamik özelliklerinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Logerais ve Bouteville 2010)....52

Çizelge 4.1. Ampul yüzeyi üzerinde kesit bazlı ortalama (a) taşınım, (b) ışınım ısı transfer katsayıları ve (c) birbirlerine oranları....62

Çizelge 4.2. Basit Lamba - Deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları....66

Çizelge 4.3. Atego DRL lambası termal analizinde kullanılan ampuller ve senaryo gereği kullanılan enerji değerleri....68

Çizelge 4.4. Atego DRL lambası üzerindeki termokupl konumları....73

Çizelge 4.5. Atego DRL lambası farklı mesh sayıları için CFX termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması....75

Çizelge 4.6. Atego DRL lambası farklı mesh sayıları için CFX ve FLUENT termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması....80

Çizelge 4.7. Atego DRL lambası zamana bağlı CFX termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması....82

Çizelge 4.8. Gövde pasif bölge üzerindeki ilave ölçüm noktaları koordinatları....114

Çizelge 4.9. Lamba dışı farklı ısı dağıtım yapısı deneme sonuçları....114

1. GİRİŞ

Otomotiv dış aydınlatma sistemleri gerek güvenlik, gerek enerji kullanımı, gerekse de görsel dış tasarıma etki eder yönü itibari ile otomobili oluşturan parçaların öne çıkanları arasındadır. Ön aydınlatma sistemlerinden temel beklenti aracın görüş alanını yeterli mesafede ve ışık kalitesinde görünür hale getirmesidir. Arka aydınlatma sistemlerinden temel beklenti ise her türlü hava şartlarında aracın arkasından gelen diğer sürücüler tarafından fark edilmesi ve yavaşlama, durma, dönme veya geri yönde hareket etme gibi durumlar için takip eden sürücüye bilgi verilmesidir. Bu beklentiler sağlanırken aydınlatma sisteminin ısıl enerji üretmesi ve yayması nedeni ile sistem içinde bazı teknolojik problemler ortaya çıkmaktadır.

Aydınlatma sistemlerinde gelişim teknolojinin her dalında olduğu gibi süreklilik halinde devam etmektedir. Işık kaynaklarında, teknolojide, yöntemlerde ve performansta gelişim eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken farklı problemler ortaya çıkarmıştır. Optik ışık kırıcı prizmaların olmadığı şeffaf lensli farların kullanılması far içerisinde oluşabilecek herhangi bir görsel problemin çok çabuk fark edilebilmesini sağlamıştır. Ayrıca plastik parçaların kullanılmasıyla sıra dışı geometride far tasarımlarının yapılması far içerisinde sıcaklığın daha dengesiz yayılmasına ve ilave olarak hava akışının yetersiz olduğu bir çok pasif bölge oluşumuna imkan vermiştir. Dolayısıyla günümüz farlarındaki çalışma şartları lens üzerinde yoğuşma oluşumuna daha elverişli hale gelmiş ayrıca oluşan yoğuşmanın fark edilmesi de bir o kadar kolaylaşmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde günümüzde otomotiv dış aydınlatma ürünlerinin karşılaştığı problemler arasında öne çıkanlardan biri aydınlatma sistemini oluşturan yapısal parçaların fazla ve düzensiz ısınması ile lens üzerinde meydana gelen yoğuşmanın görülebilir olması veya daha da ötesi optik performansı olumsuz etkilemesidir.

Otomotiv sektörü dünyada olduğu gibi ülkemiz ekonomisinde çok ciddi bir yere sahiptir. Türkiye' de otomotiv sektörü ilk olarak yurtdışı ana sanayilerinin üretim üslerini ülkemize taşımalarıyla başlamıştır. Takip eden süreçte ana üretim merkezleri beraberinde birçok alt parça tedarikçilerinin de oluşmasına ve gelişmesine sebep olmuştur. Gelişen bu alt parça tedarikçi zincirinde zaman içerisinde elde edilen üretimdeki deneyim yavaş

yavaş alt parça tasarımlarına başlanmasını beraberinde getirmiştir. Tasarım işi her bir üründe olduğu gibi otomotiv parçalarında da stratejik bir öneme sahiptir. Tasarım kabiliyetinin elinde olması o sektörde daha sağlam bir yapıya olanak verirken ayrıca sektöre yön verme imkanını da sunmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde özellikle otomotiv sektöründe kendi tasarımımızı gerçekleştirmemiz için stratejik olarak farklı teşvik ve yöntemler uygulanmaktadır.

Otomotiv dış aydınlatma ürünleri açısından bakıldığında, tasarım süreci optik, mekanik, elektronik, termal, hava akışı ve stil gibi birçok disiplini içerdiğinden dolayı ciddi anlamda uzmanlık ve yetkinlik gerektirmektedir. Ana sanayilerle birlikte araç aydınlatma ürünlerinin tasarım sürecine dahil olabilmek için bu uzmanlık ve yetkinliğe sahip olunması stratejik öneme sahiptir. Aksi halde ana sanayiler haklı olarak ürünlerinin ihtiyaçlar doğrultusunda tasarımını gerçekleştirebilecek yan sanayilerle tasarım sürecini yönetmek istemektedirler. Türkiye' de gerçekleşen komple araç tasarım sayısının kısıtlı olması ve çoğunlukla araç tasarım süreçleri yurtdışı merkezli yürütülmesi ülkemizdeki otomotiv dış aydınlatma ürünleri tasarım kabiliyetlerinin artırılmasında negatif etkiye sahiptir. Ayrıca yurt dışı merkezli araç tasarım süreçlerine dahil olabilmek için yarıştığınız diğer yurt dışı rakiplerinin tasarım anlamında geçmişe dayalı çok daha fazla tecrübesinin olması ülkemiz adına başka bir zorluktur. Bu şartlar altında ülkemizde tasarım kabiliyetinin elde edilmesi ve artırılması sektördeki yerimizin devamlılığı açısından göz ardı edilemez bir öneme sahiptir.

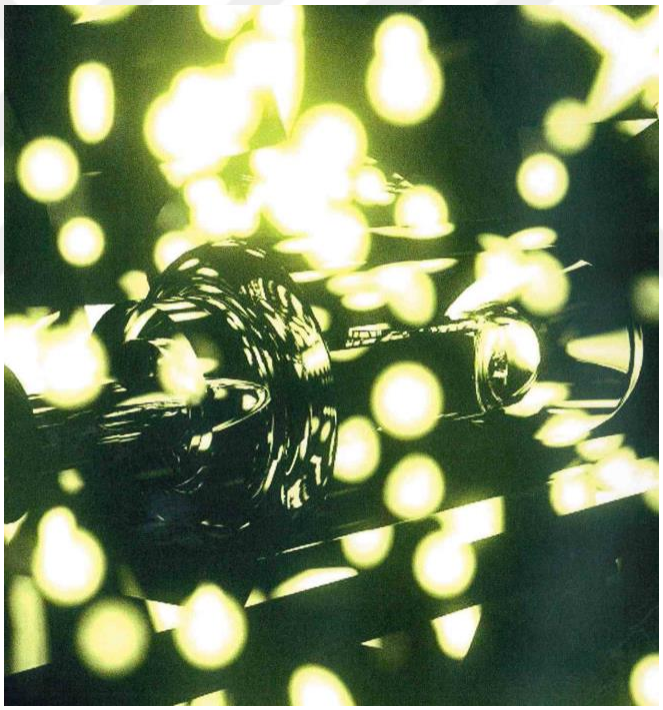
Stratejik yönden değerlendirildiğinde küresel anlamda aydınlatma sektörünün güncel tasarım problemlerinden biri olan farlardaki yoğuşma oluşumuna yönelik çalışmalar ülkemiz açısından ayrıca bir öneme sahiptir. Bu ihtiyaç doğrultusunda ülkemizdeki otomotiv dış aydınlatma ürünleri ana tedarikçilerinden biri olan FARBA A.Ş. firması farlarda yoğuşma oluşumuna yönelik hem bilgi hem de yatırım gerekliliğinden dolayı 2012 yılında SAN-TEZ projesi sürecine dahil olmuştur. SAN-TEZ projesi kapsamında teknolojik bir problem olan farlarda yoğuşma oluşumu üzerindeki çalışma, tasarım aşamasında bilimsel ve akademik bakış açısıyla problemi tespit etme ve yenilikçi yöntemler dahil problemin çözümüne odaklanarak endüstriyel anlamda sonuç elde etme yönünde gerçekleştirilmiştir. Bu doktora tez çalışması akademik ve endüstriyel olmak üzere 2 hedefe sahip olarak gerçekleştirilen SAN-TEZ projesinin akademik çıktısıdır.

SAN-TEZ projesi kapsamında ilk olarak hayata geçirilecek yeni nesil taşıt aydınlatma sisteminin tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bütün ısıl kriter ve mekanizmaların bilimsel yöntem ve yaklaşımlar ile tasarım sürecine dahil edilmesi amacı ile kapsamlı bir literatür araştırması yürütülmüştür. Buradan elde edilen detaylı malzeme termodinamik özellikleri gibi bilgiler ve simülasyon yöntemleri firmanın CFD (computational fluid dynamics) yazılımıyla yürüttüğü far termal analiz sürecine dahil edilerek analiz hassasiyeti %90-95 mertebelerine çıkarılmıştır. Sonraki adımda, yoğuşma oluşumu bilgisayar ortamında incelenmiş ve zamana bağlı bir yoğuşma analizi yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem endüstriyel bir ürün üzerinde uygulanmış ve sonuçları deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Proje kapsamında yürütülen çalışmanın son aşamasında yoğuşma problemine sahip örnek bir endüstriyel ürün üzerinde yoğuşma önlemeye / azaltmaya yönelik endüstriyel çözüm yöntemleri bilgisayar ortamında incelenmiş ve fayda sağlayan yöntem prototip ile test yapılarak yöntemin etkinliği deneysel olarak incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER, KAYNAK ÖZETLERİ ve KURAMSAL TEMELLER

2.1. Genel Bilgiler

Araç aydınlatma sistemleri aracın görmesini ve görülmesini sağlarken gece boyunca güvenli sürüşe imkan vermektedir. Bunun yanı sıra aracın stili için vazgeçilmez bir etkiye sahiptir ve adeta aracın ruhunu yansıtmaktadır. Diğer bir önemli özelliği de aracın teknolojik içeriği hakkında bilgi vermektedir. Işık kaynağından çıkan fotonların (Şekil 2.1) kontrollü bir şekilde yansıtılmasıyla görevlerini yerine getiren aydınlatma sistemleri ilk araçların kullanılmasıyla birlikte ihtiyaç haline gelmiştir ve zaman içerisinde hem ışık kaynağının kendisinde hem de optik yöntemlerde devamlı gelişim göstererek günümüz teknoloji seviyesine ulaşmıştır (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. Zenon ampulden saçılan fotonlar (Fratty 2015)



Şekil 2.2. Araç aydınlatma sistemlerinin zaman içinde değişimi (Fratty 2015)

2.1.1. Araç Aydınlatma Sistemlerinin Yıllar İçinde Gelişimi

Araçlarda kullanılan ilk aydınlatma sistemleri klasik gaz yağı kandilleriydi (Şekil 2.3). Bu kandiller şoförün yolu görmesine yetecek kadar ışığa sahip değillerdi fakat en azından aracın diğerleri tarafından fark edilmesini sağlıyordu.



Şekil 2.3. İlk araç aydınlatma sistemi gaz yağı kandili (Fratty 2015)

1898 yılında ise Electric Vehicle Company of Hartford (ABD) firması tarafından Kolombiya' da ilk elektrikli araç lambaları opsiyonel aksesuar olarak tanıtıldı (Şekil 2.4). Elektrikli araç lambalarının ışık kaynağı ampul içerisindeki vakum ortamında çalışan tungsten filamandı. Bu teknolojinin Avrupa' da tanıtılması ise Carello ve Bosch tarafından yapılmıştır. Bu teknolojide başlangıçta filaman çok kısa ömürlüydü ve bu ışık kaynaklarına yetecek kadar güçlü ve araca uygun derecede ufak jeneratörler de çok yaygın değildi.



Şekil 2.4. İlk elektrikli araç aydınlatma sistemi (Fratty 2015)

Aydınlatma sistemlerinde elektrik teknolojisi 20. yüzyılın başlarında ciddi gelişim göstermiş olup daha uzun ömürlü filamanlar, daha güçlü ve kompakt jeneratörler kullanılır hale gelmiştir. Fakat hala karşı sürücünün göz kamaşma problemi devam etmekteydi. Göz kamaşması problemine önlem olarak ilk çift filamanlı ampuller 1924 yılında kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.5). Filamanın biri karşıdan araç geldiğinde kısa huzmeyi sağlarken, diğeri ise karşıdan gelen araç olmadığı durumlarda uzun huzmeyi sağlamaktaydı.



Şekil 2.5. İlk çift filamanlı araç aydınlatma ampulü (Fratty 2015)

1926 yılında ise sisli havalarda sürücünün daha iyi görebilmesi için araçlarda ilk ön sis lambaları kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Araçlarda kullanılan ilk ön sis farı (Fratty 2015)

Göz kamaşmasına diğer bir önlem olarak 1936 yılında sarı farlar kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.7). Sarı far kullanımı belirli bir süre yaygın olarak devam etmiştir fakat 1950 ile 1970 arasında yapılan araştırmalarda sarı farların normal lambalara göre göz kamaşması açısından ne fayda ne de zarar gösterdiği ortaya çıkarılmıştır. Bu bilgilerden sonra sarı far kullanımından genel anlamda vazgeçilmiştir.



Şekil 2.7. Araçlarda sarı far kullanımı (Fratty 2015)

Amerika pazarında standartlaşma ve süreklilik için 1930' ların sonunda atom farlar (Şekil 2.8) kullanılmaya başlanmıştır. Atom farda dış camı, reflektörü ve içindeki ampulüyle birlikte far içerisinde vakum ortamı bulunmaktaydı ve bu sebepten dolayı ampul değiştirilememekteydi. İlk olarak standart 7 inç atom far formatı 1940' larla birlikte Amerika' da satılan bütün araçlarda kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.8. Amerikan pazarında kullanılmaya başlanan atom farlar (Fratty 2015)

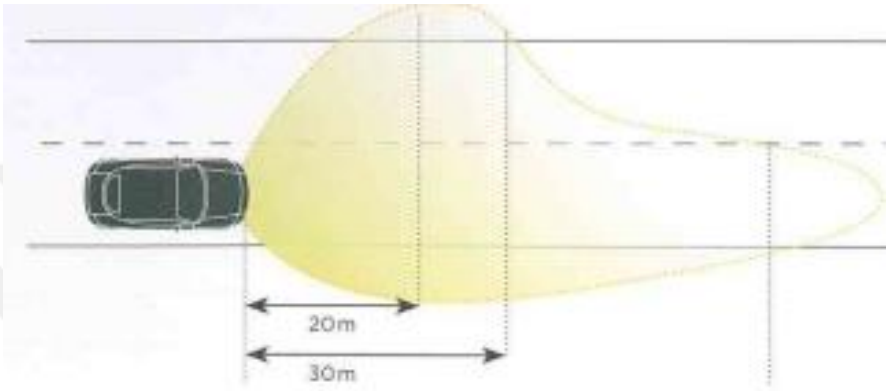
1957’ de 5 ¾ inç dairesel atom farlar kullanılmaya başlanmış olup 1976’ da dikdörtgen atom far kullanılması araç üreticileri için stil seçeneği haline gelmiştir. Halojen ampul teknolojisi gelişmesiyle birlikte Amerika pazarında atom far kullanılma zorunluluğu 1983’ de sona ermiştir.

1947 yılında Amerika’ da bir araç modelinde farklı bir teknoloji olarak virajlarda şoförün yolu daha iyi görmesini sağlamak amacıyla aracın tam ortasına üçüncü bir far takılmıştır (Şekil 2.9). Bu ilave far aracın direksiyon sistemine mekanik olarak bağlı ve direksiyonun döndüğü tarafa doğru reflektörü çevirerek virajı daha iyi aydınlatmaktadır. Bu mekanik viraj aydınlatma farı günümüz teknolojisinde elektronik kontrol üniteli viraja duyarlı akıllı farların atası olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.9. Araçlarda kullanılan ilk viraja duyarlı far (Fratty 2015)

Uzun ve kısa huzmenin sağlanması için ilk defa 1924’ de geliştirilen çift filamanlı ampulün kullanılmasıyla birlikte karşı sürücünün gözünü kamaşması problemine karşılık ilk büyük adım atılmıştır. Bu adımdan sonraki takip eden en önemli diğer gelişme 1957 yılında kullanılmaya başlayan asimetrik far aydınlatması olmuştur (Şekil 2.10). Bu yeni sistem ile hem kısa huzmenin kullanılmasıyla kazanılan göz kamaştırma problemi biraz daha iyileştirilmiştir hem de yolun karşıdan gelen sürücünün olmadığı bölümlerinin daha iyi aydınlatılmasıyla daha kaliteli ve güvenlikli aydınlatma elde edilmiştir.



Şekil 2.10. Asimetrik far (Fratty 2015)

Takip eden yıllarda ampul teknolojisinde kırılım noktası olan 1962 yılında ilk halojen ampullerin araçlarda kullanılması gerçekleşmiştir. Halojen teknolojisi (Şekil 2.11) ampul içerisindeki halojen gazı kimyasal ve termal reaksiyonlarda kullanarak filamandan buharlaşan tungsten malzemenin tekrar filaman üzerine çökmesini sağlamaktadır.

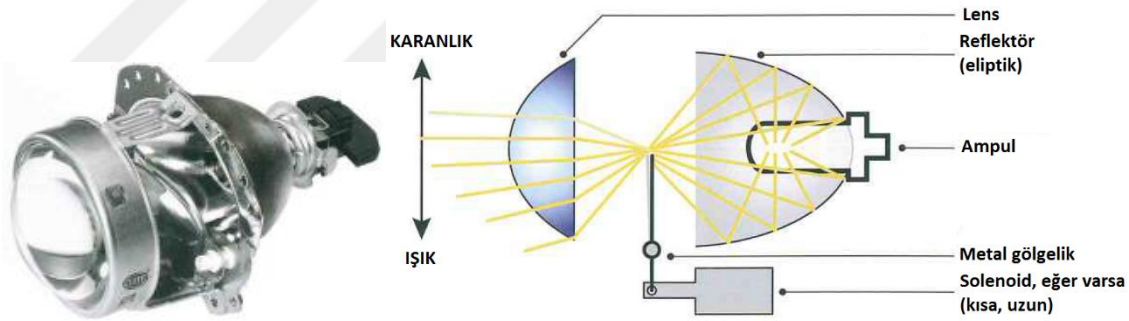


Şekil 2.11. Halojen ampul

Bu şekilde filaman ömrü artırılmış, ampulün daha yüksek sıcaklıklarda çalışması sağlanarak daha yüksek ışık çıktısı elde edilmiş ve ampul ömrü boyunca ışık çıktısındaki değişim daha dengeli hale gelmiştir. Diğer önemli bir katkısı da buharlaşan tungsten malzemeden dolayı ampul camında meydana gelen kararmaların da önüne geçilmiştir.

1960’ larda geliştirilen halojen ampuller hala günümüzdeki ampullü farların ışık kaynağı olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Işık kaynağından gelen ışığın yansıtılması için kullanılan reflektör parabol yapılıdır. Diğer bir alternatif olarak poli-elipsoidal ya da projektör optik sistemlerin geliştirilmesiyle aydınlatma grubu çok daha kompakt ve verimli hale gelmiştir. Projektör optik ilk seri üretim olarak farlarda 1980’ lerin ortasında Opel Calibra ve BMW 7 serisi için kullanılmaya başlanmıştır. Projektör optik sistemi (Şekil 2.12) elipsoidal reflektörün ilk odak noktasına ampulün ikincil odak noktasına ise metal gölgeliğin yerleştirilmesi ve sistemin en önüne de merceğin oturtulmasıyla elde edilmektedir. Gölgelik sayesinde istenilen bölgenin karanlık çıkması sağlanarak yol üzerinde kısa huzme farın gereklilikleri yerine getirilmektedir. İlerleyen zamanda metal gölgeliğin selonoid bir valf ile hareketlendirilmesiyle aynı projektör modülde hem kısa hem uzun huzme sağlanır hale gelmiştir. Zenon ampullerin kullanılmasıyla projektör modüllerin verimliliği daha da artırılmıştır ve kullanımı daha yaygın hale gelmiştir.



Şekil 2.12. Projektör far (Fratty 2015)

Farlarda metal reflektör ve dış lens olarak camın kullanılması üretim zorluklarından dolayı stil anlamında farklı alternatiflerin kullanılmasını ciddi derecede kısıtlamaktaydı. Bu yapıların alternatifi olarak ilk kompozit malzemeli far 1984 yılında Ford Lincoln Mark VII modelinde kullanılmıştır. Bu farın en önemli özelliği 1940’ lı yıllardan beri Amerikan pazarında kullanılan atom farların yerine değiştirilebilir ampul kullanmakla beraber termoplastik reflektör ve ayrıca PC (polycarbonate) dış lens içermesidir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13. Termoplastik malzemeli far (Fratty 2015)

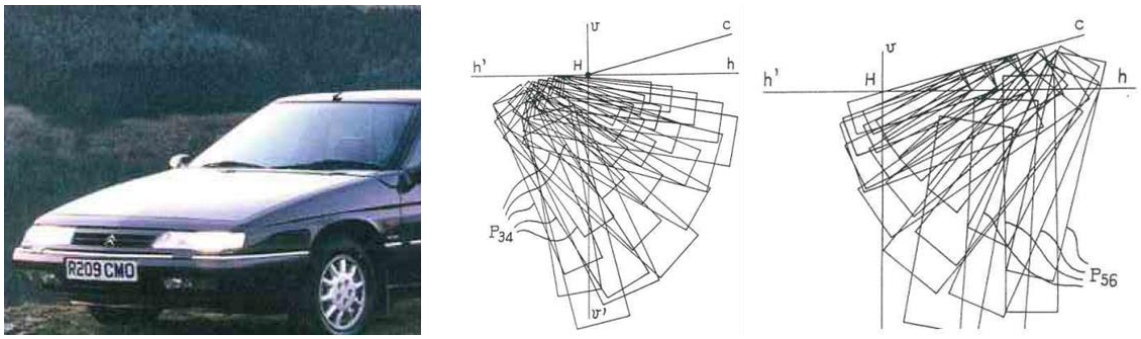
İlk kompozit malzemeli far genel anlamda ciddi kalite problemleriyle yüzyüze gelmiştir. Bunlardan en önemlileri yüksek sıcaklıkla termoplastik reflektörde deformasyon olması ve ampul odağının kaymasıdır ve PC dış lensin güneş ışığı altında belirli bir zaman diliminde sararıp solmasıdır. Bu tarz kalite problemleri yaşamasına rağmen bu far otomotiv dış aydınlatma lamba tasarımlarında termoplastik malzeme kullanılması sebebiyle yeni bir kapı aralamıştır. Bu şekilde daha karmaşık şekillerde farlar tasarlanabilir hale gelmiştir. Günümüzdeki farlarda reflektördeki termal problemler genel anlamda simülasyon yazılımlarının gelişmesiyle de daha tasarım aşamasında ön görülebilir hale gelmiştir ve bu şekilde tasarımın yönlendirilmesi sağlanmıştır. Fakat PC malzemenin güneş ışığı altında sararma veya solma problemi malzemenin kendi özelliği olması sebebiyle hala devam etmektedir. Lens üzerine yapılan ilave kaplamalarla sararma süresi ciddi anlamda uzatılmış olsa da tam olarak çözülebilmiş değildir.

Araç aydınlatma ve güvenlik ilişkisi üzerinde yapılan yoğun araştırmalar neticesinde aracın arkasında bulunan ve tam ortaya yerleştirilen üçüncü bir fren lambasının arkadan çarpmaları ciddi derecede azalttığı görülmüştür. Bunun üzerine üçüncü fren lambası (Şekil 2.14) 1986 yılında ilk kez Amerikan pazarında bütün yeni model binek araçlar için zorunlu hale getirilmiştir. Avrupa pazarında da 1998 yılında zorunlu hale getirilmiştir. Üçüncü fren lambalarında ilk LED (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) tipi ışık kaynağının kullanılması 1980’ lerin sonlarında gerçekleştirilmiş olup günümüzde üçüncü fren lambalarında büyük çoğunlukla LED kullanılmaktadır.



Şekil 2.14. Üçüncü fren lambası (Fratty 2015)

Parabolik optik sistemlerde reflektör tek bir parabolik yüzeyden oluşmakta ve ışığın yönlendirilmesi dış cam üzerindeki kırıcı sistemler üzerinden gerçekleştirilmekteydi. 1970' lerin başında General Motor' un Guide Light bölümü ilk kez üzerinde kırıcı optik olmayan şeffaf lens ve reflektör optikten oluşan sis lambasının prototipini sunmuşlardır fakat o dönemki gerek tasarım gerekse üretim teknolojilerinin yetersizliği bu yöntemin hemen seri araçlarda kullanılmasına imkan vermemiştir. 1980' lerin sonuna doğru bilgisayar yazılımlarındaki ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde dış lensi üzerinde herhangi bir optik kırıcı olmayan ve ışığın yönlendirilmesi tamamen reflektör yüzeylerin kontrolleriyle elde edilmiş free-form (serbest yüzey) optik özelliğe sahip farlar seri üretimde kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 2.15). Zamanla plastik ham maddelerin yaygınlaşmasıyla free-form optik ve şeffaf dış lens stilistik bir gereksinim haline gelmiş ve farların çok farklı şekillerde tasarlanabilmesine olanak vermiştir.



Şekil 2.15. Free-form optik far (Fratty 2015)

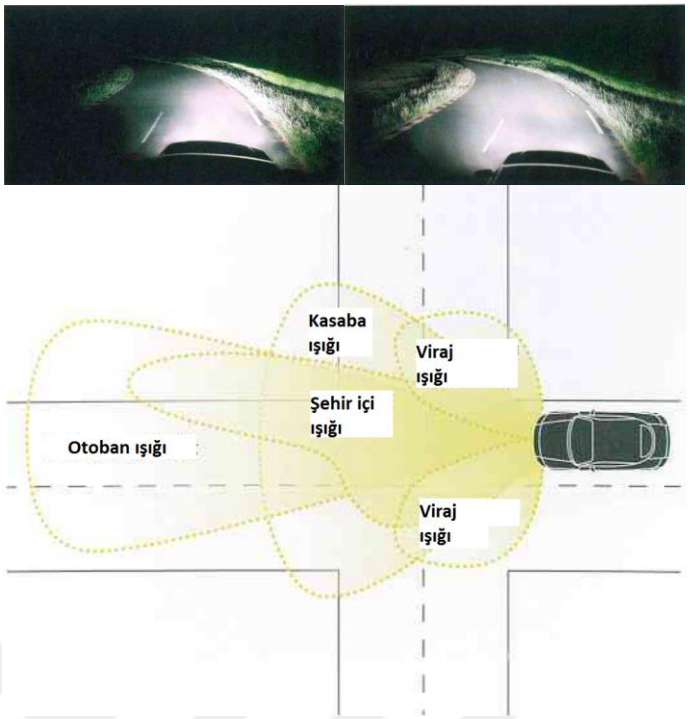
Zenon (HID – High Intensity Discharge) ampul teknolojisi 1960' lardan beri sokak aydınlatması, spor sahalarının aydınlatması ve sanayi bölgelerinin aydınlatması gibi

birçok uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştı. Fakat otomotiv dış aydınlatmada kullanılması geniş ark tüpünün olması sebebiyle pek uygun değildi. Zenon teknolojisinin ışık kalitesi anlamında ciddi avantajlar getirmesi sebebiyle OSRAM, PHILIPS gibi ampul üreticileri 1980' lerle birlikte bu teknolojinin otomotiv aydınlatmada kullanılabilmesi için çalışmalara başladılar. Bu çalışmaların neticesinde ilk zenon ampul 1991 yılında BMW 750iL modelinde kullanılmıştır. Daha sonra Audi ve Mercedes 1993-1994 yıllarında zenon ampul kullanmaya başlamışlardır. 1996 yılında Japon pazarında kullanılmaya başlanan zenon teknolojisi 2000' li yıllardan sonra en büyük Pazar kullanım oranını Japonya' da elde etmiştir. Zenon ampul halojen ampule nazaran yaklaşık 3 kat fazla ışık vermektedir bu şekilde çok daha kaliteli aydınlatma elde edilmektedir (Şekil 2.16). Zenon ampul ark oluşturabilmesi açısından balast sistemi ile çalışmakta olup ayrıca yüksek ışık çıktısı sebebiyle karşıdan gelen aracı bütün sürüş şartlarında rahatsız etmemesi amacıyla kontrollü olunabilmesi için aracın otomatik far ayar sistemine ve far yıkama sistemine sahip olması zorunlu hale getirilmiştir.



Şekil 2.16. Zenon ampul halojen ampul kıyaslaması (Fratty 2015)

Yaklaşık 45 yıl önce mekanik aksamla elde edilen viraja duyarlı far sistemi yeni teknoloji kontrol sistemleriyle 2003 yılında tekrar seri üretim araçlarında kullanılmaya başlamıştır. Farın ışık dağılımı kontrol sistemlerinin geliştirilmesiyle 2007 yılında AFS (Adaptive Front-Lighting System / Adaptif Ön Aydınlatma Sistemi) isimli yenilikçi teknoloji tanıtılmıştır. Bu teknolojide far viraja duyarlı haldeyken ayrıca kısa ve uzun huzme yanı sıra farklı kullanım koşulları için farkı aydınlatma özellikleri sunar hale gelmiştir (Şekil 2.17).



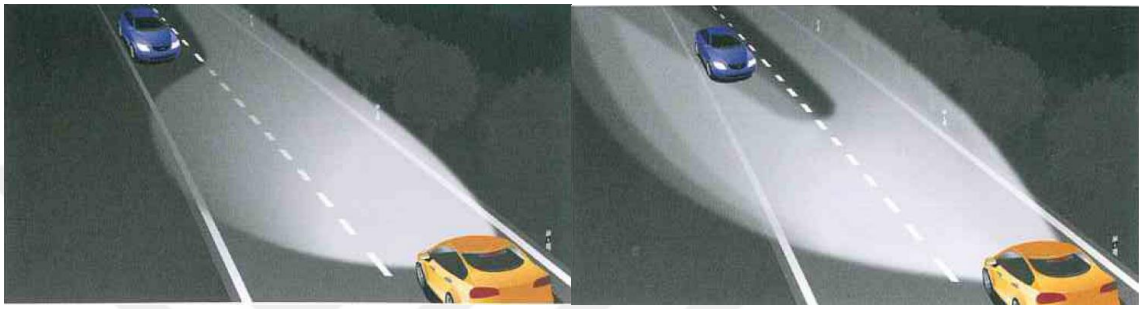
Şekil 2.17. AFS far sistemi (Fratty 2015)

Otomotiv aydınlatma tarihi boyunca ışık gaz yağı ateşinden, akkor ampulden, halojen ampulden, Zenon ampulden elde edilmiştir. Son dönemde otomotiv dış aydınlatmada ışık kaynağı olarak LED ön plana çıkmıştır. Önce üçüncü fren lambasında kullanılmış, daha sonra arka stop lambalarında kullanılmış ve nihayetinde 2007 yılında ilk kez kısa huzme ışık kaynakları LED olan ön aydınlatma farı Lexus LS600h modelinde kullanılmıştır. Bu modeli takiben kısa süre içerisinde bütün ışık kaynakları LED olan farlar seri üretimde kullanılır hale gelmiştir (Şekil 2.18). Artık LED otomotiv dış aydınlatma sistemlerinin vazgeçilmez bir ışık kaynağı olmuştur.



Şekil 2.18. LED far sistemi (Fratty 2015)

AFS far sistemleri de gelişimini devam ettirmiş ve sürüş aydınlatma konforunu artırırken karşıdan gelen sürücünün göz kamaşmasına daha detaylı kontroller getirilmiştir. 2010 yılında geliştirilen teknoloji ile farın karşıdan gelen aracın konumunu kontrol edip sadece aracın olduğu bölgeye ışık göndermemekle birlikte geri kalan bütün bölgelere ışık göndermesi sağlanmıştır (Şekil 2.19). Bu şekilde uzun huzme konforu her daim sağlanmış aynı zamanda da kısa huzmenin verdiği karşı tarafın gözünü kamaştırmama özelliği korunmuş olmuştur.



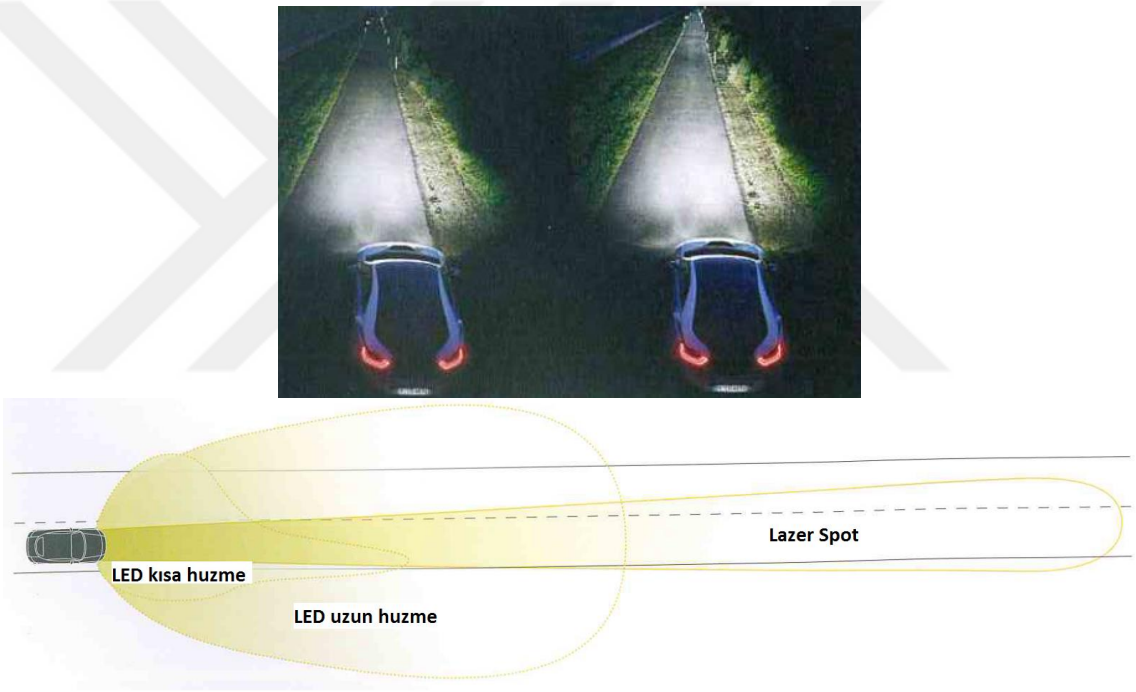
Şekil 2.19. Adaptif huzme kontrollü far sistemi (Fratty 2015)

Far içerisinde elektro-mekanik kontrollerle adaptif huzme kontrolünün sağlanması sonrasında LED sürüm tekniklerinin gelişmesiyle aynı akıllı kontrolleri yapabilen yüksek çözünürlüklü LED far sistemleri geliştirilmiştir. 2013 yılında tanıtılan matris huzme kontrollü LED far sisteminde (Şekil 2.20) istenilen bölgelerin aydınlık şiddetinin ayarlanması o bölgeleri aydınlatan LED grubunun ışığının kısılması veya kapatılması şeklinde yönetilmiştir.



Şekil 2.20. Matris huzme kontrollü LED far sistemi (Fratty 2015)

Günümüzde LED tipi ışık kaynaklarına ilave olarak Lazer tipi ışık kaynaklarının kullanılabilirliği üzerine çalışmalar devam etmektedir. 2014 yılında geliştirilen lazer far sisteminde Mavi – morötesi lazer diyotu fosfor bir çip üzerine yüksek yoğunlukta lazer ışığı göndererek beyaz ışık elde edilmektedir. Burada elde edilen ışık yüksek güçlü LED tipi ışık kaynağının yaklaşık 10 katı kadar daha fazla bir değere sahiptir. Bu yüksek spot ışığı ilk aşama olarak uzun huzme ışığa yardımcı ışık olarak geliştirilmiştir (Şekil 2.21). Lazer ışık kaynakları üzerinde çalışmalar devam etmektedir.



Şekil 2.21. Lazer far sistemi (Fratty 2015)

2.2. Kaynak Özetleri

Projenin bilimsel altyapısını oluşturmak üzere yürütülen literatür araştırması

2.2.1 Isı Transferine Yönelik Bilimsel Araştırmalar

2.2.2 Yoğuşma Oluşumuna Yönelik Bilimsel Araştırmalar

olmak üzere 2 ana başlık çerçevesinde yapılandırılmıştır.

2.2.1. Isı Transferine Yönelik Bilimsel Araştırmalar

Taşıt aydınlatma sistemlerinin ısı transfer sistematiğinin detaylı olarak irdelenmesi sürecinde literatür araştırması aşağıdaki alt başlıklar altında gruplandırılmıştır.

2.2.1.1 Halojen Lambalar Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.2 İleri Işıma Analizi Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.3 Yüzey Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.4 Ampul İçi Gaz Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.5 Ampul Camı Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.6 Isıl Temas Direnci Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.7 Saydam Parçaların Optik Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.8 Termoplastik Elemanlar Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.1.9 Termal Görüntüleme Üzerine Bilimsel Araştırmalar

2.2.1.1. Halojen Lambalar Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Cho ve Kim (2011) halojen lambaların giriş voltajlarının ve açma kapama sayısının lambanın ömrü üzerindeki etkisini incelemiş ve ömrü nasıl düşürdüğünü irdelemiştir. Çalışma sırasında yapılan karşılaştırmalarda açıp kapatma şeklinde yanan halojen lamba ömrünün sürekli yanan lambadan %31 daha az olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda voltaj girdilerine karşılık olarak ömür hesabı yapabilen formülasyonlar oluşturulmuş ve bu formülasyonların testlerle uyum sağladığı görülmüştür. Farklı bir çalışma olarak Hudoklin ve ark. (2002) çok sayıda termokuplun aynı anda kalibre edilirken ortaya çıkabilecek hata kaynaklarını araştırmıştır. Termokupların kalibre edilmesi sırasında hataların ortaya çıkmasının sebebinin ilave homojensizliklerin etkileri ve bazı ölçüm ayarlarının karakteristiklerinin olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir incelemede Carbonaro ve ark. (2002) ısı akısı yayan prob kalibrasyonu yapmak amacıyla bilinen bir ısı kaynağı olan halojen lambayı siyah cisim gibi davranış gösteren bir deney düzeneğinde kullanmıştır. Bilinen ışıma kurallarını kullanarak üretilen ısı akısının miktarını sıcaklık kontrolü ve ölçümlerden elde etmenin mümkün olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yöntem ile temassız ısı akısı ölçmeyi amaçlamışlardır.

2.2.1.2. İleri Işıma Analizi Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Logerais ve Bouteville (2010) kızılötesi halojen lambalardan oluşan bir fırının ısı akısını CFD Ace yazılımını kullanarak simülasyon (sonlu hacimler) yöntemiyle tespit etmiş ve test sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uyumluluğunu araştırmıştır. Yapılan çalışmada rejim hali simülasyonları ile test sonuçları arasında yüksek uyumluluk görülmüştür ve çalışma sonrasında simülasyon modeli üzerinde zamana bağlı analizler de yapılarak bu sistemin dinamik ısınma davranışı hassas şekilde tespit edilmiştir. Yaptıkları simülasyonlarda tungsten filaman, kuartz cam, nitrojen gazı ve hava gibi tüm malzemeler için sıcaklığa bağımlı malzeme özellikleri kullanmıştır ve ampul içerisinde halojen gazların da bulunmasına rağmen, termal açıdan etkisinin az olacağı düşünülerek ampul içindeki gazın tamamını ideal gaz nitrojen olarak kabul etmişlerdir. Sistemdeki tüm gazlar ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Yapılan simülasyonların doğrulanması aşamasında filaman sıcaklıkları kıyaslanmıştır. Bu çalışma bünyesinde lambalara verilen güç girdisinin silikon plaka üzerinde ne kadar ısı akısı oluşturduğunu denge halinde ve dinamik halde detaylı olarak incelenmiştir. Başka bir çalışmada Pettersson ve Stenström (2000) bir kızılötesi elektrikli ısıtıcı modellemişlerdir ve yaptıkları simülasyonlarda gri cisim olarak davranmayan parçalar arasındaki radyasyonla, iletim ile ve taşınım ile ısı transferi mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışma bünyesinde geniş bir voltaj datası aralığı girdi olarak kullanılarak sistemin parçaları üzerindeki sıcaklıkları tahmin eden bir model oluşturulmuş ve denge hali ile zamana bağlı durumları için yapılan simülasyonlar deneysel veriler ile kıyaslanarak uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Diğer bir inceleme olarak Chen ve ark. (2004) döküm uygulamalarında kullanılan bir indüksiyon yüzey ısıtıcısı geliştirmişlerdir. Çalışma bünyesinde hem dairesel hem de dikdörtgen şeklindeki tek sarmal ısıtıcıların yassı bir çelik plaka üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulan ısıtıcı tasarımlarının testlerle davranışlarını incelemişlerdir. Ayrıca dikdörtgen şeklindeki birden fazla sarmaldan oluşan bir ısıtıcı tasarımını da tek sarmaldan oluşan ısıtıcılar ile kıyaslamışlardır. Deneyler sırasında indüksiyon ısıtıcılara güç verilerek üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları termal kamera ile ölçülmüş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır. Ayrıca ANSYS sonlu elemanlar yazılımının hem termal hem de elektromanyetik modülleri yardımıyla bu tasarımların simülasyonlarını da yaparak benzetim mekanizması oluşturmuşlardır. Yapılan simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçların testlerden elde edilen sonuçlarla uyum gösterdiği görülmüş ve ayrıca birden fazla sarmal ile

tasarlanan indüksiyon ısıtıcının diğerlerine göre daha yüksek performans gösterdiği ve ısıtılan obje üzerinde daha düzgün sıcaklık dağılımı oluşturduğu tespit edilmiştir. Farklı bir çalışma olarak Chang ve Hwang (2006) üç boyutlu bir kızılötesi enjeksiyon yüzey ısıtıcısının ışın izleme ve zamana bağlı simülasyonu üzerinde çalışmıştır. Birkaç ayrı reflektör geometrisi kullanarak bu sistemin ısıtma kabiliyetini ölçmüşlerdir. Bir ticari yazılım olan TracePro yazılımını kullanarak enjeksiyon kalıp yüzeylerinin kızılötesi soğurma hesaplamasını yapmış olup kalıp yüzeylerinde oluşan sıcaklıkların iki boyutlu ve üç boyutlu zamana bağlı halinde hesaplanması için ise ANSYS yazılımını kullanmışlardır. Çalışma sırasında termal kamera ile yapılan ölçümlerin simülasyon sonucunda ortaya çıkan verilerle uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma sonucunda kızılötesi ısıtma sisteminin enjeksiyon kalıplama yöntemi açısından uygulanabilir ve verimli bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Diğer bir çalışmada Kim ve Cho (2002) hızlı termal işleme (Rapid Thermal Processing - RTP) yöntemi ile çalışan bir ısıtıcı geliştirmiş ve bu ısıtıcının bir simülasyon modelini kodlayarak çalıştırmışlardır. RTP yöntemiyle üretilen ürünlerde yüksek kalite sağlayabilmek için plaka sıcaklığının olabildiğince düzgün dağılımlı olması gerektiğini belirterek bu çalışmada en uygun performansı sağlayacak bir ürün optimize edilmeye çalışılmış ve geliştirilen kod ile elde edilen simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslanmış olup geliştirilen yazılımın tatmin edici sonuçlar sağladığı görülmüştür. Farklı bir incelemede Logerais ve ark. (2008) kızılötesi lambalardan bir silikon levhaya transfer edilen ısı miktarını ve ısının transfer mekanizmasını irdelemişlerdir. Tasarladıkları sistemin hem simülasyonlar ile hem de deneysel olarak performansını ölçmüşler ve deneysel veriler ile simülasyon verileri arasında uyumluluk görmüşlerdir. Yapılan simülasyonlar hem iki boyutlu hem de üç boyutlu olarak denge hali için yapılmış olup simülasyonlar için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics - CFD) yazılımı kullanılmıştır ve radyasyon ile ısı transferi ise Monte Carlo metoduyla hesaplanmıştır. Simülasyon doğrulanması için beş ayrı güç değeri kızılötesi lambalara uygulanmış ve tüm bu test verileri simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yaptıkları iki boyutlu simülasyonlar ile test sonuçları arasında üç boyutlu simülasyonların sapmasına nazaran daha fazla sapma olduğunu tespit etmişlerdir. Yapılan simülasyonlar ve testler neticesinde silikon plaka üzerinde istenen sıcaklık değerinin elde edilmesi için lambalara verilmesi gereken güç girdisini tahmin eden bir formülasyon oluşturmuşlardır. Başka bir çalışmada Huang ve ark. (2000) ısı

üreteci tasarımının hızlı termal işleme prosesi (RTP) performansı üzerinde nasıl bir sınırlama oluşturduğu gerçeğine ilave olarak reflektör yüzeylerinin düz ve açılı olması durumlarında ortaya çıkan benzerlik ve farklılıklar üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmada da lamba ringinin açılı bir reflektör yüzeyi gibi düşünülebileceği şeklinde bir tasarım prosedürü tavsiye edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında bu modifikasyonlar sayesinde sıcaklığın düzgün dağılımında önemli değişimler gözlenmiştir.

2.2.1.3. Yüzey Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Lim ve Kar (2009) metal numunelerin yayıcılık değerlerini 0.4-1.08 μm dalga boyu aralığında ve 400-1150 °C sıcaklık aralığında ölçmüş ve yüksek sıcaklıklarda çalışan metal parçaların yüzey yayıcılık ölçümünde emisyon spektroskopu cihazının kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki bu tip malzemelerin optik sabitleri ile yayıcılık değerleri arasında ilişki olduğunu belirtmiş ve birtakım bağıntılar türetmişlerdir. Başka bir çalışmada Teodorescu ve ark. (2006) %99.99 saflığa sahip bir alüminyum parçanın yüzey özellikleri üzerinde radyometrik ölçüm tekniğini kullanarak araştırmalar yapmışlardır. Kızıl ötesi spektrometre ve siyah cisim özelliği gösteren bir cihaz olan küreden oluşan aparat yardımıyla ölçümü yapılmak istenen numuneyi yüzey normali ile açı yapacak şekilde konumlandırarak ve farklı açılar için de yüzey yayıcılık ölçümü yapılmıştır. Ölçüm öncesinde alüminyum numuneyi 150 saat civarında istenen sıcaklığa ısıtarak hazırlanmış ve ardından 3 ile 14 μm dalga boyu aralığındaki yüzey yayıcılık değerleri üç farklı sıcaklık değeri için ölçülüp sonuçlar listelenmiştir. Auger elektron spektroskobu (AES - Auger Electron Spectroscopy) ve X-Ray foto-elektron spektroskobu (X-Ray Photoelectron Spectroscopy - XPS) cihazlarını alüminyumun kalınlığını ve alüminyum oksit tabakanın kompozisyonunu ölçmek için kullanmışlardır. Farklı bir incelemede Wen ve Mudawar (2004) 2.05 ile 4.72 μm arasındaki dalga boylarını baz alarak AL 1100, 7150, 7075 ve 2024 gibi alüminyum alaşımı örneklerin yüzey yayıcılık değerlerini 600, 700 ve 800 K sıcaklıkları için araştırmışlardır. Ayrıca ektrüzyon ve testere ile keserek oluşturulan örnek yüzeylerin de yayıcılık değerlerini ölçerek yüzey pürüzlülüğünün yayma katsayısı üzerindeki etkisini incelemiş ve 6-14 mikron aralığında yüzey pürüzlülüğüne sahip örnekler için yayma katsayısının 2.05 ile 3.5 μm dalga boyu aralığında hızla düşerken 3.5 ile 4.72 μm dalga boyu aralığında hızla yükseldiğini tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmada sıcaklığın etkisi

göz önüne alındığında 600 ve 700 K aralığında yayma katsayısı düşerken 700 ve 800 K aralığında artış göstermiştir. Ayrıca farklı alaşımların yüzey yayma katsayısı karakteristikleri birbirlerine çok benzerlik gösterirken değerleri farklılıklar göstermektedir. Yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğünün yayma katsayısı değerini genellikle artırdığı tespit edilmiştir. Diğer bir araştırmada Chaabane ve ark. (2011) Lattice Boltzman Methodunu (LBM) iki boyutta soğuran, yutan ve saçılma yapan ortamda zamana bağlı iletim-radyasyon ısı transfer problemini çözmede kullanmıştır. Kontrol hacmi sonlu elemanlar yöntemi (CVFEM) de ışınım özelliklerini elde etmek için kullanılmıştır. Bu yeni non-lineer hibrid algoritmaya göre, saçılan beyaz ışığın, iletim-radyasyon parametresi gibi zamana bağlı termal tepkilerini etkileyen çeşitli parametreler üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca radyasyon ısı akısı ve duvar yayma katsayısının sıcaklık dağılımına olan etkisi üzerinde de çalışılmıştır. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında bu yöntem sayesinde mühendislik bakımından problemin hangi konusunda araştırma yapılmak isteniyorsa sistemin temel davranışını yakalamak mümkün olduğu ve çözüm açısından da kıyaslandığında çözüm süresi anlamında da ciddi avantajlar sağladığı vurgulanmıştır.

2.2.1.4. Ampul İçi Gaz Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar

El-Genk ve Tournier (2008a) argon, kripton, helyum, zenon ve bu soy gazların ikili karışımlarının 0.1 MPa basınçtan 20 MPa basınca kadar basınç aralığında 1400 K sıcaklığa kadar termodinamik ve transport özelliklerini tespit etmiştir ve sıcaklık ile basıncın etkilerini de hesaba katan yarı ampirik formüller oluşturmuştur. Ayrıca 2 MPa basıncın altında ve 400 K sıcaklığın üzerinde bu soy gazların ve ikili bileşenlerinin ideal gaz gibi davrandığını tespit etmiştir. Oluşturdukları formulasyonların, 2MPa basıncın üstünde ve 40 g/mol moleküler yoğunluğun üzerindeki durumlarda hassas şekilde termodinamik ve transport özellikleri tespit edebildiğini belirtmişlerdir. Başka bir çalışma olarak yine El-Genk ve Tournier (2008b) 15 g/mol ağırlığındaki He-Xe karışımının nükleer reaktörlerde soğutma sıvısı olarak kullanılması durumu üzerine çalışmış ve bu karışımın ısı transfer katsayısının Helyumun ısı transfer katsayısından %7 daha büyük olduğu tespit etmişlerdir. Helyumun yüksek ısı transfer katsayısına sahip olması ve bu karışıma oranla çok daha az pompalanma ihtiyacı gerektirmesine rağmen gaz soğutmalı

nükleer reaktörlerde He-Xe karışımının turbo makinelerin, boyut ve kütlenin azaltılması açısından çok verimli olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

2.2.1.5. Ampul Camı Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Tempel (2002) cam malzemelerinin 1000 °C ye kadar termal iletkenlikleri tespit etmiş ve cam içindeki kompozisyonu da göz önüne alan bir ampirik model oluşturmuştur. Yapılan deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilen ampirik modelin %12 civarında hataya sahip olduğunu görmüştür. Oluşturulan ampirik model termal iletkenlik değerini, malzemenin yoğunluk ve özgül ısı değerleriyle ilişkilendirmektedir. Ayrıca çalışma sonucunda eritilmiş silikat camın termal iletkenliğinin sıcaklığa çok bağımlı olmadığını tespit etmiştir. Diğer bir çalışma olarak Kang ve Morita (2006) CaO–Al2O3–SiO2 malzemesinin birçok sayıda farklı kompozisyonlarından oluşan bir camın termal iletkenliğini 1673 K ile 1873 K arasında ölçmüştür. Yapılan hesaplamalar sırasında foton iletim teorisinden yararlanılmıştır. Bu ürün kompozisyonları için genellikle termal iletkenliğin sıcaklık ile ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca termal iletkenliğin artan CaO/SiO2 oranıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Diğer bir incelemede Tempel ve ark. (2000) farklı üniform başlangıç sıcaklıklarına sahip bir metal ile temas halindeki bir camın termal iletimini ölçmüştür. Belli aralıklarla çok ince bir termokupl vasıtasıyla temas eden yüzey üzerinden sıcaklık ölçümü alınmıştır. Oluşturulan formülasyon ile ısı iletim katsayısı hesaplanmıştır. Isıl penetrasyon katsayısının ayrı olarak ısı kapasitesine (ρCp) bölünmesi ile termal iletim katsayısı k elde edilmiştir. İletim katsayısı k' nın tekrar ölçülebilirlik sapması %3 civarında olmuştur. Bu metot küçük modifikasyonlarla katı ve eriyik haldeki numunelerle 50-850 °C aralığında ve iletim katsayıları 0.1-25 W/mK aralığında olan ürünler üzerinde çalışılmıştır. Üzerinde inceleme yapılan soda-lime silikat camlarda ısı iletim katsayısı açısından bakıldığında çevre sıcaklığından camsı geçiş sıcaklığına doğru %27-30 aralığında bir artışın söz konusu olduğu tespit edilmiştir.

2.2.1.6. Isıl Temas Direnci Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Salti ve Laraqi (1999) birbiri üzerinde kayan üç boyutlu iki cismin rejim anındaki sıcaklığını ve ısıl temas (termal kontak) direncini sonlu hacimler yöntemi kullanılarak incelemiştir. Analitik çözüm yapılırken üniform bir ısı akısına sahip tek bir pürüzsüz cisim yaklaşımı yapılmıştır. Çalışma sonucunda termal kontak direncinin yüzey ve hız

parametrelerindeki artış ile düştüğünü tespit etmişlerdir. Farklı bir çalışmada Shuyuan ve ark. (2009) termal koruma sistemlerinde kullanılan fiber yalıtkanların ısı transferi davranışlarını incelemiştir. Zamana bağlı olarak ölçülen sonuçlarla analiz modelinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, kontak direncinin önemli derecede etkili olduğunu ve analiz modelinden elde edilen sıcaklıkların numunedeki ölçülen sıcaklıkların üzerinde görüldüğünü tespit etmişlerdir. Başka bir incelemede Amara ve ark. (2009) temas yüzeylerinin üniform olarak temasından daha çok rastgele bir temastan kaynaklanan termal kontak direncinin hesaplanması üzerinde çalışmıştır. Bu hesaplamayı yapabilmek için termal kontak direnci hesaplaması pürüzlülük, piklerin sayısı ve piklerin kontak yüzeyi üzerindeki dağılımını içerecek şekilde geliştirilmiştir. Pürüzlülüğü yansıtan elamanların pik yüksekliğinin sabit ve yaklaşık olarak 7 μm yüksekliğinde olduğu varsayılmıştır. Piklerin yüzeydeki pozisyonu yazılan kodlar yardımıyla rastgele dağıtılmış ve simülasyonlar ANSYS CFX ile gerçekleştirilerek termal kontak direncinin rastgele piklerin dağılımı, sayısı ve pürüzlülük ile nasıl değiştiği incelenmiştir.

2.2.1.7. Saydam Parçaların Optik Özellikleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Jiang ve ark. (2009) yarı saydam ortamlarda derinlemesine radyasyon ile siyah PMMA malzemedeki termal enerjinin soğurulma miktarını bulmak için bir yöntem geliştirmiştir. Soğurmaya tepki olarak cisim içerisinde meydana gelen sıcaklık değişiminden dolayı zamana bağlı iletim meydana geldiği tespit edilmiştir. Schulz ve ark. (2010) plazma ile düzeltilerek elde edilen PMMA malzemenin kimyasal bileşimini kızılötesi yansıtma soğurma spektroskopisiyle (IRRAS) ile incelemişlerdir. Araştırmalarında dağlama işleminin ilk saniyelerinde bile PMMA malzemenin kimyasal bileşiminde ne tür değişimler olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Görünür spektral aralıktaki (350-800 nm) geçirgenliği ve kırılma indisini ölçmek için ise UV-VIS spektrofotometre Lambda 900 (Perkin-Elmer) cihazını ve yüzey yapısını görüntülemek için bir Philips marka Scanning Electron Microscope XR40 kullanmışlardır. Diğer bir araştırmada Khashan ve Nassif (2001) kuartz ve PMMA numunelerin 0,2-3 μm spektral bant aralığında optik sabitleri olan soğurma katsayısı, yansıtma, geçirgenlik ve kırılma indisi spektogramları üzerinde çalışmıştır. Çalışmayı 24 °C oda sıcaklığında 2,985 mm kalınlığında bir kuartz camı ve 2,353 mm kalınlığındaki PMMA üzerinde yapmışlardır. Ölçümler sırasında Shimadzu-3101PC-UV-VIS-NIR marka bir spektofotometre cihazı kullanılmıştır. Farklı bir

incelemede Yang ve ark. (2005) Bizmut titanat Bi4Ti3O12(BTO) malzemesi üzerinde optik hafıza, piezo-elektrik ve elektro-optik cihazlar kullanarak çalışmalar yapmışlardır. BTO/PMMA malzemenin d kalınlığında ince bir kompozit filminin 300-1500 nm spektrum aralığında kırılma indeksi, yutma katsayısı gibi optik sabitleri A UV-VIS-NIR spektofotometre (Lamba 19) kullanılarak ölçülmüştür. Başka bir çalışma olarak Du ve ark. (2011) bir borosilikat camının yansıtma, geçirgenlik ve soğurma katsayılarını ölçmüştür. Cam kalınlığı azaldığında bağıl hatanın arttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle bu çalışmada soğurma katsayısı hesaplanırken ince camlar kullanılmıştır. Deneyde, tüm numunelerin ölçümleri oda sıcaklığında Varian Cary 500 UV-VIS-NIR isimli spektrofotometre cihazı ile 220-800 nm (5,6-1,5eV) dalga boyları arasında ölçülmüştür. Başka bir araştırma olarak Pilon ve Viskanta (2003) yarı saydam malzemelerin iç kısımlarında oluşan baloncukların malzemenin termo-fiziksel, transport ve optik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Steimacher ve ark. (2006) SiO2 içeriğinin bir fonksiyonu olarak camın form edilebilirliği üzerinde çalışmak üzere vakum basınç altında değişik kompozisyonlarda CaO:Al2O3:SiO2 bileşimleri hazırlamışlardır. Ağırlıkça %25-45 oranında Al2O3, %31-44 oranında SiO2 ve %4,1 oranında MgO grafit numune hazırlanmışlardır. Silika içeriğinin etkisi mekanik özellikler, cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, geçirgenlik spektrumu, kırılma indeksi, kütle yoğunluğu, özgül ısı, termal geçirgenlik, termal iletkenlik ve optik yol uzunluk değişiminin sıcaklık katsayısı gibi özellikler bakımından araştırılmıştır. Numunelerin hazırlanması literatürde LSCAS olarak bilinen temel bileşim referans alınarak hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki kırılma indeksi oda sıcaklığında 632,8 nm' lik Michelson interferometresi kullanılarak ölçülmüştür ve optik geçirgenlik spektrumu görünür ve morötesi dalga boylarında UV-VIS Hitachi (U-2000) spektrofotometre kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, bu malzemelerin yukarıda bahsi geçen özellikler bakımından güçlü olduklarını, çalışma sıcaklığı aralığının çok iyi olduğunu, termal, mekanik ve optik özellikler bakımından iyi bir kombinasyon oluşturduğu vurgulanmıştır.

2.2.1.8. Termoplastik Elemanlar Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Rouif (2004) plastik enjeksiyon parçaların üretiminde radyasyon çapraz bağlı plastiklerin kullanımı üzerinde çalışmıştır. Ayrıca birçok termoplastik, elastomer ve termoplastik elastomerlerle kıyaslandığında performans açısından da daha iyi olduğunu ortaya

çıkarmıştır. Radyasyon çapraz bağlı plastiklerin kimyasal bakımdan agresif olduğunu ve yüksek sıcaklık şartlarında boyutsal açıdan kararlılığı sağladığını belirtmiştir. Radyasyon çapraz bağlı plastikler hem teknik hem de ekonomik açıdan yüksek performans plastikleriyle kıyaslandığında ana sanayi firmaları ve endüstrinin tüm dalları için önemli avantajlar sağladığı belirtilmiştir. Sonuç olarak radyasyon çapraz bağlı plastiklerin boyutsal kararlılık, ısı kaynaklı çarpılma sıcaklığı, sürünme, kızgın tel direnci, alev direnci gibi özellikleri bu ürünleri tercih edilebilir kıldığı vurgulanmıştır. Başka bir araştırma olarak Belogorokhov ve ark. (1999) yaptıkları çalışmada toplam dozajı 5x1016 ve 2x1017 cm² olacak şekilde 100 ve 175 kV enerji vererek silikon içerisine aralıklarla implant edilen oksijen ve nitrojenin davranışını incelemişlerdir. Çeşitli implantasyon aralıkları ve enerjileri denenmiştir. Numuneler FTIR, XRD ve SIMS cihazları kullanılarak ölçümlere tabi tutulmuştur. Sonuç olarak 5x1016 cm² dozaj verildiğinde tavlama esnasında nitrojen ve oksijenin ayrılmadığı gözlemlenmiştir. Bu dozajdaki tavlama işleminin faz değişimine bir etkisi görülmemiştir. Ancak oksijen-atom boşluğu komplekslerin ayrılmasına ve hacimden oksijen kaybına yol açmıştır. 2x1017 cm² dozajındaki tavlama işleminde ise implant esnasında faz değişimine rastlanmıştır. O ve N atomlarının birlikte ayrılmasının ancak oksijen atomlarının nitrojen atomlarından daha derine implant edilmesiyle oluştuğu ortaya çıkmıştır. Bu ayrılmanın eğer nitrojen oksijenden önce implant edilirse daha da fazla olacağı tespit edilmiştir.

2.2.1.9. Termal Görüntüleme Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Vadivambal ve Jayas (2011) araştırmalarında termal görüntüleme yöntemi hakkında bilgiler vermişlerdir. Bu teknolojinin termokupllara ve termo-sensörlere göre en büyük avantajı temassız olması ve belli bir bölgenin termal haritasını çıkarabildiğini söylemişlerdir. Çünkü termokupl ölçümlerinde tek bir noktadan ölçüm alınabilmekte ve malzeme mutlaka tahrip edilmektedir. Çalışmada ayrıca kızılötesi ışınları kendi içerisinde farklı bölümlere ayrıldığı da belirtilmiştir: Yakın kızılötesi (0,75-3 μm), orta kızılötesi (3-6 μm), uzak kızılötesi (6-15 μm) ve en uç kızılötesi (15-1000 μm).

2.2.2. Yoğuşma Oluşumuna Yönelik Bilimsel Araştırmalar

Yoğuşma oluşumuna dair bütün mekanizmaların ve etkili parametrelerin belirlenmesi ile ilgili bilimsel yöntem ve yaklaşımların da tasarım sürecine dahil edilmesi amacı ile yürütülen literatür araştırması aşağıdaki alt başlıklar altında tanımlanmıştır.

2.2.2.1 Yoğuşma ile Isı Transfer Ölçümleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.2 Yoğuşma Üzerine Nümerik Yürütülmüş Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.3 Düz Yüzey Üzerinde Yoğuşma Oluşumunun Nümerik Olarak İncelendiği Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.4 Damlacık Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.5 Film Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.6 Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Geometrik Etkilerin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar
2.2.2.7 Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Yüzey Pürüzlülük Etkilerinin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar

2.2.2.1. Yoğuşma ile Isı Transfer Ölçümleri Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Agarwall ve Garimella (2010) hidrolik çapı 100 μm ile 200 μm arası değişen dikdörtgen mikro kanallarda akan soğutucu akışkan R134a için yoğuşma basınç düşümünün ve ısı transfer katsayısının küçük kalite artışları şeklinde ölçümlerini yapmışlardır. Bu deneysel çalışmada yüzey pürüzlülüğü tespiti için SEM (Scaning Electron Microscope) mikroskopu, akışkan basıncı ölçümü için Rosemount basınç transduseri ve sıcaklık ölçümü için de T tipi termokupllar (OMEGA Inc., TMQSS-092(G)-6) kullanılmış olup sonuçta basınç düşümü ve ısı transferi artışının, buhar kalitesi artışıyla, kütle akışı artışıyla ve doyma sıcaklığı düşümüyle doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir araştırma olarak Ali ve Briggs (2012) çalışmalarında artırılmış yüzeylerde yoğuşma esnasında ısı transferini etkileyen alt mekanizmaları irdelemişlerdir. Araştırma sonucu olarak ısı transferi artışının, akış açısından daha az açıya sahip olduğundan dolayı yüzeye yapışan yoğuşma sebebiyle bloke olan alan haricindeki aktif alanın artışıyla ilişkisi olduğu tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada Bandhauer ve ark. (2006) yatay mikro kanal içerisinde soğutucu akışkan R134a için yoğuşma esnasında ısı transferi öngörüsünde bulunan bir metot sunmuşlardır. Bu çalışmalarında bütün sıcaklık ölçümleri için

platinyum direnç sıcaklık detektörü (Platinum Resistance Temperature Detectors-RTD) kullanmış olup soğutucu akışkanın farklı buhar sıvı kaliteleri üzerinde küçük artırım halleri için termal amplifikasyon tekniğini kullanarak hassas bir şekilde yoğuşma ısı transfer katsayısını ölçmüşlerdir. Farklı bir inceleme olarak Gstoehl ve Thome (2006a) yaptıkları bir araştırmada boru yüzeylerinde oluşan yoğuşmanın dikey konumda üst üste sıralanmış düz veya kanatçık yapılı yatay borulardaki termal performansa etkisini irdelemiş olup test kesitindeki buhar basıncını mutlak basınç transduseri ile ölçmüşlerdir. Yine Gstoehl ve Thome (2006b) yaptıkları başka bir araştırmalarında boru yüzeylerinde akan yoğuşmanın, yoğuşma oluşumunu ve ısı transfer prosesini ciddi derecede etkilediğinin gözlenmesine dayanarak ısı transfer katsayısının öngörülmesi için yeni metotlar tespit etmişlerdir. Diğer bir araştırma olarak Iqbal ve Bansal (2012) 0 ile -15 °C doyma sıcaklıkları aralığında ve 20 ile 200 kg/m²s kütle akışları ve farklı buhar kalitesi durumları için yatay düz bir boruda CO2 yoğuşmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucu olarak yoğuşma sıcaklığının artışı ile ısı transfer katsayısının düştüğü gözlenmiştir. Başka bir incelemede Jiang ve ark. (2007) yatay boru içerisinde akan soğutucu akışkan R404A ve R410A için yoğuşma ısı transferi üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada ısı transfer katsayılarının buhar kalitesi ve kütle akısı ile arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmalarında soğutucu akışkan ve ikincil soğutucu akış oranları ölçümü için mikro-hareketli Koriolis kütle akış metreleri (Micromotion Coriolis mass flow meters), farklı noktalarda basınç ölçümü için basınç transduseri ve sıcaklık ölçümleri için Platinyum RTD ile T tipi termokuplları kullanmışlardır. Diğer bir araştırmada Odaymet ve Louahlia (2012) tekil kare kesitli silikon mikro kanalda kesintili akış için lokal yoğuşma ısı transfer katsayısını irdelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel verileri literatürdeki yoğuşma ısı transfer katsayısı korelasyonlarıyla kıyaslamış olup Dobson ve Chato' nun korelasyonu hariç mevcut lokal ve ortalama yoğuşma ısı transfer katsayısı korelasyonlarının yüksek öngörülü olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bu çalışmalarında sıcaklık ölçümü için K tipi mikro termokupllar, mikro-kanalı ölçmek için SEM mikroskopu ve oluşumu görüntülemek için yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Başka bir araştırmada Son ve Oh (2012) yoğuşma sıcaklığı ve kütle akısı üzerinden yüksek doyma sıcaklığı durumunda yatay düzgün ve mikro kanatçık yapılı kanal içindeki CO2 için yoğuşma ısı transfer katsayısını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada sıcaklık ölçümü için T tipi termokupl ile basınç ölçümü için basınç transduseri kullanılmıştır. Elde

edilen sonuçları önceki ısı transfer katsayı korelasyonlarıyla kıyaslamışlardır. Sonuç olarak deneysel verileri öngörü için birçok korelasyonun yetersiz kaldığını tespit etmişlerdir.

2.2.2.2. Yoğuşma Üzerine Nümerik Yürütülmüş Bilimsel Araştırmalar

Lee ve ark. (2009) kontrol hacimdeki yapısal malzemeleri dikkate alarak (gözenekli ortam yaklaşımı) iki fazlı akış analizi için zaman-hacim ortalamalı ikili-sıvı modelini formülleştirmişlerdir. Bu çalışmada zaman-hacim ortalamalı ikili-sıvı model, lokal zaman-ortalamalı ikili-sıvı modelin yapısal malzemeleri içeren kontrol hacim üzerine ortalaması alınarak hassas bir şekilde elde edilmiştir. Meier (1999) yaptığı doktora çalışmasında nükleer santrallerde yaygın olarak karşımıza çıkan su havuzuna gömülmüş buhar püskürtme jeti yapısını detaylı bir şekilde incelemiş olup hem deneysel hem de sayısal sonuçlar elde ederek bunları karşılıklı olarak kıyaslamış ve aradaki farklılıkları ortaya koymuştur. Song ve Ishii (2000) sıkıştırılamaz tek boyutlu ikili-sıvı model için diferansiyel denklemler elde edilmesinin kararlılığı üzerinde karakteristik analizde bulunmuşlardır. Burada kararlılık kriterini, boşluk oranının ve hız profillerinin etkilerini dahil ederek momentum akısı parametreleri cinsinden önermişlerdir. Önerilen teorinin doğruluğunu test etmek için mevcut korelasyonlara uygun basit iki-fazlı akış konfigürasyonu yapılmış ve deneysel olarak korelasyonu elde edilmiş hız profilleri seçilmiştir. Sonuç olarak hesaplanan momentum akısı parametreleri eğrisiyle kararlılık eğrisi kıyaslanmışlar ve geniş bir boşluk oranı bandında her iki eğriyi uyum içerisinde bulmuşlardır. Yine Song ve Ishii (2001) başka bir çalışmalarında bu sefer sıkıştırılabilir tek boyutlu ikili-sıvı model için diferansiyel denklemler elde edilmesinin kararlılığı üzerinde karakteristik analizde bulunmuşlardır. Bu çalışmalarının sonucunda ise sıkıştırılabilir tek boyutlu ikili-sıvı modelin uygun momentum akısı parametrelerinin kullanılmasıyla bütün akış rejimi aralığında kararlı olduğu gösterilmiştir. Yaptıkları çalışmada Gong ve ark. (2012) ikili yoğuşturucu sistemli santrifüj bir çiller için sistem simülasyon aracı olan Simulink ile enerji ve ekserji analizi esas olmak üzere termodinamik simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Başka bir çalışma olarak Song ve ark. (2012) endüstriyel proseste yaygın hale gelen su havuzuna batırılmış buhar jetinde direkt temas yoğuşmasını (direct contact condensation – DCC) dikkate almış olup yoğuşma jetlerinin lokal özellikleri ve ilişkili olarak türbülans jetleri dahil olarak yoğuşma buhar

jetlerinin ana karakteristikleri irdelemişlerdir. Çalışmalarında deneysel sonuçların yanı sıra hesaplamalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics–CFD) analizlerinden de faydalanmışlardır. Sonuç olarak her ne kadar yeni sayısal metotların geliştirilmesi için birçok çalışmalar devam etse de şu anda iki-faz karışım akış problemini analiz edebilen efektif bir sayısal çözümün olmadığı belirtilmiştir. Sun ve ark. (2003) ise yaptıkları çalışmada iki grup ara yüzey alan transport eşitlikleri yaklaşımında direkt olarak uygulanabilecek değiştirilmiş ikili-sıvı model ortaya koymuşlardır. Diğer bir inceleme olarak Tang ve ark. (2012) havanın yoğuşamaz gaz kabulüyle, yatay bir borunun dış yüzeyindeki film yoğuşma ısı transfer katsayısının davranışı üzerinde irdeleme yapmak için çift sınır tabaka modelini geliştirmişlerdir. Bu çalışmalarında düzgün yatay boru üzerindeki ısı ve kütle transferini sonlu farklar metoduyla sayısal olarak çözmüş olup sınır tabakadaki hız ve sıcaklık dağılımını ortaya çıkarmışlar ve değerlendirmişlerdir. İrdelemeleri neticesinde yoğuşamaz gazın ana karışım içindeki oranının az olmasına rağmen ortalama ısı transfer katsayısının azalmasındaki etkisinin yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptığı araştırmada Yadigaroglu (2005) su havuzuna yüz üstü batırılmış hava-buhar karışım jeti üzerinden yaptığı çalışmasında ara yüzey izleme teknikleriyle donatılmış mevcut tek sıvı metotlu hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile hesaplamalı çift fazlı akışkanlar dinamiğini (Computational Multi-Fluid Dynamics–CMFD) karşılıklı olarak incelemiştir. Aynı çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin tek fazlı akışlarda güvenilir seviyede olmasına rağmen çift fazlı akışlar için hala gelişim aşamasında olduğunu vurgulamıştır. Diğer bir çalışmada Liu ve ark. (2008) zamana bağlı ve gelişen akışlarda ara yüzey yapısının dinamik değişimine dair ön görüde bulunabilmek için ara yüzey alan transport denklemi kavramını önermişlerdir. Bu yaklaşımda su içerisinde baloncuk yapılarını iki kategoriye ayırmış olup gelişen akış durumları altında her iki grup için de tek boyutlu ikili-grup ikili-sıvı modelinde momentum denklemleri üzerinden tutunma katsayılarının hesabı elde edilmiştir. Neticede her iki grubun boşluk oranı yine her iki grubun tutunma katsayılarının tayininde dikkate alınması gerektiği tespit edilmiştir.

2.2.2.3. Düz Yüzey Üzerinde Yoğuşma Oluşumunun Nümerik Olarak İncelendiği Bilimsel Araştırmalar

Benelmir ve ark. (2009) iki dikey düz plaka arasında ve durgun halde plaka-kanatçık ve boru tipi eşanjör içerisinde yoğuşmaz gazı (hava) da dikkate alarak su buharı yoğuşmasının FLUENT yazılımını kullanarak simülasyonunu yapmışlardır. Bu çalışmalarında FLUENT yazılımına bazı kullanıcı tanımlı alt programlar (user defined sub programs) eklemiş olup neticesinde hesaplanan yoğuşma akışında %7 ve ısı transfer katsayısında %10 çözüm hassasiyeti yakalayarak modellerinin güvenilirliğini göstermişlerdir. Chang (2008a) yaptığı çalışmada zorlanmış akışlı kuru doygun buhar içerisinde, yoğuşma tabakasındaki atalet ve taşınım etkileriyle beraber sıvı-buhar ara yüzeyindeki direnci de hesaba katarak izotermal dikey boru üzerindeki yoğuşma film tabakasını incelemiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar zorlanmış-akış parametresinin (forced-flow parameter) sıvı yoğuşma tabakası kalınlığının artışıyla arttığını göstermiştir. Ayrıca ekstrem ebatlarda sonsuz yarıçaplı boruda, atalet terimlerinin göz ardı edilmesinin ciddi hatalara sebep verdiği tespit edilmiştir. Bu çalışma neticesinde yüksek zorlanmış-akış parametresinin ve Jakob sayısını (Ja) ihtiva eden yoğuşma problemlerinde atalet kuvvetlerinin kesinlikle hesaba katılması gerektiği vurgulanmıştır. Chang ve Wang (2009) ise temas yüzeylerinde emiş yapan gözenekli ortam içerisindeki yatay borunun dış yüzeyi üzerinde akan sürekli film tabaka yoğuşma problemine analitik bir irdeleme yapmışlardır. Bu incelemede klasik film yoğuşma problemlerinde olduğu gibi, yoğuşma ve buhar tabakalarının ikincil bir iki-faz bölgesiyle ayrılması yerine ortak bir sınırda bir araya geldikleri, yoğuşma filminin sabit özelliklere sahip olduğu ve gözenekli ortamda Darcy kanuna uyduğu kabul edilmiştir. Neticede analitik sonuçlar Nusselt sayısının (Nu), Darcy sayısına (Da), Jakob sayısına (Ja), Rayleigh sayısına (Ra) ve emiş parametrelerine bağlı olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada Cheng ve Junming (2011) film tabaka yoğuşma kabulüyle tam bir sınır tabaka üzerine kurulmuş matematik model ile dikey plaka boyunca nemli hava yoğuşmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Bu incelemelerinde yoğuşma tabakasının sadece kalınlığına bakılarak göz ardı edilmesinin hatalı olacağını vurgulamışlardır. Yoğuşma film kalınlığının, arayüzey sıcaklık düşümünün ve arayüzey teğetsel hızın fiziksel alanı az etkilemesinin yanı sıra soğumanın ve arayüzey normal hızının önemli faktörler olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca sınır şartlarının kilit bir özelliğe sahip olduğu belirtmişlerdir. Diğer bir incelemede Chin ve

ark. (1998) eğimli izotermal düz plakalar üzerindeki buhar ve daha ağır yoğuşmaz gaz karışımı akışından karışık-taşınım laminer film yoğuşma için sonlu hacimler bazlı sayısal bir model sunmuşlardır. Bu yaklaşımlarında sıvı film ve buhar gaz karışımı (sıvı ataleti ve enerji taşınım terimleri dahil) için tam sınır tabaka denklemleri uygun sıvı-karışım arayüzey durumları kabulüyle çözülmüştür. Çalışma neticesinde sıvı ataleti etkisinin ancak küçük Prandtl sayıları ve düşük gaz konsantrasyonlarında kayda değer olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca sıvı enerji taşınımının sadece büyük Prandtl sayıları önemli ve karışık-taşınım yoğuşma için çok önemli olduğu tespit edilmiştir. Kang ve Kim (1999) ise düz plaka üzerinde akan buhar-hava karışımında laminer film yoğuşmayı incelemişlerdir. Çalışma sonucunda gaz karışımı ve soğuk duvar arasındaki küçük sıcaklık farkı için, sınır tabakadaki gaz karışımının kızgın gaz olarak değerlendirilebileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca büyük sıcaklık farkı durumlarında, arayüzeydeki gaz karışımının aşırı doymuş hale geldiği belirtilmiştir. Bu durumda yoğuşma meydana gelip, gaz karışımının sıcaklık profili arayüzeye doğru ciddi derece konkav hale geldiği ve ısı transferinin arttığı ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmalarında sıcaklık ölçümü için T tipi termokupl kullanmışlardır. Termal iletkenlik katsayısını ULYAC, TC-7000 HNC termal iletkenlik metresi ile hassas bir şekilde ölçmüşlerdir. Ayrıca anemometre ile buhar-hava karışımının hızını ölçmenin zor olduğunu belirtmekle beraber çalışmalarında bu ölçüm için lazer Doppler anemometreyi (DANTEC, 2D LDA) kullanmışlardır. Diğer bir araştırma olarak Al-Mdallal ve ark. (2011) iyi bilinen homotopi karışıklık metodunun (homotopy perturbation method-HPM) He için geliştirilmiş hali olan genişletilmiş homotopi karışıklık metodunu (extended homotopy perturbation method-EHPM) kullanarak soğuk pürüzlü dikey bir plaka üzerindeki yoğuşmadan dolayı düşen buharın sınır tabaka akışına analitik çözümler türetmişlerdir. Farklı bir inceleme olarak Groff ve ark. (2002) yatay izotermal bir plaka üzerinde buhar-hava ve buhar-hidrojen karışımlarında laminer, zorlanmış-taşınım ve film yoğuşma boyunca Nusselt sayısı için sayısal bazlı cebirsel korelasyon geliştirmişlerdir. Bu korelasyonun 0 ile %70 gaz konsantrasyonu aralığında, 45 °C ile 180 °C sıcaklık serbest akış profilleri aralığında ve 5°C ile 70 °C serbest profil ile duvar sıcaklık farkı aralığında geçerli olduğunu vurgulamışlardır. Başka bir çalışmada Khaled ve ark. (2009) dikey plaka üzerinde ivmelenen buhar akışıyla beraber plaka yüzeyde emiş veya kayma efektlerini de dikkate alarak laminer düşen film yoğuşmayı analiz etmişlerdir. Bu çalışmalarında; laminer

yoğuşmanın sabit özeliklere sahip olduğunu, buhar kısmında sabit doyma sıcaklıklı saf buhar olduğu ve sıvı-buhar arayüzeyinde kesme gerilmelerinin ihmal edilebileceğini kabul etmişlerdir. İncelemeleri sonucunda, yoğuşma ve ısı transfer oranları artışının Jakob sayısının, kayma parametresinin ve doyma sıcaklığının artışıyla paralel olduğu tespit edilmiştir. Koch ve ark. (1998) ise metal yüzeylerde atmosferik basınç altında damlacık yoğuşmayı (dropwise condensation-DWC) ortaya çıkarmak için yeni amorf hidrojeniz karbon filmlerinden başarılı şekilde faydalanmışlardır. Bu çalışmalarında, komple kaplı yüzeylerde, maksimum temas açısında, taban malzemenin yüksek termal iletkenlik katsayılarında, dikey yönlendirilmiş duvarda ve minimum duvar yüksekliğinde maksimum ısı transfer katsayısı ölçülmüştür. Diğer bir çalışmada Liu ve ark. (2004) hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodunu (Computational Fluid Dynamics-CFD) kullanarak yoğuşma problemlerinin çözülebilmesi için yöntem sunmuşlardır. CFD yazılımı olarak STREAM 4.0 kullanılmış olup analizde k-ε türbülans modeli uygulanmıştır. Ayrıca duvar hattına yakın bölgelerde daha sık mesh olacak şekilde düzgün olmayan mesh stratejisi sergilenmiştir. Yoğuşma olgusu zamana bağlı bir durum olduğu için simülasyonlar da zamana bağlı gerçekleştirilmiş olup analiz sonuçları deneysel verilerle kıyaslanarak iyi bir uyumun olduğu gösterilmiştir. Farklı bir çalışma olarak Mancin ve ark. (2012) pirinçle lehimlenmiş plaka tipi eşanjör (Brazed Plate Heat Exchanger–BPHE) içerisindeki R407C ve R410A soğutucu akışkanları karışımının yoğuşma ısı transferini incelemişlerdir ve ısı transfer katsayısının deneysel ölçümlerini raporlamışlardır. Çalışma neticesinde deneysel sonuçlar literatürdeki mevcut modellerle kıyaslanmış olup, BHPE tipi yoğuşturucu tasarımı için yeni bir hesaplama prosedürü geliştirilmiş ve mevcut deneysel verilerle doğrulanmıştır. Wu ve ark. (2001) ise damlacık tipinde yoğuşma ısı transferinin yönlendirilmiş simülasyonunun yapılması için sayısal bir yöntem sunmuşlardır. Bu çalışmalarında damlacık yoğuşmada damlacık ebatlarını ve uzaysal dağılımın simülasyonunu yapmak için başlangıç olarak rastgele fraktal modeli kullanmışlardır. Daha sonra ise tek damla üzerinde ısı transfer modeli kullanılarak yoğuşma duvar yüzeyi boyunca ısı iletimi sınır şartları belirlenmiştir. Çalışma neticesinde sayısal simülasyon sonuçlarının mevcut deneysel verilerle çok iyi bir uyum içerisinde olduğunu gösterilmiştir. Diğer bir araştırma olarak Maschmann ve Ma (2006) dikey kanallı bir plaka üzerinde oluşan yoğuşma ısı transferine kılcal akışların etkisini öngören basit bir model oluşturmuşlardır. Sayısal sonuçlar yoğuşma ısı transferinin plaka

yüksekliği, kanal derinliği ve kanal açısı tarafından etkilenmesinin yanı sıra kapiler kuvvetler tarafında meydana gelen kılcal akışlar tarafından da ciddi derece etkilendiğini göstermiştir. Farklı bir çalışma olarak Mei ve ark. (2011) tek bir damlacık yapısının gerçek büyüme oranını (RT1/3) baz alarak, çekirdeklenme, büyüme, tekrar çekirdeklenme ve damlanın kayması proseslerinin simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçları damlacıkların büyüme oranının güçlü bir şekilde ilk oluşan damlacık sayısına bağlı olduğunu göstermiştir. Panday (2003) ise dikey boru içerisinde ve paralel plakalar arasında akan buharın film yoğuşmasını incelemiş olup ısı transfer katsayısını, film kalınlığını ve basınç düşümünü saptayan bir metodoloji geliştirmiştir. Analizi tam eşleşmiş sınır tabaka eşitliklerinin hem buhar hem de sıvı fazlar için tekrar çözülmesi esasına dayanırken elde edilen eşitliklerde atalet ve taşınım terimleri göz ardı edilmemiştir. Başka bir araştırma olarak Shang ve Wang (1997) izotermal dikey plaka üzerindeki kızgın buharın kararlı hal laminer film yoğuşması hakkında, boyutsuz hız komponent metodunu kullanarak yaptıkları genişletilmiş çalışmalarında hem buhar hem de sıvı için değişken termofiziksel özellikleri hesaba katabilmek adına sıcaklık parametre metodunu ve polinomial yaklaşımı uygulamışlardır. Diğer bir incelemede Siow ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada hızı, sıcaklığı, gaz kütle oranı profillerini, film kalınlığının eksenel değişimini, basınç gradyanını ve Nusselt sayısını içeren detaylı sonuçları dikey düz plaka kanallar arasında aşağı doğru akan buhar-hava karışımının laminer film yoğuşması için elde etmişlerdir. Ayrıca çalışmaları neticesinde girişteki yoğuşamaz gaz oranı artışının film kalınlığında, lokal Nusselt sayısında ve eksenel basınç gradyanında ciddi bir düşüşe sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yine Siow ve ark. (2007) başka bir çalışmalarında ise eğimli düz plaka kanallar arasında akan buhar ve yoğuşamaz gaz karışımının laminer film yoğuşmasını incelemek için iki-faz modelini sunmuşlardır. Bu model, atalet kuvvetlerini de içeren komple iki-faz sınır tabaka denklemlerini, enerji değişimini, ara yüzey kesme kuvvetlerini ve eksenel basınç değişimini çözen sonlu hacimler metodunu içermektedir. İncelemeleri neticesinde, eğim açısının artırılmasının (Froude sayısının (Fr) düşürülmesi) daha ince ve hızlı hareket eden filmler oluşturduğu görülmüştür. İlave olarak Froude sayısının değişimiyle lokal Nusselt sayısının değişiminin film kalınlığındaki değişime nispeten çok önemli olmadığının görülmesinin yanı sıra yoğuşamaz gazın ısı transferi oranı üzerindeki zararlı etkisinin daha yüksek Froude sayıları için daha belirgin hale geldiği ortaya çıkarılmıştır. Farklı bir çalışma

olarak Srzic ve ark. (1999) eğik izotermal plaka boyunca aşağı doğru akan buhar ve hafif yoğuşmaz gaz karışımının laminer film yoğuşmasını tam sınır tabaka denklemlerini hem sıvı film hem de karışım için kullanarak incelemişlerdir. Bu çalışmada sonlu kontrol hacimler metodu esaslı bir sayısal yöntem geliştirilmiş olup, sıvı Prandtl sayıları, yüksek gaz konsantrasyonu ve yüksek sıvı aşırı soğutulması gibi geniş bir aralığı kapsayan üç buhar-gaz karışımı için sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önceki modellerle kıyaslandığında mevcut modellerin sonuçlarla ancak düşük gaz konsantrasyonu ve sıvı aşırı soğutması durumlarında uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca hafif gazların daha ağır gazlara nazaran ısı transferi üzerinde daha kısıtlı etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Diğer bir çalışmada Tovazhnyansky ve ark. (2004) yoğuşmaz bileşenler de içeren farklı çok elemanlı karışımlar için plaka tipi yoğuşturucular üzerinde ısı ve kütle transferi performansının yarı ampirik eşitlikler kullanarak sayısal simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında endüstride kullanılan dört farklı plaka tipini kullanmışlardır ve neticede dört komponentli karışımlar için plaka tipi yoğuşturucu kullanılarak elde edilen ısı ve kütle transferindeki artışın aynı proses şartlarında boru tipi yoğuşturuculara nazaran gerekli ısı transfer yüzeyini 1.8-2 kat azaltabilme imkanını sağladığı tespit edilmiştir. Volchkov ve ark. (2004) ise incelemelerinde sınır tabaka akışı sayısal çözümünden veri elde etmiş olup, nemli havanın laminer ve türbülanslı akışı için enerji ve difüzyon denklemlerini tanımlamışlardır. Ayrıca bu çalışmalarında ısı ve kütle transferi prosesi için yüzeyde buhar yoğuşmasının olması durumunu da hesaba katmışlardır. Başka bir araştırma olarak Wang ve ark. (2006) homojen gözenekli tabaka içerisindeki soğuk yatay disk civarında oluşan durgun film yoğuşmanın çözümünü gerçekleştirebilmek için bir sınır tabaka yaklaşımında bulunmuşlardır. Sayısal çözümler atış metodu ile dördüncü derece Runge-Kutta şemasının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal veriler olarak disk yüzeyi üzerinde boyutsuz ortalama Nusselt sayısı ve boyutsuz sıvı film kalınlığı farklı Darcy sayılarında, Jakob sayılarında, Prandtl sayılarında, değiştirilmiş Rayleigh sayılarında ve emme parametrelerinde elde edilmiş olup neticede elde edilen sayısal sonuçlar esas alınarak ortalama Nusselt sayısı için analitik bir korelasyon fonksiyonu tanımlanmıştır. Mosaad (1999) ise doğal ve zorlanmış taşınım koşulları altında, eğimli izotermal dairesel bir boru üzerindeki laminer film yoğuşması üzerinde yaptığı analizinde daha önceki benzer araştırmalarda ortaya çıkarılan

kabullere ilave olarak ara yüzey kesme geriliminin tespit edilmesine yönelik bazı yaklaşımları tanımlamıştır.

2.2.2.4. Damlacık Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Kim ve Kim (2011) hidrofobik ya da süper hidrofobik özelliklere sahip ıslanmaz yüzey üzerindeki damlacık yoğuşma oluşumunu belirtmek ve öngörüde bulunabilmek için matematik model geliştirmişlerdir. Bu modelde, buhar-sıvı temas direncini, damlacığın kendisi boyunca gerçekleşen iletimden dolayı olan direnci, kaplama tabakasının direncini ve damlacığın eğimli olmasından kaynaklanan direnci hesaba katarak tek bir damlanın ısı transferini analiz etmişlerdir. Elde edilen bulgular tek bir damlacık ısı transferinin ve damlacık dağılımının ciddi derecede temas açısından etkilendiğini göstermiş olup daha yüksek damlacık temas açısının yoğuşma ısı transferini artırdığını ortaya çıkarmıştır. Başka bir incelemede Li ve ark. (2011) soğuk dikey boru üzerinde etanol ve su buharlarından oluşan karışım için damlacık yoğuşma durumunda ısı transfer katsayısını tanımlayan yarı ampirik bir model oluşturmuş olup bu modelde yoğuşma damlacığı boyunca olan ısı transfer prosesiyle birlikte buhar sınır tabakasındaki difüzyon prosesinin analizini de dahil etmişlerdir. Ma ve ark. (2012) ise pürüzlülük uygulanmış süper hidrofobik yüzeylerde nemlendirme modu gelişimini de dahil ederek süper hidrofobik ve hidrofobik yüzeylerde yoğuşamaz gaz havanın olması halinde damlacık yoğuşma ısı transfer karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmalarında, yüzey pürüzlülüğü tespiti için SEM mikroskopundan, sıcaklık ölçümü için T tipi termokupllardan ve data toplayıcı cihazdan, damlacık temas açısının tespiti özel ölçüm sisteminden ve oluşumu kaydetmek için 50 fps hızlı kameradan faydalanmışlardır.

2.2.2.5. Film Tipinde Yoğuşma Oluşumu Üzerine Bilimsel Araştırmalar

Chang (2008b) yüzeylerde emiş sağlayan gözenekli bir ortam içerisinde daldırılmış yatay disk üzerindeki iki boyutlu durgun film yoğuşma akış problemi üzerinde teorik bir araştırma gerçekleştirmiş olup kapiler kuvvetler sebebiyle sıvı film ve buhar alanları arasında iki fazlı bir bölgenin oluştuğunu belirtmiştir. İncelemesi neticesinde kapiler kuvvetin ve duvardaki emme etkisinin ısı transfer performansı üzerinde ciddi derecede tesir ettiğini tespit etmiştir. Ayrıca boyutsuz ısı transfer katsayısının Darcy sayısına (Da), Jakob sayısına (Ja), efektif Rayleigh sayısına (Rae), efektif Prandtl sayısına (Pre), emme

parametresine ve kapiler parametreye bağlı olduğunu göstermiştir. Liao (2010) yoğuşamazların (non-condensable) olması veya olmaması durumunda doğal, karışık ve zorlanmış taşınım rejimleri için laminer film yoğuşma iki-faz sınır tabaka denklemlerinin çözülmesine yönelik birleşik formülleştirme gerçekleştirmiştir.

2.2.2.6. Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Geometrik Etkilerin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar

Salimpour ve Yarmohammadi (2012) yatay boru içerisindeki R-404A soğutucu akışkanının zorlanmış yoğuşması boyunca basınç düşümü üzerinde bükülmüş şerit geçmelerin etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler sonucunda düz bir boruya nazaran boruya ilave takılmış bükülmüş şerit geçmelerin yoğuşma boyunca gerçekleşen basınç düşümünü %89' dan %239' a çıkardığı görülmüştür.

2.2.2.7. Yoğuşma Oluşumu Üzerinde Yüzey Pürüzlülük Etkilerinin İncelendiği Bilimsel Araştırmalar

Grooten ve van der Geld (2012) lokal olarak uygulanmış Ti kaplamanın kompakt plaka ısı eşanjöründe damlacık yoğuşmadaki ısı transferi ve damlacık drenajı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmalarında gaz hacminin ölçülmesi için I.G.A. rotorgazmetre, eşanjördeki ısı kayıpları ölçümü için TNO PU ısı akısı sensörü, gaz sıcaklığı ölçümü için SMT sıcaklık sensörlerini, hız profilleri ölçümü için Prandtl borusu, izafi nemin ölçümünde üst değerler için akustik sensör ve alt değerler için Vaisala HMP247 ile HMP135 sensörünü, yoğuşma sıcaklığının ölçülmesi için Pt100, yüzey sıcaklığı ölçümü için FLIR PM575 termal kamera ve yoğuşma oluşumunu kaydetmek için 29 fps özellikli Kodak Megaplus CCD kamera kullanılmış olup, kaplama ile artırılan yüzey kalitesinin yoğuşma drenajı üzerinde çok ciddi bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Mohamed (2006) ise dikey silindirler içindeki buhar yoğuşma prosesinde döndürme ve yüzey pürüzlülüğünün ısı transferi üzerindeki etkilerini deneysel olarak irdelemiştir. Çalışma neticesinde Nusselt (Nu) sayısı ana olarak Reynolds (Re) ve Prandtl (Pr) sayılarına bağlı iken ısı transferindeki ya da diğer bir deyişle Nusselt sayısındaki artışın Weber sayısı (We) değerine ve yüzey tipine bağlı olduğu gösterilmiştir. Başka bir çalışmada Russo ve ark. (2012) mezo-gözenekli silisli malzemelerde uçucu organik bileşiklerin yoğuşma/buharlaşma ve tutunma (adsorption) entalpileri üzerinde deneysel

çalışmalar yapmış olup, çalışma neticesinde daha dar mezo-gözenekli malzemeler için kapiler yoğuşma ile ilişkili izosterik entalpilerin molar yoğuşma entalpilerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

2.3. Kuramsal Temeller

Taşıt aydınlatma sistemi üzerine ısıl kriterler ve yoğuşma önleme odaklı yürütülecek bir geliştirme çalışmasında yapılacak nümerik simülasyon çalışmalarının sistem içindeki enerji kaynağı olan ampul filamanından başlayarak ampul içindeki soygaz hacmini, lamba geometrisi içindeki hava hacmini ve lambayı oluşturan bütün yapısal bileşenleri (ampul malzemesi, ampul bağlantıları, hava venti, reflektör, lens ve diğer iç parçalar) içine alacak şekilde yürütülme zorunluluğu bulunmaktadır. Taşıt aydınlatma sisteminin ısıl mekanizması ampul gücü ile sistemin tamamının ısıl dengesi üzerine kurulmuştur. Taşıt aydınlatma sistemi içindeki ısı transfer mekanizması iletim, taşınım ve ışıma olmak üzere her 3 ısı transfer modunu da kapsamaktadır. Öte yandan hem ampul içindeki soy gazın hem de lamba içindeki havanın doğal taşınım kaynaklı hareketinin taşıt aydınlatma sisteminin genel ısı transfer sistematiğine olan etkisinden dolayı bu rejimin de inceleme altında tutulma zorunluluğu bulunmaktadır (Kersch ve Schafbaur 2000, Park ve Jung 2001). Buradan hareketle ampul ve lamba geometrileri içindeki 3-boyutlu akışkan hacimlerinde süreklilik, momentum ve enerji denklemleri çözülecektir. Süreklilik ve momentum denklemleri sırası ile Eş. (2.1) ve Eş. (2.2) ile verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}\left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial\left(\rho \vec{V}\right)}{\partial t} + \rho \vec{V}\,\mathrm{div}\,\vec{V} = -\,\vec{\mathrm{grad}}\,P + \mu \Delta \vec{V} + \vec{S}_M \tag{2.2}$$

div ve grad açıklamaları **EK-1**' de verilmiştir. Taşıt aydınlatma sisteminin genel ısı transfer incelemesinin yürütülebilmesi için zamanla değişen yapıdaki iletim, taşınım ve ışıma mekanizmalarının eş zamanlı çözülmesi gerekmektedir. Aydınlatma sisteminin çevresi ile ısıl denge şartını sağlaması gerektiğinden, lambanın akışkan hacimlerini ve yapısal kısımlarının tamamını kapsayacak şekilde yürütülmesi gerekecek ısıl incelemeler

Eş. (2.3) ile verilen enerjinin korunumu denkleminin çözülmesi ile gerçekleştirilecektir (Cheng ve Junming 2011, Logerais ve Bouteville 2010, Benelmir ve ark. 2009).

$$\frac{\partial(\rho h_o)}{\partial t} + \mathrm{div}\left(\rho \vec{V} h_o\right) = \mathrm{div}\left(k \vec{\mathrm{grad}}\, T\right) + S_h + \frac{\partial P}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}\right]$$

$$+\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z}\right] + \left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z}\right] + \frac{\Psi}{\forall} \qquad (2.3)$$

Eş. (2.3)'de soldaki ilk terim zamanla değişimi, ikinci terim ise taşınım ile ısı transferini göstermektedir. Eşitliğin sağındaki ilk terim iletim ile ısı transferini tanımlarken, S_h ışıma kaynaklı ısı transferini, Ψ ampul güç seviyesini, $\forall$ filaman hacmini ve h_o toplam entapliyi göstermektedir ki açık ifadesi aşağıdaki Eş. (2.4) ile tanımlanmıştır.

$$h_o = i + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}\left(u^2 + v^2 + w^2\right) \qquad (2.4)$$

Bu aşamada vurgu yapılması gereken nokta lamba hacmi içindeki taşınımın büyük ölçüde doğal modda olacağından $\partial P/\partial t$, $\mathrm{div}\left(\vec{V}\tau_{ij}\right)$ ve $(1/2)(u^2+v^2+w^2)$ terimlerinin Eşitlikler (2.3) ve (2.4) ikincil seviyede etkili olabileceğidir. Gerek bu tespitten hareketle gerekse de taşıt aydınlatma sistemleri üzerinde yürütülen endüstriyel çalışmalardan aktarılabilecek teknolojik bilgi, lambanın genel ısı transfer mekanizması içinde taşınımın ışımaya göre daha az etkili olduğu yönündedir. Bu sebeple far gövdesi içinde birbirlerini gören yüzeyler arasındaki ışıma ısı transfer düzeyinin hassas hesaplanmasına yönelik bir gerek kendisini hissettirmektedir (Carbonaro ve ark. 2002, Vujicic ve ark. 2006, Chai 2003, Lin ve Dold 2001, Shamoun 2001).

Yayıcı-emici ve saçıcı bir ortamın ışıma ile ısı transfer denklemi aşağıda verilmiştir (Modest 1993).

$$\Omega \vec{\mathrm{grad}}(I(r,\Omega)) = -(\kappa+\sigma)I(r,\Omega) + \varepsilon I_b(r) + \frac{\sigma}{4\pi}\int_{\Omega'=4\pi} I(r,\Omega)\Phi(\Omega' \to \Omega)d\Omega' \qquad (2.5)$$

Burada $\Omega \vec{\mathrm{grad}}(I(r,\Omega))$ ışıma yoğunluğunun belirlenmiş Ω yönündeki gradyanı iken, $-(\kappa+\sigma)I(r,\Omega)$ terimi κ emilimi ile σ saçılımına bağlı olarak ışıma yoğunluğundaki

değişimi tanımlamakta, $\varepsilon I_b(r)$ yayılım düzeyine karşılık gelmektedir. $\sigma/4\pi \int_{\Omega'=4\pi} I(r,\Omega)\Phi(\Omega' \to \Omega)d\Omega'$ yüzeye diğer yüzeylerden saçılma ile gelen ışıma miktarı iken buradaki $\Phi(\Omega' \to \Omega)$ terimi yüzeye Ω' yönünden gelen ışıma ile yüzeyden Ω yönünde ayrılan ışıma düzeyleri için faz fonksiyonudur. Eş. (2.5)' te kendisine yer bulan yüzey üzerindeki ışıma yoğunluğunu $(I(r,\Omega))$ ise Eş. (2.6) ile hesaplanmaktadır (Chaabane ve ark. 2011, Cui ve Li 2004, Ben ve ark. 2005):

$$I(r,\Omega) = \varepsilon I_b(r) + \frac{\rho}{\pi} \int_{\pi\Omega'} |n\Omega'| I(r,\Omega') d\Omega' \tag{2.6}$$

Ampul camı ve lens gibi yarı saydam malzemeleri içeren sistemlerde, Eş. (2.5) ile verilen ışıma ile ısı transfer denkleminin nümerik çözümü bilimsel araştırmalarda da görüldüğü üzere (Mazumder ve Kersch 2000, Logerais ve ark. 2008, Rousse 2000, Tang ve ark. 2009) Monte-Carlo Metodu (CFX) veya Discrete Ordinates Radiation Model (FLUENT) gibi yarı saydam malzemelerin ışınım enerjisinin yutmasını da simüle edebilen yöntemlerle yürütülmektedir. Mazumder ve Kersch (2000) Monte Carlo yönteminin akış şemasını makalelerinde detaylandırmışlardır. Bu yöntemde her bir yüzey parçasından yayılan ışınlar, o yüzey veya başka bir yüzey tarafından emilene kadar takip edilmektedir. Bu nedenle Eş. (2.5) ile, i nolu her bir yüzey parçası ile j nolu diğer bütün yüzey parçaları arasındaki ışıma enerjisinin karşılıklı alıp-verilmesinin hesap edilmesi amaçlanmaktadır. Bu mekanizmanın açık ifadesi Eş. (2.7) ile şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$Q_i = q_i A_i = \sum_{j=1}^{N_s} (M_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon_j)\sigma T_j^4 A_j \tag{2.7}$$

Burada N_s toplam yüzey parçası sayısını tanımlamakta kullanılırken, M_{ij} i nolu yüzey parçasının yaydığı ve j nolu yüzey parçası tarafından emilen ışıma miktarlarının oranını veren ışıma enerjisinin karşılıklı alıp-verilme matrisidir.

Temel ısı transferi teorisine göre (Incropera ve De Witt 1990) ışımanın taşındığı fotonlar bir yüzey tarafından emilmeden önce pek çok aksiyon içinde bulunurlar. Işıma bir yüzeye çarptığında emilme, yansıma ve geçirme gibi proseslere maruz kalır (Siegel ve Howell

1992). Bu aksiyonların her biri ışıma dalga boyuna, ışımanın ilerleme yönüne, yüzeylerin oryantasyonuna ve yüzeylerin optik özelliklerine bağlıdır.

Optik özellikler Eş. (2.8) ile verilen dalga boyuna bağlı kompleks kırılım indeksi ($\bar{n}_\lambda$) ile tanımlanmaktadır. $\bar{n}_\lambda$ yarı-saydam veya opak olabilecek yüzeylerin emiciliğinin, yayıcılığının, yansıtıcılığının ve geçirgenliğinin belirlenmesini sağlar (Logerais ve Bouteville 2010, Benelmir ve ark. 2009, Chen ve ark. 2009, Teodorescu ve ark. 2006, Kitamura ve Pilon 2009).

$$\bar{n}_\lambda = n_\lambda - ik_\lambda \tag{2.8}$$

Taşıt aydınlatma sistemlerinde enerji kaynağı olan filamanın ulaştığı yüksek sıcaklıklardan dolayı yaydığı ısının büyük oranda ışıma ile olması yarı-saydam olan kuartz veya sert-camdan imal edilen ampul camının optik özelliklerinin önemini daha da artırmaktadır. Dalga boyuna bağlı emilim katsayısı ($\alpha\lambda$) bu noktada araştırmacıların dikkate aldığı parametreler arasındadır. Öte yandan yarı-saydam yüzeyin emiciliği, yansıtıcılığı ve geçirgenliği aşağıdaki Eş. (2.9)-(2.11) ile verilmektedir.

$$A_{st} = \frac{(1-\rho)(1-\tau)}{1-\rho\tau} \tag{2.9}$$

$$R_{st} = \rho\left[1 + \frac{(1-\rho)^2\tau^2}{1-\rho^2\tau^2}\right] \tag{2.10}$$

$$T_{st} = \frac{(1-\rho)^2\tau}{1-\rho^2\tau^2} \tag{2.11}$$

Burada

$$\rho = \frac{1}{2}\left(\frac{\tan^2(\theta_1-\theta_2)}{\tan^2(\theta_1+\theta_2)} + \frac{\sin^2(\theta_1-\theta_2)}{\sin^2(\theta_1+\theta_2)}\right) \qquad \tau = e^{-d\alpha_\lambda} \qquad \alpha_\lambda = \frac{4\pi k_\lambda}{\lambda} \tag{2.12a-c}$$

olarak tanımlanmaktadır ki θ_1 1 nolu ortamın isabet yönü ile yüzey dik yönü arasındaki açı, θ_2 2 nolu ortamın kırılma yönü ile yüzey dik yönü arasındaki açı ve d ise ışımanın katı hacim içinde hareket ettiği mesafedir.

Ampulün tungsten filamanı gibi opak yüzeylerde geçirgenlik kesinlikle sıfırdır. Opak yüzeyin emiciliğinin (A_{op}) bilinmesi durumunda yansıtıcılık aşağıdaki gibi hesap edilebilir:

$$R_{op}=1-A_{op} \tag{2.13}$$

Hem yarı-saydam hem de opak durumlarda, Kirchoff Kuralı'na göre (Incropera ve De Witt 1990) dalga boyu ve yön şartlarına bağlı olarak emicilik ve yayıcılık birbirlerine eşittir:

$$\alpha_{\lambda,\theta}= \varepsilon_{\lambda,\theta} \qquad A_{\lambda}= \varepsilon_{\lambda} \tag{2.14a-b}$$

Işıma ile ısı transferinin iletim ve taşınım modlarına göre daha kompleks ve çok parametre ile bağlantılı bir karaktere sahip olması bilimsel araştırmalarda Monte-Carlo Metodu (CFX) veya Discrete Ordinates Radiation Model (FLUENT) gibi yarı saydam malzemelerin ışınım enerjisinin yutmasını da simüle edebilen yöntemlerin kullanılması ön plana çıkmıştır. Bu yöntemlerde ışımanın taşındığı fotonların dalga boyunu, yönünü ve yörüngesini yayılımın başladığı noktadan emilim noktasına kadar tayin edilmektedir. Bu noktadan hareketle ışımanın baskın ısı transferi modu olan bu doktora tezi çalışmasının nümerik simülasyon adımında bu yöntemler (Benelmir ve ark. 2009, Utanohara ve ark. 2011, Papadikis ve ark. 2011, Shah ve ark. 2010) kullanılacaktır.

Taşıt aydınlatma sisteminin lens yüzeyi üzerinde yoğuşma oluşumunun incelenmesine yönelik formülasyon içeriği yukarıda tanımlanan akışkan hareketi-ısı transferine dair metodun tamamını kapsamakla birlikte aşağıda sunulan ek formüllerin de uygulanmasını gerektirmektedir. Lambanın içindeki hava-su buharından oluşan 2 gazlı karışım için taşınım-difüzyon denklemi her bir gaz tipi için Eş. (2.15) ile verilmektedir (Cheng ve Junming 2011, Siow ve ark. 2004, Benelmir ve ark. 2009).

$$\frac{\partial \rho W_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho u W_i\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho v W_i\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho w W_i\right)=-\frac{\partial}{\partial x}J_{i,x}-\frac{\partial}{\partial y}J_{i,y}-\frac{\partial}{\partial z}J_{i,z} \tag{2.15}$$

Burada W_i i nolu gazın kütle oranı ve $J_{i,k}$ i nolu gaz türü i ile karışım arasındaki konsantrasyon gradyanından oluşan k yönündeki difüzyon akısını tanımlamaktadır. Buradan hareketle difüzyon akıları (Tang ve ark. 2012, Meier 1999, Cheng ve Junming 2011, Siow ve ark. 2004, Benelmir ve ark. 2009) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$J_{i,x} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial W_i}{\partial x} \qquad J_{i,y} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial W_i}{\partial y} \qquad J_{i,z} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial W_i}{\partial z} \tag{2.16a-c}$$

Lamba içindeki akışkan hacmindeki karışım ortamı için enerjinin korunumu denklemi Eş. (2.17) ile verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}[u(\rho h)] + \frac{\partial}{\partial y}[v(\rho h)] + \frac{\partial}{\partial z}[w(\rho h)] = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x} - \sum_k h_k J_k \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y} - \sum_k h_k J_k \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z} - \sum_k h_k J_k \right) \tag{2.17}$$

İdeal bir gaz karışımının hissedilir entalpisi Eş. (2.18) ile bulunurken,

$$h = \sum_k W_k h_k + \frac{P}{\rho} \tag{2.18}$$

karışım içinde bulunan her bir gaz türünün hissedilir entalpileri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$h_k = \int_{T_{ref}=298.15}^{T} C_{p,k}\, dT \tag{2.19}$$

Yoğuşma üzerine yürütülen araştırmalarda ticari yazılım kullanılmasına rağmen üzerinde çalışılan mühendislik sisteminin spesifik gereklerine göre *Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar*'ın da (User Defined Functions - UDF) araştırmacılar tarafından hazırlanarak yazılıma entegre edildiği yapılan literatür araştırması kapsamında belirlenmiştir (Benelmir ve ark. 2009, Papadikis ve ark. 2011, Shah ve ark. 2010). Bu özel fonksiyonlar difüzyon veya taşınım-difüzyonu üzerine hazırlanmaktadır. Sadece difüzyon akısı dikkate alındığında Eş. (2.20) çözülmesi gerekirken,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho W_k) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k \frac{\partial W_k}{\partial x_i} \right) = S_{wk} \qquad k=1,2,\ldots,N \tag{2.20}$$

taşınım ve difüzyon akılarının incelenmesi durumunda ise Eş. (2.21) denklem sistemine dahil edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho W_k) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i W_k - \Gamma_k \frac{\partial W_k}{\partial x_i}\right) = S_{Wk} \qquad k=1,2,\ldots,N \tag{2.21}$$

Eş. (2.20)-(2.21)' de Γ_k difüzyon katsayısını, S_{Wk} kullanıcı tarafından her bir gaz türü için tanımlanacak kaynak terimini ifade etmektedir.

Hava ortamındaki su buharının yoğuşması sırasındaki ısı ve kütle transferi mekanizmasının teorik analizi iki yaklaşımın uygulanması ile gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki sınır-tabaka analizini içerirken ikincisi ısı ve kütle transferi arasındaki analoji üzerine kuruludur. Isı ve kütle transferi analojisi karışım-yoğuşma arayüzeyindeki ısıl denge denklemlerini kullanmaktadır. Gaz karışımından transfer edilen toplam ısı akısını oluşturan alt bileşenler (i) Hava ve yoğuşma arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan taşınımın hissedilir bileşeni ve (ii) Nemli hava içindeki buharın kısmi yoğuşmasına neden olan buhar faz değişim ısısı kaynaklı gizli (latent) bileşenler olmak üzere iki kısımdır. Sınır tabaka analizi hava-buhar karışımı için kütle, momentum ve enerji denge denklemlerinin nümerik çözümü ile yürütülmektedir. Bu tez çalışmasında ticari CFD (Computational Fluid Dynamics) yazılımı FLUENT' in Eulerian Wall Film (EWF) modeli kullanılarak yoğuşma film tabaka analizleri gerçekleştirilecektir. EWF modeli hesaplamalarında kullanılan 2 boyutlu film tabakanın 3 boyutlu ortamda kütlenin korunumu denklemi Eş. (2.22) (Anonim 2015) olarak aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla_s . \left[h \vec{V}_l\right] = \frac{\dot{m}_s}{\rho_l} \tag{2.22}$$

Burada ρ_l sıvı yoğunluğu, h film yüksekliği, ∇_s yüzey gradyan operatörü, $\vec{V}_l$ ortalama hızı ve $\dot{m}_s$ de birim duvar alanı başına denk gelen kütle kaynağıdır.

Film tabaka için momentumun korunumu da Eş. (2.23) (Anonim 2015) olarak verilmiştir.

$$\frac{\partial h \vec{V}_l}{\partial t} + \nabla_s . \left(h \vec{V}_l \vec{V}_l\right) = -\frac{h \nabla_s P_L}{\rho_l} + . \left(\vec{g}_\tau\right) h + \frac{3}{2\rho_l} \vec{\tau}_{f_s} - \frac{3\nu_l}{h} \vec{V}_l + \frac{\dot{q}}{\rho_l} \tag{2.23}$$

Burada;

$$P_L = P_{gas} + P_h + P_\sigma$$

$$P_h = -\rho h(\vec{n}.\vec{g})$$

$$P_\sigma = -\sigma \nabla_s.(\nabla_s h)$$

Eş. 2.23' ün sol tarafındaki terimler sırasıyla zamana bağlı ve taşınım etkilerini göstermektedir. Sağ tarafında ise, ilk terim gaz akış basıncı, duvar yüzeyi normalindeki yerçekimi ve yüzey gerilimi etkilerini içermektedir. İkinci terim film paraleli yönündeki yerçekimi etkisini göstermektedir. Üçüncü terim gaz-film arayüzeyindeki viskoz kayma kuvvetidir. Dördüncü terim film içerisindeki vizkos kuvveti göstermektedir ve son terim de damlacık toplanması ve dağılmasını dikkate alan terimdir.

Film tabaka için enerjinin korunumu denklemi Eş. (2.24) (Anonim 2015) olarak verilmiştir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial(hT_f)}{\partial t} + \nabla_s.\left(h\vec{V}_f hT_f\right) &= -\frac{1}{\rho C_P}\left\{k_f\left[\frac{T_s - T_f}{h/2} - \frac{T_f - T_w}{h/2}\right] + \dot{q}_{imp} + \dot{m}_{vap}L(T_s)\right\} \\ &= -\frac{1}{\rho C_P}\left\{2k_f\left[\frac{T_s - T_f}{h} - \frac{T_f - T_w}{h}\right] + \dot{q}_{imp} + \dot{m}_{vap}L(T_s)\right\}\end{aligned} \tag{2.24}$$

Bu denklemde T_s film-gaz arayüzeyindeki sıcaklık, T_f ortalama film sıcaklığı, T_w duvar sıcaklığıdır. $\dot{q}_{imp}$ terimi duvara doğru olan akışta sıvı çarpmasından dolayı olan kaynak terimidir. $\dot{m}_{vap}$ terimi ise kütle buharlaşması yada yoğuşma oranı ve L terimi de faz değişiminden kaynaklanan gizli ısıyı göstermektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Yoğuşma önleme odaklı bir tasarımın yapılabilmesi amacıyla bilgisayar ortamında yoğuşma analizi yapılacaktır. Yoğuşma zamana bağlı bir oluşumdur ve bu sebeple simülasyonunun da zamana bağlı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Zamana bağlı simülasyonda her bir zaman adımı tek tek çözülmektedir ve dolayısıyla zamandan bağımsız analize oranla daha uzun çözüm süreleri gerektirmektedir. Bu sebepten dolayı simülasyon girdilerinin doğru analiz sonuçlarını vermesi için yapılan analiz denemelerinin zamana bağlı simülasyon gerçekleştirmeden önce zamandan bağımsız analizlerin de yapılması uygun bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında öncelikli olarak detaylı malzeme özelliklerinin ve simülasyon metotlarının uygun olarak kullanılabilmesi için zamandan bağımsız analizler gerçekleştirilecektir. Daha sonra zamana bağlı analizler ve takiben yoğuşma analizleri yapılacaktır.

Yüksek lisans tez çalışmasında (Boduroğlu 2010) yuvarlak geometrili ÇAP 70 otomotiv dış aydınlatma lambasının zamandan bağımsız analizleri gerçekleştirilmiş, ampulden yayılan yüksek ışınım enerjisinin alüminyum kaplamalı yüzey ve kaplamasız yüzeyler üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımlarındaki etkisi detaylı bir şekilde incelenmişti. Bu doktora tez çalışmasında ilk olarak önceki yüksek lisans tez çalışmasında incelenen ÇAP 70 (Şekil 3.1) lambasının detaylı malzeme özellikleriyle birlikte zamandan bağımsız analizleri gerçekleştirilecektir. Lamba reflektör, lens ve ampul soketi ve ampul içermekte olup tek üniteden oluşmaktadır. Lambada 12V gerilimli P21W ampul kullanılmaktadır. Yüksek lisans tezine benzer olarak simülasyonda ışınım modellenmesinin neticelerinin daha iyi kıyaslanabilmesi için alüminyum kaplamalı, alüminyum kaplamasız açık gri ve siyah reflektörlü üç lamba analiz edilecek ve sonuçları detaylı bir şekilde kıyaslanacaktır.



Şekil 3.1. ÇAP 70 lambası

Doktora tez çalışmasının asıl inceleme konusu olan yoğuşma analizleri için ise ÇAP 70 lambasına nazaran kısmen daha kompleks yapılı Atego DRL (daytime running light – gündüz yanan lamba) ve sinyal ön aydınlatma lambası kullanılacaktır (Şekil 3.2). Atego DRL ve sinyal lambası DRL ve sinyal ampulü, ampul soketleri, reflektör ve lensten oluşmaktadır. ÇAP 70 lambası analizlerinde doğrulanan simülasyon girdileri Atego DRL ve sinyal lambası analizlerinde kullanılacaktır.

Atego DRL ve sinyal lambasının tasarımı gereği ampul tarafından ısıtılmasının zor olduğu soğuk bölgeler içermesi özellikle yoğuşma oluşumuna elverişli bir yapı ortaya çıkarmaktadır. Yoğuşma oluşumuna elverişli bu tarz tasarımsal soğuk bölgeler içermesi tez çalışmalarında Atego DRL ve sinyal lambasının kullanılmasına karar verilmesinde önemli paya sahiptir.



Şekil 3.2. Atego DRL ve sinyal lambası

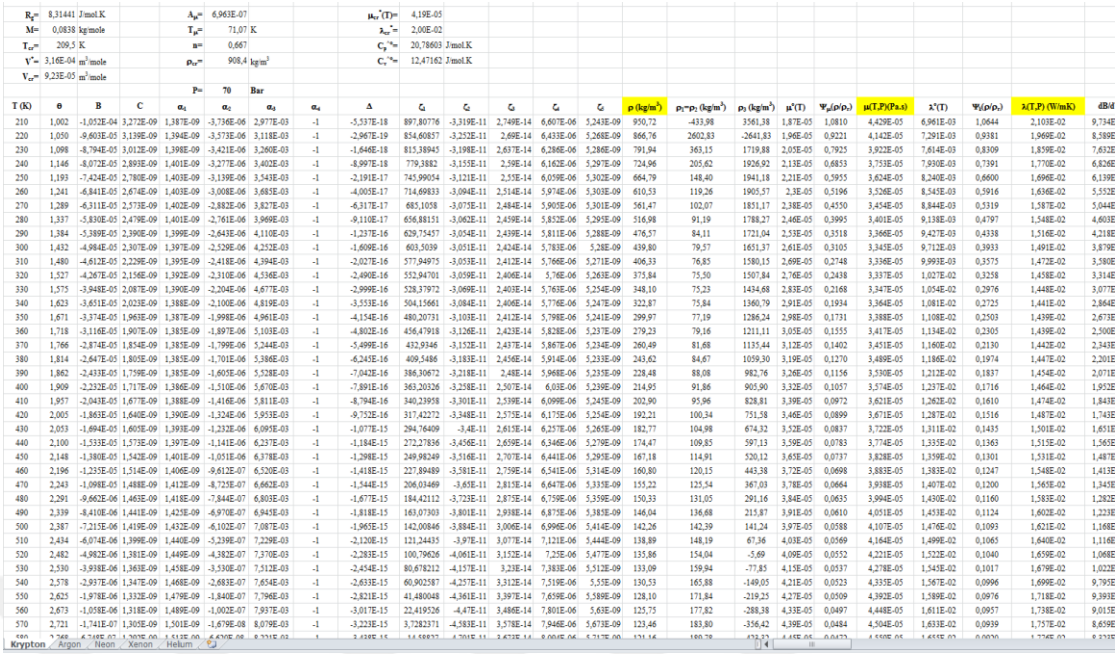
3.2. Yöntem

3.2.1. Malzeme Özellikleri

Kuramsal Temeller bölümünde ortaya koyulan nümerik simülasyon çalışmalarına yönelik metot ve formulasyon, 3-boyutlu lamba geometrisi dahilindeki akışkan hacimleri ile yapısal parçalar üzerindeki ısı transferi mekanizmalarını iletim, taşınım ve ışıma modlarının tamamını içerisine alacak şekilde bilimsel literatüre uygun olarak yapılandırılmıştır. Öte yandan gerek ampul içindeki soy gaz ile lamba içindeki havanın gerekse de lambayı oluşturan fiziksel kısımların fiziksel, ısıl ve optik özelliklerinin de detaylı tanımlanma zorunluluğu bulunmaktadır. Buradan hareketle Literatür Özeti bölümünde de aktarıldığı üzere ampullerde kullanılan soy gazlar ile havanın viskozite, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklık ve basınç etkisindeki değişimleri de literatür kaynaklı olarak tespit edilmiştir. Buna ilave olarak tungsten filaman, kuartz, sert-cam, reflektör ve lens malzemelerinin yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklık ile değişimleri, ayrıca yine bu malzemelerin yayıcılık, emicilik, yansıtıcılık ve geçirgenliğinin dalga boyuna bağlı değişimleri de yürütülen literatür araştırması neticesinde detaylı olarak derlenmiştir.

3.2.1.1. Ampul Gazı Özellikleri

P21W ampul içinde 0,5 bar basınç altında kripton gazı bulunmaktadır. Ampul içinde düşük oranda halojen gazlar da bulunmasına rağmen bilgisayar destekli analizlerde, ampul içindeki gaz ortamının saf kripton olduğu kabul edilecektir. El-Genk ve Tournier (2008a)' in araştırmasından faydalanılarak sıcaklık bağımlı gaz dataları hesaplanmıştır (Şekil 3.3). Ampul içi gazı dataları ayrıca **EK-2**' de verilmiştir.

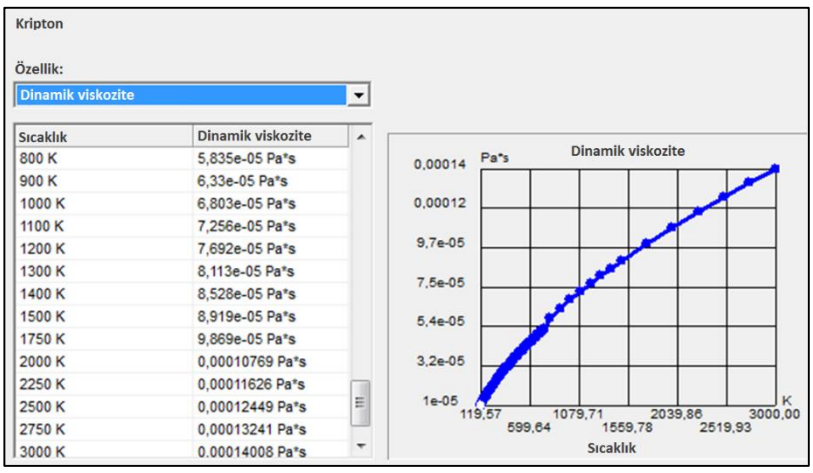


R_g=	8,31441	J/mol.K		A_{ij}=	6,963E-07			$\mu_{ij}^*(T)$=	4,19E-05																
M=	0,0838	kg/mole		T_{ij}=	71,07	K		χ_{ij}^*=	2,00E-02																
T_{cr}=	209,5	K		n=	0,667			C_p^{*}=	20,78603	J/mol.K															
V*=	3,16E-04	m³/mole		ρ_{cr}=	908,4	kg/m³		C_v^{*}=	12,47162	J/mol.K															
V_{cr}=	9,25E-05	m³/mole																							
				P=	70	Bar																			
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m³)	$\rho_1-\rho_2$ (kg/m³)	ρ_2 (kg/m³)	$\mu^*(T)$	$\Psi_\mu(\rho/\rho_c)$	μ(T,P)(Pa.s)	$\lambda^*(T)$	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_c)$	λ(T,P) (W/mK)	dB/d
210	1,002	-1,052E-04	3,272E-09	1,387E-09	-3,736E-06	2,977E-03	-1	-5,537E-18	897,80776	-3,319E-11	2,749E-14	6,607E-06	5,243E-09	950,72	-433,98	3561,38	1,87E-05	1,0810	4,429E-05	6,961E-03	1,0644	2,103E-02	9,734E
220	1,050	-9,603E-05	3,139E-09	1,394E-09	-3,573E-06	3,118E-03	-1	-2,967E-19	854,60857	-3,252E-11	2,69E-14	6,433E-06	5,268E-09	866,76	2602,83	-2641,83	1,96E-05	0,9221	4,142E-05	7,291E-03	0,9381	1,969E-02	8,589E
230	1,098	-8,794E-05	3,012E-09	1,398E-09	-3,421E-06	3,260E-03	-1	-1,646E-18	815,38945	-3,198E-11	2,637E-14	6,286E-06	5,286E-09	791,94	363,15	1719,88	2,05E-05	0,7925	3,922E-05	7,614E-03	0,8309	1,859E-02	7,632E
240	1,146	-8,072E-05	2,893E-09	1,401E-09	-3,277E-06	3,402E-03	-1	-8,997E-18	779,3882	-3,155E-11	2,59E-14	6,162E-06	5,297E-09	724,96	205,62	1926,92	2,13E-05	0,6853	3,753E-05	7,930E-03	0,7391	1,770E-02	6,826E
250	1,193	-7,424E-05	2,780E-09	1,403E-09	-3,139E-06	3,543E-03	-1	-2,191E-17	745,99054	-3,121E-11	2,55E-14	6,059E-06	5,302E-09	664,79	148,40	1941,18	2,21E-05	0,5955	3,624E-05	8,240E-03	0,6600	1,696E-02	6,139E
260	1,241	-6,841E-05	2,674E-09	1,403E-09	-3,008E-06	3,685E-03	-1	-4,005E-17	714,69833	-3,094E-11	2,514E-14	5,974E-06	5,303E-09	610,53	119,26	1905,57	2,3E-05	0,5196	3,526E-05	8,545E-03	0,5916	1,636E-02	5,552E
270	1,289	-6,311E-05	2,573E-09	1,402E-09	-2,882E-06	3,827E-03	-1	-6,317E-17	685,1058	-3,075E-11	2,484E-14	5,905E-06	5,301E-09	561,47	102,07	1851,17	2,38E-05	0,4550	3,454E-05	8,844E-03	0,5319	1,587E-02	5,044E
280	1,337	-5,830E-05	2,479E-09	1,401E-09	-2,761E-06	3,969E-03	-1	-9,110E-17	656,88151	-3,062E-11	2,459E-14	5,852E-06	5,295E-09	516,98	91,19	1788,27	2,46E-05	0,3995	3,401E-05	9,138E-03	0,4797	1,548E-02	4,603E
290	1,384	-5,389E-05	2,390E-09	1,399E-09	-2,643E-06	4,110E-03	-1	-1,237E-16	629,75457	-3,054E-11	2,439E-14	5,811E-06	5,288E-09	476,57	84,11	1721,04	2,53E-05	0,3518	3,366E-05	9,427E-03	0,4338	1,516E-02	4,218E
300	1,432	-4,984E-05	2,307E-09	1,397E-09	-2,529E-06	4,252E-03	-1	-1,609E-16	603,5039	-3,051E-11	2,424E-14	5,783E-06	5,28E-09	439,80	79,57	1651,37	2,61E-05	0,3105	3,345E-05	9,712E-03	0,3933	1,491E-02	3,879E
310	1,480	-4,612E-05	2,229E-09	1,395E-09	-2,418E-06	4,394E-03	-1	-2,027E-16	577,94975	-3,053E-11	2,412E-14	5,766E-06	5,271E-09	406,33	76,85	1580,15	2,69E-05	0,2748	3,336E-05	9,993E-03	0,3575	1,472E-02	3,580E
320	1,527	-4,267E-05	2,156E-09	1,392E-09	-2,310E-06	4,536E-03	-1	-2,490E-16	552,94701	-3,059E-11	2,406E-14	5,76E-06	5,263E-09	375,84	75,50	1507,84	2,76E-05	0,2438	3,337E-05	1,027E-02	0,3258	1,458E-02	3,314E
330	1,575	-3,948E-05	2,087E-09	1,390E-09	-2,204E-06	4,677E-03	-1	-2,999E-16	528,37972	-3,069E-11	2,403E-14	5,763E-06	5,254E-09	348,10	75,23	1434,68	2,83E-05	0,2168	3,347E-05	1,054E-02	0,2976	1,448E-02	3,077E
340	1,623	-3,651E-05	2,023E-09	1,388E-09	-2,100E-06	4,819E-03	-1	-3,553E-16	504,15661	-3,084E-11	2,406E-14	5,776E-06	5,247E-09	322,87	75,84	1360,79	2,91E-05	0,1934	3,364E-05	1,081E-02	0,2725	1,441E-02	2,864E
350	1,671	-3,374E-05	1,963E-09	1,387E-09	-1,998E-06	4,961E-03	-1	-4,154E-16	480,20731	-3,103E-11	2,412E-14	5,798E-06	5,241E-09	299,97	77,19	1286,24	2,98E-05	0,1731	3,388E-05	1,108E-02	0,2503	1,439E-02	2,673E
360	1,718	-3,116E-05	1,907E-09	1,385E-09	-1,897E-06	5,103E-03	-1	-4,802E-16	456,47918	-3,126E-11	2,423E-14	5,828E-06	5,237E-09	279,23	79,16	1211,11	3,05E-05	0,1555	3,417E-05	1,134E-02	0,2305	1,439E-02	2,500E
370	1,766	-2,874E-05	1,854E-09	1,385E-09	-1,799E-06	5,244E-03	-1	-5,499E-16	432,9346	-3,152E-11	2,437E-14	5,867E-06	5,234E-09	260,49	81,68	1135,44	3,12E-05	0,1402	3,451E-05	1,160E-02	0,2130	1,442E-02	2,343E
380	1,814	-2,647E-05	1,805E-09	1,385E-09	-1,701E-06	5,386E-03	-1	-6,245E-16	409,5486	-3,183E-11	2,456E-14	5,914E-06	5,233E-09	243,62	84,67	1059,30	3,19E-05	0,1270	3,489E-05	1,186E-02	0,1974	1,447E-02	2,201E
390	1,862	-2,433E-05	1,759E-09	1,385E-09	-1,605E-06	5,528E-03	-1	-7,042E-16	386,30672	-3,218E-11	2,48E-14	5,968E-06	5,235E-09	228,48	88,08	982,76	3,26E-05	0,1156	3,530E-05	1,212E-02	0,1837	1,454E-02	2,071E
400	1,909	-2,232E-05	1,717E-09	1,386E-09	-1,510E-06	5,670E-03	-1	-7,891E-16	363,20326	-3,258E-11	2,507E-14	6,03E-06	5,239E-09	214,95	91,86	905,90	3,32E-05	0,1057	3,574E-05	1,237E-02	0,1716	1,464E-02	1,952E
410	1,957	-2,043E-05	1,677E-09	1,388E-09	-1,416E-06	5,811E-03	-1	-8,794E-16	340,23958	-3,301E-11	2,539E-14	6,099E-06	5,245E-09	202,90	95,96	828,81	3,39E-05	0,0972	3,621E-05	1,262E-02	0,1610	1,474E-02	1,843E
420	2,005	-1,863E-05	1,640E-09	1,390E-09	-1,324E-06	5,953E-03	-1	-9,752E-16	317,42272	-3,348E-11	2,575E-14	6,175E-06	5,254E-09	192,21	100,34	751,58	3,46E-05	0,0899	3,671E-05	1,287E-02	0,1516	1,487E-02	1,743E
430	2,053	-1,694E-05	1,605E-09	1,393E-09	-1,232E-06	6,095E-03	-1	-1,077E-15	294,76409	-3,4E-11	2,615E-14	6,257E-06	5,265E-09	182,77	104,98	674,32	3,52E-05	0,0837	3,722E-05	1,311E-02	0,1435	1,501E-02	1,651E
440	2,100	-1,533E-05	1,573E-09	1,397E-09	-1,141E-06	6,237E-03	-1	-1,184E-15	272,27836	-3,456E-11	2,659E-14	6,346E-06	5,279E-09	174,47	109,85	597,13	3,59E-05	0,0783	3,774E-05	1,335E-02	0,1363	1,515E-02	1,565E
450	2,148	-1,380E-05	1,542E-09	1,401E-09	-1,051E-06	6,378E-03	-1	-1,298E-15	249,98249	-3,516E-11	2,707E-14	6,441E-06	5,295E-09	167,18	114,91	520,12	3,65E-05	0,0737	3,828E-05	1,359E-02	0,1301	1,531E-02	1,487E
460	2,196	-1,235E-05	1,514E-09	1,406E-09	-9,612E-07	6,520E-03	-1	-1,418E-15	227,89489	-3,581E-11	2,759E-14	6,541E-06	5,314E-09	160,80	120,15	443,38	3,72E-05	0,0698	3,883E-05	1,383E-02	0,1247	1,548E-02	1,413E
470	2,243	-1,098E-05	1,488E-09	1,412E-09	-8,725E-07	6,662E-03	-1	-1,544E-15	206,03469	-3,65E-11	2,815E-14	6,647E-06	5,335E-09	155,22	125,54	367,03	3,78E-05	0,0664	3,938E-05	1,407E-02	0,1200	1,565E-02	1,345E
480	2,291	-9,662E-06	1,463E-09	1,418E-09	-7,844E-07	6,803E-03	-1	-1,677E-15	184,42112	-3,723E-11	2,875E-14	6,759E-06	5,359E-09	150,33	131,05	291,16	3,84E-05	0,0635	3,994E-05	1,430E-02	0,1160	1,583E-02	1,282E
490	2,339	-8,410E-06	1,441E-09	1,425E-09	-6,970E-07	6,945E-03	-1	-1,818E-15	163,07303	-3,801E-11	2,938E-14	6,875E-06	5,385E-09	146,04	136,68	215,87	3,91E-05	0,0610	4,051E-05	1,453E-02	0,1124	1,602E-02	1,223E
500	2,387	-7,215E-06	1,419E-09	1,432E-09	-6,102E-07	7,087E-03	-1	-1,965E-15	142,00846	-3,884E-11	3,006E-14	6,996E-06	5,414E-09	142,26	142,39	141,24	3,97E-05	0,0588	4,107E-05	1,476E-02	0,1093	1,621E-02	1,168E
510	2,434	-6,074E-06	1,399E-09	1,440E-09	-5,239E-07	7,229E-03	-1	-2,120E-15	121,24435	-3,97E-11	3,077E-14	7,121E-06	5,444E-09	138,89	148,19	67,36	4,03E-05	0,0569	4,164E-05	1,499E-02	0,1065	1,640E-02	1,116E
520	2,482	-4,982E-06	1,381E-09	1,449E-09	-4,382E-07	7,370E-03	-1	-2,283E-15	100,79626	-4,061E-11	3,152E-14	7,25E-06	5,477E-09	135,86	154,04	-5,69	4,09E-05	0,0552	4,221E-05	1,522E-02	0,1040	1,659E-02	1,068E
530	2,530	-3,938E-06	1,363E-09	1,458E-09	-3,530E-07	7,512E-03	-1	-2,454E-15	80,678212	-4,157E-11	3,23E-14	7,383E-06	5,512E-09	133,09	159,94	-77,85	4,15E-05	0,0537	4,278E-05	1,545E-02	0,1017	1,679E-02	1,022E
540	2,578	-2,937E-06	1,347E-09	1,468E-09	-2,683E-07	7,654E-03	-1	-2,633E-15	60,902587	-4,257E-11	3,312E-14	7,519E-06	5,55E-09	130,53	165,88	-149,05	4,21E-05	0,0523	4,335E-05	1,567E-02	0,0996	1,699E-02	9,795E
550	2,625	-1,978E-06	1,332E-09	1,479E-09	-1,840E-07	7,796E-03	-1	-2,821E-15	41,480048	-4,361E-11	3,397E-14	7,659E-06	5,589E-09	128,10	171,84	-219,25	4,27E-05	0,0509	4,392E-05	1,589E-02	0,0976	1,718E-02	9,393E
560	2,673	-1,058E-06	1,318E-09	1,489E-09	-1,002E-07	7,937E-03	-1	-3,017E-15	22,419526	-4,47E-11	3,486E-14	7,801E-06	5,63E-09	125,75	177,82	-288,38	4,33E-05	0,0497	4,448E-05	1,611E-02	0,0957	1,738E-02	9,015E
570	2,721	-1,741E-07	1,305E-09	1,501E-09	-1,679E-08	8,079E-03	-1	-3,223E-15	3,7282371	-4,583E-11	3,578E-14	7,946E-06	5,673E-09	123,46	183,80	-356,42	4,39E-05	0,0484	4,504E-05	1,633E-02	0,0939	1,757E-02	8,659E

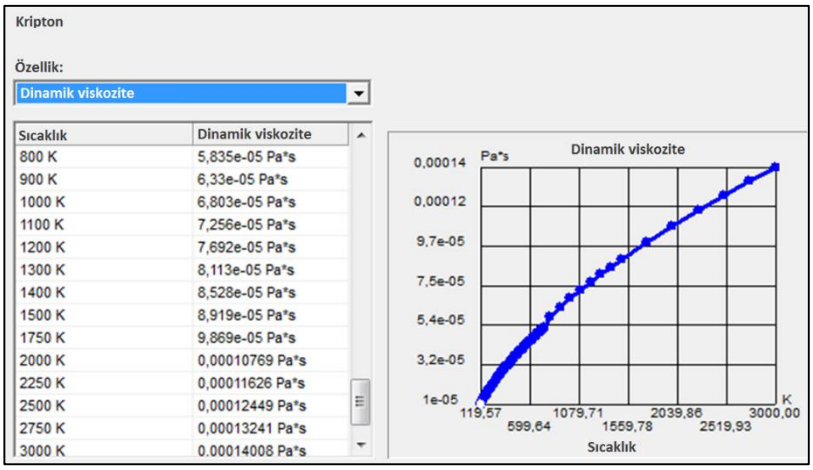
Krypton | Argon | Neon | Xenon | Helium

Şekil 3.3. Ampul iç gazı data hesaplaması

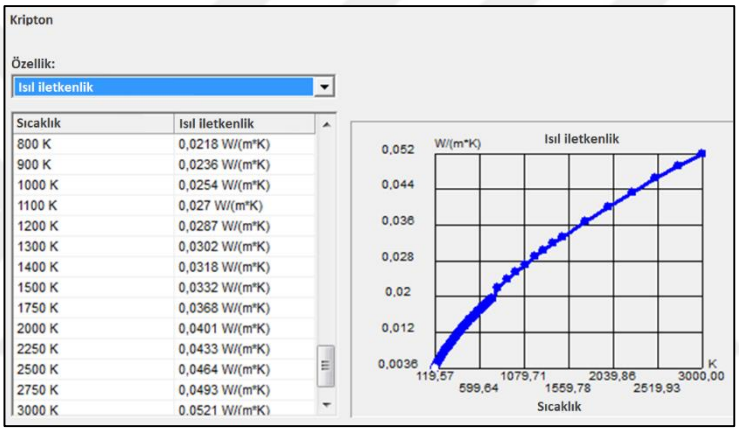
Söz konusu formulasyonların düşük basınçlarda yoğunluk ve diğer termodinamik malzeme özellikleri (ısı iletkenlik, özgül ısı, dinamik viskozite vb.) için makul veriler çıkarmadığı görülmüştür. Bu makalede 1 MPa' ın altındaki basınç değerlerinde söz konusu soy-gazların ideal gaz gibi davrandığı belirtilmiştir. Hesaplanan ve makalede gösterilen termodinamik malzeme özellikleri ticari bir CFD yazılımı olan FLOEFD yazılımı kütüphanesindeki datalar (Şekil 3.4, 3.5 ve 3.6) ile kıyaslanmış ve basıncın ciddi bir etken olmadığı görülmüştür. Buradan hareketle kripton gazının bu basınç altındaki yoğunluğu ideal gaz gibi kabul edilerek hesaplanmaya karar verilmiştir.



Şekil 3.4. Kriptonun dinamik viskozitesinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014)



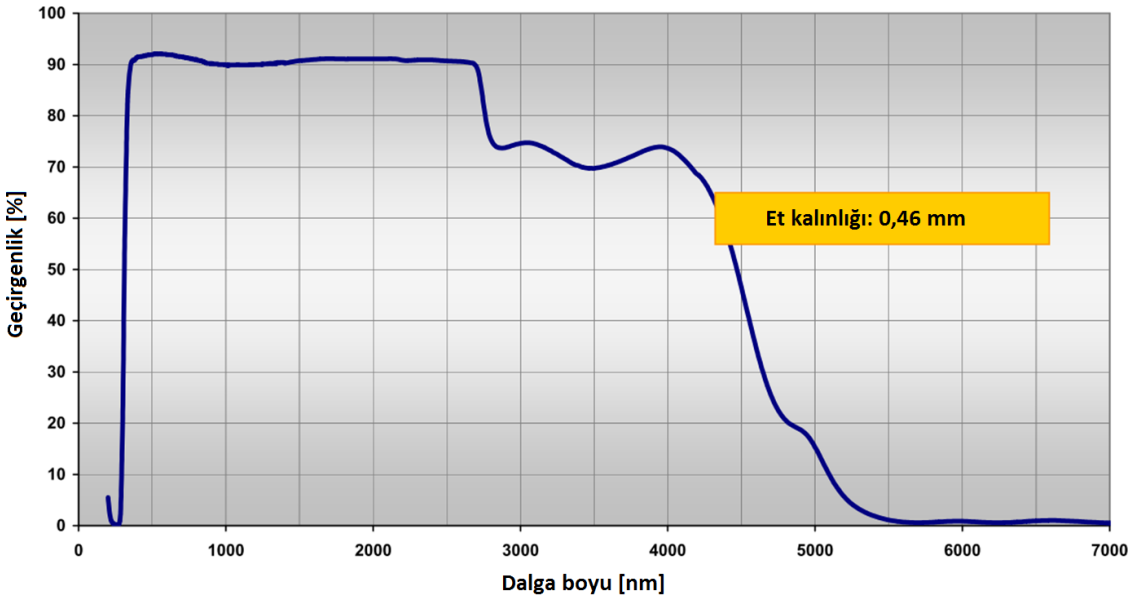
Şekil 3.5. Kriptonun özgül ısısının sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014)



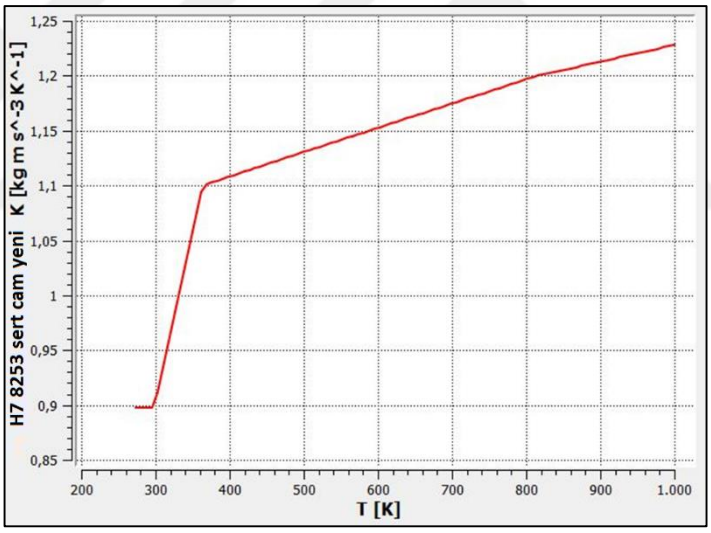
Şekil 3.6. Kriptonun ısıl iletkenliğinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014)

3.2.1.2. Ampul Camı Özellikleri

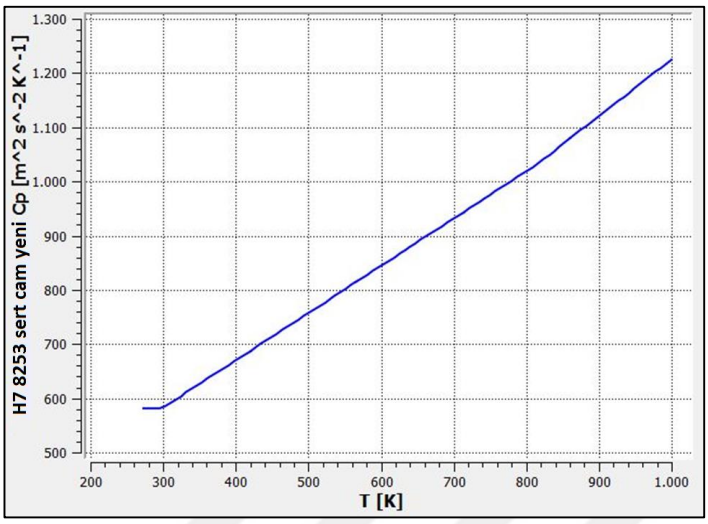
Ampul camı dalga boyu – geçirgenlik grafiği (Şekil 3.7) ampul üreticisi OSRAM firmasından temin edilmiştir. Camın sıcaklığa bağımlı ısıl iletkenlik değerinin tanımlanmasında Tempel (2002)'in araştırmasında kullandığı datadan (Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10) faydalanılmıştır.



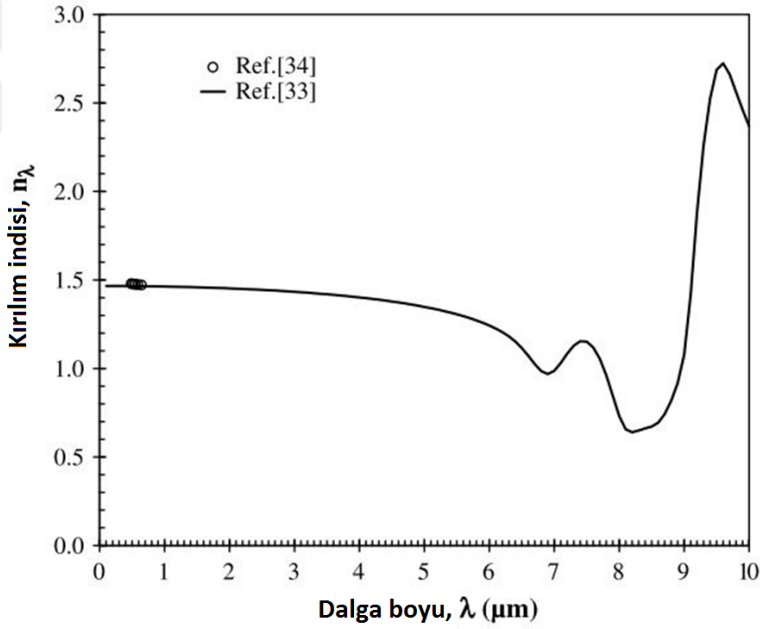
Şekil 3.7. Ampul camı geçirgenlik – dalga boyu grafiği (Anonim 2006)



Şekil 3.8. Sert-camın ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi (Tempel 2002)



Şekil 3.9. Sert-camın özgül ısı katsayısının sıcaklıkla değişimi (Tempel 2002)



Şekil 3.10. Sert-camın kırılım indisinin dalga boyu ile değişimi (Tempel 2002)

Ampul camı imalatında kullanılan ikinci malzeme kuartzdır. Kuartzın ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi Logerais ve Bouteville (2010)' nin araştırmalarından (Çizelge 3.1) temin edilmiştir.

Çizelge 3.1. Kuartzın ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerinin sıcaklıkla değişimi (Logerais ve Bouteville 2010)

Cam (kuartz)	**Yoğunluk, ρ**	$2649\ \text{kg m}^{-3}$
	Başlangıç sıcaklığı, T_0	300 K
	Özgül Isı, c_p	$212.3 + 4.75T - 6.26 \times 10^{-3}T^2 + 3.66 \times 10^{-6}T^3 - 7.8 \times 10^{-10}T^4\ \text{J K}^{-1}\ \text{kg}^{-1}$
	Isıl iletkenlik, k	$0.96 + 2.43 \times 10^{-3}T - 2.29 \times 10^{-6}T^2 + 7.94 \times 10^{-10}T^3\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

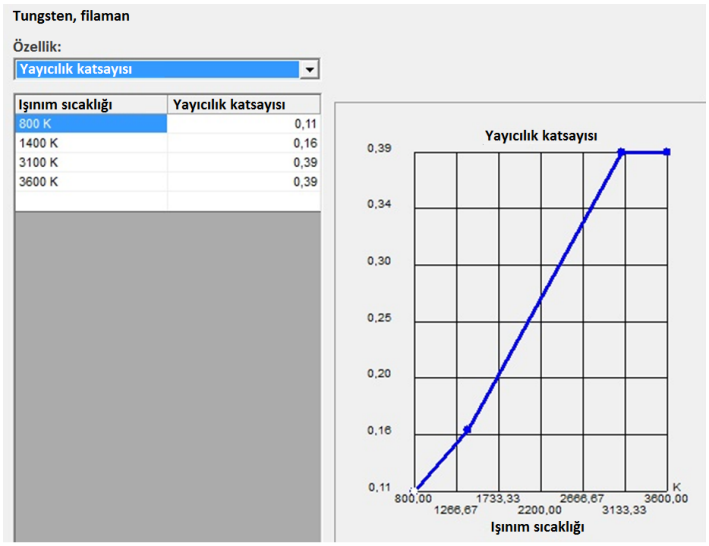
3.1.1.1 Tungsten Filaman Özellikleri

Logerais ve Bouteville (2010)' in araştırmalarında kullandıkları formulasyonlardan (Çizelge 3.2) alıntılar yapılmıştır. Tungsten filamanının yoğunluk, özgül ısı ve ısıl iletkenlik katsayıları sıcaklığa bağımlı olarak tanımlanmıştır.

Çizelge 3.2. Tungsten filaman termodinamik özelliklerinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Logerais ve Bouteville 2010)

Filaman (tungsten)	**Yoğunluk, ρ**	$19\ 300\ \text{kg m}^{-3}$
	Başlangıç sıcaklığı, T_0	300 K
	Özgül Isı, c_p	$0.0255T + 124.35\ \text{J K}^{-1}\ \text{kg}^{-1}$
	Isıl iletkenlik, k	$3.3 \times 10^{-5}T^2 - 0.1144T + 199.7\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

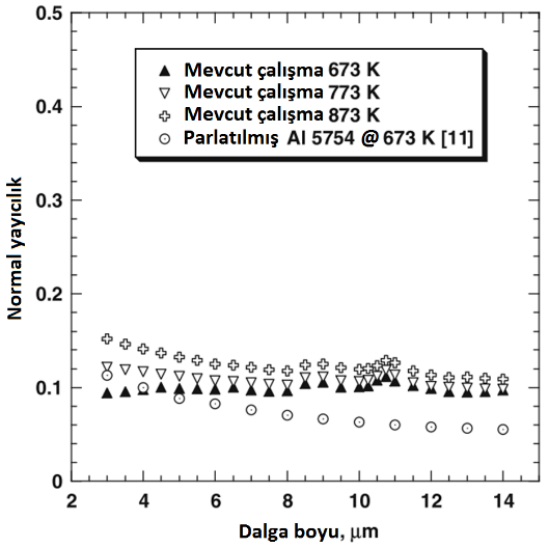
Tungsten filamanının sıcaklık bağımlı yüzey yayıcılık (emissivity) değeri ise FLOEFD yazılım kütüphanesinden alınmıştır (Şekil 3.11).



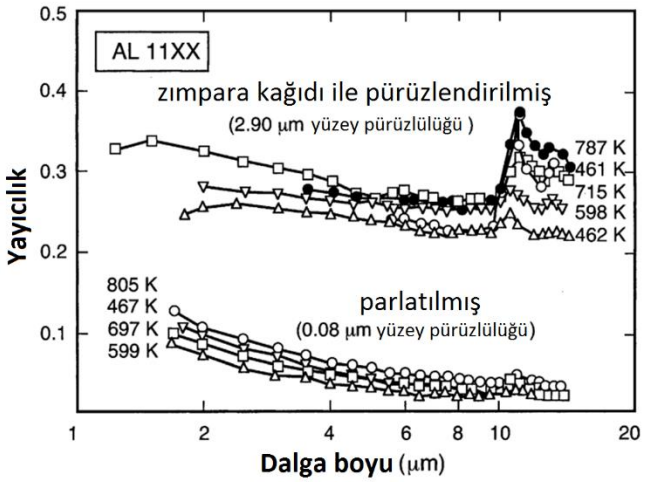
Şekil 3.11. Tungsten filamanının yüzey yayıcılık değerinin sıcaklığa bağımlı değişimi (Anonim 2014)

3.2.1.3. Alüminyum Kaplama Özellikleri

Alüminyum kaplama için kullanılan alüminyum külçenin saflığı %99,95' tir ve Teodorescu ve ark. (2006)' nın araştırmalarında kullanılan datadan alıntı yapılarak alüminyum yüzey kaplama özellikleri tespit edilmiştir (Şekil 3.12). Ayrıca kıyaslama amaçlı olarak Wen ve Mudawar (2004)' ın araştırmalarındaki data da dikkate alınmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.12. Alüminyum kaplama yayıcılık dalga boyu grafiği (Teodorescu ve ark. 2006)



Şekil 3.13. Alüminyum kaplama yayıcılık dalga boyu grafiği (Wen ve Mudawar 2004)

3.2.2. Simülasyon Girdileri ve Sınır Şartları

Analiz modelleri, ampul camı, ampul soketi, filaman, ampul iç gazı, lamba içi hava ve çevreleyen dış hava, reflektör ve dış lensini içermektedir. Analizlerde iletim, taşınım ve ışınımı içerecek şekilde birleşik ısı transfer mekanizmaları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda ampul iç gazı, iç ve dış hava akışları doğal taşınım kaynaklı olmaktadır ve meydana gelen hız seviyeleri türbülans oluşturacak seviyede olmadığı için laminer akış olarak modellenmişlerdir. Bütün katı alt parçalar için iletimle ısı transferi dikkate alınmıştır. Yüksek filaman sıcaklığı sebebiyle ciddi oranda da ışınımla ısı transferi gerçekleşmektedir ve bütün alt parçalar ışınım çözümlenmesine dahil edilmektedir. Radyasyon çözümlenmesi için çoklu bant genişliğinde ışın izleme yaklaşımı üzerine oluşturulmuş olan modellemeler kullanılmaktadır. Bunlar ANSYS CFX yazılımında Monte Carlo Modeli iken FLUENT yazılımında ise Discrete Ordinates Radiation Modelidir. Alüminyum kaplamalı reflektör için dalga boyuna bağlı yayıcılık (emissivity) katsayısı kullanılmıştır (bkz. Şekil 3.12). Yarı saydam ampul camı için ise dalga boyuna bağlı geçirgenlik katsayısı analizlerde dikkate alınmıştır (bkz. Şekil 3.7). Yine benzer olarak yarı saydam dış lens malzemesi için de dalga boyuna bağlı geçirgenlik katsayısı analizlerde dikkate alınmıştır (Anonim 2010).

Analizlerde lamba araç pozisyonunda konumlandırılmış oluş lamba çevresini saran dış hava dahil bütün sistemi kapsayacak şekilde mesh ağı örülmüştür. Dış hava zamandan bağımsız ve zamana bağlı analizlerde 23 °C olarak tanımlanmış olup analiz modelindeki dış havanın kenar yüzeyleri açık ortam (opening) olarak tanımlanmıştır. Başlangıç şartlarında tüm sistem 23 °C sıcaklığında denge halinde olarak tanımlanmıştır ve lamba çevresi dış hava, lamba içi hava ve ampul içi gazı olacak şekilde bütün akışkanlar başlangıçta durgun halde sıfır hızda tanımlanmıştır. Katı veya gaz sistemdeki alt birimlerin bütün temas yüzeylerinde irtibatlı mesh yapısı kullanılmıştır. Ampul filamanı silindirik yapıda modellenmiştir ve filamana verilen enerji toplam güç olarak filaman geometrisinin tamamına tanımlanmıştır.

Yoğuşma analizi çalışmalarında öncelikli olarak su buharını içeren havanın hesaplamalarda dikkate alınabilmesi için multi-faz çözüm yöntemi kullanılacaktır. Bunun haricinde lens üzerinde yoğuşma oluşumu simülasyonu için FLUENT' yazılımının Eulerian Wall Film (EWF) modeli (bkz. **EK-3**) kullanılacaktır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Tez çalışmasının üzerine kurgulandığı yoğuşma önleme odaklı tasarım yapılabilmesi hedefiyle zamana bağlı yoğuşma analizinin gerçekleştirilmesi bir takım analiz süreçlerini başarıyla yapılabilmesine bağlıdır. Tez araştırması kapsamında kurgulanan analiz ve kıyaslama çalışmaları basitlikten zorluğa doğru kademeli olacak şekilde ve bir sonraki adım bir önceki adımın kazanımlarını kapsayacak şekilde planlanmıştır. Bu planlama doğrultusunda ön görülen analiz çalışmaları aşağıda sıralanmıştır.

4.1 Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışmaları
4.2 Zaman Bağlı Termal Analiz Çalışmaları
4.3 Yoğuşma Testi
4.4 Yoğuşma Analizi
4.5 Yoğuşma Analizi ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması
4.6 Yoğuşma Azaltıcı – Önleyici Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları

Yoğuşma analizi çalışmalarında yoğuşma oluşumu simülasyonu için FLUENT' yazılımının Eulerian Wall Film (EWF) modeli kullanılacaktır. Yüksek lisans tez çalışmasında (Boduroğlu 2010) ve diğer farklı çalışmalarda ANSYS CFX yazılımının kullanılması konusunda yeterince tecrübe kazanılmıştır. Fakat FLUENT yazılımı ilk kez bu tez kapsamında kullanılacaktır. Bu sebeple denge hali zamandan bağımsız ve zamana bağlı termal analiz hassaslaştırma çalışmalarında öncelikli olarak ANSYS CFX yazılımı kullanılacak olup daha sonra buradan elde edilen kazanımlar FLUENT yazılımında kullanılarak benzer hassasiyette analiz sonuçları elde edilmeye çalışılacaktır.

4.1. Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışmaları

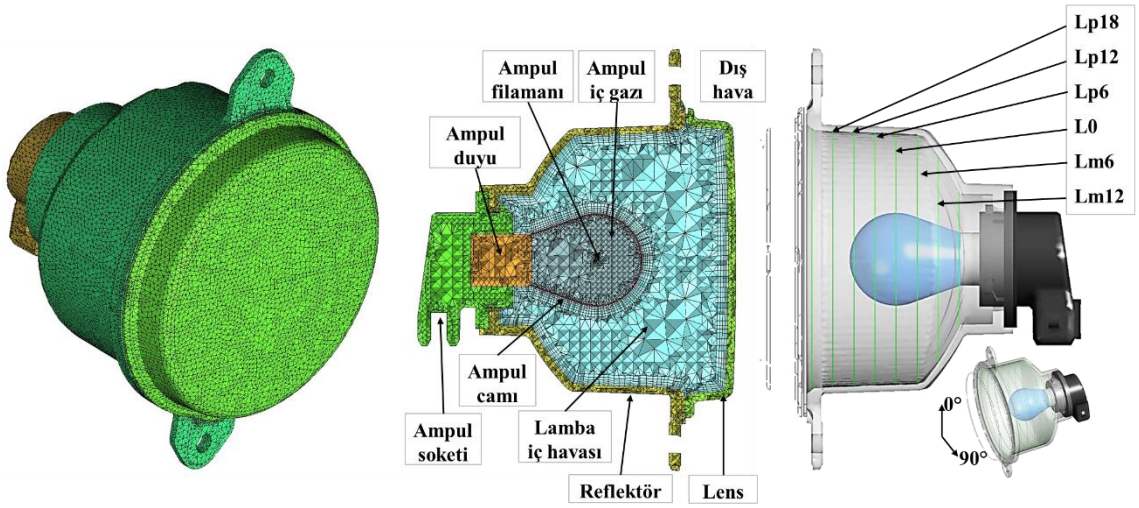
Yüksek lisans tez çalışmasında (Boduroğlu 2010) yuvarlak basit geometrili ÇAP 70 otomotiv dış aydınlatma lambasının zamandan bağımsız analizleri gerçekleştirilmiş, ampulden yayılan yüksek ışınım enerjisinin alüminyum kaplamalı yüzey ve kaplamasız yüzeyler üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımlarındaki etkisi detaylı bir şekilde incelenmişti. Bu doktora tez çalışmasında ilk olarak önceki yüksek lisans tez çalışmasında incelenen ÇAP 70 (bkz. Şekil 3.1) lambasının detaylı malzeme özellikleriyle birlikte tekrar zamandan bağımsız analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler farklı bakış

açısıyla tekrar detaylı olarak değerlendirilmiş olup deneysel sonuçlar ile kıyaslanarak ciddi seviyede uyumlu olduğu görülmüştür. Buradan elde edilen doğrulanmış sınır şartlarıyla diğer analiz aşamaları Atego DRL ve sinyal lambası (bkz. Şekil 3.2) üzerine yapılmıştır.

4.1.1. Basit Lamba Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışması

Lamba reflektör, lens ve ampul soketi ve ampul içermekte olup tek üniteden oluşmaktadır. Lambada maksimum 26.5 W gücünde (Anonim 2008) 12V gerilimli P21W ampul kullanılmaktadır. Yüksek lisans tezine benzer olarak simülasyonda ışınım modellenmesinin neticelerinin daha iyi kıyaslanabilmesi için alüminyum kaplamalı, alüminyum kaplamasız açık gri ve siyah reflektörlü üç lamba analiz edilecek ve sonuçları detaylı bir şekilde kıyaslanacaktır. Bu farklı lambaların reflektör yüzeyi ışınım özelliklerinin analize girilmesinde yayıcılık - dalga boyu grafiklerinden elde edilen veriler kullanılmış olsa da lambaların tanımlanması için ortalama yayıcılık değerleri üzerinden isimlendirileceklerdir. Bu isimlendirme alüminyum kaplamalı, alüminyum kaplamasız açık gri ve siyah reflektör için sırasıyla ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 şeklindedir.

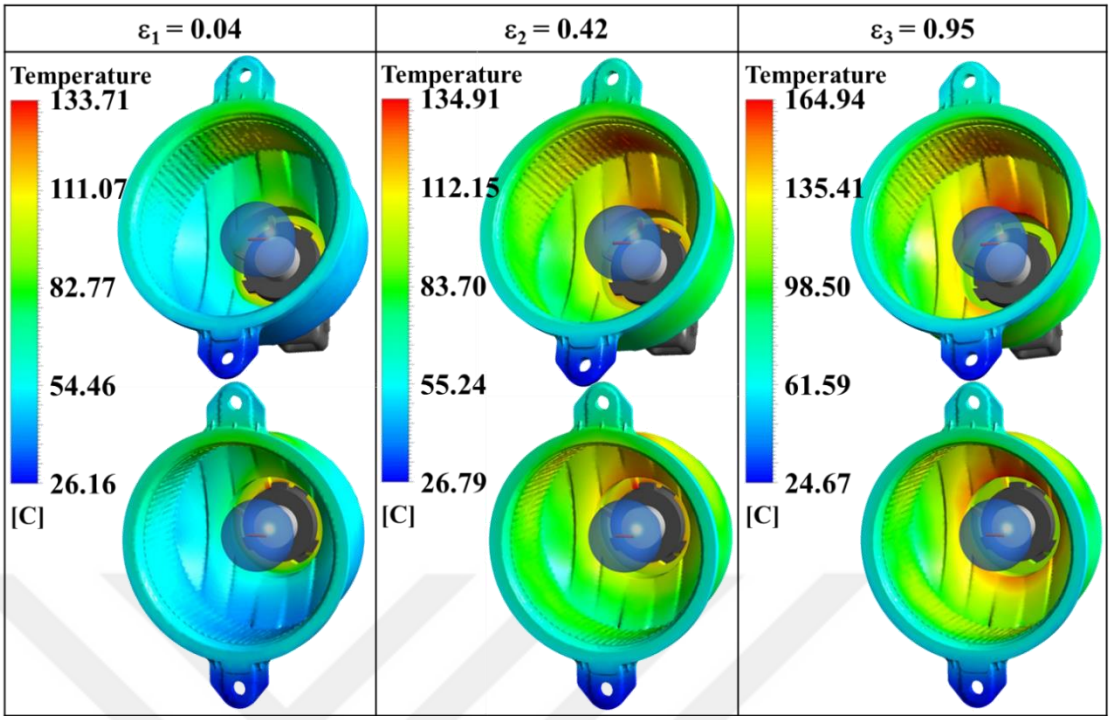
Analizde 23 °C ortam sıcaklığı dikkate alınmış olup sabit sıcaklıkta durgun hava ortamında ampulün devamlı yanması neticesinde lambanın ısıl dengeye girmiş zamandan bağımsız hali olarak analiz gerçekleştirilmiştir. Mesh ağı örülmesi için ICEM yazılımı kullanılırken termal analiz için ANSYS CFX yazılımı kullanılmıştır. Analiz süresi ve yakınsama oranı arasında optimizasyon yapılarak örülen mesh ağında 772139 tetra ve 350213 nokta olmak üzere toplam 1116413 eleman bulunmaktadır (Şekil 4.1). Analiz sonuçlarının detaylı kıyaslanması lamba üzerinde Lm12, Lm6, L0, Lp6, Lp12 ve IAD (intermediate air domain – ara seviye hava domaini) olmak üzere 6 farklı YZ düzlem kesitleri üzerinden elde edilmiş momentum ve termal veri tablo ve grafikleri şeklinde yapılacaktır.



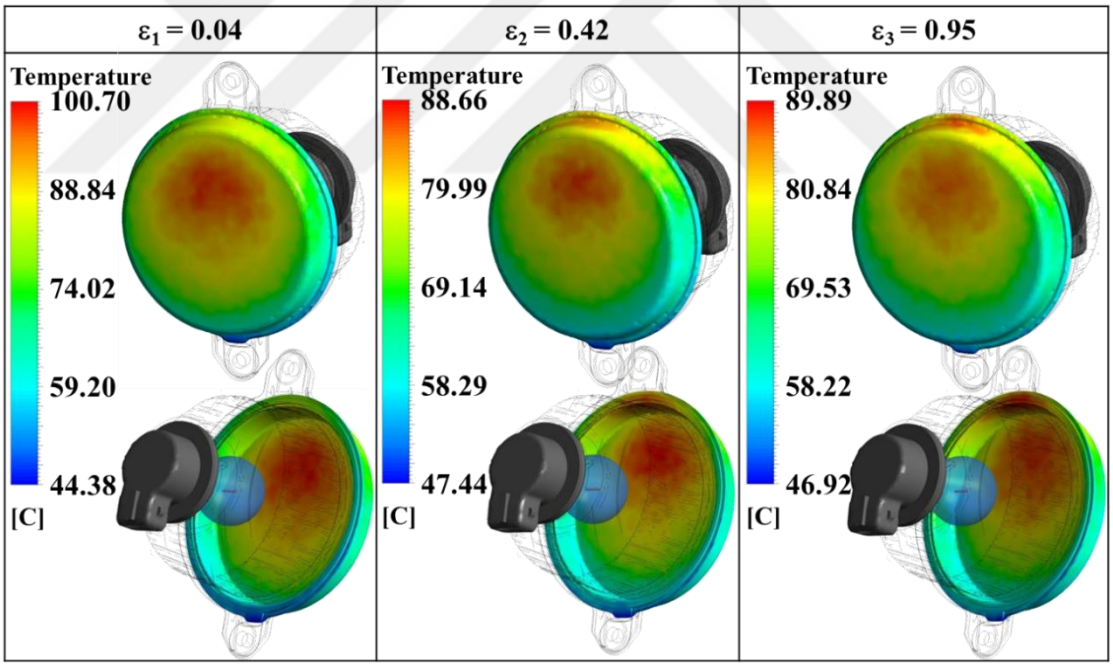
Şekil 4.1. ÇAP 70 lambası mesh ağı ve lamba üzerindeki YZ düzlemsel kesit bölgeleri

4.1.1.1. Reflektör ve Lens Yüzeyi Sıcaklık Sonuçları

ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 olacak şekilde her üç tip lamba için reflektör ve lens yüzey sıcaklık dağılımları Şekil 4.2 (a) ve (b) olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Düşük yayıcılık katsayılı (ε_1=0.04) reflektör iç yüzey sıcaklığında maksimum ve minimum değer arasındaki fark diğer lambalara kıyasla (ε_2=0.42 ve ε_3=0.95) daha fazladır (Şekil 4.2 (a)). Bunun haricinde ε_1=0.04 reflektör yüzey sıcaklık dağılımında sıcak hava akışının baskın olduğu da net bir şekilde görülebilmektedir (Şekil 4.2 (a)). Bu sonuçlardan yola çıkılarak düşük yayma katsayılı (ε_1=0.04) reflektörde ampulden gelen ışınım enerjisi çoğunlukla lense doğru yansıtılmakta, dolayısıyla reflektör sıcaklık dağılımında baskın bir rol oynamamaktadır. Aynı bakış açısıyla yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) reflektör tarafından yutulan ışınım enerjisi artmakta ve ampul alt bölgelerinde sıcaklığın arttığı görülmektedir. Ayrıca yine yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) reflektör sıcaklık dağılımında ampul filamanı konum etkisi de hissedilmeye başlanmaktadır. Ampul filamanı yatay silindir olarak modellenmiştir ve silindirin geniş alanının daha fazla ışınım yaydığı bilgisiyle birlikte ε_3=0.95 durumu için θ=90° ve 270° konumundaki sıcaklıkların θ=180° en alt bölgedeki sıcaklıktan daha düşük olduğu görülmektedir (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)) (Şekil 4.2 (a)).



(a)



(b)

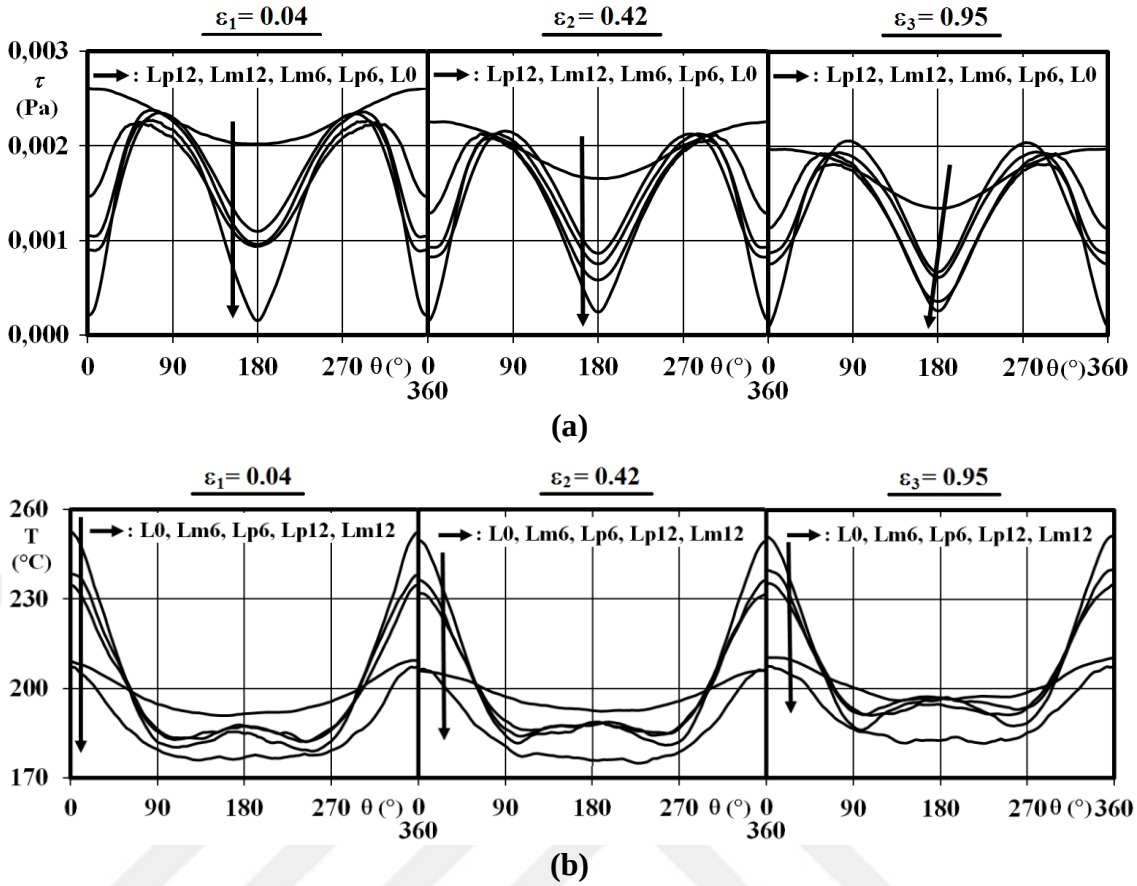
Şekil 4.2. Yüzey sıcaklık dağılımı (a) reflektör ve (b) lens

Sıcaklık dağılımı açısından bakıldığında lensin reflektör ile ters orantılı bir şekilde ışınım enerjisinden etkilendiği görülmektedir (Şekil 4.2 (b)). Senin ve ark. (2005) çalışmalarında belirttiği gibi reflektör yayıcılık katsayısının azalmasıyla ($\varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_1$) daha fazla ışınım yansıtmakta ve dolayısıyla daha yüksek ışınıma maruz kalan lens sıcaklığı artmakta ve

ayrıca maksimum sıcaklığın olduğu konum da etkilenmektedir. ε_1=0.04 durumunda lens maksimum sıcaklığı üst orta bölgedeyken ε_2=0.42, ε_3=0.95 durumlarında lens üzerinde ışınım etkisinin azalması ve taşınım etkisinin artmasıyla birlikte lensin üst duvarının da sıcaklığında artış olduğu görülmektedir (Şekil 4.2 (b)). Yüksek reflektör yayıcılık katsayısı ($\varepsilon_3 > \varepsilon_2$) lense gelen ışınım etkisinin azalması anlamına gelmesine rağmen ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 durumları için maksimum sıcaklık değerleri neredeyse birbirleriyle aynıdır. Bu durumun açıklaması olarak da ε_3=0.95 reflektör yüzeyindeki sıcaklık artışı lamba iç havasının genel sıcaklığında da artışa sebep olmakta ve bununla alakalı olarak lensteki sıcaklık üzerinde ışınım enerjisini azalma etkisi daha sıcak iç havayla artan taşınım etkisiyle nötrlenmektedir (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)).

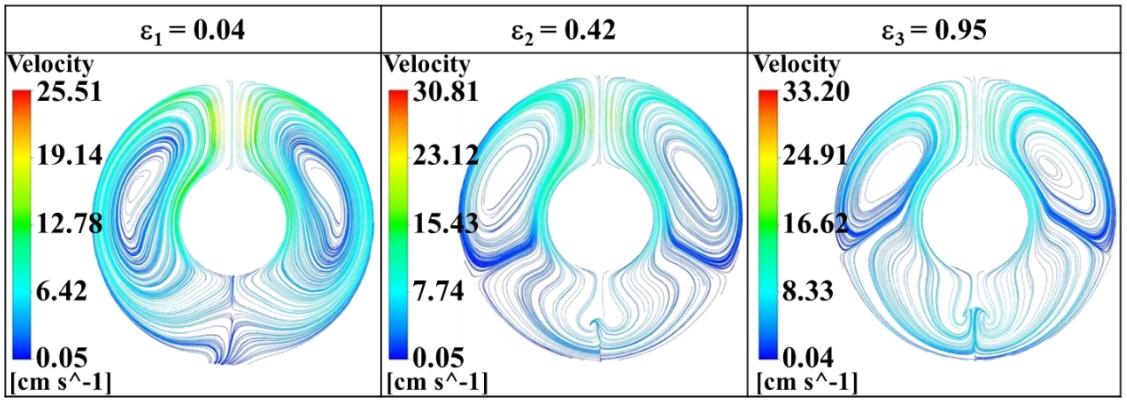
4.1.1.2. Lamba İç Hava Sonuçları

ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 şeklindeki üç farklı lambanın ampul yüzeyi üzerindeki momentum aktiviteleri ve termal değerleri, kayma gerilmesi (τ) ve sıcaklık (T) olarak 5 farklı kesit (Lm12, Lm6, L0, Lp6 ve Lp12) üzerinden Şekil 4.3 (a) ve (b) olarak gösterilmiştir.

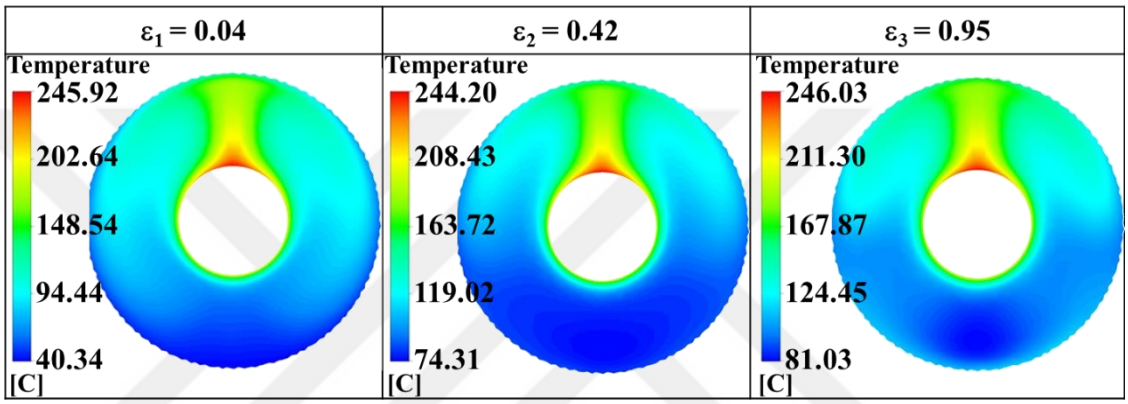


Şekil 4.3. Ampul yüzeyindeki (a) Kayma gerilmesi (Pa) ve (b) Sıcaklık (°C) değerlerinin açısal değişimi

Ayrıca iç havanın L0 kesitindeki akış çizgileri / vorteks oluşumu ve sıcaklık dağılımı Şekil 4.4' de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. İç hava L0 kesitindeki (a) Hava akış çizgileri ve (b) Sıcaklık dağılımı

Şekil 4.3 (a)' dan görüldüğü gibi reflektör yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) ampul yüzeyindeki kayma gerilmesi değerleri düşmektedir. Bu değişim hava domain içindeki momentum mekanizmalarının termal aktiviteler tarafından ciddi derecede etkilendiğini göstermektedir. Her ne kadar yayıcılık değeri ışınımla ısı transferiyle alakalı olsa da eş zamanlı olarak ampul yüzeyinde ve iç havadaki sıcaklık dağılımları viskozite ve yoğunluk başta olmak üzere hava özelliklerini etkilemektedir. Yoğunluk, sıcaklık tarafından etkilenmesinin yanı sıra süreklilik ve momentum denklemlerinde (Eş. 2.1, 2.2) tanımlandığı gibi momentum transfer karakteristikleri boyunca hız değerlerini de artırma potansiyeline sahiptir. Bu bilimsel durum, kayma gerilmesinin viskozite ve hız gradyanlarının bir ölçümü olmasıyla birlikte ayrıca sıcaklık ve hız gradyanlarının lokal değerlerine de bağlı olduğunu ortaya çıkarmaktadır (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)).

Şekil 4.4 (a)' da görüldüğü gibi ampulün her iki yanında hava akışında vorteks oluşmuştur. Ayrıca ampulün alt kısmında da kısmen ikincil vorteks oluşumları

gözlenmektedir ve bu ikincil vorteksler birincil vorteksler tarafından bastırılmaktadır. Şekil 4.4 (a)' nın dikkatli incelenmesi ε_1=0.04 düşük yayıcılık katsayısı durumda ikincil vorteksin diğerlerine göre daha zayıf olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Bu oluşumun sebebi aynı kesitin sıcaklık dağılımı (Şekil 4.4 (b)) üzerinden daha iyi anlatılabilir. Şekil 4.4 (b) L0 düzlemindeki maksimum sıcaklık değerlerinin T=244.20 °C - 246.03 °C aralığında olmasıyla yayıcılık katsayısından fazla etkilenmediğini göstermektedir. Fakat minimum sıcaklığın T=40.34 °C (ε_1=0.04) değerinden T=81.03 °C (ε_3=0.95) değerine doğru değiştiği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, vorteks oluşumunun sıcaklık farkından dolayı hareketlenmiş hava moleküllerinin fiziksel motivasyonu olduğu bilgisiyle ε_1=0.04 durumunun ampul alt bölgesinde ($\theta \approx 180°$) belirgin şekilde ikincil vorteks oluşturacak seviyede sıcaklıklara sahip olmadığı yorumu yapılabilir (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)).

Şekil 4.3' de görülen diğer önemli davranış da reflektör yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) ampul yüzeyindeki kayma gerilmesi değerleri düşmesinin yanı sıra sıcaklık değerleri artmaktadır. Bunun haricinde açısal konumda kayma gerilmesinin artması sıcaklık değerinin düşmesi durumu da gözlenmektedir. Bu davranış da katı – sıvı arayüzeyinde sürtünme ve termal mekanizmaların birbirleriyle ilişkili karakteristiklere sahip olduğunu göstermektedir.

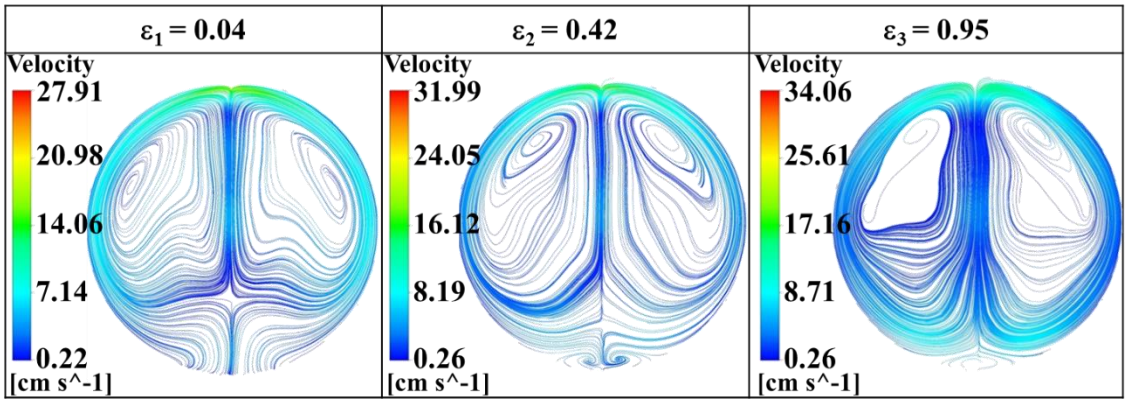
Reflektör yayıcılık katsayısının taşınım ($h_{taş}$) ve ışınım (h_{rad}) ısı transfer katsayıları üzerindeki etkisinin ortaya çıkarılması için, analiz sonucu elde edilen bu katsayıların kesit bazlı ortalama değerleri ve birbirlerine oranı ($h_{taş}$ / h_{rad}) Çizelge 4.1 olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Ampul yüzeyi üzerinde kesit bazlı ortalama (a) taşınım, (b) ışınım ısı transfer katsayıları ve (c) birbirlerine oranları

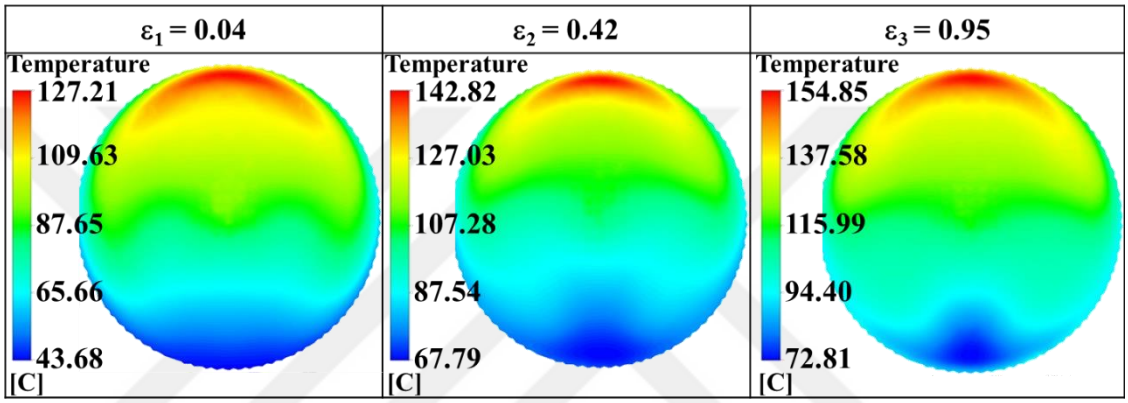
	$h_{Taş}$ (W/m²K)			**h_{Rad} (W/m²K)**			**$h_{Taş}$ / h_{Rad}**		
Kesit	**ε_1 = 0.04**	**ε_2 = 0.42**	**ε_3 = 0.95**	**ε_1 = 0.04**	**ε_2 = 0.42**	**ε_3 = 0.95**	**ε_1 = 0.04**	**ε_2 = 0.42**	**ε_3 = 0.95**
Lm12	9.02	7.80	5.79	56.32	57.54	59.55	0.16	0.14	0.10
Lm6	7.37	6.13	5.47	57.99	59.22	59.88	0.13	0.10	0.09
L0	8.04	7.13	6.08	57.28	58.19	59.23	0.14	0.12	0.10
Lp6	7.85	6.36	5.87	57.49	58.97	59.46	0.14	0.11	0.10
Lp12	6.20	5.77	5.38	59.18	59.59	59.98	0.10	0.10	0.09

Yayıcılık ε katsayısının $h_{taş}$ üzerindeki azaltma etkisi katsayı değerlerinin Lm12 kesitinde $h_{taş}$=9.02→5.79 W/m²K (ε=0.04→0.95), L0 kesitinde $h_{taş}$=8.04→6.08 W/m²K ve Lp12 kesitinde $h_{taş}$=6.20→5.38 W/m²K şeklinde düşüş göstermesiyle anlaşılabilmektedir (Çizelge 4.1). Çizelge 4.1 ayrıca Heyndericx ve Nozawa (2005), Lou ve ark. (2007), Stefanidis ve ark. (2008) çalışmalarına benzer olarak h_{rad} değerlerinin eş zamanlı olarak ε artmasıyla arttığını da göstermektedir. Bu davranışlar yayıcılık katsayısının artmasıyla lamba içerisinde ışınımla ısı transfer etkisinin de artması şeklinde yorumlanabilir (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)). Bu sonuca ayrıca taşınım ve ışınım katsayılarının birbirleriyle oranlarındaki ($h_{taş}$ / h_{rad}) değişiminden de varılmaktadır.

IAD kesitinde tüm momentum ve termal etkileşimler sadece hava hareketlerine bağlıdır. Her ne kadar taşınım ve ışınım ısı transfer mekanizmaları birincil derece etkili gözükmese de, arka planda ampul yüzeyinden ve lens yüzeyinden IAD bölgesine olan ısı transferleriyle etkili olmaktadırlar. IAD kesiti için akış çizgileri ve sıcaklık dağılımı Şekil 4.5 olarak verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.5. İç hava IAD kesitindeki (a) Hava akış çizgileri ve (b) Sıcaklık dağılımı

Ampul çevresi hava kesitindeki (Şekil 4.4 (a)) momentum sonuçlarına benzer olarak IAD kesitinde de birincil ve ikincil vorteks oluşumu gözlenmektedir (Şekil 4.5 (a)). Yine L0 kesitine benzer olarak yüksek reflektör yayıcılık katsayısıyla birlikte daha fazla hava hızının oluşmaktadır fakat IAD kesitinde ampul yüzeyinin olmaması birincil vorteksin daha geniş olmasına imkan vermiş bu sebeple ikincil vorteks yapıları daha fazla bastırılmış hale gelmiştir. Bu sebeple L0 kesitine kıyasla ikincil vorteks yapıları IAD kesitinde daha küçüktür hatta ε_3=0.95 durumu için ikincil vorteks neredeyse gözükmemektedir.

4.1.1.3. Deneysel Sonuçlar

ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 şeklindeki üç farklı lambanın sıcaklık ölçümleri termokupl ve termal kamera olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneğinde bulunan ekipmanlar aşağıdaki gibidir.

- Deneyde kullanılacak lamba
- Harici güç kaynağı
- K tipi Cr-Ni termokupl
- Veri kayıt cihazı (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger)
- Termal kamera (ticari ismi: Flir E60 thermal camera)

Deney esnasında lamba araç pozisyonunda konumlandırılmış olup çevresinde 23 – 25 °C sıcaklığında durgun hava bulunmaktadır. Harici güç kaynağı tarafından 13,5V sabit gerilimle enerji verilerek ampul yakılmaktadır. Termokupl ile ölçümler için 9 adet K tipi Cr-Ni termokupl her üç lamba üzerine Şekil 4.6' da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Ölçümler veri kayıt cihazıyla (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger) 1 saniye periyotlar halinde kaydedilmiş olup ölçümler denge haline ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Veri kayıt cihazının hata oranı ±% 0,05 olup zaman adımlı ölçümlerde termokupl cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde (bkz. **EK-4**) göz ardı edilmiştir.



Şekil 4.6. Basit lamba üzeri termokupl konumları

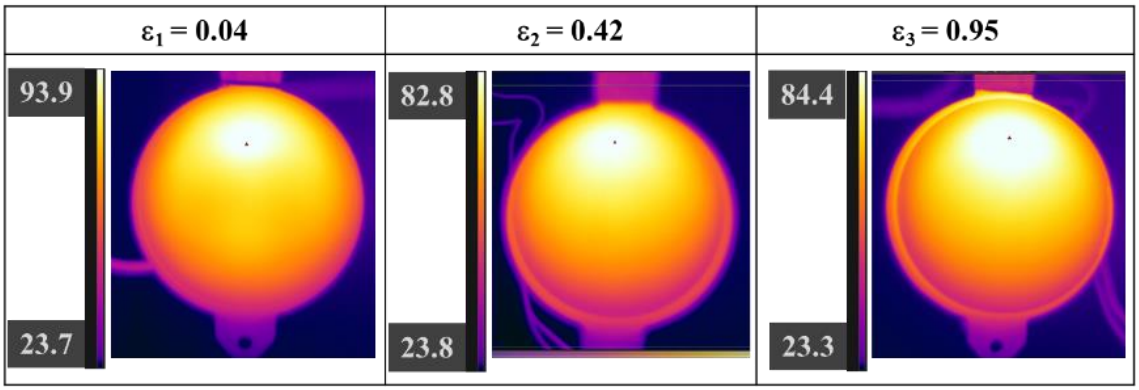
9 termokupl konumundaki deneysel sonuçlar ve o bölgedeki analiz sonuçları kıyaslamalı olarak Çizelge 4.2' de gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının kıyaslanmasında maksimum sıcaklık farkı 8 numaralı termokupl bölgesinde %7,9 bir sapmaya denk gelen T_{Analiz}-T_{Deney}=6.9 ^{o}C olduğu görülmüştür. Bununla birlikte genel ortalama sapmanın %5 civarında olmasıyla deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2. Basit Lamba - Deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları

		Termokupl Konumları	Sıcaklık Değerleri (°C)								
			$\varepsilon_1 = 0.04$			$\varepsilon_2 = 0.42$			$\varepsilon_3 = 0.95$		
			Den.	Anal.	Sap.	Den.	Anal.	Sap.	Den.	Anal.	Sap.
Termokupl No	1	Lens üst bölge	87.2	85.9	-1.3	76.3	81.1	4.8	80.9	82.5	1.6
	2	Lens orta üst alan	95.4	99.7	4.3	81	86.4	5.4	81.4	84.8	3.4
	3	Lens orta alan	84	87.5	3.5	76.3	80.5	4.2	78.9	83.4	4.5
	4	Lens alt bölge	82.9	84.1	1.2	67.3	70.2	2.9	66.4	69.5	3.1
	5	Reflektör üst bölge	102.5	105.1	2.6	123.2	128.7	5.5	134.9	138.1	3.2
	6	Reflektör sağ bölge	55.9	51.5	-4.4	76.2	81.9	5.7	86.4	90.1	3.7
	7	Reflektör sol bölge	55	51.5	-3.5	77.7	81.4	3.7	85.8	90	4.2
	8	Reflektör alt bölge	45.5	41.6	-3.9	80.7	83.5	2.8	87.1	94	6.9
	9	Reflektör konektör bölge	100.4	95.5	-4.9	128.8	126.5	-2.3	141.3	146.8	5.5

Den.: Deneysel Anal.: Analiz Sap.: Sapma (Anal.-Den.)

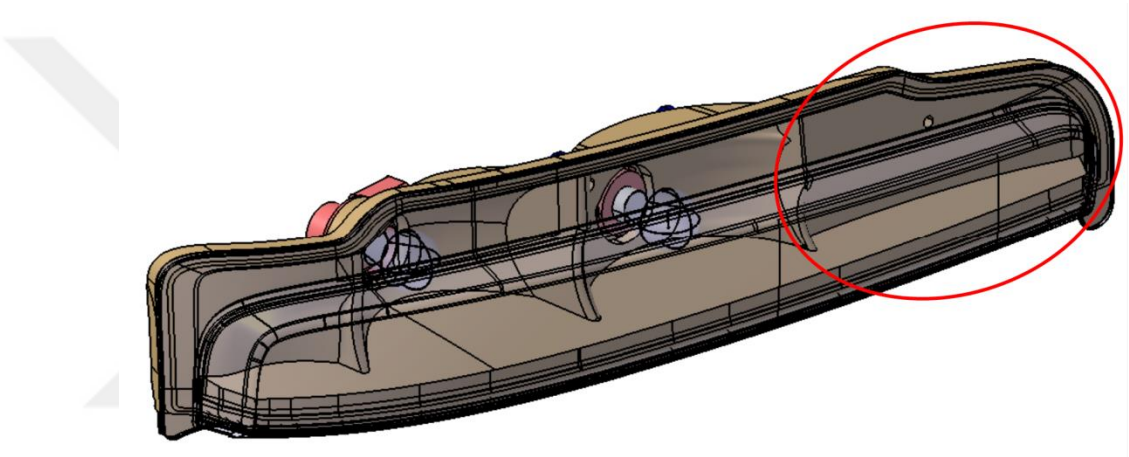
İlave olarak her üç lambanın lens sıcaklık dağılımı termal kamera (ticari ismi: Flir E60 thermal camera) ile görüntülenmiş olup Şekil 4.7' de sunulmuştur. Termal kamera sonuçlarından, Şekil 4.2 (b)' de dağılıma benzer olarak, yüksek reflektör yayıcılık katsayıları ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) için ışınım etkisi azalmasıyla lens sıcaklık dağılımında taşınımla ısı transfer etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Lensteki sıcaklık düşümü Çizelge 4.2' deki verilerden de görülmektedir (termokupl #1-4). Termokupl #1 lens üst bölgesinde, termokupl #2 de lens orta üst alanında konumlandırılmıştır. Bu iki noktadaki sıcaklık değerlerinin oranları (termokupl #1 / termokupl #2) ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 durumları için sırasıyla 0,91, 0,94 ve 0,99 şeklindedir. Reflektör yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) birlikte Çizelge 4.2' den görülen bu artış eğilimi, daha güçlü vorteks aktiviteleriyle (Şekil 4.5 (a)) birlikte lens yüzey sıcaklığında taşınımla ısı transfer etkisinin arttığını göstermektedir (Boduroglu ve Ozalp (*in press*)).



Şekil 4.7. Basit lamba lens sıcaklık dağılımı termal kamera görüntüsü

4.1.2. Kompleks Lamba Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışması

Atego DRL ve sinyal lambasının tasarımı gereği ampul tarafından ısıtılmasının zor olduğu soğuk bölgeler içermesi özellikle yoğuşma oluşumuna elverişli bir yapı ortaya çıkarmaktadır. Bu soğuk bölgenin yoğuşma problemi açısından büyük bir potansiyel sahip olduğu ön görülmüş olup sonraki analizlerde daha iyi tanımlama yapılabilmesi için **pasif bölge** olarak adlandırılacaktır (Şekil 4.8). Ayrıca tezde lambanın daha kolay tanımlanabilmesi için **Atego DRL lambası** olarak adlandırılacaktır. Lamba mevcut tasarımında üç adet havalandırma bölgesine sahiptir. Bu havalandırmaların 2 adeti DRL ampul bölgesinde ve 1 adeti pasif bölgede bulunmaktadır.



Şekil 4.8. Atego DRL lambası pasif bölge

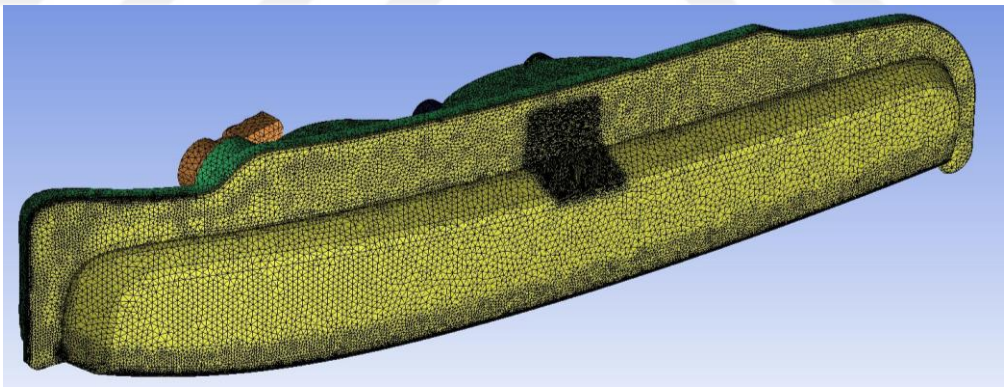
Lambada 1 adet 24 V P21W DRL ampulü ile 1 adet 24 V PY21W sarı renkli sinyal ampulü bulunmaktadır. Sinyal ampulü dakikada yaklaşık 90 kere aç kapa şeklinde flaşörlü yanmaktadır. Denge hali zamandan bağımsız analizde kullanılan ampul güç bilgileri ampul tedarikçilerinden temin edilmiştir (Anonim 2008, 2009). Geçmiş çalışmaların ve deneysel verilerin bilgisi ışığında flaşörlü yanma ampulün güç seviyesinde %50 bir düşüşe denk geldiği bilinmektedir. Analizde ortam sıcaklığı 23 °C olarak kullanılmıştır. Analiz zamandan bağımsız denge hali durumu için gerçekleştirilmiştir.

Atego DRL lambası termal analizinde kullanılan ampuller ve senaryo gereği kullanılan enerji değerleri Çizelge 4.3’ te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Atego DRL lambası termal analizinde kullanılan ampuller ve senaryo gereği kullanılan enerji değerleri

Fonksiyon	Ampul	Güç (W)	Senaryo	Güç Katsayısı	Girilen Güç (W)
DRL	P21W (24V)	29,68	Sürekli Açık	1	29,68
Sinyal	PY21W (24V)	29,68	Flaşör	0,5	14,85
Çevre Sıcaklığı	23 °C				

Öncesinde sadeleştirilen 3D data üzerinde mesh ağı örülmesi için ICEM yazılımı kullanılmış olup alt parçaların küçüklüğü, hava akış yolları, yüksek ısı etkisi ve hassas yapılar dikkate alınarak geometrideki yakınlık, eğim, radüs gibi şekilsel yapılara en iyi uyumun sağlanması için değişken ebatlı mesh yapısı kullanılmıştır. Özellikle DRL ampulü lense kısmi olarak yaklaştığı için o bölge daha sık mesh ağı ile örülmüştür ve ilk mesh çalışmasında yaklaşık toplam *6,3 milyon* eleman elde edilmiştir (Şekil 4.9).

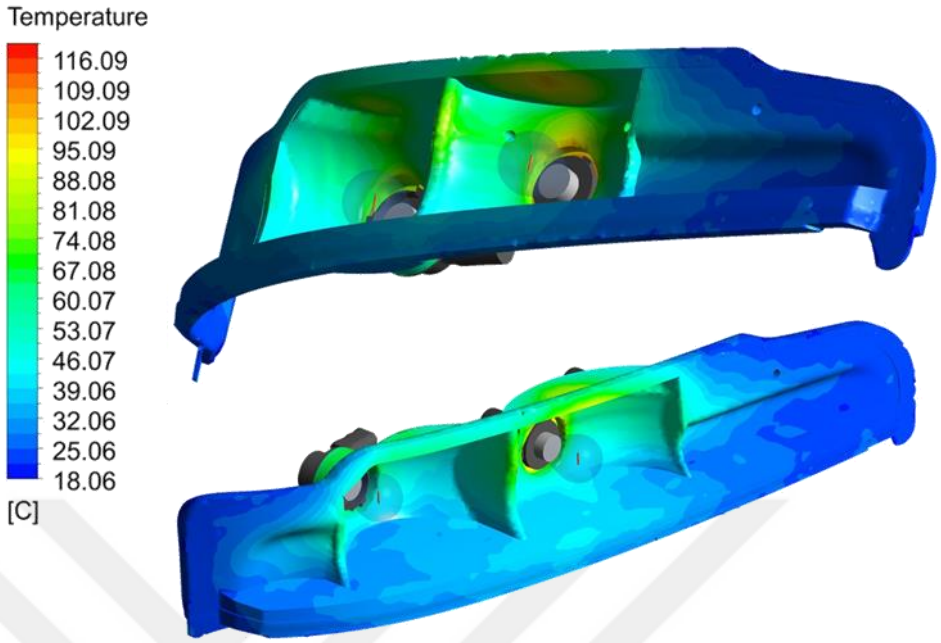


Şekil 4.9. Atego DRL ve sinyal lambası mesh yapısı

Analiz çalışması ANSYS CFX yazılımında yapılmış olup çözüm tamamlandıktan sonra analiz sonuçları yine CFX-POST arayüzeyinde sıcaklık dağılımı şeklinde elde edilmiştir. Sıcaklık dağılım görüntüleri iki alt parça gövde ve lens için ayrı ayrı elde edilmiş ve her parça için maksimum sıcaklık seviyeleri belirlenmiştir. Ayrıca iç hava akışı ve sıcaklıkları da analiz sonucu incelenmiştir.

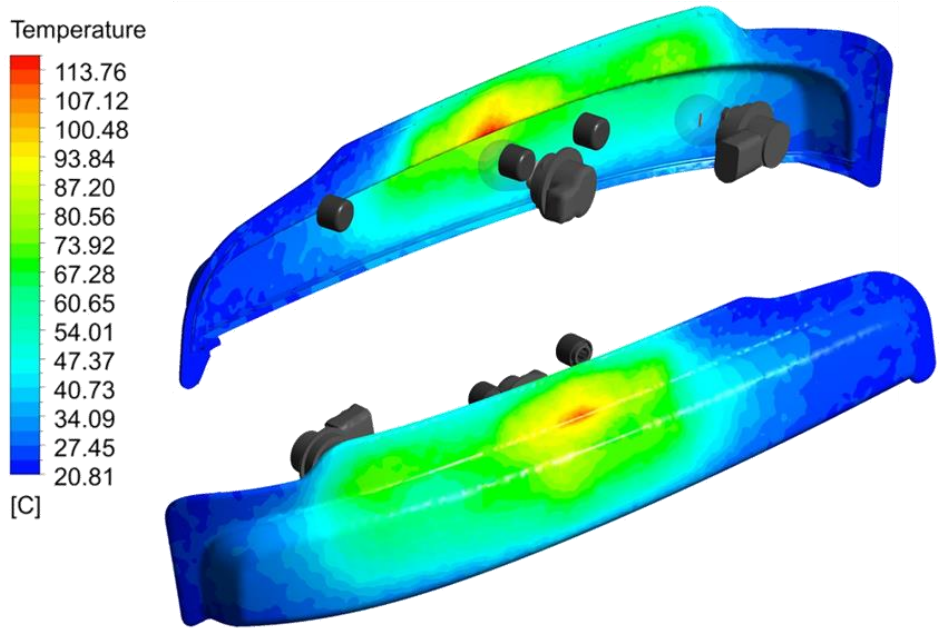
Analiz sonucuna göre gövde üzerinde oluşan maksimum sıcaklık 116 °C' dir ve bu

sıcaklık en yüksek enerji çıkışı olan DRL ampulü üst bölgesinde oluşmuştur (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu gövde sıcaklık dağılımı

Analiz sonucuna göre lens üzerinde oluşan maksimum sıcaklık 114 °C' dir ve bu sıcaklık en yüksek enerji çıkışı olan DRL ampulü karşısında oluşmuştur (Şekil 4.11).

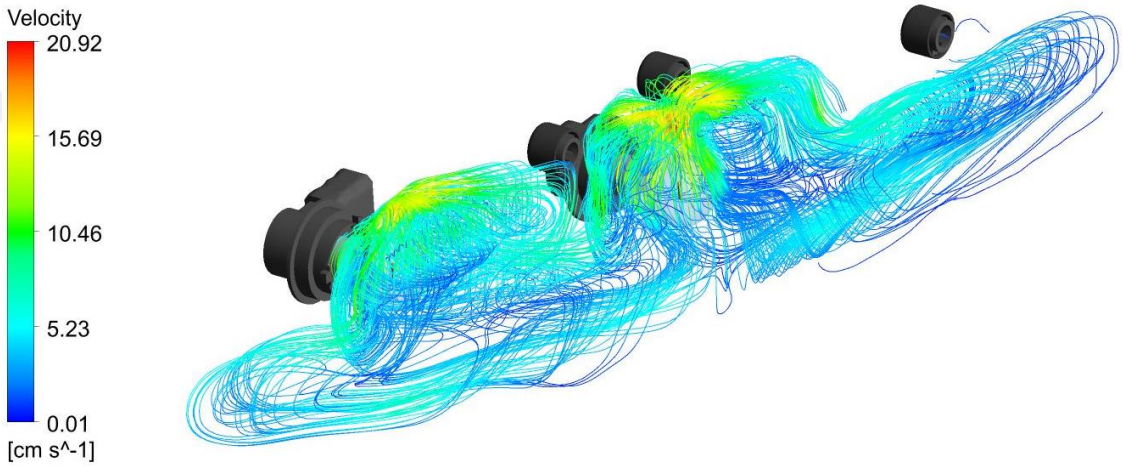


Şekil 4.11. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu lens sıcaklık dağılımı

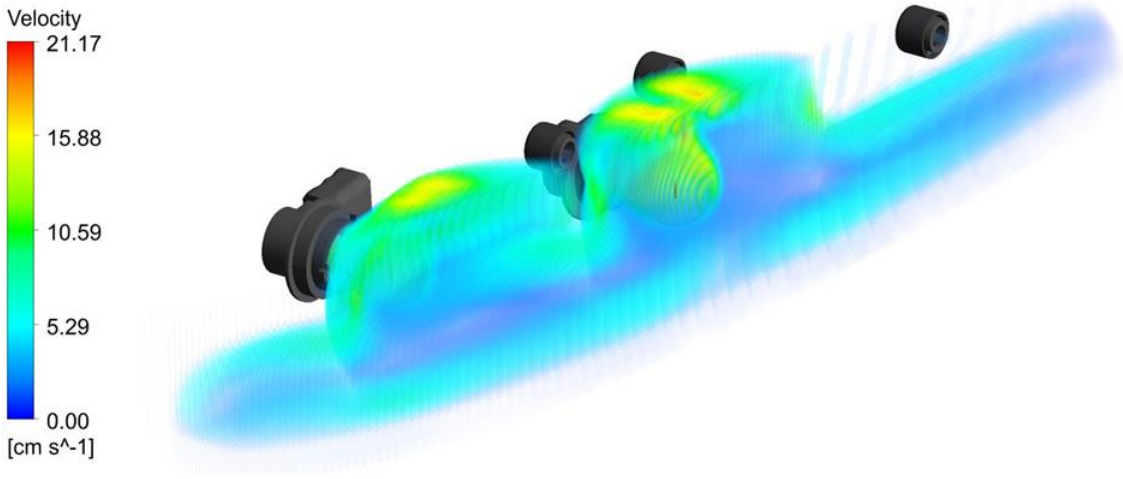
Analiz sonucunda aktif aydınlatma alanı haricinde stilistik olarak uzatılmış olan pasif bölgenin soğuk kaldığı görülmüştür. Daha detaylı inceleme için iç hava akış yönleri,

sıcaklık ve hız kontrolü de yapılmıştır.

Lamba içi hava akışına bakıldığında doğal taşınım ile alakalı olarak ampul bölgelerinde ciddi hava hareketleri oluşmaktadır ve bu hava akışı lamba içi genel hava akışını tetiklemektedir. Maksimum hava hızı 21 cm/s olarak görülmektedir (Şekil 4.12). Pasif bölgede de hava akışının alt bölümden lamba ucuna doğru gidip üst bölümden geri geldiği görülmüştür. Kısmen de havalandırmadan dışarı çıkış olduğu da görülmektedir. Pasif bölgedeki hava akış hızının ortalama hava hızına göre daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13).

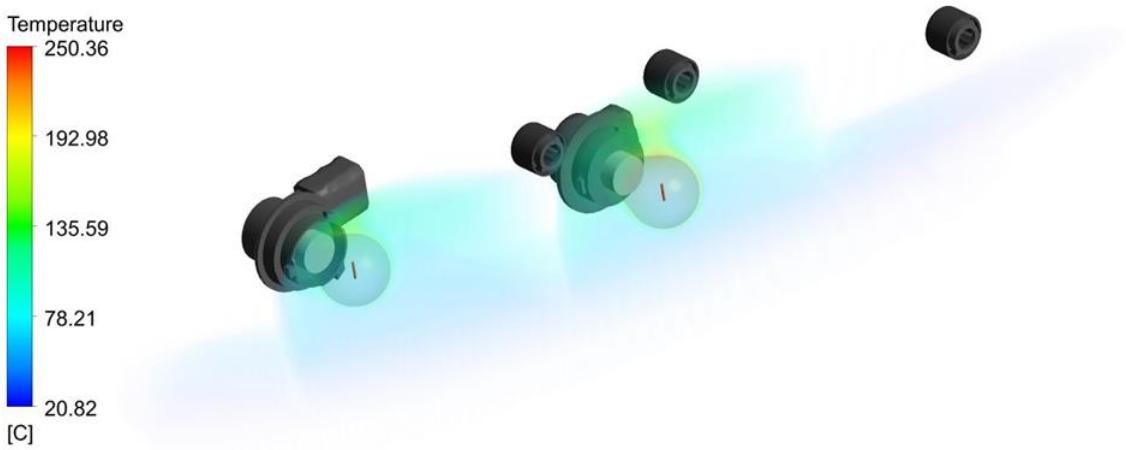


Şekil 4.12. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış çizgileri



Şekil 4.13. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış hızı

Şekil 4.14' te lamba iç havası sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu dağılıma göre de pasif bölgede hava sıcaklığının yaklaşık 30 °C' nin altında olduğu görülmektedir ve uçlara gidildikçe sıcaklığın dış ortam sıcaklığıyla neredeyse aynı değere düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.14. Atego DRL lambası CFX termal analiz sonucu iç hava akış hızı

4.1.2.1. Deneysel Ölçüm

Yapılan termal analizin sapma oranlarının tespit edilebilmesi için Atego DRL ve sinyal lambasında termokupl ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deney düzeneğinde bulunan ekipmanlar aşağıdaki gibidir.

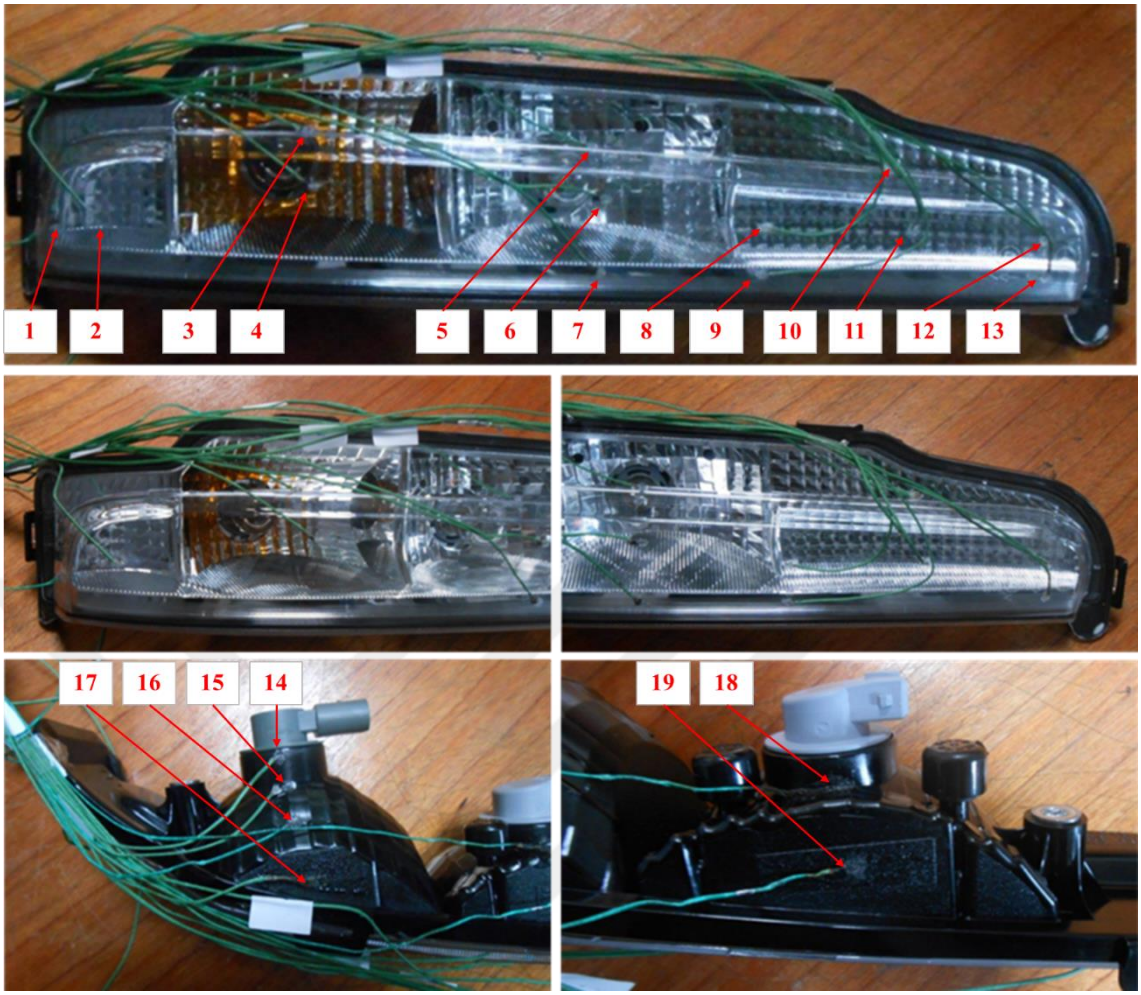
- Deneyde kullanılacak lamba
- Harici güç kaynağı
- K tipi Cr-Ni termokupl
- Veri kayıt cihazı (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger)

Deney esnasında lamba araç pozisyonunda konumlandırılmış olup çevresinde 23 – 25 °C sıcaklığında durgun hava bulunmaktadır. Harici güç kaynağı tarafından DRL ampulü için sabit ve sinyal ampulü için flaşörlü 13,5V gerilimle enerji verilerek ampuller yakılmaktadır.

Termokupl ile ölçümler için 19 adet K tipi Cr-Ni termokupl lamba üzerine Şekil 4.15' te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Ölçümler veri kayıt cihazıyla (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger) 1 saniye periyotlar halinde kaydedilmiş olup ölçümler denge haline ulaşıncaya kadar devam etmiştir. Veri kayıt cihazının hata oranı ±% 0,05 olup zaman adımlı ölçümlerde termokupl cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde (bkz. **EK-4**) göz ardı edilmiştir.

Termokuplların takıldığı bölgeler aşağıdaki gibidir.

1. Lens üzeri sinyal ampul yanı pasif bölge en uç kısmı
2. Lens üzeri sinyal ampul yanı pasif bölge orta kısmı
3. Lens üzeri sinyal ampul önü en yakın bölge
4. Lens üzeri sinyal ampul önü karşı bölge
5. Lens üzeri DRL ampul önü en yakın bölge
6. Lens üzeri DRL ampul önü karşı bölge
7. Lens üzeri DRL ampul önü alt bölge
8. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge ampule yakın kısım orta bölgesi
9. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge ampule yakın kısım alt bölgesi
10. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge havalandırma karşısı
11. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge havalandırma hizası orta bölge
12. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge en uç kısım orta bölge
13. Lens üzeri DRL ampul yanı pasif bölge en uç kısım alt bölge
14. Gövde üzeri sinyal ampul soketi üst kısım
15. Gövde üzeri sinyal ampul en yakın köşe bölge
16. Gövde üzeri sinyal ampul üstü hava akışı ilk temas bölgesi
17. Gövde üzeri sinyal bölümü üst duvar orta bölgesi
18. Gövde üzeri DRL ampul en yakın köşe bölge
19. Gövde üzeri DRL bölümü üst duvar orta bölgesi



Şekil 4.15. Atego DRL lambası üzerine takılan termokupllar

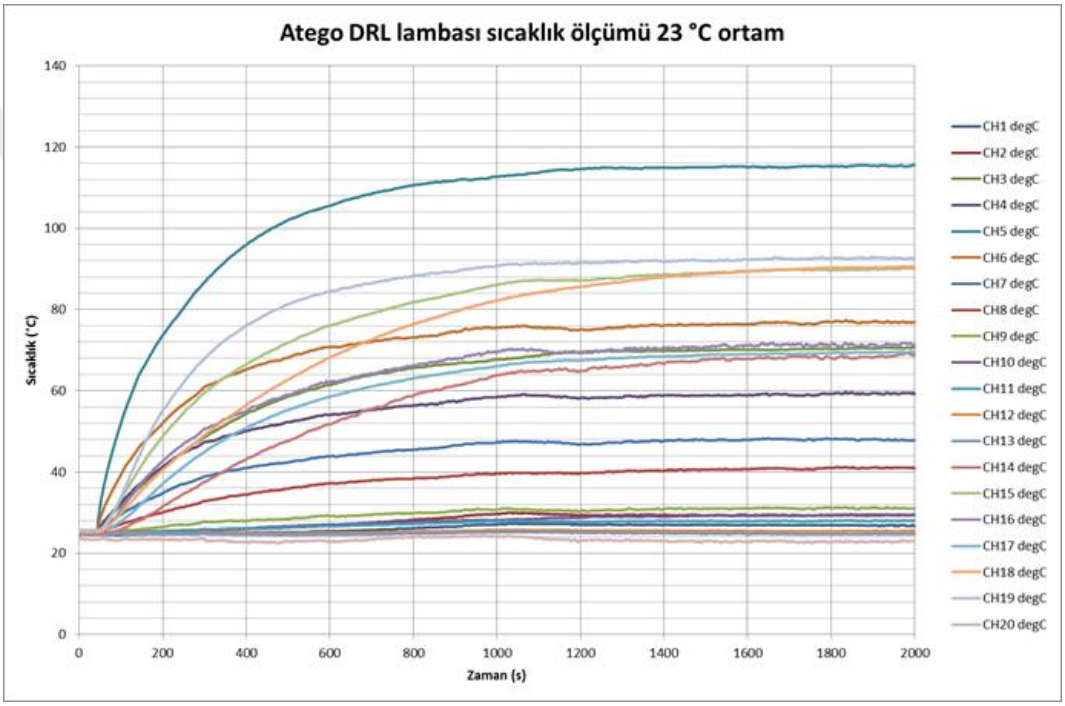
Termokupların takıldığı noktaların termal analizde kullanılan 3D data üzerinde araç orijin noktasına göre hangi koordinatlarda olduğu Çizelge 4.4' te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Atego DRL lambası üzerindeki termokupl konumları

Termokupl	Termokupl koordinatları (mm)		
	X	Y	Z
CH1	144,94	1062,57	-351,6
CH2	110,75	1037,58	-341,89
CH3	90,71	964,01	-311,09
CH4	72,4	963,68	-329,26
CH5	62,99	856,75	-317,82
CH6	43,96	857,35	-337,27
CH7	44,58	857,23	-364,15
CH8	33,23	790,56	-345,9
CH9	33,89	790,56	-366,08
CH10	45,86	728,83	-324,03

CH11	26,28	730,75	-347,8
CH12	21,66	673,85	-354,26
CH13	21,67	673,3	-369,79
CH14	157,43	965,03	-304,82
CH15	140,63	965,03	-304,46
CH16	127,94	964,61	-293,18
CH17	109,88	956,27	-285,95
CH18	103,98	857,16	-309,8
CH19	89,51	856,04	-293,95

Deneysel ölçüm sonucu elde edilen grafik Şekil 4.16' da verilmiştir.



Şekil 4.16. Atego DRL lambası sıcaklık ölçümü

4.1.2.2. Farklı Mesh Sayıları ve Deneysel Sonuç Kıyaslaması

Yoğuşma problemi zamana bağlı şartlarda oluşan bir durumdur. Zamana bağlı bir analiz çözümünde ise her bir birim zaman adımı tek tek çözülmekte ve zaman adımı yeterli seviyede küçük olması gerekmektedir. Bu sebeple zamana bağlı analiz çalışmaları çok uzun zamanda tamamlanmaktadır. Analiz süresini bire bir etkileyen parametrelerden biri de toplam mesh sayısıdır. Mesh hassasiyeti analiz sonuçlarının doğruluğunu artırırken analiz süresini de artırmaktadır. Bu sebeple Atego DRL lambası için farklı 3,6 milyon ve 1,6 milyon toplam elemana sahip 2 farklı analiz çalışması daha yapılmıştır. Bu mesh

yapılarında yine alt parçaların küçüklüğü, hava akış yolları, yüksek ısı etkisi ve hassas yapılar dikkate alınarak geometrideki yakınlık, eğim, radüs gibi şekilsel yapılara en iyi uyumun sağlanması için değişken ebatlı mesh yapısı kullanılmıştır. Deneysel sonuçları ile farklı mesh yapılarına ait analiz sonuçları kıyaslamalı olarak Çizelge 4.5' te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Atego DRL lambası farklı mesh sayıları için CFX termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması

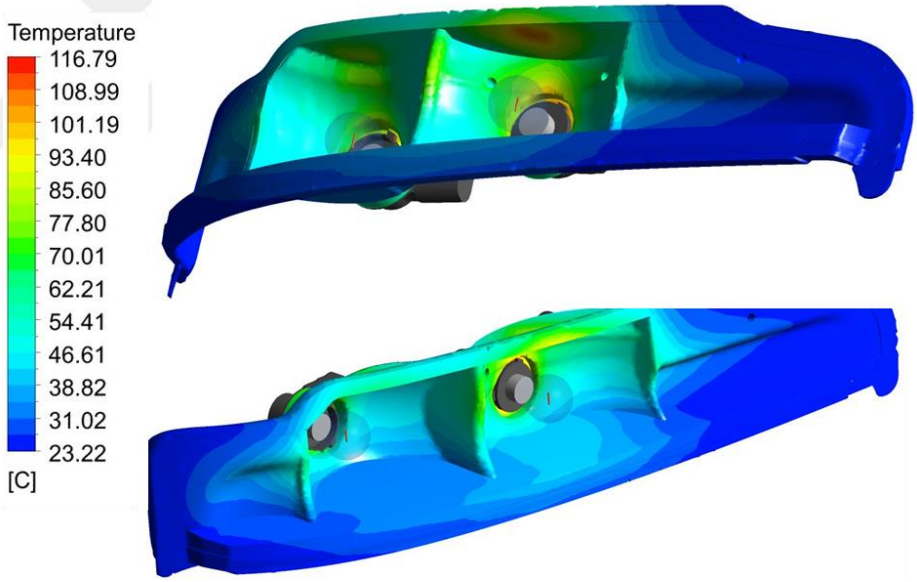
		Deneysel sıcaklık ölçümleri	**Termal analiz sonuçları (° C)**					
			6,3 milyon mesh		**3,6 milyon mesh**		**1,6 milyon mesh**	
			Sonuç	**Sapma**	**Sonuç**	**Sapma**	**Sonuç**	**Sapma**
Ölçüm noktaları sıcaklık değerleri (°C)	**CH1**	27,2	27,3	0,1	27	-0,2	29,3	2,1
	CH2	31,4	30,2	-1,2	31,7	0,3	35,6	4,2
	CH3	71,9	74,3	2,4	71,7	-0,2	68,7	-3,2
	CH4	62,4	60,3	-2,1	59,6	-2,8	58,2	-4,2
	CH5	117	115,6	-1,4	111,5	-5,5	102,7	-14,3
	CH6	79,6	71,6	-8	72,9	-6,7	66,4	-13,2
	CH7	48,9	47,1	-1,8	51,2	2,3	58,8	9,9
	CH8	40,9	39,8	-1,1	40	-0,9	43,5	2,6
	CH9	31	33,9	2,9	34	3	39,7	8,7
	CH10	28,3	24,9	-3,4	27,6	-0,7	28,4	0,1
	CH11	27,5	27,8	0,3	26,4	-1,1	29,9	2,4
	CH12	24,6	23,9	-0,7	24,3	-0,3	25,4	0,8
	CH13	24	23,6	-0,4	24,1	0,1	24,9	0,9
	CH14	72,1	68,9	-3,2	67,4	-4,7	74,5	2,4
	CH15	92,5	84,9	-7,6	78	-14,5	84,2	-8,3
	CH16	73,8	75,9	2,1	71,6	-2,2	62,7	-11,1
	CH17	69,8	76,9	7,1	76,5	6,7	60,8	-9
	CH18	91,6	91	-0,6	90,9	-0,7	94,7	3,1
	CH19	92,4	97,6	5,2	85,9	-6,5	78,3	-14,1

Çizelge 4.5, 6,3 milyon adetli mesh yapısında sapma oranları çok düşük iken mesh sayısı azaldıkça sapma oranlarının arttığını göstermektedir. Zamana bağlı simülasyon çalışmalarında bilinen sapma oranlarıyla birlikte düşük mesh sayılı yapıların kullanılması analiz süresinin kısaltılması konusunda ciddi avantaj sağlayacaktır. Bu bağlamda tez çalışmasının sonraki aşamalarında zamana bağlı analizlerde düşük sayılı mesh yapıları kullanılacaktır.

Yoğuşma oluşumu simülasyonu için FLUENT' yazılımının Eulerian Wall Film (EWF) modeli kullanılacaktır. Bu bağlamda yüksek lisans tez çalışmasında (Boduroğlu 2010) ve diğer farklı çalışmalarda ANSYS CFX yazılımından elde edilen kazanımlar FLUENT yazılımında kullanılarak analizler tekrarlanmıştır. ANSYS CFX ve FLUENT her ne kadar ticari CFD yazılımlar olsalar da çözüm yöntemleri ve ara yüzeyleri gibi konularda tamamen farklıdırlar. Bu bağlamda FLUENT ile yapılan analizlerde ANSYS CFX seviyesine gelinebilmesi için birçok farklı ayarlamalar yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde FLUENT ile yapılan analizlerin sonuçları da uygun seviyelere gelmiştir.

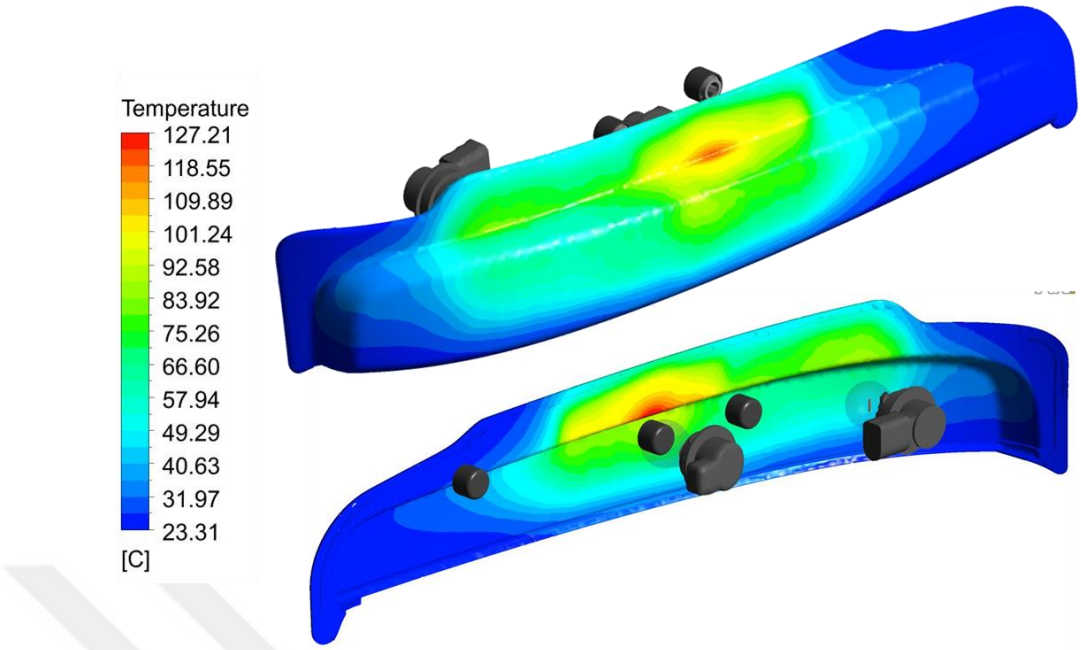
FLUENT yazılımı ile ilk olarak daha önce ANSYS CFX ile yapılmış ve sonuçları Çizelge 4.5' te görülen 3,6 milyon mesh yapısı için termal analiz yapılmıştır.

Analiz sonucuna göre gövde üzerinde oluşan maksimum sıcaklık 116 °C olmakla beraber bu sıcaklık en yüksek enerji çıkışı olan DRL ampulü üst bölgesinde oluşmuştur (Şekil 4.17).



Şekil 4.17. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu gövde sıcaklık dağılımı

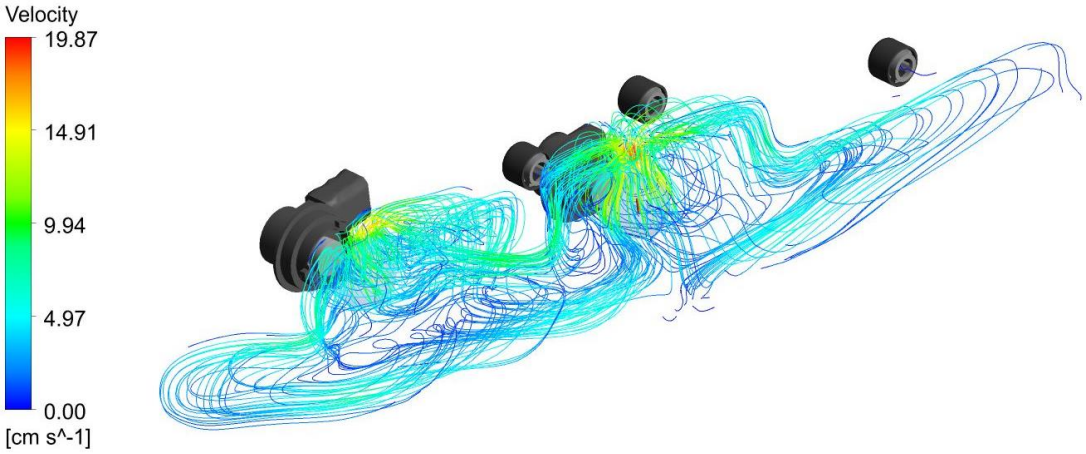
Analiz sonucuna göre lens üzerinde oluşan maksimum sıcaklık 127 °C olmakla beraber bu sıcaklık en yüksek enerji çıkışı olan DRL ampulü karşısında oluşmuştur (Şekil 4.18).



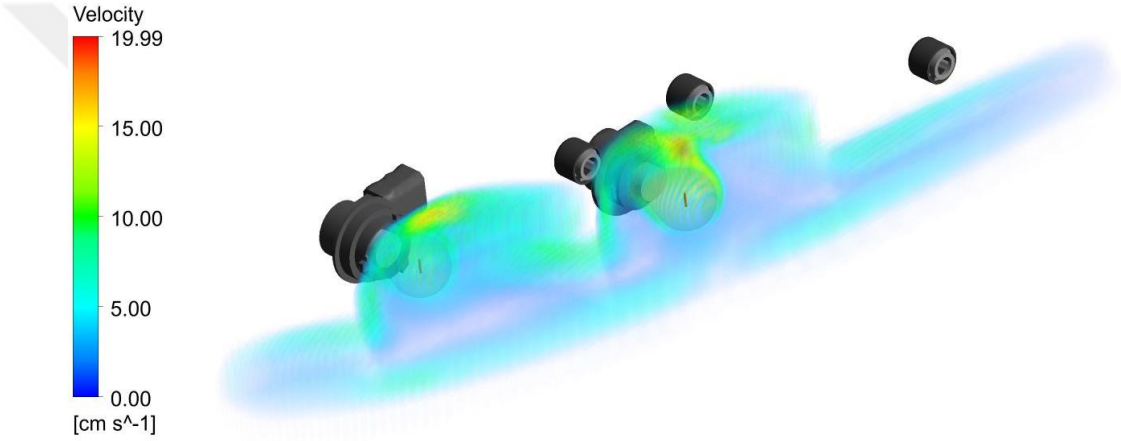
Şekil 4.18. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu lens sıcaklık dağılımı

FLUENT ile yapılan analiz sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı önceki ANSYS CFX ile yapılan termal analiz ile uyumlu gerçekleştiği Şekil 4.17-18' den görülmektedir. FLUENT analizinde de yine aktif aydınlatma alanı haricinde stilistik olarak uzatılmış olan pasif bölgenin soğuk kaldığı görülmüştür.

FLUENT analizinden elde edilen lamba içi hava akış hız değerlerinin ve yönlerinin de önceki CFX analizinden elde edilen sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Maksimum hava hızı 20 cm/s olarak görülmektedir (Şekil 4.19). Pasif bölgede de hava akışının alt bölümden lamba ucuna doğru gidip üst bölümden geri geldiği görülmüştür. Yine benzer olarak kısmen de havalandırmadan dışarı çıkış olduğu da görülmektedir. Pasif bölgedeki hava akış hızının ortalama hava hızına göre daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.19 ve Şekil 4.20).

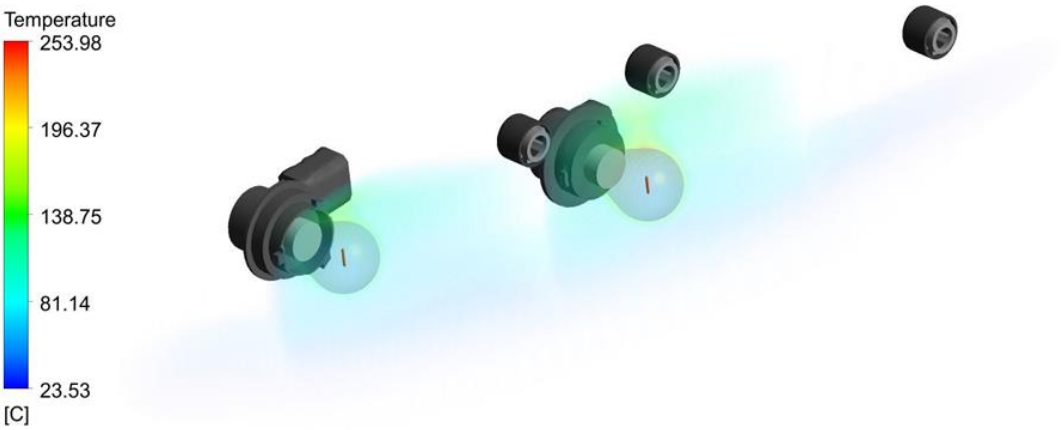


Şekil 4.19. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu iç hava akış çizgileri



Şekil 4.20. Atego DRL lambası FLUENT termal analiz sonucu iç hava akış hızı

Şekil 4.21' de lamba iç havası sıcaklık dağılımı görülmektedir. Bu dağılıma göre de pasif bölgede hava sıcaklığının yaklaşık 30 °C' nin altında olduğu görülmektedir ve uçlara gidildikçe sıcaklığın dış ortam sıcaklığıyla neredeyse aynı değere düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.21. Atego DRL FLUENT lambası termal analiz sonucu iç hava akış hızı

FLUENT ile ayrıca daha önce CFX analizinde kullanılan 1,6 milyon adetli mesh yapısı analiz edilmeye çalışılmış fakat mesh kalitesi yüzünden analiz hata vermiştir. Bunun üzerine geometri basitleştirme çalışmaları neticesinde termal analiz ve yoğuşma analizi açısından etkisiz bir bölge olan gövde ve lens üzerinde her iki parçanın birbirleriyle birleşim hatlarının dışında kalan ince kanal yapıları silinmiştir. Bu şekilde tekrar mesh yapısı örülmüş yine yaklaşık 1,6 milyon eleman sayısı elde edilmiştir. Bu yeni mesh yapısı FLUENT analizinde problem çıkarmamıştır.

Daha önce Çizelge 4.5 olarak verilen farklı mesh sayılarıyla yapılmış ANSYS CFX analiz sonuçlarının deneysel ölçümlerle kıyaslanmasına aradaki kıyaslamayı daha kolay yapabilmek için bir de FLUENT 3,6 milyon ve yeni 1,6 milyon mesh yapılı analiz sonuçları eklenerek Çizelge 4.6 olarak sunulmuştur. Aynı mesh yapısının iki yazılımda kullanılması hasebiyle 3,6 milyon mesh için CFX ve FLUENT sonuçları karşılıklı olarak kıyaslandığında ölçüm noktalarındaki karşılıklı farklılık genel anlamda 4 °C' nin altındadır. Lens maksimum sıcaklığı açısından değerlendirilirse, CFX sonucu deneysel ölçüm değerine yaklaşık -%5 yaklaşım gösterirken FLUENT sonucu da +%5 yaklaşım göstermiştir. Ayrıca 1,6 milyon elemanlı yeni mesh yapısının FLUENT sonuçları özellikle yoğuşma analizi için önem arz eden lens yüzey sıcaklıklarında maksimum 5 °C sapmaya sahiptir. Bu bağlamda sonraki süreçler olarak FLUENT zamana bağlı analizlerde elde edilen 1,6 milyon elemanlı yeni mesh yapısı kullanılacaktır.

Çizelge 4.6. Atego DRL lambası farklı mesh sayıları için CFX ve FLUENT termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması

			Termal Analiz Sonuçları (°C)									
			ANSYS CFX						FLUENT			
		Deneysel sıcaklık ölçümleri	6,3 milyon mesh		3,6 milyon mesh		1,6 milyon mesh		3,6 milyon mesh		1,6 milyon yeni mesh	
			Sonuç	Sapma	Sonuç	Sapma	Sonuç	Sapma	Sonuç	Sapma	Sonuç	Sapma
Ölçüm noktaları sıcaklık değerleri (°C)	CH1	27,2	27,3	0,1	27	-0,2	29,3	2,1	27,7	0,5	28,8	1,6
	CH2	31,4	30,2	-1,2	31,7	0,3	35,6	4,2	32,5	1,1	34,7	3,3
	CH3	71,9	74,3	2,4	71,7	-0,2	68,7	-3,2	79,1	7,2	79,0	7,1
	CH4	62,4	60,3	-2,1	59,6	-2,8	58,2	-4,2	62,2	-0,2	64,5	2,1
	CH5	117	115,6	-1,4	111,5	-5,5	102,7	-14,3	124,3	7,3	120,0	3,0
	CH6	79,6	71,6	-8	72,9	-6,7	66,4	-13,2	79,1	-0,5	78,5	-1,1
	CH7	48,9	47,1	-1,8	51,2	2,3	58,8	9,9	47,2	-1,7	53,9	5,0
	CH8	40,9	39,8	-1,1	40	-0,9	43,5	2,6	44	3,1	50,3	9,4
	CH9	31	33,9	2,9	34	3	39,7	8,7	31	0	35,7	4,7
	CH10	28,3	24,9	-3,4	27,6	-0,7	28,4	0,1	27,2	-1,1	27,7	-0,6
	CH11	27,5	27,8	0,3	26,4	-1,1	29,9	2,4	29,1	1,6	30,8	3,3
	CH12	24,6	23,9	-0,7	24,3	-0,3	25,4	0,8	26,4	1,8	27,0	2,4
	CH13	24	23,6	-0,4	24,1	0,1	24,9	0,9	24,8	0,8	25,8	1,8
	CH14	72,1	68,9	-3,2	67,4	-4,7	74,5	2,4	71,9	-0,2	73,0	0,9
	CH15	92,5	84,9	-7,6	78	-14,5	84,2	-8,3	76,6	-15,9	76,5	-16,0
	CH16	73,8	75,9	2,1	71,6	-2,2	62,7	-11,1	72,3	-1,5	65,9	-7,9
	CH17	69,8	76,9	7,1	76,5	6,7	60,8	-9	69,9	0,1	69,1	-0,7
	CH18	91,6	91	-0,6	90,9	-0,7	94,7	3,1	88	-3,6	89,6	-2,0
	CH19	92,4	97,6	5,2	85,9	-6,5	78,3	-14,1	92	-0,4	79,0	-13,4

4.2. Zamana Bağlı Termal Analiz Çalışmaları

4.2.1. CFX ile Zamana Bağlı Analiz

Zamana bağlı analizlerde en önemli parametre hesaplanacak toplam zamanın analiz esnasından bölündüğü zaman adımlarıdır. Özellikle sıcaklık değişiminin fazla olduğu ilk zamanlarda zaman adımı yeterince küçük seçilmediği takdirde analiz çözüm hatası vermektedir. Zamana bağlı akışlar için Courant sayısı en önemli parametredir. Bir boyutlu grid için courant sayısı aşağıdaki gibidir.

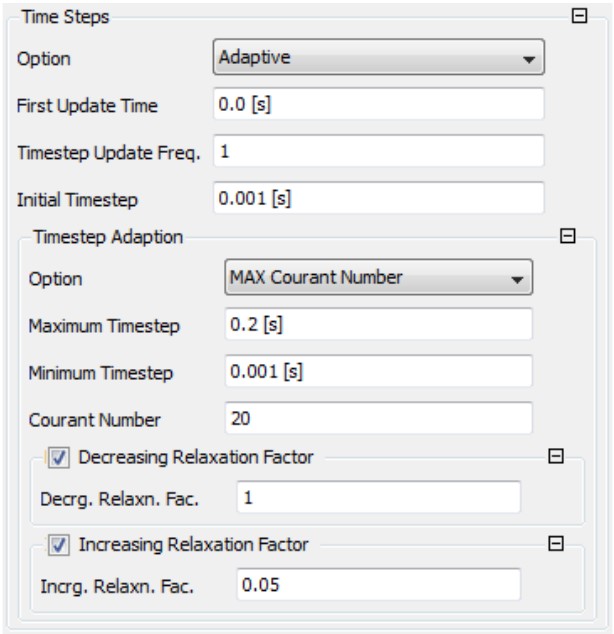
$$courant = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$$

Burada u akışkan hızı, Δt zaman adımı ve Δx de mesh büyüklüğüdür. ANSYS CFX içerisinde hesaplanan courant sayısı yukarıdaki terimin çok boyutlu genelleştirilmiş

halidir. Bu genelleştirmede hız ve büyüklük ölçülerinde kontrol hacmine olan kütle akışı ve kontrol hacminin boyutu temel alınmaktadır.

CFX çözüm parametrelerinde zaman adımı courant sayısını yeterince küçük yapacak şekilde seçilmelidir. Bu bilgiler ışığında birçok farklı analiz parametre denemesi yapılmıştır. Uygun seviyede parametre girişi yapılmadığı takdirde analiz çözümünde hata ile karşılaşılmaktadır. CFX zamana bağlı parametrelerinde zaman adımı sabit girilebileceği gibi değişken de girilebilmektedir. Değişken zaman adımı girişi yapıldığında belirtilen şartlara göre her iterasyon çözümünde zaman adımı program tarafından güncellenmektedir. Lambamızın gerçek sıcaklık verilerine bakıldığı zaman ampulün ilk yakılmasıyla sıcaklık gradyanı çok büyükken zaman ilerledikçe küçülerek sürekli hale yakınsamaktadır. Bu şartlar göz önüne alındığında zamana bağlı analiz için de değişken zaman adımı seçeneğinin kullanılmasının isabetli olacağı öngörülmüştür.

Farklı denemelerden sonra Şekil 4.22' de görülen parametrelerin uygun bir başlangıç olduğu tespit edilmiştir. Zaman adımı değişkenliği maksimum Courant sayısına bağlanmış, program her iterasyonda courant sayısını girilen maksimum limit değerde tutacak şekilde zaman adımını tekrar belirlemiştir. Çözümde maksimum courant sayısı limiti kademeli olarak 75' e kadar çıkarılmıştır.



Şekil 4.22. ANSYS CFX zamana bağlı parametreleri

CFX ile yapılan zamana bağlı analizde 1,6 milyon mesh yapısı için toplam 340 saniyelik

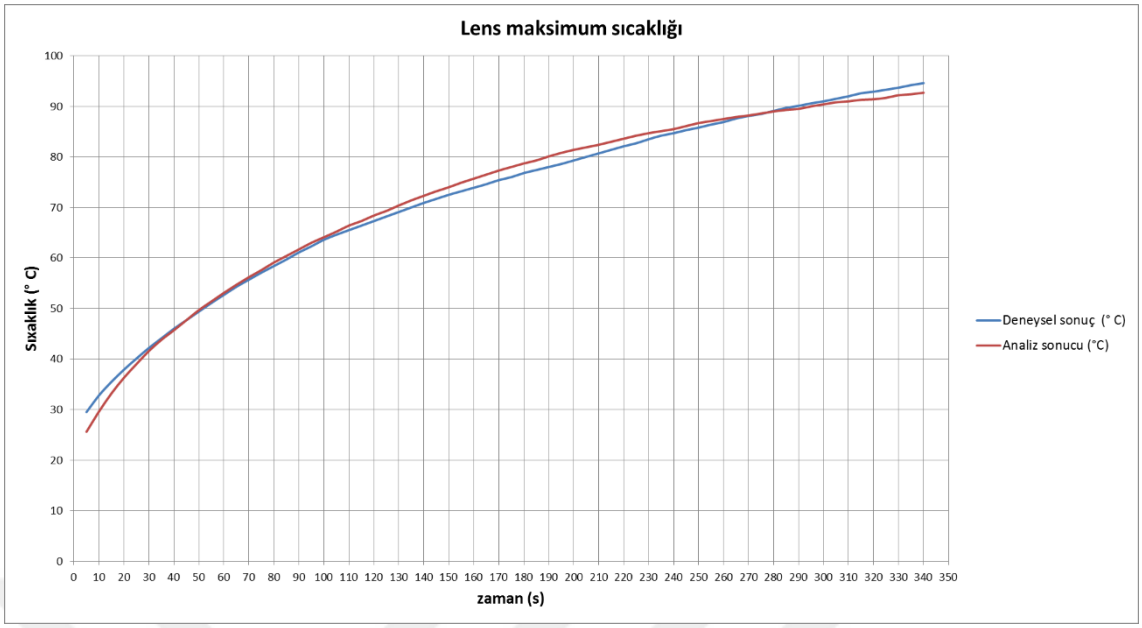
bir analiz çözümlenmiştir. Bu analizin çözümü tek bilgisayar 16 CPU ile **27 gün 1 saat** sürmüştür. Analiz çözümünde her 5 saniyelik hesaplamalar için sonuçlar alınmıştır. Zamana bağlı sonuçlar deneysel ölçümlerden elde edilen verilerle Çizelge 4.7' de kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4.7. Atego DRL lambası zamana bağlı CFX termal analiz sonuçları ile ölçüm sonuçlarının kıyaslanması

	Lens maksimum sıcaklığı			**Gövde maksimum sıcaklığı**		
Zaman (s)	**Deneysel sonuç (° C)**	**Analiz sonucu (°C)**	**Sapma**	**Deneysel sonuç (° C)**	**Analiz sonucu (°C)**	**Sapma**
5	29,5	25,6	-3,9	25,7	26,9	1,2
10	32,8	29,6	-3,2	25,9	32,3	6,4
15	35,5	33,2	-2,3	26,2	35,6	9,4
20	37,9	36,3	-1,6	26,7	38,1	11,4
25	40,1	39	-1,1	27,4	40,2	12,8
30	42,2	41,6	-0,6	28,1	42,1	14
35	44,1	43,8	-0,3	29	43,7	14,7
40	46	45,7	-0,3	30	45,1	15,1
45	47,7	47,7	0	31	46,4	15,4
50	49,4	49,7	0,3	32,1	47,5	15,4
55	51,1	51,4	0,3	33,2	48,6	15,4
60	52,7	53,1	0,4	34,4	49,6	15,2
65	54,3	54,7	0,4	35,5	50,6	15,1
70	55,7	56,2	0,5	36,7	51,5	14,8
75	57,1	57,6	0,5	37,9	52,4	14,5
80	58,4	59,1	0,7	39,1	53,3	14,2
85	59,7	60,4	0,7	40,3	54,1	13,8
90	61,1	61,7	0,6	41,4	54,9	13,5
95	62,3	63	0,7	42,6	55,6	13
100	63,6	64,1	0,5	43,7	56,4	12,7
105	64,6	65,2	0,6	44,8	57,1	12,3
110	65,5	66,4	0,9	46	57,8	11,8
115	66,4	67,3	0,9	47	58,5	11,5
120	67,3	68,4	1,1	48,1	59,2	11,1
125	68,2	69,3	1,1	49,1	59,8	10,7
130	69,1	70,4	1,3	50,1	60,5	10,4
135	70	71,4	1,4	51,2	61,3	10,1
140	70,9	72,3	1,4	52,1	62	9,9
145	71,7	73,2	1,5	52,9	62,8	9,9
150	72,5	74	1,5	53,9	63,5	9,6

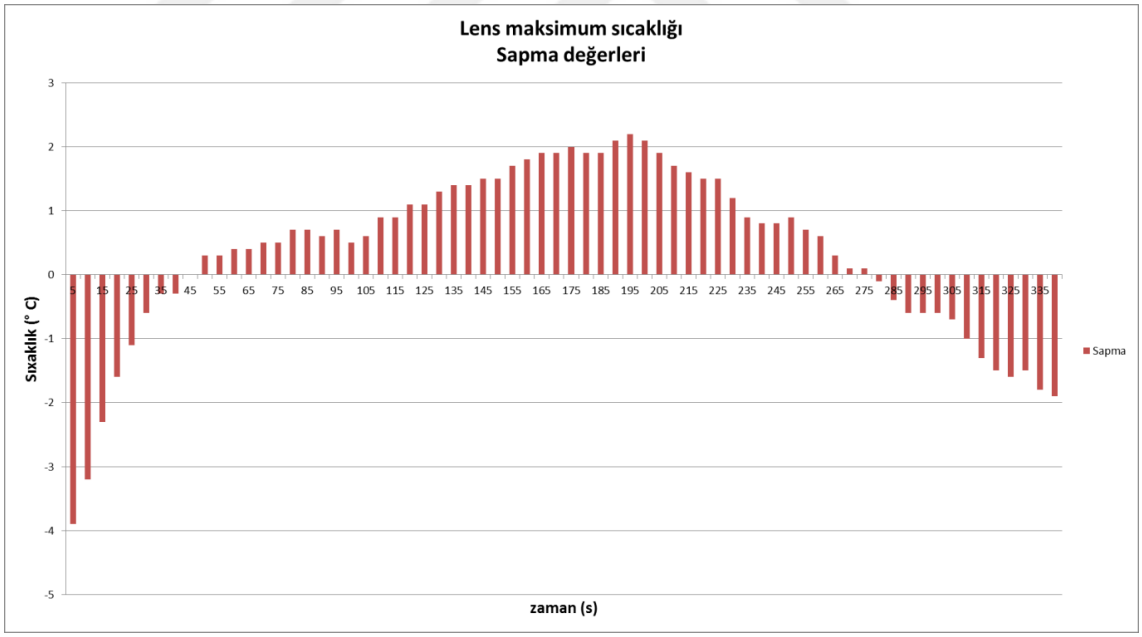
155	73,2	74,9	1,7	54,8	64,2	9,4
160	73,9	75,7	1,8	55,5	64,8	9,3
165	74,6	76,5	1,9	56,1	65,5	9,4
170	75,4	77,3	1,9	56,8	66,1	9,3
175	76	78	2	57,5	66,8	9,3
180	76,8	78,7	1,9	58,3	67,4	9,1
185	77,4	79,3	1,9	59,1	68	8,9
190	78	80,1	2,1	59,7	68,6	8,9
195	78,6	80,8	2,2	60,4	69,1	8,7
200	79,3	81,4	2,1	60,9	69,7	8,8
205	80	81,9	1,9	61,7	70,2	8,5
210	80,7	82,4	1,7	62,3	70,8	8,5
215	81,4	83	1,6	63	71,3	8,3
220	82,1	83,6	1,5	63,7	71,8	8,1
225	82,7	84,2	1,5	64,3	72,3	8
230	83,5	84,7	1,2	64,9	72,8	7,9
235	84,2	85,1	0,9	65,5	73,2	7,7
240	84,7	85,5	0,8	66,2	73,7	7,5
245	85,3	86,1	0,8	66,6	74,1	7,5
250	85,8	86,7	0,9	67,2	74,6	7,4
255	86,4	87,1	0,7	67,6	75	7,4
260	86,9	87,5	0,6	68,1	75,4	7,3
265	87,6	87,9	0,3	68,7	75,9	7,2
270	88,1	88,2	0,1	69,1	76,3	7,2
275	88,5	88,6	0,1	69,5	76,7	7,2
280	89,1	89	-0,1	70,1	77,1	7
285	89,7	89,3	-0,4	70,6	77,5	6,9
290	90,1	89,5	-0,6	71	77,8	6,8
295	90,6	90	-0,6	71,5	78,2	6,7
300	91	90,4	-0,6	71,8	78,6	6,8
305	91,5	90,8	-0,7	72,3	78,9	6,6
310	92	91	-1	72,8	79,3	6,5
315	92,6	91,3	-1,3	73,1	79,6	6,5
320	92,9	91,4	-1,5	73,5	80	6,5
325	93,3	91,7	-1,6	73,7	80,3	6,6
330	93,7	92,2	-1,5	74,1	80,6	6,5
335	94,2	92,4	-1,8	74,4	81	6,6
340	94,6	92,7	-1,9	74,8	81,3	6,5

Kıyaslama neticesinde analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında ciddi bir uyum olduğu görülmüştür. Şekil 4.23’ te zamana bağlı maksimum lens sıcaklığı hem deneysel hem de analiz sonucu kıyaslamalı olarak grafik şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.23. CFX Zamana bağlı lens sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

Deneysel sonuç ile analiz sonucunda lens maksimum sıcaklığındaki sapmanın zamana bağlı grafiği de Şekil 4.24 olarak verilmiştir.



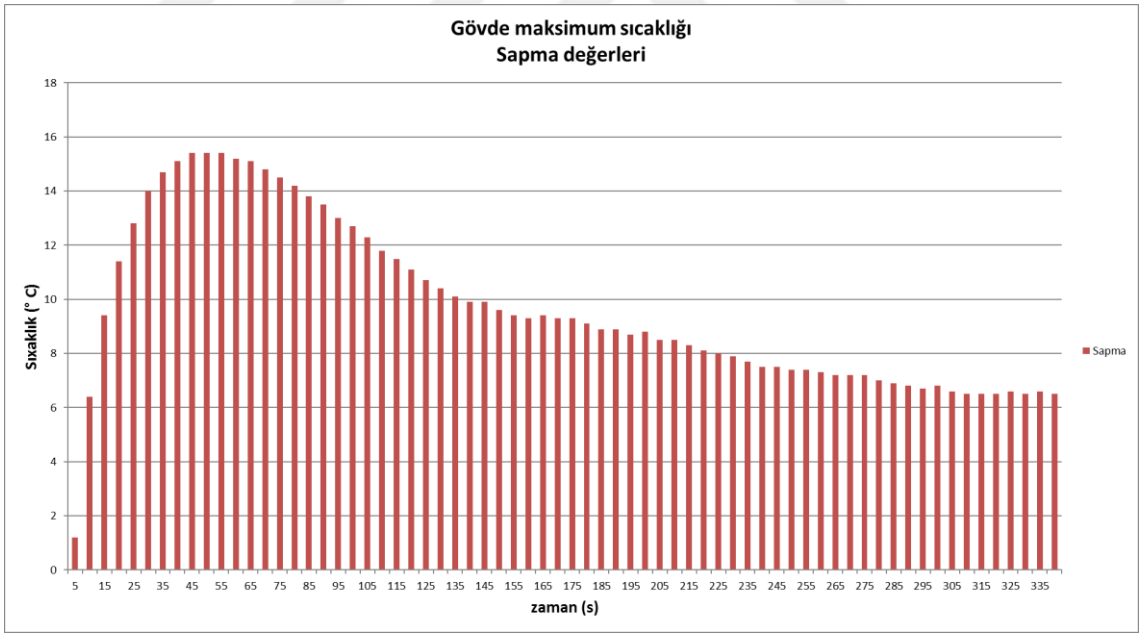
Şekil 4.24. CFX Zamana bağlı lens sıcaklığı deneysel ve analiz sonucu sapma değerleri

Yine benzer olarak Şekil 4.25' te zamana bağlı maksimum gövde sıcaklığı hem deneysel hem de analiz sonucu kıyaslamalı olarak verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi arada belirli bir sapma değeriyle zamana bağlı analiz ve deneysel sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir.



Şekil 4.25. CFX Zamana bağlı gövde sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

Deneysel sonuç ile analiz sonucunda gövde maksimum sıcaklığındaki sapmanın zamana bağlı grafiği de Şekil 4.26 olarak verilmiştir.

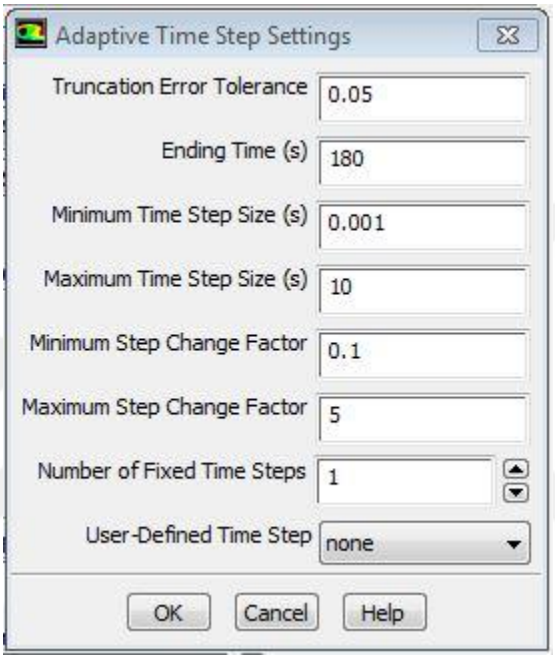


Şekil 4.26. CFX Zamana bağlı gövde sıcaklığı deneysel ve analiz sonucu sapma değerleri

ANSYS CFX yazılımı ile yapılan zamana bağlı çalışmalarda analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Fakat tek bilgisayarda çözüm yapıldığı için çözüm süresi çok uzun sürmüştür.

4.2.2. FLUENT ile Zamana Bağlı Analiz

FLUENT ile yapılan zamana bağlı analizde CFX zamana bağlı analizine benzer olarak değişken zaman adımı seçeneğinin kullanılmasına karar verilmiştir. FLUENT için değişken zaman adımı ara yüzeyi CFX analizindeki deneyimlerle birlikte Şekil 4.27' deki gibi başlangıç değerlerine ayarlanmıştır. Burada başlangıç zaman adımı yine 0,001 s seçilmiştir. Zaman adımı güncellemesi de **transcuation error** tanımıyla yapılmaktadır.



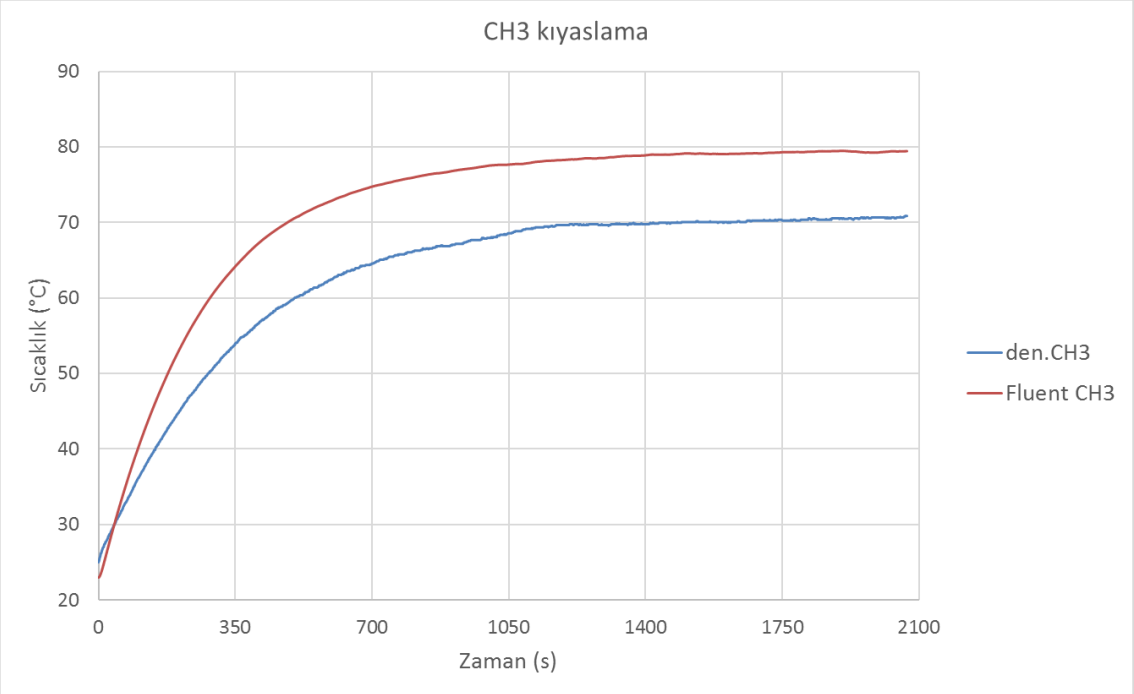
Şekil 4.27. FLUENT değişken zaman adımı ayarları

CFX zamana bağlı analizinde 340 saniyelik gerçek analiz süresinin çözümlenmesi yaklaşık 27 gün sürmüştü. Bu 27 gün süre içerisinde zaman zaman analiz hatalarından dolayı durmalar da dahildir. CFX analizi süresince yaşanan hatalar analiz süresince zaman adımını küçük tutma baskısı yapmıştır. FLUENT ile yapılan analizde daha düzgün hale getirilmiş yeni 1,6 milyon elemanlı mesh yapısı kullanılmıştır. Bu yapının avantajı olarak analiz çözümünde hata yaşamadan zaman adımlarının daha büyük seçilebilir hale gelmiştir. Ayrıca FLUENT analizinde toplamda 32 CPU anlamına gelen 16 CPU özelliğinde 2 adet bilgisayar paralel olarak kullanılmıştır. Bu şartlarla yürütülen FLUENT zamana bağlı analizinde toplam 2070 saniyelik bir analiz çözülmesi yaklaşık **9 gün** sürmüştür.

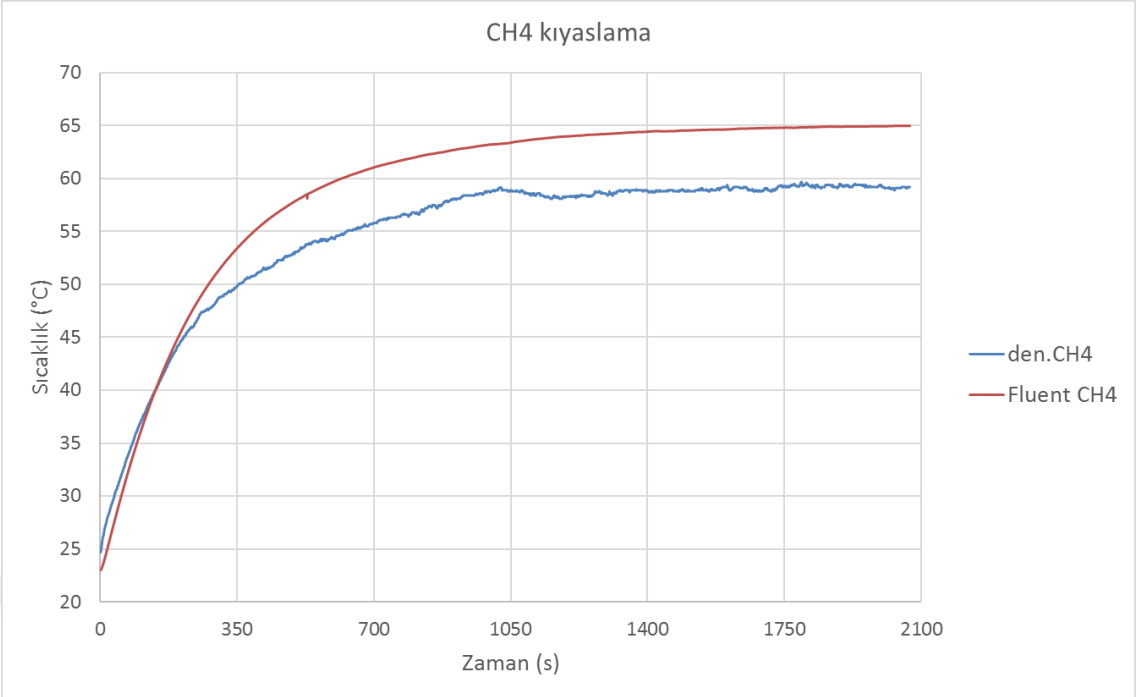
Zamana bağlı analizlerde istenilen sıklıkla belirli zaman dilimleri için analiz sonuç

dosyası yazdırılmakta ve neticede bu yazdırılan sonuç dosyalarının birleştirilmiş hali tüm zamana bağlı sonuçları göstermektedir. CFX ile yapılan zamana bağlı analiz sonucunda her bir zaman adımında sadece lens ve gövdenin maksimum sıcaklıkları kıyaslanmıştır. FLUENT ile yapılan zamana bağlı analizlerde daha detaylı kıyaslama yapılabilmesi için lens ve gövde üzerinde daha önce deneysel ölçümlerde termokupların takıldığı noktalardaki (bkz. Çizelge 4.4) sıcaklık verileri her bir adım için analiz süresince kaydettirilmiştir.

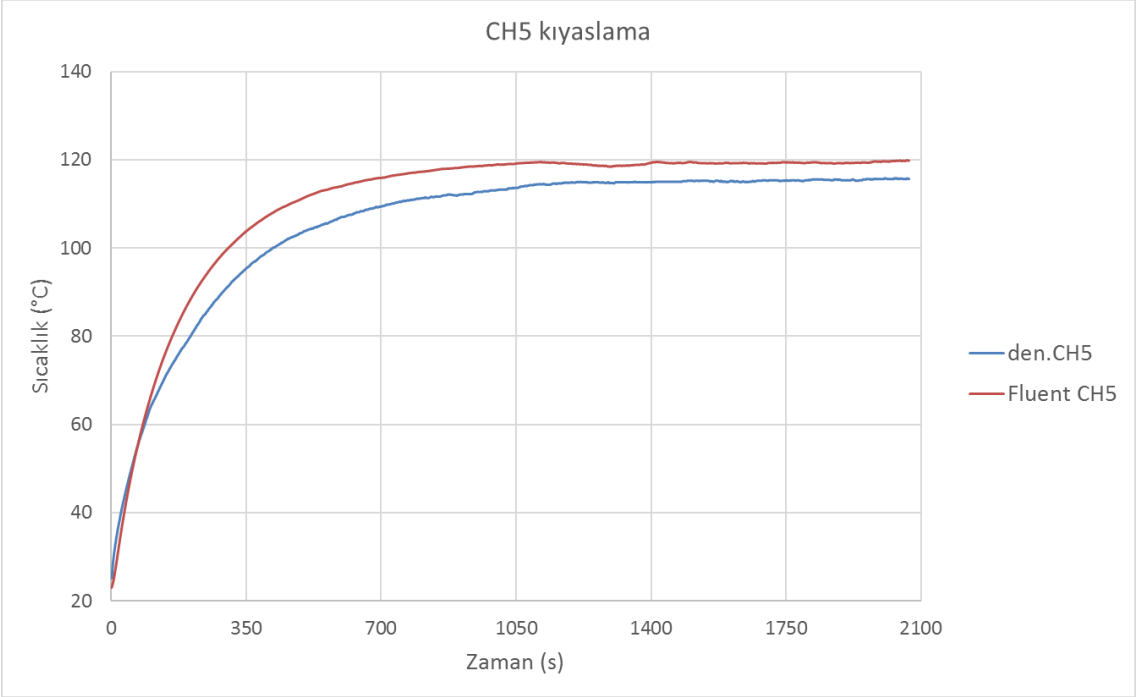
FLUENT zamana bağlı analiz sonuçlarının deneysel sonuçlar ile kıyaslamaları Şekil 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33' te verilmiştir. Bu kıyaslamalar lens üzerinde bulunan CH3, CH4, CH5 ve CH6 ile gövde üzerinde bulunan CH17 ve CH19 ölçüm noktalarına aittir. Grafiklerden görüldüğü üzere zamana bağlı sıcaklık değişimleri deneysel verilerle uyumlu şekilde gerçekleşmekte ve analiz sonucunda elde edilen sapma değerleri zamandan bağımsızda elde edilen (bkz. Çizelge 4.6) sapma değerleriyle benzer şekilde ortaya çıkmıştır.



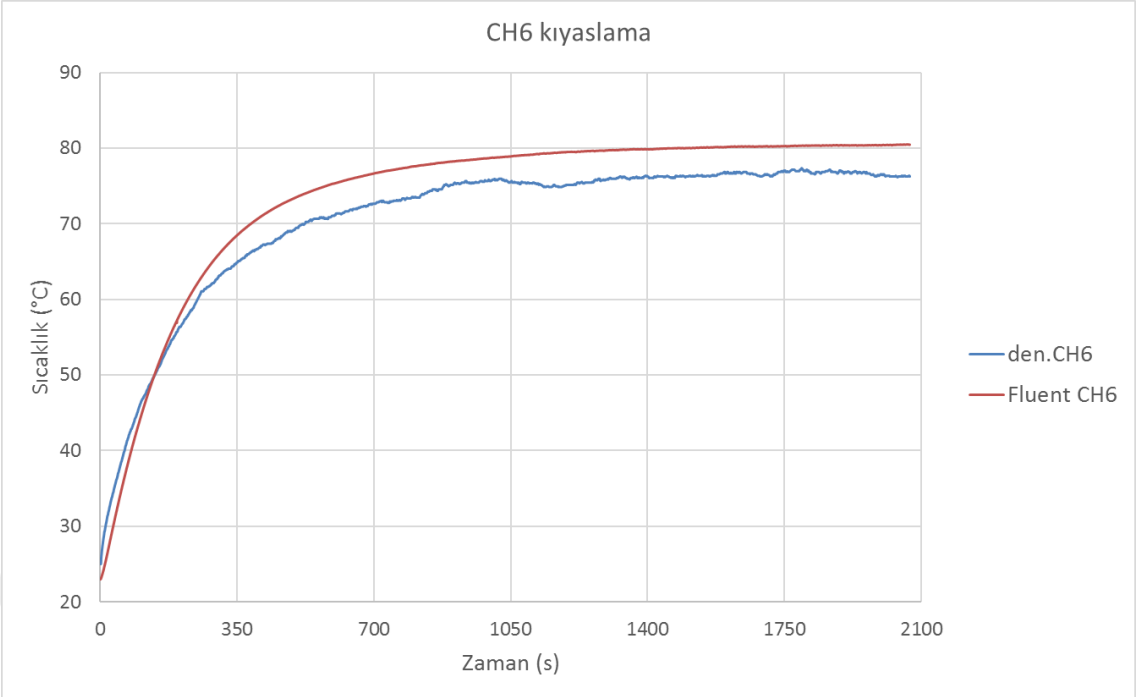
Şekil 4.28. FLUENT zamana bağlı CH3 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



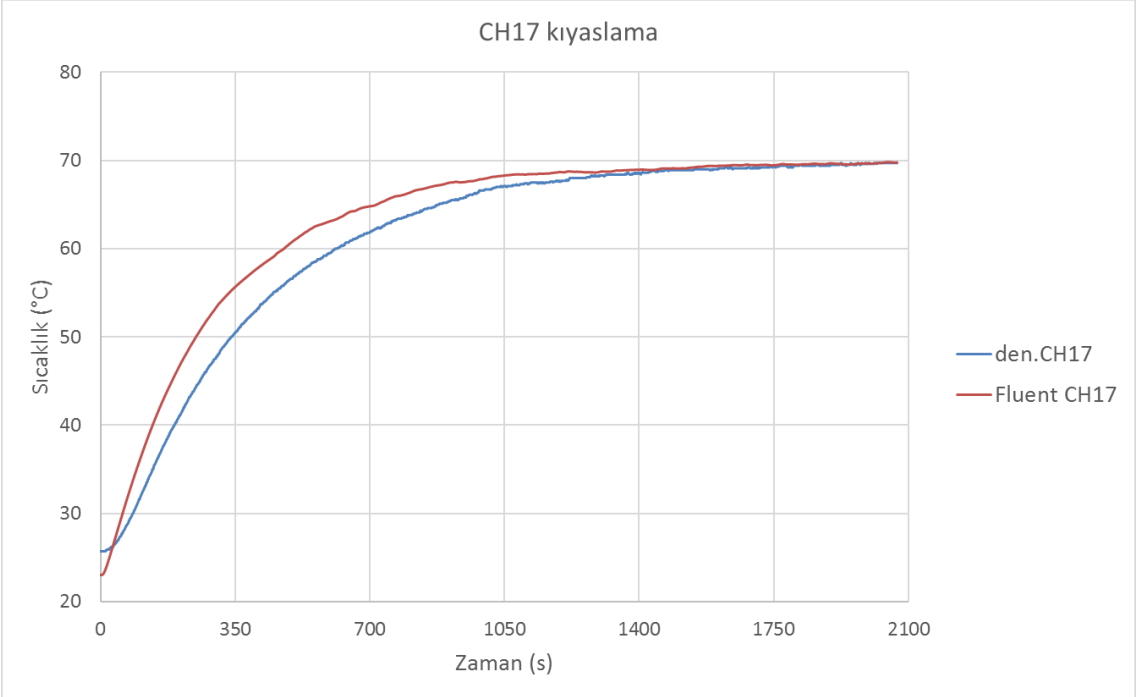
Şekil 4.29. FLUENT zamana bağlı CH4 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



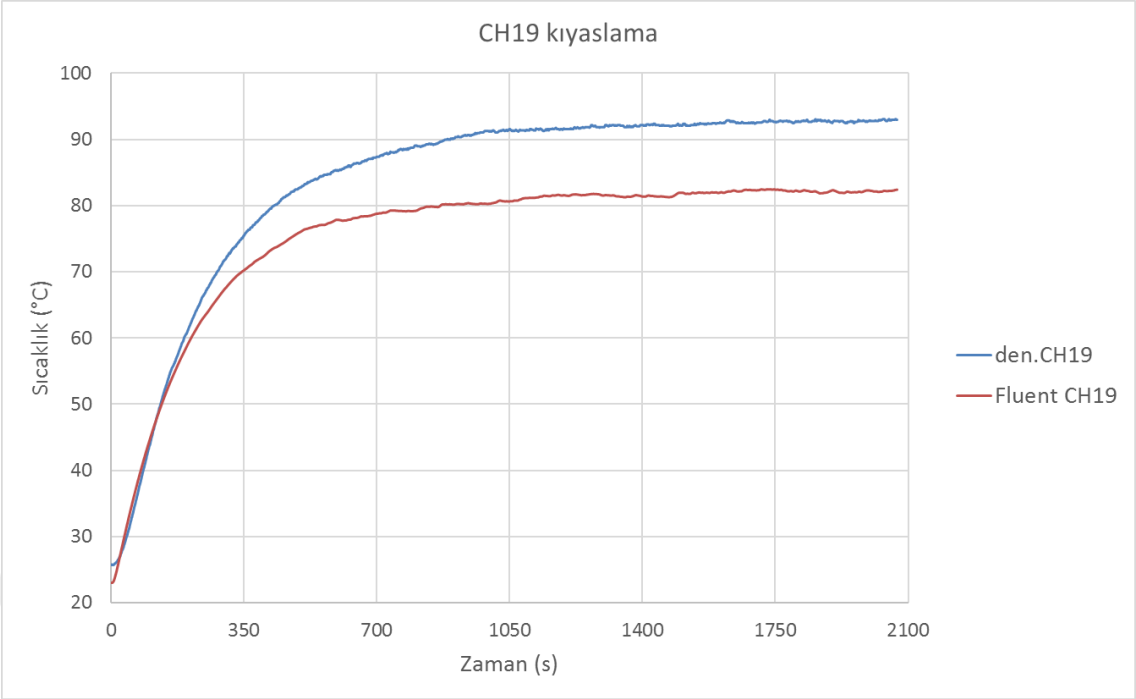
Şekil 4.30. FLUENT zamana bağlı CH5 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



Şekil 4.31. FLUENT zamana bağlı CH6 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

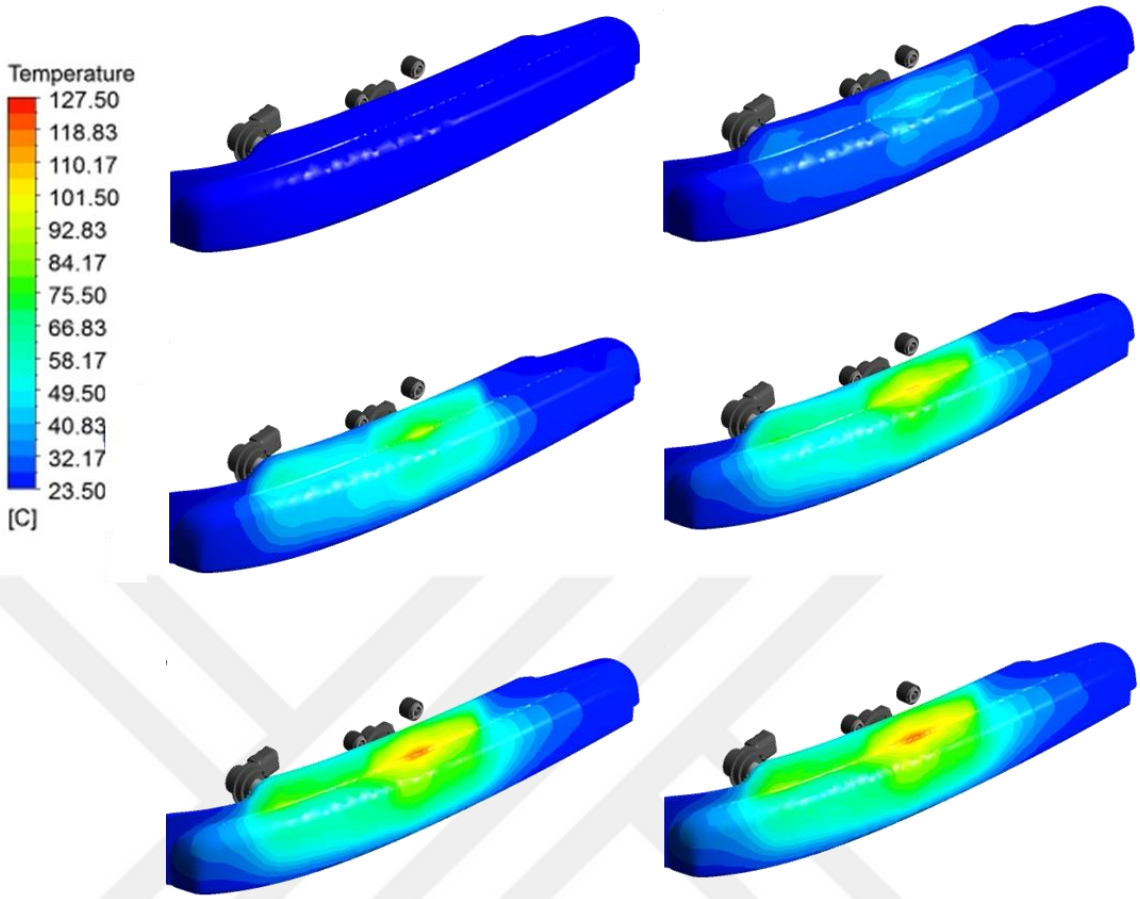


Şekil 4.32. FLUENT zamana bağlı CH17 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

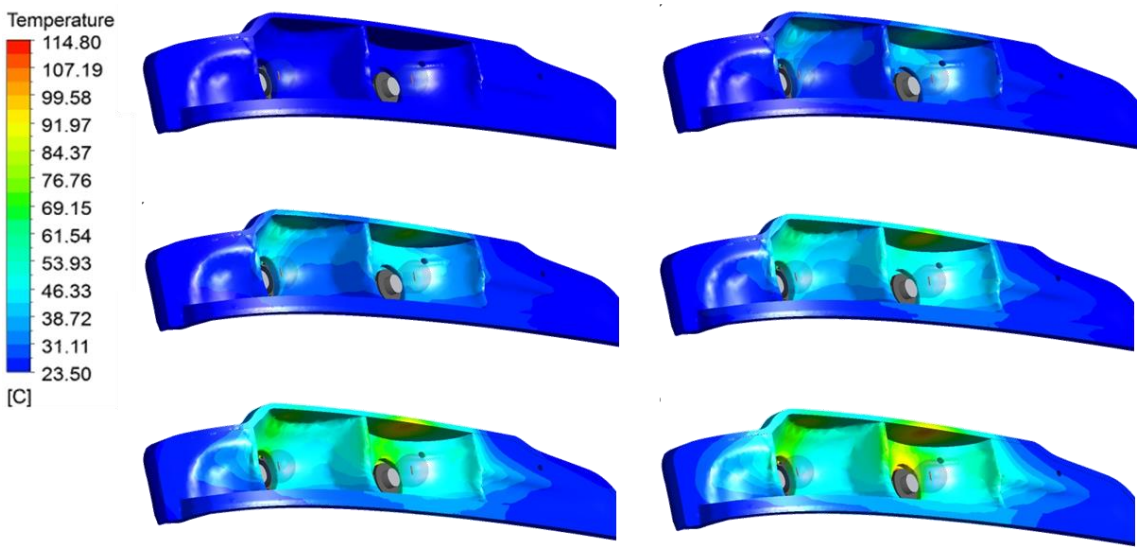


Şekil 4.33. FLUENT zamana bağlı CH19 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

Zamana bağlı analiz neticesinde lens üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılım değişimi Şekil 4.34' te, gövde üzerindeki de Şekil 4.35' te verilmiştir.



Şekil 4.34. FLUENT zamana bağlı lens sıcaklığı değişimi



Şekil 4.35. FLUENT zamana bağlı gövde sıcaklığı değişimi

4.3. Yoğuşma Testi

Her ana sanayi kendi ürünün test şartlarını kendisi belirlemektedir. Bu şartların belirlenmesinde aracın satılacağı coğrafi pazar önemli bir paya sahiptir. Dolayısıyla her ne kadar lambaların maruz kalacağı zorlu dış ortam şartları benzer olsa da farklı ana sanayilerde aynı ortam şartını test etmek için farklı test senaryoları bulunmaktadır.

Yoğuşma testi için de benzer durum söz konusudur. Toyota, Renault, Ford gibi ana sanayilerin farklı şekilde yoğuşma testleri mevcuttur. Her ne kadar test senaryoları farklılık gösterse de genel kaide olarak yoğuşma testinde lambalar ısıtılmakta ve daha sonra ani soğutularak lens yüzeyinde yoğuşma oluşturulmaktadır. Daha sonra tekrar ampuller açılarak yoğuşmanın gitmesi gözlenmektedir. Bu proje kapsamında Toyota firmasının yoğuşma test senaryosu analizlerde kullanılacaktır. Bu test senaryosunun adımları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

1. Lambanın bütün havalandırma ve ampul kapakları açık vaziyette iklimlendirme fırınına atılır.
2. Lamba ilk olarak 2 saat boyunca 80 °C sıcaklıkta %10 bağıl nemli havada bekletilir.
3. Daha sonra oda sıcaklığında %45-75 bağıl nemde 1 saat bekletilir.
4. Sonraki aşama olarak 38 °C ortam sıcaklığında ve %70 bağıl nemde 1,5 saat tutularak nemli havanın lamba içerisine dolması sağlanır.
5. Ön şartlandırmalar sonrası iklimlendirme fırınından alınan lambanın hemen bütün kapakları kapatılarak ortam sıcaklığında 20 dakika boyunca ampuller senaryolu yakılarak lambanın ısınması sağlanır.
6. 20 dakika ampullerin yanmasından hemen sonra üzerine 3 dakika boyunca 10 ±2 °C sıcaklıkta ø 19 mm borudan 100±20 kPa basınçta çıkan soğuk su tutulmaktadır. Bu aşamada lamba lensinin iç yüzeyinde yoğuşma olması sağlanmaktadır. Bu su tutma süresince ampuller kapalı konumdadır.
7. 3 dakika soğuk suya maruz kalması ile yoğuşma oluşumundan sonra oda sıcaklığında ampuller 10 dakika boyunca senaryolu şekilde yakılarak yoğuşmanın lamba içerisinden gitmesi gözlenir.

8. Eğer 10 dakika ampuller açık iken yoğuma tamamen gitmediyse ampuller kapatılır ve bu şekilde yoğuşmanın gitmesi gözlenir. Ampuller kapatıldıktan 2 saat sonra hala yoğuşma gitmediyse ürün testi geçememiştir.

Atego DRL lambası üzerinde Toyota yoğuşma testi aşağıdaki amaçlara istinaden 3 kere yapılmıştır.

1. Yoğuşma testi boyunca sıcaklık ölçümünün yapılması
2. Yoğuşma testi boyunca video kaydının yapılması
3. Yoğuşma testi boyunca bağıl nem ölçümünün yapılması

Yoğuşma testi deney düzeneğinde bulunan ekipmanlar aşağıdaki gibidir.

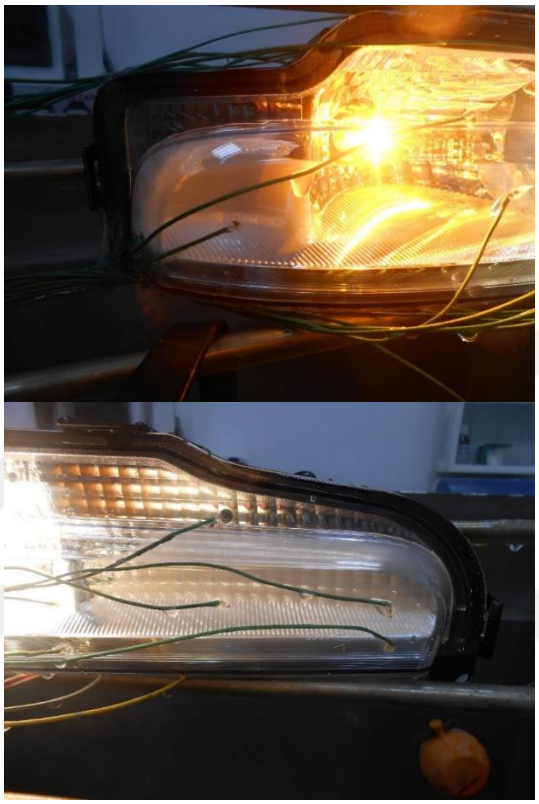
- Deneyde kullanılacak lamba
- Harici güç kaynağı
- K tipi Cr-Ni termokupl
- Veri kayıt cihazı (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger)
- HT15-22/2 tipi nem probu
- HD video kayıt cihazı (Ticari ismi: Kodak)
- Nem kabini
- Soğuk su akış hortumu ve ilgili soğutma sistemi

Deney esnasında lamba araç pozisyonunda konumlandırılmış olup ortamda test senaryosuna uygun sıcaklıkta durgun hava bulunmaktadır. Ampullerin açık olduğu aşamalarda harici güç kaynağı tarafından DRL ampulü için sabit ve sinyal ampulü için flaşörlü 13,5V gerilimle enerji verilerek ampuller yakılmaktadır.

Birinci yoğuşma testi yapılırken sıcaklık ölçümü için lamba üzerine 19 adet K tipi Cr-Ni termokupl takılmıştır (bkz. Çizelge 4.4, Şekil 4.15). Ölçümler veri kayıt cihazıyla (Ticari ismi: Graphtec GL820 logger) 1 saniye periyotlar halinde kaydedilmiş olup test boyunca kayıt devam etmiştir. Sıcaklık ölçümü için veri kayıt cihazının hata oranı ±% 0,05 olup zaman adımlı ölçümlerde termokupl cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde (bkz. **EK-4**) göz ardı edilmiştir.

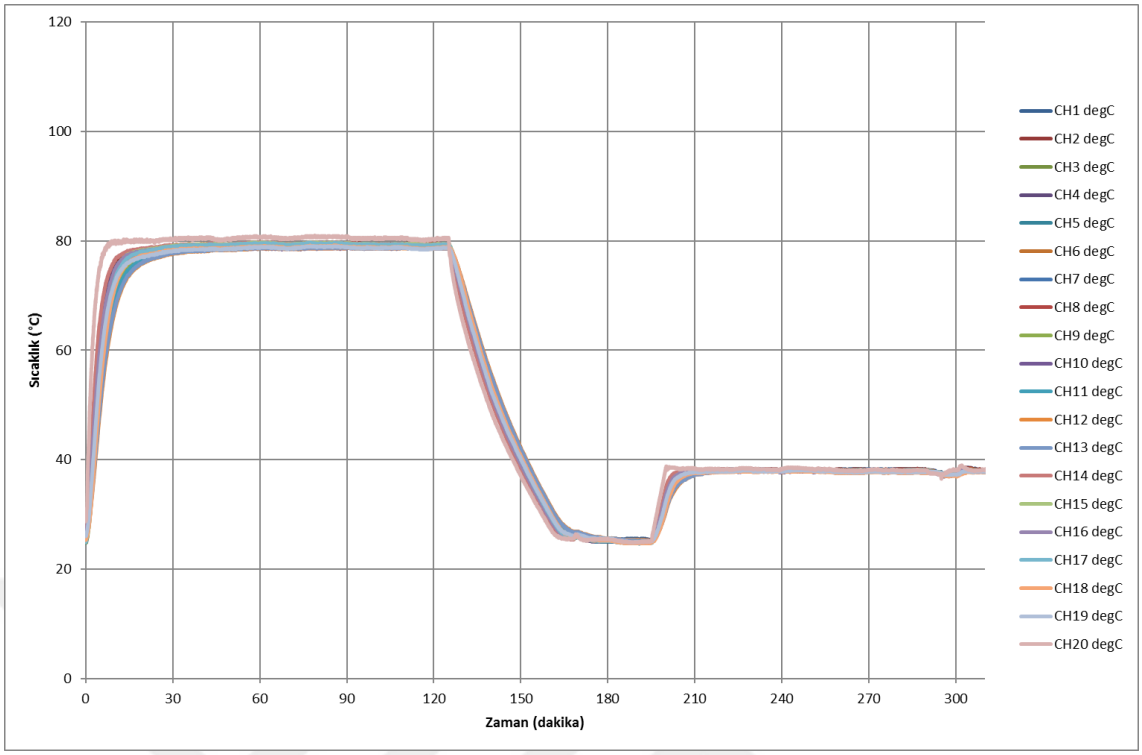
3 dakika soğuk su ile ani soğutma neticesinde Şekil 4.36’ da görüldüğü gibi lens üzerinde yoğuşma meydana gelmiştir. Testin devamında 10 dakika ampuller açık vaziyetteyken

lens üzerindeki yoğuşma ciddi oranda azalmış ve soğuk bölgelere kümelenmiştir. Daha sonra ampuller kapatıldıktan yaklaşık 15 dakika sonrasında yoğuşma tamamen gitmiştir. Takip eden süreçte yapılacak olan yoğuşma analizleri 10 dakika ampullerin açık olduğu aşamaya kadarki zamanı kapsayacaktır.

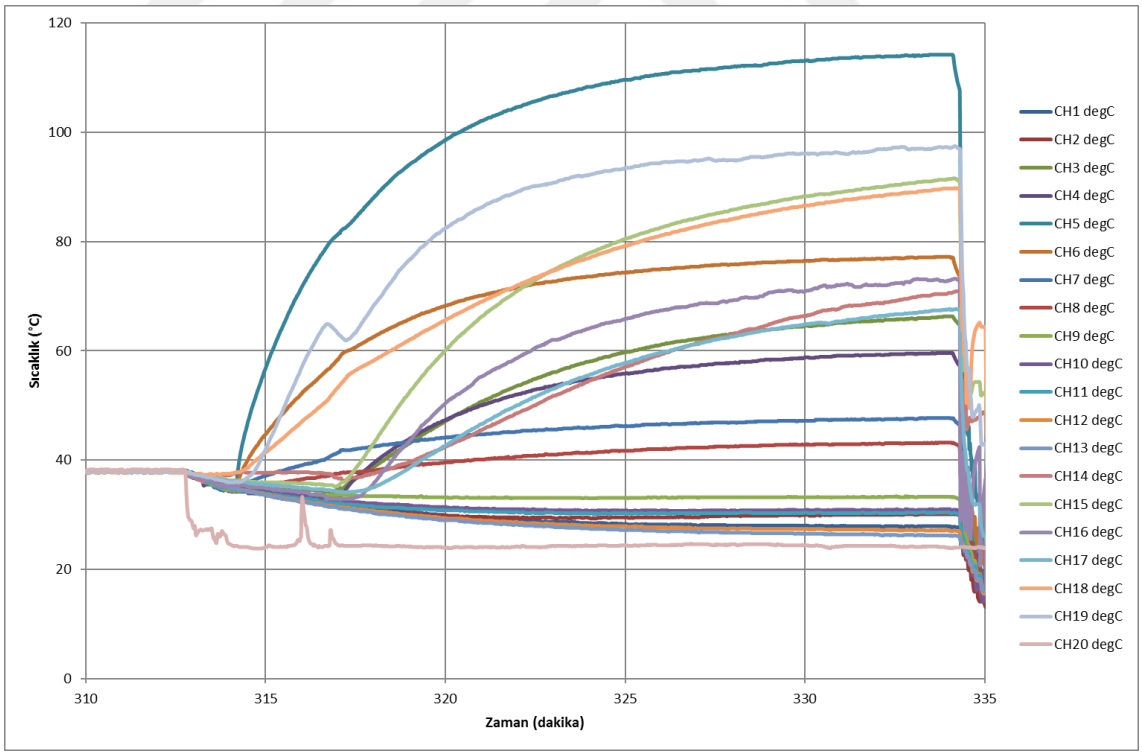


Şekil 4.36. Atego DRL lambası test esnasında lens üzerinde oluşan yoğuşma

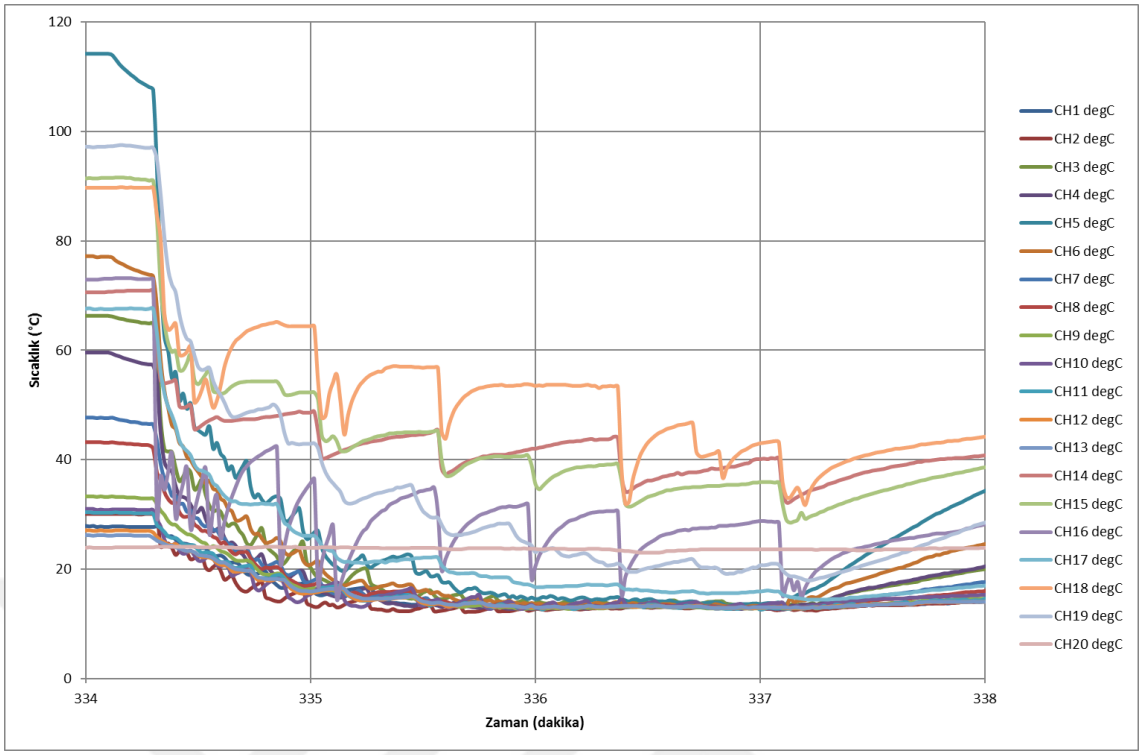
Şekil 4.37’ de ön şartlandırma aşamasındaki sıcaklık ölçümü mevcuttur. Şekil 4.38’ de 20 dakika boyunca ampullerin yakılması aşamasındaki sıcaklık ölçümü mevcuttur. Şekil 4.39’ da 3 dakika soğuk su ile ani soğutma aşamasındaki sıcaklık ölçümü mevcuttur. Şekil 4.40’ ta da son aşama 10 dakika boyunca ampullerin yakılması ve sonraki ampullerin kapalı olarak beklemesi aşamasındaki sıcaklık ölçümü mevcuttur.



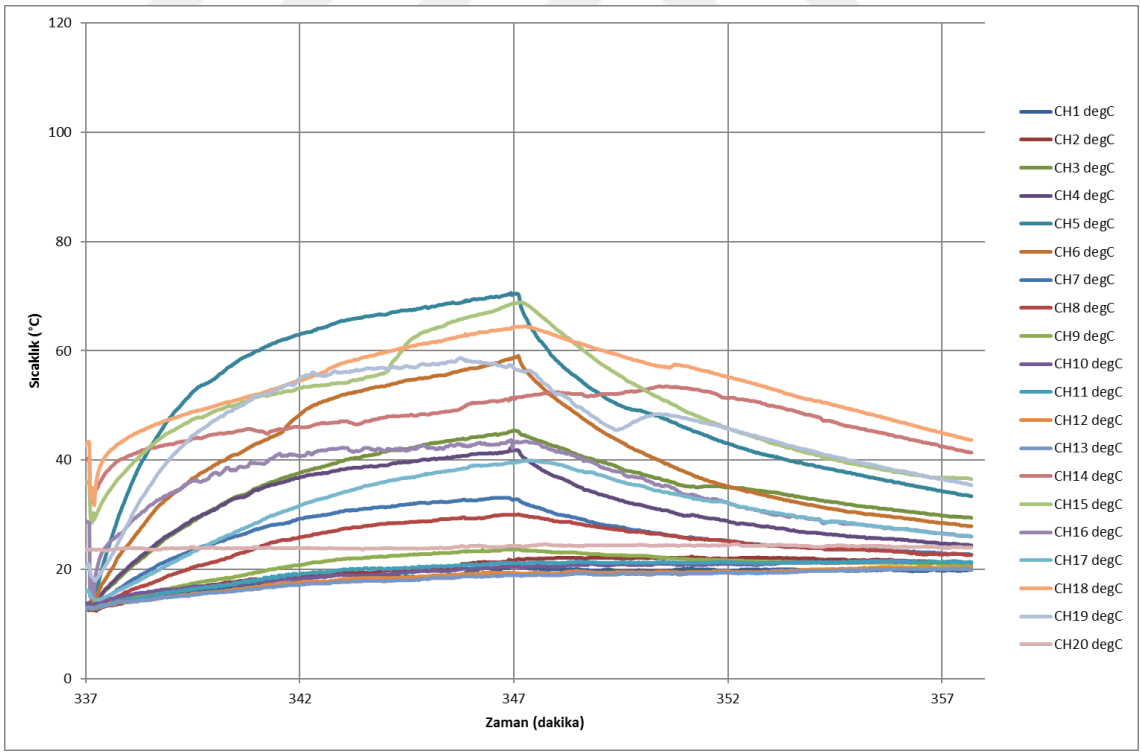
Şekil 4.37. Atego DRL lambası yoğuşma testi ön şartlandırma sıcaklık ölçümleri



Şekil 4.38. Atego DRL lambası yoğuşma testi 20 dakika ampuller açık sıcaklık ölçümleri

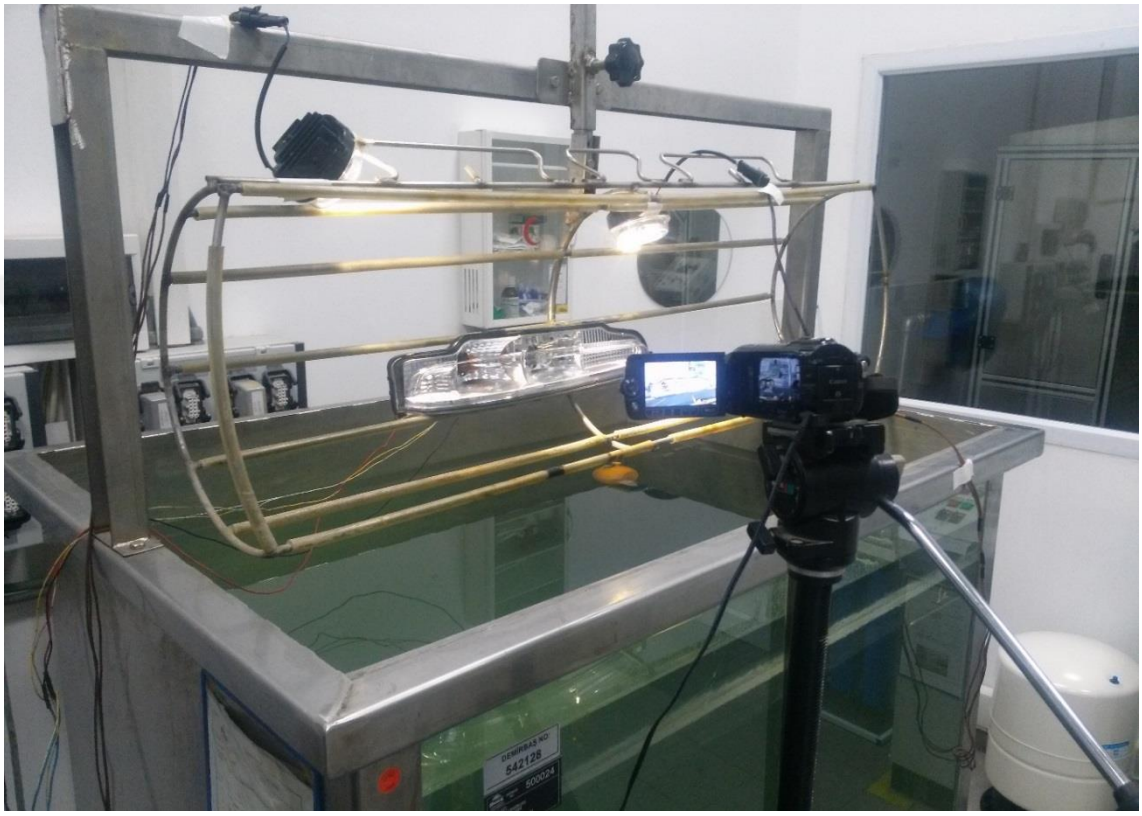


Şekil 4.39. Atego DRL lambası yoğuşma testi 3 dakika ani soğutma sıcaklık ölçümleri



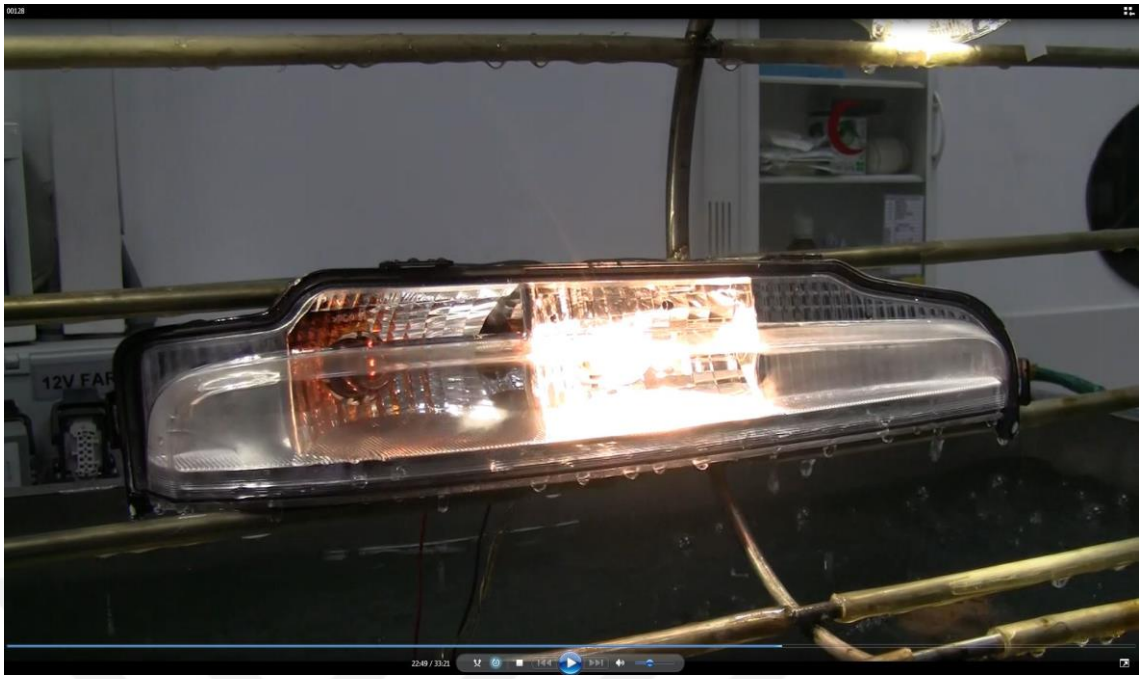
Şekil 4.40. Atego DRL lambası yoğuşma testi 10 dakika ampuller açık ve sonrası sıcaklık ölçümleri

İkinci yoğuşma testinde ise sabit açıdan video kaydı yapılarak test tekrar edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilecek olan yoğuşma miktarındaki zamana bağlı değişimin daha iyi kıyaslanabilmesi ikinci test yapılmıştır. İkinci test düzeneğinde (Şekil 4.41) HD video kayıt cihazı (Ticari ismi: Kodak) ve oluşan yoğuşmayı daha iyi görülebilir hale getirmek için yardımcı aydınlatma sistemleri kullanılmıştır.



Şekil 4.41. Yoğuşma test düzeneği

Deneysel sonuç olarak 3 dakika ani soğutma neticesinde elde edilen yoğuşma görüntüsü Şekil 4.42’ de verilmiştir.



Şekil 4.42. Yoğuşma testi – 3 dakika ani soğuma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü

Deneysel sonuç olarak 3 dakika ani soğutma neticesinde elde edilen yoğuşma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma neticesinde meydana gelen yoğuşma görüntüsü Şekil 4.43' te verilmiştir.



Şekil 4.43. Yoğuşma testi – 10 dakika ısıtma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü

Üçüncü yoğuşma testinde ise bağıl nem ölçülerek test tekrar edilmiştir. Bağıl nem ölçümü

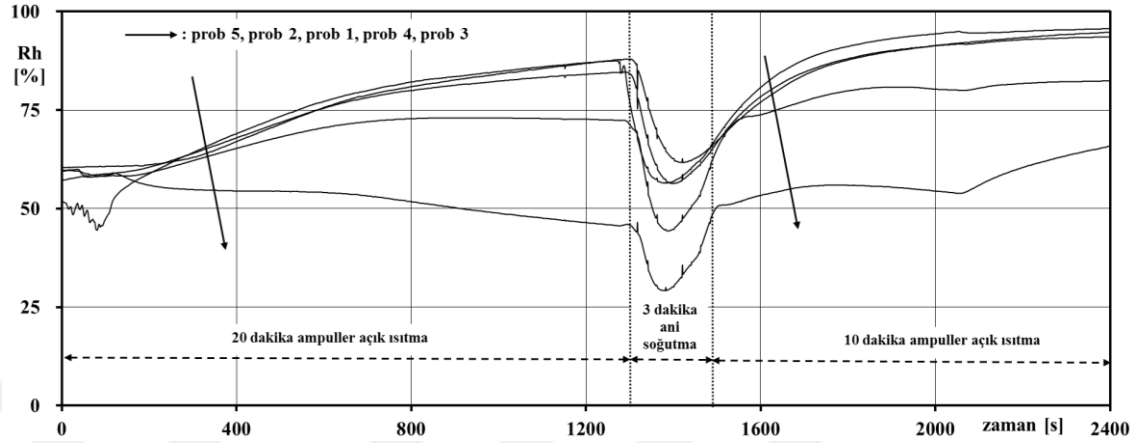
için HT15-22/2 tipi nem probu kullanılırken verilerin kaydı yine Graphtech GL 820 ölçüm ve kayıt cihazı tarafından 1 saniye periyotlar halinde kaydedilmiş olup test boyunca kayıt devam etmiştir. Bağıl nem ölçümü için veri kayıt cihazının hata oranı ±% 2 olup zaman adımlı ölçümlerde nem probu cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde (bkz. **EK-4**) göz ardı edilmiştir.

Nem probu bağıl nem ölçmekte olup yapısı gereği uç kısmında esnek olmayan plastik bir gövdesi bulunmaktadır ve en uç kısmı ise 6 mm çapındadır. Probun geometrisi de göz önünde bulundurularak nem ölçümü yapılacak olan noktalar olarak lambanın alt duvarının biraz üst kısmı olarak belirlenmiştir (Şekil 4.44). Lamba üzerine toplam 5 adet prob takılmış olup bunlar sağ taraftaki pasif bölgeden başlayarak sol tarafa doğru sıralanmıştır (Şekil 4.44). Probların uç kısımları lambanın içerisine girmesi için gövde alt duvarında delik açılmıştır ve test esnasında herhangi bir hava kaçışını engellenmesi amacıyla o bölgeler macunla sızdırmaz hale getirilmiştir.



Şekil 4.44. Atego DRL lambası - nem ölçüm probu takılmış hali

Test boyunca 1 saniye adımlarla bağıl nem ölçümü yapılmış olup 20 dakika ampuller açık, 3 dakika ampuller kapalı ani soğutma ve 10 dakika ampuller tekrar açık olan zaman dilimi için elde edilen bağıl nem değerleri Şekil 4.45 olarak grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 4.45. Yoğuşma testi boyunca bağıl nem ölçüm değerleri

%70 nem ve 38 °C sıcaklıkta ön şartlandırılmış olan lamba içerisinde ampullerin yanmasıyla birlikte özellikle pasif bölgelerdeki (prob 1, 2 ve 5) bağıl nem değerlerinde artış gözlenmektedir. Normal şartlarda sabit nem miktarı olan bir havanın sıcaklığının artırılması maksimum nem tutma kapasitesi artırması sebebiyle bağıl nemin düşmesi anlamına gelmektedir fakat lamba içerisinde ciddi derecede hava hareketinin olması ölçüm noktalarındaki bağıl nem değerlerindeki değişimin bu yorum ile değerlendirilemeyeceğini göstermektedir (bkz. Şekil 4.12 ve 4.19). Şekil 4.12 ve 4.19' dan görüldüğü üzere ampuller tarafından ısınan hava önce ampul etrafından yükselerek üst duvara çarpmakta, daha sonra duvarın da yönlendirmesiyle bir kısmı ön taraftaki lens yüzeyini süpürerek aşağı doğru giderken bir kısmı da pasif bölgelere doğru hareketlenmektedir. Pasif bölgelere ulaşan kısmen sıcak hava soğuyarak pasif bölgenin alt bölgesinden geri dönerek akışını tamamlamaktadır. Bu açıdan bakılırsa, ısınan hava içerisine daha fazla nem almaktadır ve pasif bölgeye ulaşan kısmen sıcak olan hava orada soğumakta ve dolayısıyla içerisinde tutabileceği maksimum toplam nem miktarı (doyma durumu) azalmaktadır. Bağıl nemin hava içerisindeki nem ile o sıcaklıkta tutabileceği maksimum nem arasındaki oran olduğu bilindiğinden dolayı pasif bölge ölçülen bağıl nem değerlerinin (prob 1, 2 ve 5) ampuller açık iken artmasının sebebi olarak kısmen sıcak olan nemli havanın pasif bölgede soğuması gösterilebilir. Prob 3 DRL ampulünün karşısında olup Prob 4 ise sinyal ampulünün karşısındadır. Prob 4' teki bağıl nem pasif

bölgelerdekilere (prob 1, 2 ve 5) benzer olarak belirli bir süre artış göstermektedir. Bu artış yine aynı şekilde sıcak havanın soğuması olarak gösterilebilir. Fakat özellikle yaklaşık 800 saniye sonrasında Prob 4' teki bağıl nem artışı durmuş, kısmen de azalışa geçmiştir. Bu aşamadan sonra ise sinyal ampulünün etkisiyle Prob 4 ölçüm noktasındaki sıcaklığın artışının bağıl nem değerini düşüşe geçirecek seviyede olduğu görülmektedir. DRL ampulü karşısındaki Prob 3' teki bağıl nem değeri genel anlamda hep düşüş eğilimi göstermiştir. DRL ampulünün sinyal ampulüne kıyasla yüksek enerjili olması ve bununla alakalı olarak Prob 3' teki sıcaklık değerinin bağıl nem oranını düşürecek seviyede artış içinde olduğu görülmektedir.

3 dakika ani soğutma esnasında ölçülen bağıl nem değerleri iki farklı eğilim göstermişlerdir. İlk aşama olarak lambanın sıcak lensi üzerine soğuk su ile ani soğumanın başlaması ve bu bağlamda lens yüzeyinde yoğuşmanın gerçekleşmesi sürecidir. Ani soğuma başlangıcı lens yüzeyinden olduğu için soğuma işleminin başlangıcında lens yüzeyi ile iç hava arasında sıcaklık farkı artmakta olup süreç ilerledikçe havanın sıcaklığı da lensinkine doğru düşüş göstererek aradaki fark azalmaktadır. İlk adımda ani soğuma ile lens üzerinde yüksek bir hızla yoğuşma meydana gelmektedir. Bu aşamada hemen yanındaki sıcak havanın bağıl neminde ciddi bir düşüş olmaktadır. Zamanla havanın sıcaklığı da düştükçe tutabileceği maksimum toplam nem miktarı da düşmekte ve bağıl neminde tekrar bir artış olmaktadır. 3 dakika ani soğumanın başlangıcında yoğuşma hızlı bir şekilde olurken sonlara doğru yoğuşma miktarının artışında azalma olmaktadır. Bu aşama da iç havanın sıcaklığının düştüğü durumla eş zamanlıdır.

3 dakika ani soğutma sonrasında 3. aşama 10 dakika ampuller açık ısıtma da ise bağıl nem değerlerindeki değişim 1. aşama 20 dakika ampuller açık ısıtmadan biraz farklı olmaktadır. 1. aşamaya benzer olarak Pasif bölgelerde (prob 1, 2 ve 5) yine nem oranı artmaktadır fakat artış miktarı 1. aşamaya göre daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi ise probların hemen yanındaki lens yüzeyinde yoğuşma vardır ve bu yoğuşma sıcaklıkla birlikte buharlaşarak havaya karışmaktadır. Dolayısıyla iç havanın nem oranını artırmaktadır. Ampul karşısındaki prob 3 ve prob 4 için ise nem oranındaki değişim 1. aşamaya göre tamamen farklıdır. 1. aşamada sıcaklığın artmasıyla nem oranı düşmekteyken 3. aşamada sıcaklığın artmasıyla lens üzerindeki yoğuşma buharlaşmakta dolayısıyla iç havanın o bölgedeki nem oranında artış olmaktadır.

4.4. Yoğuşma Analizi

Tez araştırması kapsamında yoğuşma testi olarak dikkate alınan Toyota test prosedürü gerçek anlamda uzun süre gerektirmesine rağmen bu uzun sürenin büyük bir kısmı lambanın ön şartlandırmada tutulmasıyla geçmektedir. Test esnasında gerçek anlamda yoğuşma oluşumu için yapılan prosedür ön şartlandırılmış lambanın;

1. 20 dakika ampuller açık ısıtma
2. 3 dakika soğuk su ile lambanın ani soğutulması, yoğuşma oluşumu
3. 10 dakika ampuller tekrar açık yoğuşmanın gitmesi

şeklindedir. CFD analizinde ön şartlandırılmış lambanın özellikleri başlangıç şartları olarak verildiği düşünüldüğünde yoğuşma analizi kapsamında testin asıl ibaret olduğu bu 3 aşamanın simülasyonunun yapılması öngörülmüştür. Diğer bir yönden test aşamasında lambanın 20 dakika ön ısıtılması aşamasında gerek analiz sonuçlarında gerekse deneysel sonuçlarda lambanın neredeyse termal dengeye ulaştığı görülmüştür (bkz. Şekil 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33). Bu sebeple analiz prosedüründe hız kazanma adına bu aşamanın zamandan bağımsız analiz olarak yapılmasına karar verilmiştir.

Test esnasında yoğuşmanın gerçekleştiği prosedür olan 3 dakika soğuk su ile lambanın ani soğutulma işlemi zamana bağlı yoğuşma analizinde dikkate alınabilmesi için Görür (2013) farklı yöntemler belirtmiştir. Bunlar,

1. Su spreylemenin analiz ortamında modellenmesi
2. Dış yüzeyde su akışına benzeyen ince bir film tabaka modelleyerek bunun giriş çıkış gibi sınır şartının verilmesi
3. Su ile ani soğutma neticesindeki soğuma eğrilerini verecek olan temsili bir taşınım katsayısının sınır şartı olarak verilmesi

şeklindedir. Görür (2013) su spreylemenin veya ince film halinde su akışının modellenmesini gerek analiz zamanı, gerek ihtiyaç duyulan mesh yapısı gerekse girilmesi gereken bazı parametrelerin deneysel ortam ile bulunması zorunluluğundan dolayı önermemiştir. Bu sebeple tez çalışması kapsamında su ile soğutmanın simülasyonda dikkate alınabilmesi için ilk aşama olarak temsili bir taşınım katsayısının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu bağlamda 3 dakika boyunca lambanın ani soğutulmasını temsil eden

taşınım katsayısının deneysel sıcaklık verileriyle analiz sonuçlarının kıyaslanması şeklinde farklı denemeler sonrasında lens için 250 W/m²K ve gövde için 150 W/m²K olarak kullanıldığında elde edilen yakınsamanın kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

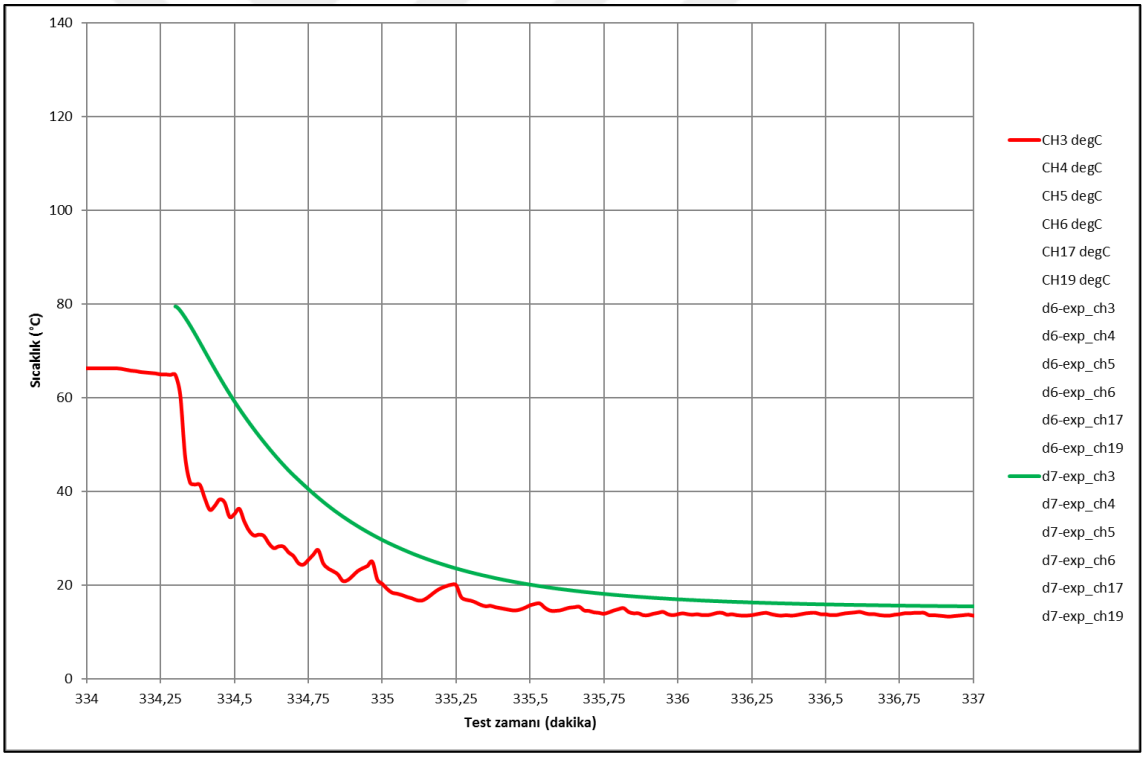
Hem FLUENT hem de CFX ile yapılan zamandan bağımsız veya zamana bağlı analizlerde lamba çevresindeki dış hava da modellenmiştir. Fakat lens ve gövde dış yüzeyine temsili bir h taşınım katsayısının sınır şartı olarak verilebilmesi için analizde dış havanın modellenmemesi gerekmektedir. Şu ana kadarki geliştirilen ve analizlerde kullanılan radyasyon modellemesinin çalışması için de dış havanın modellenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde radyasyon hesaplamalarında kullanılan ve program arayüzeyine girilen girdilerin tekrar ayarlanması gerekecektir. Bu sebepten dolayı soğutma analizlerinin temsili bir h taşınım katsayısı ile yapılması aşağıdaki aşamalara sahip olacak şekilde kurgulanmıştır.

1. Dış havanın modellenmiş olduğu yapı zamandan bağımsız analiz edilerek lamba üzeri sıcaklık dağılımları elde edilmektedir.
2. h taşınım katsayısının sınır şartı olarak girilebilmesi için dış hava modellenmemiş analize ilk olarak 1. Maddenin sonucunda elde edilmiş sıcaklık dağılımları profil olarak okutulmaktadır. Daha sonra birkaç adım analiz çözdürülerek bu profillerin analiz başlangıç şartı olması sağlanmaktadır.
3. Daha sonra ise tespit edilen h taşınım katsayısı havasız dış yüzeylere sınır şartı olarak verilip soğutma analizi gerçekleştirilmektedir.
4. Soğutma sonrasında elde edilen yoğuşma miktarı ve sıcaklık dağılımı tekrar dış havanın modellendiği mesh yapısına profil olarak okutularak termal radyasyon modellemesi açık şekilde ampuller yakılarak analiz yapılmaktadır.

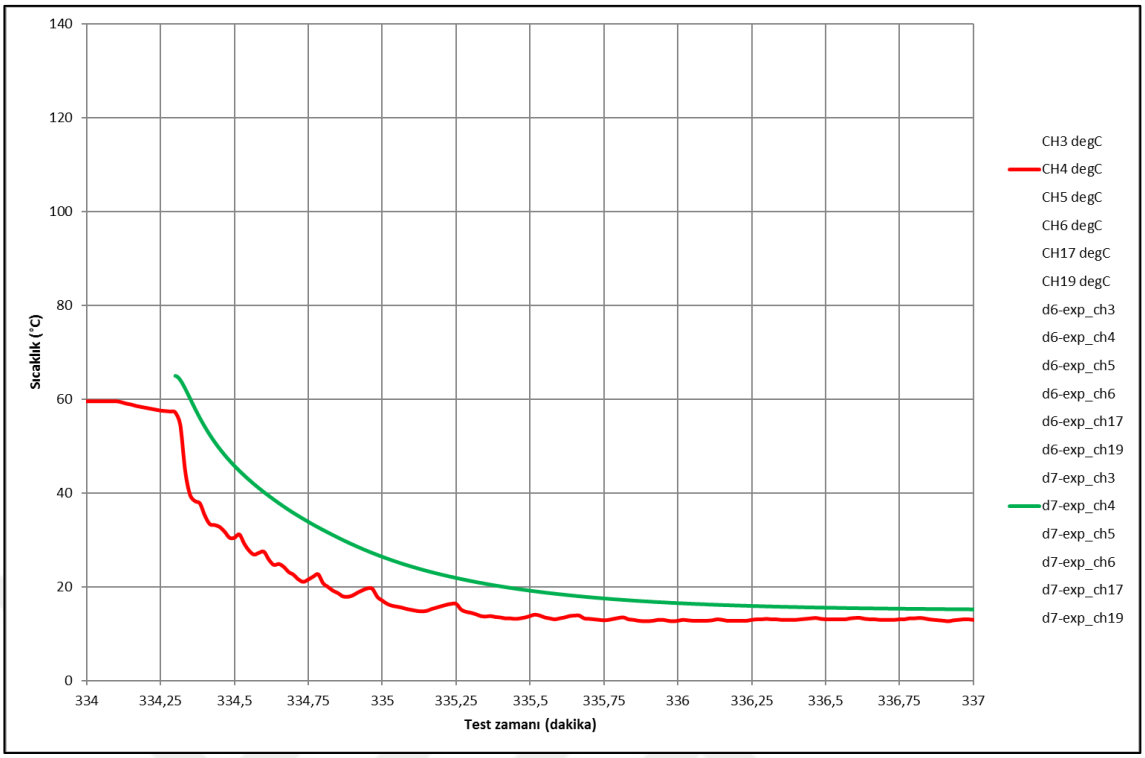
Bu prosedür ile yapılan analizlerde 3. aşamada yoğuşma oluşmuş fakat 4. aşamada yapılan tekrar ampullerin açık olduğu analizde lens sıcaklığında artış olması beklenirken tam tersi olarak fiziki kurallara uygun olmayacak şekilde sıcaklığın düştüğü görülmüştür. Araştırmalar neticesinde bu hatanın sebebi olarak dış havanın modellendiği ve modellenmediği farklı mesh yapılı analiz dosyaları arasında bilgi transferinde oluşan problemlerin olduğu tespit edilmiştir.

Dolayısıyla ani soğutma işlemi için temsili h taşınım katsayısının girebilmesi adına dış havanın mesh yapısında modellenmemesi problemin kök sebebi olduğu için bu yöntemden vazgeçilmiştir. Bunun yerine dış hava mesh yapısında bulunacak fakat fiziki özellikleri temsili olarak değiştirilerek test ortamındaki ani soğutma şartlarının yakalanması için çalışma yapılmasına karar verilmiştir.

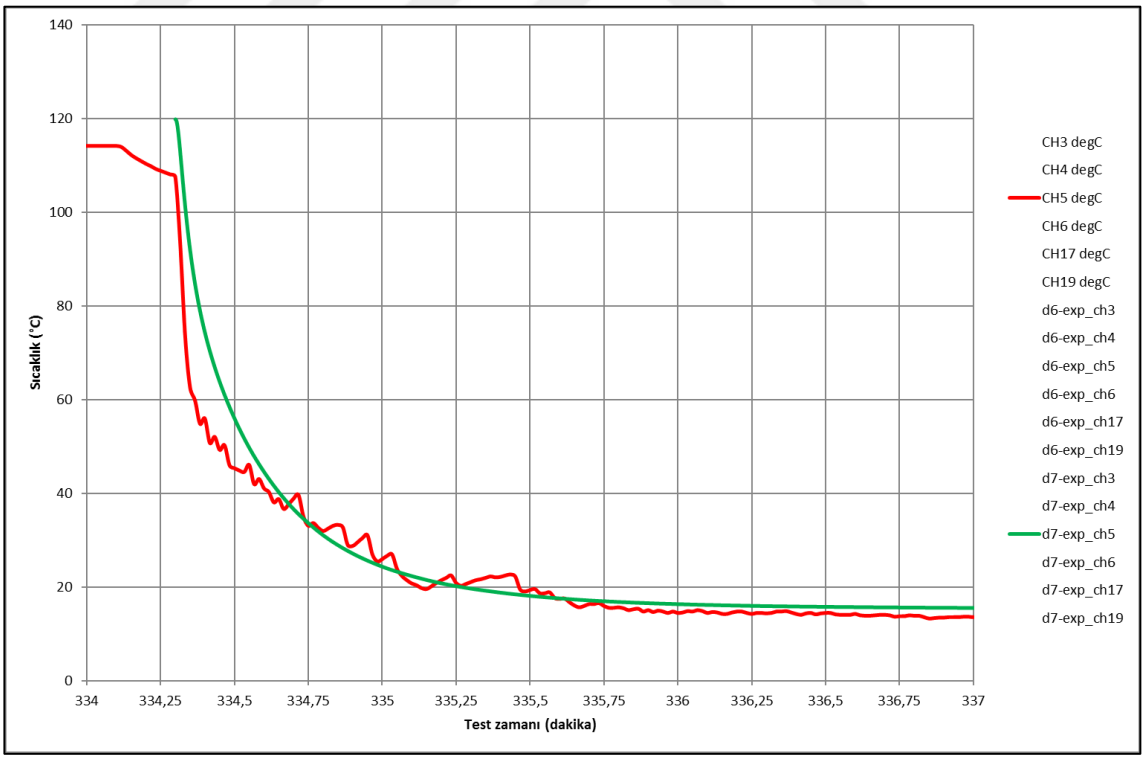
Bu benzeşim için yapılan farklı denemelerden sonra dış havanın 3 dakika ani soğuma sürecinde 15 °C alüminyum katı olarak kullanılmasıyla test ortamında elde edilen soğuma eğrilerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Dış havanın 3 dakika ani soğuma sürecinde 15 °C alüminyum katı olarak kullanılmasıyla elde edilen soğuma eğrilerinin deneysel verilerle kıyaslanması Şekil 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50 ve 4.51' de verilmiştir. Bu kıyaslamalar sırasıyla lens üzerinde bulunan CH3, CH4, CH5 ve CH6 ile gövde üzerinde bulunan CH17 ve CH19 ölçüm noktalarına aittir.



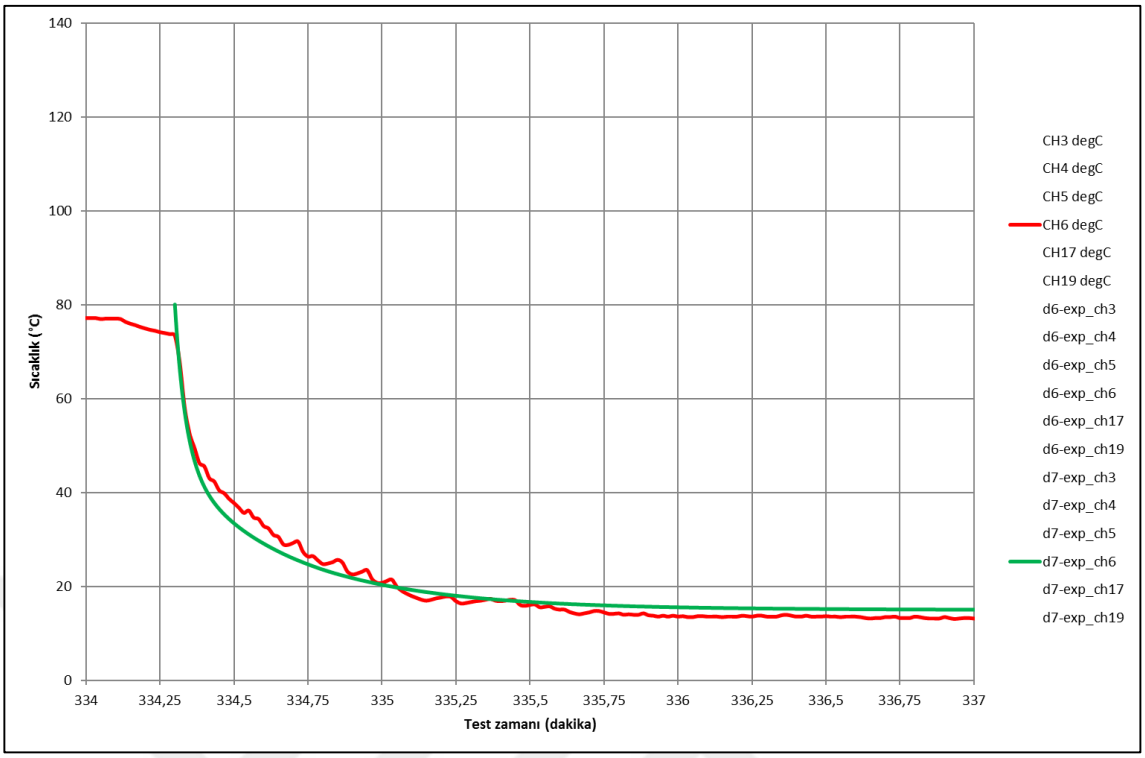
Şekil 4.46. Ani soğutma analizi CH3 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



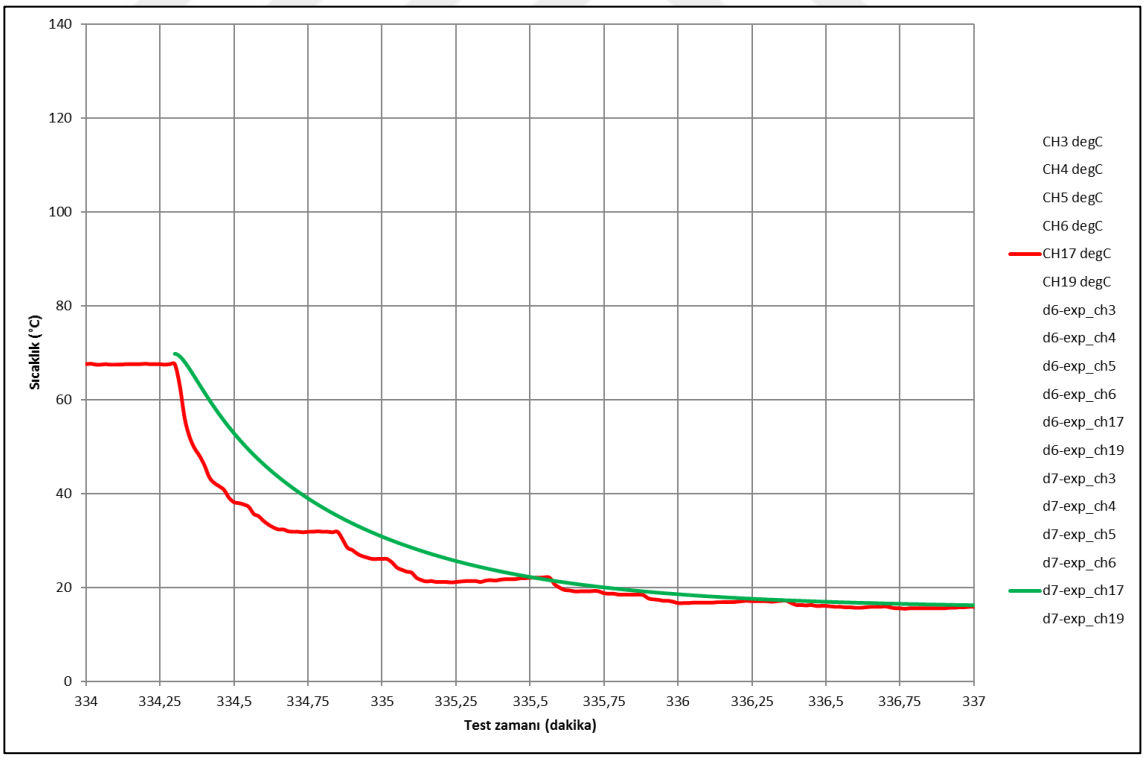
Şekil 4.47. Ani soğutma analizi CH4 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



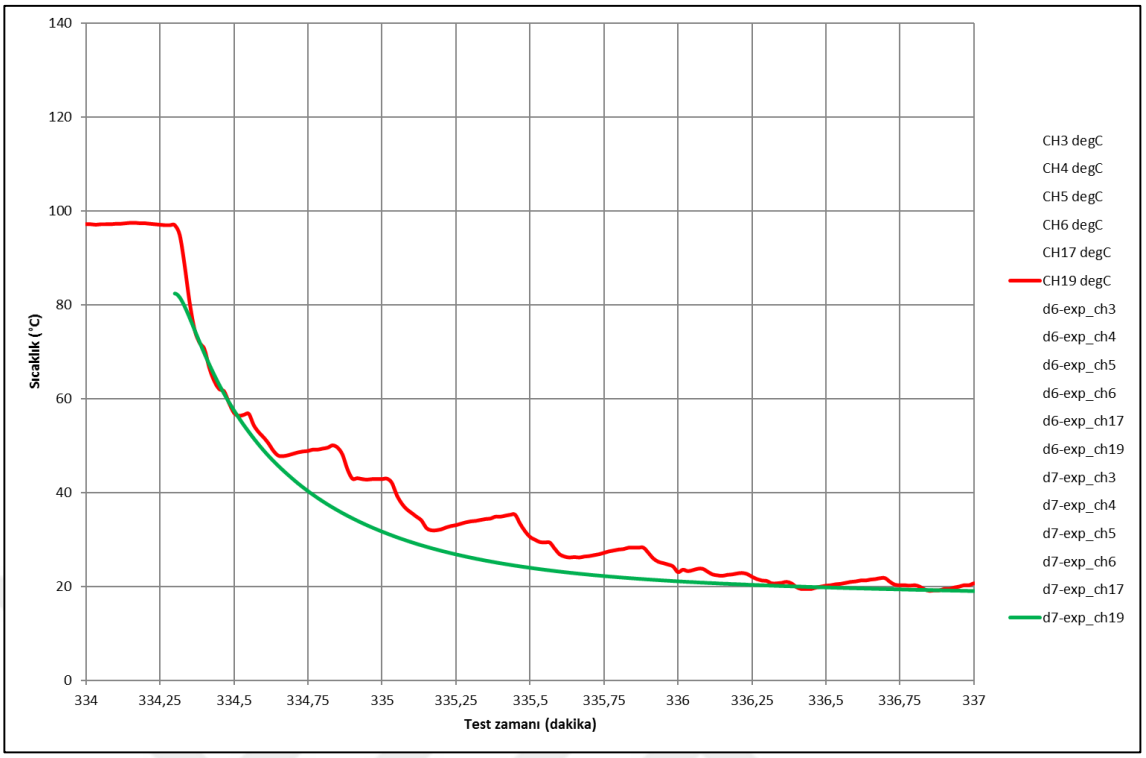
Şekil 4.48. Ani soğutma analizi CH5 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



Şekil 4.49. Ani soğutma analizi CH6 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



Şekil 4.50. Ani soğutma analizi CH17 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması



Şekil 4.51. Ani soğutma analizi CH19 sıcaklığı deneysel ve analiz sonuçları kıyaslaması

Uygun soğutma eğrilerinin yakalanmasıyla yoğuşma analiz prosedürü dış hava modellenmiş tek mesh yapısıyla yapılmıştır ve yoğuşma analizi prosedürü aşağıdaki gibi güncellenmiştir.

1. Dış havanın modellenmiş olduğu yapı denge halinde zamandan bağımsız analiz yapılarak ampuller açık vaziyette lamba ısıtılmaktadır.
2. Ani soğuma işleminin analizi için 1. aşamada elde edilen analiz dosyasındaki dış hava 15 °C sıcaklıkta alüminyum katı olarak tanımlanmakta ve ampuller kapalı olacak şekilde 3 dakika boyunca zamana bağlı analiz yapılmaktadır. Bu aşamada FLUENT EWF modeli çalıştırılarak yoğuşma oluşumu görülmektedir.
3. 2. Aşamada elde edilen yoğuşma oluşmuş analiz dosyasında dış hava bölgesi katı alüminyum yerine tekrar 23 °C hava olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca ampuller açılarak 10 dakika zamana bağlı analiz yapılmakta ve oluşan yoğuşmanın gitmesi gözlenmektedir.

4.4.1. Zamandan Bağımsız Ampuller Açık Isıtma Analizi

Zamandan bağımsız analiz dahil bütün ampul yanmalı senaryolarda Çizelge 4.3' teki değerler kullanılmıştır.

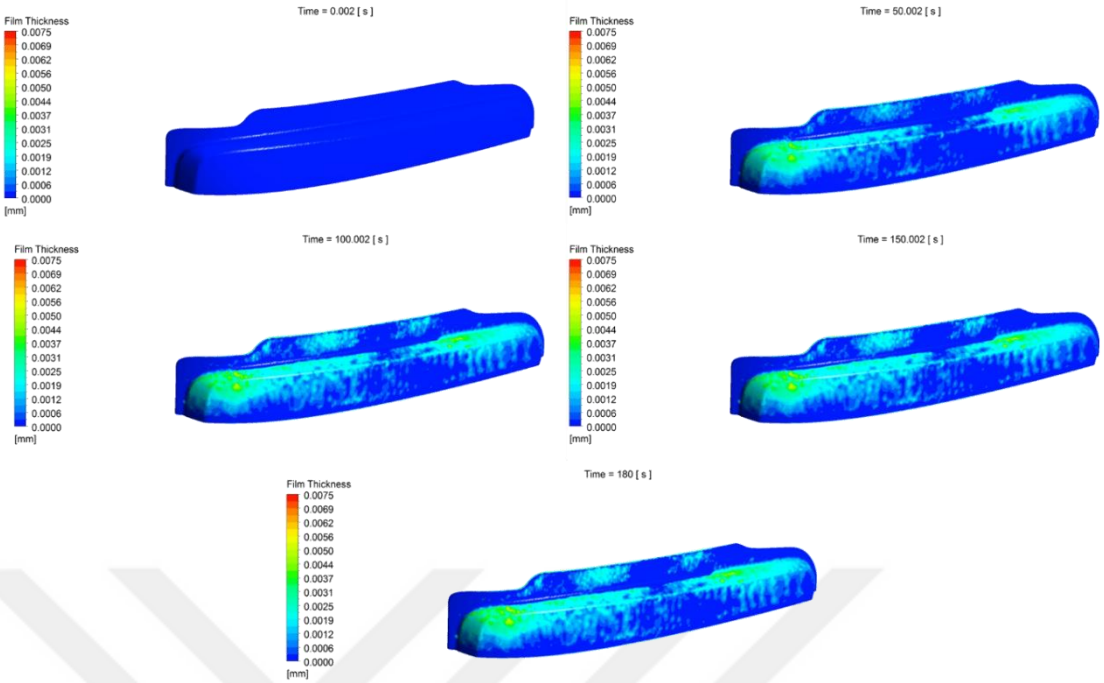
FLUENT programında nemli hava özelliği için özgül nem değeri sınır şartı olarak girilmektedir. Analizi yapılan test senaryosunda lamba 38 °C ortam sıcaklığında ve %70 bağıl nemde 1,5 saat tutularak nemli havanın lamba içerisine tamamen dolması sağlanmaktadır. Simülasyonda başlangıç şartı için lamba içerisindeki havanın bu şartlara göre hesaplanmış özgül nemi girilmiştir.

$$x(r) = 0{,}622 * \frac{\varphi * P_{db}}{(100 * p) - (\varphi * P_{db})} \qquad (4.1)$$

Eşitlik (4.1), bağıl nemin ve sıcaklığın bilinmesiyle özgül nemin hesaplanmasını göstermektedir. Termodinamik tablolardan 38 °C hava için doyma basıncı Pd = 6682,7 Pa olarak tespit edilmiştir. Ortam basıncının atmosferik basınç 101325 Pa ve bağıl nemin de %70 olması halinde Eşitlik (1) ile hesaplanan özgül nem **0,0484 kg / kg kuru hava** olmaktadır. Bu değer analizde havanın nem özelliği olarak başlangıç şartı şeklinde kullanılmıştır. Zamandan bağımsız analiz ile elde edilen analiz sonucu ikinci aşamanın analiz başlangıcı olarak kullanılacaktır.

4.4.2. 3 Dakika Ani Soğutma – Yoğuşma Oluşumu Analizi

Zamandan bağımsız analizin sonuç dosyasında dış hava 15 °C alüminyum olarak tanımlanarak ani soğutma benzeşimi yapılmıştır. Analiz zamana bağlı olarak 3 dakikalık periyodu kapsamakta olup ampuller bu süre zarfında kapalı konumdadır. Analizde yoğuşma oluşumu için FLUENT EWF modeli çalıştırılmış ve başlangıç şartı olarak film tabaka et kalınlığı 0 mm olarak verilmiştir. Analiz sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen yoğuşma miktarı ve dağılımı Şekil 4.52' de görülmektedir.

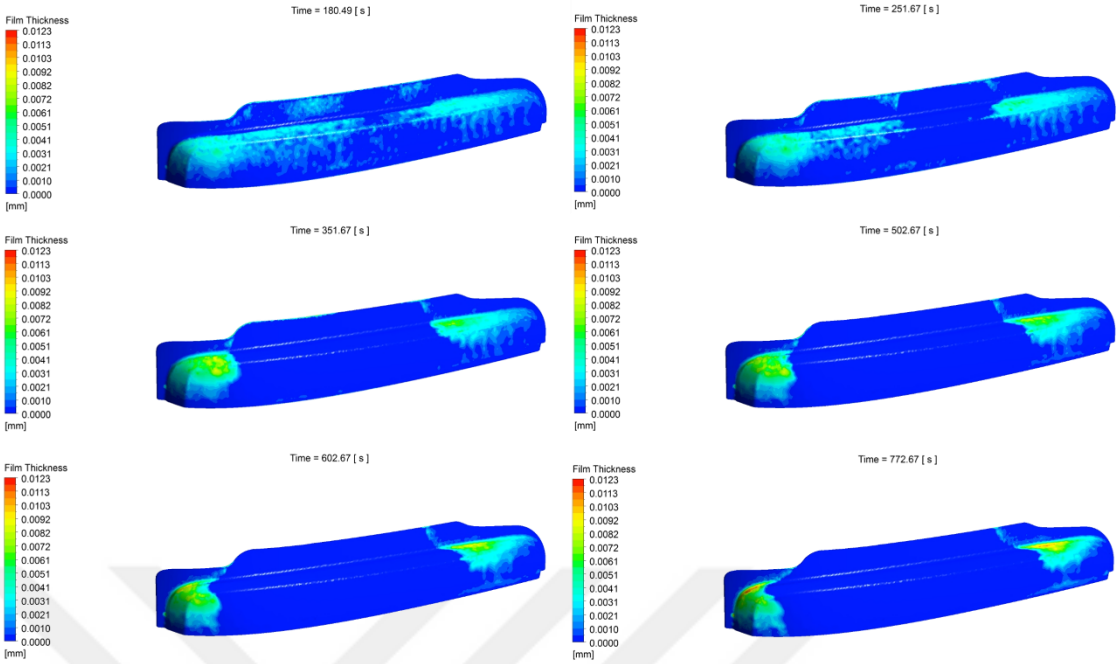


Şekil 4.52. 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi

Zamana bağlı yoğuşma oluşumuna bakıldığında yoğuşmanın Brunberg ve Aspelin (2011) çalışmasında da elde edilen yoğuşma sonuçlarına benzer olarak beklenildiği gibi soğuk olan pasif bölgede başladığı görülmektedir. Havanın içerisindeki su buharının çiğ noktası sıcaklığının altına düştüğü yüzeylerde yoğuşma olarak biriktiği bilgisiyle soğuk bölgelerin yoğuşma potansiyelinin en fazla olduğu yerlerdir denilebilir. Lensin soğuması devam ettikçe lens yüzeyinde yoğuşma alanı da genişlemekte ve 3 dakika sonrasında en geniş alana sahip olmaktadır.

4.4.3. 10 Dakika Ampuller Açık Isıtma Analizi

Ani soğutma ile elde edilen yoğuşma oluşmuş analiz dosyasında dış hava 23 °C sıcaklıkta %45 bağıl nemde **(0,0128 kg / kg kuru hava)** olacak şekilde tanıtılmış ve ampuller tekrar açık hale getirilerek 10 dakika zamana bağlı analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda zamana bağlı olarak elde edilen yoğuşma miktarı ve dağılımı Şekil 4.53' te görülmektedir.

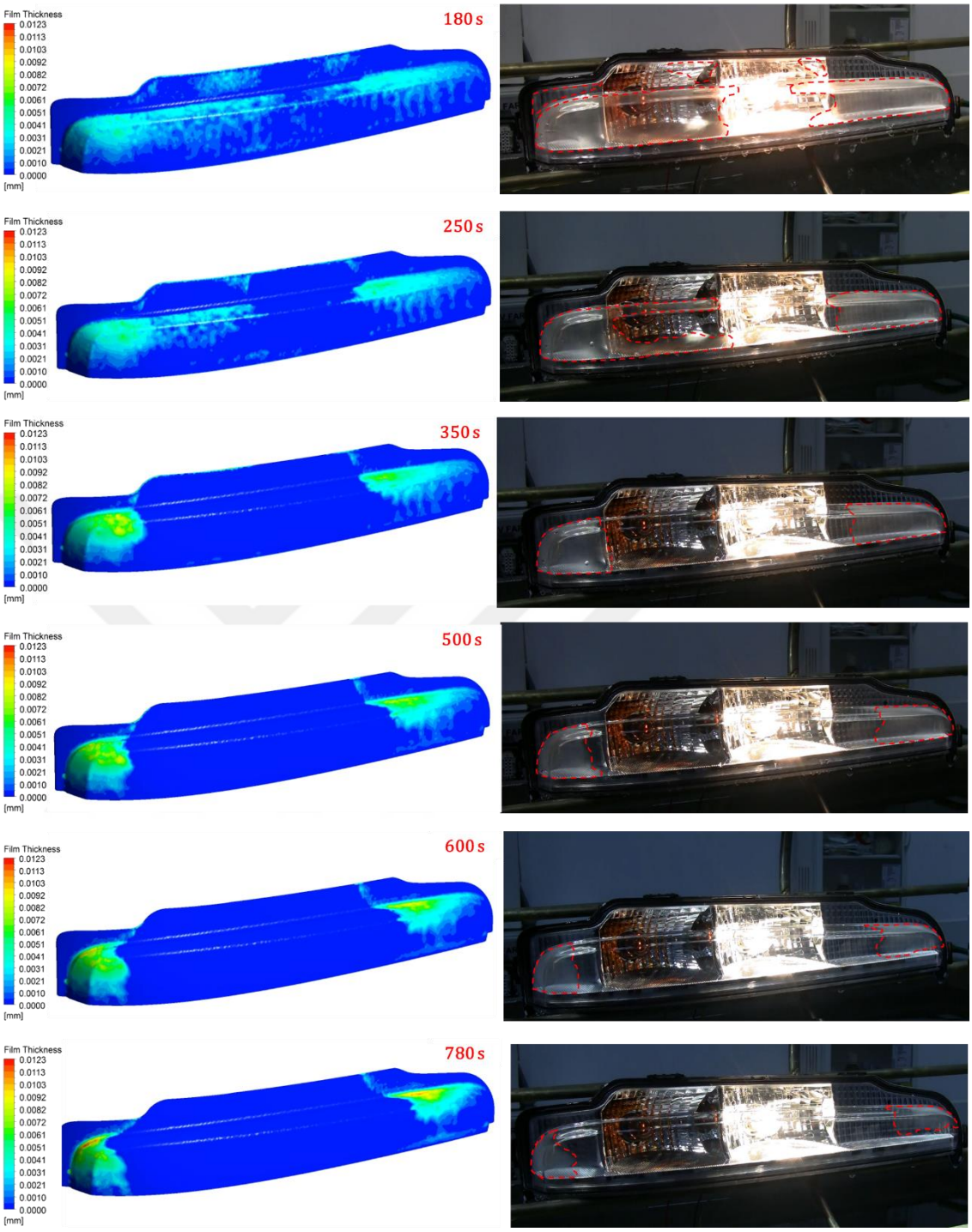


Şekil 4.53. 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi

10 dakikalık ampullerin açık olduğu zaman diliminde lensin ampuller tarafından ısıtılmasıyla yoğuşma alanı zamana bağlı olarak en sıcak bölgelerden hareketle azalmaya başlamaktadır. Zaman ilerledikçe sinyal ve DRL ampullerinin ısıttığı lens yüzeyinde yoğuşma tamamen kaybolmuş olup pasif bölgelerdeki yoğuşma alanı da sıcaklığa bağlı olarak kısmen azalmıştır. 10 dakika testin sonrasında pasif bölgelerdeki yoğuşma uç kısımlarda birikmiş halde olup tamamen ortadan kalkmamıştır (Şekil 4.53).

4.5. Yoğuşma Analizi ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması

Zamana bağlı analiz sonucunda elde edilen yoğuşma miktarı ve dağılımı deneysel ortamda video kamera ile kaydedilen yoğuşma miktarı ve dağılımı görüntüleriyle kıyaslanmıştır. Deney sonucu elde edilen görüntüler üzerinde görülebilir yoğuşma bölgeleri kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. 3 dakika (180 saniye) ani soğutma sonrası elde edilen yoğuşmadan başlayarak ampuller açık ısıtma aşamasında yoğuşma yapısındaki değişimler sırasıyla 250, 350, 500, 600 ve 780 saniye (10 dakika ampuller açık) olarak Şekil 4.54' te kıyaslanmıştır. Yoğuşma analizi ile ele edilen zamana bağlı yoğuşma dağılımının deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.54. Yoğuşma dağılımı – analiz ve deneysel sonuçların kıyaslanması

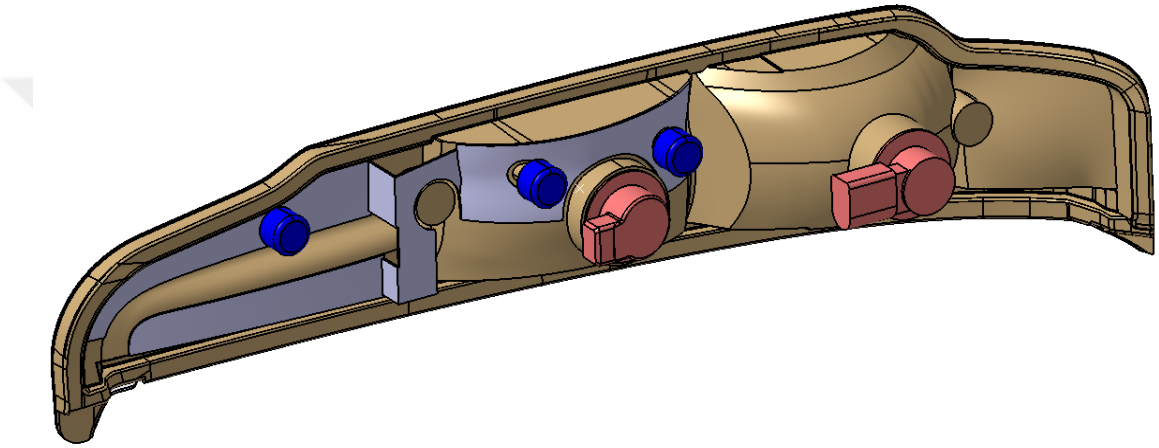
4.6. Yoğuşma Azaltıcı – Önleyici Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları

Atego DRL lambası tasarımı gereği pasif bölgeye sahiptir ve bu bölge diğer alanlara göre nispeten soğuk kalmaktadır. Bu sebeple sıcak bölgelerdeki ısının bir kısmının pasif bölgeye iletilmesi için metal bir ısı dağıtım yapısından faydalanılması planlanmaktadır.

Bu ısı dağıtım yapısı ile ampul tarafından ısıtılan sıcak bölgedeki ısının parça üzerinden iletimle soğuk bölgeye taşınarak o bölgenin ısıtılması hedeflenmektedir.

4.6.1. Lamba Dışı Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları

Atego DRL lambasında en yüksek sıcaklığın olduğu yüzey DRL reflektörünün olduğu bölgedir. Bu bağlamda DRL reflektör bölgesindeki yüksek sıcaklığı nispeten daha soğuk bölgelere iletebilecek lamba dış yüzeyinde bulunan bir ısı dağıtım yapısı tasarlanmıştır (Şekil 4.55).



Şekil 4.55. Atego DRL lambası arka yüzeydeki soğutucu tasarımı

Lamba dışı ısı dağıtım yapısının lamba sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisinin incelenmesinde analiz çözüm sürelerinde zaman kazanma adına kıyaslamanın denge hali üzerinden yapılmasına karar verilmiştir. Şekil 4.55' teki ısı dağıtım yapısı hem alüminyum alaşım (k:173 W/m.K) hem de bakır (k:381 W/m.K) malzeme olarak analiz yapılmıştır.

Lambalarda kullanılan termoplastik malzemenin ısı iletim katsayısı yaklaşık k:0,2 W/m.K olacak şekilde çok düşüktür. Dolayısıyla plastik parçaların uzunluğu boyunca ısı iletimi düşük seviyede kalmaktadır. Fakat teknolojinin gelişmesine paralel olarak bazı özel uygulamalar için k:4 W/m.K civarı ısı iletim katsayısına sahip özel termoplastik malzemeler geliştirilmiş ve sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Farklı bir deneme olarak gövdenin yüksek ısı iletim katsayısı termoplastik malzemeden olması da analiz edilmiştir.

Neticede pasif bölgeye ilave ısı geçişinin sağlanması için kıyaslanacak denemeler olarak aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

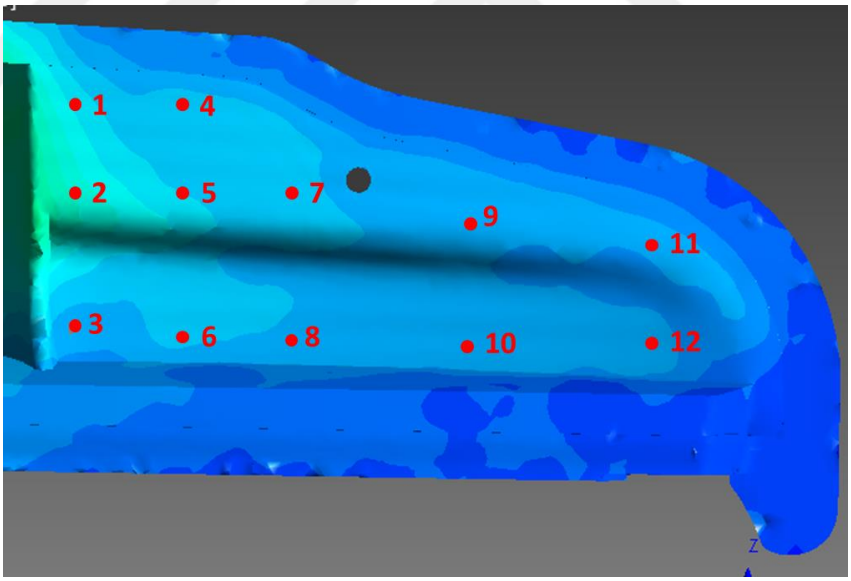
A: Normal lamba, ısı dağıtım yapısı yok

B: Alüminyum alaşım ısı dağıtım yapılı (k: 173 W/mK) lamba

C: Bakır ısı dağıtım yapılı (k: 381 W/mK) lamba

D: Normal lamba, ısı dağıtım yapısı yok, ısı transfer katsayısı yüksek malzemeden üretilmiş gövde (k: 4 W/mK)

Yapılan denge hali zamandan bağımsız analizlerin kıyaslanması lambada sıcaklık ölçümü için kullanılan termokupl noktaları üzerinden yapılacaktır (bkz. Şekil 4.15 ve Çizelge 4.4). Bunların haricinde özellikle pasif bölgedeki sıcaklık değişiminin daha iyi kıyaslanması için o bölgeye analiz ortamında ilave sıcaklık ölçüm noktaları da tanımlanmıştır (Şekil 4.56).



Şekil 4.56. Gövde pasif bölge üzerindeki ilave ölçüm noktaları

Analiz ortamında ilave sıcaklık ölçüm noktalarının koordinatları Çizelge 4.8 olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.8. Gövde pasif bölge üzerindeki ilave ölçüm noktaları koordinatları

İç yüzey: IAD		Dış yüzey: EAD	
	X (mm)	**Y (mm)**	**Z (mm)**
IAD1	56,8	788	-307
EAD1	59,3	788	-307
IAD2	55,7	788	-326
EAD2	58,2	788	-326
IAD3	64	788	-353
EAD3	66,5	788	-353
IAD4	53,7	765	-307
EAD4	56,2	765	-307
IAD5	52,6	765	-326
EAD5	55,1	765	-326
IAD6	61,6	765	-353
EAD6	64,1	765	-353
IAD7	49,7	742	-326
EAD7	52,2	742	-326
IAD8	58,4	742	-353
EAD8	60,9	742	-353
IAD9	45,3	707	-333
EAD9	47,8	707	-333
IAD10	52,2	707	-358
EAD10	54,7	707	-358
IAD11	41,2	670	-338
EAD11	43,7	670	-338
IAD12	43,6	670	-358
EAD12	46,1	670	-358

A, B, C ve D olarak isimlendirilen farklı denemeler sonucunda analizlerden alınan noktasal sıcaklık verileri Çizelge 4.9' da bir araya getirilmiştir.

Çizelge 4.9. Lamba dışı farklı ısı dağıtım yapısı deneme sonuçları

Ölçüm noktaları	**Noktasal sıcaklık değerleri (°C)**			
	A	**B**	**C**	**D**
CH1	27,68	26,86	27,34	26,29
CH2	32,98	33,67	34,54	31,08
CH3	69,63	64,18	69,66	68,13
CH4	61,07	61,03	61,94	59,44
CH5	108,59	108,57	110,83	105,99
CH6	72,41	72,35	73,72	70,97
CH7	50,94	55,06	55,79	49,44
CH8	45,43	44,49	45,49	44,53

CH9	37,10	31,98	36,06	33,27
CH10	27,65	30,05	33,13	26,86
CH11	28,32	27,10	28,33	26,44
CH12	24,06	24,88	27,65	25,18
CH13	23,22	24,44	27,03	22,79
CH14	63,47	69,36	70,98	57,55
CH15	73,63	75,79	82,79	60,81
CH16	68,49	59,00	67,71	58,42
CH17	68,94	67,41	73,94	56,63
CH18	91,84	79,32	79,13	70,60
CH19	83,62	79,82	89,15	67,26
IAD1	41,03	41,54	42,34	39,43
EAD1	41,00	41,64	42,04	39,04
IAD2	48,60	49,57	49,52	43,25
EAD2	47,53	48,52	48,56	39,93
IAD3	28,85	32,00	34,26	34,10
EAD3	27,82	31,25	34,17	32,00
IAD4	27,93	34,57	36,90	31,97
EAD4	27,71	36,12	38,77	33,06
IAD5	36,55	36,97	39,22	33,21
EAD5	36,16	36,09	38,72	33,47
IAD6	29,78	33,40	36,47	31,04
EAD6	29,30	33,27	36,56	30,33
IAD7	29,78	34,15	36,95	29,15
EAD7	28,93	34,65	37,75	29,20
IAD8	27,14	32,18	35,61	28,32
EAD8	26,53	32,12	35,74	28,35
IAD9	26,67	30,74	34,34	25,58
EAD9	26,45	30,91	35,04	26,00
IAD10	22,58	30,52	34,42	25,40
EAD10	21,90	30,69	34,82	25,49
IAD11	23,96	29,05	33,05	24,12
EAD11	23,79	29,33	33,92	24,12
IAD12	23,90	29,75	33,74	24,11
EAD12	24,11	30,00	34,34	24,15

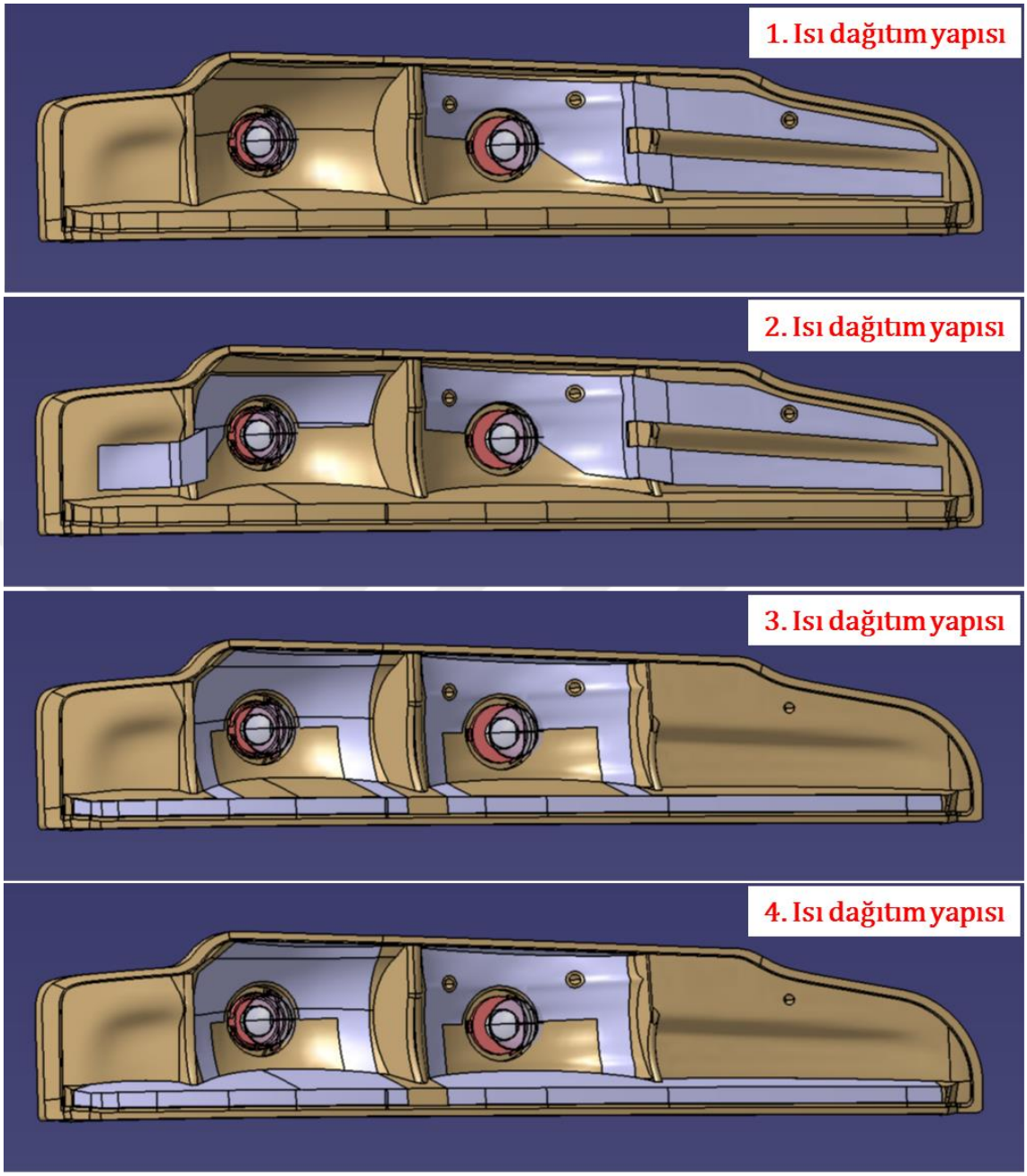
Tablodaki verilerden yola çıkılarak, gövdenin pasif bölgesindeki değerler (IAD ve EAD) kıyaslandığında, öncelikli olarak en uç bölgeye gidildikçe (1→12) denemeler arasındaki farklılıkların daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Denemelerin normal lamba (deneme A) ile pasif bölgedeki sıcaklık değerleri üzerinden kıyaslanmasında, alüminyum alaşım ısı dağıtım yapısında (deneme B) pasif bölgede sıcaklık artışı görülürken ısı dağıtım yapısı malzemesi bakır olduğunda (deneme C) pasif bölgedeki sıcaklık artışının daha fazla olduğu görülmektedir. En soğuk bölgedeki IAD12 ve EAD12 kıyaslandığında

deneme C verilerinin deneme A verilerine göre yaklaşık 10°C daha yüksek olduğu görülmektedir. En son çalışma olarak yapılan daha yüksek ısı iletim katsayılı gövde (deneme D) analizindeki veriler irdelendiğinde yüksek ısı iletiminin gövdenin sıcak bölgelerindeki ısıyı dışarıya daha çabuk atmasına sebep olurken pasif bölgedeki sıcaklıkları artırmadığı görülmüştür.

Pasif bölgede lens üzerinde denk gelen ölçüm noktaları CH8-CH13 arasındadır. Bu noktadaki veriler kıyaslandığında en iyi performanslı olan deneme C (bakır ısı dağıtım yapısı) için en soğuk lens bölgesinde (CH13) yaklaşık 4°C artış olduğu görülmüştür. Neticede gövde dış yüzeyine sıcak bölgedeki ısıyı soğuk bölgeye taşıması için ilave edilen soğutucunun dış hava ile temas etmesinden dolayı lens üzerinde belirgin bir farklılık ortaya çıkarmadığı tespit edilmiştir. Bunun üzerine diğer ısı dağıtım yapısı denemelerinin lamba içerisinde olmasına karar verilmiştir.

4.6.2. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları

Lamba içinde değişik geometrilerde 4 farklı ısı dağıtım yapısı tasarımı yapılmıştır. Kıyaslama için lamba içerisinde ön görülen ısı dağıtım yapısı denemeleri Şekil 4.57’ de gösterilmiştir.



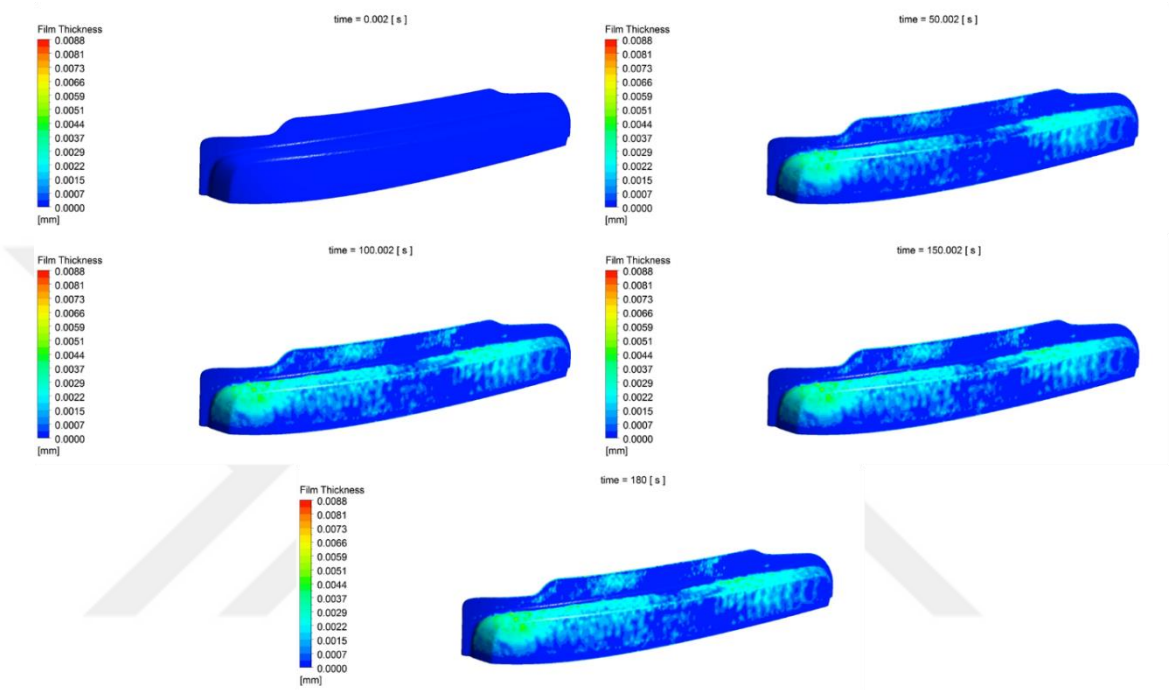
Şekil 4.57. Lamba içi ısı dağıtım yapısı denemeleri

Ön görülen 4 farklı ısı dağıtım yapısının daha iyi kıyaslanabilmesi için lambadaki yoğuşma üzerindeki etkilerini görmek adına bütün denemelere Bölüm 4.4' te tanımlanan ve aşağıdaki gibi özetlenen yoğuşma analizi prosedürü uygulanmıştır.

1. Zamandan bağımsız ampuller açık ısıtma analizi
2. 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi
3. 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi

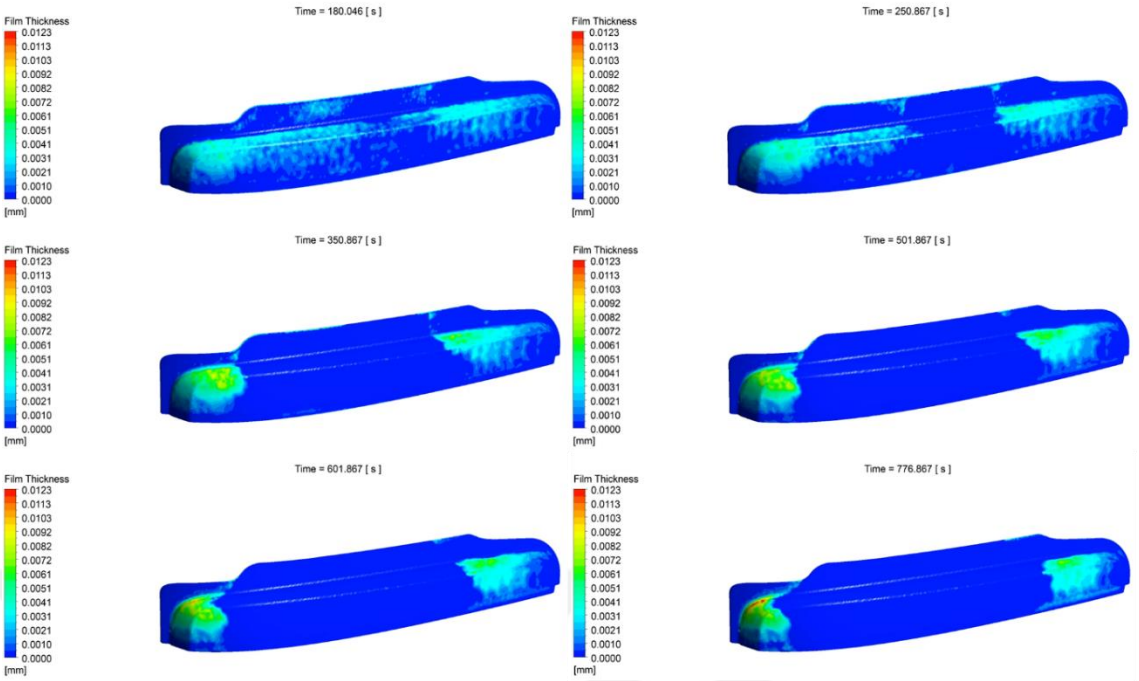
4.6.2.1. 1. Isı dağıtım yapısı analizleri

1. ısı dağıtım yapısı için ilk çalışma olarak bakır malzeme (k=381 W/m.K) ile analiz yapılmıştır. Lambanın denge hali zamandan bağımsız ampuller açık ısıtılması sonrasında 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi neticesinde ortaya çıkan yoğuşma miktarı Şekil 4.58' de gösterilmiştir.



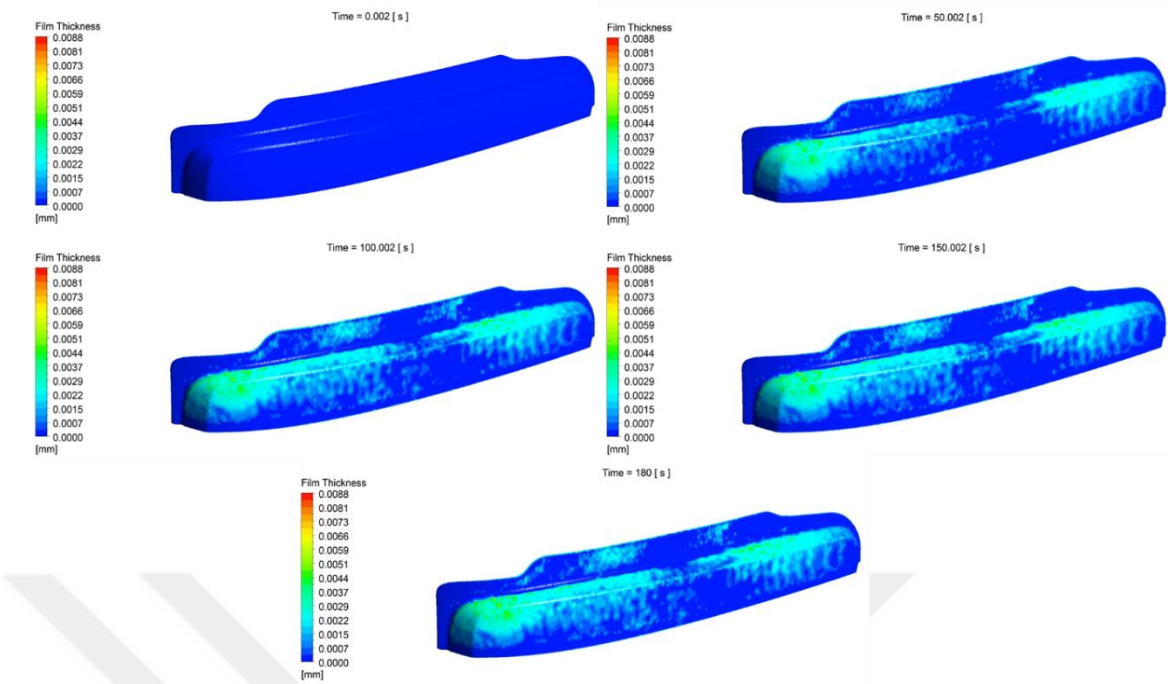
Şekil 4.58. 1. ısı dağıtım yapısı – bakır malzeme – 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü

3 dakika ani soğutma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi neticesinde elde edilen yoğuşma dağılımındaki değişim Şekil 4.59' da gösterilmiştir.



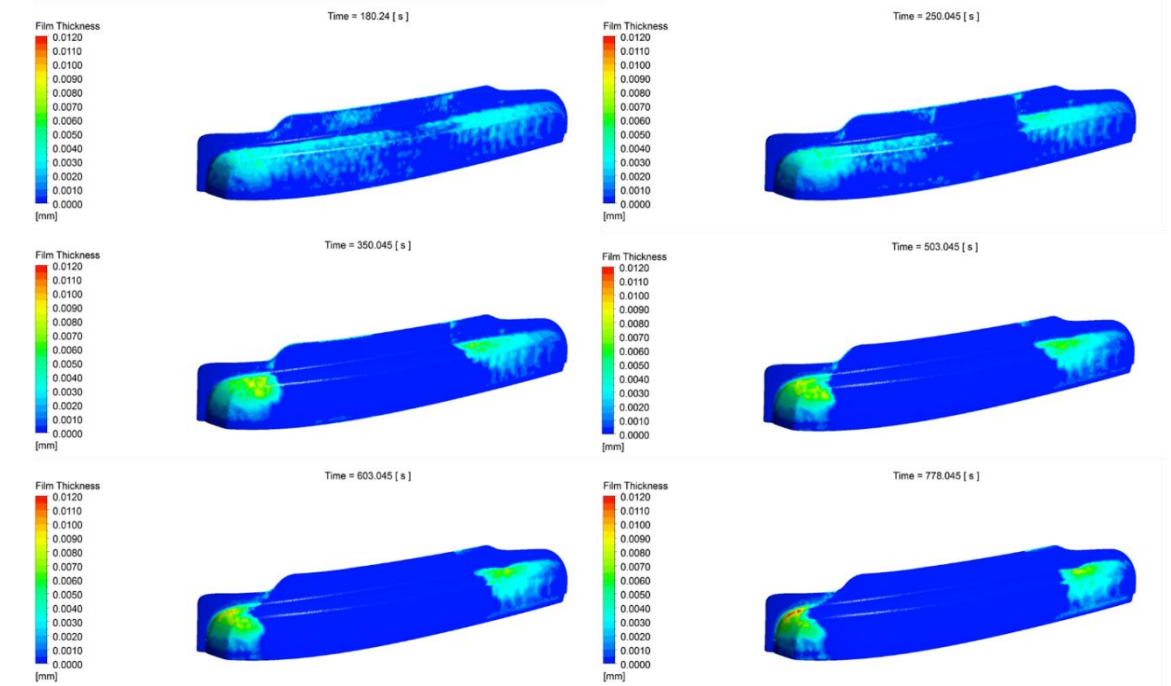
Şekil 4.59. 1. ısı dağıtım yapısı – bakır malzeme – 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü

Bakır malzemenin üretim, maliyet, kullanılabilirlik ve tedarik gibi konularda alüminyum alaşım malzemeye göre bir takım dezavantajlarının olması sebebiyle 1. ısı dağıtım yapısı ayrıca alüminyum alaşım (k=173 W/m.K) malzeme olacak şekilde analizler tekrar edilmiştir. Lambanın denge hali zamandan bağımsız ampuller açık ısıtılması sonrasında 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi neticesinde ortaya çıkan yoğuşma miktarı Şekil 4.60' da gösterilmiştir.



Şekil 4.60. 1. ısı dağıtım yapısı – alüminyum alaşım malzeme – 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü

3 dakika ani soğutma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi neticesinde elde edilen yoğuşma dağılımındaki değişim Şekil 4.61' de gösterilmiştir.

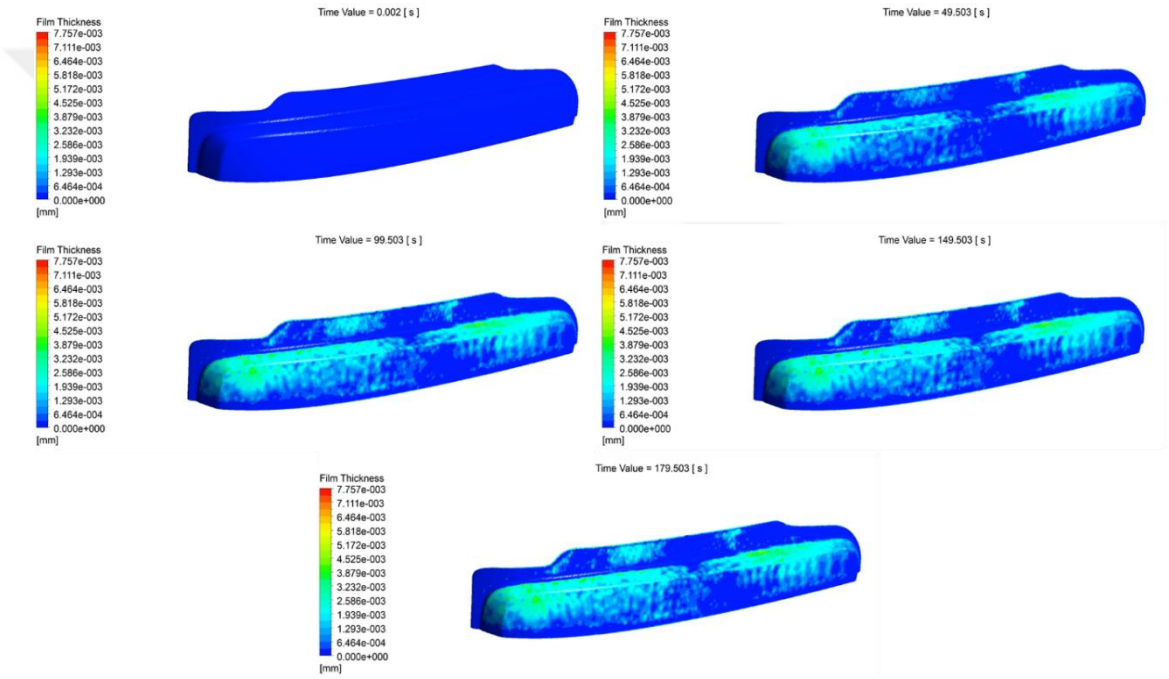


Şekil 4.61. 1. ısı dağıtım yapısı – alüminyum alaşım malzeme – 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü

Isı dağıtım yapısının bakır ile alüminyum alaşım malzeme olması durumlarında elde edilen yoğuşma yapıları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Bu sebeple diğer ısı dağıtım yapısı denemelerinde alüminyum alaşım malzeme kullanılmasına karar verilmiştir.

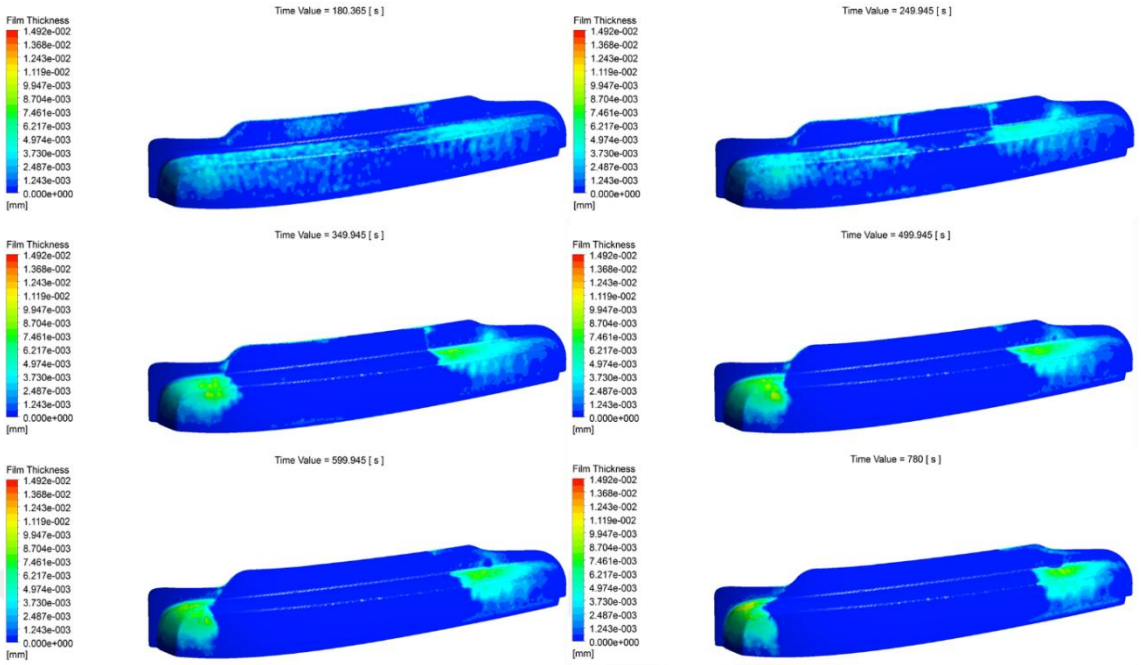
4.6.2.2. 2. Isı dağıtım yapısı analizleri

2. ısı dağıtım yapısı ile lambanın denge hali zamandan bağımsız ampuller açık ısıtılması sonrasında 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi neticesinde ortaya çıkan yoğuşma miktarı Şekil 4.62' de gösterilmiştir.



Şekil 4.62. 2. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü

3 dakika ani soğutma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi neticesinde elde edilen yoğuşma dağılımındaki değişim Şekil 4.63' te gösterilmiştir.

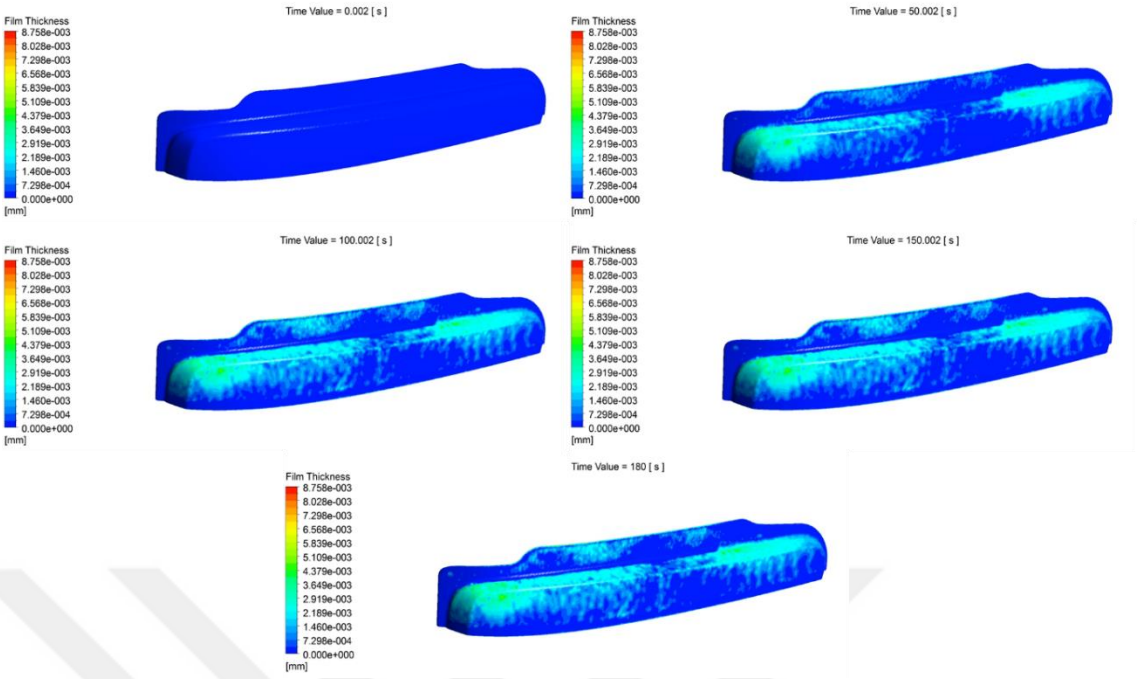


Şekil 4.63. 2. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü

1. ısı dağıtım yapısına göre lambanın sol tarafına ilave metal yapının eklenmesi ile elde edilen 2. Isı dağıtım yapısının analizler sonucunda yoğuşma oluşumunda belirgin bir fark oluşturmadığı görülmüştür.

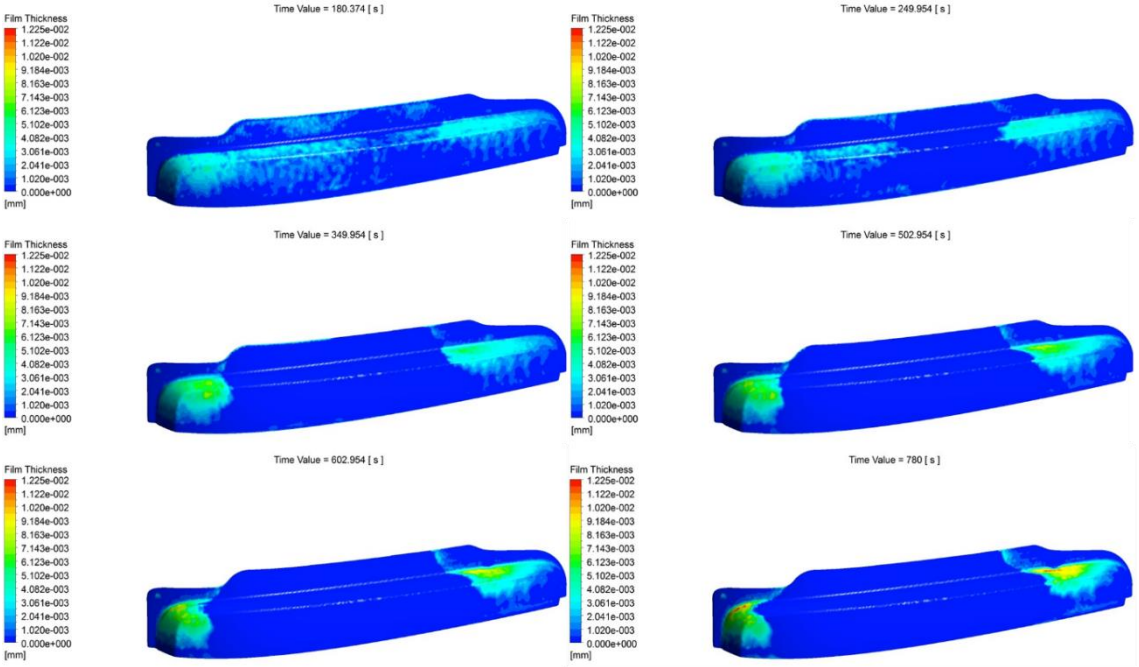
4.6.2.3. 3. Isı dağıtım yapısı analizleri

Diğer deneme olarak ampul bölgesindeki ısıyı alan ısı dağıtım yapılarının gövde dikey duvarından ziyade lense yakın bölgelere ulaşması amacıyla 3. ısı dağıtım yapısı şekillendirilmiştir. Bu yapı ile lambanın denge hali zamandan bağımsız ampuller açık ısıtılması sonrasında 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi neticesinde ortaya çıkan yoğuşma miktarı Şekil 4.64' te gösterilmiştir.



Şekil 4.64. 3. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü

3 dakika ani soğutma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi neticesinde elde edilen yoğuşma dağılımındaki değişim Şekil 4.65' te gösterilmiştir.

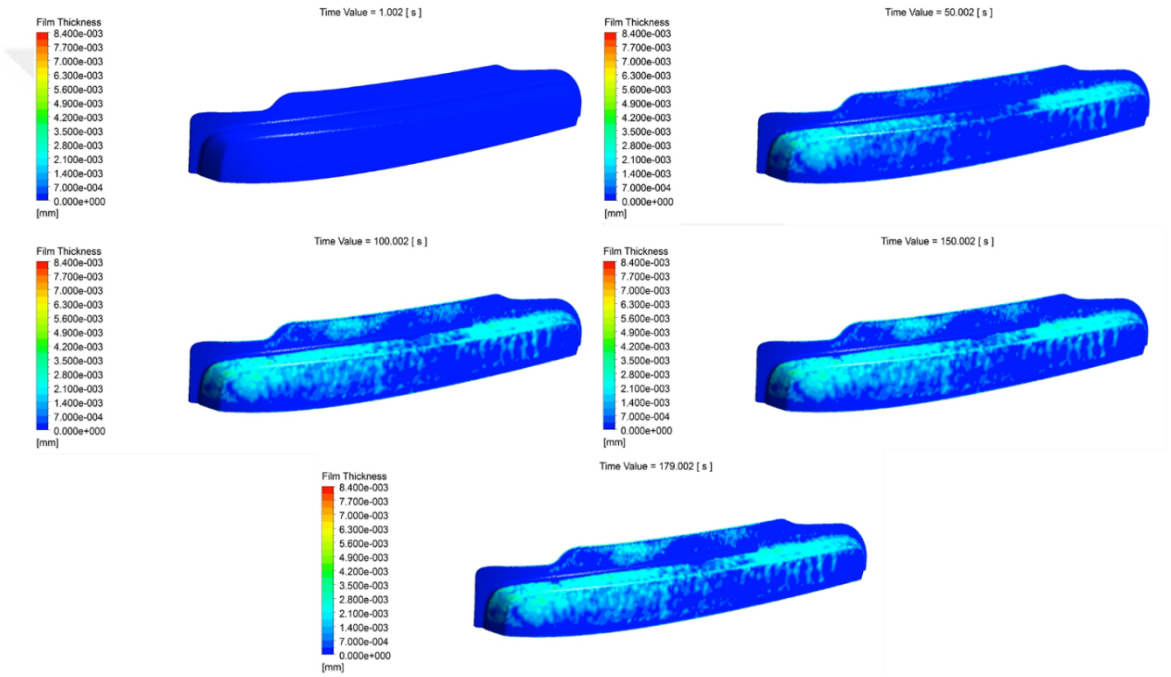


Şekil 4.65. 3. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü

3. ısı dağıtım yapısıyla lens üzerindeki yoğuşmanın alt bölgelerden azalmaya başladığı görülmüştür.

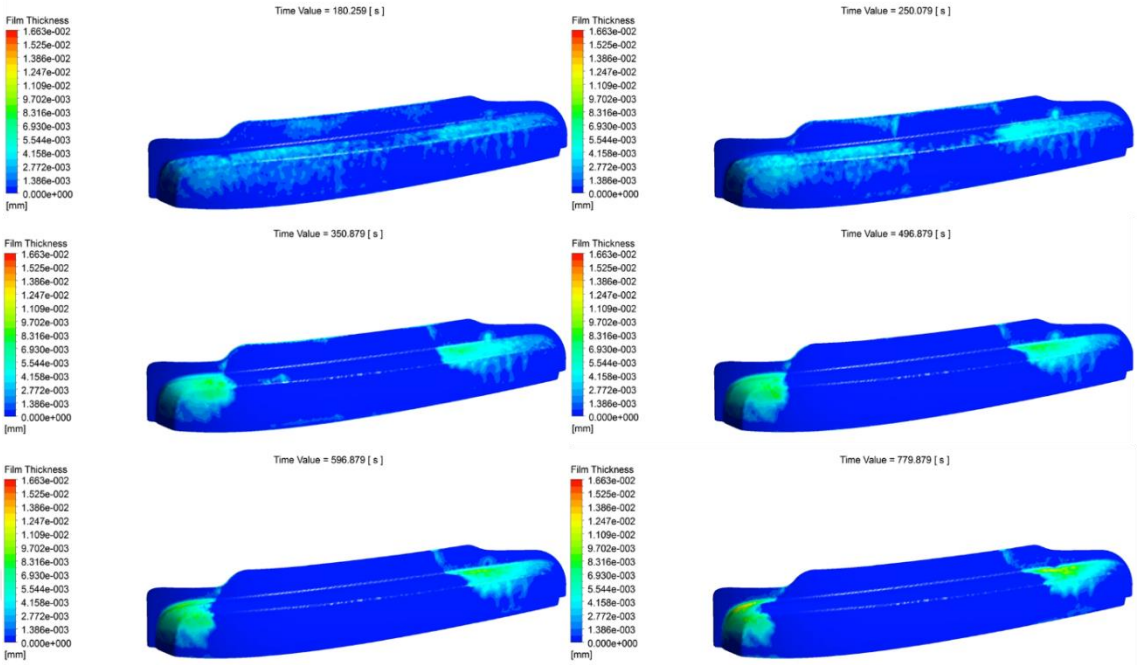
4.6.2.4. 4. Isı dağıtım yapısı analizleri

3. ısı dağıtım yapısına ilave olarak lense yaklaşan metal yapının biraz daha genişletilmesiyle lens alt bölgeden daha iyi ısıtılabileceği ön görüsüyle 4. ısı dağıtım yapısı tasarlanmıştır. Bu yapı ile lambanın denge hali zamandan bağımsız ampuller açık ısıtılması sonrasında 3 dakika ani soğutma – yoğuşma oluşumu analizi neticesinde ortaya çıkan yoğuşma miktarı Şekil 4.66' da gösterilmiştir.



Şekil 4.66. 4. ısı dağıtım yapısı 3 dakika ani soğutma yoğuşma görüntüsü

3 dakika ani soğutma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma analizi neticesinde elde edilen yoğuşma dağılımındaki değişim Şekil 4.67' de gösterilmiştir.

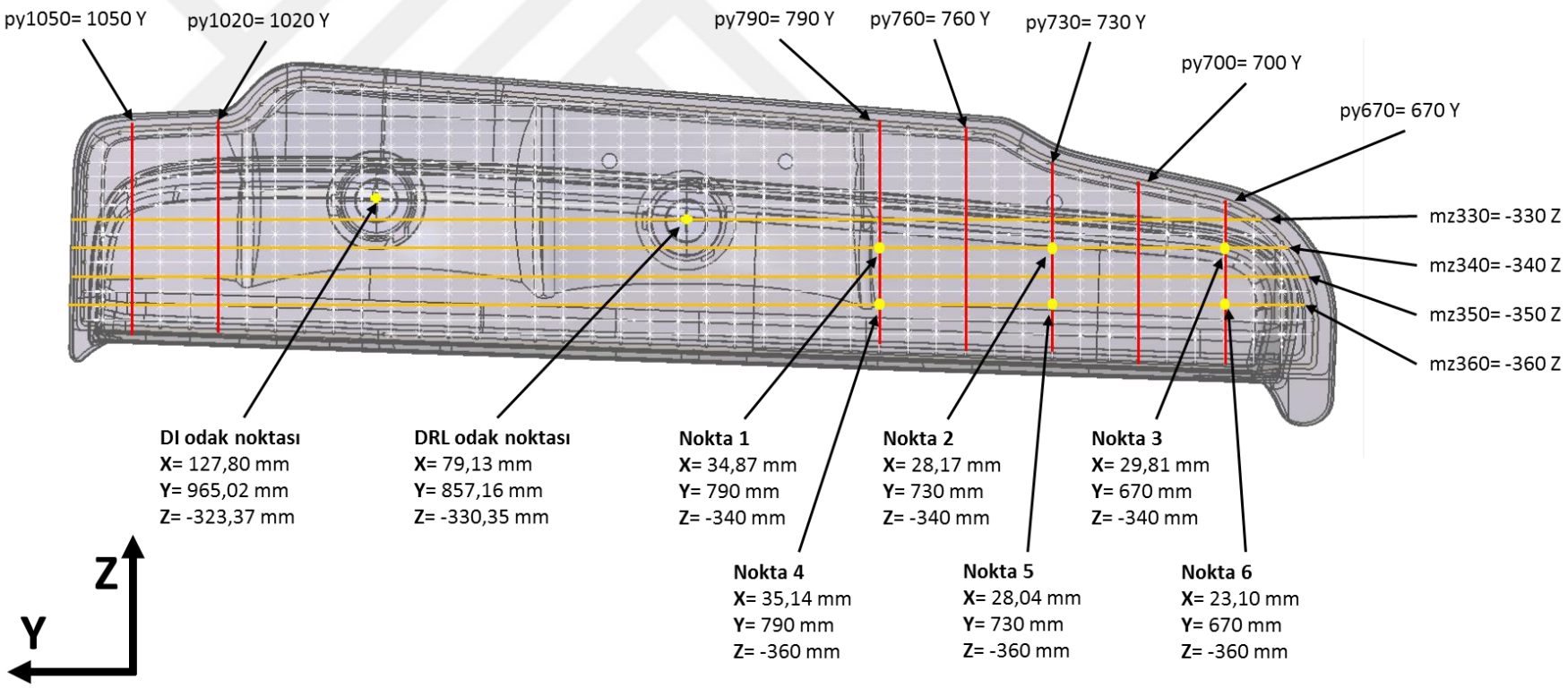


Şekil 4.67. 4. ısı dağıtım yapısı 10 dakika ısıtma yoğuşma görüntüsü

4. ısı dağıtım yapısıyla lens üzerindeki yoğuşmanın alt bölgelerden biraz daha fazla azaldığı görülmüştür.

4.6.2.5. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Denemeleri Kıyaslaması

Yapılan analizlerin grafiksel bazda değerlendirilmesi için analiz datası üzerinde bazı kesitler ve noktalar belirlenmiştir. Bu kesit çizgileri ve noktalar lens iç yüzeyinde olup aracın eksen takımına göre isimlendirilmiştir. Lamba datası dikey kesitlerinin isimleri "py" ile başlamakta ve Y ekseni değerine göre geldiği konumun rakamsal karşılığı olarak bitmektedir. Lamba datası yatay kesitlerinin isimleri de "mz" ile başlamakta ve Z ekseni değerine göre geldiği konumun rakamsal karşılığı olarak bitmektedir. Kesitlerin konumları özellikle lambanın pasif bölgelerini içerecek şekilde tercih edilmiştir. Ayrıca 1. pasif bölgedeki kesitlerin keşişim noktaları Nokta 1' den Nokta 6' ya kadar numaralandırılmıştır. Bütün kesitler ve noktaları Şekil 4.68' de gösterilmektedir. Bu kesitler ve noktaları üzerindeki farklı analizlerden elde edilen sıcaklık (°C) ve film kalınlığı (mm) değerleri grafik olarak derlenmiş ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.



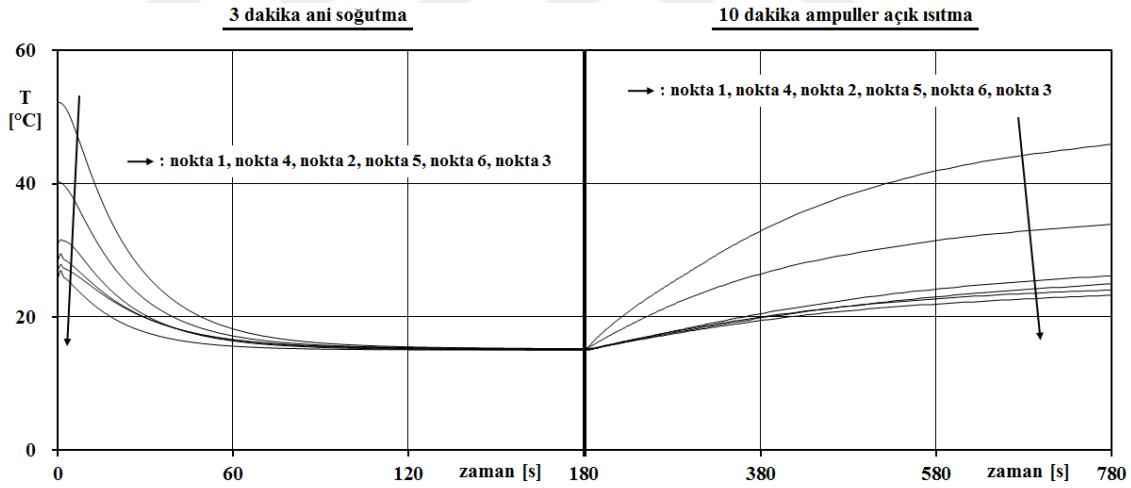
Şekil 4.68. Atego DRL lambası analiz datası üzerindeki kesitler ve noktaları

Analiz sonuçlarını grafik üzerinde değerlendirme iki farklı aşamada yapılmıştır.

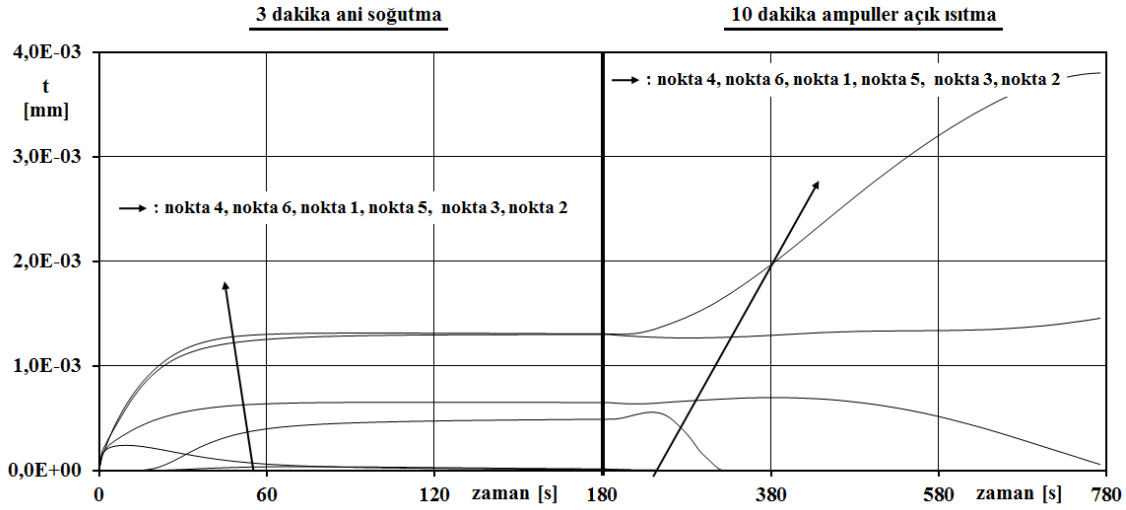
1. aşamada Atego DRL lambasının orijinal halinin yoğuşma analizi sonuçları üzerinden 1. Pasif bölgede bulunan Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 ve Nokta 6 üzerindeki sıcaklık (°C) ve film kalınlığı (mm) değerleri zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir.

2. aşamada Atego DRL lambası orijinal halinin ve 4 farklı ısı dağıtım yapısının yoğuşma oluşumunu takiben 10 dakika ampuller açık ısıtma sonrasındaki sıcaklık (°C) ve film kalınlığı (mm) değerleri Y ve Z kesitleri üzerinden kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Atego DRL lambasının orijinal halinin yoğuşma analizi sonuçları üzerinden 1. Pasif bölgede bulunan Nokta 1, Nokta 2, Nokta 3, Nokta 4, Nokta 5 ve Nokta 6 üzerindeki sıcaklık (°C) grafiği Şekil 4.69' da verilmiştir. Yine aynı noktalar üzerindeki film kalınlığı (mm) grafiği Şekil 4.70' te verilmiştir.



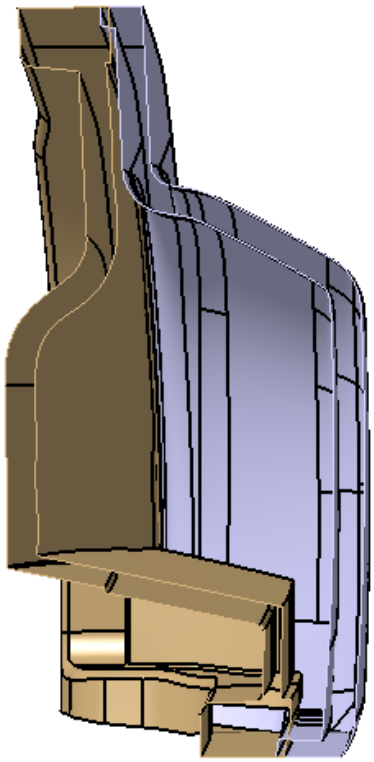
Şekil 4.69. Atego DRL lambası analiz datası noktasal kıyaslama – Sıcaklık/Zaman



Şekil 4.70. Atego DRL lambası analiz datası noktasal kıyaslama – Film kalınlığı/Zaman

Şekil 4.69' da 3 dakika ani soğutma grafiğine bakıldığı zaman başlangıçta noktalar arasında ampule en yakın olandan en uzak olana doğru (nokta 1 → nokta 3) azalacak şekilde (52 °C → 26 °C) sıcaklık değerlerinde farklılık varken soğuma neticesinde bütün noktalar aynı sıcaklık 15 °C değerine düşmektedir. 10 dakika ampuller açık tekrar ısıtmada ise yine aynı sıralamayla noktalar arasındaki sıcaklık farkı ampule olan mesafelerine göre artarak devam etmektedir. Şekil 4.70' teki film kalınlığı grafiğine bakıldığı zaman ise noktalar üzerindeki film kalınlığı değişiminin sıcaklık değişimleriyle uyum içerisinde olmadığı görülmektedir. Bu uyumsuzluk lamba içerisindeki hava akışlarıyla beraber lamba geometrisindeki farklılıkla açıklanabilir. 3 dakika ani soğutma neticesinde alt noktalardan ampule en yakın olan nokta 4 ve en uzak olup hava akışına minimum maruz kalan nokta 6 yaklaşık 5e-05 mm film kalınlığıyla en düşük film tabakası kalınlığına sahiptir. Nokta 2 ve 3 ise 1,3e-03 mm civarında maksimum film kalınlığına sahiptir. Grafikten görüldüğü gibi 3 dakika soğutma neticesinde ortaya çıkan pasif bölgedeki yoğuşma dağılımı üst orta kısma (nokta 2, nokta 3) doğru yoğunluk göstermektedir. Sonrasında 10 dakika ampuller açık ısıtılmaya başlandığında ise ilk olarak en ince film tabakasına sahip nokta 4 ve 6 üzerindeki yoğuşma tamamen ortadan kaybolmaktadır. Sonrasında ise yaklaşık 320. saniyede ampule en yakın olan nokta 1 üzerindeki yoğuşma tamamen yok olmaktadır. Pasif bölge orta kısım alt alandaki nokta 5' teki yoğuşma miktarı ısıtma boyunca genel anlamda düşüş göstermiş olup 10 dakika sonrasında film kalınlığı 0 mm' ye çok yaklaşmış şekilde yoğuşmanın neredeyse kalmadığı görülmektedir. Isıtma sonrasında yine yoğuşmanın pasif bölge orta üst kısımda

kümelendiği görülmektedir. Fakat bu sefer bütün noktalardaki sıcaklık değerlerinde kısmen artış olmasına rağmen nokta 2' deki film kalınlığı ciddi oranda artış göstermiştir. Bunun sebebi olarak lambanın kesiti gösterilebilir. Lambanın py730 dikey kesiti Şekil 4.71 olarak gösterilmiştir. Lamba kesiti incelendiğinde lens yüzeyi üst bölgeye doğru neredeyse yatay bir seviyeye geldiği görülmektedir. Bu yatay konum lens yüzeyi boyunca dikey yöndeki hava hareketlerine direnç göstermekte olup yoğuşmanın o bölgede kümelenmesine sebep olmaktadır.



Şekil 4.71. Atego DRL lambası py730 kesiti

Lens iç yüzeyinde belirlenen noktalar üzerindeki zamana bağlı sıcaklık ve film kalınlığı değişiminin incelenmesinin ardından farklı ısı dağıtım yapılarına sahip lambalarda 10 dakika ampuller açık ısınma sonrasında meydana gelen sıcaklık (°C) ve film kalınlığı (mm) dağılımları dikey ve yatay kesitler üzerinden kıyaslanmıştır. Farklı ısı dağıtım yapısı (bkz. Şekil 4.57) tasarımına sahip lambalar aşağıdaki isimlendirme kullanılarak grafiklerde tanımlanmıştır.

Tasarım 1: normal lamba (ısı dağıtım yapısı yok)

Tasarım 2: lamba üzerinde 1. Isı dağıtım yapısı var

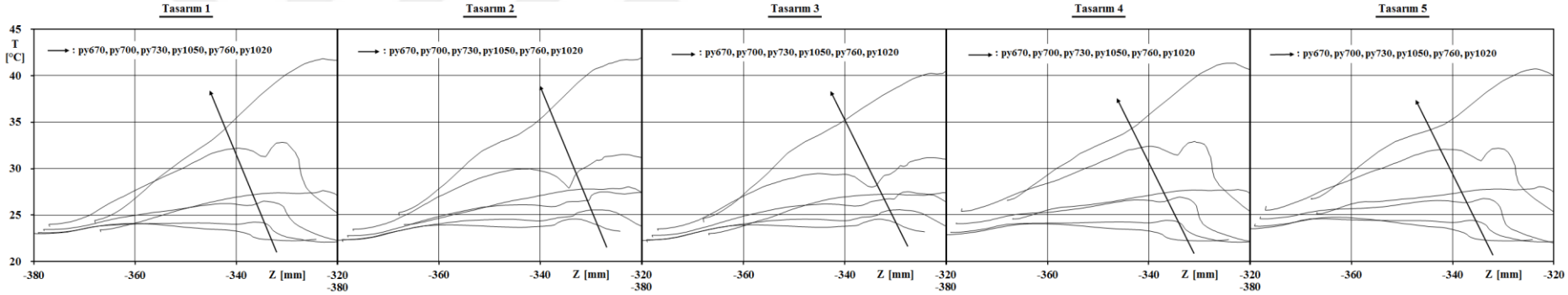
Tasarım 3: lamba üzerinde 2. Isı dağıtım yapısı var

Tasarım 4: lamba üzerinde 3. Isı dağıtım yapısı var

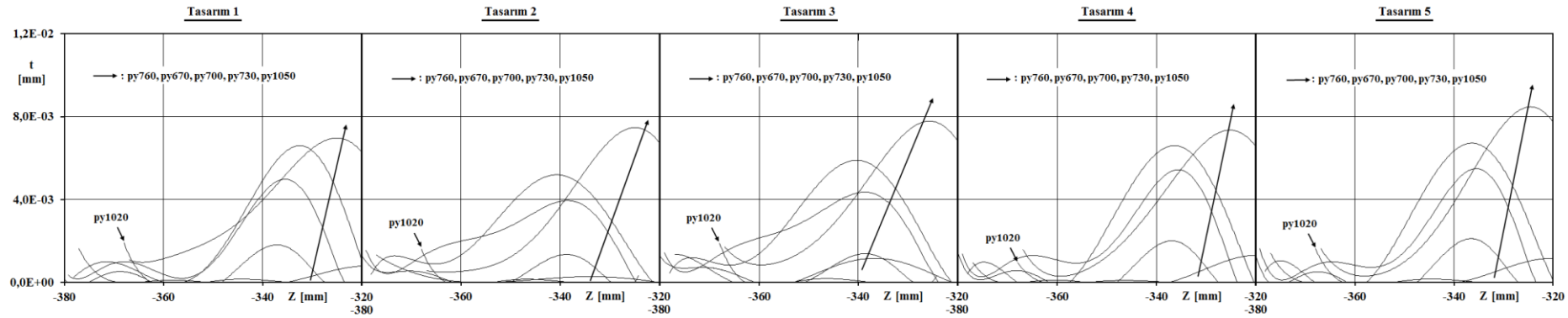
Tasarım 5: lamba üzerinde 4. Isı dağıtım yapısı var

Farklı tasarımların kıyaslandığı dikey kesitler üzerinden elde edilmiş sıcaklık grafiği Şekil 4.72 olarak sunulmuştur. Aynı kesitler üzerinden elde edilmiş film kalınlığı grafiği de Şekil 4.73 olarak sunulmuştur. Tez çalışmasında analiz sürelerindeki kısaltma çalışmaları neticesinde düşük mesh sayılı analiz datası üzerinden bütün çalışmalar yürütülmüştür. Bu bağlamda mesh yapısının büyük elemanlardan oluşması kesit boyunca elde edilen özellikle film kalınlığı eğrisinde ciddi keskin değişkenlikler ortaya çıkarmıştır. Bu sebeple sonuçların daha iyi kıyaslanabilmesi için film kalınlığı grafiklerinde 6. dereceden eğri uydurma yapılarak profiller yumuşatılmıştır.

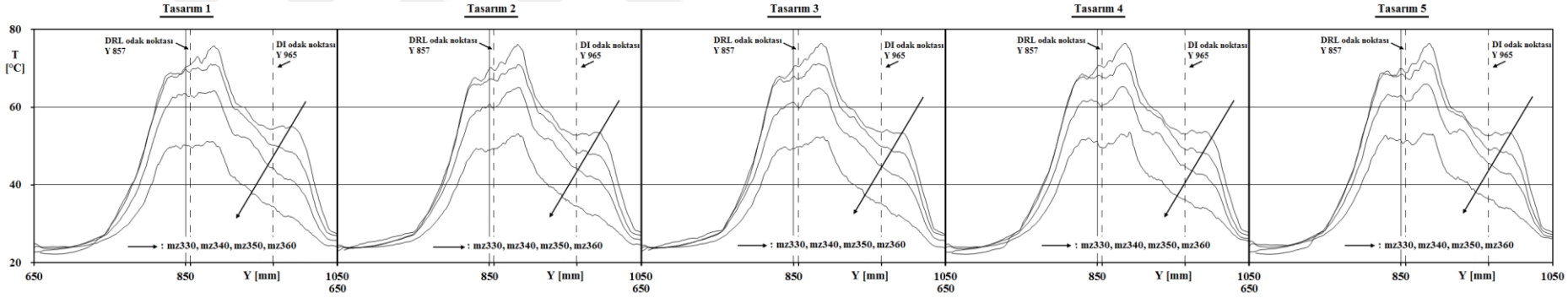
Benzer şekilde kıyaslamalı olarak yatay kesitler üzerinden elde edilmiş sıcaklık grafiği Şekil 4.74 olarak sunulmuştur. Aynı yatay kesitler üzerinden elde edilmiş film kalınlığı grafiği de Şekil 4.75 olarak sunulmuştur. Yine bu grafikte 6. dereceden eğri uydurma yapılarak profiller yumuşatılmıştır.



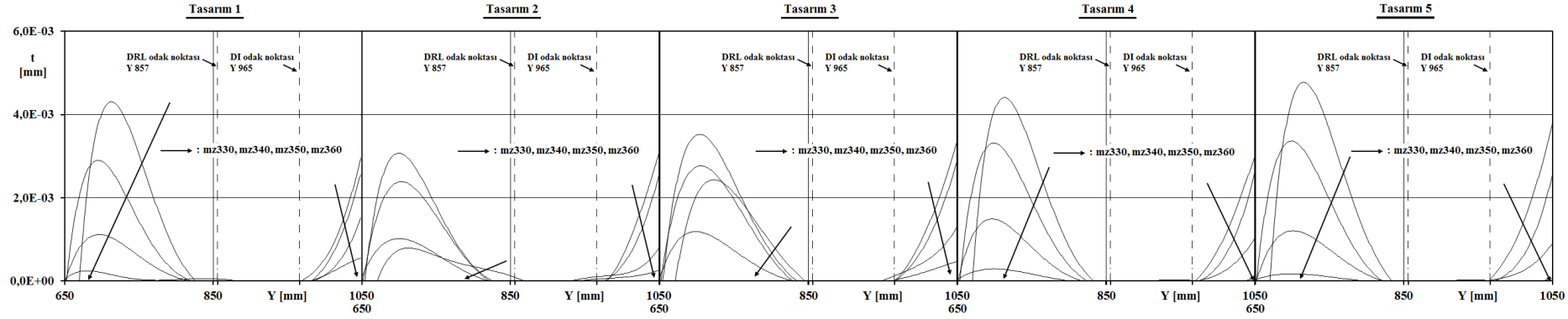
Şekil 4.72. Dikey kesit sıcaklık profillerinin kıyaslanması



Şekil 4.73. Dikey kesit film kalınlığı profillerinin kıyaslanması



Şekil 4.74. Yatay kesit sıcaklık profillerinin kıyaslanması

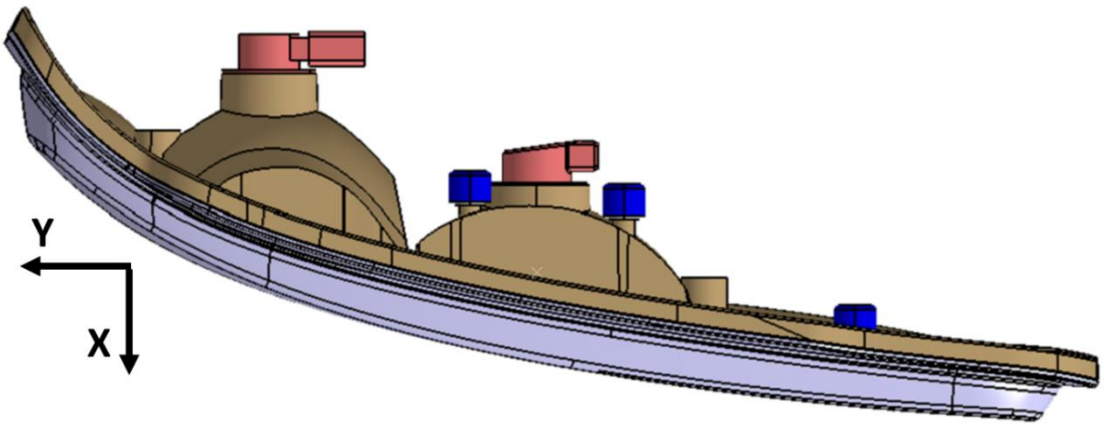


Şekil 4.75. Yatay kesit film kalınlığı profillerinin kıyaslanması

Şekil 4.72' deki grafiklerden Tasarım 1 - normal Atego DRL lambası sıcaklık profillerine bakıldığında 1. pasif bölgedeki dikey kesitlerin (py670 → py760) sıcaklıklarında yaklaşık Z -330' dan sonra düşüş olduğu görülmektedir. Bu bölge Şekil 4.71' deki dikey kesit görüntüsünde belirgin olan lensin üst kısmının gövdeye yaklaştığı bölgedir. Pasif bölgede ısınma ampul bölgesinden gelen hava akışıyla sağlanmaktadır (bkz. Şekil 4.12 ve 4.19) ve bu bölge dar olması sebebiyle hava akışının çok zayıf kaldığı bölgedir. Aynı grafiklerden Tasarım 2 ve Tasarım 3 için ise 1. pasif bölgedeki dikey kesitlerin (py670 → py760) yaklaşık Z -330' dan sonra sıcaklık düşüşleri olmamış yerine artışa bırakmıştır. Bu artışın sebebi ise ısı dağıtım yapısı tasarımı gereği o bölgeye ilave ısı akışı sağlanmıştır. Bu sıcaklık artışı lens yüzeyindeki film kalınlığında da etkisini göstermiştir. Şekil 4.73' te Tasarım 1 için aynı dikey kesitlerin (py670 → py760) film kalınlıklarına bakıldığında maksimum film kalınlığı yaklaşık 6,5e-03 mm değeri Z -330 civarındayken Tasarım 2 ve Tasarım 3 için ise bu değer yaklaşık 5e-03 mm olup Z -340 civarına inmiştir. Tasarım 4 ve Tasarım 5 için ise ısı dağıtım yapısının şeklinden dolayı bu dikey kesitlerin (py670 → py760) üst bölgelerinde tekrar yaklaşık Z -330' dan sonra düşüş olduğu görülmektedir. Fakat özellikle Tasarım 5 için py760 kesiti hariç diğer kesitlerin alt bölgelerinde Z -370 civarındaki sıcaklık değerleri 25 °C hattına yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.72). Tasarım 1 – normal lamba için ise bu değerler 23 °C bandındadır. Bu 2 °C' lik artışın film kalınlığı grafiğinde eğri uydurma yönteminden dolayı net olarak ektisi hissedilememekle beraber, lens yüzeyindeki 3 boyutlu film kalınlığı dağılımına bakıldığında (bkz. Şekil 4.67) alt bölgelerdeki yoğuşmanın gittiği görülmektedir.

Şekil 4.74' teki yatay kesitlerin sıcaklık dağılımına bakıldığı zaman kesitlerin ampul odak bölgelerinden de geçmesi sebebiyle grafikteki dikey eksen sıcaklık göstergesinin değeri büyük olduğu bu sebeple de farklı ısı dağıtım yapılarının (Tasarım 2 → Tasarım 5) sıcaklık profillerindeki etkisi zor seçilebilmektedir. Tasarım 2 ve Tasarım 3 için dikey kesit grafiğinde görülen 1. pasif alanda üst bölgelerdeki sıcaklık artışı eğilimi yatay kesit grafiğinde de mz330 ve mz340 kesitlerinde Y 650 – 750 aralığında görülmektedir. Tasarım 2 ve Tasarım 3 için bu etki Şekil 4.75' te yine Y 650 – 750 aralığında film kalınlığı değerlerinin düşüşü olarak görülmektedir. Yine Şekil 4.75' te en alt yatay kesit mz360 incelendiğinde Tasarım 4 ve Tasarım 5 için ısı dağıtım yapısının şekli gereği Y 1050 bölgesinde film kalınlığının 0 mm civarına düştüğü görülmektedir. Atego DRL

lambasının uzaydaki konumu Y eksenine kıyasla hafif sağa doğru eğiktir (bkz. Şekil 4.68). Bu sebeple Z -360 kesiti Y 1050 konumunda lensin en alt bölgesine denk gelirken, Y 670 bölgesinde Z-370 lensin en alt bölgesine denk gelmektedir. İncelenen sıcaklık ve film kalınlığı profillerinin bütünlük içinde olması için grafiklerde en alt kesit olarak Z -360 dahil edilmiştir. Bu sebeple Şekil 4.74 ve 4.75' e bakıldığı zaman Tasarım 4 ve Tasarım 5 için ısı dağıtım yapısının sıcaklık ve film kalınlığına etkisi Y 650 – 750 aralığında tam olarak görülememektedir. Şekil 4.75' te Tasarım 5 için Y 1050 civarında mz330 kesitinin değeri Tasarım 1 – normal lambaya göre artış gösterirken yaklaşık maksimum 3,8e-03 mm olmuştur. Buradan Tasarım 5' teki ısı dağıtım yapısının etkisiyle yoğuşmanın lens üst kısmına daha fazla kümelendiği söylenebilir. Şekil 4.74' teki sıcaklık dağılımlarında dikkat çeken diğer bir konu da lensteki ampul sebebiyle olan maksimum noktaların tam olarak odak noktasının karşısında olmayıp pozitif Y yönünde kayık olmasıdır. Bunun sebebi lambanın XY düzleminde eğik konumda olması ve buna göre lensin ampule en yakın yüzeyinin pozitif Y yönüne doğru kaymasıdır (Şekil 4.76).



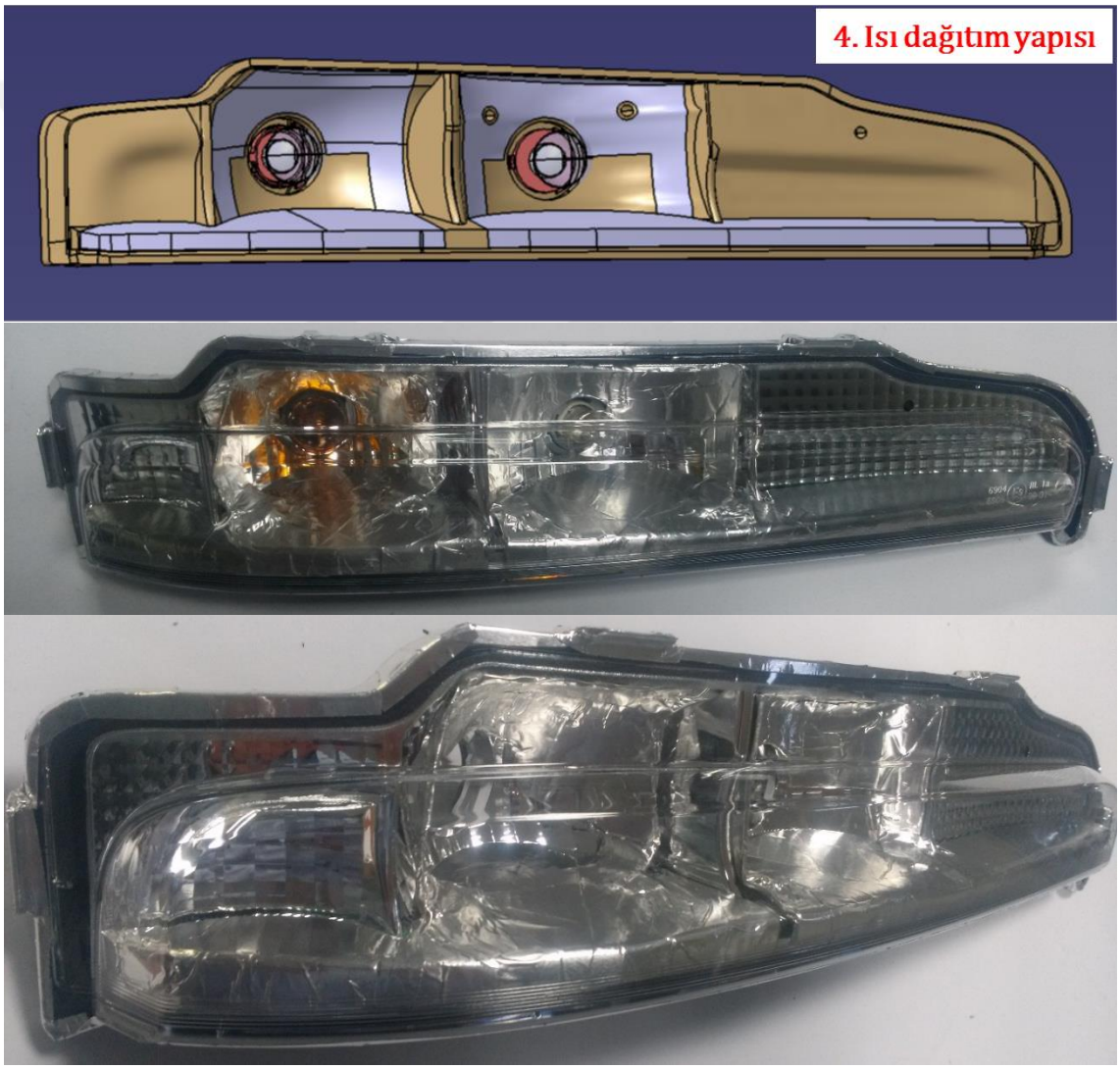
Şekil 4.76. Atego DRL lambasının YX düzlemindeki konumu

4.6.2.6. Lamba İçi Isı Dağıtım Yapısı Prototipi Yoğuşma Testi ve Kıyaslaması

Atego DRL lambası üzerinde yapılan ilk yoğuşma testinde farklı noktalardan sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmişti. Daha sonra uygun kalitede fotoğraf ve video kaydı yapılabilmesi için yoğuşma testi sabit açıdan video kaydı yapılarak ikinci kez tekrar edilmişti. Test Toyota test şartlarına göre gerçekleştirilmiş olup test düzeneğinde HD video kayıt cihazı ve oluşan yoğuşmayı daha iyi görülebilir hale getirmek için yardımcı

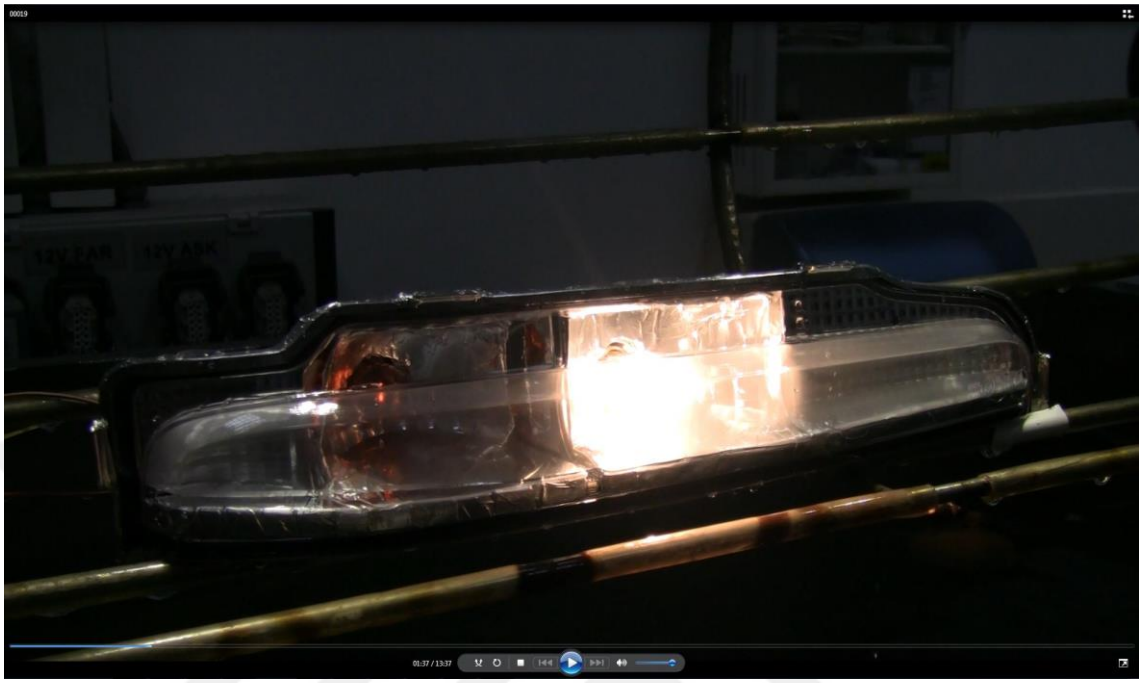
aydınlatma sistemleri kullanılmıştı (bkz. Şekil 4.41). Üçüncü test olarak da bağıl nem ölçümü yapılarak test tekrarlanmıştı.

Analiz ortamında kıyaslanan farklı ısı dağıtım yapıları arasından 4. ısı dağıtım yapısı (Tasarım 5) için prototip yapılmaya karar verilmiştir. Prototip için 1 mm kalınlığında alüminyum alaşım sac kullanılmış ve ısı dağıtım yapısının geometrisine uygun üretilen prototip parça Atego DRL lambası içerisine yerleştirilmiştir. Alüminyum alaşım prototipin dış yüzeyi yayıcılık katsayısının lamba iç optik yüzeylere benzetilmesi amacıyla parlak alüminyum folyo bant ile kaplanmıştır (Şekil 4.77).



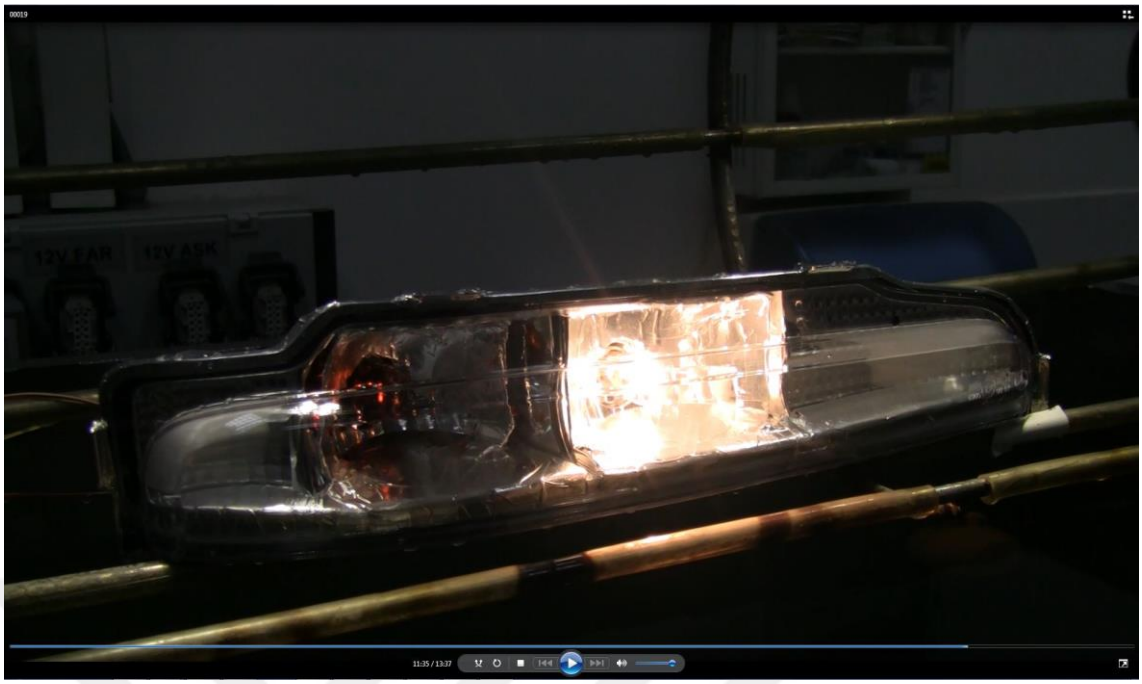
Şekil 4.77. Isı dağıtım yapısı prototipi

Deneysel sonuç olarak prototip için 3 dakika ani soğutma neticesinde elde edilen yoğuşma görüntüsü Şekil 4.78’ de verilmiştir.



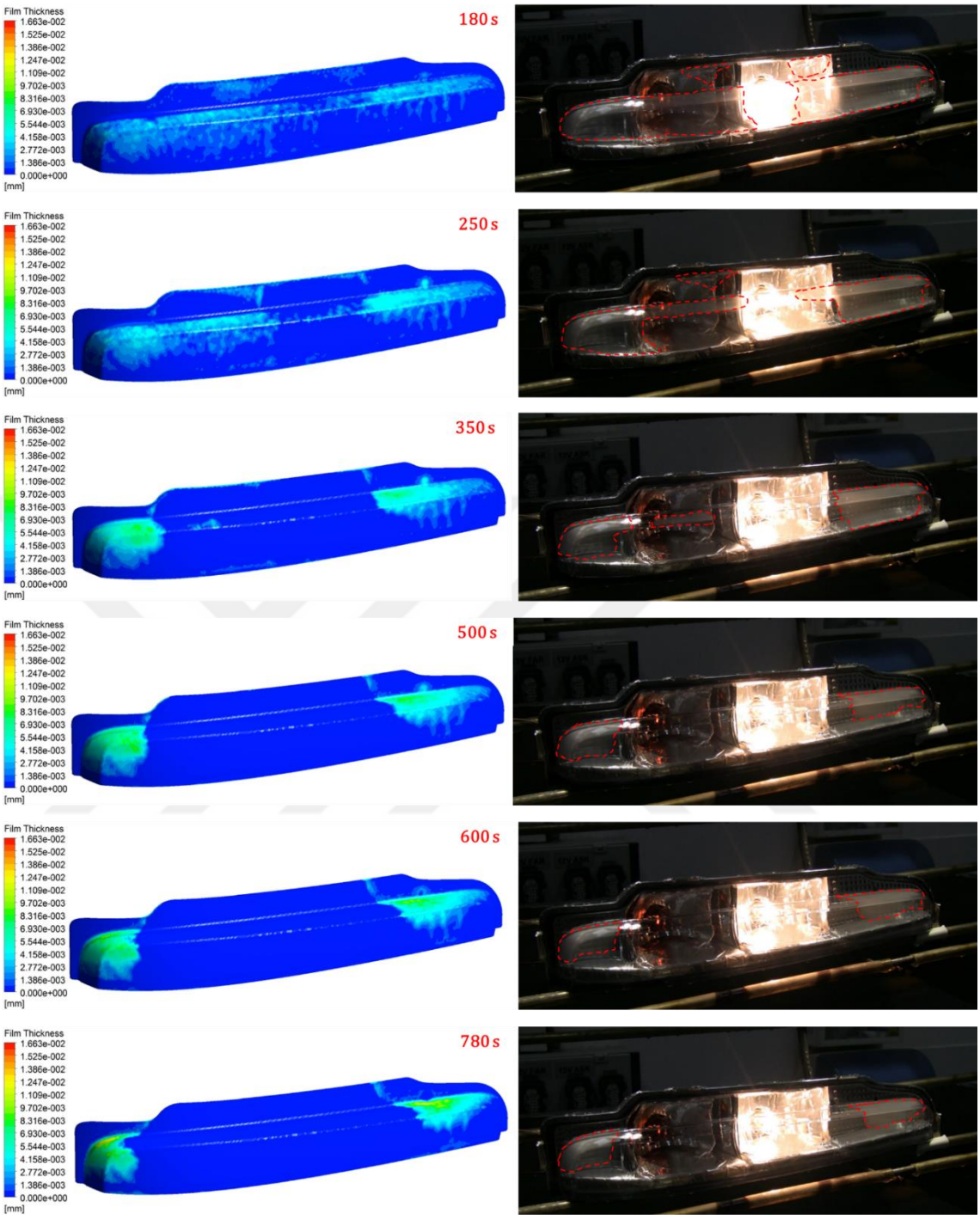
Şekil 4.78. Prototip yoğuşma testi – 3 dakika ani soğutma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü

Deneysel sonuç olarak 3 dakika ani soğutma neticesinde elde edilen yoğuşma sonrası 10 dakika ampuller açık ısıtma neticesinde meydana gelen yoğuşma görüntüsü Şekil 4.79’ da verilmiştir.



Şekil 4.79. Prototip yoğuşma testi – 10 dakika ısıtma sonucunda oluşan yoğuşma görüntüsü

Prototip için zamana bağlı analiz sonucunda elde edilen yoğuşma miktarı ve dağılımı deneysel ortamda video kamera ile kaydedilen yoğuşma miktarı ve dağılımı görüntüleriyle kıyaslanmıştır. Deney sonucu elde edilen görüntüler üzerinde görülebilir yoğuşma bölgeleri kırmızı çizgi ile belirtilmiştir. 3 dakika (180 saniye) ani soğutma sonrası elde edilen yoğuşmadan başlayarak ampuller açık ısıtma aşamasında yoğuşma yapısındaki değişimler sırasıyla 250, 350, 500, 600 ve 780 saniye (10 dakika ampuller açık) olarak Şekil 4.80' de kıyaslanmıştır. Isı dağıtım yapısıyla yapılan analizlerde yoğuşmanın tamamen ortadan kaybolmadığı fakat özellikle alt bölgelerdeki yoğuşmanın kaybolduğu geri kalanın ise lens üst bölgesinde kümelendiği görülmektedir. Aynı durum deneysel sonuçlarda da ortaya çıkmış ve analiz ile deneysel sonuçların dağılımlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu ikinci kıyaslama ile görülen analiz ve deneysel veri uyumu neticesinde yoğuşma analizi kullanılan yöntemin geçerliliği tekrar doğrulanmıştır.



Şekil 4.80. Prototip yoğuşma dağılımı – analiz ve deneysel sonuçların kıyaslanması

Prototip ve analiz çalışmalarının sonucunda ısı dağıtım yapısının lens üzerindeki yoğuşma oluşumunu azaltıcı yönde etkilediği fakat çalışmalarda kullanılan lambada tamamen ortadan kaldırmadığı görülmüştür. SAN-TEZ projesinde analiz ortamında geliştirme yapılabilmesi için kısmen basit konseptte 2 adet P21 ampullü Atego DRL

lambası kullanılmıştır. Genel anlamda ön farlar daha kompleks yapılı olup daha fazla ampul içermektedir. Normal şartlarda farlarda kullanılan H7 tipi halojen ampuller 12V için 58 W gücündedir. Atego DRL lambasındaki P21 tipi ampul 12 V için 26,5W gücündedir. Ampul gücünün artmasıyla oluşan ısının da artışı ısı dağıtım yapısının verimliliğini artıracaktır. Diğer açıdan yoğuşmanın oluştuğu bölge tamamen lambanın stili ile ilişkilidir. Yoğuşma bölgesinin ampule olan uzaklığı, konumu ve aradaki diğer parçalar gibi etkenler ısı dağıtım yapısının tasarımını ve etkinliğini değiştirecektir. Bu kıstaslar doğrultusunda her bir yeni far tasarımında gerekli görüldüğü takdirde ısı dağıtım yapısının tasarımı o konsepte has ele alınmalıdır.

Proje ortağı firma SAN-TEZ projesi kapsamında yürütülen tasarım çalışmaları ile yoğuşmayı önlemeye/gidermeye yönelik olarak önemli bir tasarım yetkinliği kazanmıştır. Yoğuşmanın giderilmesine yönelik olarak geliştirilen ısı dağıtım yapısı tasarım yöntemi firmanın bundan sonraki ticari projelerinde yoğuşma problemine karşılık olarak kullanılması planlanmaktadır.

5. SONUÇ

Otomotiv dış aydınlatma sistemlerinde gelişim, teknolojinin her dalında olduğu gibi süreklilik halinde devam etmektedir. Işık kaynaklarında, teknolojide, yöntemlerde ve performansta gelişim eş zamanlı olarak yönetilmesi gereken farklı problem ortaya çıkarmıştır. Optik ışık kırıcı prizmaların olmadığı şeffaf lensli farların kullanılması far içerisinde oluşabilecek herhangi bir görsel problemin çok çabuk fark edilebilmesini sağlamıştır. Ayrıca plastik parçaların kullanılmasıyla sıra dışı geometride far tasarımlarının yapılması far içerisinde sıcaklığın daha dengesiz yayılmasına ve ilave olarak hava akışının yetersiz olduğu bir çok pasif bölge oluşumuna imkan vermiştir. Dolayısıyla günümüz farlarındaki çalışma şartları lens üzerinde yoğuşma oluşumuna daha elverişli hale gelmiş ayrıca oluşan yoğuşmanın fark edilmesi de bir o kadar kolaylaşmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde günümüzde otomotiv dış aydınlatma ürünlerinin karşılaştığı problemler arasında öne çıkanlardan biri aydınlatma sistemini oluşturan yapısal parçaların fazla ve düzensiz ısınması ile lens üzerinde meydana gelen yoğuşmanın görülebilir olması veya daha da ötesi optik performansı olumsuz etkilemesidir.

Yeni nesil bir taşıt aydınlatma sisteminin ısıl kriterler ve yoğuşma önleme odaklı tasarımı ve prototip imalatı amacıyla yürütülen bu SAN-TEZ projesi kapsamında ilk olarak hayata geçirilecek yeni nesil taşıt aydınlatma sisteminin tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bütün ısıl kriter ve mekanizmaların bilimsel yöntem ve yaklaşımlar ile tasarım sürecine dahil edilmesi amacı ile kapsamlı bir literatür araştırması yürütülmüştür. Buradan elde edilen detaylı malzeme termodinamik özellikleri gibi bilgiler ve simülasyon yöntemleri firmanın CFD (computational fluid dynamics) yazılımıyla yürüttüğü denge hali zamandan bağımsız far termal analiz sürecine dahil edilerek analiz hassasiyeti %90-95 mertebelerine çıkarılmıştır. Proje kapsamında yürütülen çalışmalar aşağıdaki sıralamada gerçekleştirilmiştir.

- Zamandan Bağımsız Termal Analiz Çalışmaları
- Zamana Bağlı Termal Analiz Çalışmaları
- Yoğuşma Testi
- Yoğuşma Analizi

- Yoğuşma Analizi ve Deneysel Sonuçların Kıyaslanması
- Yoğuşma Azaltıcı – Önleyici Isı Dağıtım Yapısı Çalışmaları

Zamandan bağımsız analiz çalışmalarında dairesel geometrili bir lamba üzerinde yapılmıştır ve simülasyonda ışınım modellenmesinin neticelerinin daha iyi kıyaslanabilmesi için alüminyum kaplamalı, alüminyum kaplamasız açık gri ve siyah reflektörlü (ε_1=0.04, ε_2=0.42 ve ε_3=0.95) üç lamba analiz edilip sonuçları detaylı bir şekilde kıyaslanmıştır.

Kıyaslama neticesinde düşük yayıcılık katsayılı (ε_1=0.04) reflektörde ampulden gelen ışınım enerjisi çoğunlukla lense doğru yansıtılmakta olduğu, dolayısıyla reflektör sıcaklık dağılımında baskın bir rol oynamadığı görülmüştür. Aynı bakış açısıyla yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) reflektör tarafından yutulan ışınım enerjisinin arttığı ve ampul alt bölgelerinde sıcaklığın arttığı görülmüştür. Ayrıca yine yayıcılık katsayısının artmasıyla ($\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_3$) reflektör sıcaklık dağılımında ampul filamanı konum etkisinin de hissedilmeye başladığı tespit edilmiştir. Ampul filamanı yatay silindir olarak modellenmiştir ve silindirin geniş alanının daha fazla ışınım yaydığı bilgisiyle birlikte ε_3=0.95 durumu için θ=90° ve 270° konumundaki sıcaklıkların θ=180° en alt bölgedeki sıcaklıktan daha düşük olduğu görülmüştür. Sıcaklık dağılımı açısından bakıldığında lensin reflektör ile ters orantılı bir şekilde ışınım enerjisinden etkilendiği görülmüştür. Reflektör yayıcılık katsayısının azalmasıyla ($\varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_1$) daha fazla ışınım yansıtmakta ve dolayısıyla daha yüksek ışınıma maruz kalan lens sıcaklığının arttığı ve ayrıca maksimum sıcaklığın olduğu konumun da etkilendiği görülmüştür. ε_1=0.04 durumunda lens maksimum sıcaklığı üst orta bölgedeyken ε_2=0.42, ε_3=0.95 durumlarında lens üzerinde ışınım etkisinin azalması ve taşınım etkisinin artmasıyla birlikte lensin üst duvarının da sıcaklığında artış olduğu tespit edilmiştir. Yüksek reflektör yayıcılık katsayısı ($\varepsilon_3 > \varepsilon_2$) lense gelen ışınım etkisinin azalması anlamına gelmesine rağmen ε_2=0.42 ve ε_3=0.95 durumları için maksimum sıcaklık değerleri 89 °C ve 90 °C olacak şekilde neredeyse birbirleriyle aynı olduğu görülmüştür. Bu durumun sebebi olarak da ε_3=0.95 reflektör yüzeyindeki sıcaklık artışı lamba iç havasının genel sıcaklığında da artışa neden olmakta ve bununla alakalı olarak lensteki sıcaklık üzerinde ışınım enerjisini azalma etkisi daha sıcak iç havayla artan taşınım etkisiyle nötrlendiği tespiti yapılmıştır. Dairesel geometrili lamba üzerinde yapılan denge hali zamandan bağımsız analiz sonuçları ayrıca deneysel

verilerle kıyaslanmış ve genel ortalama sapmanın %5 civarında olmasıyla deneysel sonuçlar ile analiz sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

İlk çalışmadan elde edilen analiz yöntemleri ve detaylı malzeme özellikleri kullanılarak yoğuşma çalışmalarında kullanılacak olan kompleks geometrili Atego DRL lambası üzerinde de zamandan bağımsız analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalar ANSYS CFX yazılımıyla yürütülmüş olup Atego DRL lambası üzerinde yapılan çalışmalarda daha iyi kıyaslama yapılabilmesi için FLUENT yazılımı da kullanılmıştır. Bir sonraki adım zaman bağlı analizlerin çözümünde her bir zaman dilimi kendi içerisinde iterasyon yapılacağı için modelin toplam mesh sayısı çok önemlidir. Bu bağlamda Atego DRL lambasının zamandan bağımsız analiz çalışmalarında hem farklı yazılım (ANSYS CFX / FLUENT) hem de farklı mesh sayıları için analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel veriler ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama neticesinde aynı mesh sayısında farklı yazılımlar ile yapılan analiz sonuçlarının deneysel verilerden sapma miktarı kendi aralarında bazı tekil noktalar hariç genel anlamda 1-2 °C civarında arasında olduğu görülerek ciddi derecede uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Farklı mesh sayıları ile yapılan analizlerin sonuçları kıyaslandığında da mesh sayısı düştükçe deneysel verilerle sapma miktarının arttığı görülmüştür. Fakat buna rağmen zamana bağlı analiz çalışmaları için çok uzun analiz çözme süreleri gerektiği için tez çalışması kapsamında sonraki adımda yürütülen zamana bağlı ve yoğuşma analiz çalışmalarında düşük mesh sayılı model kullanılmıştır. Zamana bağlı analiz çalışmalarında da yine ANSYS CFX ve FLUENT yazılımları kullanılarak kıyaslama yapılmıştır. Her iki yazılım için elde edilen sonuçlarda sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimleri deneysel verilerle uyumlu olduğu ve genel sapma oranının denge hali zamandan bağımsızda elde edilen hassasiyette olduğu görülmüştür. Analizlerde SAN-TEZ projesi kapsamında yapılan yatırım ile temin edilmiş 4 adet iş istasyonu bilgisayar birbirlerine paralel bağlı olacak şekilde analiz çözümlerinde kullanılmıştır. CFX zamana bağlı analizinde 340 saniyelik gerçek analiz süresinin çözümlenmesi yaklaşık 27 gün sürmüştür. FLUENT zamana bağlı analizinde ise toplam 2070 saniyelik bir analiz çözülmesi yaklaşık 9 gün sürmüştür. Buradan yola çıkılarak FLUENT yazılımın analizlerde kullanılan modelimiz için birden fazla bilgisayarın paralel bağlanmasıyla yapılan çözüm işleminde daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkarılmıştır. Bu sebeple sonraki çalışmalara FLUENT yazılımıyla devam edilmiştir.

Lamba üzerinde yoğuşma oluşumu üzerinde yapılan çalışmalara ilk olarak yoğuşma testi ile başlanmıştır. Test yöntemi olarak TOYOTA firmasının test şartnamesi kullanılmıştır. Testte genel mantık olarak önce lamba içerisinde nemli hava giriş sağlanmakta, ikinci adımda lambada ampuller açılarak sıcaklığın artması sağlanmakta, üçüncü aşamada soğuk su ile lamba ani soğutularak lens üzerinde yoğuşma oluşumu gerçekleştirilmekte ve son olarak da ampuller belirli bir süre için tekrar açılarak lens üzerindeki yoğuşma davranışı incelenmektedir. Atego DRL lambası üzerine yapılan yoğuşma testinde ilk olarak sıcaklık ölçümleri yapılmış, sonrasında ise HD video kaydı ile yoğuşmanın zaman içerisindeki davranışı görüntülenmiştir.

Yoğuşma oluşumu ve zamana bağlı değişiminin analizinde FLUENT yazılımının Eulerian Wall Film (EWF) modeli kullanılmıştır. Atego DRL lambasının yoğuşma analiz yöntemi olarak da farklı çalışmalar sonucunda aşağıdaki sıralamaya karar verilmiştir.

1. Dış havanın modellenmiş olduğu yapı denge halinde zamandan bağımsız analiz yapılarak ampuller açık vaziyette lamba ısıtılmaktadır.
2. Ani soğuma işleminin analizi için 1. aşamada elde edilen analiz dosyasındaki dış hava 15 °C sıcaklıkta alüminyum katı olarak tanımlanmakta ve ampuller kapalı olacak şekilde 3 dakika boyunca zamana bağlı analiz yapılmaktadır. Bu aşamada FLUENT EWF modeli çalıştırılarak yoğuşma oluşumu görülmektedir.
3. 2. Aşamada elde edilen yoğuşma oluşmuş analiz dosyasında dış hava bölgesi katı alüminyum yerine tekrar 23 °C hava olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca ampuller açılarak 10 dakika zamana bağlı analiz yapılmakta ve oluşan yoğuşmanın gitmesi gözlenmektedir.

Yoğuşma analizi sonucunda elde edilmiş lens üzerindeki yoğuşma dağılımı yoğuşma deneyinde kaydedilen görüntüler ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama analizin belirli zaman dilimleri için yapılmıştır. Sonuçlar arasındaki uyum her iki görüntü yan yana konularak ve yoğuşma sınırlar görüntüler üzerinde belirtilerek ortaya çıkarılmıştır.

Yoğuşma analizleri sonrasındaki adımda ise yenilikçi bir fikir olarak lamba içerisinde sıcak bölgedeki ısının yoğuşmanın büyük oranda gerçekleştiği daha soğuk bölgeye taşınmasını sağlayan ısı dağıtım yapısı çalışmaları yürütülmüştür. Bu yapıların genel

mantığı hemen ampul bölgesindeki sıcak yüzeylere temas eden metal iletim ile ısıyı kendi gövdesi üzerinden soğuk bölgeye taşıyacak ve o bölgeyi ısıtacak olmasıdır.

İlk olarak ısı dağıtım yapısı lamba dış yüzeyinde tasarlanmış fakat analizler sonucunda metal ısı dağıtım yapısının dış havadan daha çok etkilenerek arzulandığı gibi lambanın pasif bölgesinde belirgin bir sıcaklık artışına sebep olmadığı görülmüştür. Bunun sonrasındaki denemelerde 4 adet farklı ısı dağıtım yapısı lamba içerisinde tasarlanarak her biri üzerinde yoğuşma analizi yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bütün ısı dağıtım yapılarının pasif bölgedeki yoğuşma dağılımını etkilediği görülmüştür. Fakat 4. ısı dağıtım yapısı olarak adlandırılan modelin yapısı pasif bölgede lensin en alt konumuna kadar gelmesi sebebiyle kısmen sıcak havanın soğuk lens yüzeyinin en altından başlayarak temas etmesini sağlaması sebebiyle yoğuşma dağılımını en iyi şekilde etkilediği tespit edilmiştir. Bu bağlamda 4. ısı dağıtım yapısının prototip yapılarak deneysel ortamda yoğuşmayı nasıl etkilediği gözlenmiştir.

Isı dağıtım yapısıyla yapılan analizlerde yoğuşmanın tamamen ortadan kaybolmadığı fakat özellikle alt bölgelerdeki yoğuşmanın kaybolduğu geri kalanın ise lens üst bölgesinde kümelendiği görülmüştür. Aynı durum deneysel sonuçlarda da ortaya çıkmış ve analiz ile deneysel sonuçların dağılımlarının birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu ikinci kıyaslama ile görülen analiz ve deneysel veri uyumu neticesinde yoğuşma analizi kullanılan yöntemin geçerliliği tekrar doğrulanmıştır.

Prototip ve analiz çalışmalarının sonucunda ısı dağıtım yapısının lens üzerindeki yoğuşma oluşumunu azaltıcı yönde etkilediği fakat çalışmalarda kullanılan lambada tamamen ortadan kaldırmadığı görülmüştür. SAN-TEZ projesinde analiz ortamında geliştirme yapılabilmesi için kısmen basit konseptte 2 adet P21 ampullü Atego DRL lambası kullanılmıştır. Genel anlamda ön farlar daha kompleks yapılı olup daha fazla ampul içermektedir. Normal şartlarda farlarda kullanılan H7 tipi halojen ampuller 12V için 58 W gücündedir. Atego DRL lambasındaki P21 tipi ampul 12 V için 26,5W gücündedir. Ampul gücünün artmasıyla oluşan ısının da artışı ısı dağıtım yapısının verimliliğini artıracaktır. Diğer açıdan yoğuşmanın oluştuğu bölge tamamen lambanın stili ile ilişkilidir. Yoğuşma bölgesinin ampule olan uzaklığı, konumu ve aradaki diğer parçalar gibi etkenler ısı dağıtım yapısının tasarımını ve etkinliğini değiştirecektir. Bu

kıstaslar doğrultusunda her bir yeni far tasarımında gerekli görüldüğü takdirde ısı dağıtım yapısının tasarımı o konsepte has ele alınmalıdır.

Proje ortağı firma SAN-TEZ projesi kapsamında yürütülen tasarım çalışmaları ile yoğuşmayı önlemeye/gidermeye yönelik olarak önemli bir tasarım yetkinliği kazanmıştır. Yoğuşmanın giderilmesine yönelik olarak geliştirilen ısı dağıtım yapısı tasarım yöntemi firmanın bundan sonraki ticari projelerinde yoğuşma problemine karşılık olarak kullanılması planlanmaktadır.

Takip eden süreçlerde, projede elde edilen yoğuşma analizi metodolojisinin geliştirilmesi, yaygın hale getirilmesi ve ısı dağıtım yapılarının etkinliğinin farklı tasarımlarda incelenmesi için gelecek dönem çalışmalar kompleks geometrili ön farlar üzerine oluşturulmalıdır. Bu çalışmalarda farklı ampul tipleri üzerine analiz çeşitliliği artırılmalı bunun haricinde LED tipi ışık kaynaklarının kullanıldığı ön far sistemlerinde de çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Agarwal, A., Garimella, S. 2010. Representative results for condensation measurements at hydraulic diameters similar to 100 microns. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 132: Article Number: 041010.

Al-Mdallal, Q.M., Syam, M.I., Ariel, P.D.. 2011. The extended homotopy perturbation method and boundary layer flow due to condensation and natural convection on a porous vertical plate. *International Journal of Computer Mathematics*, 88: 3535-3552.

Ali, H.M., Briggs, A. 2012. Enhanced condensation of ethylene glycol on single pin-fin tubes: Effect of pin geometry. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 134: Article Number: 011503.

Amara, M., Timchenko, V., El Ganaoui, M.A. 2009. 3D computational model of heat transfer coupled to phase change in multilayer materials with random thermal contact resistance. *International Journal of Thermal Sciences*, 48: 421-427.

Anonim, 2006. 2006-03_Transmittance P21W clear (Soda Lime Glass 241). OSRAM.

Anonim, 2008. Datasheet, CI 7506L P21W 21W - lead free. Version ZCI 1884099[00]. OSRAM.

Anonim, 2009. Datasheet, CI 7507 PY21W 21W - lead free. Version ZMP_60924. OSRAM.

Anonim, 2010. Datasheet, Transmission Curve for DiakonTM Standard Grades. Lucite International.

Anonim, 2014. FLOEFD Material Library.

Anonim, 2015. ANSYS FLUENT Theory guide, Eulerian Wall Films.

Bandhauer, T.M., Agarwal, A., Garimella, S. 2006. Measurement and modeling of condensation heat transfer coefficients in circular microchannels. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 128: 1050-1059.

Belogorokhov, A.I., Bublik, V.T., Scherbachev, K.D. 1999. Behaviour of implanted oxygen and nitrogen in halogen lamp annealed silicon. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 147: 320-326.

Ben, S.M., Askri, F., Ben, N.S. 2005. Unstructured control-volume finite-element method for radiative heat transfer in a complex 2-D geometry. *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, 48: 477-497.

Benelmir, R., Mokraoui, S., Souayed A. 2009. Numerical analysis of filmwise condensation in a plate fin-and-tube heat exchanger in presence of non-condensable gas. *Heat and Mass Transfer*, 45: 1561-1573.

Boduroğlu, S. 2010. Bir dış aydınlatma farının nümerik ısıl performans incelemesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. (*in press*). A computational and experimental investigation of the metallisation effects on the thermal characteristics of an automotive exterior Lighting Lamp. *International Journal of Vehicle Design.*

Brunberg, J., Aspelin M. 2011. CFD modelling of headlamp condensation. Master' s Thesis in Automotive Engineering, Chalmers University of Technology, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Department of Applied Mechanics, Göteborg, Sweden.

Carbonaro, M., Marsili, R., Maggiorana, P. 2002. An innovative methodology in the characterization of the halogen lamp as a reference source for heat flux sensor calibration. *Measurement Science & Technology*, 13: 932-938.

Chaabane, R., Askri, F., Ben, N.S. 2011. Parametric study of simultaneous transient conduction and radiation in a two-dimensional participating medium. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 16: 4006-4020.

Chai, J.C. 2003. One-dimensional transient radiation heat transfer modeling using a finite-volume method. *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, 44: 187-208.

Chang, P.C., Hwang, S.J. 2006. Simulation of infrared rapid surface heating for injection molding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 3846-3854.

Chang, T.B. 2008a. Mixed-convection film condensation along outside surface of vertical tube in saturated vapor with forced flow. *Applied Thermal Engineering*, 28: 547-555.

Chang, T.B. 2008b. Laminar filmwise condensation on horizontal disk embedded in porous medium with suction at wall. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 130: Article Number: 071502.

Chang, T.B., Wang, F.J. 2009. An analytical investigation into filmwise condensation on a horizontal tube in a porous medium with suction at the tube surface. *Heat and Mass Transfer*, 45: 355-361.

Chen, S.C., Peng, H.S., Chang, J.A. 2004. Simulations and verifications of induction heating on a mold plate. International Communications in Heat and Mass Transfer, 31: 971-980.

Chen, Y., Zhao, H., Wang, Z. 2009. Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source. Optical Review, 16: 26-29.

Cheng, L., Junming, L. 2011. Laminar forced convection heat and mass transfer of humid air across a vertical plate with condensation. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 19: 944-954.

Chin, Y.S., Ormiston, S.J., Soliman, H.M. 1998. A two-phase boundary-layer model for laminar mixed-convection condensation with a noncondensable gas on inclined plates. *Heat and Mass Transfer*, 34: 271-277.

Cho, Y., Kim, J.J. 2011. Lifetime decrease of halogen lamps for automotive by duty cycle stress. *IEEE Transactions on Reliability*, 60: 550-556.

Cui, X., Li, B.Q. 2004. A discontinuous finite-element formulation for multidimensional radiative transfer in absorbing, emitting, and scattering media. *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, 46: 399-428.

Du, J., Wu, J., Song, L. 2011. Reflectivity and absorption coefficient of a borosilicate glass during 60 Co-γ irradiation calculated from data measured by an integrating sphere. *Radiation Effects & Defects in Solids*, 167:37–48.

El-Genk, M.S., Tournier, J.M. 2008a. On the use of noble gases and binary mixtures as reactor coolants and CBC working fluids. *Energy Conversion and Management*, 49: 1882-1891.

El-Genk, M.S., Tournier, J.M. 2008b. Noble gas binary mixtures for gas-cooled reactor power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 238: 1353-1372.

Fratty, H. 2015. Lighting the soul of car design. Driving vision news, Escourbiac I'imprimeur, France.

Gong, G., Chen, F., Su, H. 2012. Thermodynamic simulation of condensation heat recovery characteristics of a single stage centrifugal chiller in a hotel. *Applied Energy*, 91: 326-333.

Görür, B. A. 2013. Araç aydınlatma sistemlerindeki yoğuşma problemi analizi ve tasarım açısından incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Groff, M.K., Ormiston, S.J., Soliman, H.M. 2002. An algebraically-explicit correlation for forced-convection condensation of steam-air and steam-hydrogen on horizontal plates. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29: 1047-1056.

Grooten, M.H.M., van der Geld, C.W.M. 2012. Surface property effects on dropwise condensation heat transfer from flowing air-steam mixtures to promote drainage. *International Journal of Thermal Sciences*, 54: 220-229.

Gstoehl, D., Thome, J.R. 2006a. Film condensation of R-134a on tube arrays with plain and enhanced surfaces: Part I - Experimental heat transfer coefficients. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 128: 21-32.

Gstoehl, D., Thome, J.R. 2006b. Film condensation of R-134a on tube arrays with plain and enhanced surfaces: Part II - Empirical prediction of inundation effects. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 128: 33-43.

Heynderickx, G.J., Nozawa, M. 2005. Banded gas and nongray surface radiation models for high-emissivity coatings. *American Institute of Chemical Journal*, 51(10): 2721-2736.

Huang, I., Liu H.H., Yu C.C. 2000. Design for control: Temperature uniformity in rapid thermal processor. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 17: 111-117.

Hudoklin, D., Drnovsek, J., Pusnik, I. 2002. Simultaneous calibration of a large number of thermocouples. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51: 1015-1018.

Incropera, F.P., De Witt, D.P. 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, New York.

Iqbal, O., Bansal, P. 2012. In-tube condensation heat transfer of CO2 at low temperatures in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale du Froid*. 35: 270-277.

Jiang, F., Ris, J.L., Khan, M.M. 2009. Absorption of thermal energy in PMMA by in-depth radiation. *Fire Safety Journal*, 44: 106–112.

Jiang, Y., Mitra, B., Garimellal, S. 2007. Measurement of condensation heat transfer coefficients at near-critical pressures in refrigerant blends. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 129: 958-965.

Kang, Y., Morita, K. 2006. Thermal conductivity of the CaO-Al2O3-SiO2 system. *ISIJ International*, 46: 420-426.

Kang, H.C., Kim, M.H. 1999. Characteristics of film condensation of supersaturated steam-air mixture on a flat plate. *International Journal of Multiphase Flow*, 25: 1601-1618.

Kersch, A., Schafbaur, T. 2000. Thermal modelling of RTP and RTCVD processes. *Thin Solid Films*, 365: 307-321.

Khaled, A.R.A., Radhwan, A.M., Al-Muaikel, S.A. 2009. Analysis of laminar falling film condensation over a vertical plate with an accelerating vapor flow. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 131: Article Number: 071304.

Khashan, M.A., Nassif, A.Y. 2001. Dispersion of the optical constants of quartz and polymethyl methacrylate glasses in a wide spectral range: 0.2-3 μm. *Optics Communications*, 188: 129-139.

Kim, S.J., Cho, Y.M. 2002. Optimal design of a rapid thermal processor via physics-based modeling and convex optimization. *Control Engineering Practice*, 10: 1199-1210.

Kim, S., Kim, K.J. 2011. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 133: Article Number: 081502.

Kitamura, R., Pilon, L. 2009. Radiative heat transfer in enhanced hydrogen outgassing of glass. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34: 6690-6704.

Koch, G., Kraft, K., Leipertz, A. 1998. Parameter study on the performance of dropwise condensation. *Revue Generale de Thermique*, 37: 539-548.

Lee, S.Y., Hibiki, T., Ishii, M. 2009. Formulation of time and volume averaged two-fluid model considering structural materials in a control volume. *Nuclear Engineering and Design*, 239: 127-139.

Li, Y., Yan, J., Wang, J. 2011. A semi-empirical model for condensation heat transfer coefficient of mixed ethanol-water vapors. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 133: Article Number: 061501.

Liao, Y. 2010. Revisit of laminar film condensation boundary layer theory for solution of mixed convection condensation with or without noncondensables. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 132: Article Number: 101501.

Lim, G., Kar, A. 2009. Radiative properties of thermal barrier coatings at high temperatures. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 42: Article Number: 155412.

Lin, K., Dold, P. 2001. Radiative heat transfer in a resistance heated floating zone furnace: A numerical study with FIDMAP (TM). *Crystal Research and Technology*, 36: 629-639.

Liu, Y., Hibiki, T., Sun, X. 2008. Drag coefficient in one-dimensional two-group two-fluid model. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29: 1402-1410.

Liu, J., Aizawa, H., Yoshino, H. 2004. CFD prediction of surface condensation on walls and its experimental validation. *Building and Environment*, 39: 905-911.

Logerais, P.O., Chapron, D., Garnier, J. 2008. Validation of a rapid thermal processing model in steady-state. *Microelectronic Engineering*, 85: 2282-2289.

Logerais, P.O., Bouteville, A. 2010. Modelling of an infrared halogen lamp in a rapid thermal system. *International Journal of Thermal Sciences*, 49: 1437-1445.

Lou, C., Zhou, H-C., Yu, P-F., Jiang, Z-W. 2007. Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31: 2771-2778.

Ma, X., Wang, S., Lan, Z. 2012. Wetting mode evolution of steam dropwise condensation on superhydrophobic surface in the presence of noncondensable gas. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 134: Article Number: 021501.

Mancin, S., Del, C.D., Rossetto, L. 2012. Partial condensation of R407C and R410A refrigerants inside a plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 36: 149-157.

Maschmann, M.R., Ma, H.B. 2006. An investigation of capillary flow effect on condensation heat transfer on a grooved plate. *Heat Transfer Engineering*, 27: 22-31.

Mazumder, S., Kersch, A. 2000. A fast Monte Carlo scheme for thermal radiation in semiconductor processing applications. *Numerical Heat Transfer Part B-Fundamentals*, 37: 185-199.

Mei, M., Yu, B., Zou, M. 2011. A numerical study on growth mechanism of dropwise condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 2004-2013.

Meier, M. 1999. Numerical and experimental study of large steam-air bubbles injected in a water pool. *Ph. D. Thesis,* Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, DISS. ETH No. 13091.

Modest, M.F. 1993. Radiative Heat Transfer. McGraw-Hill International Editions.

Moffat, R. J. 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science,* 1: 3-17.

Mohamed, H.A. 2006. Effect of rotation and surface roughness on heat transfer rate to flow through vertical cylinders in steam condensation process. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME,* 128: 318-323.

Mosaad, M. 1999. Combined free and forced convection laminar film condensation on an inclined circular tube with isothermal surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 42: 4017-4025.

Odaymet, A., Louahlia, G.H. 2012. Experimental study of slug flow for condensation in a single square microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 38: 1-13.

Panday, P.K. 2003. Two-dimensional turbulent film condensation of vapours flowing inside a vertical tube and between parallel plates: a numerical approach. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid*, 26: 492-503.

Papadikis, K., Gu S., Bridgwater, A.V. 2011. Eulerian model for the condensation of pyrolysis vapors in a water condenser. *Energy & Fuels*, 25: 1859-1868.

Park, H.M., Jung, W.S. 2001. Recursive solution of an inverse heat transfer problem in rapid thermal processing systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44: 2053-2065.

Pettersson, M., Stenstrom, S. 2000. Modelling of an electric IR heater at transient and steady state conditions Part I: model and validation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 1209-1222.

Pilon, L., Viskanta, R. 2003. Radiation characteristics of glass containing gas bubbles. *Journal of the American Ceramic Society*, 86: 1313–20.

Rouif, S. 2004. Radiation cross-linked plastics: a versatile material solution for packaging, automotive, electrotechnic and electronics. *Radiation Physics and Chemistry*, 71: 527-530.

Rousse, D.R. 2000. Numerical predictions of two-dimensional conduction, convection, and radiation heat transfer. I. Formulation. *International Journal of Thermal Sciences*, 39: 315-331.

Russo, P.A., Carrott, M.M.L.R., Carrott, P.J.M. 2012. Trends in the condensation /evaporation and adsorption enthalpies of volatile organic compounds on mesoporous silica materials. *Microporous and Mesoporous Materials*, 151: 223-230.

Salimpour, M.R., Yarmohammadi, S. 2012. Effect of twisted tape inserts on pressure drop during R-404A condensation. *International Journal of Refrigeration-Revue Internationale du Froid*, 35: 263-269.

Salti, B., Laraqi, N. 1999. 3-D numerical modeling of heat transfer between two sliding bodies: temperature and thermal contact resistance. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42: 2363-2374.

Senin, S., E.P. Wachsmann, C. Karcher. 2005. Thermal Analysis in Automotive Components. ISAL 2005 Symposium, Darmstadt University of Technology, Germany.

Shah, A., Chughtai, I.R., Inayat, M.H. 2010. Numerical simulation of direct-contact condensation from a supersonic steam jet in subcooled water. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18: 577-587.

Shamoun, B. 2001. Photomask patterning: the influence of substrate bulk heating on placement accuracy. *Microelectronic Engineering*, 57: 447-452.

Shang, D.Y., Wang, B.X. 1997. An extended study on steady-state laminar film condensation of a superheated vapour on an isothermal vertical plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40: 931-941.

Schulz, U., Munzert, P., Kaiser, N. 2010. Plasma surface modification of PMMA for optical applications. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24: 1283-1289.

Shuyuan, Z., Boming, Z., Shanyi, D. 2009. Effects of contact resistance on heat transfer behaviors of fibrous insulation, *Chinese Journal of Aeronautics*, 22: 569-574.

Siegel, R., Howell, J.R. 1992. Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis, Washington DC.

Siow, E.C., Ormiston, S.J., Soliman, H.M. 2004. A two-phase model for laminar film condensation from steam-air mixtures in vertical parallel- plate channels. *Heat and Mass Transfer*, 40: 365-375.

Siow, E.C., Ormiston, S.J., Soliman, H.M. 2007. Two-phase modelling of laminar film condensation from vapour-gas mixtures in declining parallel- plate channels. *International Journal of Thermal Sciences*, 46: 458-466.

Son, C.H., Oh, H.K. 2012. Condensation heat transfer characteristics of CO2 in a horizontal smooth- and microfin-tube at high saturation temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 36: 51-62.

Song, J.H., Ishii, M. 2000. The well-posedness of incompressible one-dimensional two-fluid model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43: 2221-2231.

Song, J.H., Ishii, M. 2001. The one-dimensional two-fluid model with momentum flux parameters. *Nuclear Engineering and Design*, 205: 145-158.

Song, C.H., Cho, S., Kang, H.S. 2012. Steam jet condensation in a pool: From fundamental understanding to engineering scale analysis. *Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME*, 134: Article Number: 031004.

Srzic, V., Soliman, H.M., Ormiston, S.J. 1999. Analysis of laminar mixed-convection condensation on isothermal plates using the full boundary-layer equations: mixtures of a vapor and a lighter gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42: 685-695.

Stefanidis, G. D., Van Geem, K. M., Heynderickx, G.J., Marin G. B. 2008. Evaluation of high-emissivity coatings in steam cracking furnaces using a non-grey gas radiation model. *Chemical Engineering Journal*, 137: 411-421.

Steimacher, A., Astrath, N.G.C., Novatski, A. 2006. Characterization of thermo-optical and mechanical properties of calcium aluminosilicate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352: 3613-3617.

Sun, X.D., Ishii, M., Kelly, J.M. 2003. Modified two-fluid model for the two-group interfacial area transport equation. *Annals of Nuclear Energy*, 30: 1601-1622.

Tang, Q., Denison, M., Adams, B. 2009. Towards comprehensive computational fluid dynamics modeling of pyrolysis furnaces with next generation low-NO(x) burners using finite-rate chemistry. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32: 2649-2657.

Tang, G.H., Hu, H.W., Zhuang, Z.N. 2012. Film condensation heat transfer on a horizontal tube in presence of a noncondensable gas. *Applied Thermal Engineering*, 36: 414-425.

Tempel, L., Melis, G.P., Brandsma, T.C. 2000. Thermal conductivity of a glass: I. Measurement by the glass-metal contact. *Glass Physics and Chemistry*, 26: 606-611.

Tempel, L. 2002. Thermal conductivity of a glass: II. The empirical model. *Glass Physics and Chemistry*, 28: 147-152.

Teodorescu, G., Jones, P.D., Overfelt, R.A. 2006. Spectral-directional emittance of 99.99% aluminum, thermally oxidized below its melting point. *International Journal of Thermophysics*, 27: 554-568.

Tovazhnyansky, L.L., Kapustenko, P.O., Nagorna, O.G. 2004. The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat Transfer Engineering*, 25: 16-22.

Utanohara, Y., Kinoshita, I., Murase, M. 2011. Numerical simulation using CFD software of countercurrent gas-liquid flow in a PWR hot leg under reflux condensation. *Nuclear Engineering and Design*, 241: 1643-1655.

Vadivambal, R., Jayas, D.S. 2011. Applications of thermal imaging in agriculture and food industry-A review. *Food and Bioprocess Technology*, 4: 186-199.

Volchkov, E.P., Terekhov, V.V., Terekhov, V.I. 2004. A numerical study of boundary-layer heat and mass transfer in a forced flow of humid air with surface steam condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 1473-1481.

Vujicic, M.R., Lavery, N.P., Brown, S.G.R. 2006. Numerical sensitivity and view factor calculation using the Monte Carlo method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 220: 697-702.

Yadigaroglu, G. 2005. Computational fluid dynamics for nuclear applications: from CFD to multi-scale CMFD. *Nuclear Engineering and Design*, 235: 153-164.

Yang, H.L., Quan, R., Zhang, G.H. 2005. Preparation and optical constants of the nano-crystal and polymer composite Bi4Ti3O12/PMMA thin films. *Optics and Laser Technology*, 37: 259-264.

Wang, S.C., Chen, C.K., Yang, Y.T. 2006. Steady filmwise condensation on a finite-size horizontal disk in a homogeneous porous layer. *Chemical Engineering Communications*, 193: 1217-1231.

Wen, C.D., Mudawar, I. 2004. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47: 3591-3605.

Wu, Y.T., Yang, C.X., Yuan, X.G. 2001. Drop distributions and numerical simulation of dropwise condensation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44: 4455-4464.

EKLER

EK-1 **Gradyan ve Diverjans**

EK-2 **Ampul İç Gazı Özellikleri**

EK-3 **Eulerian Wall Film Modeli**

EK-4 **Hata Analizi**

EK-1 Gradyan ve Diverjans

Gradyan

Skaler alandaki değişimin oranını ve yönünü ölçer. Skaler alanları vektör alanlarına gönderir.

x genelleştirilmiş koordinatların kapalı gösterimi olmak üzere $x = (x_1, \ldots., x_n)$ bir *f(x)* fonksiyonunun gradyanı;

$$\text{grad } f = \nabla . f = (\frac{\partial f}{\partial x_1}, \ldots, \frac{\partial f}{\partial x_n})$$

Diverjans

Bir vektör alanında verilmiş olan bir noktadaki bir kaynağın veya batığın büyüklüğünü ölçer. Vektör alanlarını skaler alanlara gönderir.

$\vec{F}(x, y, z)$ ile gösterilen bir vektör alanın diverjansı, diverjans teoremi yardımıyla, nabla operatörü $(\vec{\nabla})$ ile $\vec{F}$' nin skaler çarpımına eşittir. Kartezyen koordinatlarda;

$$\text{div}\vec{F} = \vec{\nabla} . \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$$

EK-2 Ampul İç Gazı Özellikleri

KRİPTON

	KRİPTON																			
R_g=	8,31441	J/mol.K		A_μ=	6,963E-07			$\mu_{cr}^*(T)$=	4,19E-05											
M=	0,0838	kg/mole		T_μ=	71,07	K		λ_{cr}^*=	2,00E-02											
T_{cr}=	209,5	K		n=	0,667			C_p°=	20,78603	J/mol.K										
V^*=	3,16E-04	m^3/mole		ρ_{cr}=	908,4	kg/m^3		C_v°=	12,47162	J/mol.K										
V_{cr}=	9,23E-05	m^3/mole																		
				P=	70	Bar														
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m^3)	$\rho_1=\rho_2$ (kg/m^3)	ρ_3 (kg/m^3)	$\mu^*(T)$	$\Psi_\mu(\rho/\rho_r)$	μ(T,P)(Pa.s)	$\lambda^*(T)$	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_r)$	λ(T,P) (W/mK)
210	1,002	-1,052E-04	3,272E-09	1,387E-09	-3,736E-06	2,977E-03	-1	-5,537E-18	897,80776	-3,319E-11	2,749E-14	6,607E-06	5,243E-09	950,72	-433,98	3561,38	1,87E-05	1,0810	4,429E-05	6,961E-03	1,0644	2,103E-02
220	1,050	-9,603E-05	3,139E-09	1,394E-09	-3,573E-06	3,118E-03	-1	-2,967E-19	854,60857	-3,252E-11	2,69E-14	6,433E-06	5,268E-09	866,76	2602,83	-2641,83	1,96E-05	0,9221	4,142E-05	7,291E-03	0,9381	1,969E-02
230	1,098	-8,794E-05	3,012E-09	1,398E-09	-3,421E-06	3,260E-03	-1	-1,646E-18	815,38945	-3,198E-11	2,637E-14	6,286E-06	5,286E-09	791,94	363,15	1719,88	2,05E-05	0,7925	3,922E-05	7,614E-03	0,8309	1,859E-02
240	1,146	-8,072E-05	2,893E-09	1,401E-09	-3,277E-06	3,402E-03	-1	-8,997E-18	779,3882	-3,155E-11	2,59E-14	6,162E-06	5,297E-09	724,96	205,62	1926,92	2,13E-05	0,6853	3,753E-05	7,930E-03	0,7391	1,770E-02
250	1,193	-7,424E-05	2,780E-09	1,403E-09	-3,139E-06	3,543E-03	-1	-2,191E-17	745,99054	-3,121E-11	2,55E-14	6,059E-06	5,302E-09	664,79	148,40	1941,18	2,21E-05	0,5955	3,624E-05	8,240E-03	0,6600	1,696E-02
260	1,241	-6,841E-05	2,674E-09	1,403E-09	-3,008E-06	3,685E-03	-1	-4,005E-17	714,69833	-3,094E-11	2,514E-14	5,974E-06	5,303E-09	610,53	119,26	1905,57	2,3E-05	0,5196	3,526E-05	8,545E-03	0,5916	1,636E-02
270	1,289	-6,311E-05	2,573E-09	1,402E-09	-2,882E-06	3,827E-03	-1	-6,317E-17	685,1058	-3,075E-11	2,484E-14	5,905E-06	5,301E-09	561,47	102,07	1851,17	2,38E-05	0,4550	3,454E-05	8,844E-03	0,5319	1,587E-02
280	1,337	-5,830E-05	2,479E-09	1,401E-09	-2,761E-06	3,969E-03	-1	-9,110E-17	656,88151	-3,062E-11	2,459E-14	5,852E-06	5,295E-09	516,98	91,19	1788,27	2,46E-05	0,3995	3,401E-05	9,138E-03	0,4797	1,548E-02
290	1,384	-5,389E-05	2,390E-09	1,399E-09	-2,643E-06	4,110E-03	-1	-1,237E-16	629,75457	-3,054E-11	2,439E-14	5,811E-06	5,288E-09	476,57	84,11	1721,04	2,53E-05	0,3518	3,366E-05	9,427E-03	0,4338	1,516E-02
300	1,432	-4,984E-05	2,307E-09	1,397E-09	-2,529E-06	4,252E-03	-1	-1,609E-16	603,5039	-3,051E-11	2,424E-14	5,783E-06	5,28E-09	439,80	79,57	1651,37	2,61E-05	0,3105	3,345E-05	9,712E-03	0,3933	1,491E-02
310	1,480	-4,612E-05	2,229E-09	1,395E-09	-2,418E-06	4,394E-03	-1	-2,027E-16	577,94975	-3,053E-11	2,412E-14	5,766E-06	5,271E-09	406,33	76,85	1580,15	2,69E-05	0,2748	3,336E-05	9,993E-03	0,3575	1,472E-02
320	1,527	-4,267E-05	2,156E-09	1,392E-09	-2,310E-06	4,536E-03	-1	-2,490E-16	552,94701	-3,059E-11	2,406E-14	5,76E-06	5,263E-09	375,84	75,50	1507,84	2,76E-05	0,2438	3,337E-05	1,027E-02	0,3258	1,458E-02
330	1,575	-3,948E-05	2,087E-09	1,390E-09	-2,204E-06	4,677E-03	-1	-2,999E-16	528,37972	-3,069E-11	2,403E-14	5,763E-06	5,254E-09	348,10	75,23	1434,68	2,83E-05	0,2168	3,347E-05	1,054E-02	0,2976	1,448E-02
340	1,623	-3,651E-05	2,023E-09	1,388E-09	-2,100E-06	4,819E-03	-1	-3,553E-16	504,15661	-3,084E-11	2,406E-14	5,776E-06	5,247E-09	322,87	75,84	1360,79	2,91E-05	0,1934	3,364E-05	1,081E-02	0,2725	1,441E-02
350	1,671	-3,374E-05	1,963E-09	1,387E-09	-1,998E-06	4,961E-03	-1	-4,154E-16	480,20731	-3,103E-11	2,412E-14	5,798E-06	5,241E-09	299,97	77,19	1286,24	2,98E-05	0,1731	3,388E-05	1,108E-02	0,2503	1,439E-02
360	1,718	-3,116E-05	1,907E-09	1,385E-09	-1,897E-06	5,103E-03	-1	-4,802E-16	456,47918	-3,126E-11	2,423E-14	5,828E-06	5,237E-09	279,23	79,16	1211,11	3,05E-05	0,1555	3,417E-05	1,134E-02	0,2305	1,439E-02
370	1,766	-2,874E-05	1,854E-09	1,385E-09	-1,799E-06	5,244E-03	-1	-5,499E-16	432,9346	-3,152E-11	2,437E-14	5,867E-06	5,234E-09	260,49	81,68	1135,44	3,12E-05	0,1402	3,451E-05	1,160E-02	0,2130	1,442E-02
380	1,814	-2,647E-05	1,805E-09	1,385E-09	-1,701E-06	5,386E-03	-1	-6,245E-16	409,5486	-3,183E-11	2,456E-14	5,914E-06	5,233E-09	243,62	84,67	1059,30	3,19E-05	0,1270	3,489E-05	1,186E-02	0,1974	1,447E-02
390	1,862	-2,433E-05	1,759E-09	1,385E-09	-1,605E-06	5,528E-03	-1	-7,042E-16	386,30672	-3,218E-11	2,48E-14	5,968E-06	5,235E-09	228,48	88,08	982,76	3,26E-05	0,1156	3,530E-05	1,212E-02	0,1837	1,454E-02
400	1,909	-2,232E-05	1,717E-09	1,386E-09	-1,510E-06	5,670E-03	-1	-7,891E-16	363,20326	-3,258E-11	2,507E-14	6,03E-06	5,239E-09	214,95	91,86	905,90	3,32E-05	0,1057	3,574E-05	1,237E-02	0,1716	1,464E-02
410	1,957	-2,043E-05	1,677E-09	1,388E-09	-1,416E-06	5,811E-03	-1	-8,794E-16	340,23958	-3,301E-11	2,539E-14	6,099E-06	5,245E-09	202,90	95,96	828,81	3,39E-05	0,0972	3,621E-05	1,262E-02	0,1610	1,474E-02
420	2,005	-1,863E-05	1,640E-09	1,390E-09	-1,324E-06	5,953E-03	-1	-9,752E-16	317,42272	-3,348E-11	2,575E-14	6,175E-06	5,254E-09	192,21	100,34	751,58	3,46E-05	0,0899	3,671E-05	1,287E-02	0,1516	1,487E-02
430	2,053	-1,694E-05	1,605E-09	1,393E-09	-1,232E-06	6,095E-03	-1	-1,077E-15	294,76409	-3,4E-11	2,615E-14	6,257E-06	5,265E-09	182,77	104,98	674,32	3,52E-05	0,0837	3,722E-05	1,311E-02	0,1435	1,501E-02
440	2,100	-1,533E-05	1,573E-09	1,397E-09	-1,141E-06	6,237E-03	-1	-1,184E-15	272,27836	-3,456E-11	2,659E-14	6,346E-06	5,279E-09	174,47	109,85	597,13	3,59E-05	0,0783	3,774E-05	1,335E-02	0,1363	1,515E-02
450	2,148	-1,380E-05	1,542E-09	1,401E-09	-1,051E-06	6,378E-03	-1	-1,298E-15	249,98249	-3,516E-11	2,707E-14	6,441E-06	5,295E-09	167,18	114,91	520,12	3,65E-05	0,0737	3,828E-05	1,359E-02	0,1301	1,531E-02
460	2,196	-1,235E-05	1,514E-09	1,406E-09	-9,612E-07	6,520E-03	-1	-1,418E-15	227,89489	-3,581E-11	2,759E-14	6,541E-06	5,314E-09	160,80	120,15	443,38	3,72E-05	0,0698	3,883E-05	1,383E-02	0,1247	1,548E-02
470	2,243	-1,098E-05	1,488E-09	1,412E-09	-8,725E-07	6,662E-03	-1	-1,544E-15	206,03469	-3,65E-11	2,815E-14	6,647E-06	5,335E-09	155,22	125,54	367,03	3,78E-05	0,0664	3,938E-05	1,407E-02	0,1200	1,565E-02
480	2,291	-9,662E-06	1,463E-09	1,418E-09	-7,844E-07	6,803E-03	-1	-1,677E-15	184,42112	-3,723E-11	2,875E-14	6,759E-06	5,359E-09	150,33	131,05	291,16	3,84E-05	0,0635	3,994E-05	1,430E-02	0,1160	1,583E-02

Krypton | Argon | Neon | Xenon | Helium

ARGON

	ARGON																				
R_g=	8,31441	J/mol.K		A_μ=	6,989E-07			$\mu_{cr}^*(T)$=	2,82E-05												
M=	0,039948	kg/mole		T_μ=	65,7	K		λ_{cr}^*=	2,81E-02												
T_{cr}=	150,7	K		n=	0,63977			$C_p^{\circ *}$=	20,78603												
V^*=	2,58E-04	m^3/mole		ρ_{cr}=	535,6	kg/m^3		$C_v^{\circ *}$=	12,47162												
V_{cr}=	7,46E-05	m^3/mole																			
				P=	70	Bar															
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m^3)	$\rho_1=\rho_2$ (kg/m^3)	ρ_3 (kg/m^3)	μ°(T)	$\Psi_\mu(\rho/\rho_r)$	μ(T,P)(Pa.s)	λ°(T)	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_r)$	λ(T,P) (W/mK)
160	1,062	-7,660E-05	2,064E-09	6,154E-09	-9,121E-06	4,757E-03	-1	-1,874E-17	494,08045	-2,155E-10	3,073E-13	1,665E-05	2,326E-08	508,54	1296,23	-1110,23	1,28E-05	0,9144	2,741E-05	1,000E-02	0,9319	2,727E-02
170	1,128	-6,787E-05	1,950E-09	6,178E-09	-8,588E-06	5,055E-03	-1	-4,384E-17	463,38422	-2,109E-10	2,994E-13	1,616E-05	2,335E-08	450,89	305,89	778,37	1,37E-05	0,7480	2,561E-05	1,067E-02	0,7931	2,536E-02
180	1,194	-6,040E-05	1,845E-09	6,188E-09	-8,091E-06	5,352E-03	-1	-2,485E-16	435,8799	-2,077E-10	2,928E-13	1,578E-05	2,339E-08	401,23	182,79	942,06	1,45E-05	0,6184	2,436E-05	1,131E-02	0,6804	2,392E-02
190	1,261	-5,392E-05	1,748E-09	6,188E-09	-7,625E-06	5,649E-03	-1	-6,162E-16	410,75175	-2,054E-10	2,874E-13	1,548E-05	2,339E-08	358,15	134,98	962,29	1,53E-05	0,5155	2,352E-05	1,193E-02	0,5878	2,282E-02
200	1,327	-4,826E-05	1,659E-09	6,181E-09	-7,183E-06	5,947E-03	-1	-1,136E-15	387,38672	-2,039E-10	2,831E-13	1,527E-05	2,336E-08	320,59	110,05	942,06	1,61E-05	0,4325	2,297E-05	1,254E-02	0,5109	2,201E-02
210	1,393	-4,326E-05	1,577E-09	6,170E-09	-6,762E-06	6,244E-03	-1	-1,801E-15	365,32196	-2,032E-10	2,799E-13	1,512E-05	2,332E-08	287,69	95,26	905,45	1,68E-05	0,3649	2,265E-05	1,313E-02	0,4466	2,140E-02
220	1,460	-3,882E-05	1,502E-09	6,156E-09	-6,357E-06	6,541E-03	-1	-2,606E-15	344,20842	-2,031E-10	2,777E-13	1,503E-05	2,327E-08	258,79	85,97	860,69	1,76E-05	0,3096	2,250E-05	1,370E-02	0,3924	2,097E-02
230	1,526	-3,485E-05	1,433E-09	6,142E-09	-5,966E-06	6,839E-03	-1	-3,550E-15	323,78483	-2,036E-10	2,764E-13	1,5E-05	2,321E-08	233,40	80,07	811,22	1,83E-05	0,2640	2,249E-05	1,427E-02	0,3465	2,069E-02
240	1,593	-3,128E-05	1,371E-09	6,129E-09	-5,587E-06	7,136E-03	-1	-4,632E-15	303,85864	-2,046E-10	2,761E-13	1,502E-05	2,317E-08	211,08	76,47	758,64	1,9E-05	0,2263	2,260E-05	1,482E-02	0,3076	2,051E-02
250	1,659	-2,804E-05	1,313E-09	6,118E-09	-5,218E-06	7,433E-03	-1	-5,854E-15	284,29171	-2,062E-10	2,768E-13	1,508E-05	2,312E-08	191,52	74,52	703,83	1,97E-05	0,1952	2,279E-05	1,535E-02	0,2744	2,044E-02
260	1,725	-2,510E-05	1,261E-09	6,111E-09	-4,858E-06	7,731E-03	-1	-7,218E-15	264,98907	-2,083E-10	2,784E-13	1,519E-05	2,31E-08	174,44	73,83	647,30	2,03E-05	0,1696	2,306E-05	1,588E-02	0,2463	2,045E-02
270	1,792	-2,242E-05	1,214E-09	6,107E-09	-4,505E-06	8,028E-03	-1	-8,728E-15	245,89009	-2,109E-10	2,81E-13	1,533E-05	2,308E-08	159,59	74,13	589,40	2,1E-05	0,1484	2,338E-05	1,640E-02	0,2224	2,052E-02
280	1,858	-1,996E-05	1,171E-09	6,109E-09	-4,160E-06	8,325E-03	-1	-1,039E-14	226,9611	-2,14E-10	2,845E-13	1,552E-05	2,309E-08	146,75	75,22	530,43	2,17E-05	0,1311	2,376E-05	1,691E-02	0,2023	2,066E-02
290	1,924	-1,770E-05	1,132E-09	6,116E-09	-3,820E-06	8,623E-03	-1	-1,221E-14	208,18939	-2,177E-10	2,889E-13	1,575E-05	2,312E-08	135,73	76,97	470,64	2,23E-05	0,1168	2,417E-05	1,741E-02	0,1853	2,084E-02
300	1,991	-1,561E-05	1,096E-09	6,128E-09	-3,485E-06	8,920E-03	-1	-1,418E-14	189,57803	-2,219E-10	2,942E-13	1,6E-05	2,316E-08	126,33	79,24	410,25	2,29E-05	0,1052	2,462E-05	1,790E-02	0,1710	2,107E-02
310	2,057	-1,368E-05	1,064E-09	6,146E-09	-3,155E-06	9,217E-03	-1	-1,633E-14	171,1416	-2,267E-10	3,005E-13	1,63E-05	2,323E-08	118,37	81,97	349,48	2,36E-05	0,0958	2,509E-05	1,839E-02	0,1591	2,133E-02
320	2,123	-1,188E-05	1,035E-09	6,169E-09	-2,830E-06	9,515E-03	-1	-1,866E-14	152,90253	-2,32E-10	3,076E-13	1,662E-05	2,332E-08	111,66	85,07	288,57	2,42E-05	0,0880	2,558E-05	1,887E-02	0,1492	2,163E-02
330	2,190	-1,021E-05	1,008E-09	6,199E-09	-2,508E-06	9,812E-03	-1	-2,117E-14	134,88812	-2,378E-10	3,157E-13	1,697E-05	2,343E-08	106,03	88,48	227,70	2,48E-05	0,0818	2,608E-05	1,934E-02	0,1409	2,195E-02
340	2,256	-8,655E-06	9,840E-10	6,233E-09	-2,190E-06	1,011E-02	-1	-2,388E-14	117,12807	-2,442E-10	3,246E-13	1,736E-05	2,356E-08	101,31	92,15	167,08	2,54E-05	0,0766	2,659E-05	1,980E-02	0,1341	2,229E-02
350	2,322	-7,200E-06	9,621E-10	6,274E-09	-1,876E-06	1,041E-02	-1	-2,679E-14	99,652476	-2,512E-10	3,343E-13	1,776E-05	2,371E-08	97,33	96,04	106,88	2,6E-05	0,0724	2,711E-05	2,026E-02	0,1283	2,264E-02
360	2,389	-5,836E-06	9,422E-10	6,319E-09	-1,564E-06	1,070E-02	-1	-2,991E-14	82,490395	-2,587E-10	3,449E-13	1,819E-05	2,389E-08	93,95	100,10	47,28	2,65E-05	0,0689	2,764E-05	2,071E-02	0,1235	2,300E-02
370	2,455	-4,557E-06	9,241E-10	6,370E-09	-1,255E-06	1,100E-02	-1	-3,326E-14	65,668662	-2,669E-10	3,563E-13	1,864E-05	2,408E-08	91,03	104,30	-11,59	2,71E-05	0,0659	2,816E-05	2,116E-02	0,1194	2,337E-02
380	2,522	-3,354E-06	9,076E-10	6,426E-09	-9,487E-07	1,130E-02	-1	-3,684E-14	49,211144	-2,756E-10	3,685E-13	1,912E-05	2,429E-08	88,45	108,60	-69,57	2,77E-05	0,0633	2,869E-05	2,160E-02	0,1157	2,375E-02
390	2,588	-2,221E-06	8,926E-10	6,486E-09	-6,448E-07	1,160E-02	-1	-4,066E-14	33,138247	-2,848E-10	3,815E-13	1,96E-05	2,452E-08	86,10	113,00	-126,58	2,82E-05	0,0610	2,921E-05	2,204E-02	0,1124	2,412E-02
400	2,654	-1,153E-06	8,790E-10	6,551E-09	-3,433E-07	1,189E-02	-1	-4,474E-14	17,466662	-2,946E-10	3,952E-13	2,011E-05	2,476E-08	83,89	117,45	-182,50	2,88E-05	0,0589	2,973E-05	2,247E-02	0,1093	2,450E-02
410	2,721	-1,438E-07	8,666E-10	6,620E-09	-4,388E-08	1,219E-02	-1	-4,909E-14	2,2093145	-3,05E-10	4,096E-13	2,062E-05	2,502E-08	81,76	121,94	-237,26	2,93E-05	0,0568	3,025E-05	2,290E-02	0,1063	2,487E-02
420	2,787	8,109E-07	8,553E-10	6,693E-09	2,535E-07	1,249E-02	-1	-5,372E-14	-12,624555	-3,16E-10	4,247E-13	2,115E-05	2,53E-08	79,63	126,46	-290,80	2,99E-05	0,0548	3,076E-05	2,332E-02	0,1033	2,524E-02
430	2,853	1,715E-06	8,450E-10	6,769E-09	5,489E-07	1,279E-02	-1	-5,863E-14	-27,029193	-3,275E-10	4,406E-13	2,169E-05	2,559E-08	77,47	130,99	-343,07	3,04E-05	0,0527	3,126E-05	2,374E-02	0,1003	2,560E-02
440	2,920	2,573E-06	8,355E-10	6,849E-09	8,425E-07	1,308E-02	-1	-6,385E-14	-41,002068	-3,396E-10	4,571E-13	2,224E-05	2,589E-08	75,24	135,52	-394,04	3,1E-05	0,0507	3,176E-05	2,416E-02	0,0972	2,596E-02

Krypton | Argon | Neon | Xenon | Helium

NEON

	NEON																				
R_g=	8,31441	J/mol.K		A_μ=	8,453E-07			$\mu_{cr}^*(T)$=	1,60E-05												
M=	0,020179	kg/mole		T_μ=	16,47	K		λ_{cr}^*=	3,56E-02												
T_{cr}=	44,5	K		n=	0,642584			C_p°=	20,78603												
V^*=	1,38E-04	m^3/mole		ρ_{cr}=	481,9	kg/m^3		C_v°=	12,47162												
V_{cr}=	4,19E-05	m^3/mole																			
				P=	70	Bar															
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m^3)	$\rho_1=\rho_2$ (kg/m^3)	ρ_3 (kg/m^3)	μ°(T)	$\Psi_\mu(\rho/\rho_r)$	μ(T,P)(Pa.s)	λ°(T)	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_r)$	λ(T,P) (W/mK)
200	4,494	7,898E-06	2,118E-10	6,123E-09	4,608E-06	1,177E-02	-1	-4,362E-14	-250,83884	-2,992E-10	4,212E-13	2,293E-05	2,314E-08	29,54	280,36	-1313,24	2,41E-05	0,0174	2,424E-05	3,720E-02	0,0408	3,816E-02
210	4,719	8,429E-06	2,100E-10	6,376E-09	5,163E-06	1,236E-02	-1	-5,197E-14	-269,92214	-3,315E-10	4,624E-13	2,417E-05	2,41E-08	16,26	288,88	-1387,53	2,49E-05	0,0086	2,499E-05	3,849E-02	0,0221	3,901E-02
220	4,944	8,903E-06	2,085E-10	6,630E-09	5,713E-06	1,295E-02	-1	-6,138E-14	-287,24833	-3,656E-10	5,055E-13	2,541E-05	2,506E-08	3,52	297,11	-1455,97	2,57E-05	0,0017	2,575E-05	3,976E-02	0,0047	3,987E-02
230	5,169	9,328E-06	2,070E-10	6,884E-09	6,259E-06	1,354E-02	-1	-7,194E-14	-303,05255	-4,016E-10	5,503E-13	2,665E-05	2,602E-08	-8,66	305,06	-1519,28	2,65E-05	-0,0036	2,651E-05	4,100E-02	-0,0115	4,074E-02
240	5,393	9,712E-06	2,057E-10	7,137E-09	6,799E-06	1,413E-02	-1	-8,372E-14	-317,53226	-4,394E-10	5,969E-13	2,788E-05	2,698E-08	-20,27	312,74	-1578,08	2,73E-05	-0,0074	2,726E-05	4,223E-02	-0,0265	4,160E-02
250	5,618	1,006E-05	2,045E-10	7,390E-09	7,335E-06	1,472E-02	-1	-9,680E-14	-330,85332	-4,789E-10	6,452E-13	2,91E-05	2,793E-08	-31,32	320,16	-1632,89	2,81E-05	-0,0097	2,802E-05	4,343E-02	-0,0405	4,248E-02
260	5,843	1,037E-05	2,033E-10	7,642E-09	7,868E-06	1,530E-02	-1	-1,113E-13	-343,1553	-5,201E-10	6,951E-13	3,032E-05	2,889E-08	-41,83	327,34	-1684,14	2,89E-05	-0,0108	2,878E-05	4,462E-02	-0,0535	4,336E-02
270	6,067	1,066E-05	2,022E-10	7,893E-09	8,396E-06	1,589E-02	-1	-1,272E-13	-354,55613	-5,63E-10	7,466E-13	3,153E-05	2,983E-08	-51,83	334,27	-1732,21	2,96E-05	-0,0108	2,954E-05	4,579E-02	-0,0656	4,425E-02
280	6,292	1,092E-05	2,012E-10	8,143E-09	8,920E-06	1,648E-02	-1	-1,447E-13	-365,15592	-6,075E-10	7,997E-13	3,273E-05	3,078E-08	-61,34	340,98	-1777,43	3,04E-05	-0,0098	3,029E-05	4,694E-02	-0,0768	4,513E-02
290	6,517	1,116E-05	2,002E-10	8,391E-09	9,441E-06	1,707E-02	-1	-1,639E-13	-375,04011	-6,537E-10	8,542E-13	3,393E-05	3,172E-08	-70,38	347,47	-1820,06	3,11E-05	-0,0079	3,104E-05	4,808E-02	-0,0873	4,603E-02
300	6,742	1,138E-05	1,992E-10	8,638E-09	9,959E-06	1,766E-02	-1	-1,847E-13	-384,28202	-7,015E-10	9,103E-13	3,513E-05	3,265E-08	-78,98	353,75	-1860,34	3,18E-05	-0,0053	3,179E-05	4,920E-02	-0,0970	4,692E-02
310	6,966	1,158E-05	1,982E-10	8,884E-09	1,047E-05	1,825E-02	-1	-2,075E-13	-392,94494	-7,509E-10	9,679E-13	3,632E-05	3,358E-08	-87,16	359,83	-1898,49	3,26E-05	-0,0020	3,254E-05	5,031E-02	-0,1061	4,781E-02
320	7,191	1,177E-05	1,973E-10	9,128E-09	1,098E-05	1,884E-02	-1	-2,321E-13	-401,0838	-8,019E-10	1,027E-12	3,75E-05	3,45E-08	-94,95	365,71	-1934,67	3,33E-05	0,0019	3,329E-05	5,140E-02	-0,1145	4,871E-02
330	7,416	1,194E-05	1,964E-10	9,371E-09	1,149E-05	1,942E-02	-1	-2,588E-13	-408,74653	-8,544E-10	1,087E-12	3,868E-05	3,542E-08	-102,37	371,40	-1969,04	3,4E-05	0,0063	3,403E-05	5,248E-02	-0,1225	4,960E-02
340	7,640	1,209E-05	1,956E-10	9,612E-09	1,200E-05	2,001E-02	-1	-2,877E-13	-415,97514	-9,084E-10	1,149E-12	3,985E-05	3,633E-08	-109,44	376,91	-2001,75	3,47E-05	0,0111	3,476E-05	5,355E-02	-0,1299	5,050E-02
350	7,865	1,224E-05	1,947E-10	9,852E-09	1,250E-05	2,060E-02	-1	-3,188E-13	-422,80667	-9,64E-10	1,213E-12	4,102E-05	3,724E-08	-116,18	382,25	-2032,92	3,53E-05	0,0163	3,549E-05	5,461E-02	-0,1368	5,139E-02
360	8,090	1,238E-05	1,939E-10	1,009E-08	1,300E-05	2,119E-02	-1	-3,522E-13	-429,2739	-1,021E-09	1,277E-12	4,219E-05	3,814E-08	-122,62	387,42	-2062,66	3,6E-05	0,0219	3,622E-05	5,566E-02	-0,1433	5,229E-02
370	8,315	1,250E-05	1,931E-10	1,033E-08	1,349E-05	2,178E-02	-1	-3,881E-13	-435,40597	-1,08E-09	1,343E-12	4,335E-05	3,904E-08	-128,76	392,42	-2091,06	3,67E-05	0,0276	3,694E-05	5,669E-02	-0,1495	5,318E-02
380	8,539	1,262E-05	1,923E-10	1,056E-08	1,398E-05	2,237E-02	-1	-4,266E-13	-441,22886	-1,14E-09	1,411E-12	4,45E-05	3,993E-08	-134,63	397,27	-2118,22	3,74E-05	0,0336	3,766E-05	5,772E-02	-0,1552	5,407E-02
390	8,764	1,272E-05	1,916E-10	1,080E-08	1,447E-05	2,296E-02	-1	-4,678E-13	-446,76586	-1,201E-09	1,479E-12	4,566E-05	4,082E-08	-140,24	401,96	-2144,21	3,8E-05	0,0398	3,837E-05	5,874E-02	-0,1607	5,496E-02
400	8,989	1,282E-05	1,908E-10	1,103E-08	1,496E-05	2,354E-02	-1	-5,118E-13	-452,03788	-1,264E-09	1,549E-12	4,68E-05	4,17E-08	-145,61	406,50	-2169,11	3,87E-05	0,0461	3,908E-05	5,974E-02	-0,1658	5,584E-02
410	9,213	1,292E-05	1,901E-10	1,127E-08	1,545E-05	2,413E-02	-1	-5,587E-13	-457,06378	-1,328E-09	1,62E-12	4,795E-05	4,258E-08	-150,74	410,90	-2192,99	3,93E-05	0,0525	3,978E-05	6,074E-02	-0,1706	5,672E-02
420	9,438	1,300E-05	1,894E-10	1,150E-08	1,593E-05	2,472E-02	-1	-6,086E-13	-461,8606	-1,394E-09	1,693E-12	4,909E-05	4,346E-08	-155,66	415,16	-2215,89	3,99E-05	0,0590	4,048E-05	6,172E-02	-0,1752	5,760E-02
430	9,663	1,308E-05	1,887E-10	1,173E-08	1,641E-05	2,531E-02	-1	-6,618E-13	-466,4438	-1,461E-09	1,767E-12	5,022E-05	4,432E-08	-160,37	419,28	-2237,89	4,06E-05	0,0656	4,118E-05	6,270E-02	-0,1795	5,848E-02
440	9,888	1,316E-05	1,880E-10	1,196E-08	1,689E-05	2,590E-02	-1	-7,182E-13	-470,82741	-1,53E-09	1,842E-12	5,135E-05	4,519E-08	-164,89	423,27	-2259,02	4,12E-05	0,0722	4,186E-05	6,367E-02	-0,1836	5,936E-02
450	10,112	1,323E-05	1,873E-10	1,218E-08	1,736E-05	2,649E-02	-1	-7,781E-13	-475,02424	-1,6E-09	1,918E-12	5,248E-05	4,605E-08	-169,22	427,14	-2279,34	4,18E-05	0,0788	4,255E-05	6,464E-02	-0,1875	6,023E-02
460	10,337	1,329E-05	1,866E-10	1,241E-08	1,783E-05	2,708E-02	-1	-8,415E-13	-479,04596	-1,671E-09	1,996E-12	5,361E-05	4,691E-08	-173,37	430,88	-2298,89	4,24E-05	0,0854	4,322E-05	6,559E-02	-0,1911	6,109E-02
470	10,562	1,335E-05	1,860E-10	1,263E-08	1,830E-05	2,767E-02	-1	-9,086E-13	-482,90328	-1,743E-09	2,074E-12	5,473E-05	4,776E-08	-177,36	434,50	-2317,70	4,31E-05	0,0920	4,390E-05	6,654E-02	-0,1946	6,196E-02
480	10,787	1,341E-05	1,853E-10	1,286E-08	1,877E-05	2,825E-02	-1	-9,796E-13	-486,60599	-1,817E-09	2,154E-12	5,584E-05	4,86E-08	-181,19	438,00	-2335,82	4,37E-05	0,0986	4,456E-05	6,747E-02	-0,1979	6,282E-02

Krypton | Argon | Neon | Xenon | Helium

ZENON

	ZENON																			
R_g=	8,31441	J/mol.K		A_μ=	7,568E-07			$\mu_{cr}^*(T)$=	5,22E-05											
M=	0,13129	kg/mole		T_μ=	112,31	K		λ_{cr}^*=	1,59E-02											
T_{cr}=	289,7	K		n=	0,655473			$C_p^{\circ *}$=	20,78603											
V^*=	4,12E-04	m^3/mole		ρ_{cr}=	1110	kg/m^3		$C_v^{\circ *}$=	12,47162											
V_{cr}=	1,18E-04	m^3/mole																		
				P=	70	Bar														
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m^3)	$\rho_1=\rho_2$ (kg/m^3)	ρ_3 (kg/m^3)	μ°(T)	$\Psi_\mu(\rho/\rho_r)$	μ(T,P)(Pa.s)	λ°(T)	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_r)$	λ(T,P) (W/mK)
200	0,690	-2,786E-04	7,366E-09	7,732E-10	-3,840E-06	1,809E-03	-1	-1,159E-16	1655,3257	-2,386E-11	1,489E-14	6,421E-06	2,922E-09	2250,07	-0,54	4967,05	1,42E-05	4,3712	1,432E-04	3,374E-03	2,7580	3,235E-02
210	0,725	-2,541E-04	7,140E-09	7,870E-10	-3,678E-06	1,900E-03	-1	-8,946E-17	1557,6318	-2,269E-11	1,454E-14	6,158E-06	2,975E-09	2066,94	-5,32	4683,53	1,53E-05	3,5127	1,189E-04	3,622E-03	2,4325	2,918E-02
220	0,759	-2,328E-04	6,921E-09	7,992E-10	-3,529E-06	1,990E-03	-1	-6,790E-17	1472,0403	-2,171E-11	1,42E-14	5,923E-06	3,021E-09	1904,04	-10,95	4438,01	1,63E-05	2,8829	1,013E-04	3,861E-03	2,1553	2,650E-02
230	0,794	-2,141E-04	6,709E-09	8,099E-10	-3,393E-06	2,081E-03	-1	-5,038E-17	1396,4903	-2,088E-11	1,388E-14	5,712E-06	3,061E-09	1758,30	-17,72	4224,91	1,72E-05	2,4084	8,831E-05	4,092E-03	1,9180	2,424E-02
240	0,828	-1,976E-04	6,504E-09	8,192E-10	-3,267E-06	2,171E-03	-1	-3,623E-17	1329,3229	-2,017E-11	1,358E-14	5,524E-06	3,097E-09	1627,27	-26,17	4040,32	1,82E-05	2,0420	7,844E-05	4,317E-03	1,7138	2,232E-02
250	0,863	-1,829E-04	6,305E-09	8,273E-10	-3,150E-06	2,262E-03	-1	-2,494E-17	1269,1918	-1,957E-11	1,329E-14	5,355E-06	3,127E-09	1508,95	-37,27	3882,12	1,91E-05	1,7527	7,082E-05	4,535E-03	1,5373	2,069E-02
260	0,897	-1,697E-04	6,113E-09	8,342E-10	-3,041E-06	2,352E-03	-1	-1,612E-17	1214,9949	-1,907E-11	1,302E-14	5,204E-06	3,153E-09	1401,73	-52,93	3750,85	2E-05	1,5198	6,485E-05	4,749E-03	1,3839	1,929E-02
270	0,932	-1,579E-04	5,928E-09	8,400E-10	-2,938E-06	2,443E-03	-1	-9,448E-18	1165,8237	-1,863E-11	1,278E-14	5,07E-06	3,175E-09	1304,22	-77,50	3652,46	2,09E-05	1,3290	6,010E-05	4,957E-03	1,2501	1,809E-02
280	0,967	-1,473E-04	5,749E-09	8,449E-10	-2,841E-06	2,533E-03	-1	-4,693E-18	1120,9236	-1,826E-11	1,254E-14	4,949E-06	3,193E-09	1215,31	-123,21	3609,19	2,17E-05	1,1703	5,627E-05	5,161E-03	1,1329	1,706E-02
290	1,001	-1,376E-04	5,577E-09	8,488E-10	-2,749E-06	2,624E-03	-1	-1,658E-18	1079,6642	-1,794E-11	1,233E-14	4,842E-06	3,208E-09	1133,99	-242,74	3724,48	2,26E-05	1,0366	5,316E-05	5,361E-03	1,0297	1,618E-02
300	1,036	-1,288E-04	5,411E-09	8,520E-10	-2,662E-06	2,714E-03	-1	-1,891E-19	1041,5156	-1,767E-11	1,213E-14	4,747E-06	3,22E-09	1059,45	-1479,50	6083,54	2,34E-05	0,9226	5,062E-05	5,557E-03	0,9385	1,542E-02
310	1,070	-1,207E-04	5,252E-09	8,545E-10	-2,579E-06	2,805E-03	-1	-1,625E-19	1006,0298	-1,744E-11	1,195E-14	4,663E-06	3,23E-09	990,95	424,75	2168,59	2,42E-05	0,8245	4,854E-05	5,749E-03	0,8577	1,476E-02
320	1,105	-1,133E-04	5,098E-09	8,563E-10	-2,499E-06	2,895E-03	-1	-1,479E-18	972,82627	-1,724E-11	1,179E-14	4,588E-06	3,237E-09	927,85	197,95	2522,57	2,5E-05	0,7393	4,682E-05	5,938E-03	0,7857	1,419E-02
330	1,139	-1,065E-04	4,951E-09	8,576E-10	-2,422E-06	2,985E-03	-1	-4,057E-18	941,58041	-1,707E-11	1,163E-14	4,522E-06	3,241E-09	869,62	134,06	2556,62	2,58E-05	0,6650	4,541E-05	6,124E-03	0,7213	1,370E-02
340	1,174	-1,002E-04	4,810E-09	8,584E-10	-2,349E-06	3,076E-03	-1	-7,832E-18	912,01428	-1,693E-11	1,15E-14	4,465E-06	3,244E-09	815,75	104,21	2527,62	2,66E-05	0,5996	4,425E-05	6,307E-03	0,6637	1,328E-02
350	1,208	-9,442E-05	4,675E-09	8,587E-10	-2,277E-06	3,166E-03	-1	-1,275E-17	883,8891	-1,681E-11	1,137E-14	4,415E-06	3,246E-09	765,85	87,21	2477,25	2,73E-05	0,5418	4,331E-05	6,487E-03	0,6118	1,291E-02
360	1,243	-8,900E-05	4,545E-09	8,588E-10	-2,208E-06	3,257E-03	-1	-1,877E-17	856,9992	-1,671E-11	1,126E-14	4,371E-06	3,246E-09	719,52	76,51	2417,97	2,81E-05	0,4906	4,254E-05	6,665E-03	0,5649	1,260E-02
370	1,277	-8,396E-05	4,421E-09	8,585E-10	-2,141E-06	3,347E-03	-1	-2,586E-17	831,1671	-1,664E-11	1,116E-14	4,334E-06	3,245E-09	676,46	69,44	2354,62	2,88E-05	0,4449	4,193E-05	6,840E-03	0,5226	1,233E-02
380	1,312	-7,925E-05	4,302E-09	8,580E-10	-2,075E-06	3,438E-03	-1	-3,399E-17	806,23946	-1,658E-11	1,108E-14	4,303E-06	3,243E-09	636,37	64,68	2289,36	2,95E-05	0,4042	4,146E-05	7,013E-03	0,4841	1,210E-02
390	1,346	-7,485E-05	4,188E-09	8,573E-10	-2,011E-06	3,528E-03	-1	-4,314E-17	782,08372	-1,653E-11	1,1E-14	4,277E-06	3,24E-09	599,00	61,52	2223,21	3,02E-05	0,3676	4,110E-05	7,183E-03	0,4492	1,190E-02
400	1,381	-7,071E-05	4,080E-09	8,565E-10	-1,949E-06	3,619E-03	-1	-5,329E-17	758,58535	-1,65E-11	1,093E-14	4,256E-06	3,237E-09	564,15	59,54	2156,68	3,1E-05	0,3348	4,084E-05	7,352E-03	0,4173	1,174E-02
410	1,415	-6,683E-05	3,976E-09	8,555E-10	-1,888E-06	3,709E-03	-1	-6,443E-17	735,64548	-1,649E-11	1,088E-14	4,24E-06	3,234E-09	531,61	58,46	2090,01	3,17E-05	0,3054	4,067E-05	7,518E-03	0,3882	1,160E-02
420	1,450	-6,317E-05	3,876E-09	8,545E-10	-1,828E-06	3,800E-03	-1	-7,656E-17	713,17899	-1,648E-11	1,084E-14	4,228E-06	3,23E-09	501,21	58,12	2023,29	3,24E-05	0,2788	4,058E-05	7,683E-03	0,3616	1,148E-02
430	1,484	-5,972E-05	3,782E-09	8,535E-10	-1,770E-06	3,890E-03	-1	-8,967E-17	691,11278	-1,65E-11	1,081E-14	4,22E-06	3,226E-09	472,81	58,38	1956,57	3,3E-05	0,2549	4,056E-05	7,846E-03	0,3372	1,139E-02
440	1,519	-5,646E-05	3,691E-09	8,525E-10	-1,712E-06	3,981E-03	-1	-1,038E-16	669,38441	-1,652E-11	1,078E-14	4,217E-06	3,222E-09	446,28	59,16	1889,83	3,37E-05	0,2333	4,060E-05	8,007E-03	0,3149	1,131E-02
450	1,553	-5,338E-05	3,605E-09	8,515E-10	-1,655E-06	4,071E-03	-1	-1,188E-16	647,94081	-1,655E-11	1,077E-14	4,217E-06	3,218E-09	421,50	60,39	1823,05	3,44E-05	0,2139	4,070E-05	8,166E-03	0,2944	1,126E-02
460	1,588	-5,045E-05	3,523E-09	8,506E-10	-1,599E-06	4,162E-03	-1	-1,349E-16	626,73727	-1,66E-11	1,077E-14	4,221E-06	3,215E-09	398,36	62,00	1756,20	3,5E-05	0,1963	4,084E-05	8,324E-03	0,2756	1,122E-02
470	1,622	-4,768E-05	3,445E-09	8,497E-10	-1,544E-06	4,252E-03	-1	-1,520E-16	605,73644	-1,666E-11	1,078E-14	4,229E-06	3,212E-09	376,77	63,97	1689,26	3,57E-05	0,1805	4,103E-05	8,480E-03	0,2583	1,119E-02
480	1,657	-4,504E-05	3,370E-09	8,490E-10	-1,490E-06	4,343E-03	-1	-1,701E-16	584,90755	-1,673E-11	1,08E-14	4,24E-06	3,209E-09	356,65	66,26	1622,20	3,64E-05	0,1662	4,126E-05	8,634E-03	0,2425	1,118E-02

Krypton | Argon | Neon | **Xenon** | Helium

HELYUM

	HELYUM																			
R_g=	8,31441	J/mol.K		A_μ=	3,063E-07			$\mu_{cr}^*(T)$=	1,98E-06											
M=	0,004003	kg/mole		T_μ=	-21,33	K		λ_{cr}^*=	3,65E-02											
T_{cr}=	5,2	K		n=	0,7243			$C_p^{\circ *}$=	20,78603											
V^*=	1,90E-04	m^3/mole		ρ_{cr}=	69,64	kg/m^3		$C_v^{\circ *}$=	12,47162											
V_{cr}=	5,75E-05	m^3/mole																		
				P=	70	Bar														
T (K)	θ	B	C	α_1	α_2	α_3	α_4	Δ	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_4	ζ_5	ρ (kg/m^3)	$\rho_1=\rho_2$ (kg/m^3)	ρ_3 (kg/m^3)	μ°(T)	$\Psi_\mu(\rho/\rho_r)$	μ(T,P)(Pa.s)	λ°(T)	$\Psi_\lambda(\rho/\rho_r)$	λ(T,P) (W/mK)
200	38,462	1,200E-05	2,609E-10	9,662E-07	1,779E-04	5,934E-02	-1	-8,826E-10	-61,355374	-2,566E-07	1,978E-09	0,0006824	3,652E-06	-4,21	68,56	-321,19	1,53E-05	-0,0094	1,529E-05	1,192E-01	-0,0378	1,182E-01
201	38,654	1,200E-05	2,604E-10	9,694E-07	1,787E-04	5,964E-02	-1	-8,975E-10	-61,455539	-2,588E-07	1,993E-09	0,0006852	3,664E-06	-4,33	68,49	-321,35	1,53E-05	-0,0095	1,534E-05	1,195E-01	-0,0388	1,186E-01
202	38,846	1,199E-05	2,600E-10	9,725E-07	1,796E-04	5,994E-02	-1	-9,126E-10	-61,555518	-2,61E-07	2,007E-09	0,0006879	3,676E-06	-4,44	68,42	-321,51	1,54E-05	-0,0096	1,539E-05	1,199E-01	-0,0398	1,190E-01
203	39,038	1,199E-05	2,595E-10	9,756E-07	1,805E-04	6,023E-02	-1	-9,278E-10	-61,655317	-2,632E-07	2,021E-09	0,0006906	3,688E-06	-4,55	68,36	-321,68	1,54E-05	-0,0098	1,544E-05	1,203E-01	-0,0408	1,193E-01
204	39,231	1,199E-05	2,591E-10	9,787E-07	1,813E-04	6,053E-02	-1	-9,432E-10	-61,754942	-2,654E-07	2,036E-09	0,0006934	3,699E-06	-4,67	68,29	-321,85	1,55E-05	-0,0099	1,549E-05	1,207E-01	-0,0417	1,197E-01
205	39,423	1,199E-05	2,586E-10	9,818E-07	1,822E-04	6,083E-02	-1	-9,588E-10	-61,854401	-2,676E-07	2,05E-09	0,0006961	3,711E-06	-4,78	68,23	-322,02	1,55E-05	-0,0100	1,554E-05	1,211E-01	-0,0427	1,201E-01
206	39,615	1,199E-05	2,582E-10	9,849E-07	1,831E-04	6,112E-02	-1	-9,745E-10	-61,953698	-2,698E-07	2,065E-09	0,0006988	3,723E-06	-4,89	68,16	-322,19	1,56E-05	-0,0101	1,559E-05	1,215E-01	-0,0436	1,204E-01
207	39,808	1,199E-05	2,578E-10	9,880E-07	1,839E-04	6,142E-02	-1	-9,905E-10	-62,052841	-2,72E-07	2,079E-09	0,0007015	3,734E-06	-5,00	68,10	-322,36	1,56E-05	-0,0102	1,564E-05	1,219E-01	-0,0446	1,208E-01
208	40,000	1,198E-05	2,573E-10	9,910E-07	1,848E-04	6,172E-02	-1	-1,007E-09	-62,151834	-2,742E-07	2,094E-09	0,0007043	3,746E-06	-5,10	68,04	-322,54	1,57E-05	-0,0103	1,569E-05	1,223E-01	-0,0455	1,212E-01
209	40,192	1,198E-05	2,569E-10	9,941E-07	1,856E-04	6,201E-02	-1	-1,023E-09	-62,250684	-2,764E-07	2,108E-09	0,000707	3,757E-06	-5,21	67,98	-322,72	1,57E-05	-0,0104	1,573E-05	1,226E-01	-0,0464	1,215E-01
210	40,385	1,198E-05	2,564E-10	9,971E-07	1,865E-04	6,231E-02	-1	-1,039E-09	-62,349396	-2,787E-07	2,123E-09	0,0007097	3,769E-06	-5,32	67,92	-322,89	1,58E-05	-0,0105	1,578E-05	1,230E-01	-0,0474	1,219E-01
211	40,577	1,198E-05	2,560E-10	1,000E-06	1,874E-04	6,261E-02	-1	-1,056E-09	-62,447976	-2,809E-07	2,137E-09	0,0007124	3,78E-06	-5,43	67,87	-323,08	1,58E-05	-0,0105	1,583E-05	1,234E-01	-0,0483	1,223E-01
212	40,769	1,198E-05	2,555E-10	1,003E-06	1,882E-04	6,290E-02	-1	-1,073E-09	-62,54643	-2,831E-07	2,152E-09	0,0007151	3,792E-06	-5,53	67,81	-323,26	1,59E-05	-0,0106	1,588E-05	1,238E-01	-0,0492	1,226E-01
213	40,962	1,198E-05	2,551E-10	1,006E-06	1,891E-04	6,320E-02	-1	-1,090E-09	-62,644763	-2,854E-07	2,166E-09	0,0007178	3,803E-06	-5,64	67,75	-323,44	1,59E-05	-0,0107	1,593E-05	1,242E-01	-0,0501	1,230E-01
214	41,154	1,197E-05	2,547E-10	1,009E-06	1,899E-04	6,350E-02	-1	-1,107E-09	-62,74298	-2,876E-07	2,181E-09	0,0007204	3,814E-06	-5,74	67,70	-323,63	1,6E-05	-0,0107	1,598E-05	1,246E-01	-0,0510	1,233E-01
215	41,346	1,197E-05	2,542E-10	1,012E-06	1,908E-04	6,379E-02	-1	-1,125E-09	-62,841087	-2,899E-07	2,196E-09	0,0007231	3,825E-06	-5,85	67,65	-323,82	1,6E-05	-0,0108	1,603E-05	1,250E-01	-0,0518	1,237E-01
216	41,538	1,197E-05	2,538E-10	1,015E-06	1,917E-04	6,409E-02	-1	-1,142E-09	-62,939088	-2,922E-07	2,21E-09	0,0007258	3,837E-06	-5,95	67,60	-324,01	1,61E-05	-0,0108	1,608E-05	1,253E-01	-0,0527	1,241E-01
217	41,731	1,197E-05	2,533E-10	1,018E-06	1,925E-04	6,439E-02	-1	-1,160E-09	-63,036989	-2,944E-07	2,225E-09	0,0007285	3,848E-06	-6,05	67,54	-324,20	1,61E-05	-0,0108	1,613E-05	1,257E-01	-0,0536	1,244E-01
218	41,923	1,197E-05	2,529E-10	1,021E-06	1,934E-04	6,469E-02	-1	-1,178E-09	-63,134794	-2,967E-07	2,239E-09	0,0007312	3,859E-06	-6,16	67,49	-324,39	1,62E-05	-0,0109	1,618E-05	1,261E-01	-0,0545	1,248E-01
219	42,115	1,196E-05	2,525E-10	1,024E-06	1,942E-04	6,498E-02	-1	-1,196E-09	-63,23251	-2,99E-07	2,254E-09	0,0007338	3,87E-06	-6,26	67,45	-324,59	1,62E-05	-0,0109	1,623E-05	1,265E-01	-0,0553	1,251E-01
220	42,308	1,196E-05	2,520E-10	1,027E-06	1,951E-04	6,528E-02	-1	-1,214E-09	-63,33014	-3,013E-07	2,268E-09	0,0007365	3,881E-06	-6,36	67,40	-324,79	1,63E-05	-0,0109	1,628E-05	1,269E-01	-0,0562	1,255E-01
221	42,500	1,196E-05	2,516E-10	1,030E-06	1,959E-04	6,558E-02	-1	-1,233E-09	-63,427689	-3,036E-07	2,283E-09	0,0007391	3,892E-06	-6,46	67,35	-324,99	1,63E-05	-0,0109	1,632E-05	1,272E-01	-0,0570	1,259E-01
222	42,692	1,196E-05	2,512E-10	1,032E-06	1,968E-04	6,587E-02	-1	-1,252E-09	-63,525162	-3,059E-07	2,298E-09	0,0007418	3,903E-06	-6,56	67,31	-325,19	1,64E-05	-0,0110	1,637E-05	1,276E-01	-0,0579	1,262E-01
223	42,885	1,196E-05	2,507E-10	1,035E-06	1,976E-04	6,617E-02	-1	-1,271E-09	-63,622563	-3,081E-07	2,312E-09	0,0007444	3,913E-06	-6,66	67,26	-325,39	1,64E-05	-0,0110	1,642E-05	1,280E-01	-0,0587	1,266E-01
224	43,077	1,195E-05	2,503E-10	1,038E-06	1,985E-04	6,647E-02	-1	-1,290E-09	-63,719898	-3,104E-07	2,327E-09	0,0007471	3,924E-06	-6,76	67,22	-325,59	1,65E-05	-0,0110	1,647E-05	1,284E-01	-0,0595	1,269E-01
225	43,269	1,195E-05	2,499E-10	1,041E-06	1,993E-04	6,676E-02	-1	-1,309E-09	-63,817171	-3,128E-07	2,341E-09	0,0007497	3,935E-06	-6,86	67,17	-325,80	1,65E-05	-0,0110	1,652E-05	1,288E-01	-0,0604	1,273E-01
226	43,462	1,195E-05	2,494E-10	1,044E-06	2,002E-04	6,706E-02	-1	-1,329E-09	-63,914385	-3,151E-07	2,356E-09	0,0007524	3,946E-06	-6,96	67,13	-326,01	1,66E-05	-0,0109	1,657E-05	1,291E-01	-0,0612	1,277E-01
227	43,654	1,195E-05	2,490E-10	1,047E-06	2,010E-04	6,736E-02	-1	-1,348E-09	-64,011546	-3,174E-07	2,371E-09	0,000755	3,956E-06	-7,06	67,09	-326,22	1,66E-05	-0,0109	1,662E-05	1,295E-01	-0,0620	1,280E-01
228	43,846	1,194E-05	2,486E-10	1,050E-06	2,018E-04	6,765E-02	-1	-1,368E-09	-64,108658	-3,197E-07	2,385E-09	0,0007576	3,967E-06	-7,15	67,05	-326,43	1,67E-05	-0,0109	1,666E-05	1,299E-01	-0,0628	1,284E-01

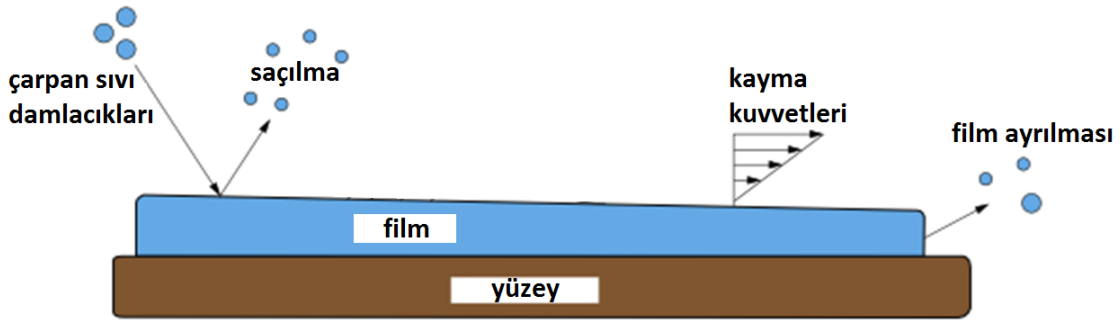
Krypton | Argon | Neon | Xenon | Helium

EK-3 Eulerian Wall Film Modeli

FLUENT yazılımının Eulerian Wall Film (EWF) modeli duvar yüzeyleri üzerinde ince sıvı film oluşumunu ve akışını ön görebilmek için kullanılmaktadır. Duvar yüzeyindeki ince sıvı film modelinin 2 boyutlu gösterimi Şekil EK-3.1' de gösterilmiştir. İnce film domain içerisindeki sıvı damlacıklarının katı yüzeye çarpmasıyla oluşmaktadır. Bu çarpmanın neticesinde bir takım farklı oluşumlar meydana gelmektedir:

- *Yapışma*, burada damlacıklar duvarı küçük bir enerji ile etkilemekte ve neredeyse küresel kalmakta;
- *Geri sekme*, burada damlacık, yüzeyi bağıl olarak bozulmamış fakat hızı değişmiş şekilde terk eder;
- *Yayılma*, burada damlacık duvara orta seviye bir enerji ile çarpar ve film halinde yayılım gösterir;
- *Saçılma*, burada yüzeye çarpan damlacıkların bir kısmı filme katılırken diğer bir kısmı da rastgele şekilde küçük damlacıklar halinde yüzeyden ayrılır.

İnce film varsayımı genellikle hem Eulerian hem de Lagrangian film model yaklaşımlarıyla yapılmakta olup burada özellikle film kalınlığı yüzeydeki kavis yarıçapına kıyasla daha küçük kabul edilmektedir ki film kalınlığı boyunca özellikler değişmemektedir ve film yeterince ince öngörülmektedir ki film içerisindeki sıvı akışı öngörülmüş kuadratik şekliyle yüzeye paralel olmaktadır.



Şekil EK-3.1. Yüzey üzerindeki ince sıvı film modeli (Anonim 2015)

EWF modeli hesaplamalarında kullanılan 2 boyutlu film tabakanın 3 boyutlu ortamda kütlenin korunumu denklemi Eş. (EK-3.1) (Anonim 2015) olarak aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial h}{\partial \mathrm{t}} + \nabla_s . \left[h \vec{V}_l \right] = \frac{\dot{m}_s}{\rho_l} \qquad \text{(EK-3.1)}$$

Burada ρ_l sıvı yoğunluğu, h film yüksekliği, ∇_s yüzey gradyan operatörü, $\vec{V}_l$ ortalama hızı ve $\dot{m}_s$ de birim duvar alanı başına denk gelen kütle kaynağıdır.

Film tabaka için momentumun korunumu da Eş. (EK-3.2) (Anonim 2015) olarak verilmiştir.

$$\frac{\partial h \vec{V}_l}{\partial \mathrm{t}} + \nabla_s . \left(h \vec{V}_l \vec{V}_l \right) = -\frac{h \nabla_s P_L}{\rho_l} + . \left(\vec{g}_\tau \right) h + \frac{3}{2\rho_l} \vec{\tau}_{fs} - \frac{3\nu_l}{h} \vec{V}_l + \frac{\dot{q}}{\rho_l} \qquad \text{(EK-3.2)}$$

Burada;

$$P_L = P_{gas} + P_h + P_\sigma$$

$$P_h = -\rho h (\vec{n} . \vec{g})$$

$$P_\sigma = -\sigma \nabla_s . (\nabla_s h)$$

Eş. EK-3.2' nin sol tarafındaki terimler sırasıyla zamana bağlı ve taşınım etkilerini göstermektedir. Sağ tarafında ise, ilk terim gaz akış basıncı, duvar yüzeyi normalindeki yerçekimi ve yüzey gerilimi etkilerini içermektedir. İkinci terim film paraleli yönündeki yerçekimi etkisini göstermektedir. Üçüncü terim gaz-film arayüzeyindeki viskoz kayma kuvvetidir. Dördüncü terim film içerisindeki vizkos kuvveti göstermektedir ve son terim de damlacık toplanması ve dağılmasını dikkate alan terimdir.

Film tabaka için enerjinin korunumu denklemi Eş. (EK-3.3) (Anonim 2015) olarak verilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (h T_f)}{\partial \mathrm{t}} + \nabla_s . \left(h \vec{V}_f h T_f \right) &= -\frac{1}{\rho C_P} \left\{ k_f \left[\frac{T_s - T_f}{h/2} - \frac{T_f - T_w}{h/2} \right] + \dot{q}_{imp} + \dot{m}_{vap} L(T_s) \right\} \\ &= -\frac{1}{\rho C_P} \left\{ 2k_f \left[\frac{T_s - T_f}{h} - \frac{T_f - T_w}{h} \right] + \dot{q}_{imp} + \dot{m}_{vap} L(T_s) \right\} \end{aligned} \qquad \text{(EK-3.3)}$$

Bu denklemde T_s film-gaz arayüzeyindeki sıcaklık, T_f ortalama film sıcaklığı, T_w duvar sıcaklığıdır. $\dot{q}_{imp}$ terimi duvara doğru olan akışta sıvı çarpmasından dolayı olan kaynak terimidir. $\dot{m}_{vap}$ terimi ise kütle buharlaşması yada yoğuşma oranı ve L terimi de faz değişiminden kaynaklanan gizli ısıyı göstermektedir.

EK-4 Hata Analizi

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar belirli bir ölçüm hassasiyetine sahip olduğundan ölçülen her değer bir miktar hata içermektedir. Deneylerde kullanılan her cihazın, kullanım amacı ve yerine göre ölçüm aralığı ve hassasiyeti farklıdır. Bu cihazların oluşturduğu toplam hatayı belirlemek için Moffat' ın (1988) önerdiği aşağıda verilen eşitlik kullanılabilir.

$$Hata = \left[\left(\frac{\Delta X_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta X_2}{X_2} \right)^2 + \ldots + \left(\frac{\Delta X_n}{X_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(EK-4.1)}$$

Bu eşitliğin payındaki lamda (Δ) ile ifade edilen değerler cihazın ölçüm hassasiyetini, paydadaki değerler ise ölçüm değerlerini ifade etmektedir.

Tez çalışması kapsamında sıcaklık ölçümü için kullanılan veri kayıt cihazının hata oranı ±% 0,05 olup zaman adımlı ölçümlerde termokupl cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde göz ardı edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında bağıl nem ölçümü için kullanılan veri kayıt cihazının hata oranı ±% 2 olup zaman adımlı ölçümlerde nem probu cevap hızından dolayı olan gecikmeler hata analizinde göz ardı edilmiştir.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Sercan BODUROĞLU	
Doğum Yeri ve Tarihi	: Devrek – 08.08.1982	
Yabancı Dili	: İngilizce	
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)		
Lise	: Zonguldak Atatürk Anadolu Lisesi	2000
Lisans	: Uludağ Üni. Makine Müh. Böl.	2004
Yüksek Lisans	: Uludağ Üni. Makine Müh. Böl.	2011
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl	:	
Farba A.Ş.	2008 - …….	
Iscar Bursa bölge bayii	2007-2008	
Sandeks İth. İhr. Ltd.	2005-2008	
İletişim (e-posta)	: sercnbdr@gmail.com	

Yayınları*:

Boduroglu, S. 2009. Thermal Investigation of a Sample Automotive Exterior Lighting Lamp by CFD. *14th Conference for Computer Aided Engineering and System Modeling*, 05-06 November 2009, Metu, Ankara.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. 2010. Otomotiv Dış Aydınlatma Lambasında Oluşan Sıcaklık Dağılımında Alüminyum Kaplama Etkisinin Nümerik İncelenmesi., *5. Otomotiv teknolojileri kongresi OTEKON 2010*, 07-08 Haziran 2010, Bursa.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. 2013. Otomotiv Dış Aydınlatma Lambasında Oluşan Sıcaklık Dağılımında Yansıtıcı Yüzey Malzemesi Işınım Karakteristikleri Etkisinin Nümerik İncelenmesi. *Anova 2013 Kullanıcılar Konferansı*, 23-24-25 Ekim 2013, Ankara.

Ozalp, A.A., Boduroglu, S., Tursucular, E. 2013. Otomotiv Dış Aydınlatma Lambasında Oluşan Sıcaklık Dağılımında Alüminyum Kaplama Etkisinin Nümerik İncelenmesi., *Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve AR-GE günleri*, 07-08 Haziran 2010, Bursa.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. 2014. A Numerical Investigation Of The Metallization Effect On Heat Distribution Of An Automotive Exterior Lighting Lamp – Part 1: On Bulb Area. *7. Otomotiv teknolojileri kongresi OTEKON 2014*, 26-27 Mayıs 2014, Bursa.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. 2014. A Numerical Investigation Of The Metallization Effect On Heat Distribution Of An Automotive Exterior Lighting Lamp. *7th International Ege Energy Symposium & Exhibition*, 18-20 June 2014, Uşak.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. 2015. Otomotiv Dış Aydınlatma Lambasında Yoğuşma Analizi. *Anova 2015 Kullanıcılar Konferansı*, 3-4 Kasım 2015, Ankara.

Boduroglu, S., Ozalp, A.A. (*in press*). A computational and experimental investigation of the metallisation effects on the thermal characteristics of an automotive exterior Lighting Lamp. *International Journal of Vehicle Design.*