

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ÖN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK
MODELLENMESİ VE BUZUN ERİMESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN
İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhan TATAR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV ÖN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK
MODELLENMESİ VE BUZUN ERİMESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN
İRDELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serhan TATAR
(503111150)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Levent Ali KAVURMACIOĞLU

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111150 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi, **Serhan TATAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**OTOMOTİV ÖN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE BUZUN ERİMESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İRDELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Levent Ali KAVURMACIOĞLU**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Murat ÇAKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Zehra YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **22 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, otomotiv camlarında soğuk havalarda oluşan buzun, otomobil klima sistemindeki buğu ve buz çözme modu ile zamana bağlı olarak çözünmesi Ansys Fluent programında entalpi-porozite metodu kullanılarak modellenmiştir. Buzun çözünmesine etki eden parametreler üzerinde çalışılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Yüksek lisans çalışmalarımı yürüten, değerli fikirleri ile çalışmalarına her noktasına yön veren, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve özellikle tez aşamasında beni her zaman daha iyi ve daha doğruya yönlendiren kıymetli danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Levent Ali KAVURMACIOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışma hayatımızı birlikte sürdürdüğümüz, bu süreçte yaşadığımız sıkıntılı zamanları birlikte aştığımız, desteklerini her zaman yakından hissettiğim, düşüncelerine daima önem verdiğim, çok kıymetli arkadaşlarım Tanju NAYIR ve Emine Zühre SEZGİNER'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca beni her aşamada koşulsuz destekleyen, ellerinden gelen herşeyin en iyisi ve en güzelini daima bana veren, sevgileriyle beni koruyan, bu seviyeye gelmemde benden çok emek harcayan ve hayatımın her aşamasında benimle olmasını dilediğim annem Sn. Nuran TATAR, babam Sn. İrfan TATAR ile birlikte tüm aileme teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunuyorum.

Aralık 2014

Serhan TATAR
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	2
2. SOĞUK YÜZEYLER ÜZERİNDE BUZLANMA VE OTOMOBİL ÖN CAM BUZ ÇÖZME SİSTEMİ.....	11
2.1 Buz Tabakasının Oluşum Süreci	11
2.2 Otomobil Ön Cam Buğu ve Buz Çözme Sistemi	13
2.3 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Terimler	15
2.4 Camdan Buza Doğru Olan Isı Transferi.....	16
2.5 Buz Çözmeye Etki Eden Temel Faktörler.....	18
2.5.1 Yeterli hava akışının sağlanması.....	18
2.5.2 Yüksek hava sıcaklıklarının elde edilmesi.....	19
3. KATILAŞMA, ERİME PROBLEMLERİNİN MODELLENMESİ.....	21
3.1 Entalpi Porozite Yöntemi	21
3.1.1 Modelin Limitleri	21
3.1.2 Matematiksel Modelleme ve İlgili Eşitlikler	22
3.1.2.1 Enerji denklemi	22
3.1.2.2 Momentum denklemi	24
3.1.2.3 Türbülans eşitlikleri	25
3.1.2.4 Duvarlardaki temas direnci	25
3.2 Ön Cam ve Hava Jeti Arasındaki Birleşik Isı Transfer Analizi	26
3.2.1 Matematiksel formülasyon.....	26
3.2.2 Türbülanslı birleşik ısı transferi	28
3.2.3 Entalpi metodu	30
4. ULUSLARARASI ÖN CAM BUZ ÇÖZME STANDARLARI.....	31
4.1 Avrupa Birliği Standartı, 78/317/EEC	31
4.2 Binek Araçlar İçin ABD Standartı, SAE J902	32
4.3 Kamyon, Otobüs vb. Araçlar İçin ABD Standartı, SAE J381	34
5. ÖN VE YAN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANS TESTİ.....	37
5.1 Test Merkezi ve Ekipmanlar	37
5.2 Test Ortamının ve Test Edilecek Aracın Hazırlanması.....	37
5.2.1 Cam yüzeyinde homojen buz tabakasının oluşturulması.....	39
5.3 Buz Çözme Testi – Ön Cam ve Birinci Sıra Yan Camlar	40
5.4 Buz Çözme Testi Sırasında Kullanılan Ölçüm ve Takip Metotları	40

5.4.1 Kızıl ötesi termal görüntüleme tekniği.....	40
5.4.2 Laser ışını ile görüntüleme tekniği (LSV).....	41
5.4.3 Sıcak tel anemometresi ile hava hız ölçümü	42
5.4.4 Çizgi takip metodu	43
5.4.5 Dijital fotoğraflama yöntemi	43
5.5 Takip Tekniklerinin Birbirleriyle Karşılaştırılması.....	44
5.6 Ağır Ticari Araç ile Yapılan Buz Çözme Testinin İncelenmesi.....	45
6. MODELLEME ÇALIŞMASI VE SAYISAL ANALİZLER.....	49
6.1 Akış Karakteristikleri	50
6.2 İki Boyutlu Modelin Oluşturulması.....	52
6.2.1 İki boyutlu modelin geometrik yapısı	52
6.2.2 İki boyutlu modelde kullanılan sayısal çözüm ağları.....	53
6.2.3 Malzeme özellikleri, başlangıç ve sınır şartları.....	60
6.3 İki Boyutlu Analizler ve Sonuçları.....	63
6.3.1 Sayısal çözüm ağının çözüme olan etkisi.....	63
6.3.2 Türbülans modelleri ve çözüme olan etkileri.....	67
6.3.3 Hava çarpma açısının ve üfleme mesafesinin çözüme olan etkisi	74
6.3.4 Cam üzerindeki buz kalınlığının çözüme olan etkisi	78
6.3.5 Duvarlarda taşınım sınır şartının kullanılması ve çözüme olan etkisi	80
6.4 Üç Boyutlu Modelin Oluşturulması	82
6.4.1 Üç boyutlu modelin geometrik yapısı	82
6.4.2 Üç boyutlu modelde kullanılan sayısal çözüm ağı.....	84
6.4.3 Üç boyutlu analizlerde kullanılan sınır şartları	87
6.4.4 Üç boyutlu kararlı hal çözümü	87
6.4.5 Üç boyutlu zamana bağlı buz erime çözümü	92
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	103
KAYNAKLAR.....	107
EKLER.....	111
ÖZGEÇMİŞ.....	115

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
CFD	: Computational Fluid Dynamics
DLO	: Daylight Opening
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HVAC	: Heating, Ventilation and Air Conditioning
K	: Kelvin
LDA	: Laser Doppler Anemometry
LSV	: Laser Sheet Visualisation
Nu	: Nusselt Sayısı
OEM	: Original Equipment Manufacturer
PIV	: Particle Image Velocimetry
Pr	: Prandtl Sayısı
PVB	: Polivinil Butral
Re	: Reynolds Sayısı
UDF	: User Defined Function
VOF	: Volume of Fluid

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.	32
Çizelge 4.2 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.	34
Çizelge 4.3 : Araç tiplerine göre görüş alanının sınırlarının belirlenmesi.....	35
Çizelge 4.4 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.	36
Çizelge 6.1 : İki boyutlu analizlerde kullanılan ağ yapıları.....	53
Çizelge 6.2 : Hava, ön cam ve buz tabakasının fiziksel özellikleri.	61
Çizelge 6.3 : Kararlı ve izotermal hal için sınır şartları.....	61
Çizelge 6.4 : Türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları.	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Soğuk yüzey üzerinde bu tabakasının oluşumu	11
Şekil 2.2 : Buz tabakasının gelişim süreci	12
Şekil 2.3 : Basitleştirilmiş yolcu kabini ve hava üfleme modları.....	13
Şekil 2.4 : Kalorifer içinde hava akışı ve ön cama yönlendirilmesi	14
Şekil 2.5 : Buz çözme prosesi ve ısı transfer yönü	14
Şekil 2.6 : Cam üzerindeki erimiş bölgelerinin tanımlanması.....	16
Şekil 2.7 : Cam boyunca meydana gelen ısı transferi.....	16
Şekil 2.8 : Cam içerisindeki 3 boyutlu ısı iletimi	17
Şekil 2.9 : Ön camı takip eden uygun hava jetinin örnek görüntüsü.....	18
Şekil 2.10 : Ön camı takip eden zayıf hava jetinin örnek görüntüsü.....	19
Şekil 3.1 : Duvarlardaki temas direncinin şematik gösterimi[26].	25
Şekil 3.2 : Birleşik ısı transferi için arayüz şartları[27].	26
Şekil 4.1 : 78/317/EEC, buz çözme standardı tanımlanmış cam alanları.....	31
Şekil 4.2 : SAE J902, buz çözme standardı için tanımlanmış cam alanları	32
Şekil 4.3 : Tanımlanmış bölgelerin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi.....	33
Şekil 4.4 : Tanımlanmış bölgelerin sağ ve sol sınırlarının belirlenmesi.....	33
Şekil 4.5 : Çözünmesi gereken alanların alt ve üst sınırının belirlenmesi.....	34
Şekil 4.6 : SAE J381, buz çözme standardı için tanımlanmış cam alanları	36
Şekil 5.1 : Ön cam hava üfleci için örnek bir enstrümantasyon.	38
Şekil 5.2 : Arka cam tavan açısı ve uygulanacak su miktarı tayini.	39
Şekil 5.3 : Cam yüzeyine su püskürtülmesi sırasında çekilen örnek bir resim.....	39
Şekil 5.4 : Termal görüntüleme düzeneği kurulumu	41
Şekil 5.5 : Tünel testi sırasında termal kamera ile kaydedilmiş bir görüntü	41
Şekil 5.6 : Cam yüzeyindeki hava jet akışı LSV görüntüsü	42
Şekil 5.7 : Sıcak tel anemometresi kurulumunun şematik görünümü	42
Şekil 5.8 : Ön cam hava hızı ölçüm metodu örnek resim.....	43
Şekil 5.9 : Çizgi takip metodu ile yapılan testten bir görüntü	43
Şekil 5.10 : Dijital fotoğraflama metodu ile yapılan testten görüntüler	44
Şekil 5.11 : Araç ön camına su sıkıldıktan sonraki durumun görüntüsü.	45
Şekil 5.12 : Test ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimi.	46
Şekil 5.13 : Sürücü ve yolcu tarafındaki sensörlerde okunan üfleme sıcaklıkları.	47
Şekil 5.14 : Cama üflenen havanın ortalama sıcaklığı ve zamana bağlı değişimi.	47
Şekil 6.1 : Saf su için entalpinin sıcaklık ile değişimi.....	49
Şekil 6.2 : Ön cam boyunca hava akışının şematik görünümü.....	50
Şekil 6.3 : (x_i, y_j) noktasında $u(x_i, y_j, z)$ hız komponentinin şematik gösterimi.	51
Şekil 6.4 : Modelde kullanılan üfleç konumu ve yapısı	51
Şekil 6.5 : İki boyutlu analiz için oluşturulan modelin şematik görünümü.....	52
Şekil 6.6 : Durum 1 – Kaba mesh uygulanmış modelin genel görünümü.....	54
Şekil 6.7 : Durum 1 – Kaba mesh uygulanmış modelde cam ve buz tabakası	54
Şekil 6.8 : Durum 2 – Orta mesh uygulanmış modelin genel görünümü	55
Şekil 6.9 : Durum 2 – Orta mesh uygulanmış modelde cam ve buz tabakası	55

Şekil 6.10 : Durum 3 – Sıkı mesh uygulanmış modelin genel görünümü	56
Şekil 6.11 : Durum 3 – Sıkı mesh uygulanmış modelde cam yüzeyi ve hava kanalı	56
Şekil 6.12 : Durum 4-Çok sıkı ağ yapısı uygulanmış modelde bölgesel ağ yapıları	57
Şekil 6.13 : Modellerde hava üfleci için belirlenmiş sınır tabakaların özellikleri.....	58
Şekil 6.14 : Otomotiv ön cam kompozit katmanları.....	60
Şekil 6.15 : Katı-sıvı arayüzeyinde ısı iletim modelleme teknikleri.....	62
Şekil 6.16 : Katı-akışkan duvar sınır şartı şematik gösterimi.....	62
Şekil 6.17 : Cam alt yüzeyinden 150mm yukarıda sayısal çözüm ağına bağlı hava hızları	63
Şekil 6.18 : Üfleç çıkışında hava hızlarının sayısal çözüm ağı modelleri için karşılaştırılması	64
Şekil 6.19 : Çözüm ağı yapıları için 10dk. sonunda cam iç yüzey sıcaklıkları	64
Şekil 6.20 : 10.dk da dört durum için cam yüzeyinden 5mm içerdeki hava sıcaklığı	65
Şekil 6.21 : 20dk. da dört durum için cam yüzeyinden 5mm içerdeki hava sıcaklığı	66
Şekil 6.22 : Buz tabakasındaki sıvı oranının sayısal çözüm ağına bağlı olarak karşılaştırılması	66
Şekil 6.23 : Cam yüzeyi etrafında hava hızlarının karşılaştırılması için seçilen hatlar	68
Şekil 6.24 : Cam alt yüzeyinden 150 mm yukarıdaki hava hızlarının türbülans modelleri ile karşılaştırılması	69
Şekil 6.25 : Cam alt yüzeyinden 250 mm yukarıdaki hava hızlarının türbülans modelleri ile karşılaştırılması.....	69
Şekil 6.26 : Cam yüzeyinden 5 mm içeride hava hızlarına türbülans modelinin etkisi.....	70
Şekil 6.27 : Üfleç çıkışındaki hız profilinin türbülans modelleri ile karşılaştırılması	71
Şekil 6.28 : Cam iç yüzey sıcaklık artışının türbülans modelleriyle karşılaştırması.	71
Şekil 6.29 : Buz tabakasındaki sıvı oranının türbülans modelleri ile karşılaştırılması	72
Şekil 6.30 : 10 dk. ve 20 dk. sonunda cam iç yüzeyi boyunca toplam ısı transferi ...	73
Şekil 6.31 : Üfleç ile ön cam arasındaki ilişki.....	74
Şekil 6.32 : Analizlerde kullanılan hava jeti çarpma açıları	75
Şekil 6.33 : Farklı üfleç açıları için üfleç çıkışındaki hava hızları	75
Şekil 6.34 : Cam yüzeyine dik hat boyunca hava hızlarının farklı çarpma açıları için karşılaştırılması – 1. pozisyon	76
Şekil 6.35 : Cam yüzeyine dik hat boyunca hava hızlarının farklı çarpma açıları için karşılaştırılması – 2. pozisyon	77
Şekil 6.36 : Farklı çarpma açıları için 10.dk'da buz tabakasının ortalama sıcaklığı .	77
Şekil 6.37 : Farklı çarpma açılarında 10 dk. sonunda buz tabakasındaki sıvı oranı ..	78
Şekil 6.38 : Farklı buz kalınlıkları için sıvı oranının zamana bağlı değişimi	79
Şekil 6.39 : Farklı buz kalınlıklarında cam yüzeyi boyunca gerçekleşen ısı transferi	79
Şekil 6.40 : Farklı buz kalınlıklarında 20dk sonunda buz içindeki sıcaklık dağılımı	80
Şekil 6.41 : Yan duvarlarda taşınım ve adyabatik sınır şartının erimeye olan etkisi.	81
Şekil 6.42 : Üç boyutlu modelin genel görünümü ve modelde kullanılan temel elemanlar	82
Şekil 6.43 : Üç boyutlu modelde kullanılan üfleç geometrisi.....	83
Şekil 6.44 : Üç boyutlu modelde kullanılan hacimsel çözüm ağı kesiti görüntüsü. ..	84
Şekil 6.45 : Üfleç bölgesindeki sıkı ağ yapısı.....	85
Şekil 6.46 : Ön cam üfleç gözenekleri etrafındaki çözüm ağı detayı	85
Şekil 6.47 : Üç boyutlu modelde kullanılan yüzey ağ yapısının kesit görünümü	86

Şekil 6.48 : Modelde kullanılan sayısal çözüm ağının genel kesit görünümü.....	86
Şekil 6.49 : Üfleç içerisindeki hava hız dağılımı.....	88
Şekil 6.50 : Cam iç yüzeyi etrafındaki bölgede hava hız dağılımı	88
Şekil 6.51 : Cam yüzeyi üzerinde hakim olan hava hızları	89
Şekil 6.52 : Cam etrafındaki eş hız yüzeyi ($v = 3.5$ m/s)	90
Şekil 6.53 : Hava kanalı geometrisinden kaynaklı hava akış problemi.....	90
Şekil 6.54 : Araç içerisindeki hava akışı ve koltuğun akışa etkisi.....	91
Şekil 6.55 : Cam alt kısmında oluşan girdap bölgesi.....	91
Şekil 6.56 : Yan duvarlarda taşınım sınır şartı için ilk kırılmanın konumu ve süresi	92
Şekil 6.57 : Taşınım sınır şartı için 10., 15., 20. dakikalarda erimiş buz miktarı.....	93
Şekil 6.58 : Taşınım sınır şartı için 25., 30., 35. dakikalarda erimiş buz miktarı.....	94
Şekil 6.59 : Taşınım sınır şartı için 40.dakikada çözünmüş buz miktarı.....	95
Şekil 6.60 : Yan duvarlarda adyabatik şart için ilk kırılmanın konumu ve süresi.....	95
Şekil 6.61 : Adyabatik şart için 10., 15., 20., dakikalarda çözünmüş buz miktarı	96
Şekil 6.62 : Adyabatik şart için 25. dakikada çözünmüş buz miktarı.....	97
Şekil 6.63 : Yan duvarlardaki sınır şartına bağlı erime miktarındaki değişim	97
Şekil 6.64 : Yan duvarlardaki sınır şartına bağlı cam iç yüzey sıcaklığındaki değişim	98
Şekil 6.65 : Yan duvarlarda taşınım sınır şartı için cam dış yüzey sıcaklığı (20.dk.)	98
Şekil 6.66 : Yan duvarlarda adyabatik şart için cam dış yüzey sıcaklığı (20.dk.).....	99
Şekil 6.67 : Yan duvarlarda taşınım sınır şartı için cam dış yüzey sıcaklığı (40.dk.)	99
Şekil 6.68 : Yan duvarlarda adyabatik şart için cam dış yüzey sıcaklığı (40.dk.)...	100
Şekil 6.69 : Buz erime analiz sonuçlarının ve test çıktılarının karşılaştırılması.....	101

OTOMOTİV ÖN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANSININ SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ VE BUZUN ERİMESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİN İRDELENMESİ

ÖZET

Otomobil iklimlendirme sistemlerinin geliştirilmesinde sürücü ve yolcu güvenliği ile ısı konfor en önemli parametre olarak görülmektedir. Özellikle şiddetli soğukların olduğu kış aylarında ön cam ve kapı camları üzerinde buz ve buğu tabakasının oluşumu sürücü görüş alanını kısıtlamakta ve sürüş dikkatini dağıtmaktadır. Bu nedenle otomobil kalorifer sisteminin performansı araç klima sisteminin dizaynında önemli bir yere sahiptir.

Buz ve buğu çözme sisteminin yeteneği, cam üzerinde oluşan buz tabakasının ne kadar hızlı ve efektif çözüldüğü, cam içerisinde oluşan buğunun ise ne oranda temizlendiği ile ölçülmektedir. Sistemin belirtilen bu özellikleri sağlayabilmesinin altında cama üflenen hava sıcaklığı ve üfleci terkeden sıcak havanın cam etrafındaki hareketi yatmaktadır. Sıcak havanın cam yüzeyi etrafındaki dolaşımı camdan buza doğru olan ısı transferini arttırmakta ve cam dış yüzeyinde bulunan buzun erimesini sağlamaktadır. Uygun hava hızlarının ve sıcaklıklarının sağlanması durumunda kalorifer sisteminin buz çözme performansı sürüşün her anında güvenli görüş açısının elde edilmesini sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında basitleştirilmiş iki boyutlu bir model oluşturulmuş ve bu model üzerinde numerik çalışmalar yapılmıştır. Model üzerinde buz tabakasının kalınlığı sabit kabul edilmiş ve sistem performansı buzun erimesi ile değil bu tabaka içerisindeki sıvı oranının takip edilmesi ile belirlenmiştir. Fluent programı yardımıyla entalpi-porozite yöntemi kullanılarak türbülans modelinin, sayısal çözüm ağ yapısının, hava jetinin cama çarpma açısının, cam üzerindeki buz kalınlığının ve kullanılan sınır şartlarının buzun erimesine olan etkileri teker teker irdelenmiştir. İki boyutlu analizlerden sonra ağır ticari bir yol kamyonunun kabin içi ve ön cam üfleçleri modellenmiş analizlere üç boyutlu olarak devam edilmiştir. Yapılan numerik analizlerin sonuçları modellenen yol kamyonunun soğuk odada yapılmış test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Oluşturulan üç boyutlu model ile test sonuçlarının farklılıkları nedenleri ile birlikte ortaya konulmuş, modelde yapılan yaklaşımlar sonuçlar ile birlikte özetlenmiştir.

Tezin ilk bölümünde tezin amacı ve konu hakkında yapılan literatür araştırması paylaşılmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan modeller incelenerek elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu çalışmalardan yola çıkılarak tez kapsamı belirlenmiş ve çalışma kapsamında yapılacak yaklaşım ve kabuller ortaya konmuştur.

İkinci bölümde buz oluşum sürecinden ve otomobil buz çözme sisteminin çalışma prensibinden bahsedilmiştir. Cama üflenen sıcak havanın cam boyunca oluşturduğu iletim ve taşınım ile ısı transfer mekanizması detaylı olarak açıklanmıştır. Cam içerisinde ısı iletiminin üç boyutlu olduğundan bahsedilmiş ve camı oluşturan

katmanların ısı iletimine olan etkisi açıklanmıştır. Ayrıca buz çözme performansını etkileyen en önemli iki parametrenin, üflenen havanın sıcaklığı ve hava hızlarının optimize edilmesi olduğu belirtilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde buz çözme mekanizması için kullanılan numerik metotlar ve ilgili eşitlikler paylaşılmıştır. Akış ve ısı transfer eşitlikleri kütle korunumu, momentum ve enerji denklemleri yardımıyla çıkarılmıştır. Entalpi-porozite modelinin detaylarından bahsedilmiş buz tabakasının poroz ortam olarak tanımlanması gerektiği açıklanmıştır. Erime modelindeki porozite değerinin sıvı oranına eşit olduğu açıklanmıştır.

Araç buz çözme performansı için firmaların takip ettiği şartnameler ve bu şartnamelerin gereklilik ve içerikleri tezin dördüncü bölümünde gösterilmiştir. Bu şartnamelere uyabilmek için hava üflecinin konumu, hava jetinin cama çarpma açısı, üflecin geometrik yapısı ve sayısı gibi parametrelerin çok iyi şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Otomobil ön cam buz çözme testinin yapılışı, aracın teste hazırlanması ve test sırasında kullanılan takip metotları beşinci bölümde açıklanmıştır. Kızıl ötesi görüntüleme tekniği, çizgi takip metodu, lazer ışın tekniği ve dijital fotoğraflama yöntemlerinden detaylı olarak bahsedilmiştir. Üflenen havanın sıcaklığının zamanla değişimi ve ön cama üflenen havanın ortalama sıcaklığı paylaşılmıştır. Motor suyu sıcaklığı test başlangıcında ortam sıcaklığına eşitken, testin başlamasıyla birlikte ısınmakta ve kalorifer peteği içerisinde dolaşan akışkanın sıcaklığı da artmaktadır. Böylece petek üzerinde kabin içerisine üflenen havaya doğru olan ısı transferi artmakta ve üfleme sıcaklığı giderek yükselmektedir. Buna paralel olarak cam üzerindeki buzun erimesi artan cam yüzey sıcaklığı dolayısıyla hızlanmaktadır. Bu bölümde paylaşılan, test sırasında toplanmış olan üfleme sıcaklıkları zamana bağlı bir fonksiyona çevrilmiş ve sayısal analizlerde giriş şartı olarak kullanılmıştır.

Tez kapsamında oluşturulan iki boyutlu ve üç boyutlu modeller ve yapılan analizler altıncı bölümde detaylandırılmıştır. İki boyutlu model Creo programında tasarlanmış, Ansys 15.0 programında çözüm ağı oluşturulmuş ve analiz yapılmıştır. İki boyutlu model üzerinde yapılan parametrik çalışmalar sonucunda, kullanılan türbülans modelinin ve ağ yapısının cam etrafındaki hava hızlarına ve buzun erime süresine önemli derecede etki ettiği gösterilmiştir. Hava jetinin cama çarpma açısı arttıkça erimenin camın daha alt kısımlarında başladığı görülmüştür. Ayrıca buz tabakasının kalınlığının artmasıyla gerekli olan toplam erime gizli ısı miktarı da artacağından erime süresinin uzadığı gösterilmiştir. Araç yan duvarları için kullanılan sınır şartlarının adyabatik ya da taşınım sınır şartı olması durumunda buzun erime sürecinin nasıl değiştiği karşılaştırılmıştır. İki boyutlu modelleme çalışmasının ardından ağır ticari kamyonun yarım kabin modeli oluşturularak erime üç boyutlu olarak analiz edilmiştir. Araç geometrisi CATIA V5 programında modellenmiş, hacimsel çözüm ağı ANSA V15 programında oluşturulmuştur. Katı ağ modeli kullanılarak cam ve buz tabakası örülmüş, buz içerisinde toplam 5 adet, cam içerisinde ise toplam 10 adet eşit kalınlıkta tabaka oluşturulmuştur. Fluent programında entalpi-porozite yönteminden yararlanılarak erime simüle edilmiştir. Soğuk oda test korelasyonu yapabilmek için yan duvarlarda adyabatik ve taşınım sınır şartı karşılaştırılmıştır. Son bölümde sonuçlar detaylı olarak açıklanmış, model için yapılan kabullerin ne derece doğru olduğu tartışılmıştır. Test sonuçlarından yola çıkarak model iyileştirmesi için gerekli olan öneriler paylaşılmıştır.

NUMERICAL MODELING OF WINDSHIELD DE-ICING PERFORMANCE AND PARAMETRIC EVALUATION OF ICE MELTING PROCESS

SUMMARY

The safety and thermal comfort of automotive passenger has been considered the most important factors in developing the automotive air conditioning system. Especially the formation of frost on the windshield and front door glasses in the severe cold season is a main cause of veiling the passenger's view and disturbing the driving. Therefore, the performance of automotive defroster is important in the design of an air conditioning system to insure passenger's safety and comfort. Maintaining adequate visibility at all times, with the increased glazing surfaces in today's vehicles and the close proximity of the occupant to the surface, clearing of the driver's vision areas in inclement weather is important. The ability of the windshield defrosting and demisting system to quickly and completely melt ice on the outer windshield surface and remove mist formed on the inner surface is therefore of paramount importance. Modern vehicles are expected to both be able to provide thermal comfort and to insure visibility for safe driving by preventing frost formation on the windows even at temperatures of below -20°C .

Frosted windshields are common appearances during the cold season. Frost formation is the phenomenon resulting from breathed vapor that saturates along the inner surface of the windows at below 0°C and prevents the penetration of light from outside. The formation of frost is a complex phenomenon that is affected by the temperature, humidity and velocity of the air near the glass as well as by the surface temperature and roughness of the glass, among the other factors. If the weather changes from temperatures above zero to below this point, humidity contained in the air will condense at car windows and subsequently solidify. In addition, temperature changes lead to resolidification of earlier melted snow that was deposited prior to the temperature changes. This quite trivial occurrence makes the use of defrosting techniques necessary as otherwise the car driver's vision would be affected quite enormously. The defrosting of the car's windshield is carried out by blowing hot air against the inside of the pane. This yields growing temperatures also on the outside and finally makes the ice melt. The physical phenomena involved are fluid flow and heat transfer in the air on both sides of the glass as well as inside (conjugate heat transfer) and the phase change in the solidified water.

Prediction of automotive windshield defrost pattern using CFD is becoming increasingly important as a complement to wind tunnel and field testing to help achieve improved windshield de-icing performance while reducing vehicle development time and cost. CFD simulations have been able to shorten the development cycle and reduce cost. On the other hand, windshield de-icing simulations involve both geometrical complexities as well as complex physics. The efficiency and accuracy of simulation somewhat strongly depend on the simulation parameters. These factors include defroster angle with the windshield, mesh size and

mesh type near windshield and defroster outlet, thermal conductivity and specific heat considerations due to the composite laminate windshield, effect of the melting of ice due to the de-icing, turbulence modeling etc. Without considering these effects, the de-icing rates cannot be correctly predicted.

At the first two chapters, scope of the thesis is explained and a summary of previous studies are presented. The phenomenon for the ice growing over a cold surface and basic terms about the defroster system are discussed in these sections.

The governing equations and the numerical methods employed in the third part of this study. Fluid flow and heat transfer equations are derived from the conservation laws of mass, momentum, and energy. To implement turbulent conjugate heat transfer, the thermal diffusivity has to be modified according to the turbulent boundary layer developed at the solid fluid interface and described by the wall function of turbulence. Instead of tracking the liquid solid front explicitly, Fluent 15.0 uses enthalpy porosity formulation. The liquid solid mushy zone is treated as a porous zone with porosity equal to the liquid fraction, and appropriate momentum sink terms are added to the momentum equations to account for the pressure drop caused by the presence of solid material. Sinks are also added to the turbulence equations to account for reduced porosity in the solid regions.

All of the windshield defrosting system test procedures and performance requirements are explained on the fourth chapter of thesis. SAE recommended practice establish uniform test procedures and performance requirements for the defrosting system of vehicles. It is limited to a test that can be conducted on uniform test equipment in commercially available laboratory facilities. Current engineering practice prescribes that for laboratory evaluation of defroster systems, an ice coating of known thickness be applied to the windshield, left and right hand side windows to provide more uniform repeatable test results, even though under actual conditions such a coating would necessarily be scraped off before driving. The test condition, therefore, represents a more severe condition than the actual condition where the defroster system must merely be capable of maintaining a cleared viewing area. The de-icing performance of a defroster system is normally evaluated by its ability to quickly remove ice layer for the given zones. For instant, SAE J902 requires that 100% "C" zone and 80% "A" zone of the windshield must be cleared in 30 minutes. FMVSS 103 requires that 80% "C" zone of the windshield must be cleared in 20 minutes. To achieve these de-icing performance standards, several design parameters should be considered, such as defroster nozzle out location, air impingement angle, cross-section area of the defroster nozzle and its optimum shape, and finally number of nozzle outlets needed which depends on the vehicle and the packaging space. Among these parameters, the most significant parameter is the impingement angle and air velocity. These two parameters need to be optimized to insure that the air jet leaving the defroster nozzle travels along the windshield without any significant separation from the windshield.

Cold room de-icing test method is explained in section five. Vehicle preparation before the test like ice coating over the windshield and vehicle soaking is detailed in this section. Velocity measurement techniques like hot wire anemometry, hot bulb probe and laser sheet visualization and ice melting tracking techniques like thermal imaging, line tracking and digital photographing are shortly examined.

Hot wire anemometry provides quantitative velocity measurements that are useful for determining defroster and windshield airflow and validating the numerical simulations. Hot bulb probe is used to measure the velocity and the temperature simultaneously. The principle of this thermal probe is based on a heated element from which heat is extracted by the colder impact flow. Laser sheet visualization involves the projection a sheet of laser light inside the cabin and the recording of the image of scattering particles on a single photographic negative or on a video film. Thermal imaging is used to map the temperature contours on the window outer surface.

In the sixth part of this investigation, parametric study on automotive windshield defrost pattern using CFD was performed about simplified 2D passenger compartment considering shape of grid system, turbulence models, impingement jet angle, convective conditions of the climatic wind tunnel and ice thickness in transient simulation. 2D geometry was modeled by using Creo Parametric 2.0 and meshing is done by Ansys 15.0 program. The objectives are to examine the effects of each parameter and derive the optimized simulation methodology of windshield defrost pattern. After this parametric investigation a 3D model including defroster nozzles, passenger compartment, first row seats and air extractors created by using CATIA V5. These data read into mesh-generated software ANSA V15.0.2 for mesh generation. In solid modeling method, the prism layers were created to model the thickness of windshield as solid elements. Total 10 prism layers are generated with thickness equal to one tenth of respective glass thickness to model the windshield and 5 prism layers with 0.01 mm thickness are generated for ice layers over windshield. A general-purpose CFD solver, Fluent 15.0 is used to simulate the de-icing process. The melting of ice is simulated using phase change model, which is based on the enthalpy-porosity techniques.

The defroster performance simulation is performed in two steps. First, the momentum and continuity equations are solved to determine the steady state isothermal flow field inside the nozzle and the cabin. Then, in the second step, using the steady state solution of the flow field the transient solution of the energy equation is obtained to calculate the temperature of the entire flow domain and the conjugate heat transfer through the windshield and ice layers. Since energy equation is linear, the analysis can be started as steady state to solve for the flow and turbulence equations and then solve the energy equation as function of time on the converged flow field. To simulate the wind tunnel test and the transient nature of the analysis the temperature at the nozzle outlet should vary with time. This is done through user define function to simulate the vehicle warm up curve at duct inlet port. The boundary conditions are assumed to be uniform mass flow ($5.66 \text{ m}^3/\text{min.}$) at the nozzle inlet and constant atmospheric pressure ($P = 0.0 \text{ Pascal gage}$) at the outlet. This assumption is considered as no slip boundary conditions. Inlet flow rate corresponds to the vehicle climate control setting of maximum flow/maximum heat in defrost mode. Turbulence is assumed to exist starting at the inlet at 5% intensity level. The initial ice thickness was assumed 0.5 mm, which was evaluated from the amount of sprayed water used, and the overall windshield surface area. The initial temperature in the passenger compartment was -8°C .

Grid system applied in simulation affects the flow field and defrosting pattern. In general, the complicate shape of defroster duct and passenger compartment needs much more modeling efforts. For this reason, it is convenient to use tetrahedral grid

system to construct the computational model. In spite of its convenience, tetrahedral grid system has a shortcoming to simulate the flow field in the boundary layer having large velocity gradient because it has large mesh size near the wall. For this reason, near wall mesh treatment is required to construct the fine mesh layer up to proper location covering the boundary layer. In this study 4 different grid system are checked in terms of velocity prediction around the windshield and inside the cabin. Tetrahedral grid system is used for cabin and for windshield and ice, quadrilateral elements are used. All models have different layer quantities for windshield and ice layer. Except the first model, the all models have near wall treatment. The RNG k- ϵ turbulence model with enhanced wall functions is used to consider turbulent effect of fluid flow. To check the effect of turbulence models on 2D model, Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , Standart k-w and SST k-w model with enhanced wall and scalable wall functions were used for the case 4 grid system. In transient simulation of defrosting, analysis were set to run in case 4 grid, 0.1 second time increments in total time 40 minutes. The thermal boundary conditions were assumed adiabatic at all the outer surfaces. Realizable k- ϵ turbulence model with scalable wall function cannot predict the ice melting process. Also ice melting process is slower with k-w turbulence models than the k- ϵ . In addition to grid system and turbulence effect to the ice melting process, different impingement jet angles and convective heat transfer through the cabin wall are investigated. It was found that, there is a slightly effect of air jet angle on total ice melting time. After parametric investigation a 3D model is created to see time dependent melting pattern of ice. ANSA mesh generator is used for 3D model volume meshing. Again, Fluent 15.0 is used for 3D numeric analyses with steady state for momentum and turbulent flow and unsteady analysis for time dependent de-icing performance. Adiabatic and convective thermal wall conditions at cabin outer walls are compared with the defrosting tests results. Since the half cabin model is used, results are compatible with each other.

Finally, in the seventh section, summary of results and suggestions are obtained. The important parameters are determined and validation of chosen correlations is shown. Future works are clarified in order to improve the de-icing model.

1. GİRİŞ

Araç içi iklimlendirme, otomobil sektöründe firmaların rekabet edebilmesi için büyük önem arz eden bir kalite parametresidir. Kabin içerisindeki ısı dengeyi sağlayarak yolcuların konfor şartları altında seyahat etmeleri temel hedef olarak gözüktüğü de ön ve yan camlardaki görüş alanlarının yeterli açıklıkta olması sürücü ve yolcu güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle iklimlendirme sistemleri konfor ortamı oluşturmanın yanı sıra, sürüşün her anında araç içerisinde bulunan yolcuların güvenliğini de sağlamalıdır.

Özellikle soğuk bölgelerde ön ve yan camlardaki buzlanma sürücünün görüş açısının azalmasına ve dikkatinin dağılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle araç çalışma anından sürüş koşullarına ulaşıncaya dek ön cam üzerindeki, görüş açısını kısıtlayan buz tamamen çözünmüş olmalıdır.

Buz çözme sistemi, hızlı ve efektif bir şekilde cam üzerindeki buz eritmeli ve görüş alanının açılmasını sağlamalıdır. Dolayısıyla otomotiv sektöründe önemli noktalardan biri de basınç kayıpları ve akış direnci en az olan, sıcak havayı buz ve buğuyu çözmek için cam iç yüzeyine doğru üfleyen menfezleri ve havayı bu menfezlere doğru ileten hava kanallarını tasarlamaktır.

1.1 Tezin Amacı

Otomotil iklimlendirme ve buz çözme sistemleri, eskiden sadece klimatik rüzgar tünellerinde, araç seviyesi testler ile kontrol edilmekteydi. Prototip seviyedeki araçlar üzerinde soğuk ve sıcak odalarda testler yapılıyor olsa bile iklimlendirme sisteminin tasarımı ve doğrulaması tünel testlerinden çok önceki bir aşamada yapılmalıdır. Tünel test maliyetlerinin çok yüksek olması ve otomobil HVAC sistem dizaynının büyük yatırımlar gerektirmesi nedeniyle, iklimlendirme sistemlerinin araç seviyesi testlerden önce doğrulanması kaçınılmaz olmuştur. Akışkanlar mekaniği sayesinde daha doğru dizayn ve efektif üretim gerçekleştirilebilmeye ve tasarımın ilk aşamalarında büyük yatırımlar gerektirmeden, bu olsa ne olurdu şeklindeki çalışmaların sonuçlarını kolaylıkla elde edilmeye başlanmıştır.

Bu çalışmadaki amaç; otomobil ön camı üzerindeki buz tabakasının eriyebilmesi için gereken teknikleri anlatma, ön cam üzerindeki ısı transferinin ve hava akışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) metotları yardımı ile modellenmesi, üfleçten çıkan sıcak havanın cam dış yüzeyi üzerinde bulunan buzun erimesine olan etkisinin zamana bağlı olarak incelenmesidir.

Çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada yolcu kabini, cam ve buz 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Türbülans modelinin, kullanılan sayısal çözüm ağ yapısının, sıcak havanın cama çarpma açısının, kabin duvarlarındaki termal sınır şartların ve buz kalınlığının cam iç yüzeyindeki havanın dağılımına ve cam dış yüzeyinde bulunan buzun erime profiline olan etkisi karşılaştırılmıştır.

İkinci aşamada ise, buz çözme sisteminin performansının incelemesi için 3 boyutlu bir model oluşturulmuştur. Klimatik rüzgar tüneline elde edilen veriler ile numerik çözümler karşılaştırılmış ve zamana bağlı buzun erimesi incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Çeşitli ülkeler tarafından kabul edilen regülasyonlar kapsamında sürüşün her anında görüş alanının açık tutulması oldukça önemli bir konudur. Otomobil üretim firmaları bu nedenle iklimlendirme sistemlerinin tasarımını, üretimini ve araç seviyesi performanslarını ilgili regülasyonlar kapsamında kanıtlamak zorundadırlar.

Önceleri klima sisteminin tasarımı bittikten sonra tünel testleri yapıp sistem performansı kontrol edilirdi. Tasarımda problem görülmesi halinde geriye dönük çalışma yapılmaktaydı. Rüzgar tünellerinde yapılan testlerin maliyeti çok fazla olduğundan kayıp bütçe de oldukça fazla olmaktaydı. Bunun yanı sıra prototip parçaların dizaynı, parça numunelerinin ve aracın üretilmesi ve rüzgar tüneline teste alınması için oldukça uzun bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu süre sonucunda deneyden elde edilecek veriler, araç üzerinde bulunan enstrümantasyon ile kısıtlanmaktadır yani elde edilen veri kullanılan sensör adedi kadardır.

Günümüzde ise cam üzerindeki buzun çözünme prosesini daha iyi anlamak ve erimeye etkili parametrelerin tespiti için birçok modelleme ve simülasyon çalışması yapılmaktadır. Böylece araç seviyesi testlerden önce kurulan modeller üzerinden sistem dizaynı üzerinde optimizasyon çalışmaları yürütülebilmektedir. Tünel testleri

optimize edilmiş sistem ile yapılmakta ve test sırasında karşılaşılabilecek beklenmedik sonuçlar en aza indirilebilmektedir.

Lee ve diğ. (1994) yapmış oldukları çalışmada, 250⁰K sıcaklıktaki bir test odasında bulunan aracın ön cam buz çözme performansını simüle etmek adına üç boyutlu bir model oluşturmuşlardır. Modelde Chrysler marka bir araç kullanılmış ve modele sadece ön cam, arka cam, koltuklar ve hava kanalları katılmıştır. Oluşturulan model standart k-ε türbülans modeli ile çözümlenmiştir. Başlangıçta 0.47 mm kalınlıkta olan buz tabakasının erimesi, birleşik ısı transferi ve entalpi metodu ile zamana bağlı olarak takip edilmiştir. Analiz sonuçları araç seviyesi test sonuçları ile karşılaştırılarak yorumlamalar yapılmıştır[1].

Wolfahrt ve diğ. (2005) yaptıkları üç boyutlu analizlerde “steady strategy” ve “switch on/off strategy” olarak tanımladıkları iki ayrı yöntem kullanmışlardır. Birinci yöntemde ilk olarak buzun erimesi dikkate alınmadan sadece momentum denklemi çözülerek cam bölgesinde kararlı haldeki hava hızları elde edilmiş ve daha sonra zamana bağlı çözümlerle, enerji denklemleri vasıtasıyla buzun erime prosesi incelenmiştir. İkinci yöntemde ise zamana bağlı enerji ve türbülans hesaplamaları kullanılmıştır. Zamana bağlı çözüm yapılırken momentum ve süreklilik denklemleri, cama üflenen havanın sıcaklığı belirlenen bir artış değerine ulaştığında hesaplama katılmış ve kısa bir süre sonra hesaplama dışına alınmıştır. Momentum ve süreklilik denklemlerinin analiz boyunca belirlenen bir profil altında devreye giriş ve çıkışı sağlanmıştır. Birinci yöntem olan “steady strategy” de buz çözünme prosesi referans değerden daha yavaş olduğundan sonuçlarda büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bunun aksine ikinci yöntemdeki sonuçlar referans değere oldukça yakındır. Bu nedenle kısa sürede kantitatif veriler elde etmek için “steady strategy” yönteminin kullanılabilmesi ancak daha doğru ve net sonuçlar elde etmek için “switch on/off strategy” yönteminin tercih edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Analizlerin sonunda ikinci yöntem için parametre çalışması yapılarak çözüm süresinin çeşitli parametreler üzerinde oynayarak %15-50 oranında kısaltılabileceği gösterilmiştir[2].

Buz erime problemlerinin çoğunda kullanılan entalpi metodu, su buz karışımının lineer olmayan bir entalpi sıcaklık etkileşimi olduğunu temel almaktadır. Buzun entalpisinin sıcaklıkla değişimi, erime sıcaklığının altında ve üstünde lineerdir ancak erime sıcaklığında ise erime gizli ısı kadar bir artış oluşmaktadır. Brewster ve diğ. (1997) çalışmalarında bu metodu baz alarak Star CD programında üç boyutlu model

üzerinde otomobil ön camındaki buzun erimesini simüle etmişlerdir. Yapılan çalışmada su/buz karışımının yoğunluğu ve termal iletkenliği sabit kabul edilmiş ve erime bölgesinde akış ihmal edilmiştir. Ayrıca buz ve su homojen maddeler olarak kabul edilerek cam yüzeyindeki buz tabakasının erimesi sırasında, su buz karışımı içerisine hapsolmuş hava kabarcıklarının ve katı partiküllerin etkisi dikkate alınmamıştır. Analiz boyunca her bir hücredeki sıvı oranı hesaplanarak buzun zamana bağlı erimesi simüle edilmiştir[3].

AbdulNour (1998) yaptığı çalışmada cama üflenen sıcak hava debisini 101.4 cfm olarak sabit kabul etmiş ve üfleme menfezlerinin efektif alanlarını hesaplayarak, cama üflenen havanın ortalama hızını hesaplamıştır. Elde edilen hava hızları araç klima sisteminin, maksimum fan hızında ve maksimum sıcaklıkta çalıştırıldığında elde edilen değerlere denk gelmektedir. Cam iç yüzeyinde Reynold sayısı hesaplanarak akışın tamamen türbülanslı olduğu kanıtlanmıştır. Star-CD programında analizler, akışın kararlı, viskoz, sıkıştırılmaz, Newtonien, izentropik ve homojen olduğu varsayımları altında k-ε türbülans modeli ile yapılmıştır. Üç boyutlu model üzerinde yapılan çalışmada cam bölgesindeki mesh yoğunluğu diğer bölgelere göre daha fazla olacak şekilde toplam 110,000 hücre tanımlanmıştır. Analizde giriş şartı için uniform hava hızı çıkış şartı için sabit basınç şartı tanımlanmıştır. Numerik çalışmanın ardından deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kızgın telli anemometre yardımı ile cam iç yüzeyi civarında ve hava üfleme menfezleri etrafındaki hız değerleri ölçülmüştür. Ölçümler numerik değerler ile karşılaştırılmış ve HAD analizleri sonucunda elde edilen değerlerin ölçülen değerlere göre %1 oranında bir sapmaya sahip olduğu gösterilmiştir. Sonuçların birbirine çok yakın olması nedeniyle, numerik çalışmaların başarılı bir şekilde birçok otomotiv uygulamalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır[4].

Hill ve Sringari (2001) araç ön cam buz çözme performansını inceleyebilmek için kabin şartlarını yansıtan parametrik bir model geliştirmişlerdir. Bu sayede sistem dizaynının ilk aşamalarında büyük yatırımlar gerektirmeden çeşitli iterasyonlar üzerinde inceleme yapılabilmektedir. Geometri parametrelere bağlı olarak iki boyutlu tasarlanmış ve daha sonra üç boyuta aktarılmıştır. Ön cam açısı parametrik olarak tasarlanıp, cama üflenen hava jetinin çarpma açısının cam yüzeyindeki buzun ilk çözünme noktasına olan etkisi gösterilmiştir. Diğer parametrik değer olarak camın formu seçilmiştir. Bu sayede camın eğriselliği ile buzun erimesi arasındaki ilişki

irdelenebilmiştir. Parametreler üzerinde optimizasyonlar yapılarak en iyi buz çözme performansını veren dizayn oluşturulmuştur. Farklı sıcaklık giriş şartları kullanılarak ve test odasındaki rüzgar hızları değiştirilerek hassasiyet çalışmaları yapılmış ve buzun erimesine olan etkileri araştırılmıştır[5].

Roy ve diğ. (2001) cam yüzeyinde buz çözünmesini inceleyebilmek için basit bir deney düzeneği kurmuşlardır. Deney düzeneğinde, cama oda sıcaklığındaki hava yönlendirilmiş ve cam yüzeyine sabit ısı akısı sağlayan bir bant yapıştırılmıştır. Böylece motor ısınmasına bağlı olarak cama üflenen havanın sıcaklık artışı, sabit ısı akısı sağlayan bu bant ile sağlanmıştır. Deney sırasında cama üflenen hava debisi sabit olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney düzeneğini temsil eden bir model kurularak akış analizleri yapılmıştır. Hava hızı menfez çıkışında sabit sıcaklıkta ve sabit hızda olacak şekilde kabul yapılmış ve cam dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru sabit ısı akısı tanımlanmıştır. Deneysel ve numerik çalışmalar sonucunda cam yüzeyindeki sıcaklık dağılımı elde edilmiş sonuçlar 17 farklı noktada karşılaştırılmıştır. Numerik değerler ile deneysel sonuçlar arasında $(1-3)^{\circ}\text{C}$ kadar farklılık görülmüş ve sonuçların birbirleriyle oldukça iyi örtüştüğü ortaya konmuştur[6].

Becker ve diğ. [7] yapmış oldukları çalışmada LDA yöntemi ile otomobil ön cam bölgesindeki hava hızları ve sıcaklık dağılımı üzerine çalışmışlardır. Bu yöntem sayesinde cam üzerindeki toplam 1193 noktada hava hızları ortalama olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçları numerik sonuçlarla karşılaştırabilmek için Star-CD programında modelleme yapılmış ve kabin akışı simetrik kabul edilerek modellemeye yolcu tarafı katılmamıştır. Gerçek modellemenin dışında, değişken parametrelerin buzun erimesine olan etkisini gözlemleyebilmek için basitleştirilmiş bir test düzeneği kurulmuş ve üç farklı inceleme yapılmıştır. Düzenekte eğik cam yüzey üzerine 40° açıyla hava üfleyen bir fan bulunmakta sistemi terkeden hava aynı fan ile tekrar model odasına üflenmektedir. Model üzerinde ilk olarak izotermal çalışmalar yapılarak akış hızları incelenmiştir. LDA yöntemi ile elde edilen veriler kullanılarak Richardson boyutsuz sayısı hesaplanmıştır. Hesaplanan Richardson sayısının çok küçük olması nedeniyle kaldırma kuvvetlerinin ihmal edilebilirliği sonucuna varılmış dolayısıyla izotermal ve izotermal olmayan akışlarda hız profillerinin aslında aynı olacağı ispatlanmıştır. Yapılan çalışmada cam gelen hava jetinin altında kalan alan ile zemin arasında sirkülasyon olduğu gözlemlenmiştir. Kurulan test düzeneği üzerinde yapılan ikinci çalışmada ise, düzenek sabit

sıcaklıktaki havuza daldırılmış ve cam yüzeyine sıcaklığı elektrikli ısıtıcıyla arttırılan hava gönderilmiştir. Sabit sıcaklıkta havuz kullanılmasının amacı camın dış yüzeyinde izotermal bir ortam oluşturmaktır. LDA ile alınan hız ölçüm sonuçlarının izotermal hava üflenmesi durumunda elde edilen değerlerle aynı olduğunu gösterilmiştir. Termal kamera ile cam yüzeyindeki sıcaklık dağılımı incelenmiş ve en yüksek sıcaklığın, üflenen havanın cama temas ettiği noktada olduğu görülmüştür. Son çalışmada ise test aparatı gerçek araç testinin yapılmış olduğu soğuk odaya sokulmuştur. İlk iki dakika sonunda erime başlamış ve erimenin simetrik olduğu anlaşılmıştır.

Roberts ve diğ. (2000) bu makede otomobil buz çözme sistemlerinin performansını incelemek için kullanılan test metodlarından bahsetmiştir. Genel olarak çizgi takibi ve dijital fotoğralama yöntemlerinin nasıl uygulandığı açıklamışlar ve bu yöntemlerin birbirlerine göre olan üstünlüklerini ve dezavantajlarını ortaya koymuşlardır. Çizgi takip metodunda birden fazla operatöre ihtiyaç duyulması, cam yüzeyine buz erime profillerinin çizilmesi esnasında operatörün elinin hava akışını bozması ve testin daha uzun bir süre sonunda tamamlanması nedeniyle dijital fotoğraflama yönteminin tercih edilmesi gerektiği belirtilmiştir[8].

Park ve Kim (2003) otomobil ön camındaki buzun erimesini inceleyen bir HAD modeli oluşturarak parametrik çalışmalar ortaya koymuşlardır. Oluşturmuş oldukları 2 boyutlu modelle mesh yapısının, mesh yoğunluğunun, analizde kullanılan türbülans modelinin ve kullanılan zaman adımlarının buzun erimesine olan etkisini irdelemişlerdir. HAD modelinde hava sabit 7 m/s ile cam yüzeyine gönderilmekte ve sabit atmosferik basınç sınır şartı altında kabini terketmektedir. Cam ve buz kalınlıkları analiz boyunca sabit kabul edilmiştir. Sonuçlara mesh yapısının ve yoğunluğunun etkisini gösterebilmek için 5 farklı model ile k- ϵ türbülans yöntemi ve 5'er saniye zaman adımları kullanılarak zamana bağlı analizler yapmışlardır. Cam bölgesinde sınır tabaka kullanılması sonucunda oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bunun aksine kaba mesh yapısı kullanılması ve sınır tabaka uygulanmaması halinde sonuçların oldukça zayıf olduğu görülmüştür. Türbülans yapısı üzerindeki iterasyonlarda ise standart k- ϵ , RNG k- ϵ , realizable k- ϵ ve son olarak standart k-w modelleri kullanılmıştır. Cam yüzeyindeki buzun erimesi k-w türbülans yönteminde diğerlerine göre daha yavaş gerçekleşmiş ve referans değere göre farklılık göstermiştir. Son olarak değişik zaman adımları kullanılarak buzun erimesi simüle

edilmiştir. 1sn, 5 sn ve 10 sn ile yapılan iterasyonlarda sonuçlar birbirine oldukça yakın çıkmış dolayısıyla analizlerde fazla zaman kaybetmemek için daha geniş zaman aralıklarının kullanılabilceği gösterilmiştir[9].

Kabin içerisindeki ısı dengeyi sağlayarak yolcuların konfor şartları altında seyahat etmelerini sağlamak temel hedef olarak gözükse de ön ve yan camlardaki görüş alanlarının yeterli açıklıkta olması sürücü ve yolcu güvenliği açısından büyük önem taşımaktadır. Aroussi ve diğ. Ford Focus ve Ford Taurus model araçların yan camlarındaki buğu ve buz tabakasının çözünme performansını incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda yan camlardaki çözünmenin hedef değerden oldukça uzak olduğu tespit edilmiştir. Hava yönlendirmesinin uygun olmaması nedeniyle camın alt bölgesinde yani sürücü görüş açısının dışında kalan bölgelerde yüksek hava hızları elde edilmiş ve çözünme ilk olarak bu bölgelerde başlamıştır. Üfleçlerin konumunun ve hava yönlendirmesinin uygun olmadığı anlaşılmış ve üfleme açılarının değişmesi gerektiği belirtilmiştir[10].

Otomotiv endüstrisinde kabin içindeki yolcuların ısı konforu güç geçtikçe önem kazanan bir konudur. Daha rahat yolculuk şartlarına olan talep sektörde iklimlendirme sistemleri için optimizasyon çalışmalarına gidilmesine neden olmaktadır. Aroussi ve diğ. (2001) yılında yapmış oldukları çalışmada buz çözme modunda ön cama üflenen ve daha sonra kabin içerisine yayılan sıcak havanın yolcu konforuna olan etkisini hem deneysel hem de numerik yöntemlerle açıklamışlardır. Numerik çalışmalar Fluent 5.0.2 akış analiz programında, RNG k-ε türbülans modeli ile toplam 1.420.000 üçgen mesh elemanı kullanılarak Ford Taurus araç modeli üzerinde yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ise “hot bulb probe” kullanılarak cam bölgesinde hava hızları kaydedilmiş ve termal kameralar ile ön cam üzerindeki sıcaklık dağılımları gözlemlenmiştir. Her ne kadar cam dış yüzeyindeki buzun çözünmesi güvenli sürüş için önemli bir kriter olsa da üflenen sıcak hava özellikle sürücü üzerinde istenmeyen bir etki yaratabilmektedir. Dış ortam sıcaklığı düşük olduğunda sürücü açısından kabin içerisinde arzu edilen sıcaklık dağılımı, baş bölgesinin soğuk ayak bölgesinin ise daha sıcak olmasıdır. Bu çalışmada ise durumun bunun tam tersi olduğu görülmüş ve buz çözme modunun sürücünün dikkatini dağıtmayacak şekilde otomotize edilmesi gerektiği belirtilmiştir[11].

Aroussi ve arkadaşlarının diğer bir çalışmada 1/5 oranındaki model araç kullanılarak deneyler yapılmıştır. Model su dolu bir havuza daldırılmış ve suyun

özellikleri dış ortam olarak tanımlanmıştır. Model, içerisindeki akışı lazer yöntemi ile gözlemleyebilmek için saydam lateks malzemeden yapılmıştır. 1/5 ölçekli modelde sabit hız giriş şartı altında testler yapılmış ve aynı zamanda Fluent programında koşturulan analizlerle test sonuçları karşılaştırılmıştır[12].

AbdulNour (1999) çalışmasında ön cam üzerindeki hava akışı ve ısı transferini modelleyerek entalpi metodu altında buzun erimesini analiz etmiştir. Analizlerinde ilk olarak izotermal akış çözümü yapmış daha sonra buz erimesi zamana bağlı incelenmiştir. İzotermal analizleri sırasında akışı üç boyutlu, viskoz, sıkıştırılmaz, Newtonian kabul etmiştir. Sınır şartları olarak sabit giriş hızı, çıkışta ise sabit atmosferik basınç sınır şartını kullanmıştır. Kabinin diğer bölgeleri kaymama şartı yani duvar olarak tanımlanmıştır. Türbülans yoğunluğu için %5 seviyesi seçilmiş ve standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Erime modellemesinde ise entalpi metodunu kullanarak buz tabakası içerisindeki sıvı oranını takip etmiş ve zamana bağlı erime profilini elde etmiştir. Soğuk oda testlerinde “hot-wire” yöntemi kullanılarak ölçümler almış ve HAD modeliyle karşılaştırmıştır. Çalışmasında sonuçların uluslararası FMVSS 103 şartnamesine uygun olduğunu ispatlamıştır[13].

Skea ve diğ. (2001) buz çözme performansını incelemek için oluşturdukları iki farklı HAD modelin sonuçlarını inceledikleri aracın test sırasında alınan termal görüntüleri ile karşılaştırmıştır. Analizler Star-CD ve Power Flow kullanılarak yapılmış ve Power Flow modeli test sonuçları ile karşılaştırma yapıldığında daha zayıf kaldığı belirtilmiştir. Her iki modelde de ön cam üzerinde elde edilen sıcaklık dağılımı ve hava hızları aynı olsa da Power Flow ile yapılan analizlerde yan camlar üzerine üflenen havanın yetersiz kaldığı görülmüştür[14].

Patikar (2010) yayınlamış olduğu çalışmasında iki farklı çözümleme yöntemi kullanarak üç boyutlu modeli üzerinde otomobil ön ve yan camları üzerindeki buzun erimesini zamana bağlı olarak incelemiştir. Katı modelleme ve kabuk modelleme olarak tanımladığı yöntemlerde ilk olarak kararlı halde hava hızları elde edilmiş ve ikinci aşamada kararlı haldeki hava hızları kullanılarak Fluent programında erime-katılaşma yöntemi ile zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Katı modelleme yöntemiyle camlar ve üzerlerindeki buz tabakası katı olarak modellenmiş, kabuk yöntemde ise camlar yüzey olarak tanımlanmış ve kalınlıkları ile birlikte duvar sınır şartı olarak Fluent’te modellenmiştir. Kabuk modelde buz tabakası katı modelleme yönteminde olduğu gibi katı tabaka olarak modellenmiştir. Katı modelleme yönteminde analizler

2.3 milyon mesh elemanı ile 15 saatte sonuçlanırken, kabuk modelleme yönteminde 1.7 milyon mesh elemanı üzerinde 9 saatte'da tamamlanmıştır. Dolayısıyla % 40 daha hızlı sonuç veren kabuk modelleme yönteminin bu tarz uygulamalarda kullanılması önerilmiştir[15].

Sandhu [16] Star CCM+ analiz programı kullanarak Land Rover Freelander 2 ve Jaguar XJ marka iki aracın ön cam buz çözme performansını incelemiştir. 5 mm lik ön camlar 5 eşit prizmatik tabaka şeklinde modellenmiş ve cam dış yüzeyindeki buzun kalınlığı 0.478 mm olarak kabul edilmiştir. Elde edilen numerik sonuçların test sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür.

Cam iç yüzeyindeki hava akışı buz ve buğu çözme performansı üzerinde kilit rol oynamaktadır. Düzenli bir hava akışı, cam yüzeyindeki sıcaklık dağılımını olumlu yönde etkilemekte ve daha iyi çözüme oranlarına erişmeyi sağlamaktadır. Bu nedenle tasarımın ilk aşamalarında HAD kullanılarak hava kanalları ve cam üzerindeki hava akışı optimize edilmelidir. Kumar ve dig. (2010) kurdukları modelde cama üflenen havanın cam yüzeyinde düzgün dağılım göstermediğini, hava hızlarının dış yüzeydeki buz çözüme başarısız olduğunu görmüş ve akış üzerine optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. Optimize edilen hava kanalları ile fiziksel testler yapılmış ve buz çözme performansı şartnameleri karşılar düzeye gelmiştir[17].

Aroussi ve dig. (2000) gerçekleştirdikleri çalışmada mevcut klima sistemini kullanarak buz çözme performansını nasıl arttırılabileceği konusu üzerinde çalışmışlardır. İnceledikleri aracın buz çözme sisteminin, ilk çözünen yerin sürücü görüş alanının altında olması nedeniyle yetersiz olduğunu göstermişlerdir. Ön camın ve hava kanallarının dizaynı hava akışının yetersiz olmasına ve ön camda ölü noktaların oluşmasına neden olmuştur. Yan dirseklerden hava üflenmesi durumunda ön camdaki çözünmenin bariz şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu şekilde cam üzerindeki hava hızları artmakta ve bu artış cam üzerindeki ölü noktaları azaltmaktadır. Momentum aktarımı hızlandığından cam üzerindeki ısı transfer oranı da artmakta ve ısı camın üst noktalarına kadar iletilebilmektedir[18].

Kumbae ve dig. (2008) yapmış olduğu çalışmada, kabin içinde belirli noktalara yerleştirmiş oldukları sensörler ile sıcak ve güneşli bir yaz ayında park halinde olan araç içerisinden sıcaklık kayıtları almışlardır. Veriler toplanırken buz çözme modu tamamen açık ve 35⁰ lik açı ile 7 m/s sabit hızda hava kabin içerisine üflenmektedir.

Kabin içerisinde alt bölgelerdeki sıcaklık değerleri üst bölgelere göre daha düşük ölçülmüştür. Bunun nedeni araç tavanının sıcaklığı ve camlardan olan radyasyon olarak belirtilmiştir. Bu çalışmayı değerlendirmek için paralelinde HAD modeli Scryu Tetra programında oluşturulmuş kabin içerisinde sıkıştırılmaz, kararsız bir akış modellenmiştir. Kabin içerisindeki sıcaklık 35°C olarak belirlenmiş ve 7 m/s sabit hızla üflenen havanın sıcaklığı 23°C 'den 12°C 'ye düştüğü varsayılmıştır. Kabin dış yüzeyleri adyabatik ve dış ortam sıcaklığı sabit 28°C olarak tanımlanmıştır. Kabin içi ortalama sıcaklığı deneysel ölçümlerden biraz daha farklı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kabin duvarlarının adyabatik olarak kabul edilmesidir. Ancak normalde camlardan radyasyon ile ısı kaybı vardır[19].

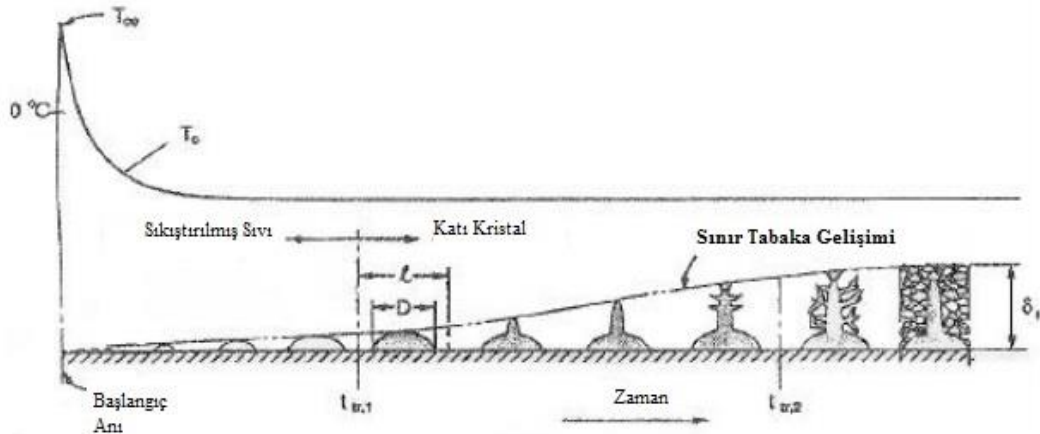
Otomobil buz çözme performansına sıcak hava üfleçlerinin lokasyonu, kesit alanı, sayısı ve üflenen havanın ön cam ile yapmış olduğu açı ve hızı oldukça etkilidir. Farag ve Huang (2003) RNG k- ϵ ve "None Equilibrium Wall Functions" türbülans modeli kullanarak üç boyutlu analizler yapmıştır. Yapmış oldukları analizde 6.67 dk sonunda erime başlarken, tünel testinde bu başlangıç 5dk sonunda gerçekleşmiştir. Bu nedenle kurulan modelinin tasarımın ilk aşamalarındaki kontroller için yeterli olduğu belirtilmiştir[20].

Mandloi ve Jain eğik yüzey üzerinde bulunan buz tabakasının erimesini incelemek için kurmuş oldukları basit model üzerinde çalışmalarını yapmışlardır. Sınır tabakanın ve türbülans modelinin çözüme olan etkileri gösterilmiştir. Bu değerlendirmeler yapılırken su buz karışımının özgül ısıları ve termal iletkenliği sabit kabul edilmiştir. Halbuki buz eridiğinde, su buz karışımı için ortalama özgül ısı ve efektif termal iletkenlik hesaplanmalıdır. Sabit olmayan bu şartlar altında analiz yapıldığında suyun özgül ısısının buzdan fazla olması nedeniyle erimenin yavaşladığı görülmüştür. Otomotiv endüstrisinde camlar, plastik ve cam olmak üzere iki katmandan oluşmaktadır. Ancak yapılan birçok çalışmada camlar iki tabaka olarak modellenmek yerine tek bir katı tabaka halinde modellenmektedir. Bu plastik katmanların etkisini görmek için yapılan iterasyonlarda plastik ve camın kompozit olarak birleştirilmesi durumunda buzun daha hızlı eridiği görülmüştür. Bunun nedeni efektif özgül ısı yerine camın özgül ısısının kullanılmasıdır. Camın özgül ısısının plastikten düşük olması nedeniyle erime daha hızlı gerçekleşmiştir[21].

2. SOĞUK YÜZEYLER ÜZERİNDE BUZLANMA VE OTOMOBİL ÖN CAM BUZ ÇÖZME SİSTEMİ

2.1 Buz Tabakasının Oluşum Süreci

Buz, suyun donmuş haline verilen addır ve oda koşullarında 0°C ve altında bulunur. Yüzey üzerindeki buzlanma, başlangıçta her bir buz kristalinin dallanması sonucunda doku şeklinde yapılanmaya başlayan ve gözenekli yapısı arasında nemli hava barındıran bir olay olarak gelişir. Birçok hava boşluğunun olması nedeniyle buzlanmanın ilk safhaları oldukça poroz bir yapıya sahiptir ve porozitesi oluşan buz tabakası boyunca değişmektedir. Şekil 2.1'de soğuk bir yüzey üzerinde buz tabakasının zamanla gelişimi görülmektedir.



Şekil 2.1 : Soğuk yüzey üzerinde bu tabakasının oluşumu[22].

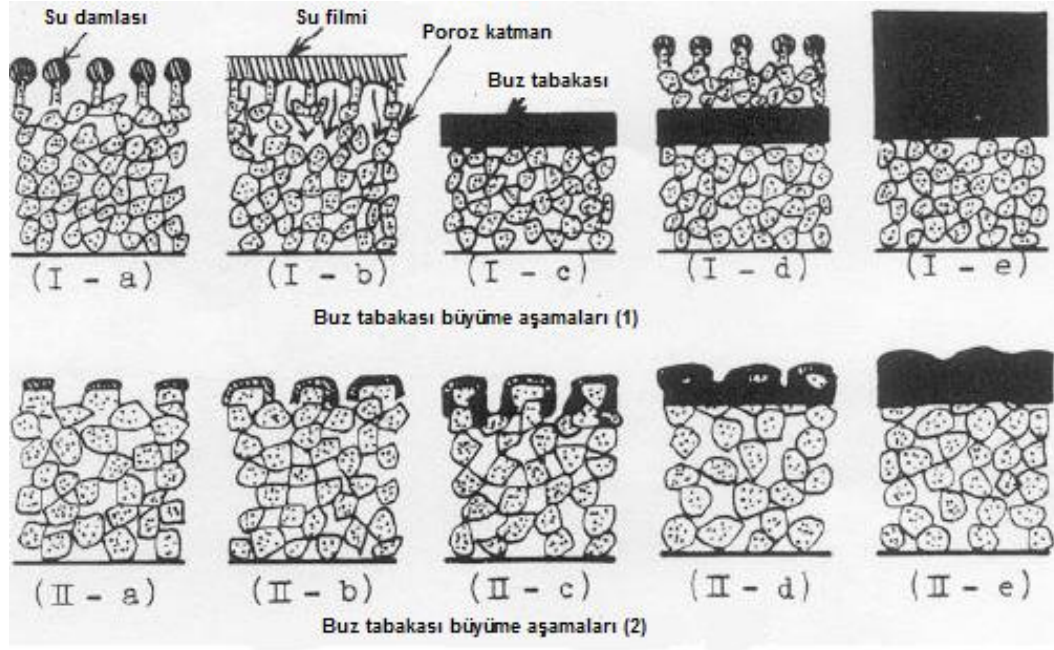
Buzlanma, $t_{r,1}$ zamanında soğuk yüzey üzerindeki su damlalarının kristalleşmesiyle başlar ve süreç $t_{r,2}$ zamanına eriştiğinde kristalleşen su dallı bir yapı oluşturmaya başlar. Süreç devam ettikçe ve bu poroz yapının sıcaklığı 0°C ye ulaştığında tamamen buza dönüşür.

Soğuk yüzey ile temas eden havadaki su buharının kısmi basıncı doymuş su buhar basıncını geçtiğinde ve yüzeydeki sıcaklık 0°C ve altında olduğunda buzlanma başlar. Buzlanmanın gelişimi aşağıdaki faktörler ile doğrudan ilişkilidir;

- Havanın sıcaklığı ve nemi

- Yüzey etrafında hareket eden havanın hızı
- Havanın temas ettiği yüzeyin sıcaklığı
- Buzlanmanın olduğu yüzeyin pürüzlülüğü

Her ne kadar buzun gelişim hızı bu faktörlerden etkilense de, buz tabakasının oluşma süreci hep aynıdır. Şekil 2.2 de buz tabakasının büyüme aşamaları detaylı olarak gösterilmektedir.



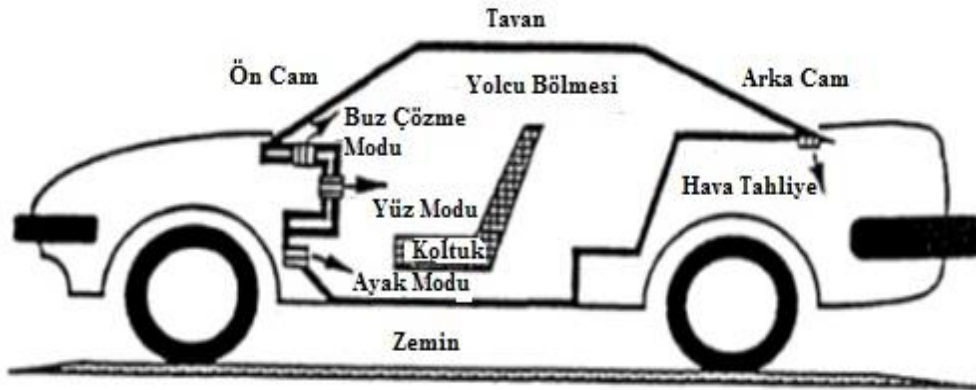
Şekil 2.2 : Buz tabakasının gelişim süreci[22].

Buz tabakası büyüdükçe ısıl direnci de artmaktadır çünkü tabakanın kalınlığındaki artış ısıl iletkenliğindeki artıştan daha hızlıdır. Termal direnç arttıkça, buz tabakasının yüzey sıcaklığı artmakta ve bu değer 0°C 'ye ulaştığında erime başlamaktadır. Şekil 2.2'de de görüldüğü gibi buz oluşumu iki farklı şekilde olabilmektedir. İlk modelde su damlaları karlı yapı üzerinde birikir ve su filmi haline dönüşür. Oluşan su filmi poroz tabakanın içine doğru süzölmeye başlar. Sonunda içeri doğru nüfus eden su donmaya başlar ve poroz tabakanın üzerinde buz tabakası oluşturur. Bu döngü devam ederek buz tabakasının genişlemesini neden olur. İkinci modelde ise su filmi hiçbir zaman tam olarak gelişemez bunun yerine poroz tabaka içerisindeki katı parçacıkların etrafına sızır ve donmaya başlayarak buz tabakası oluşturur. Aynen birinci modelde olduğu gibi süreç kendini tekrarlayarak buz tabakasının büyümesini sağlar. Bu süreç genellikle çok düşük sıcaklıklarda gerçekleşir.

2.2 Otomobil Ön Cam Buğu ve Buz Çözme Sistemi

Günümüz araçlarında stil değişikliği, aerodinamik sürüklenme kuvvetinin azaltılmak istenmesi nedeniyle kullanılan cam yüzeyleri giderek artmaktadır. Bu nedenle sürücü görüş açısının içinde bulunduğu alanların kötü hava şartlarında açık tutulması oldukça önemlidir. Genel olarak cam iç yüzeyi ve dış yüzeyinde görülebilecek üç farklı durum vardır. Bunlar; buğulanma, karlanma ve buzlanmadır. Kötü havalarda düşük ortam sıcaklıklardan dolayı cam yüzey sıcaklığı çığ noktası sıcaklığının altına düşmekte ve bu durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden güvenli sürüş şartlarını sağlayabilmek için otomobil firmaları pahalı ve uzun zaman alan soğuk oda testleri yapmaktadır.

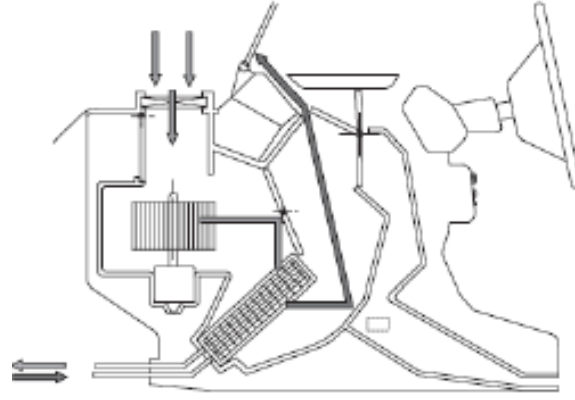
Şekil 2.3’de basitleştirilmiş olarak otomobil havalandırma sistemi gösterilmiştir. Buğu ve buz çözme üflecinden çıkan sıcak hava ön cam yüzeyindeki buzu eritmektedir.



Şekil 2.3 : Basitleştirilmiş yolcu kabini ve hava üfleme modları[1].

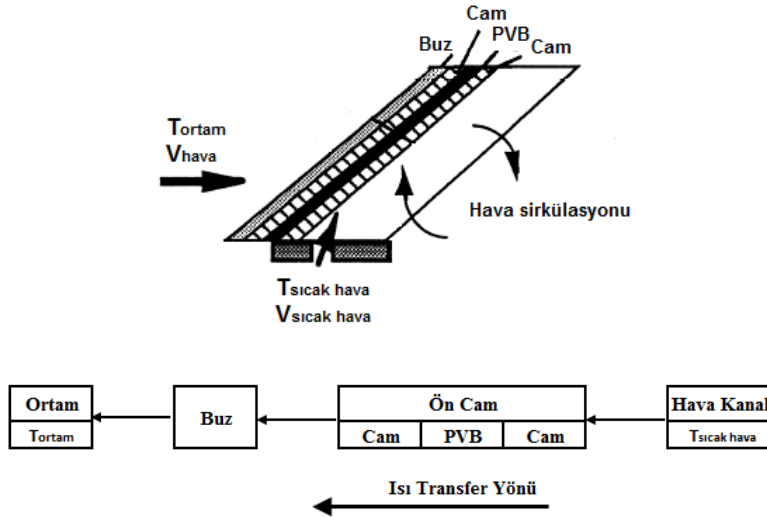
Buz çözme modunda üfleçten çıkan sıcak hava ön cama çarpmakta, kabin içerisindeki havayı sürükleyerek cam etrafında sirkülasyona neden olmakta ve ısısını cama doğru vererek cam yüzeyindeki buzun erimesini sağlamaktadır.

HVAC sisteminde bulunan kalorifer peteği içerisinde motor suyu geçmektedir. Motor ısı arttıkça soğutma suyunun sıcaklığı artmakta ve kalorifer peteği içerisinde dolaşan akışkanın petek kanatçıkları sayesinde ortama attığı ısı miktarı da artmaktadır. Petek kanatçıkları üzerinden geçen ve dış ortamdan alınan soğuk hava ise burada gerçekleşen ısı transferi sayesinde ısınır. Yine HVAC ünitesi içerisindeki yönlendirme klapeleri yardımıyla Şekil 2.4’de olduğu gibi sıcak hava ön cama doğru yönlendirilmiş olunur.



Şekil 2.4 : Kalorifer içinde hava akışı ve ön cama yönlendirilmesi[23]

Soğuk oda testleri sırasında kabin dışarısında düşük hava hızları bulunmaktadır. Ortam sıcaklığını sabit tutmak için gerekli olan bu hava sirkülasyonu kabin etrafında taşınım ile ısı kaybına neden olacak ve buz yüzeyindeki çözünmeyi doğrudan etkileyecektir. Buz çözme prosesi Şekil 2.5'deki gibi üfleçten çıkan sıcak havanın ısını cam boyunca buz tabakasına ilemesiyle gerçekleşir.



Şekil 2.5 : Buz çözme prosesi ve ısı transfer yönü[1].

Buz çözme için gerekli performans değerlendirmesi basit olarak iki kategori altında toplanabilir;

1. Buz tabakasının cam yüzeyinden temizlenmesi
2. Cam yüzeyinde tekrar buz tabakasının oluşmasının engellenmesi

Bunlardan ilki buzun ne kadar hızlı ve efektif bir şekilde eridiğiyle alakalıdır. Bu performansa araç park halinde cam dış yüzeyinde oluşan buz tabakasının çözünmesi ve yolcuların kabin içerisine girdikten sonra nefes alıp vermelerinden dolayı cam iç

yüzeyinde oluşan karlanma dahildir. Bu performansı arttıran parametreler motor suyu sıcaklığının soğuk başlama şartı altında hızla ısınması, kalorifer peteğinin verimi ve üflenen hava debisinin olabildiğince fazla olmasıdır. Diğer parametre ise güvenli sürüş için cam iç yüzeyinde tekrar buz tabakasının oluşmasının engellenmesiyle ilişkilidir. Sürüş başlangıcında ya da sürüş anında cam yüzeyindeki buz tamamen erimiş olsa bile, üflenen sıcak hava dolayısıyla yolcular rahatsız olmakta ve sıcaklık değerini, üflenen hava debisini konfor için değiştirebilmektedir. Azalan hava debisi veya hava sıcaklığı nedeniyle cam yüzeyinde buzlanma tekrarlayabilmektedir. Bunu önlemek için kalorifer sisteminin ve hava üfleçlerinin tasarımı soğuk havayı yolcuların baş bölgesinde, sıcak havayı ise ayak bölgesinde tutacak şekilde olmalıdır. Genel olarak ayağa üflenen hava debisi ile cama doğru üflenen hava debisi arasında 8:2 ila 7:3 gibi bir oran bulunmaktadır.

Hava üflecinin cam alt yüzeyi ile olan mesafesi buzun erimesine doğrudan etki etmektedir. Üflenen havanın cama temas ettiği noktanın altındaki bölgede düşük basınç oluştuğundan, hava cama çarptıktan sonra düşük basınç bölgesine doğru emilmekte ve alt bölgede sirkülasyon oluşturmaktadır. Bu sirkülasyon neticesinde cam yüzeyi boyunca radyal akış bozulmakta ve yüksek oranda sıcak havanın sürücü baş bölgesinde dolaşmasıyla konfor şartlarından uzaklaşmaya neden olmaktadır.

2.3 Otomotiv Sektöründe Kullanılan Terimler

Ön Cam Buz Çözme Sistemi: Ön cam yüzeyinde oluşabilecek buzlanmayı gidermek için kullanılan iklimlendirme ünitesinin bir alt sistemidir.

Defrost: Soğuk havalarda cam iç yüzeyinde ya da dış yüzeyinde oluşan buz tabakasının kalorifer sistemi ile çözülmesidir.

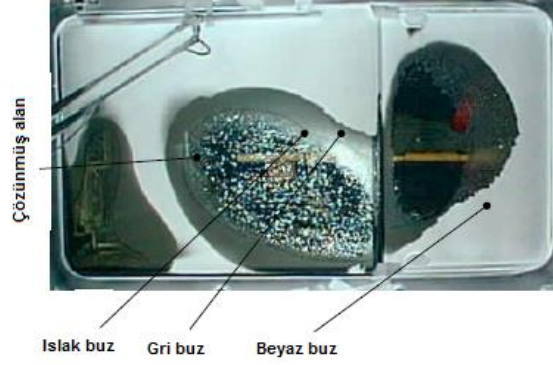
Çözünmüş Bölge: Cam yüzeylerindeki buz tabakasının tamamen erimiş olduğu kuru, temiz bölgedir.

Güneş ışığı açıklığı (DLO): Herhangi bir parça tarafından engellenmeyen cam yüzeyindeki görüş açıklığıdır. Cam serigrafi alanı dışındaki alandır.

Islak Buz: Peltemsi bölge olarak da bilinen bu bölgede erimiş sıvı yüzdesi çok yüksektir. Buzun tamamen sıvıya dönüşmesinden önceki durumdur.

Gri Buz: Erimenin başladığı ve buz tabakasındaki sıcaklığın giderek arttığı bölgedir. Bu bölgedeki katı-sıvı oranı ıslak bölgeye göre fazladır.

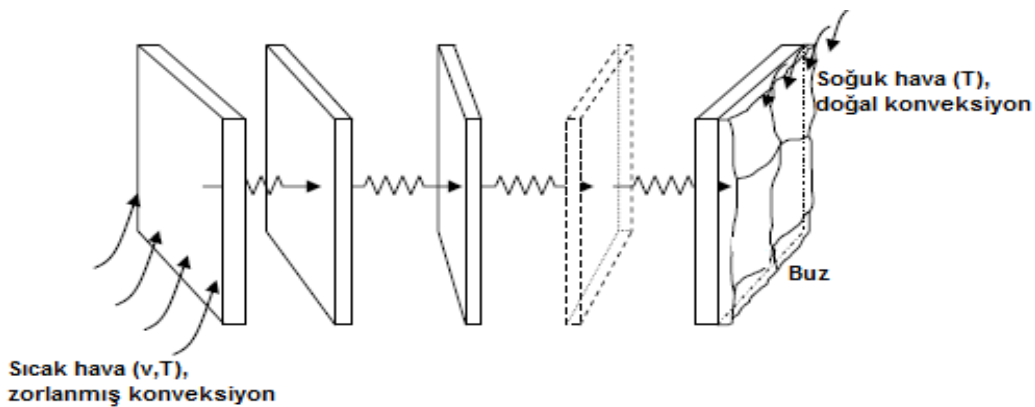
Beyaz Buz: Cam yüzeyinde henüz çözünmeye başlamamış ve sıvı yüzdesi sıfır olan bölgedir. Bu bölgenin sıcaklığı ortam sıcaklığı ile aynıdır. Tüm bu tanımlamalar Şekil 2.6 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : Cam üzerindeki erimiş bölgelerinin tanımlanması[8].

2.4 Camdan Buza Doğru Olan Isı Transferi

Cam iç yüzeyinde sıcak hava nedeniyle zorlanmış ısı transferi gerçekleşmekte ve cam boyunca sadece iletim ile ısı buza doğru aktarılmaktadır. Dışarda ise soğuk bir ortam bulunduğu ve araç hareketsiz olduğundan doğal taşınım ile ısı transferi rol oynamaktadır. Şekil 2.7’de cam iç ve dış yüzeyinde etkili olan ısı transfer çeşitleri görülmektedir.



Şekil 2.7 : Cam boyunca meydana gelen ısı transferi[24].

Her zaman adımında toplam ısı transferi hesaplanarak buzun çözünmesi için gereken ısı ile karşılaştırılır. Hava ile cam arasındaki ısı transferi Newton soğuma yasası ile cam içerisindeki ısı iletimi Fourier yasasıyla bulunur. Radyasyonla olan ısı transferi ihmal edilecek kadar az olduğundan dikkate alınmaz. Güneşli bir günde radyasyonla

olan ısı transferi buzun erimesini olumlu yönde etkileyebilir ancak sürüş güvenliği ve sistem performansı tespiti adına bulutlu bir günü simüle edecek şekilde testler ve analizler yapılmaktadır.

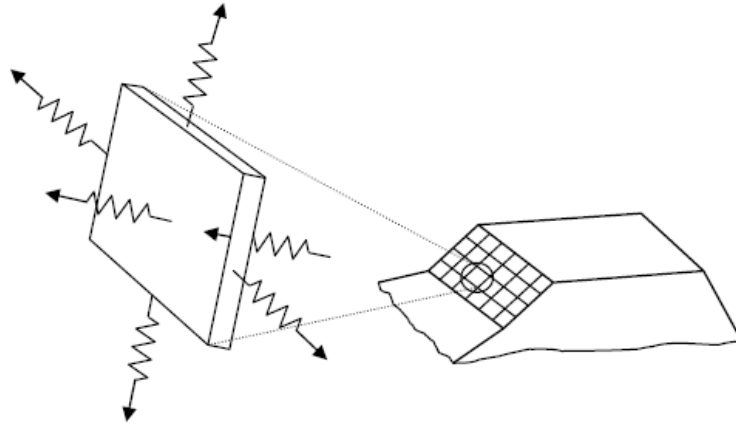
$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (2.1)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \alpha \cdot |T_W - T_F| \quad (2.2)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \sigma \cdot T_S^4 \quad (2.3)$$

Burada \dot{Q} ısı akısını, A ısı transfer alanını, λ ısı iletkenliği, α taşınım ısı transfer katsayısını, σ Stefan-Boltzmann katsayısını T_W , T_F ve T_S sırasıyla duvar, akışkan ve yüzey sıcaklıklarını ifade etmektedir.

Ön cam buz çözme analizinin bir boyutta düşünülmesi doğru değildir çünkü sıcaklık ve hava hızları camın iç yüzeyi boyunca sabit değildir. İçeride 3 boyutlu bir akış olduğundan cam içerisindeki iletkenlikte Şekil 2.8'deki gibi üç boyutta olacaktır.



Şekil 2.8 : Cam içerisindeki 3 boyutlu ısı iletimi[24].

Cam üzerindeki buzun çözünmesi, erime için gerekli olan ısıya eşit bir ısı transferi elde edilince başlar. Zaman ilerledikçe, çözülmüş buz yüzdesi, toplam enerji göz önüne alınarak hesaplanır. Toplam enerji buzunu tamamen suya dönüştürecek seviyeye gelince yüzey tamamen çözülmüş olarak tanımlanır.

Denklem 2.4'de faz değişimine bağlı toplam gizli ısı miktarı hesabı gösterilmektedir.

$$Q = \nabla h_{erime} \cdot m_{buz} \quad (2.4)$$

2.5 Buz Çözmeye Etki Eden Temel Faktörler

Otomobillerde kullanılan camların termal özellikleri, cam yüzeyindeki buz tabakasının çözünmesinde büyük bir paya sahiptir. Ancak camlar seçildikten ve termal özellikleri belirlendikten sonra iyi bir buz çözme performansı elde edebilmek için diğer iki ana faktör olan hava debisi ve hava sıcaklıkları iyi belirlenmelidir.

2.5.1 Yeterli hava akışının sağlanması

Cam etrafında iyi bir hava akışı olması için havanın cam yüzeyinden olabildiğince geç ayrılması ve cam yüzeyi boyunca kabin tavanına doğru yönlendirilmesi gerekir. Bunun için yeterli miktardaki havanın cama doğru üflenmesi gerekmektedir. Yeterli hava debisinin elde edilebilmesi için HVAC sisteminde kullanılan fanın verimliliği yüksek olmalı, klima sistemi ve hava kanallarındaki basınç düşümü ise olabildiğince az olmalıdır.

Şekil 2.9'da ve Şekil 2.10'da uygun ve uygun olmayan hava jetlerinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2.9 : Ön camı takip eden uygun hava jetinin örnek görüntüsü [25].



Şekil 2.10 : Ön camı takip eden zayıf hava jetinin örnek görüntüsü [25].

Şekil 2.9'da hava jetinin cam yüzeyini düzgün bir şekilde takip ettiği görülebilmektedir. Bu sayede cam etrafında yüksek hava hızlarının elde edilmesi ve iyi bir ısı transferi oluşması beklenmektedir. Bunun aksine Şekil 2.10'da açık şekilde hava jetinin cam yüzeyinden ayrıldığı ve hava hızlarının düştüğü görülebilmektedir. Bu tarz hava jetinin mevcut olması durumunda sistemden düşük bir buz çözme performansı elde edilecektir.

İkincil olarak tüm cam yüzeyi boyunca hava ile cam arasında olabildiğince fazla ısı transferi elde edilmelidir. Bunu elde edebilmek için ana hava jetinin cama mümkün olduğunca hızlı şekilde ulaşması ve cama yakın şekilde hareket etmesi gerekmektedir. Cam yüzeyine yakın hareket eden hava jeti sayesinde sıcak hava ile soğuk ön cam arasında maksimum ısı transferi elde edilebilmektedir.

2.5.2 Yüksek hava sıcaklıklarının elde edilmesi

Cam ile hava arasında yüksek ısı transferi elde edebilmek için cama üflenen havanın yeteri kadar sıcaklığa sahip olması gerekmektedir. Bunu elde edebilmek için iklimlendirme sistemindeki kalorifer peteği yüksek verimlilikte olmalıdır. Ayrıca kalorifer peteği içerisinde gezinen ve üzerindeki ısıyı kalorifer peteğinin kanatçıkları

arasından geçip kabine üflenen havaya veren motor suyunun sıcaklığı ve debisi büyük öneme sahiptir.

Günümüzde gelişen motor sistemleri dolayısıyla, kalorifer peteğine ulaşan motor suyunun sıcaklıklarında düşüş görölmektedir. Böylece cama üflenen ve buz çözmeyi sağlayan hava sıcaklıklarında da paralel bir düşüş olmaktadır. Bu nedenle iyi bir buz çözme performansı elde edebilmek için bu taraz durumlarda cam yüzeyindeki hava hızlarının ve cama doğru üflenen hava jetinin doğru ayarlanması şarttır.

3. KATIŁAŐMA, ERİME PROBLEMLERİNİN MODELLENMESİ

3.1 Entalpi Porozite Yöntemi

Ansys Fluent programında entalpi-porozite tekniği, katılaşma ve erime problemlerini modellemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknikte, erime ara yüzü açık (explicit) olarak takip edilmemekte, onun yerine sıvı yüzdesi olarak anılan ve sıvı formda olan hücrelerin oranını belirten bir nicelik ile takip edilmektedir. Erimenin gerçekleştiği bölgede her bir iterasyonda entalpi dengesine göre sıvı oranı hesaplanmaktadır.

Peltemsi bölge olarak tanımlanan alanda sıvı oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir. Bu bölge sözde poroz hacim olarak modellenmekte ve porozite değeri erime sırasında 0'dan 1'e doğru artmaktadır. İncelenen hücre içerisinde malzeme tamamen eridiğinde, porozite değeri 1 değerine ulaşmaktadır.

3.1.1 Modelin Limitleri

Bu formülasyon tekniği saf maddelerin katılaşma veya erime modellemesinde kullanılmaktadır ve kısıtlamaları aşağıdaki gibidir:

- Katılaşma / erime modeli sıkıŐtırılabilir akışlarda kullanılamamaktadır.
- Katılaşma / erime problemi sadece basınç tabanlı çözümlerde kullanılmakta, yoğunluk tabanlı çözümler üzerinde uygulanabilirliği yoktur.
- Çok fazlı modellerden (VOF, karıŐım ve Eulerian) sadece VOF model ile birlikte kullanılabilir.
- Katı ve sıvı fazlar için ayrı özellikler, kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) haricinde tanımlanamaz. Eğer her bir faz için ayrı özellik isteniyorsa DEFINE_PROPERTY komutu ile tanımlama yapılabilir.

3.1.2 Matematiksel Modelleme ve İlgili Eşitlikler

3.1.2.1 Enerji denklemi

Faz değişimine uğrayan malzemelerin enerji denklemi (3.1) nolu eşitlikteki gibi ifade edilebilir. Burada viskoz disipasyon ihmal edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}h) - \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h = 0 \quad (3.1)$$

Burada;

h = duyulur ısı

T = sıcaklık

\vec{v} = hız vektörü

ρ = yoğunluk

k = termal iletkenlik

Denkleminin sol tarafındaki ilk terim zamana bağlı terimi ifade etmektedir. İkinci ve üçüncü terimler ise sırasıyla taşınım ve iletimi temsil etmektedir. S_h , faz değişimi sırasında dikkate alınan kaynak terimidir. Faz değişimi ya da ısı kaynağı / ısı emilimi yok ise, kaynak terimi sıfır olur. Denklem (3.1) $h = C_p dT$ olduğundan (3.2) eşitliği ile de ifade edilebilir. Burada C_p sabit basınçtaki özgül ısıyı ifade etmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}h) - \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla h \right) + S_h = 0 \quad (3.2)$$

Faz değişimini hesaba katabilmek için malzemenin toplam entalpisi tanımlanmalıdır. (3.3) eşitliğindeki gibi bir tanımlama yapıldığında hem malzemenin duyulur ısı hem de faz değişimindeki gizli ısı miktarı hesaba katılmış olunur.

$$H = h + \Delta H \quad (3.3)$$

Burada;

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.4)$$

$$\Delta H = f(T) = \begin{cases} L & T > T_m \\ 0 < \Delta H < L & T = T_m \\ 0 & T < T_m \end{cases} \quad (3.5)$$

h_{ref} = referans entalpi

T_{ref} = referans sıcaklık

L = faz değişimi için gereken gizli ısı miktarı (buz için 334960 J/kg)

T_m = buzun erime sıcaklığı (273⁰K)

Sıvı oranı, β , katılaşma sıcaklığı T_s ve erime sıcaklığı T_m ile değişmektedir. Değişim aralığı eşitlik (3.6)'da gösterilmiştir.

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ 1, & T > T_m \\ \frac{T - T_s}{T_m - T_s}, & T_s < T < T_m \end{cases} \quad (3.6)$$

Artık gizli ısı miktarı, malzemenin erime gizli ısısı cinsinden denklem (3.7)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta H = \beta L \quad (3.7)$$

Enerji denklemini toplam entalpi cinsinden yazarsak;

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho H dV = \int_V -\rho H \vec{v} \cdot n dS + \int_S \frac{k}{C_p} \nabla H \cdot n dS \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.8)'nin sağ tarafındaki ilk ifade taşınım, ikinci ifade ise iletim terimidir. Bu eşitlik düzenlenip (3.9) formuna getirilebilir.

$$\int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) - \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla H \right) \right] dV = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) - \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla H \right) + S_h = 0 \quad (3.10)$$

Denklem (3.3), eşitlik (3.10) içerisinde yazılır ve elde edilen eşitlik (3.1) ile birleştirilirse kaynak terimi (3.11) elde edilmiş olur.

$$S_h = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\Delta H) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\Delta H) \quad (3.11)$$

h ve ΔH yakınsama için tutarlı olması gerektiğinden, iterasyonlar ile gerçekçi dağılımın elde edilmesi gerekmektedir. Diğer bir deyişle aşağıdaki maddeler yakınsama için şarttır:

- Katı bölgede: $h < C_p T_m$ ve $\Delta H = 0$
- Sıvı bölgede: $h > C_p T_m$ ve $\Delta H = L$
- Ara bölgede: $h = C_p T_m$ ve $0 \leq \Delta H \leq L$

Her hücredeki gizli ısı iteratif olarak elde sürekli hesaplanmalıdır. Yukarıda sayılan a, b, c şartları için gizli ısı miktarı (3.12) eşitliği ile hesaplanır.

$$[\Delta H_p]_{n+1} = [\Delta H_p]_n + \frac{a_p}{a_p^0} C_p \lambda [T_n - T_m] \quad (3.12)$$

Burada $[\Delta H_p]_n$ ve T_n sırasıyla, hücrenin n iterasyon sonundaki gizli ısı değeri ve sıcaklığıdır. λ değeri yakınsama faktörü ve C_p özgül ısı miktarıdır. $\frac{a_p}{a_p^0}$ normalizasyon katsayısı olup eleman sayısı ve kullanılan zaman adımlarının hesaplanması için kullanılır. $[\Delta H_p]_{n+1}$ değerinin 1'den fazla olması ya da 0'dan küçük olması halinde gerçekçi olmayan fiziksel sonuç oluşmaması için aşağıdaki ifadeler kullanılır[22].

$$\begin{aligned} [\Delta H_p]_{n+1} > L \text{ ise } [\Delta H_p]_{n+1} &= L \\ [\Delta H_p]_{n+1} < 0 \text{ ise } [\Delta H_p]_{n+1} &= 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.1.2.2 Momentum denklemi

Entalpi-porozite tekniği peltemsi bölgeyi (kısmen erimiş bölge) poroz ortam olarak görmektedir. Her bir hücredeki porozite değeri o hücredeki sıvı oranına eşit düşünülmektedir yani tamamen katılaştırmış bölgede, porozite sıfıra eşitlenir ve bu bölgedeki hızlar sıfıra eşit olur. Azalan porozite nedeniyle, peltemsi bölgede momentum sönümleyici terim aşağıdaki formu alır.

$$S_h = \frac{(1 - \beta)^2}{\beta^2 + \varepsilon} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte ε oldukça ufak bir değer (0.001) olup eşitliğin tanımsız (sıfıra bölünme) olmasını engellemek için denkleme eklenmiştir.

A_{mush} = kısmen erimiş bölge (peltemsi bölge) katsayısı

\vec{v}_p = katılaştıran malzemenin ortamdaki çekilme hızı

Katılaştıran malzeme ortamdaki çekilmiyorsa $\vec{v}_p = 0$ olarak alınır.

Peltemsi bölge katsayısı sönümleme genliğini ölçer; bu değer yüksek olması malzemenin katılma sürecinde, hızının sıfırlanmasının daha hızlı olmasına neden olur. Çok yüksek değerler çözümün kararsızlaşmasına neden olur.

3.1.2.3 Türbülans eşitlikleri

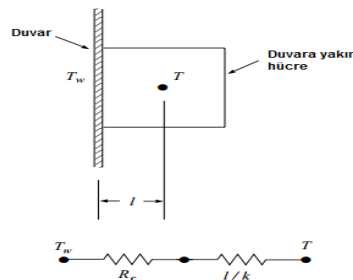
Disipasyon terimleri hem peltemsi bölge ve donmuş tabaka için türbülans denklemlerine eklenmiştir. Elde edilen (3.15) denklemi, momentum eşitliğindeki ifadeye oldukça benzemektedir.

$$S = \frac{(1 - \beta)^2}{(\beta^2 + \varepsilon)} A_{mush} \phi \quad (3.15)$$

Burada ϕ analiz edilen türbülans değerini (k , ε , w vb.) temsil etmektedir ve peltemsi bölgede sabit kabul edilir.

3.1.2.4 Duvarlardaki temas direnci

Katılma / erime modellerinde duvar ile katılaştıran / eriyen malzeme arasında hava boşlukları oluşur ve bu nedenle sıvı oranı 1'den düşük hücreler ile duvar arasında ek bir ısı transfer direnci oluşur. Bu temas direnci, duvara yakın bölgedeki akışkanın iletkenliğini düzenleyerek kullanılır. Bahsi geçen temas direnci Şekil 3.1'deki fiziksel gösterimden faydalanılarak hesaplanır.



Şekil 3.1 : Duvarlardaki temas direncinin şematik gösterimi[26].

Duvardaki temas direnci;

$$q = \frac{(T - T_w)}{\left(\frac{1}{k} + R_c(1 - \beta)\right)} \quad (3.16)$$

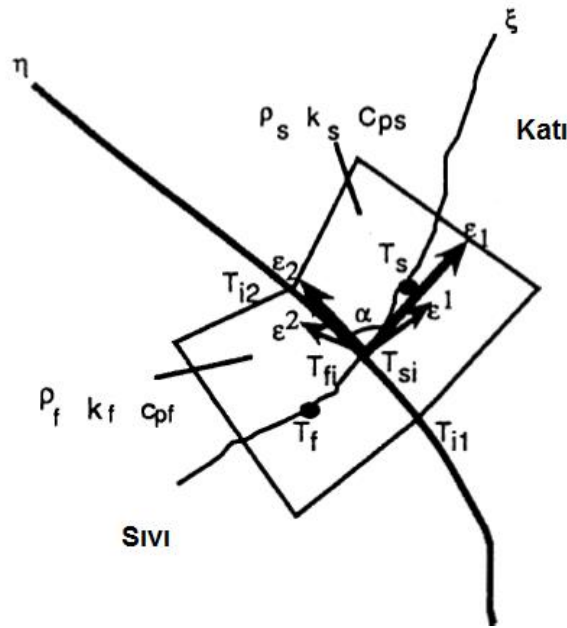
Buradaki k termal iletkenliği, T ve T_w Şekil 3.1'de gösterilen bölgelerdeki sıcaklıkları, β sıvı oranının ve son olarak R_c ise temas direncini ifade etmektedir.

3.2 Ön Cam ve Hava Jeti Arasındaki Birleşik Isı Transfer Analizi

Bu kısım birleşik ısı transferine ait formülasyonları içermektedir. Birleşik ısı transferi analizleri katı ve sıvı arasındaki ısı transferini direkt olarak ampirik bağlaşımlara gerek olmadan simüle etmektedir. Bu yöntem üfleçten çıkan havadan cama ve camdan dış ortama olan ısı transferini analiz etmede de kullanılabilir. Cama doğru üflenen hava genel olarak türbülanslı akışa sahip olduğundan birleşik ısı transferi türbülanslı akışa da adapte edilmiştir.

3.2.1 Matematiksel formülasyon

Enerji korunum yasasına göre katı sıvı ara yüzeyi boyunca transfer olan ısı miktarı korunmaktadır. Bunun yanı sıra, ara yüz boyunca sıcaklık sürekli olmalıdır. Şekil 3.2'de birleşik ısı transferinin tanımlanması için katı sıvı ara yüzey şartları gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Birleşik ısı transferi için arayüz şartları[27].

Yukarıda bahsedilen bu iki şart matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikler ile ifade edilir.

$$k_s(\nabla T)_s \cdot \vec{n} = k_f(\nabla T)_f \cdot \vec{n} \quad (3.17)$$

$$T_i = T_{si} = T_{fi} \quad (3.18)$$

Eşikliklerdeki s indisi katı ve f indisi sıvıyı belirtmektedir ve \vec{n} ise yüzey normalidir. Arayüz boyunca, özgül ısının farklı olması nedeniyle entalpi sürekli değildir.

(3.16) ve (3.17) nolu eşitlikten yola çıkarak eşdeğer iletkenlik, k_e , hesaplanır.

$$k_s(\nabla T)_s \cdot \vec{n} = k_f(\nabla T)_f \cdot \vec{n} = k_e \nabla T \quad (3.19)$$

Tensör notasyonunuda $\nabla T \cdot \vec{n}$ ifade edilirse;

$$\nabla T \cdot \vec{n} = \left(\frac{\partial T}{\partial \xi} \cdot \frac{\vec{e}^1}{\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_1} + \frac{\partial T}{\partial \eta} \cdot \frac{\vec{e}^2}{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}_2} + \frac{\partial T}{\partial \zeta} \cdot \frac{\vec{e}^3}{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}_3} \right) \quad (3.20)$$

\vec{e}_1, \vec{e}_2 ve \vec{e}_3 terimleri $\xi, \eta,$ ve ζ yönlerindeki kovaryant vektörlerdir. e^{-1}, e^{-2} ve e^{-3} ise eksenlerdeki kontravaryant vektörleri simgelemektedir. Katı ve sıvı faz için sırasıyla aşağıdaki varsayım yapılırsa ara yüzeydeki T_i sıcaklığı (3.23) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\frac{\partial T_s}{\partial \xi} = \frac{T_s - T_i}{\nabla \xi_s}, \quad \frac{\partial T_s}{\partial \eta} = \frac{T_{i1} - T_{i2}}{\nabla \eta_s}, \quad \frac{\partial T_s}{\partial \zeta} = \frac{T_{i3} - T_{i4}}{\nabla \zeta_s} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial \xi} = \frac{T_i - T_f}{\nabla \xi_f}, \quad \frac{\partial T_f}{\partial \eta} = \frac{T_{i1} - T_{i2}}{\nabla \eta_f}, \quad \frac{\partial T_f}{\partial \zeta} = \frac{T_{i3} - T_i}{\nabla \zeta_f} \quad (3.22)$$

$$T_i = \frac{AT_f + BT_s + (D - C) + (F - E)}{A + B} \quad (3.23)$$

Sırasıyla katsayılar aşağıdaki ifadelerden elde edilir.

$$A = \frac{k_f}{\Delta \xi_f} \left(\frac{1}{\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_1} \right)_f \quad (3.24)$$

$$B = \frac{k_s}{\Delta \xi_s} \left(\frac{1}{\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_1} \right)_s \quad (3.25)$$

$$C = \frac{k_f(T_{i1} - T_{i2})}{\Delta\eta} \left(\frac{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}_2} \right)_f \quad (3.26)$$

$$D = \frac{k_s(T_{i1} - T_{i2})}{\Delta\eta} \left(\frac{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}_2} \right)_s \quad (3.27)$$

$$E = \frac{k_f(T_{i3} - T_{i4})}{\Delta\eta} \left(\frac{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}_3} \right)_f \quad (3.28)$$

$$F = \frac{k_s(T_{i3} - T_{i4})}{\Delta\zeta} \left(\frac{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}_3} \right)_s \quad (3.29)$$

T_{i1}, T_{i2}, T_{i3} ve T_{i4} arayüzler arasındaki sıcaklıklardır. Elde edilen katsayılar ve (3.20) eşitliği denklem (3.19) içerisine eklenirse eşdeğer termal iletkenlik ifadesi (3.30) elde edilir.

$$k_e = \frac{AB(T_s - T_f) + A(D + F) + B(C + E)}{(A + B)[G(T_s - T_f) + H + I]} \quad (3.30)$$

Eşdeğer termal iletkenlik ifadesindeki bilinmeyen G, H ve I terimleri sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir.

$$G = \frac{1}{\Delta\xi_s + \Delta\xi_f} \left(\frac{1}{\vec{e}^1 \cdot \vec{e}_1} \right) \quad (3.31)$$

$$H = \frac{T_{i1} - T_{i2}}{\Delta\eta} \left(\frac{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^2 \cdot \vec{e}_2} \right) \quad (3.32)$$

$$I = \frac{T_{i3} - T_{i4}}{\Delta\zeta} \left(\frac{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}^1}{\vec{e}^3 \cdot \vec{e}_3} \right) \quad (3.33)$$

3.2.2 Türbülanslı birleşik ısı transferi

Türbülanslı birleşik ısı transferini uygulayabilmek için katı sıvı ara yüzünde gelişen sınır tabakaya ve belirlenen türbülans duvar fonksiyonuna göre ısı yayılımı modifiye edilmelidir. Türbülanslı akışlarda duvardaki ısı yayılımı belirleyebilmek için, katı sıvı ara yüzü boyunca ısı akısı korunumu sağlanmalıdır. Isı akısı eşitliği (3.34) numaralı denklem ile ifade edilmiştir.

$$q_w = k_s(\nabla T)_s \cdot \vec{n}_w = \frac{\rho_f C_{pf} u_\tau \cdot (T_n - T_w)}{T^+} \quad (3.34)$$

Laminar akış için hesaplanan birleşik ısı transferi formülasyonlarını türbülanslı akışta kullanabilmek için eşdeğer ısı iletkenlik sıvı tarafı için denklem (3.35)'den yola çıkarak hesaplanır.

$$\vec{k}_f \nabla T \cdot \vec{n}_w = \frac{\rho_f C_{pf} u_\tau (T_n - T_w)}{T^+} \quad (3.35)$$

$$\vec{k}_f = \frac{\rho_f C_{pf} u_\tau \cdot \delta}{T^+} \quad (3.36)$$

δ : ilk hücre ile duvar arasındaki normal mesafe

u_τ : duvar boyunca kayma gerilmesi

T^+ değeri türbülanslı ısı sınır tabaka için Prandtl sayısı kullanılarak hesaplanır.

$$T^+ = Pr_l y^+, \quad y^+ < 9.585 \quad (3.37)$$

$$T^+ = Pr_t (u^+ + P), \quad y^+ > 9.585 \quad (3.38)$$

Pr_l : laminar Prandtl sayısı

Pr_t : türbülanslı Prandtl sayısı

P: sabit sayı (hava için -2.13)

$$u^+ = \frac{u_{rel}}{u_\tau} \quad (3.39)$$

u_{rel} : hücre ile duvar arasındaki bağıl hız

u^+ değeri ise momentum sınır tabaka ifadelerinden elde edilir.

$$u^+ = y^+, \quad y^+ < 11.5 \quad (3.40)$$

$$u^+ = \left(\frac{1}{K}\right) \ln(Ey^+), \quad y^+ > 11.5 \quad E = 9, K = 0.403 \quad (3.41)$$

3.2.3 Entalpi metodu

Enerji denklemindeki kaynak terimi faz değişimine uğrayan malzemelerden dolayı ortaya çıkmaktadır. Bu terimin türetilmiş hali eşitlik (3.42) de verilmiştir.

$$S_h = -\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Delta H) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\Delta H)\right] \quad (3.42)$$

Eşitliğin sağ tarafındaki terimler sırasıyla zamana bağlı etkiyi ve taşınım etkisini simgelemektedir. Denklemdaki yoğunluk, ρ , faz değiştiren malzemeye ait değerdir. Birçok çalışmada, eriyen buzdan dolayı oluşacak taşınım hareketi ihmal edildiğinde (3.42) eşitliği (3.43) şeklinde düzenlenebilir.

$$S_h = -\left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Delta H)\right] \quad (3.43)$$

Bu eşitliklerdeki terimlerin anlamları aşığıdaki gibidir.

ΔH = gizli ısı miktarı

\vec{v} = faz değişimindeki sıvı fazın hızı

4. ULUSLARARASI ÖN CAM BUZ ÇÖZME STANDARLARI

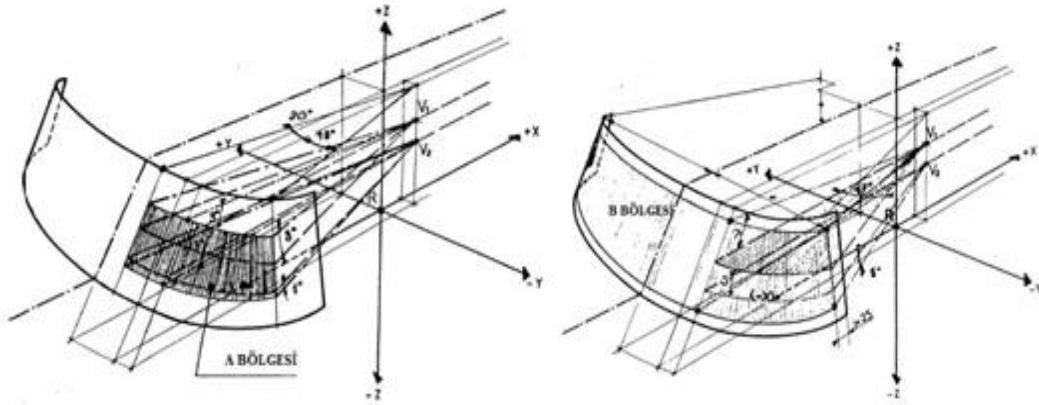
Genellikle sıfır derece ve daha düşük sıcaklıklarda, otomobillerin ön ve yan camlarında oluşan buz tabakası, üretici firma ve tasarım mühendisleri için çözülmesi gereken önemli sorunların başında gelmektedir. Zira sürüş güvenliğinin en önemli parametrelerinden biri ön ve yan camlarda görüş yeterliliğinin sağlanmasıdır. Sektörde bu performansı ortak bir temelde değerlendirebilmek için binek araçlar, kamyon ve otobüsler için kabul edilmiş standartlar bulunmaktadır[28].

Otomobil firmalarının ürettikleri araç segmentine bağlı olarak buz çözme performansı açısından uyması zorunlu oldukları şartnameler aşağıdaki gibidir.

- Avrupa birliği standardı, 78/317/EEC
- Binek araçlar için ABD standardı, SAE J902
- Kamyon, otobüs vb. araçlar için ABD standardı, SAE J381

4.1 Avrupa Birliği Standardı, 78/317/EEC

İlgili Avrupa Birliği standardında, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi şoför önünde kalan dikdörtgen bölge “A” bölgesi, camın kalan diğer tüm kısımları da “B” bölgesi olarak sınıflandırılır.



Şekil 4.1 : 78/317/EEC, buz çözme standardı tanımlanmış cam alanları[29].

Kalorifer çalıştırıldıktan 20 dakika sonra, “A” bölgesi içinde bulunan buz tabakasının % 80’i erimiş olmalıdır. 25. dakikadan sonra yolcu bölgesinin % 80’i ve 40 dakika sonunda ise “B” bölgesindeki buzun % 95’i erimiş olmalıdır[29].

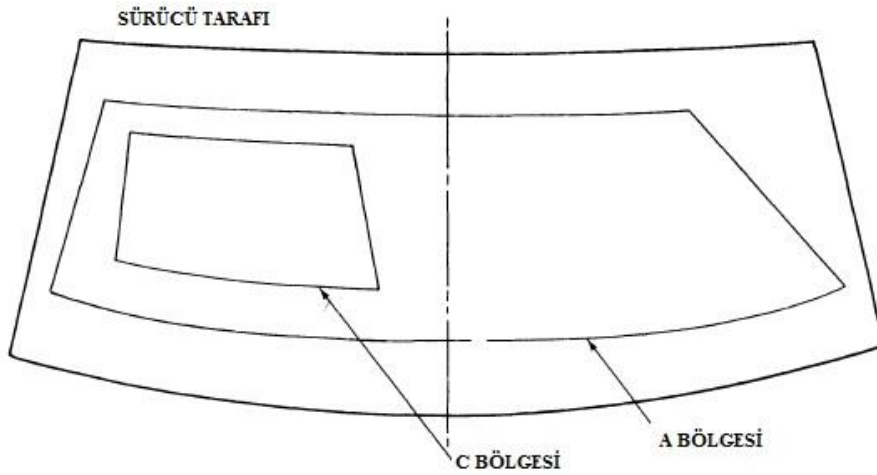
Çizelge 4.1’de cam üzerinde tanımlanmış bölgeler için zamana bağlı çözünmesi gereken buz yüzdeleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.

Süre(dk)	Cam Bölgesi	Çözünmesi gereken min. değer
20	A	% 80
25	Yolcu tarafı	% 80
40	B	% 95

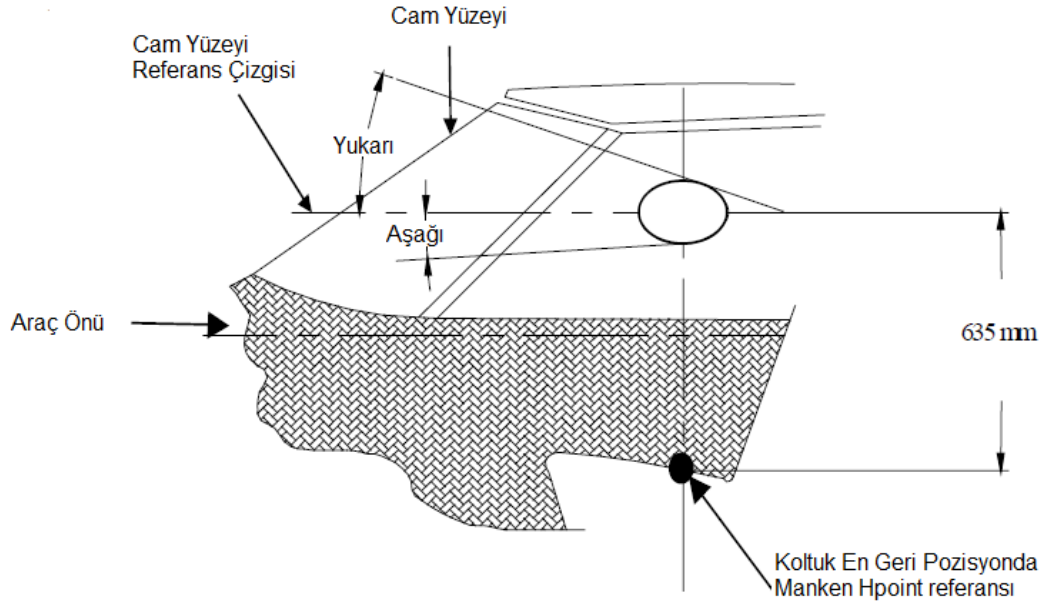
4.2 Binek Araçlar İçin ABD Standartı, SAE J902

İlgili ABD standartında binek araçlar ve hafif ticari araçlarda ön cam için ne kadar sürede hangi alanların çözünmesi gerektiği belirtilmiştir. Şekil 4.2’de belirtildiği üzere şoför önünde kalan dikdörtgen bölge “C” bölgesi, camın kalan diğer tüm kısımları da “A” bölgesi olarak adlandırılır. Her bir alan Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de belirtilen açılardan yararlanılarak elde edilir.



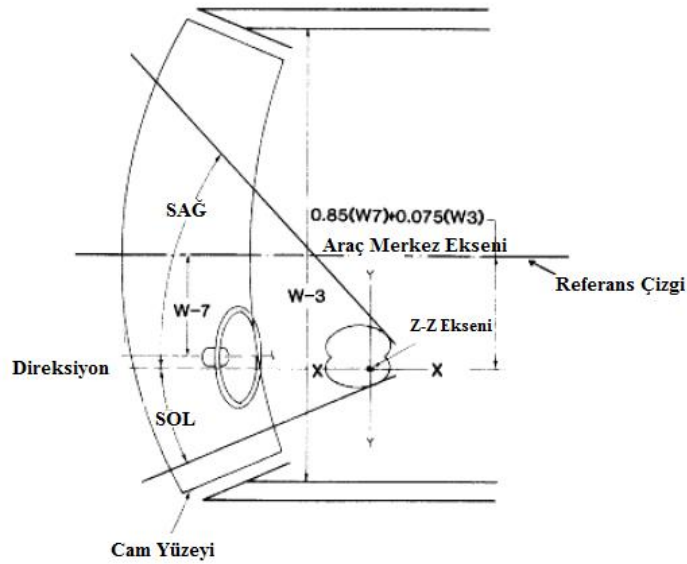
Şekil 4.2 : SAE J902, buz çözme standardı için tanımlanmış cam alanları[30].

Şekil 4.3’de C bölgesinin alt ve üst sınırları, sürücünün göz gezdirme mesafesinin alt ve üst sınırlarına teğet iki doğrunun camın yüzeyi ile kesiştirilmesi sayesinde elde edilir. Bu alt ve üst hatlar, cam yüzeyi referans çizgisi ile belirli açıda sabitlenmiştir.



Şekil 4.3 : Tanımlanmış bölgelerin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi[30].

Şekil 4.4’de ise A bölgesinin sağ ve sol sınırları, sürücünün göz gezdirme mesafesinin sağ ve sol sınırına teğet iki doğrunun yardımıyla belirlenir. Bu çizgiler referans çizgisi ile belirli açılar yapacak şekilde sabitlenmiştir.



Şekil 4.4 : Tanımlanmış bölgelerin sağ ve sol sınırlarının belirlenmesi[30].

Test prosedürleri takip etmek şartı ile teste başladıktan 30 dakika sonra “A” bölgesindeki buzun minimum %80’inin ve “C” bölgesindeki buzun ise tamamının çözülmüş olması gerekmektedir.

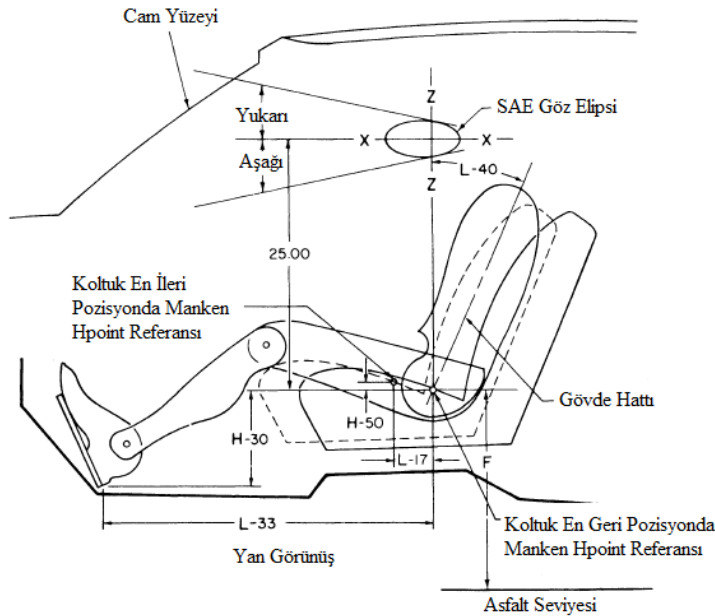
Çizelge 4.2’de cam üzerinde tanımlanmış bölgeler için zamana bağlı çözünmesi gereken buz yüzdeleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.2 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.

Cam Bölgesi	Çözünen yüzde (30 dk sonra)	Açı Değeri Sol	Açı Değeri Sağ	Açı Değeri Üst	Açı Değeri Alt
A	%80	18	56	10	5
C	%100	10	15	5	1

4.3 Kamyon, Otobüs vb. Araçlar İçin ABD Standartı, SAE J381

İlgili ABD standartı ağır ticari araçlar, kamyonlar, otobüsler vb. araçlar için buz ve buğu çözme şartlarını içermektedir. Şoför önünde kalan dikdörtgen bölge “C” bölgesi, camın kalan diğer tüm kısımları da “A” bölgesi olarak adlandırılmıştır. Bu bölgeler SAE J902’de olduğu gibi Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 yardımıyla belirlenir. Ancak araç tipine bağlı olarak sürücünün asfalttan olan yüksekliği ve görüş açısı değişmektedir. Bu farklılığın nasıl oluştuğu Şekil 4.5 üzerinde gösterilmiş ve buz çözünme alanındaki farklılıklar Çizelge 4.3’de detaylı olarak belirtilmiştir.



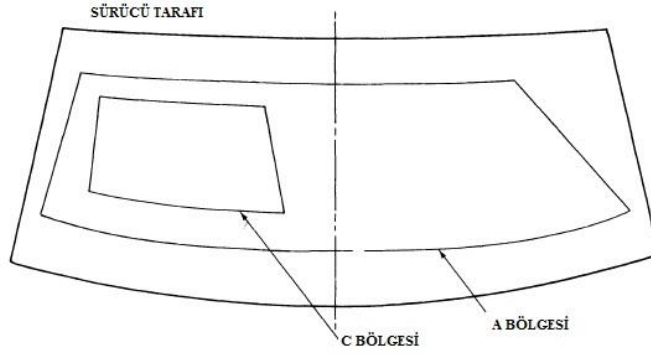
Şekil 4.5 : Çözünmesi gereken alanların alt ve üst sınırının belirlenmesi[31].

Buz çözme performansı değerlendirilirken hesaba katılan alanlar camın dış yüzeyinde gün ışığı açıklığında bulunan bölgelerdir. Cam yüzeyinde bulunan yağmur sensörü, yol kamerası vb. amaçlar için karartılmış bölgeler bu hesaplamada dikkate alınmaz.

Çizelge 4.3 : Araç tiplerine göre görüş alanının sınırlarının belirlenmesi[31].

Sınıflandırma	F Boyutu	Bölge	Merkez Açı Üst	Merkez Açı Alt	Merkez Açı Sol	Merkez Açı Sağ
Kamyon	0-1020	A	10	5	18	56
		C	5	1	10	15
	1020-1270	A	8	7	18	56
		C	3	3	10	15
	1270-Üst	A	6	9	18	56
		C	1	5	10	15
Otobüs, Okul Aracı, Ticari Araç	1270-1520	A	7.5	22	22	62
		C	1	16	22	15
Otobüs, Önden Çekiş Okul Aracı, Ticari Araç	1270-1520	A	7	14	18	65
		C	1	11	18	25
Önden Çekiş	Hepsi	A	9	7	18	56
		C	2	2	18	15
Hafif Ticari Araç	Hepsi	A	7	5	16	49
		C	4	2	8	13
Minibüs	Açık	A	7	12	18	58
		C	1	6	10	15

Tek kat cam kullanılması durumunda sistem çalıştırdıktan 30 dakika sonra, “C” bölgesi içinde bulunan buz tabakasının % 99’u ve “A” bölgesi içinde kalan buz tabakasının % 80’i erimiş olmalıdır. Çift cam kullanılması durumunda ise sistem çalıştırdıktan 30 dakika sonra “C” bölgesi içinde bulunan buz tabakasının %84’ü ve “A” bölgesi içinde kalan buz tabakasının %65’i çözülmüş olmalıdır. Şekil 4.6 da ön cam üzerinde buz çözme standartı için tanımlanmış bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : SAE J381, buz çözme standartı için tanımlanmış cam alanları[31].

Yukarıda bahsedilen test prosedürleri tekrarlanabilir test sonuçları ortaya koymaktadır. Gerçek yaşamda, camdaki donmuş su tabakası sürüşe başlamadan önce büyük ölçüde temizlenebilmektedir. Bu şartnameler ile elde edilen performans gerçek sürüş şartlarına direkt olarak atıfta bulunmasa da sistemlerin birbiriyle karşılaştırılması ve yapılan geliştirme çalışmalarının sistem performansı üzerine ne derecede etki ettiğini tespit edebilmek için kullanılmaktadır.

Çizelge 4.4’de cam üzerinde tanımlanmış bölgeler için zamana bağlı çözünmesi gereken buz yüzdeleri belirtilmiştir.

Çizelge 4.4 : Cam üzerindeki tanımlı alanlar için minimum buz çözünme yüzdesi.

Cam Tipi	A Bölgesi	C Bölgesi	Süre(dk)
Tek parça cam	%80	%99	30
Çok parça cam	%65	%84	30

5. ÖN VE YAN CAM BUZ ÇÖZME PERFORMANS TESTİ

-8°C veya -18°C ortam sıcaklığında yapılabilen bu testin amacı;

1. Buz çözme sisteminin ön cam ve birinci sıra yan camları üzerindeki buzlu temizleme etkinliğini belirlemek.
2. Ön ve yan cam yüzeylerindeki çözünen buz bölgelerinin erime sürecini kaydetmek.

5.1 Test Merkezi ve Ekipmanlar

Soğuk oda, rüzgar tüneli veya ortam sıcaklığının ve ortam havasının kontrollü olduğu bir kapalı alanda test gerçekleştirilebilir. Test merkezinin boyutu tüm aracı içine alabilecek ve ortam şartlarını sabit tutabilecek şekilde tasarlanmış olmalıdır. Camın dış yüzeyinde homojen bir buz tabakasının oluşturulabilmesi için kullanılan su tabancasının özellikleri aşağıdaki gibi standardize edilmiştir.

- a. Ağız çapı: 1.7 mm \pm 0.1 mm
- b. Uygulama basıncı: 350 kPa \pm 20 kPa
- c. Uygulama debisi: 395 ml/dk.

5.2 Test Ortamının ve Test Edilecek Aracın Hazırlanması

Test edilecek araç son seviye iklimlendirme sistemiyle donatılmış olmalıdır. Doğru sonuçlar elde edebilmek için hava kanalları ve üfleçlerde tıkanma olmadığından ve kontrol ünitesinin doğru şekilde fonksiyonunu yerine getirdiğinden de emin olunmalıdır. Soğuk odada testler yapıldığından aracın yakıtının bu şartlara uygun olacak şekilde değiştirilmesi gerekmektedir.

Test sırasında kabin içerisindeki hava akışı ve sıcaklık dağılımının izlenmesi ve kayıt altına alınabilmesi için aracın teste uygun şekilde enstrümente edilmiş olması gerekmektedir. Ön cam ve yan cam buz çözme performansında kilit rol oynayan buğu ve buz çözme üflecinden çıkan havanın sıcaklığını zamana bağlı olarak takip

etmek adına, üfleç çıkışlarına sıcaklık sensörleri bağlanır. Şekil 5.1’de örnek bir üfleç enstrümantasyonu gösterilmektedir.



Şekil 5.1 : Ön cam hava üfleci için örnek bir enstrümantasyon.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta sensörlerin yerleştirilmesinden sonra, okumayı yapan uç noktaların kanal yüzeyi ile temas halinde olmaması, sadece üzerinden geçen havanın sıcaklığını ölçmesidir. Test sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

1. Ön camdaki silecekler gün ışığı açıklığını kapadığı için testten önce uygun pozisyona getirilmelidir.
2. Cam yüzeyleri testten önce iyice temizlenmeli ve yüzeylerde buzun oluşumunu önleyecek ve/veya azaltacak yabancı maddeler uzaklaştırılmalıdır.
3. Teste başlamadan önce aracın test sıcaklığında en az 10 saat şartlandırılması gerekmektedir. Bunun nedeni gövdenin, kabin içerisindeki parçaların, motor suyunun ve yağının ortam sıcaklığına düşmesini sağlamaktır. Şartlandırma sırasında kaputun, kapıların ve camların açık olması önerilmektedir.
4. Araç şartlandırılması sona erdikten sonra cam yüzeyleri üzerine standart su tabancası ile su püskürtülerek, cam yüzeylerinde buz tabakasının oluşması sağlanır.
5. Camlara pülverize edilmiş su sıkıldıktan sonra 30 dakikadan az olmayacak ve 40 dakikadan da fazla olmayacak şekilde aracı şartlandırmaya devam edilir.
6. Şartlandırma tamamlandıktan sonra test başlatılır.

5.2.1 Cam yüzeyinde homojen buz tabakasının oluşturulması

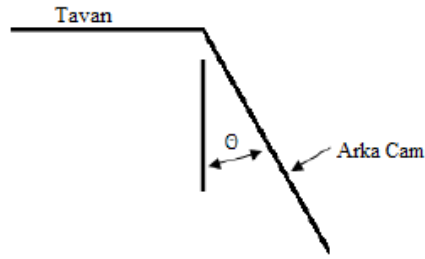
Ön cam: Yüzey alanı hesaplanır ve toplam yüzey alanına bağlı olarak 0.44 g/cm^2 olacak şekilde su hazırlanır. Standart su tabancası ile belirlenen miktardaki su homojen şekilde ön cama uygulanır.

Yan camlar: Yüzey alanına bağlı olarak her bir cam için 0.22 g/cm^2 su hazırlanarak su tabancası ile cam yüzeylerine püskürtülür.

Arka Cam (test ediliyorsa): Camın yüzey alanına ve eğikliğine bağlı olarak uygulanacak su miktarı değişir. Şekil 5.2’de arka cam açısının değişimi gösterilmektedir.

I. $0.22 \text{ g/cm}^2 \theta < 25^\circ$

II. $0.44 \text{ g/cm}^2 \theta \geq 25^\circ$



Şekil 5.2 : Arka cam tavan açısı ve uygulanacak su miktarı tayini.

Yapılan testlerde ön cama 747 g/cm^2 yan camlara ise 157 g/cm^2 su sıkılmıştır. Cam yüzeyine belirlenen miktardaki suyun uygulanışı Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : Cam yüzeyine su püskürtülmesi sırasında çekilen örnek bir resim.

5.3 Buz Çözme Testi – Ön Cam ve Birinci Sıra Yan Camlar

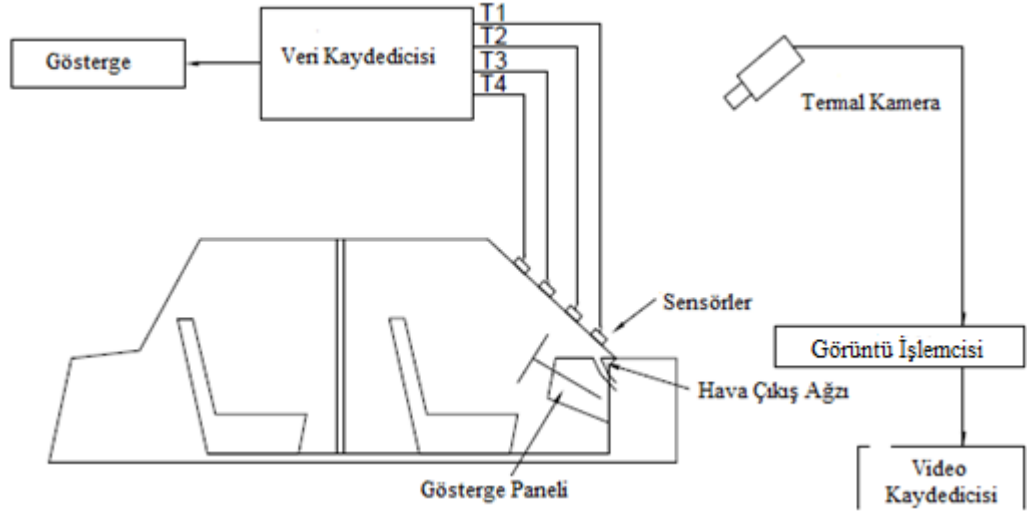
Test edilecek ortam sıcaklığında araç şartlandırıldıktan ve cam yüzeyinde buz tabakası elde edildikten sonra teste başlanır. Test sırasında ön camdaki çözünmeyi kontrolsüz şekilde etkilememek için ortamdaki rüzgâr hızının 5 km/h'den fazla olmaması istenir. Ancak bazı rüzgâr tünellerinde ortam sıcaklığını sabit tutabilmek için daha fazla rüzgâr hızına gerek duyulabilmektedir. Bu tarz bir ortamda test yapılıyor ise rüzgâr etkisi dikkate alınmalıdır. Test sırasında araç, motor devri 1500'ü geçmeyecek şekilde rölantide çalıştırılır. Kalorifer sistemi dış ortam havası ile, buz ve buğu çözme modunda, en sıcak ve en yüksek fan hızında çalıştırılır. Eğer test edilen araçta yan camlara sıcak hava yönlendirmesi yapan yanıl üfleçler yoksa yüz üfleçleri yan camlara doğru açılmalıdır. Kabin içerisine üflenen sıcak havanın etkisini azaltmamak için test sırasında camlar, kapılar, tavan penceresi kapalı konumda tutulmalıdır. Test süresi 40 dakikadır ancak daha erken bir sürede cam yüzeyindeki buz tabakası tamamen erirse test sonlandırılabilir. 40 dakika sonunda cam yüzeyinde çözünmeyen bölge kalsa dahi teste devam edilmesine gerek yoktur, test tamamlanabilir.

5.4 Buz Çözme Testi Sırasında Kullanılan Ölçüm ve Takip Metotları

Deney sırasında buzun erimesinin zamana bağlı değişimi, cam iç yüzeyindeki hava hızlarının ölçümü ve cama üflenen sıcak havanın cam yüzeyinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı birçok metot ile takip edilebilmektedir. Bu metotlardan biri ya da birkaçı kullanılarak test raporlamaları yapılmaktadır. Bu kısımda buz çözme performansını değerlendirmede kullanılan test takip metotlarından kısaca bahsedilmiştir.

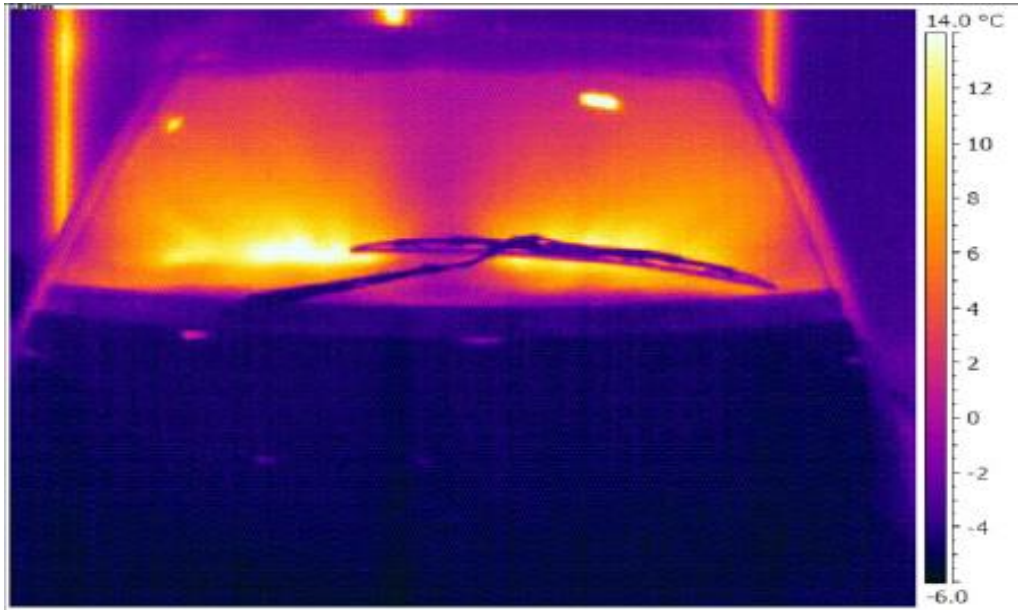
5.4.1 Kızıl ötesi termal görüntüleme tekniği

Kızıl ötesi görüntüleme buz ve buğu çözme testlerinde gün geçtikçe kullanımı artan bir tekniktir. Isıl görüntüleme yardımıyla cam yüzeyi üzerinde iki boyutlu sıcaklık dağılımı test boyunca kaydedilir. Işınölçer sayesinde belirli bir dalga boyu aralığında yüzeyden yayılan sıcaklık tespit edilir. Sistem yüzeyden yayılan sıcaklığı algıladığından ölçümlerin doğruluğu adına yüzey hazırlığı ve sistem kurulumu doğru şekilde yapılmalıdır. Şekil 5.4 ile termal görüntüleme için sistem kurulumu şematiğe aktarılmıştır.



Şekil 5.4 : Termal görüntüleme düzeneği kurulumu[32].

Termal kamera aracın ön tarafına ve cama dik bakacak şekilde konumlandırılmalıdır. Bu yöntemde cam yüzeyine yerleştirilen sensörler yardımıyla yüzeydeki sıcaklık değeri gösterge ile kayıt altına alınabilmektedir. Şekil 5.5’de test sırasında termal kamera ile kayıt altına alınan örnek bir sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.

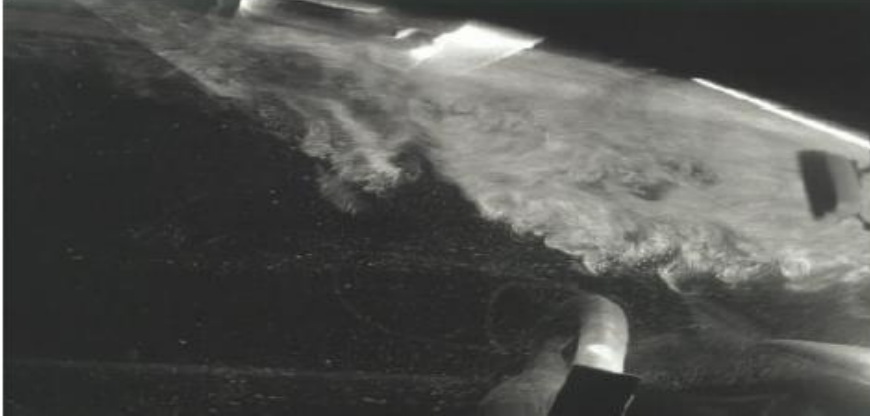


Şekil 5.5 : Tünel testi sırasında termal kamera ile kaydedilmiş bir görüntü[17].

5.4.2 Laser ışını ile görüntüleme tekniği (LSV)

Diğer tamamlayıcı ölçüm tekniği olan bu yöntemde lazer ışını sayesinde kabin içerisinde saçılan hava partiküllerinin görüntüsünü alınarak hava akışı karakteristiği

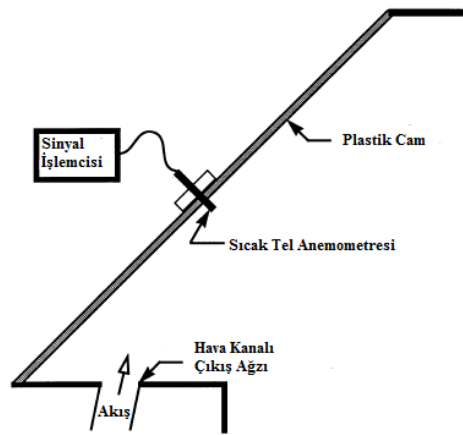
hakkında bilgi edinilir. Işın kaynağı sürekli dalga yayarak görüntünün kesintisiz olmasını sağlar. Yayılan ışın Argon-iyonudur.



Şekil 5.6 : Cam yüzeyindeki hava jet akışı LSV görüntüsü[11].

5.4.3 Sıcak tel anemometresi ile hava hız ölçümü

Bu yöntem ile cam iç yüzeyindeki hava hızları kullanışlı bir şekilde tahmin edilebilir. Hava hızı ölçümleri plastik cam üzerinde açılmış olan deliklerden içeri sarkıtılan sensörler yardımıyla yapılır. Genel olarak sensörler cam yüzeyinden 7mm içeri girecek şekilde yerleştirilir ve böylece cam iç yüzeyinde gelişen sınır tabaka yakalanmış olur. Cam yüzeyinden içeriye daldırılan sensör kendi eksenini etrafında dönebilmektedir ve maksimum sinyal değeri okunduğu anda işlemcide hava hızı ve yönü kayıt altına alınmış olur. Sıcak tel anemometresinin konumlandırılması Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Burada cam üzerinde belirlenmiş aralıklar ile konumlandırılan anemometreler bir işlemciye bağlanarak hız değerleri ve yönleri ölçülmüş olur.



Şekil 5.7 : Sıcak tel anemometresi kurulumunun şematik görünümü[4].

Şekil 5.8’de ise plastik cam yerine karton üzerine açılmış deliklerden içeri hız sensörleri sokulmakta ve ölçümler alınmaktadır.



Şekil 5.8 : Ön cam hava hızı ölçüm metodu örnek resim[33].

5.4.4 Çizgi takip metodu

Buz çözme testine başlandıktan sonra cam yüzeyindeki erime hattını takip edebilmek için bir keçeli kalem ile cam üzerine çizim yapılır. Belirli aralıklar ile cam yüzeyindeki çözünmüş alanlar işaretlenerek kayıt altına alınmış olur. Test tamamlandıktan sonra ortam sıcaklığı artırılarak cam yüzeyi kurutulur. Test sırasında cam iç yüzeyinde yapılan işaretlemeler standart kâğıtlara aktarılarak hangi alanın kaçınıcı dakika sonunda çözündüğü belirtilir. Şekil 5.9’da test sırasında buzun eridiği alanların cam üzerine işaretlenmesi örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.9 : Çizgi takip metodu ile yapılan testten bir görüntü[14].

5.4.5 Dijital fotoğraflama yöntemi

Dijital fotoğraflama yöntemi ile test boyunca belirli aralıklarla camların fotoğrafları çekilir. Böylece hangi zaman diliminde cam yüzeyinde ne kadarlık bir alanda buz

tamamen erimiş hızlı şekilde görülebilmektedir. Görüş alanının açılma hızının uygun olup olmadığı böylece test bitimini beklemeden anlaşılmaktadır. Şekil 5.10’da örnek olması adına dijital fotoğraflama ile kayıt altına alınmış test görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 5.10 : Dijital fotoğraflama metodu ile yapılan testten görüntüler[34].

5.5 Takip Tekniklerinin Birbirleriyle Karşılaştırılması

Bu bölümde buzun erime sürecinin takibinde kullanılan metotların birbirlerine göre üstünlükleri ve dezavantajları anlatılacaktır.

İz takip metodunun dezavantajları;

- a. Test sırasında yapılan işaretlemeler test tamamlandıktan sonra kâğıt üzerine aktarılır. Ancak bu işlemin yapılabilmesi için ortam sıcaklığının artırılması ve cam yüzeylerinin kurutulması gerekmektedir. Birbirini takip eden testler olması halinde vakit kaybı yaşanmaktadır.
- b. Cam yüzeylerindeki erimenin manuel olarak takip edilmesi operatör kaynaklı bir işlem olduğundan sonuçlarda farklılık görülmesi muhtemeldir.

Dijital fotoğraflama metodunun avantajları;

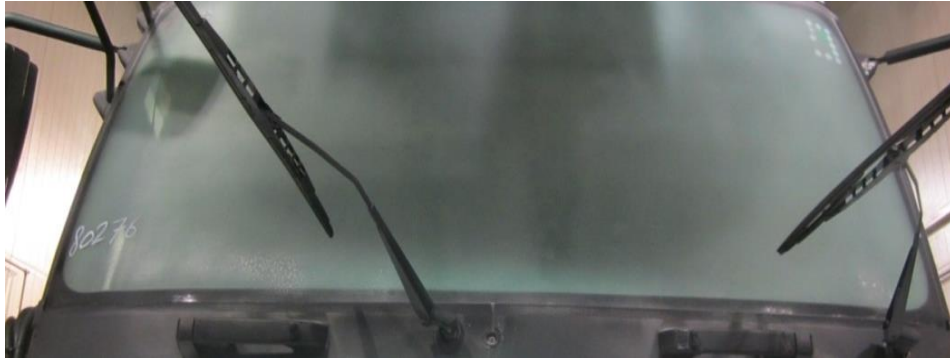
- a. Fotoğraflardan hangi bölgenin çözünmüş hangi bölgenin henüz erimemiş olduğu net olarak anlaşılmaktadır.

- b. Operatör kaynaklı bir işlem olmadığından yanılğı payı yoktur. İşaretleme sırasında hava akışının bozulması gibi etkiler ortadan kaldırılmış olur.
- c. Aynı şartlar altında birden fazla test yapılma olanağı sağlar. İz takip metodunda izlerin kâğıda aktarılması için ortamın ısıtılması gerekmektedir. Bu nedenle aynı şartlarda birden fazla test art arda yapılamamaktadır.
- d. Fotoğraflardan yola çıkarak buzun tamamen erimiş olduğu alanların zamana bağlı yüzdesi hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir.

5.6 Ağır Ticari Araç ile Yapılan Buz Çözme Testinin İncelenmesi

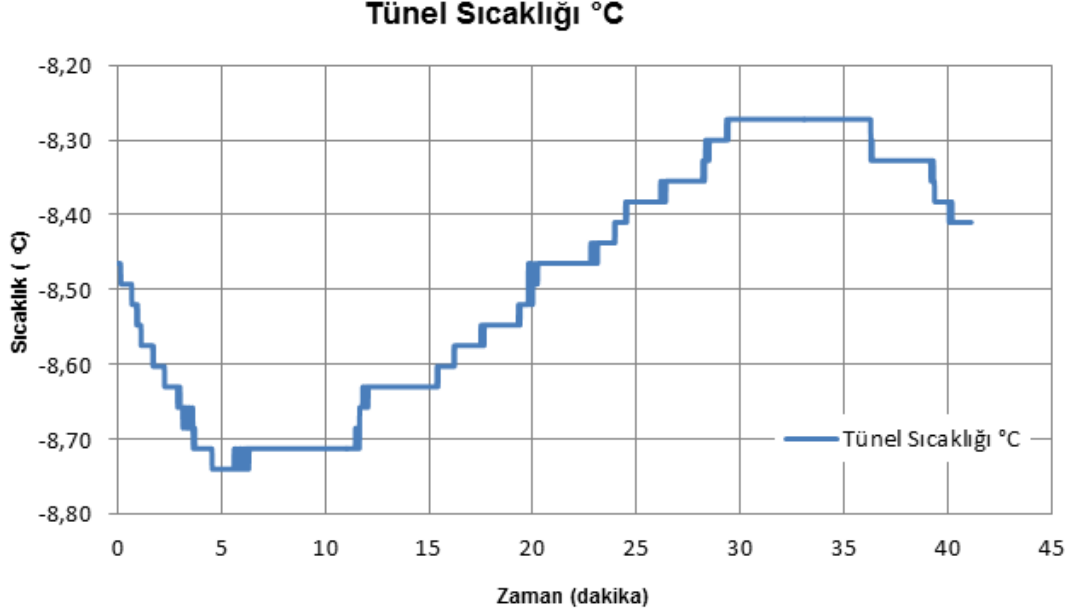
Tez kapsamında numerik modellemesi yapılacak olan yol kamyonu ile -8°C 'de yapılmış olunan ön cam buz çözme performans testi ve testten elde edilen sonuçlar bu kısımda incelenecektir. Testler Stuttgart-Almanya'da bulunan Behr test merkezindeki iklimsel rüzgâr tüneline yapılmıştır.

Test şartnamesinde belirtildiği üzere aracın ön ve yan camlarının yüzey alanları hesaplanmış ve camlara ne kadar su püskürtüleceği belirlenmiştir. Şekil 5.11'de su uygulamasından sonra cam yüzeyinde oluşan buz tabakası görülmektedir.



Şekil 5.11 : Araç ön camına su sıkıldıktan sonraki durumun görüntüsü.

Test ortamının sıcaklığını -8°C de sabit tutabilmek için içeriye sürekli şartlanmış havanın gönderilmesi gerekmektedir. Ancak odaya gönderilen havanın hızı, test sırasında cam yüzeyinde bulunan buz tabakasının erimesine etki etmemesi için olabildiğince düşük tutulmalıdır. Bu nedenle test sırasında tünele üflenen soğuk havanın hızı sabit 5 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede test ortamının sıcaklığının -8°C civarında sabitlendiği Şekil 5.12'de görülebilmektedir.



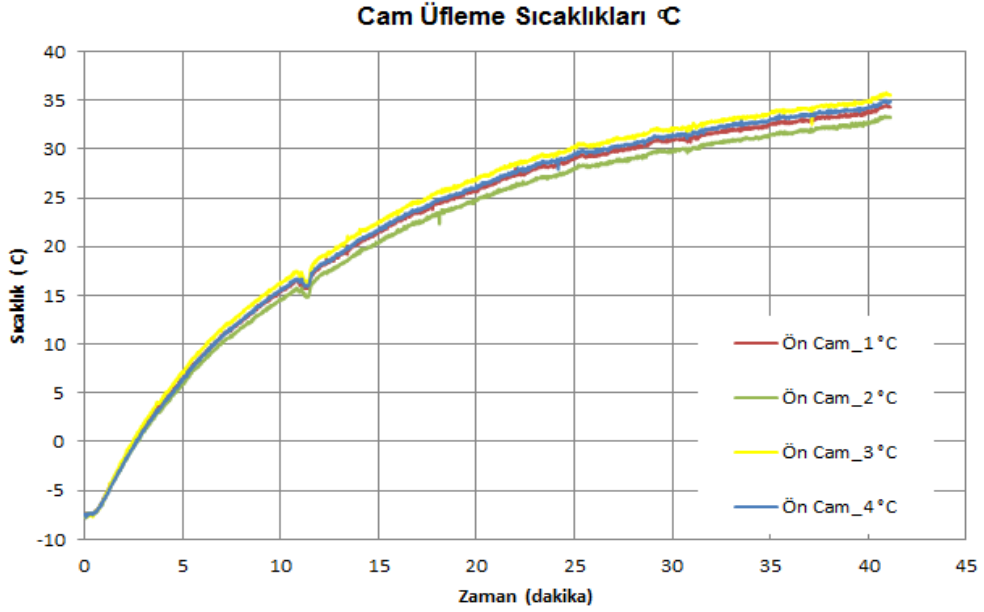
Şekil 5.12 : Test ortamının zamana bağlı sıcaklık değişimi.

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği üzere buz çözme performansını etkileyen en önemli faktör cam etrafındaki hava hızlarıdır. Yeterli miktarda hava hızı elde edilmediği zaman taşınım ile ısı transferi azalmakta ve buzun erime süresi artmaktadır. Teste başlamadan önce mutlaka üflenen hava hızları anemometre ile kontrol edilmeli ve doğru miktarda havanın cama doğru üflendiğinden emin olunmalıdır.

Araç test için -8°C de koşullandırılırken motor soğutma suyunun, motor yağının ve kalorifer peteği üzerindeki sıcaklık dağılımının ortam sıcaklığına erişmesi hedeflenir. Bu şartlar sağlandıktan sonra teste başlanır ve araç çalıştırıldıktan sonra motor suyu sıcaklığı artmaya başlar.

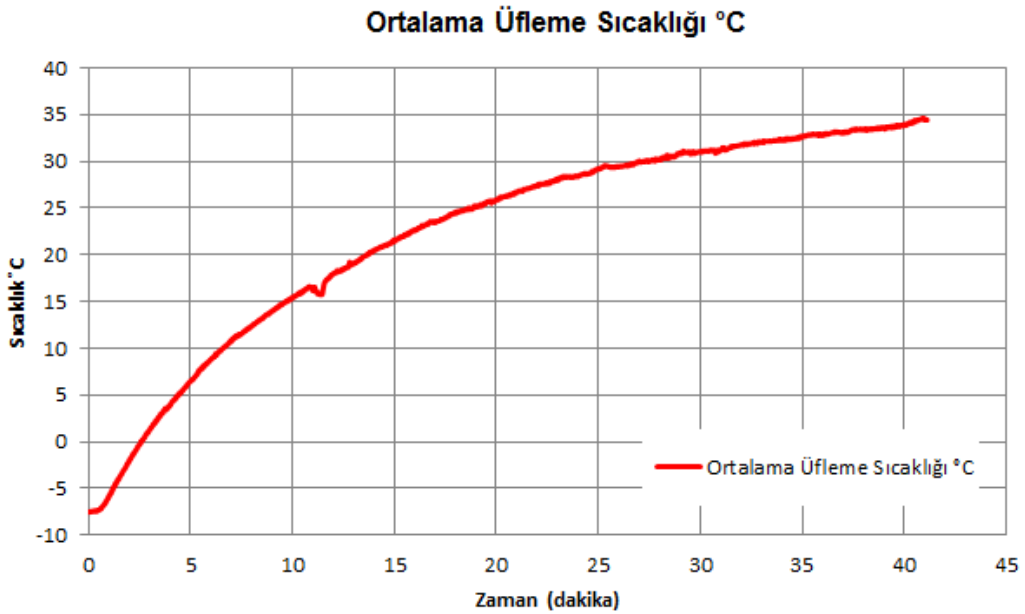
Kalorifer sisteminde bulunan ısı değiştiricisi (kalorifer peteği) içerisinden geçen motor suyu ısındıkça kalorifer peteğinin kanatçıkları arasından geçip cama doğru üflenen havanın sıcaklığı da artar. Test sırasında sürücü tarafındaki üfleçte 2 adet, yolcu tarafındaki üfleçte 2 adet olmak üzere toplam 4 noktadan üfleme sıcaklıkları ölçümleri alınmıştır. Zamana bağlı ölçülen bu değerler Şekil 5.13 görüldüğü gibi -8°C ortam sıcaklığından başlayıp yaklaşık 35°C sıcaklığa kadar yükselmektedir. Üfleme sıcaklığı arttıkça cam iç yüzey sıcaklığı da yükselmektedir. Camdan buza doğru olan ısı iletimi neticesinde buz tabakasının sıcaklığı erime noktasına

eriştiğinde çözünme başlar. Bu nedenle motor suyunun hızlı bir şekilde ısınması ve dolayısıyla üfleme sıcaklığındaki artışın çabuk olması gerekmektedir.



Şekil 5.13 : Sürücü ve yolcu tarafındaki sensörlerde okunan üfleme sıcaklıkları.

Zamana bağlı üfleme sıcaklıklarındaki değişim numerik modelleme sırasında kullanılacaktır. Isıl sınır şart olarak tek bir ısınma eğrisi tanımlanacağından dolayı üfleme sıcaklıklarının ortalaması alınmıştır. Kabin içerisine üflenen havanın ortalama sıcaklık değerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.14’de verilmiştir.



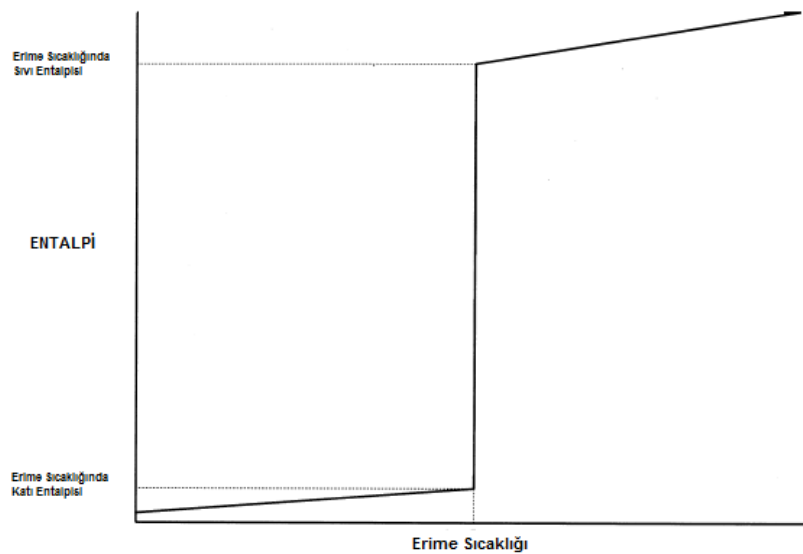
Şekil 5.14 : Cama üflenen havanın ortalama sıcaklığı ve zamana bağlı değişimi.

6. MODELLEME ÇALIŞMASI VE SAYISAL ANALİZLER

Otomotiv klima sistemlerinin incelenmesinde hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması, çalışmalarda esneklik sağladığından ve zaman kazandırdığından ön cam buğu ve buz çözme performansının incelenmesinde de kullanılabilir. Bu çalışmada, otomotiv ön camı etrafındaki hava hızlarının tahmin edilmesi ve ön cam üzerinde oluşan buzun zamana bağlı erimesi basitleştirilmiş iki ve üç boyutlu model üzerinden incelenecektir. Oluşturulan modeller yardımıyla, cam iç yüzeyi etrafındaki hava hızlarına ve cam dış yüzeyindeki buzun erimesine hangi parametrelerin ne yönde etki ettiği irdelenebilecektir. Modeller Catia ve Creo programları yardımıyla oluşturulmuş ve iki boyutlu model çözüm ağı Ansys, üç boyutlu sayısal çözü ağı ise Ansa programları ile sayısal çözümler ise Fluent 15.0 programı ile yapılmıştır.

Nümerik çalışma boyunca yapılan yaklaşımlar aşağıdaki gibidir:

1. Akış sıkıştırılmaz, viskoz, Newtonien ve izentropik olarak kabul edilmiştir.
2. Saf suyun entalpisinin sıcaklıkla değişimi lineerdir. 273 K'de buz erimekte ve erime sıcaklığının altında ve üstünde entalpi değişimi lineer olarak değişmektedir. Şekil 6.1'de entalpinin sıcaklık ile değişimi gösterilmektedir. Entalpideki sıçrama gizli ısı miktarına bağlıdır.

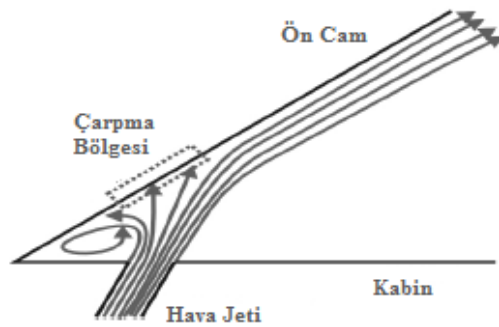


Şekil 6.1 : Saf su için entalpinin sıcaklık ile değişimi[3].

3. Buz tabakasının yoğunluğu sabit kabul edilmiştir, sıcaklık ve faz değişimine bağlı değişim dikkate alınmamıştır.
4. Analiz sırasında termal iletkenlikler sabit kabul edilmiştir.
5. Cam dış yüzeyi üzerindeki eriyen buz tabakası içerisindeki akış ihmal edilmiş, cam yüzeyinden eriyerek süzülen buzun çözünmeye olan katkısı göz ardı edilmiştir.
6. Buz tabakası erime sırasında poroz ortam olarak değerlendirilmektedir. Porozite karışımdaki sıvı oranına eşit olup, her bir iterasyonda güncellenmektedir. Ayrıca poroziteden dolayı oluşan terimler momentum denkleminde eklenmiştir.
7. Kabin duvar kalınlıkları ihmal edilmiştir.
8. Otomotiv endüstrisinde camlar PVB ve cam tabakalarından oluşmaktadır. PVB tabaka oldukça ince olduğundan çözüm ağı atama problemleri oluşturmaktadır. Bu nedenle camın termal özellikleri kompozit yapıyı yansıtacak şekilde belirlenmiş ve tek katman gibi modellenmiştir.

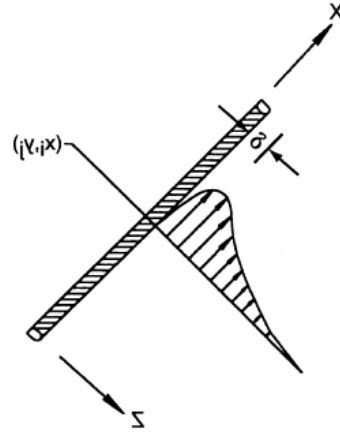
6.1 Akış Karakteristikleri

Buz çözme üflecinde cama üflenen hava, hava jeti olarak kabul edilir. Şekil 6.2’de cam yüzeyi etrafındaki hava jetinin davranışı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Ön cam boyunca hava akışının şematik görünümü[9].

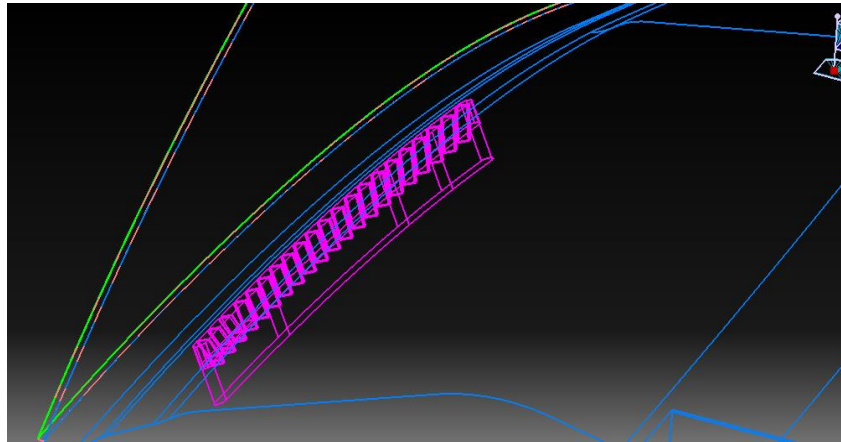
Hava jeti cama çarptıktan sonra genel olarak cam yüzeyine yapışır ve cam yüzeyi boyunca kabinin üstüne doğru hareket eder. Çarpma noktasının altında ise, çarpma açısına bağlı olarak girdap bölgesi oluşmaktadır. Şekil 6.3’de eğik bir yüzey yani cam üzerinde hava jetinin hız profili görülmektedir.



Şekil 6.3 : (x_i, y_j) noktasında $u(x_i, y_j, z)$ hız komponentinin şematik gösterimi[4].

Kalorifer sisteminin yüze, cama ve ayağa üfleme gibi farklı çalışma koşullarında kabin içerisinde bulunan her bir üfleçten çıkan hava debisi, hava kanalı optimizasyonu çalışmaları sonucunda belirlenmektedir. Bu çalışmada temel alınan araç modelinde sürücü ve yolcu tarafında birer adet olmak üzere toplam 2 adet ön cam üfleci bulunmaktadır. Buz ve buğu çözme modunda ön cam üfleçlerinden çıkan toplam hava debisi $2.83 \text{ m}^3/\text{dakika}$ dır yani toplam $5.66 \text{ m}^3/\text{dakika}$ hava cama doğru üflenmektedir. Bu debi, klima sistemi maksimum fan hızında ve maksimum sıcaklıkta çalıştırıldığında elde edilen değerdir ve hem hava kanalı optimizasyonu sonrasında test ile hem de HAD analizleri ile doğrulanmıştır.

Akış karakteristiğini belirlemek için Re sayısının hesaplanması gerekmektedir. Üfleç ağzı şekil 6.4’de görüldüğü gibi kanallara ayrılmaktadır ve efektif akış alanı $0,006 \text{ m}^2$ ’dir. Hava debisi göz önüne alındığında üfleç çıkışında hesaplanan ortalama hava hızı 7.86 m/s ’dir.



Şekil 6.4 : Modelde kullanılan üfleç konumu ve yapısı.

Üfleç çıkış ağzında hidrolik çap hesabı yapacak olursak denklem (6.1)'den yararlanmamız gerekecektir.

$$D_H = \frac{4 * (Alan)}{\text{Çevre}} \quad (6.1)$$

Buradan hidrolik çap değeri 0.0457m² olarak bulunur. Bulunan hidrolik çap kullanılarak üfleç akışı için Re sayısı denklem (6.2) ile hesaplanır.

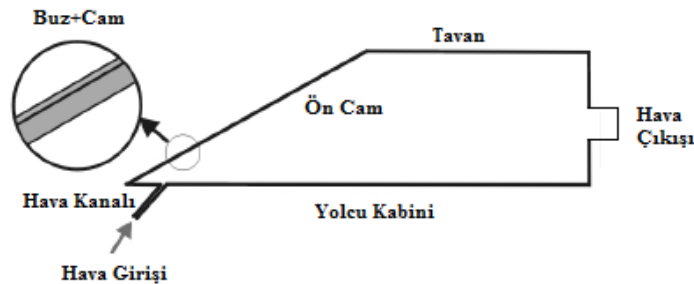
$$Re_H = \frac{U * D_H}{\nu} \quad (6.2)$$

Burada ν kinematik viskozite değeridir. Reynolds sayısı 1.64 x 10⁴ olarak bulunur. Elde edilen Reynolds sayısını incelediğimizde akışın kesinlikle türbülanslı olduğunu anlayabiliriz. Bu belirleme ileride yapılacak olan HAD modellemesi için büyük önem taşımaktadır.

6.2 İki Boyutlu Modelin Oluşturulması

6.2.1 İki boyutlu modelin geometrik yapısı

Bu bölümde ön cam çevresindeki hava jetinin akış karakteristikleri ve cam dış yüzeyi üzerinde bulunan buz tabakasının zamana bağlı erimesi iki boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 6.5'de basitleştirilmiş model görülmektedir. Modelde ön cam, buz tabakası, hava kanalı ve hava tahliye açıklığı bulunmaktadır. Analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak momentum ve süreklilik denklemi kararlı halde, izotermal olarak çözümlenmiş ve cam etrafındaki ve kabin içerisindeki hava hızları ile akış karakteristikleri ortaya konmuştur. Daha sonra zamana bağlı olarak, enerji denklemi de devreye girerek çözümlenmiş, cam yüzeyinden buza doğru olan ısı transferi neticesinde buzun erimesi incelenmiştir.



Şekil 6.5 : İki boyutlu analiz için oluşturulan modelin şematik görünümü.

Modelde, ön konsol, direksiyon, koltuklar vb. iç trim parçaları dikkate alınmamıştır. Genel olarak hava hızlarına ve buz çözünmesine etki eden parametreler üzerine yoğunlaşacağımız için modelleme ve hesaplama zorluklarından kaçınmak için bu yaklaşım yapılmıştır.

6.2.2 İki boyutlu modelde kullanılan sayısal çözüm ağları

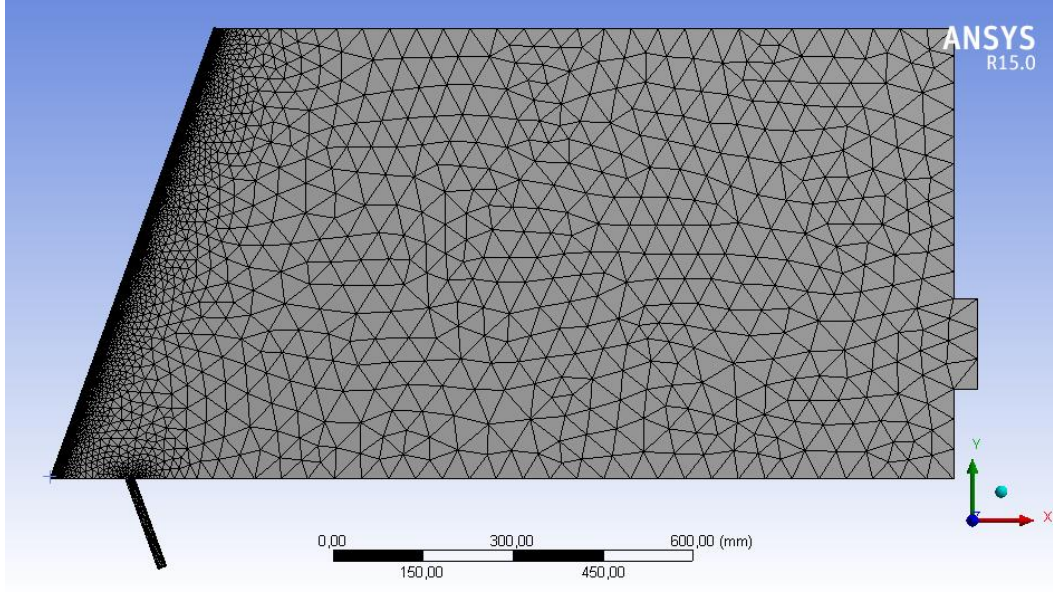
Genelde, buğu ve buz çözme kanalları karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu tarz uygulamalarda hem bu kanalların hem de kabin içerisinin modellenmesi ve meshlemesi büyük eforlara ve uzun çözümleme sürelerine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle üçgen eleman kullanılması modeli oldukça rahatlatmaktadır. Ancak üçgen ağ yapısının kullanılması sırasında sınır tabakalarda yüksek hız gradyanları elde edilebilmektedir. Bu negatif etkiyi önlemek için sınır yüzeylerde sıkı ağ yapısı kullanılmalı, eleman boyutları olabildikçe ufak tutulmalı ve özellikle doğru sonuçlar elde edebilmek için sınır yüzeylerde sınır tabakalar tanımlanmalıdır. Bu çalışmada dört farklı sayısal çözüm ağ modeli kullanılmış ve her bir model için karşılaştırma yapılmıştır. Bazı modellerde sınır tabaka tanımlaması yapılmışken bazılarında ise bu tanımlama yapılmamıştır.

Genel olarak özetleyecek olursak, modellerde kullanılan çözüm ağ yapıları ve eleman sayıları Çizelge 6.1'deki gibidir.

Çizelge 6.1: İki boyutlu analizlerde kullanılan ağ yapıları.

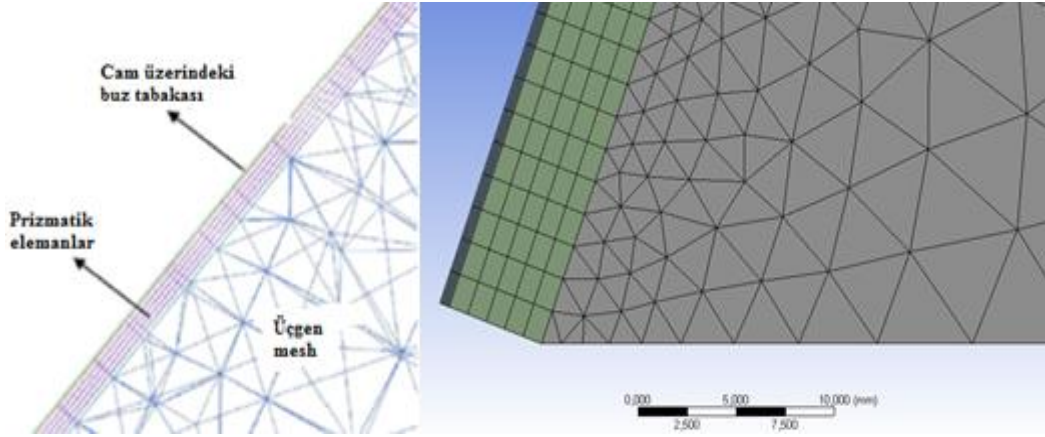
Durum	Cam İç Yüzeyi Sınır Tabaka Tanımlaması	Cam ve Buz Tabakası Sınır Tabaka Adedi (Cam+Buz)	Hücre Sayısı (Hava+Ön Cam+Buz)
1	Yok	5+5	12732 (7732+2500+2500))
2	Var	5+5	15530 (10530+2500+2500)
3	Var	8+5	70725 (60975+6000+3750)
4	Var	10+5	163475 (144725+12500+6250)

İlk durumda kaba bir çözüm ağı tanımlanmış ve eleman boyutları yüksek tutulmuştur. Kabin içerisindeki hava üçgen eleman yapısıyla örülmüş, ön cam ve buz tabakası dörtgen yapıda elemanlar ile modellenmiştir. Hiçbir duvarda sınır tabaka tanımlaması yapılmamıştır. Şekil 6.6'da modelin genel çözüm ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 6.6 : Durum 1 - Kaba mesh uygulanmış modelin genel görünümü.

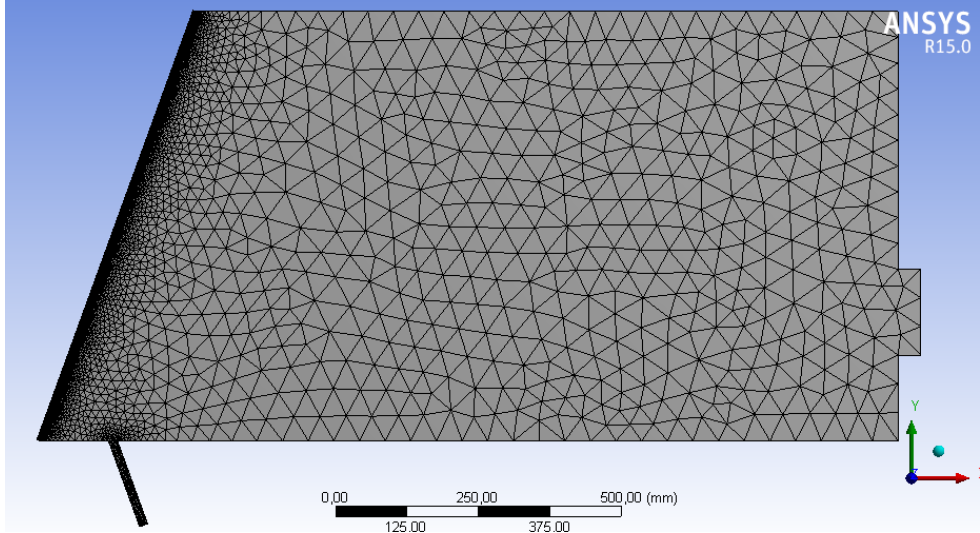
Dörtgen yapıda elaman kullanılan ön cam ve buz içerisinde 5 eşit sınır tabaka kullanılmıştır. Şekil 6.7’de cam ve buz tabakaları için sayısal çözüm elamanlarının yapısı görülmektedir. Buz ve cam tabakası alt uçtan üst uca doğru 500 eşit parçaya ayrılmıştır.



Şekil 6.7 : Durum 1 - Kaba mesh uygulanmış modelde cam ve buz tabakası.

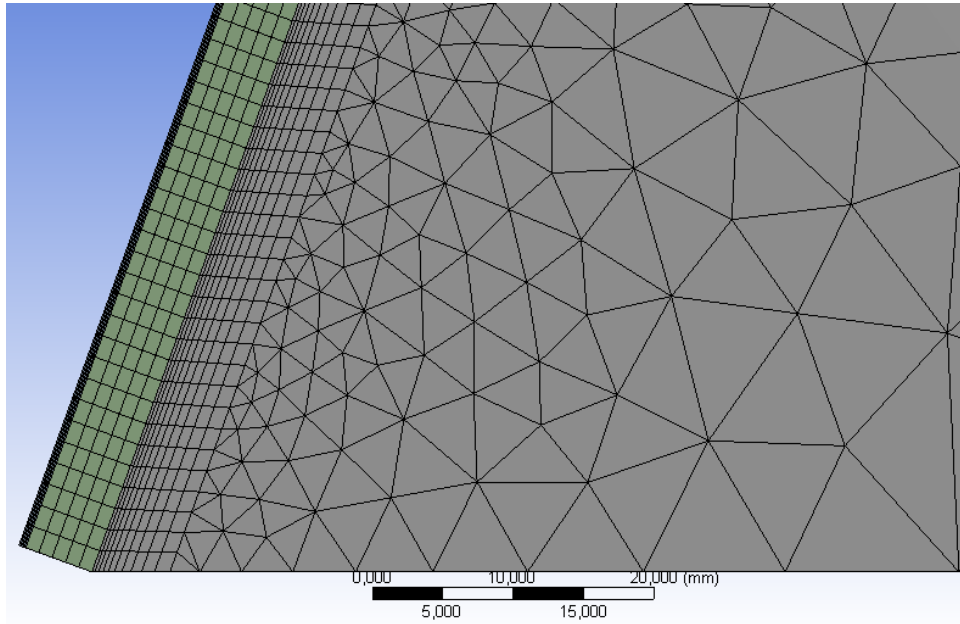
İkinci durumda da tekrar kaba (coarse) meshleme yapılmış ancak ön cam etrafındaki türbülans etkilerini ve y^+ değerlerini azaltmak için cam bölgesinde sınır tabaka yapısı uygulanmıştır. Ön cam bölgesi hariç diğer hiçbir duvarda sınır tabaka tanımlaması yapılmamıştır.

Şekil 6.8’de modelin genel ağ yapısı görülmektedir. Dörtgen yapıdaki elemanlarla modellenen ön cam ve buz içerisinde 5 eşit tabaka kullanılmıştır.



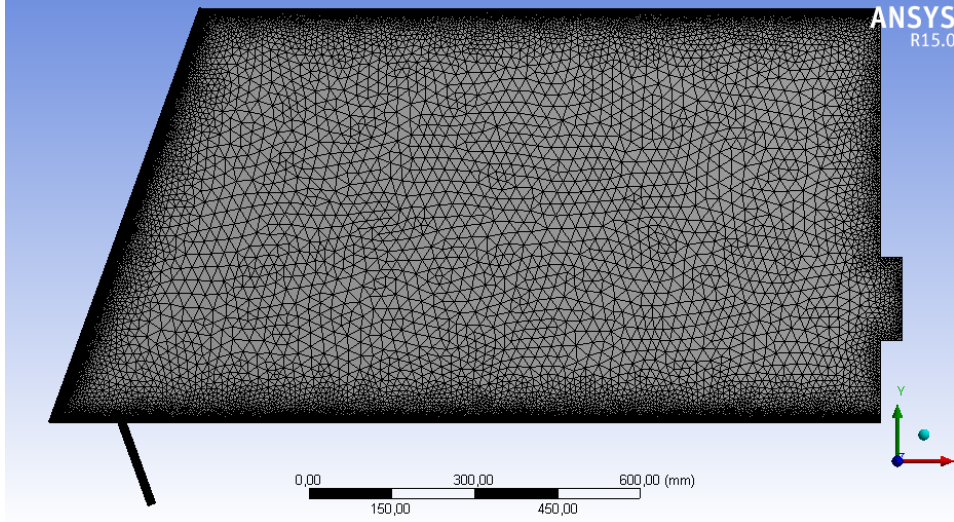
Şekil 6.8 : Durum 2– Orta mesh uygulanmış modelin genel görünümü.

Şekil 6.9’da cam ve buz tabakaları için kullanılan eleman yapısı görülmektedir. Bu katmanlar birinci durumda olduğu gibi alt uçtan üst uca doğru 500 eşit parçaya ayrılmıştır. Kabin havası ile cam ara yüzeyinde temas bölgesi tanımlandığından dolayı sınır tabaka da 500 eşit parçaya otomatik olarak bölünmüştür.



Şekil 6.9 : Durum 2 – Orta mesh uygulanmış modelde cam ve buz tabakası.

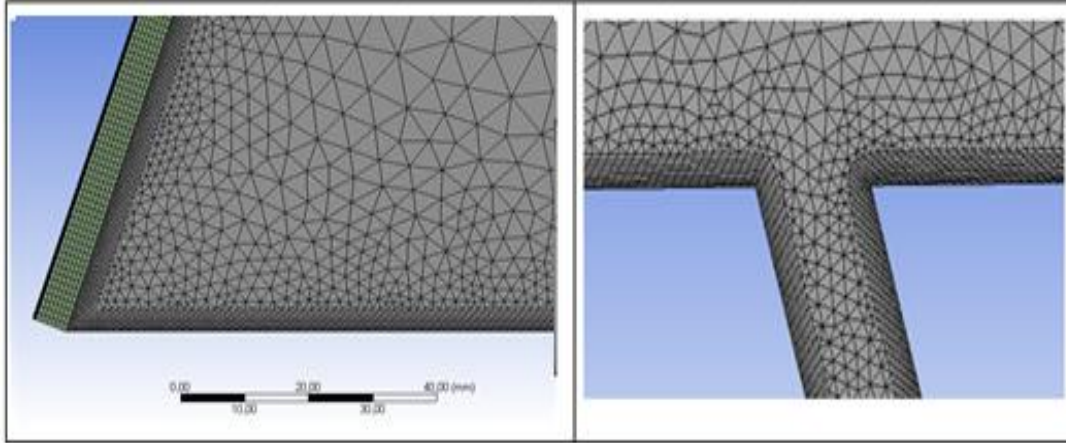
Üçüncü durumda ise ilk iki duruma göre daha iyi ve sık bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Eleman boyutları küçültülmüş ve hem cam iç yüzeyine hem de hava kanalı duvarlarına sınır tabaka tanımlaması yapılmıştır. Oluşturulan sayısal ağ yapısı Şekil 6.10’de görülebilmektedir.



Şekil 6.10 : Durum 3 – Sıkı mesh uygulanmış modelin genel görünümü.

Ön cam bölgesine ve hava kanalı duvarlarına sınır tabaka uygulanması halinde buz çözme performansı için kritik olan hava hızları daha hassas tahmin edilmiş olacaktır. Cam yüzeyi boyunca hareket eden sıcak havadan cama doğru olan ısı transferi hava hareketlerinden ve havanın hızlarından doğrudan etkilendiğinden kararlı hal analizlerinde hava hızları olabildiğince gerçeğe yakın tahmin edilmelidir.

Şekil 6.11’de cam ve buz katmanını için kullanılan prizmatik ağ yapısı, cam yüzeyindeki ve hava kanalındaki sınır tabaka tanımlamaları görülmektedir.

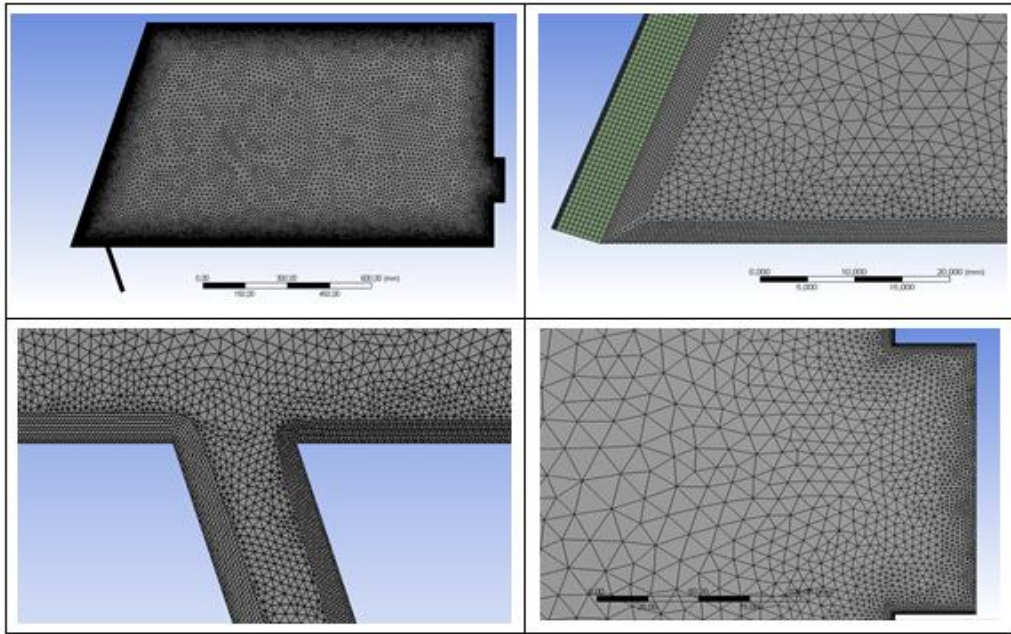


Şekil 6.11 : Durum 3 – Sıkı mesh uygulanmış modelde cam yüzeyi ve hava kanalı.

Dörtgen yapıda olan ön cam eşit kalınlıkta 8 adet katmana, buz ise aynı şekilde 5 eşit katmana ayrılmıştır. Buz ve cam tabakası alt uçtan üst uca doğru 750 eşit parçaya bölünmüştür. Cam ve kabin havası arasında temas tanımlandığından, cam iç yüzeyindeki sınır tabaka da otomatik olarak 750 eşit parçaya ayrılmıştır. Bu

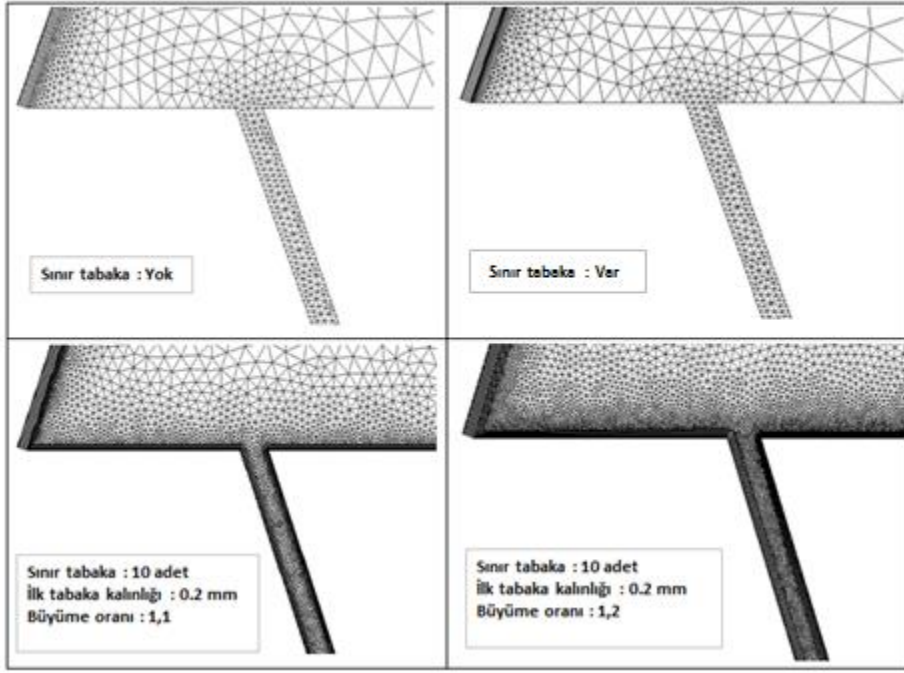
parçalama işlemi sırasında modelin yakınsamasına engel olmayacak şekilde en boy oranının kontrol edilmesi gerekmektedir.

Dördüncü ve son durumda sayısal ağ yapısı, duvarlarda ve sınır koşulların belirlendiği bölgelerde iyice sıkılaştırılmış ve eleman boyutları oldukça küçük tutulmuştur. Ön cam içerisinde 10 eşit tabaka, buz içerisinde ise 5 eşit kalınlıkta tabaka kullanılmıştır. Buz ve cam tabakası alt uçtan üst uca doğru 1250 eşit parçaya ayrılmıştır. Böylece cam iç yüzeyinde sıkılaştırılmış ağ yapısı sayesinde, o bölgedeki hız gradyanları daha net ve doğru şekilde elde edilebilecektir. Şekil 6.12’de model çözüm ağ yapıları ve sınır tabaka tanımlamaları net olarak görülmektedir.



Şekil 6.12 : Durum 4 – Çok sıkı ağ yapısı uygulanmış modelde bölgesel ağ yapıları.

Hava jetinin ön cama yönlendirilmesi için kullanılan üflecin her dört model için belirlenmiş ağ yapısı Şekil 6.13’de detaylı olarak görülebilmektedir. Burada ilk iki modelde üfleç etrafında sınır tabaka tanımlanmamıştır. İlk iki modelde hava kanalı uzunluğu boyunca 50 eşit parçaya bölünmüştür. İkinci modelin ilk modelden farkı ön cam üzerinde sınır tabaka tanımlanmış olmasıdır. Üçüncü modelde hava kanalında 10 adet sınır tabaka tanımlanmış ve ilk tabakanın kalınlığı 0.2 mm olarak belirlenmiştir. Sınır tabaka büyüme oranı ise 1.1 olarak seçilmiştir. En son modelde ise üçüncü modelden farklı olarak büyüme oranı 1.2 olarak belirlenmiştir ancak buradaki minimum eleman boyutu üçüncü modelden daha küçüktür. Dolayısıyla hava jetinin üfleçten çıktığı bölgelerde daha fazla eleman bulunmaktadır.



Şekil 6.13 : Modellerde hava üflecisi için belirlenmiş sınır tabakaların özellikleri.

Böylece birbirinden farklı sayısal çözüm ağına sahip dört adet modeli tanımlanmış oldu. Daha ileriki bölümlerde farklı çözüm ağına sahip bu modeller kullanılarak cam bölgesindeki hız gradyanlarına ve cam yüzeyindeki buz tabakasının erimesine etki eden parametreler karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

Sınır tabaka uygulamasında y^+ değerlerinin kullanılan türbülans modeli iyi uyuşması gerekmektedir. Bu nedenle analiz öncesinde y^+ değerinin kontrol edilmesi şarttır. y^+ hesaplamasına ilk olarak Re sayısının belirlenmesi ile başlanır. Sınır tabaka boyunca Re sayısı denklem (6.3) ile hesaplanır.

$$Re_x = \frac{\rho * U_\infty * L_{bl}}{\mu} = \frac{U_\infty * L_{bl}}{\nu} \quad (6.3)$$

Burada;

ρ : Havanın yoğunluğu (1.225 kg/m^3)

U_∞ : Cam yüzeyi boyunca havanın ortalama hızı [m/s]

L_{bl} : Sınır tabaka uzunluğu / cam boyu (0.8m)

μ : Havanın dinamik viskozitesi ($1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$)

ν : Havanın kinematik viskozitesi (m^2/s)

Sınır tabaka boyunca Re_x sayısı 2.46×10^5 olarak hesaplanmıştır. Cam yüzeyi boyunca havanın ortalama hızı 4.5 m/s olarak kabul edilmiştir. Bu hız değeri sınır tabaka kalınlığı belirlenmeden önce yapılan analizler sonucunda ortaya konulmuştur. Re sayısı hesaplandıktan sonra yüzey sürtünme katsayısının hesaplanması gerekmektedir. Bu sürtünme akışkanın bir yüzey üzerinde temas halindeki akışı nedeniyle oluşur. Bu katsayının azaltılması için yüzey üzerinde akışın kolaylaştırılması ya da sürtünme boyunun veya kesitinin azaltılması gerekmektedir. Düz bir plaka üzerindeki türbülanslı akışta yüzey sürtünme katsayısının hesaplanması için birden fazla yaklaşım mevcuttur. Cam yüzeyi de düz bir plaka olarak düşünülebileceğinden bu yaklaşımlardan biri uygulanabilir. Hesaplanan Reynolds sayısına uygun olarak (6.4) Schlichting eşitliği sürtünme katsayısının hesaplanması için kullanılabilir.

$$C_f = [2 \log_{10}(Re_x) - 0.65]^{-2.3} \quad Re_x < 10^9 \quad (6.4)$$

Bu eşitlikten sürtünme katsayısı $C_f = 4.86 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanır. Duvar kayma gerilmesi (τ_w) ise elde edilen sürtünme katsayısı kullanılarak (6.5) denklemi ile hesaplanır.

$$\tau_w = C_f * \frac{1}{2} * \rho * U_\infty^2 \quad (6.5)$$

Kayma gerilmesi 0.06 olarak bulunur. Birim analiz yapılarak, sürtünme hızı denilen ve eşitlik (6.6) ile ifade edilen bir hız tanımı yapılabilir. Bu eşitlik kullanıldığında sürtünme hızı 0.221 m/s olarak hesaplanır.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (6.6)$$

Son olarak sınır tabakadaki ilk katman kalınlığı, y hesaplanır. Bu hesaplamada denklem (6.7) kullanılacaktır.

$$y = \frac{y^+ * \mu}{\rho * u_\tau} \quad (6.7)$$

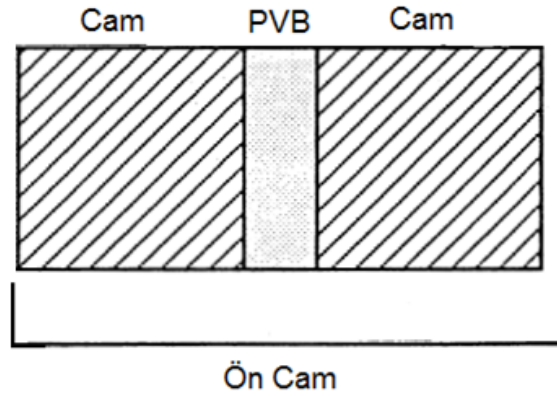
Duvara yakın ilk hücrenin duvardan olan uzaklığı (y) hesaplanırken y^+ değerine karar verilmesi gerekmektedir. Genel olarak y^+ değeri maksimum 5 civarında tutulmak

istenir. Bu göz önüne alındığında y maksimum 0.33 mm olarak seçilmelidir. Kullanılan hesaplamadaki yaklaşımlardan dolayı, güvenli tarafta kalabilmek adına y değeri 0.2 mm olarak kabul edilmiştir ve 10 adet sınır tabaka tanımlanmıştır.

6.2.3 Malzeme özellikleri, başlangıç ve sınır şartları

Modelde buz tabakasının kalınlığı sabit kabul edilmiştir. Erime analizleri sırasında cam yüzeyi üzerindeki çözünme buz tabakasının kalınlığındaki değişim ile değil, bu tabaka içerisindeki sıvı yüzdesi ile takip edilecektir. Dolayısıyla buz tabakası sabit kalınlıktaki bir katı gibi modellenecek, fiziksel özellikleri ise buzun özellikleri olarak tanımlanacaktır.

Otomobil ön camlarında güvenlik amacıyla lamine camlar kullanılır ve bu tür camlar iki ya da daha fazla cam katmanının aralarına polivinil butral (PVB) denilen sert koruyucu madde yerleştirilerek ısı ve basınç ile kalıcı olarak birleştirilmesinden oluşur. Bu camlar kırıldığında PVB ara katman cam parçalarını tutarak dağılmalarını ve büyük keskin parçalara ayrılmalarını engeller. Şekil 6.14’de ön camda bulunan katmanlar gösterilmiştir. PVB tabakasının kalınlığı cama göre çok düşük olduğundan gereksiz eleman yoğunluğu ve analiz zorluğu çıkarmaktadır.



Şekil 6.14 : Otomotiv ön cam kompozit katmanları[27].

P. Mandloi ve N. Jain yapmış oldukları çalışmada, camın katmalarını dikkate alarak ve camı tek bir kompozit yapı gibi düşünerek analiz yapıldığında elde edilen sonuçların birbirinden çok farklı olmadığını kanıtlamışlardır. Camın kompozit tek bir parça gibi düşünülmesi durumunda, PVB özgül ısısının cam katmanına göre fazla olmasından dolayı erimenin kompozit yapıda daha yavaş gerçekleştiğini göstermişlerdir. Elde edilen sonuçlardaki farklılıklar ve analiz süresinin değişimi göz önüne alındığında bu yaklaşımın yapılması mantıklı olmaktadır.

Modellenen kabin havası, buz tabakası ve ön camın fiziksel özellikleri Çizelge 6.2'deki gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 6.2: Hava, ön cam ve buz tabakasının fiziksel özellikleri

Sınırlar	Hava	Buz-Su	Cam
Yoğunluk (kg/m^3)	1.225	920	2400
Özgül Isı (J/kg K)	1006.43	2040	750
Isıl İletkenlik (W/m-K)	0.0242	1.88	0.93
Dinamik Viskozite (kg/m-s)	1.7894e-05	0.00553	-
Erime Gizli Isısı (J/kg)	0	334960	-
Donma Sıcaklığı (K)	1	271	-
Erime Sıcaklığı (K)	2	273	-

Kararlı hal ve izotermal analiz, cam bölgesinde ve araç içerisindeki hava hızlarının belirlenmesi için yapılmaktadır. Bu süreçte kullanılan başlangıç ve sınır şartları Çizelge 6.3'de verilmiştir.

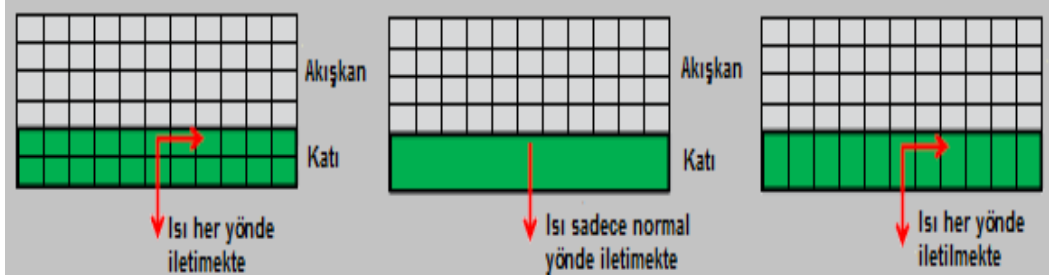
Çizelge 6.3: Kararlı ve izotermal hal için sınır şartları

Sınırlar	Sınır Koşulları
Hava debisi	0.12 kg/s
Hava sıcaklığı	-8°C
Çıkış şartı (Statik Basınç)	0 Pa
Kabin duvarları	Kaymama Sınır Şartı

Kararlı hal çözümlemesinde sabit hava debisi giriş şartı olarak uygulanmıştır. Kararlı hal çözümlemesi sonucunda elde edilen hava hızları ikinci aşama olan, kararsız hal çözümlemesinde başlangıç şartı olarak kullanılacaktır. Kararlı halde elde edilen hava hızları yakınsamış olduğundan ikinci aşamada sadece enerji denkleminin yakınsaması beklenecektir. Hava kanalı girişi hariç tüm yüzeyler adyabatik olarak değerlendirilmiştir. Üflenen havanın sıcaklık artışı için zamana bağlı ve deneysel olarak elde edilmiş Şekil 5.14'deki ısınma eğrisi kullanılmıştır. Bu eğri için Matlab programında kodlama yapılarak UDF olarak Fluent'e aktarılmıştır. Yazılan fonksiyon Ek A'da bulunmaktadır.

Katı duvar etrafını saran akışkanlar için termal etkiyi modellemek oldukça önemlidir. Isı transferini incelemek için 3 farklı yöntem uygulanabilir. Bu yöntemler Şekil 6.15'de detaylandırılmıştır. Bunlardan ilkinde katı duvar (cam) ön işlem sırasında meshlenerek, cam için hücreler oluşturulur. Bu oldukça kullanılan bir yöntemdir ve katı içerisindeki ısı iletimi tüm yönlerde hesaplanır. İkinci yöntemde ise sadece akışkan bölgesi meshlenir ve akışkan duvarında duvar kalınlığı belirlenerek duvara

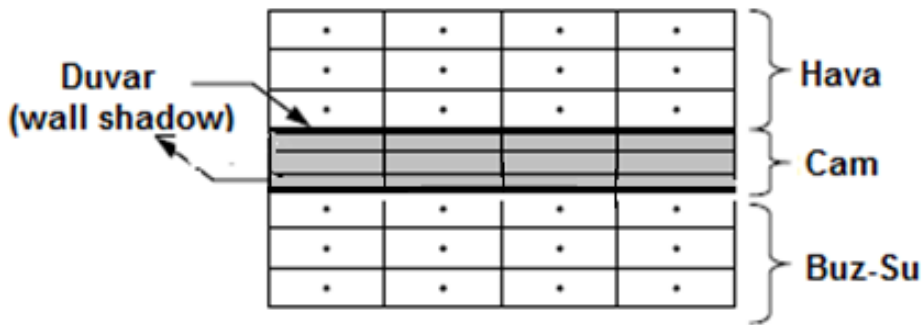
dik yönde ısı transferi hesaplanır. Son yöntemde ise ikinci opsiyon gibi duvar tanımlanır ve analiz sırasında kabuk iletim (shell conduction) seçeneği seçilirse katı içerisindeki iletim tüm yönlerde dikkate alınmış olur.



Şekil 6.15 : Katı - sıvı arayüzeyinde ısı iletim modelleme teknikleri[35].

Ancak ikinci ve üçüncü yöntemde katı üzerinden taşınım ile ısı transferi tanımlarken katı içerisindeki iletimi hesaba katabilmek için duvar kalınlığı kesinlikle analiz sırasında belirtilmelidir.

Bu çalışmada hem iki boyutlu hem de üç boyutlu analizlerde cam katı tabaka gibi modellenmiş ve çözüm elamanlarına ayrılmıştır. Dolayısıyla tezde uygulanan yöntem 1. yöntemdir. Cam yüzeyinin iç tarafında hava, dış yüzeyinde ise sabit kalınlıktaki buz tabakası akışkan olarak tanımlanmıştır. Bu şekildeki modellerde katı-akışkan ara yüzeylerindeki ısıl sınır şartları daima “coupled” olarak seçilmelidir. Bunun nedeni katı tabakanın her iki tarafında da akışkan bulunması ve bu yüzeydeki noktalarda ısı transferinin akışkan ve katı için ortak hesaplanmasıdır. Şekil 6.16’deki gibi bu yöntemde katı – akışkan ortak yüzeylerinde duvar sınır şartı ile beraber otomatik olarak “wall shadow” sınır şartı tanımlanır ve bunlar ortak çözdürülür. Duvar sınır şartı katı yüzeyi için tanımlandıysa akışkan yüzeyi için “wall shadow” duvar şartı otomatik atanır. Bu iki duvarda enerji denklemi ortak çözdürülür.

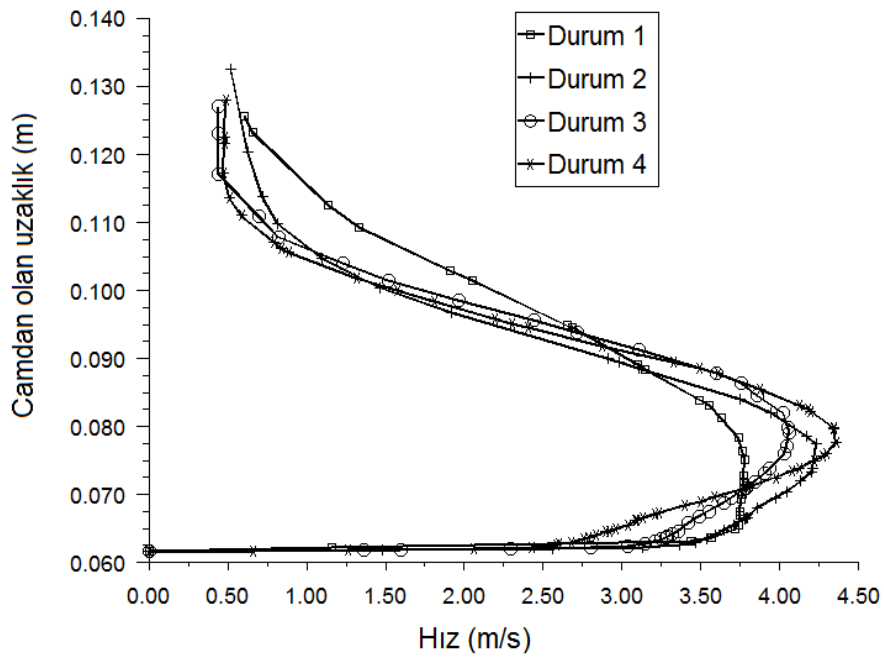


Şekil 6.16 : Katı – akışkan duvar sınır şartı şematik gösterimi[35].

6.3 İki Boyutlu Analizler ve Sonuçları

6.3.1 Sayısal çözüm ağının çözüme olan etkisi

Bu bölümde Çizelge 6.1'deki ağ yapıları birbiriyle karşılaştırılmıştır ve çözüm ağ yapısının analiz sonuçlarına etkisi irdelenmiştir. Enerji denkleminin devreye girdiği, zamana bağlı buz erime analizleri sırasında 0.1 saniye zaman adımı kullanılmıştır. Karşılaştırmalar sadece k- ϵ türbülans modeli için yapılacaktır. Şekil 6.17'de cam alt seviyesinden 150 mm yukarıda hava hızları sayısal çözüm elemanlarının yapısına bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

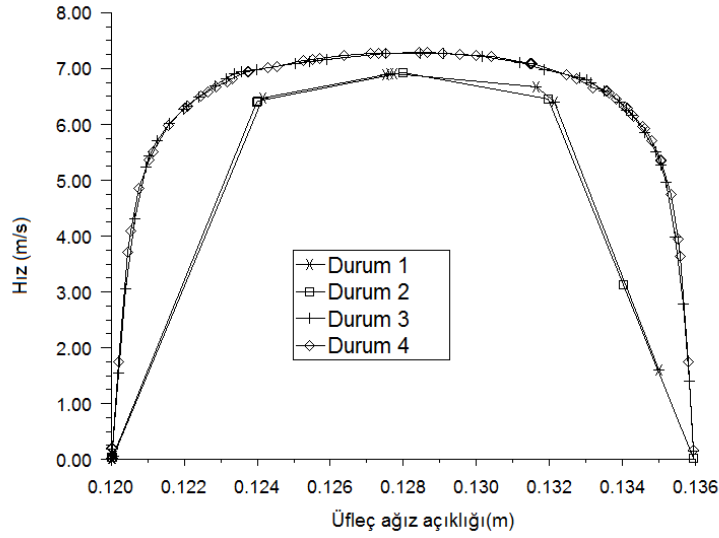


Şekil 6.17 : Cam alt yüzeyinden 150 mm yukarıda sayısal çözüm ağına bağlı hava hızları.

Kaymama sınır şartından dolayı cam yüzeyi etrafında büyük hız gradyanları bulunmaktadır. Aynı zamanda cam iç yüzeyinde sınır tabaka eleman boyutları her bir durum için farklı olduğundan hız profilleri de farklılık göstermektedir. Ağ yapısının yoğunluğu arttıkça elde edilen hız profilinin gelişiminin daha iyi olduğu ve hız gradyanlarındaki değişimin daha düzgün olduğu görülebilmektedir.

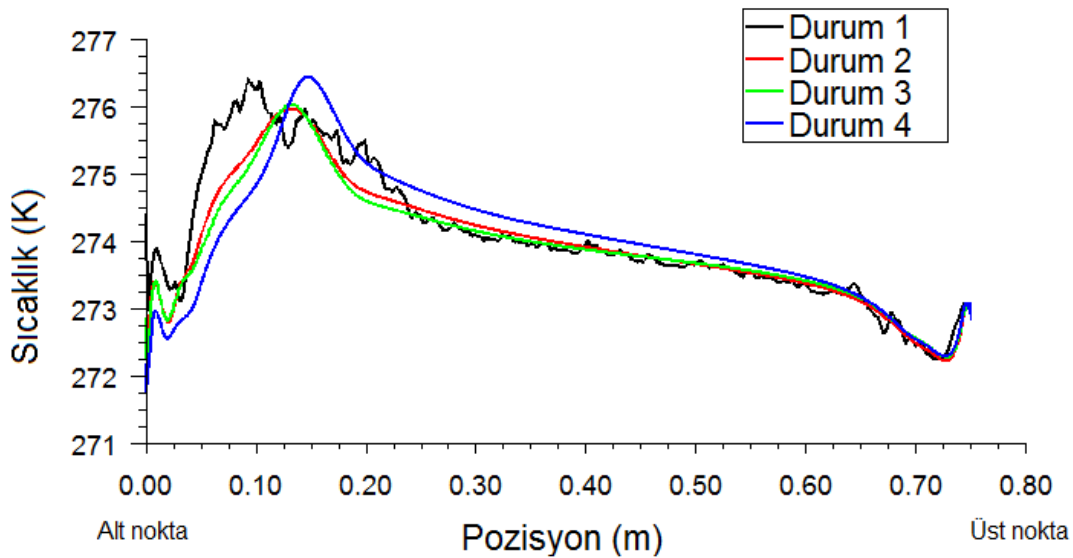
Üfleç duvarlarında 1 nolu sınır tabaka tanımlanmamış olduğundan ve 2 nolu modeldeki çözüm ağının kaba olmasından dolayı hava jetinin hemen üfleç çıkışındaki hız profili oldukça kötü elde edilmiştir. Dolayısıyla oldukça büyük hız gradyanları oluşmakta ve kabin içerisindeki ve cam bölgesindeki akış

zayıflamaktadır. 3 ve 4 nolu durumda ise üfleç duvarlarına sınır tabakalar tanımlanmış ve gelişmiş hız profili elde edilmiştir. Her iki modelde de gelişmiş hız profili aynı olduğundan sınır tabaka sayısını daha fazla arttırmaya gerek yoktur. Bu durum Şekil 6.18’de de görülmektedir.



Şekil 6.18 : Üfleç çıkışında hava hızlarının sayısal çözüm ağı modelleri için karşılaştırılması.

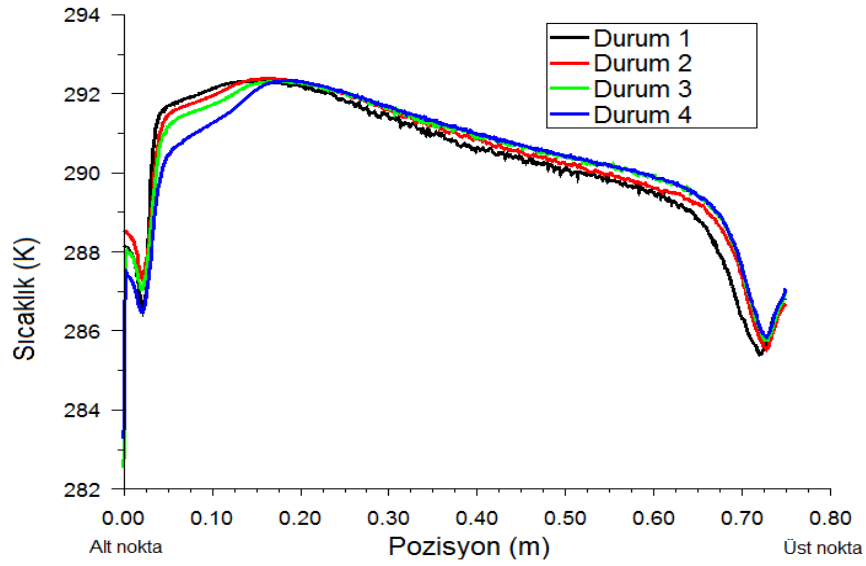
Bu kısımdan itibaren zamana bağlı analiz sonuçları tartışılacaktır. Karşılaştırma yapabilmek için 10 dakika ve 20 dakika sonundaki sonuçlar ele alınmıştır. 10 dakika sonunda cam iç yüzey sıcaklıkları her bir durum için karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 6.19’da paylaşılmıştır.



Şekil 6.19 : Çözüm ağı yapıları için 10dk. sonunda cam iç yüzey sıcaklıkları.

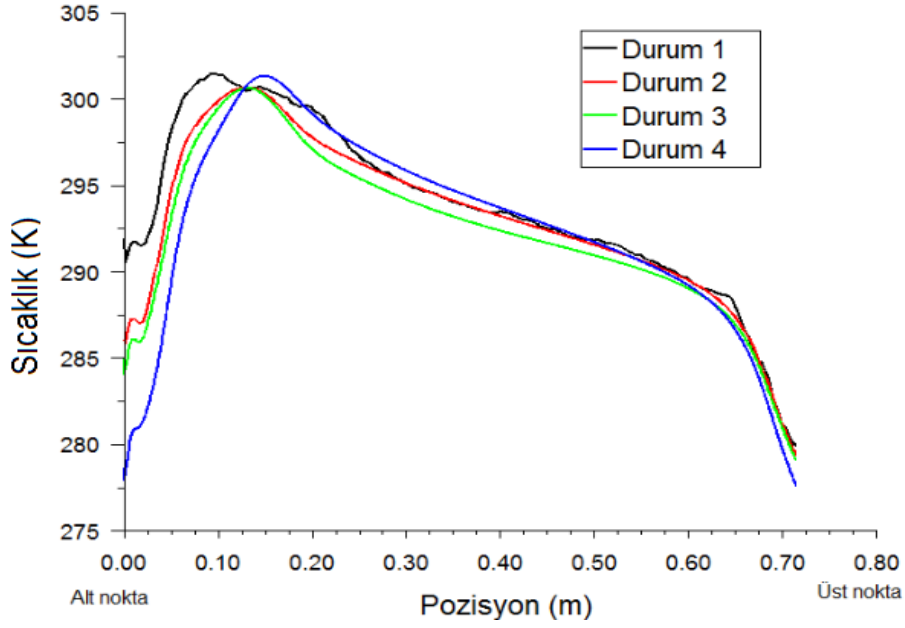
Sınır tabaka kullanılmamış olan 1 nolu durumda yüzey sıcaklığında dalgalanma görülmektedir. İyi bir ağ yapısına sahip olmadığından termal sınır tabaka düzgün şekilde gelişmemiştir. Çözüm ağındaki elaman yoğunluğundaki artış ve sınır tabaka tanımlanmasının sonucunda cam alt bölgesindeki sıcaklık değerlerinde düşüş ve hava jetinin cama çarptığı noktada ise sıcaklıklarda artışın olduğu görülmektedir. Ağ yapısı sıkılaştıkça sıcaklık profillerinin birbirlerine yaklaştığı görülebilmektedir.

Şekil 6.20’de ise yine 10 dakika sonunda cam iç yüzeyinden 5 mm içeride ve cama paralel hat üzerindeki hava sıcaklığı çözüm ağ yapısı bazında karşılaştırılmıştır. Kaba ağ yapısına sahip modelde jetin cama çarptığı bölgenin altında hava dolaşımı nedeniyle oluşan sıcaklık farkı daha fazla olmuştur. Ağ yapısı iyileştirildikçe bu bölgedeki sıcaklığın düştüğü görülebilmektedir. Sıcaklıklar arasındaki fark ağ yapısı iyileştirildikçe azalmakta dolayısıyla yine çözüm ağından bağımsız bir sonuca gidildiği görülebilmektedir.

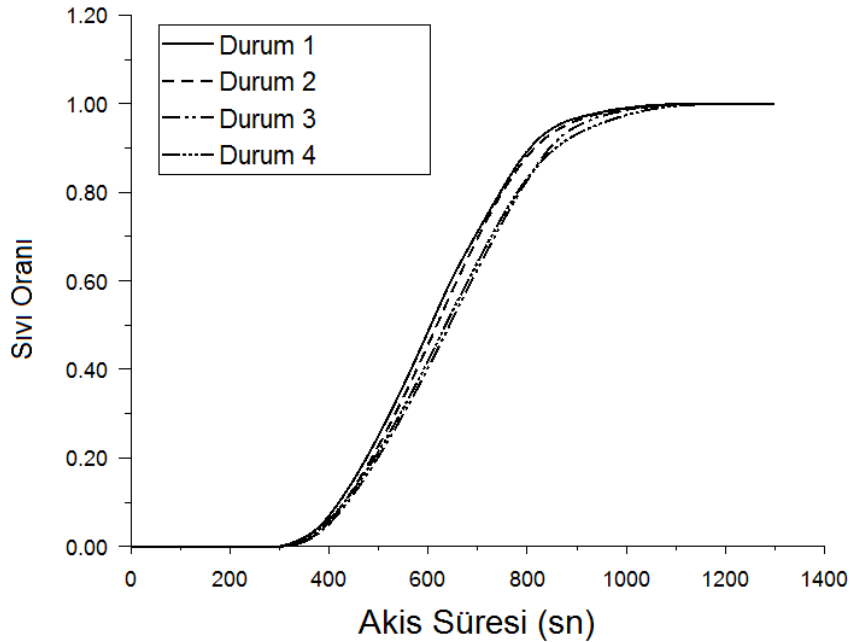


Şekil 6.20 : 10.dk da dört durum için cam yüzeyinden 5mm içerideki hava sıcaklığı.

Şekil 6.21’de aynı şekilde 20 dakika sonunda cam iç yüzey sıcaklıkları karşılaştırılmıştır. Aynı 10 dakika sonundaki gibi sınır tabaka tanımlaması yapılmamış modelde yüzey sıcaklıklarında dalgalanma görülmüştür. Benzer şekilde camın alt bölgelerindeki sıcaklık değeri durum 4’te en düşük değere sahiptir ve 1 nolu durumdan 4 nolu duruma doğru sıcaklık değeri azalmaktadır. Sıcak havanın cama çarptığı bölgeden sonra ise en yüksek sıcaklık 4 nolu durumda elde edilmiştir. Camdan buza doğru olan ısı transferi nedeniyle camın üst kısımlarına doğru ilerledikçe yüzey sıcaklıklarında beklenildiği gibi düşüş görülmüştür.



Şekil 6.21 : 20 dk. da dört durum için cam yüzeyinden 5mm içerideki hava sıcaklığı. Şekil 6.22’de buz erimesindeki farklılıklar gösterilmektedir. Görüldüğü gibi durum 1 ve 2’de kaba ağ yapısı kullanıldığından, sıkı ağ yapısı olan modellere göre farklılaşma söz konusu olmuştur. Durum 3 ve durum 4’de ki farklılaşma çok fazla değildir. Sadece süre ilerledikçe en yoğun ağ yapısına sahip olan 4 numaralı durumda buzun erimesinde yavaşlama görülmüştür.



Şekil 6.22 : Buz tabakasındaki sıvı oranının sayısal çözüm ağına bağlı olarak karşılaştırılması.

Durum 1'den durum 4'e doğru gittikçe sonuçlardaki farklılaşma azalmaktadır. Dolayısıyla durum 4'den daha yoğun bir çözüm ağı kullanılması halinde sonuçlardaki değişim çok çok az ya da dikkate alınmayacak kadar az olacaktır. Hem analizlerin uzun zaman alması ve hem de kullanılan bilgisayarın kapasitesi göz önüne alınarak sonuçlar arasındaki değişim gittikçe azaldığından bu ağ yapısı ile devam edilmesi kararlaştırılmıştır. Çözüm ağından bağımsız sonuçlar elde edildiğinden artık sonuca etki eden diğer parametreler incelenmelidir.

6.3.2 Türbülans modelleri ve çözüme olan etkileri

Türbülans modellerinin çözüme olan etkilerini görebilmek için Realizable k- ϵ , RNG k- ϵ , Standart k-w ve SST k-w modelleri kullanılmıştır. Standart k- ϵ türbülans modeli zamanında akış simülasyonları için en çok kullanılan türbülans modeli olmasından dolayı zayıf yönleri belirlenmiş ve daha gelişmiş olan Realizable ve RNG k- ϵ türbülans modelleri ile bu zayıf yönleri geliştirilmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında Standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmamıştır. Standart k-w türbülans modeli jet akışlar için uygulanabilirliği kanıtlanmış olduğundan çalışma kapsamına alınmıştır.

k- ϵ türbülans modelleri ile birlikte kullanılan duvar fonksiyonları Çizelge 6.4'de listelenmiştir.

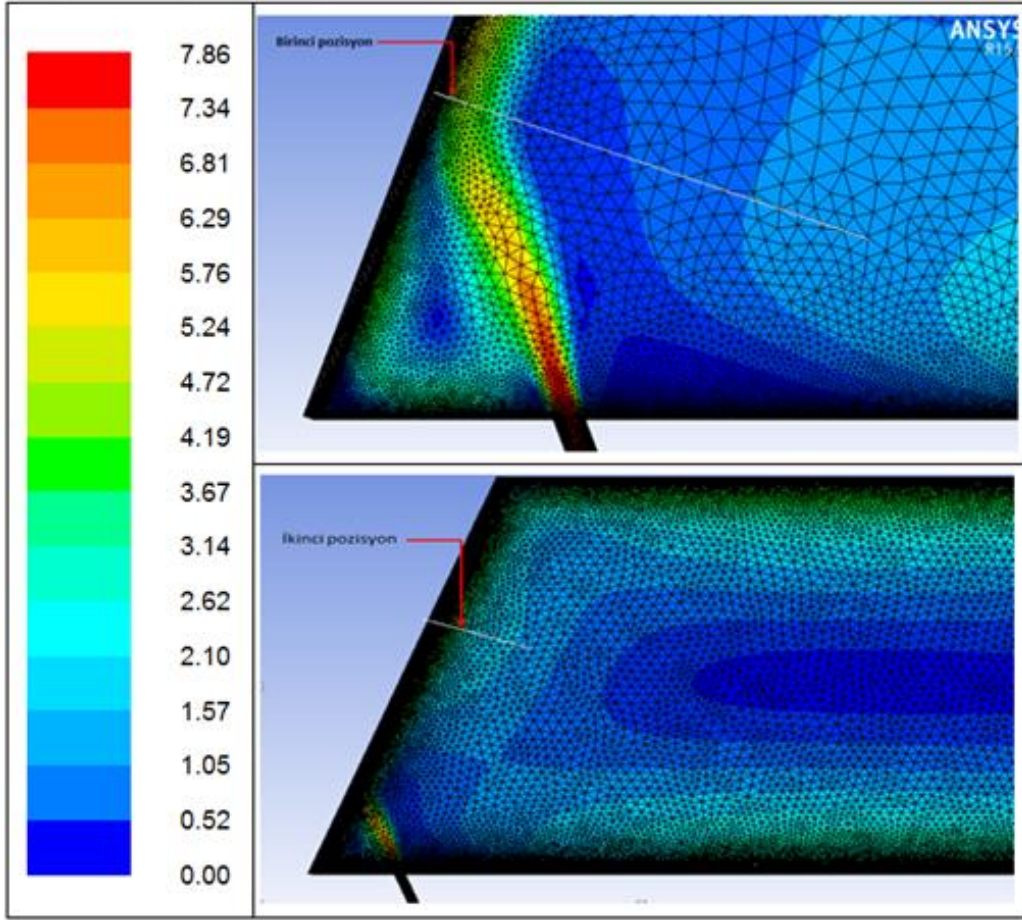
Çizelge 6.4: Türbülans modelleri ve duvar fonksiyonları.

Türbülans Modeli	Duvar Fonksiyonu
Realizable k- ϵ	Enhanced Wall Treatment
Realizable k- ϵ	Scalable Wall Functions
RNG k- ϵ	Enhanced Wall Treatment

Türbülans modelleri her bir ağ yapısı için ayrı ayrı kullanılmış, kararlı halde cama yakın bölgelerdeki hava hızlarına ve zamana bağlı analizlerde cam üzerindeki erimeye olan etkileri karşılaştırılmıştır. Ağ yapısından bağımsız çözüm daha önce elde edildiği için gerekli tüm iterasyonlar 4 numaralı ağ modeli üzerinden yapılmıştır. Yakınsama kriteri $< 10^{-5}$ olarak belirlenmiş ve zamana bağlı analizler 0.1 saniye zaman adımıyla gerçekleştirilmiştir.

Cam iç yüzeyindeki hava hızları, kullanılan türbülans modelinin etkilerini görebilmek için, camın alt ucundan itibaren belirlenmiş 2 farklı lokasyonda karşılaştırılmıştır.

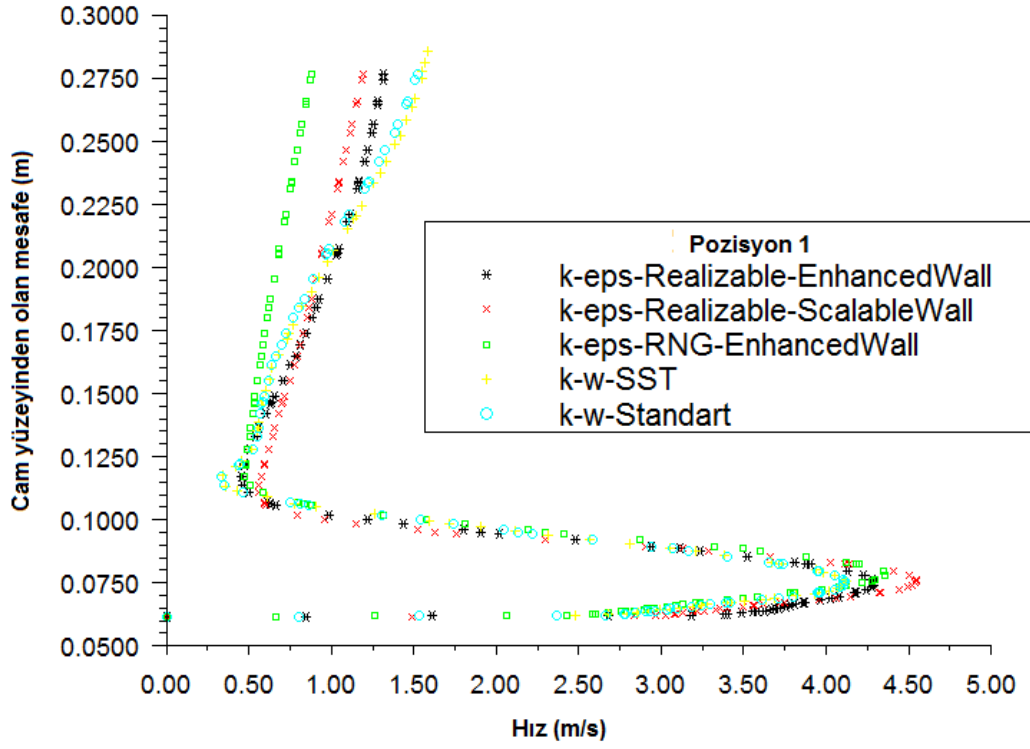
Şekil 6.23’de hava hızlarının karşılaştırıldığı lokasyonlar gösterilmiştir.



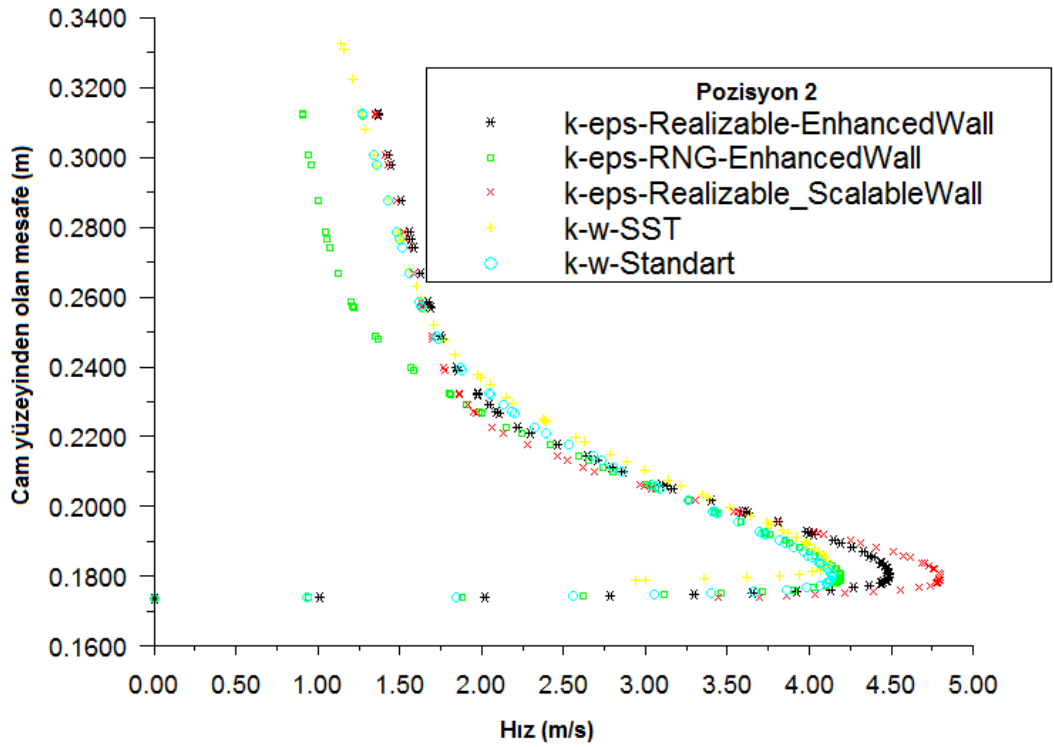
Şekil 6.23 : Cam yüzeyi etrafında hava hızlarının karşılaştırılması için seçilen hatlar.

Cam iç yüzeyi boyunca belirlenen ve cam alt yüzeyinden uzaklıkları farklı olan iki lokasyondaki hız profilleri sırasıyla Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere kullanılan türbülans modeline göre hız büyüklükleri oldukça farklılık göstermektedir. Hız değişimleri dikkatli olarak incelendiğinde maksimum hız değerinin Realizable k- ϵ türbülans modeli ve scalable duvar fonksiyonu ile elde edildiği görülmektedir. Hava jetinin cam yüzeyine çarptığı bölgeden hemen sonra yerleştirilmiş olan 1. pozisyonda cam yüzeyinden uzaklaştıkça k-w türbülans modellerinde farklılaşma görülmüştür. Diğer modellere göre RNG k- ϵ modeli camdan uzak bölgelerde yavaş kalmıştır.

Aynı şekilde 2. pozisyonda cama yüzeyine yakın bölgelerde k- ϵ türbülans modelleri ile daha yüksek hava hızları elde edilmiştir. Bu pozisyonda cam yüzeyinden uzaklaştıkça k- ϵ ile k-w türbülans modelleri birbirine yaklaşmıştır. Ancak RNG modelinde camdan uzak bölgelerde hava hızları diğer modellere göre daha düşüktür.

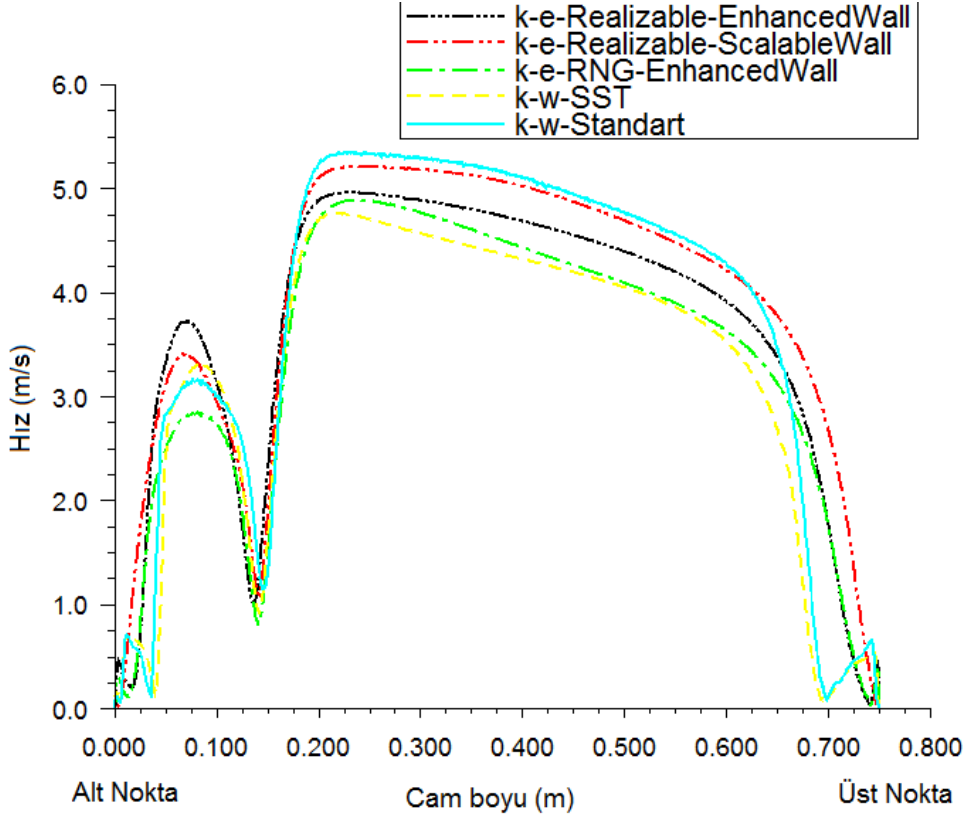


Şekil 6.24 : Cam alt yüzeyinden 150 mm yukarıdaki hava hızlarının türbülans modelleri ile karşılaştırılması.



Şekil 6.25 : Cam alt yüzeyinden 250 mm yukarıdaki hava hızlarının türbülans modelleri ile karşılaştırılması.

Cam iç yüzeyinden 5 mm içeride ve cama paralel uzanan hat boyunca hız değerleri karşılaştırıldığında durum Şekil 6.26'daki gibi olmaktadır.

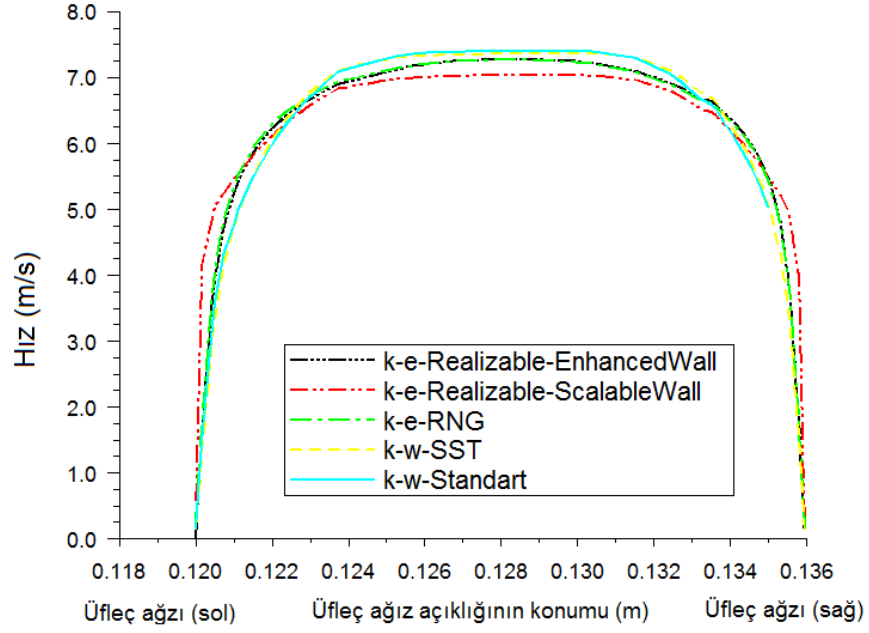


Şekil 6.26 : Cam yüzeyinden 5 mm içeride hava hızlarına türbülans modelinin etkisi.

Hız profillerine bakacak olursak SST k-w türbülans modelinde cam yüzeyinden ayrılma diğerlerine göre daha erken olmuştur. Çarpma noktasından yukarı doğru baktığımızda cam iç yüzeyi civarında en yüksek hava hızları Standart k-w türbülans modeli kullanıldığında elde edilmiştir. RNG k-ε ve Realizable k-ε modellerinde cam üst yüzeyinden ayrılma hemen hemen aynı hava hızlarında olsa da hava jetinin cama çarpma noktası ile cam alt noktası arasında RNG k-ε türbülans modeli ile elde edilen hava hızları diğer modele göre nispeten daha düşük kalmıştır.

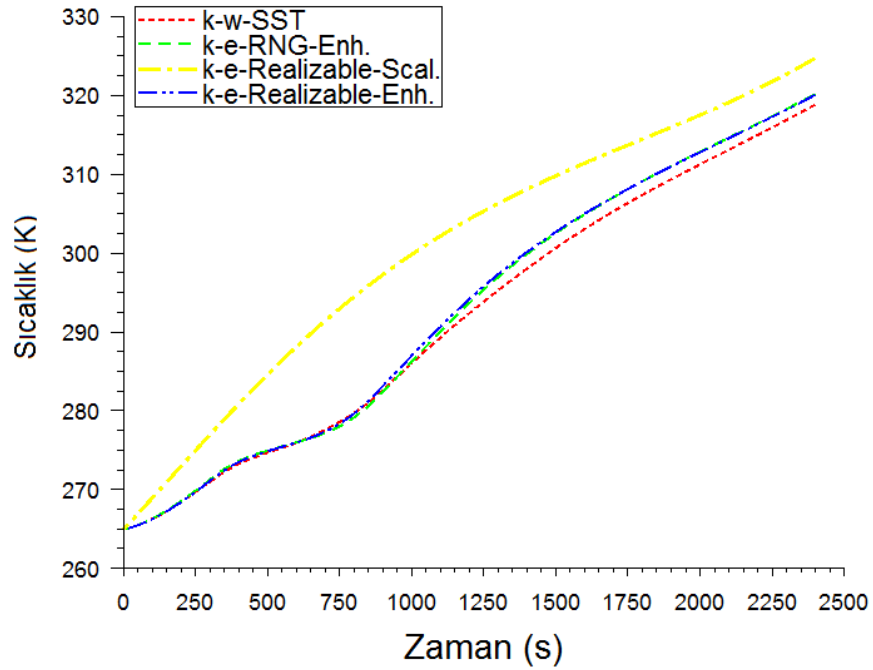
Kullanılan türbülans modelinin, hava jetinin üfleç ağzındaki hız profiline etkisi olup olmadığı da kontrol edilmiştir. Her ne kadar üfleç kesiti sabit olsa da sabit debi giriş şartı kullanılmasından dolayı elde edilen maksimum hava çıkış hızlarında farklılık vardır. Kullanılan türbülans fonksiyonları farklı olduğundan hız profillerinde farklılık oluşmuştur.

Şekil 6.27'de üfleç çıkışındaki hava hızlarındaki farklılıklar türbülans modelleri dikkate alınarak gösterilmiştir.



Şekil 6.27 : Üfleç çıkışındaki hız profilinin türbülans modelleri ile karşılaştırılması.

Kararlı hal analiz sonuçlarından sonra zamana bağlı iterasyonlar irdelenmiştir. Aynı sıcaklık giriş şartı kullanılmasına rağmen cam iç yüzeyinin ısınma davranışı modeller arasında farklılıklar göstermiştir. Bu farklılık Şekil 6.28’deki gibidir.

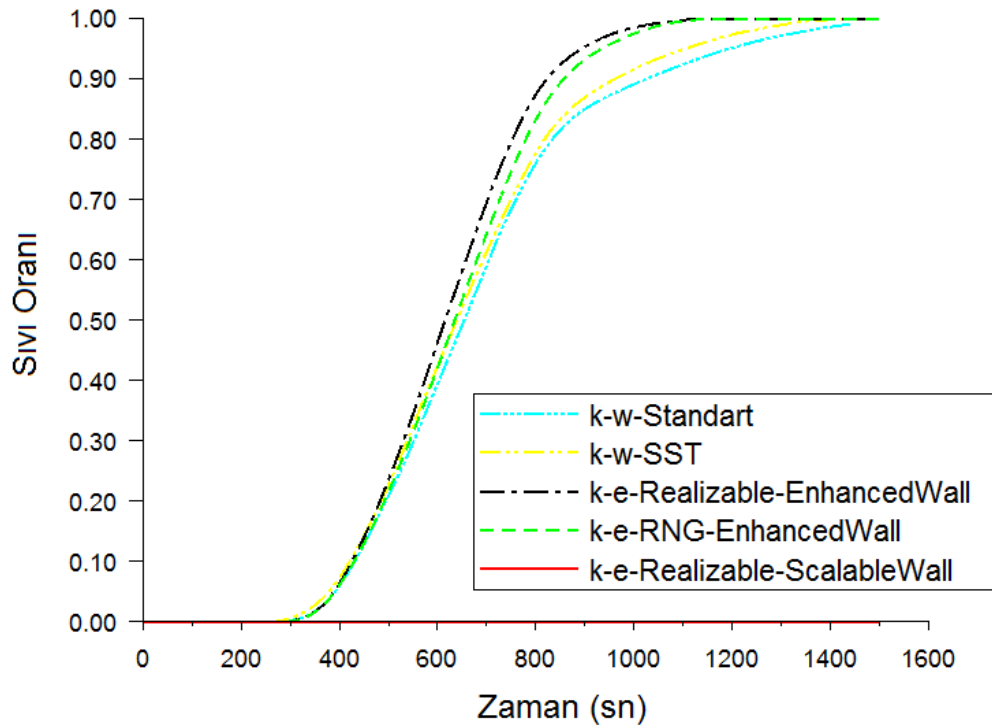


Şekil 6.28 : Cam iç yüzey sıcaklık artışının türbülans modelleriyle karşılaştırılması.

Sonuçları incelediğimizde “Scalable Wall Functions” kullanıldığında cam iç yüzey sıcaklığının diğer türbülans modellerinde bariz şekilde farklılaştığını görmekteyiz.

Onun dışında RNG k- ϵ ile Realizable k- ϵ (Enhanced Wall) arasında çok ufak bir fark olduğu gözlemlenmiştir. k-w SST türbülans modelinde ise cam yüzeyinin ısınması diğer modellere göre daha yavaş olmuştur.

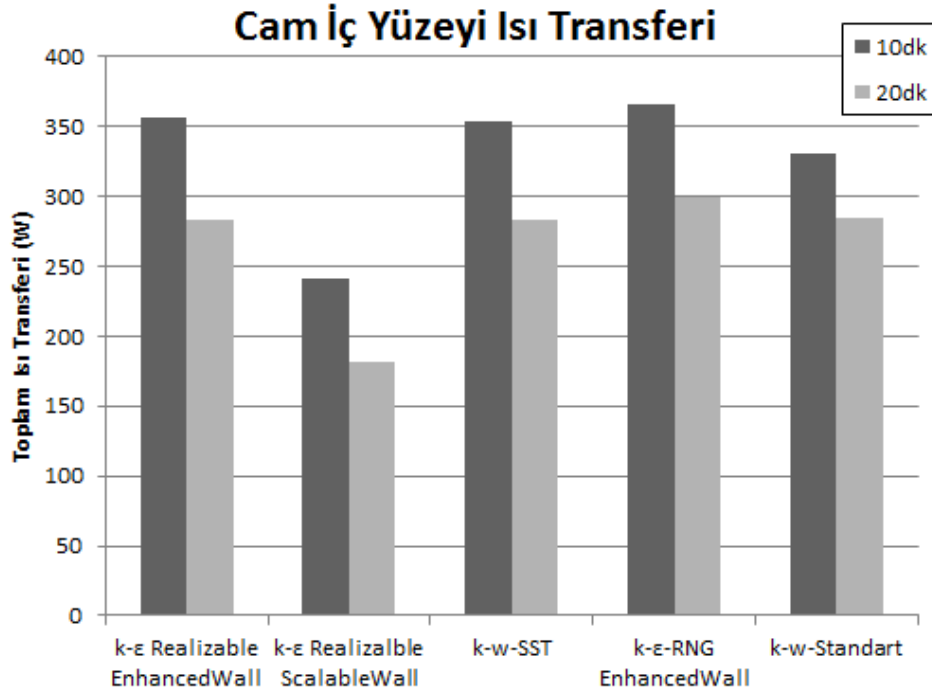
Zamana bağlı cam dış yüzeyindeki buzun erimesini incelediğimizde standart k-w türbülans modelinde erime diğer modellere göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Zaten cam iç yüzeyindeki sıcaklık artışının yavaş olması neticesinde buzun daha uzun sürede erimesi beklenen bir durumdur ve Şekil 6.29'da da bu durum net olarak görülebilmektedir.



Şekil 6.29 : Buz tabakasındaki sıvı oranının türbülans modelleri ile karşılaştırılması.

Başlangıçta buz tabakası içerisindeki sıvı oranı sıfırdır ve zaman ilerledikçe artan cam yüzey sıcaklığına bağlı olarak buz erimekte ve sıvı oranı bu tabaka içerisinde 1 değerine ulaştığında buz tamamen erimiş olmaktadır. Şekil 6.29'u daha detaylı incelediğimizde SST k-w modelinde çözünme daha geç olsa da erimenin diğer modellere göre daha önce başladığı görmekteyiz. RNG k- ϵ ve Realizable k- ϵ (Enhanced Wall) modelleri ile birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Erimenin zamanla değişimini incelediğimizde ilginç bir şekilde "Scalable Wall Function" kullanılması halinde k- ϵ türbülans modelinde faz değişimi gerçekleşmemiştir. Cam iç yüzeyindeki sıcaklık buzun erimesi için yeterli olan değere çıksa da cam boyunca iletim bu modelde oluşturulamadığından faz değişimi gözlemlenmemiştir.

Şekil 6.30'da 10 dakika ve 20 dakika sonunda cam iç yüzeyi boyunca olan ısı transferi miktarları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Enhanced Wall duvar fonksiyonu kullanılan k-ε türbülans modellerinde toplam ısı transferleri her iki zaman aralığı içinde birbirine çok yakındır. Buzun zamana bağlı erime grafiğini (Şekil 6.29) incelediğimizde zaten 10. dakikadaki sıvı yüzdeleri bu iki model ve SST k-w için hemen hemen aynıdır. Dolayısıyla bu 3 model için toplam ısı transfer miktarının da aynı olması beklenmektedir. 20 dakika sonunda ise hem buz miktarının büyük kısmı çözüldüğünden erime gizli ısıısının azalmış olması hem de üflenen hava sıcaklığı ile cam yüzey sıcaklığı arasındaki farkın azalması nedeniyle toplam ısı transferi azalmıştır.

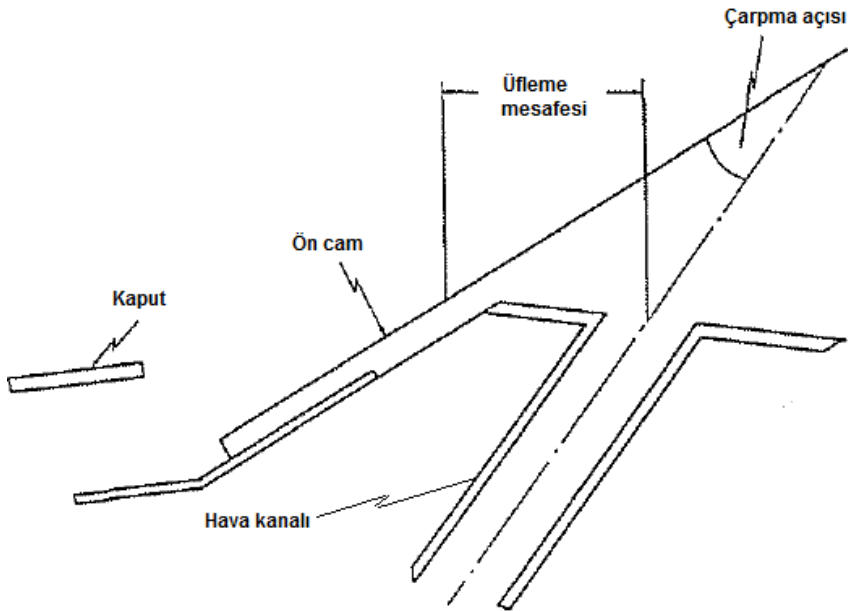


Şekil 6.30 : 10 dk. ve 20 dk. sonunda cam iç yüzeyi boyunca toplam ısı transferi.

Burada Scalable k-ε türbülans modelinde diğer modellere göre daha düşük bir ısı transferi gerçekleştiği görülmektedir. Cam iç yüzey sıcaklığı diğer modellere göre daha hızlı arttığından hava ile cam yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı hızlı şekilde kapanmakta ve cam iç yüzeyinden ısı geçişi azalmaktadır. İlginç şekilde Realizable k-ε scalable wall türbülans modelinde cam dış yüzeyinden buza doğru bir ısı transferi sıfırdır. Bu nedenle buz hiç erimemiş olarak gözükmemektedir. Gerçekte cam yüzey sıcaklığı artarken buzun erimemesi imkansız olduğundan bu türbülans modelinin faz değişimi modellemesinde kullanılamayacağı anlaşılmıştır.

6.3.3 Hava çarpma açısının ve üfleme mesafesinin çözüme olan etkisi

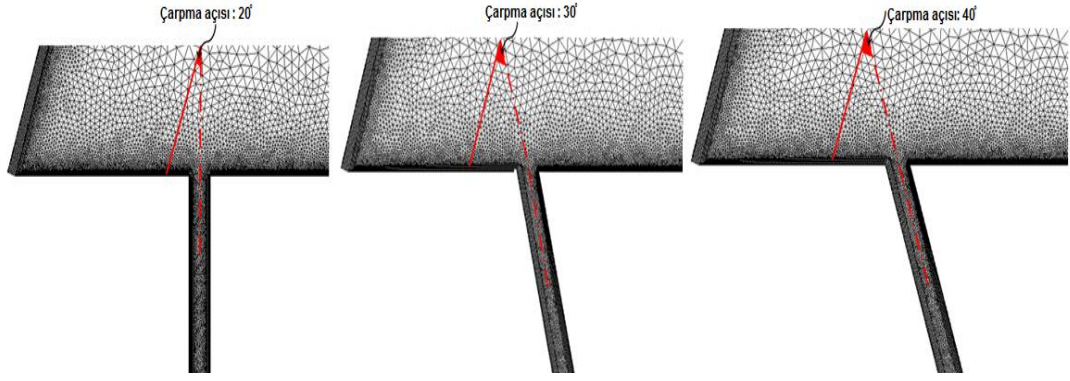
Hava kanalı ile ön cam arasındaki konum ilişkisi araç buz çözme performansı açısından büyük öneme sahiptir. Hava çıkışı ile ön cam arasındaki mesafe yani üfleme mesafesi ve hava jetinin cama çarpma açısı bu performansa etki eden en büyük parametrelerdendir. Şekil 6.31’de şematik olarak hava kanalının ön cam ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Burada cam ile üfleç arasındaki mesafenin yani üfleme aralığının çok fazla olması durumunda camın alt kısımlarında yetersiz çözünme elde edilir. Çünkü bu mesafe arttıkça hava jeti cama daha yukarı bir mesafeden çarpar ve çarpma noktasının alt kısmında yeteri miktarda girdap oluşmaz ise buzun erimesi yavaşlar. Havanın çarpma açısının büyümesi ise cam yüzeyine havanın daha iyi tutunmasını sağlar ve yüksek buz çözme performansı elde edilmesine neden olur.



Şekil 6.31 : Üfleç ile ön cam arasındaki ilişki[36].

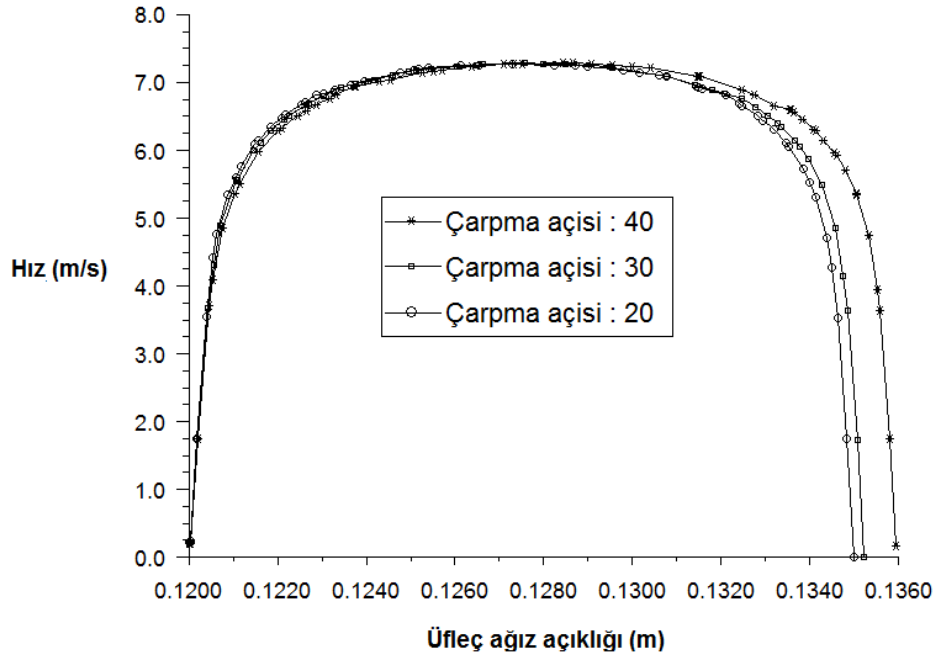
Sayısal çözüm ağı yapısının ve türbülans modelinin hava hızlarına ve buzun erimesine olan etkisini karşılaştırırken sabit 70° hava giriş açısı kullanılmıştır. Camın eğiklik açısı göz önüne alınırca çarpma açısı 20° ’dir. Çarpma açısının çözüme olan etkisini kıyaslamak için 70° , 80° ve 90° hava giriş açıları kullanılmıştır. Karşılaştırma yapılırken RNG k- ϵ türbülans modeli üzerinden gidilmiş ve zamana bağlı çözümlerde 0.1 saniye zaman adımı kullanılmıştır.

Şekil 6.32’de 3 farklı çarpma açısı tanımlaması yapılmıştır. Üfleme açısı 70° , 80° ve 90° iken çarpma açıları sırasıyla 40° , 30° ve 20° ’dir.



Şekil 6.32 : Analizlerde kullanılan hava jeti çarpma açıları.

Şekil 6.33’de farklı açılarda duran üfleçlerin çıkışındaki hız profilleri karşılaştırılmıştır. Üfleç açısı yatay ile 70^0 olan (çarpma açısı 40^0) modelde üfleç ağzındaki hız profili daha geniştir. Üflecin yatay ile yaptığı açı arttıkça (çarpma açısı daraldıkça) üfleç ağzındaki hız profili de daralmaktadır. Ancak beklendiği üzere hava hızları kesit ve debi değişmediğinden aynı kalmıştır, sadece açığa bağlı hız profilinin yapısı değişmektedir.

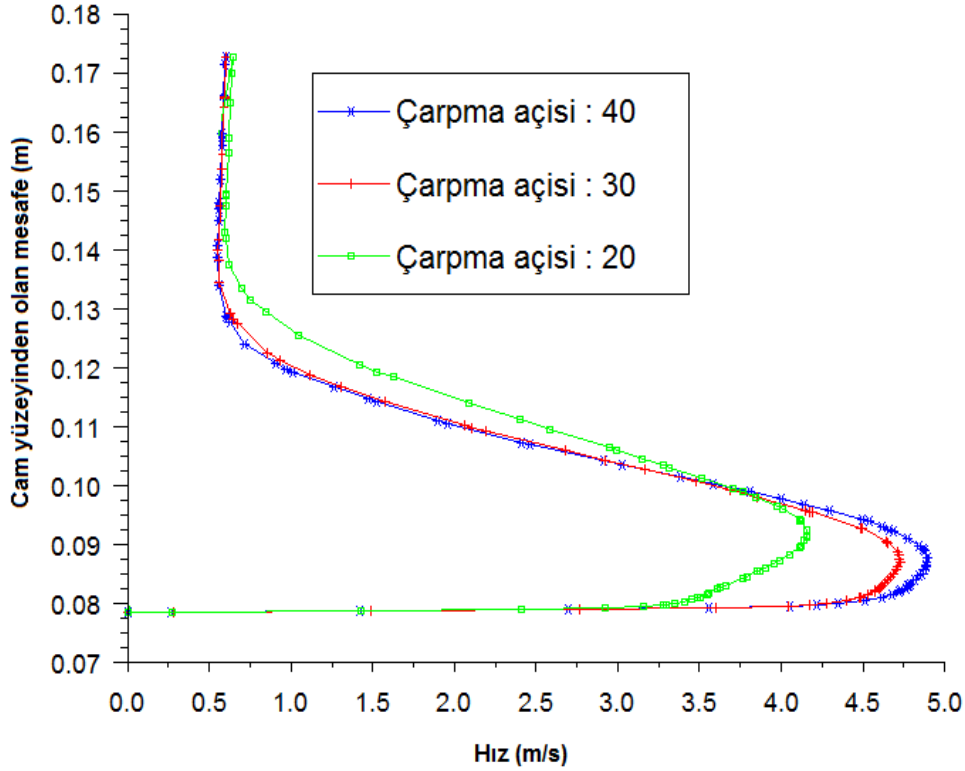


Şekil 6.33 : Farklı üfleç açıları için üfleç çıkışındaki hava hızları.

Farklı çarpma açılarına istinaden ön cam yüzeyindeki hava hızları arasında karşılaştırma yapıldığında, cam yüzeyindeki dağılımının farklı olduğu görülecektir.

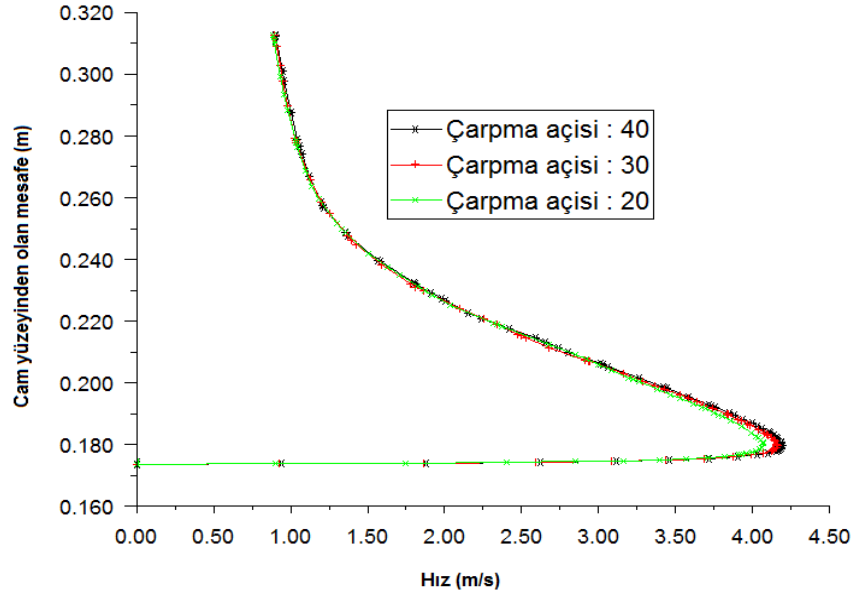
Daha önceki bölümlerde Şekil 6.23 ile tanımlanan cama dik pozisyonlardaki hava hızları da farklı çarpma açıları için karşılaştırılmıştır. Şekil 6.34’de birinci pozisyon

için hava hızlarını gösterilmiştir. Çarpma açısı daraldıkça havanın cam yüzeyine çarptığı nokta yukarı doğru kaymaktadır. Yani giriş açısı dikleştikçe hava jeti cama daha üst bir noktada ilk olarak temas etmektedir. Dolayısıyla ilk olarak cam yüzeyine çarpma açısı 40^0 olan hava jeti ve son olarak ise 20^0 açığa sahip hava jeti temas edecektir. Görüldüğü üzere yüksek çarpma açısına sahip hava jetinde cama yakın bölgelerde hava hızları diğerlerine göre daha fazla iken camdan uzaklaştıkça düşük çarpma açısına sahip hava jetinin hızı daha fazla olmaktadır. Camdan yüzeyinden yeterli mesafe uzaklıkta hız değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Bu sonuçtan yüksek çarpma açısına sahip hava jetinin cama daha alt seviyeden tutunduğundan daha iyi ısı taşımına ve dolayısıyla daha iyi buz çözme etkisine sahip olacağı çıkarılabilir. Ayrıca cama yakın bölgedeki hava hızlarının yüksek çarpma açılarında daha fazla olduğu görülmüştür.



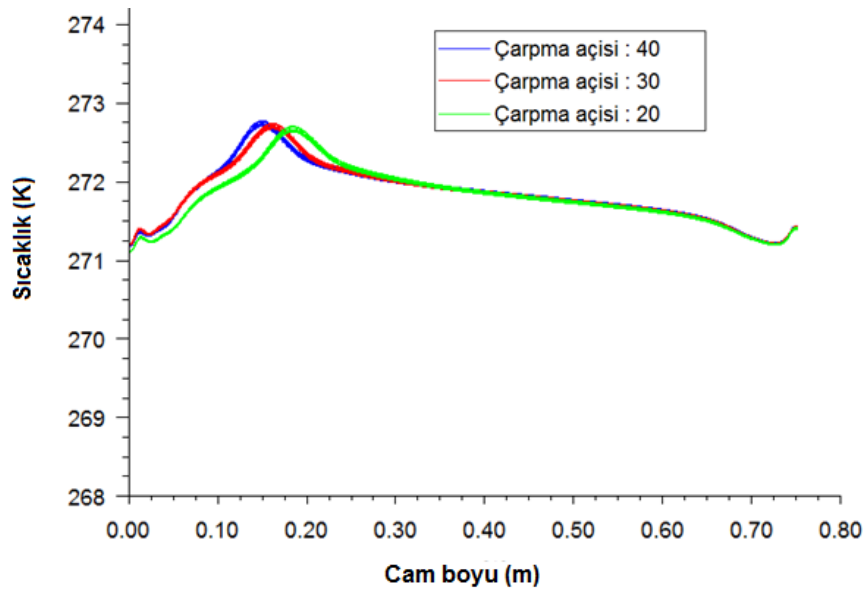
Şekil 6.34 : Cam yüzeyine dik hat boyunca hava hızlarının farklı çarpma açıları için karşılaştırılması – 1. pozisyon.

İkinci pozisyondaki hava hızlarını incelediğimizde çok fazla bir fark olmadığını görmekteyiz. Sınır tabakanın gelişmesi için yeterli uzaklıktaki bir pozisyonda karşılaştırma yapıldığından bu beklendik bir durumdur. Şekil 6.35'de bu durumu destekler niteliktedir.



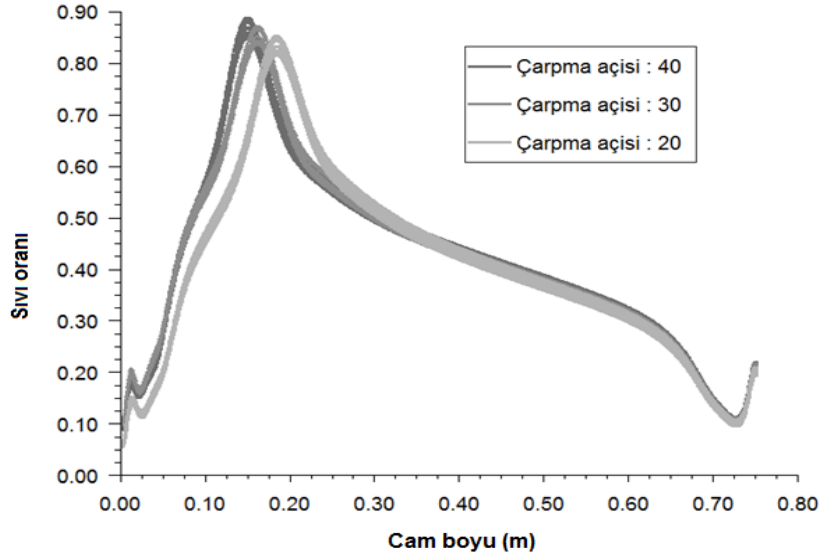
Şekil 6.35 : Cam yüzeyine dik hat boyunca hava hızlarının farklı çarpma açıları için karşılaştırılması - 2. pozisyon.

Çarpma açısının değişimi buzun erimesine ve ısıl denge üzerine de etkisi vardır. Şekil 6.36'da analizin 10. dakikasında buz tabakası içerisindeki ortalama sıcaklık değeri görülmektedir. Cam ve buz tabakasındaki en yüksek sıcaklık, ortam havasından ve buz tabakası sıcaklığından daha yüksek olan üfleme havasının cam yüzeyine temas ettiği bölgede olacaktır. Düşük çarpma açılarında camın üst noktasında ilk temas gerçekleştiğinden maksimum sıcaklık değeri camın daha üst noktasında elde edilir.



Şekil 6.36 : Farklı çarpma açıları için 10.dk'da buz tabakasının ortalama sıcaklığı.

Şekil 6.37’de analiz 10. dakikasında buz tabakası içerisindeki sıvı oranları farklı çarpma açıları için görülmektedir. Sıcaklık dağılımına paralel olarak düşük çarpma açısında erime, yüksek çarpma açısına göre cam yüzeyinin daha yukarı seviyesinden başlamıştır.



Şekil 6.37 : Farklı çarpma açılarındaki 10 dk. sonunda buz tabakasındaki sıvı oranı.

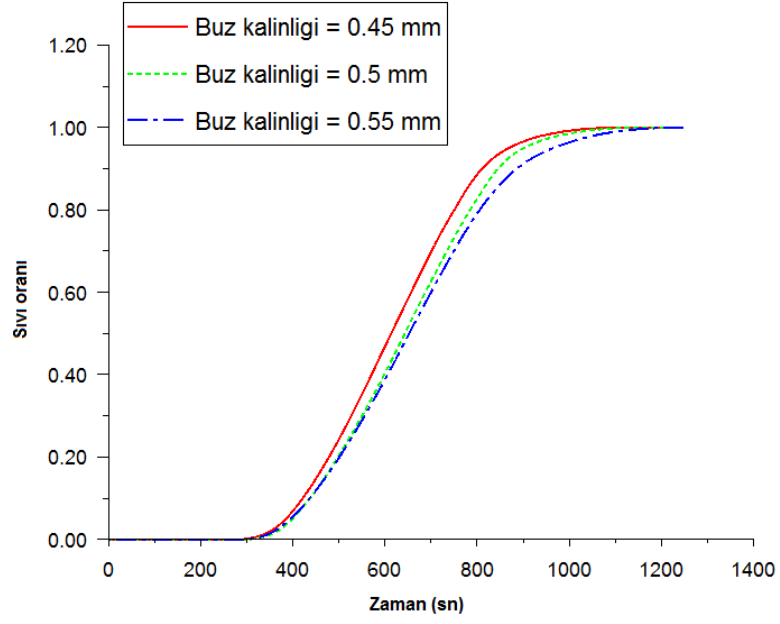
6.3.4 Cam üzerindeki buz kalınlığının çözüme olan etkisi

Kışın soğuk ortam koşullarında araç ön camlarında buzlanma görülebilmektedir. Aracın soğuk ortamda park halinde bekleme süresi ve ortam şartına bağlı olarak cam yüzeyindeki buz tabakasının kalınlığı değişkenlik gösterebilir. Kalorifer sisteminin sürüş güvenliği açısından cam yüzeyindeki buzlanmayı etkili şekilde çözmesi gerekmektedir. Araç üzerinde yapılan testlerde ise uluslararası bir standart sağlayabilmek adına test şartnameleri yazılmış ve bu şartnamelerde cam yüzeyine ne miktarda su sıkılması gerektiği belirtilmiştir. Ancak gerçek yaşamda durum farklılık göstermekte ve cam yüzeyinde testte simüle edilen şartlardan daha kötü veya daha iyi durum ortaya çıkabilmektedir.

Bu bölümde cam yüzeyinde oluşan buz tabakası kalınlığının çözüme etkisi parametrik olarak incelenecektir. Daha önce yapılan karşılaştırmalarda 0.5 mm buz kalınlığı kullanılmıştır. Bu kısımda 0.55 mm ve 0.45 mm buz kalınlıkları için çözümler karşılaştırılacaktır.

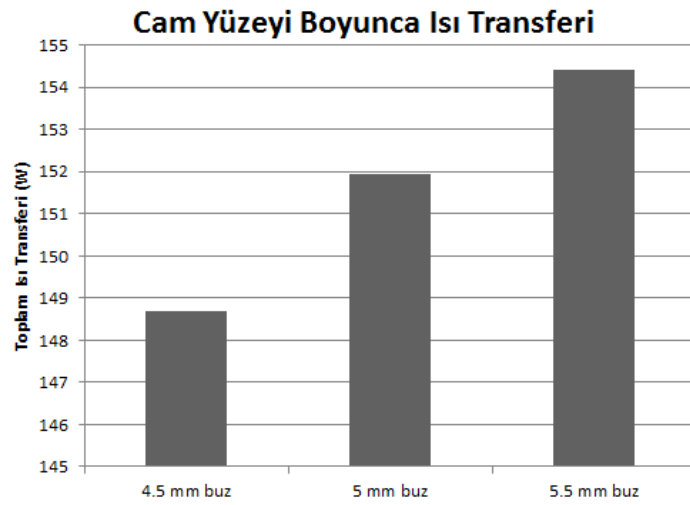
Buz kalınlığının kabin içerisindeki hava akışına bir etkisi olmayacaktır. Sadece ön cama üflenen sıcak havadan buza doğru olan ısı transferi nedeniyle erime zamanına

bağlı olarak değişecektir. Buz tabakası içerisindeki sıvı oranının zamana bağlı değişimi her bir kalınlık için karşılaştırılmış ve Şekil 6.38’de paylaşılmıştır.



Şekil 6.38 : Farklı buz kalınlıkları için sıvı oranının zamana bağlı değişimi.

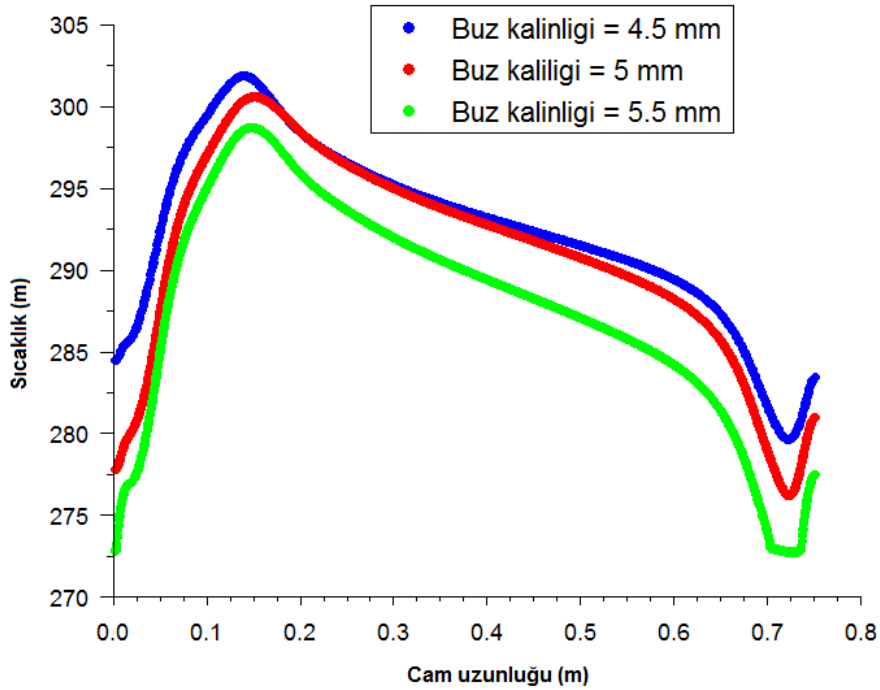
Görüldüğü gibi buz hacmi fazla olan modelde erime diğerlerine göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Cama üflenen havanın sıcaklığı diğer modeller ile aynı olduğundan, havadan cama ve dolayısıyla camdan buza doğru geçen ısı miktarı farklı olacaktır. Çünkü buzun erimesi için gereken toplam ısı miktarı kalın tabaka için daha fazla olacaktır. Şekil 6.39’da camdan buza doğru olan anlık ısı miktarı görülmektedir. İnce buz tabakasının erimesi için gereken ısı miktarının en az olduğu bu grafikte açıkça görülmektedir.



Şekil 6.39 : Farklı buz kalınlıklarında cam yüzeyi boyunca gerçekleşen ısı transferi.

Kalorifer üfleme sıcaklığı her modelde aynıdır ancak cam dış yüzey sıcaklığı üç farklı buz kalınlığı için farklı olacaktır. Bu nedenle cam iç yüzeyinde taşınım ve cam boyunca buza doğru iletim ile ısı transfer miktarında böyle bir farklılık olması doğaldır.

Buz tabakasının kalınlığı arttıkça buzun ortalama sıcaklık değeri düşmeye başlayacaktır. Kalın buz tabakası olan modelde buzun erimesi için harcanan toplam gizli ısı miktarı fazla olacağından buz içerisindeki ortalama sıcaklık kalınlıkla ters orantılı olmalıdır. Şekil 6.40'da da bu durum görülebilmektedir. Ortalama buz sıcaklığı 20 dakika sonunda incelenmiş ve kalın buz tabakasına sahip modelde daha düşük bir sıcaklık elde edilmiştir.



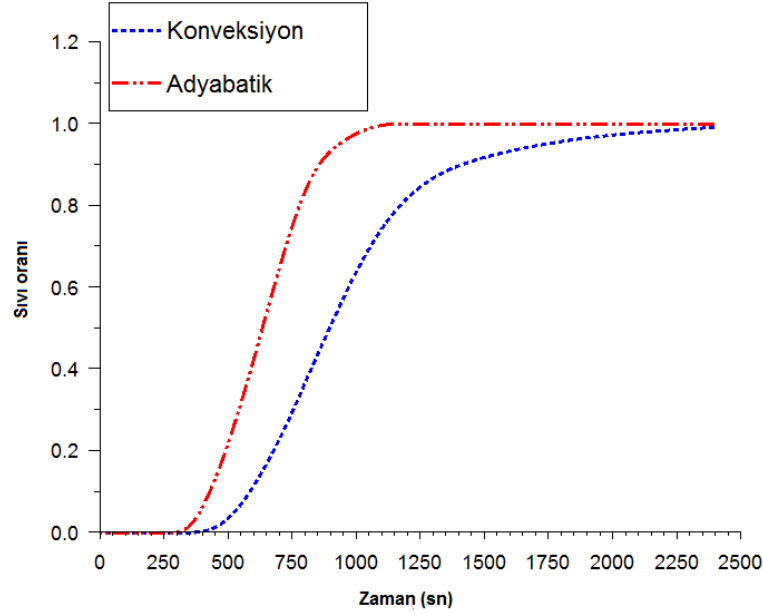
Şekil 6.40 : Farklı buz kalınlıklarında 20 dk sonunda buz içindeki sıcaklık dağılımı.

6.3.5 Duvarlarda taşınım sınır şartının kullanılması ve çözüme olan etkisi

Araçların buz çözme performansı incelenirken sadece kalorifer sisteminin erime açısından yeterli olup olmadığı değerlendirilmesi yapılır ve çözünmeyi olumlu/olumsuz yönde etkileyecek faktörler test sırasında minimize edilir. Bunlardan birisi de ön cam ve kabin etrafındaki hava hızlarıdır. Genel olarak soğuk oda testleri sırasında araç önündeki rüzgâr tünel ağzı kapatılır ve hava akışı sıfırlanır. Ancak bazı rüzgâr tünellerinde ortam sıcaklığını -8°C ve -18°C 'de sabit tutabilmek için tünel ağzı açık tutulur ve ortamı şartlandırmayı sürdürmek için 5 m/s hızlarında hava

dolaşımı sağlanır. Rüzgâr faktörünün buzun erimesi üzerindeki etkisi bu kısımda incelenmiştir.

Şekil 6.41’de adyabatik sınır şart ile taşınım sınır şartı karşılaştırılmıştır. Taşınım olduğunda buzun erimesi için gereken sürenin arttığı net bir şekilde görülebilmektedir. Kabin içerisindeki ısı, aracın çeperlerinde soğuk ortama doğru akmakta ve kabin içerisindeki ısı birikimi azaldığından erime yavaşlamaktadır.



Şekil 6.41 : Yan duvarlarda taşınım ve adyabatik sınır şartının erimeye olan etkisi.

Hava için zorlanmış taşınım 10-1000 W/m²K arasında değişmektedir. Isı taşınım katsayısının farklı hava hızları ve sıcaklıkları için Nusselt sayısı yardımı ile hesaplanır. Kabin yan duvarları etrafında 5 m/s hava hızını düşünecek olursak Re sayısı hesaplandığında kabin etrafında türbülanslı akış olduğu görülür. Düz levha üzerinde türbülanslı akış için yerel Nusselt sayısı denklem (6.8) yardımı ile hesaplanabilir. Hava için atmosfer basıncında termodinamik özellikleri Ek B’deki tablodan alınmıştır.

$$Nu_x = 0.0296 * Re_x^{\frac{4}{5}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad 0.6 < Pr < 60 \quad (6.8)$$

Prandtl sayısı ve Reynolds sayısına göre hesaplanan Nusselt sayısı kullanılarak ortalama taşınım katsayısı eşitlik (6.9) kullanılarak hesaplanır.

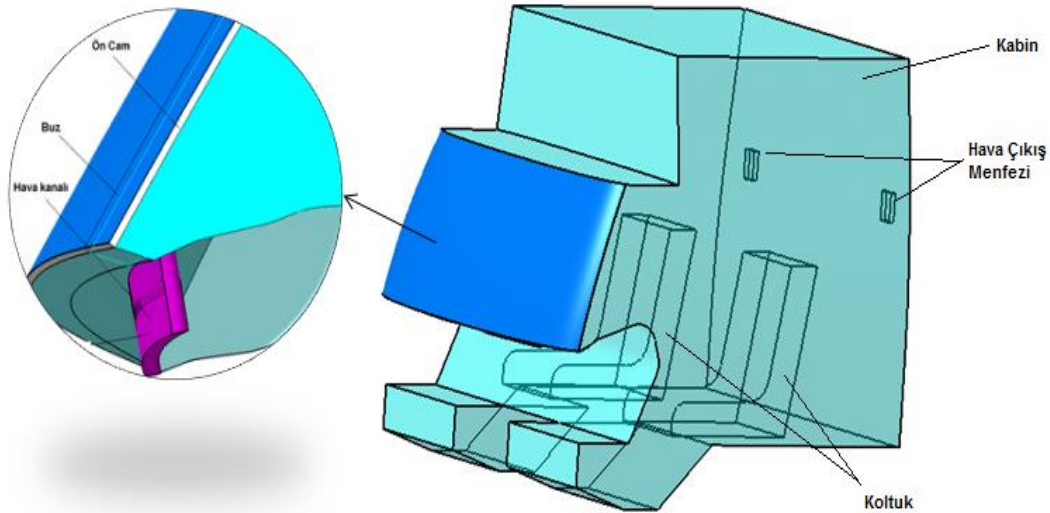
$$Nu_x = \frac{h * L}{k} \quad (6.1)$$

Kabin yan duvar uzunluğu (L) ve Ek B'den okunan iletim katsayısı kullanılarak (6.8) denkleminde hesaplanan Nusselt sayısı yardımı ile duvarlarda taşınım katsayısı $16.13 \text{ W/m}^2\text{-K}$ olarak bulunur. Böylece analizde kabin yan duvarları için 265 K ve $16.13 \text{ W/m}^2\text{-K}$ taşınım katsayısı kullanılmıştır.

6.4 Üç Boyutlu Modelin Oluşturulması

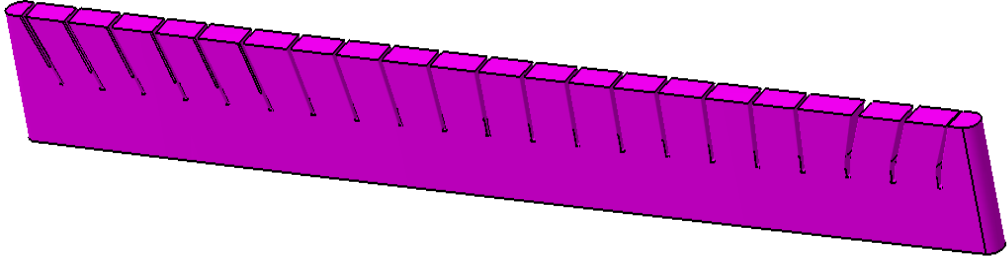
6.4.1 Üç boyutlu modelin geometrik yapısı

Bu bölümde ön cam çevresindeki hava jetinin akış karakteristikleri ve cam dış yüzeyi üzerinde bulunan buz tabakasının zamana bağlı erimesi 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 6.42'de basitleştirilmiş model görülmektedir. Modelde ön cam, buz tabakası, üfleç, hava tahliye açıklığı ve koltuk bulunmaktadır. Analizler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak momentum ve süreklilik denklemi kararlı halde ve izotermal olarak çözümlenmiş, cam etrafındaki ve kabin içerisindeki hava hızları ve akış karakteristikleri ortaya konmuştur. Daha sonra zamana bağlı olarak, enerji denklemi de devreye girerek çözümlenmiş, cam yüzeyinden buza olan ısı transferi neticesinde buzun erimesi incelenmiştir. İki boyutlu analizlerde olduğu gibi üflenen havanın sıcaklığı için Ek A'daki fonksiyondan yararlanılmış ve buz kalınlığı tüm analiz boyunca sabit kalmıştır. Zamana bağlı erime buz hacmi içerisindeki sıvı oranı dikkate alınarak incelenmiştir.



Şekil 6.42 : Üç boyutlu modelin genel görünümü ve modelde kullanılan temel elemanlar.

Modelde kullanılan hava kanalının yapısı oldukça önemlidir. Kabin içerisinde ve ön cam yüzeyindeki akışı sürükleyecek olan üfleç havasıdır ve bu yüzden üfleç olabildiğince gerçeğe yakın modellenmelidir. Şekil 6.43’de üfleç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6.43 : Üç boyutlu modelde kullanılan üfleç geometrisi.

Üfleç modeli gerçek araç üzerindeki parçadan yola çıkarak oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada yan cam buz çözme performansının incelenmemesine karar verildiğinden modele yan cam üfleçleri eklenmemiştir. Yan cam performansının incelenmesi durumunda hava kanalının yapısı karmaşıklaşacak ve cam yüzeyleri üzerine buz tabakası modellemesi yapılacağından çözüm süresi uzayacaktır. Bu yüzden model sadece ön cam buz çözme performansı incelenecek şekilde hazırlanmıştır.

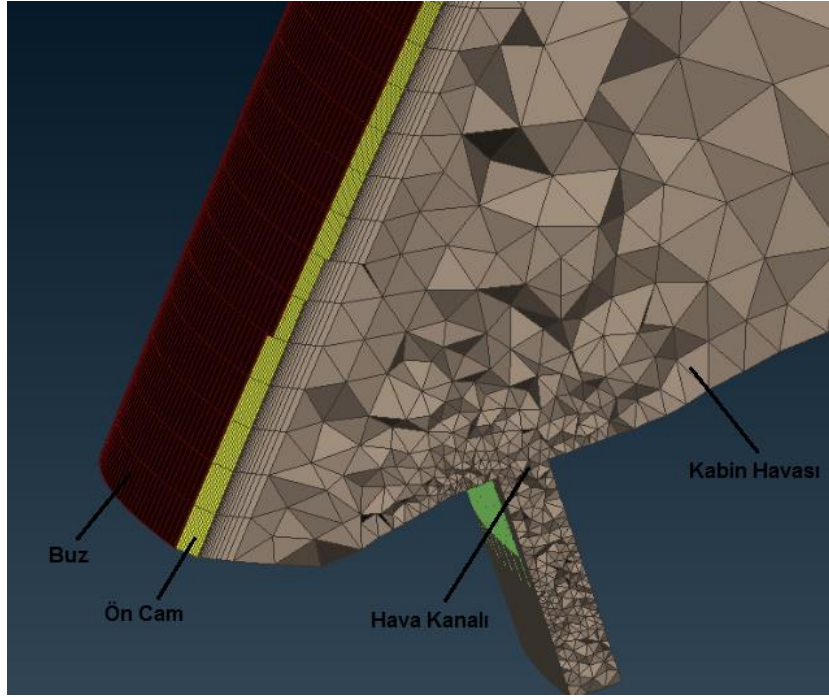
Kabin içerisindeki hava akışını bozan en önemli parçalar koltuklardır. Cam yüzeyi boyunca yukarı tırmanan ve camdan ayrıldıktan sonra kabin arkasına doğru yönlenecek havanın bir kısmı koltuk engeline takılarak sirkülasyona neden olmaktadır. Bu etkiyi görebilmek için basit koltuk modelleri kullanılmıştır. Detaylı koltuk yüzeyleri kullanılması hem fazla çözüm elemanı elde edilmesine hem de analizlerin yoğunluk nedeniyle yavaşlamasına neden olacaktır. Bu yüzden detaylı bir koltuk modeli oluşturulmamıştır. Sadece kullanılan araçtaki koltuk ebatları dikkate alınmış ve koltuk yüzeyindeki detaylar ihmal edilmiştir.

Analizler sırasında kullanılan bilgisayarın kapasitesi nedeniyle kabin orta ekseninden simetrik kabul edilip yarım modele düşürülmüştür. Literatür araştırması sırasında benzer çalışmalarda kabin içerisinde sürücü tarafında bulunan direksiyon ve ön konsol yapısındaki farklılıkların erimeye olan etkisinin ihmal edilebileceği gösterilmiştir. Bu nedenle bu tez kapsamında da yarım model kabulü yapılmasında problem yoktur. Yolcu tarafındaki üfleç modellenmiş ve sürücü tarafında simetrik olduğu kabul edilmiştir.

6.4.2 Üç boyutlu modelde kullanılan sayısal çözüm ağı

Üç boyutlu analizlerde Ansys'in kendi içerisindeki ağı oluşturma özelliği yerine ANSA 15.0.2 programı kullanılmıştır. Bu programda yerel olarak bozuk ağı elemanları üzerinde çalışma yapılabilen ve daha hızlı çözüm ağı oluşturulabilmektedir. Ayrıca "skewness", "aspect ratio" gibi önemli parametreler bu programda kolayca düzeltilebildiğinden ANSA programının kullanılması tercih edilmiştir.

Cam ve buz tabakaları prizmatik elemanlar ile oluşturulmuştur. Buz tabakası kalınlığı boyunca 5 eşit, cam tabakası ise 10 eşit katmana ayrılmıştır. Ayrıca cam ve buz tabakasının ağı yapıları birbirine eşleştirilmiştir. Geriye kalan kabin havası için ise üçgen eleman kullanılmıştır. Şekil 6.44'de katı modelleme sonrasındaki hacimsel çözüm ağı görülmektedir.

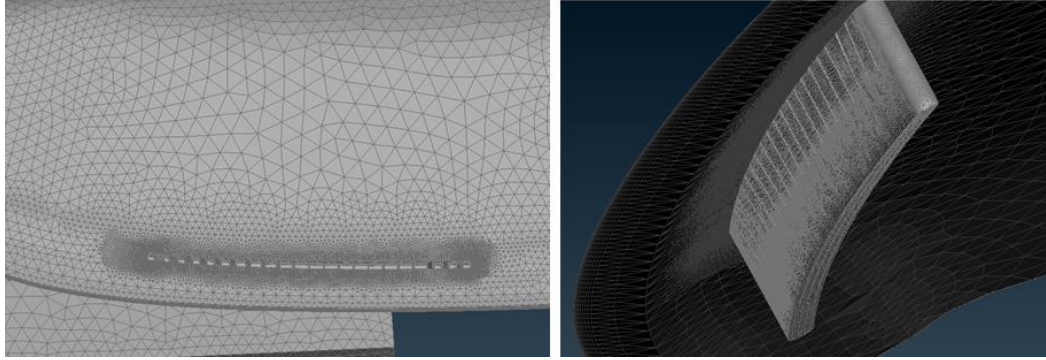


Şekil 6.44 : Üç boyutlu modelde kullanılan hacimsel çözüm ağı kesiti görüntüsü.

Cam bölgesinde vizkos ve termal sınır tabakayı yakalamak ve y^+ değerinin kullanılan türbülans modeli limitlerine çekilebilmesi için sınır tabaka tanımlanmıştır. 12 adet sınır tabaka 1.2 büyüme oranı kullanılarak oluşturulmuş ve ilk tabakanın kalınlığı 0.2 mm olarak hesaplanmıştır. Kabin havası içerisinde oluşturulan bu sınır tabaka cam iç yüzeyinde dörtgen elemanlar ile eşleştirilmiştir. Yani cam ve buz

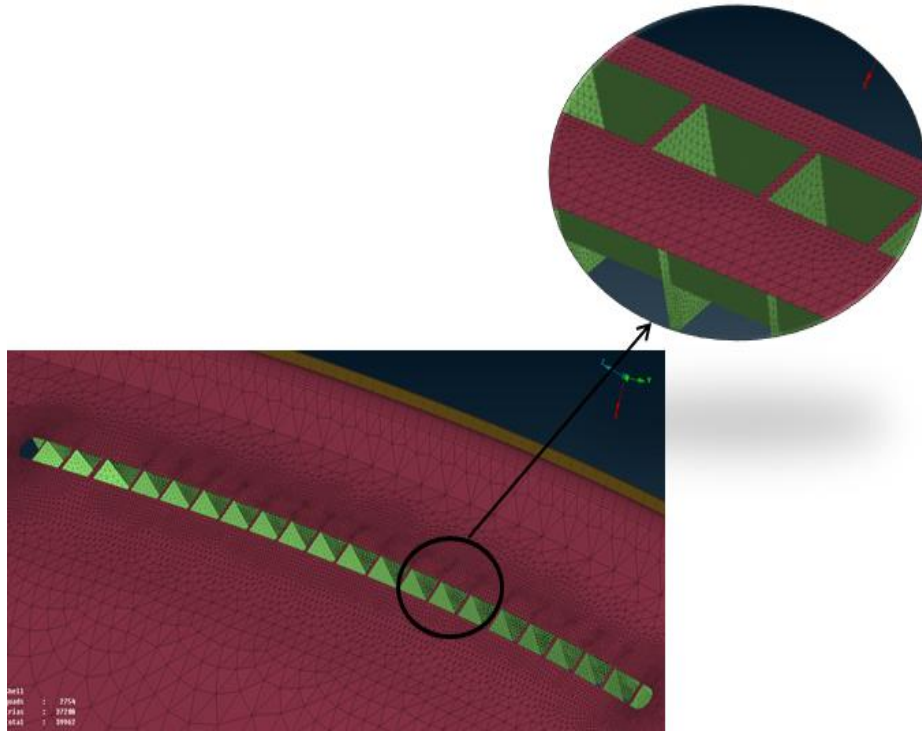
tabakasından herhangi birinin ağ yapısı değiştirildiğinde diğer eşleştirilmiş elemanlar otomatik olarak düzenlenecektir.

Üfleç çıkışındaki hava hızlarının doğruluğu hem cam yüzeyindeki akışı hem de buzun erimesi için geçen süreyi etkilemektedir. Bu nedenle kabinin diğer bölgelerine göre üfleç bölgesindeki eleman yoğunluğu artırılmıştır. Şekil 6.45’de üfleç bölgesinin kabinin diğer bölgelerine göre daha sıkı bir ağ yapısına sahip olduğu görülebilmektedir.



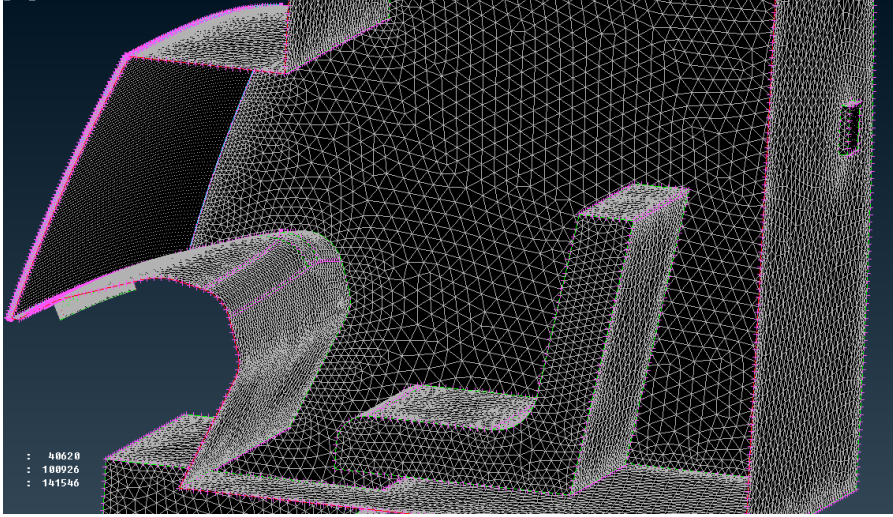
Şekil 6.45 : Üfleç bölgesindeki sıkı ağ yapısı.

Daha küçük elemanlar kullanılarak bölgesel olarak eleman yoğunluğu artırılmış, hava hızlarının ve sınır tabaka gelişiminin daha doğru tahmin edilmesi sağlanmıştır. Şekil 6.46’da üfleç bölgesindeki ağ yapısı daha net gözükmemektedir.



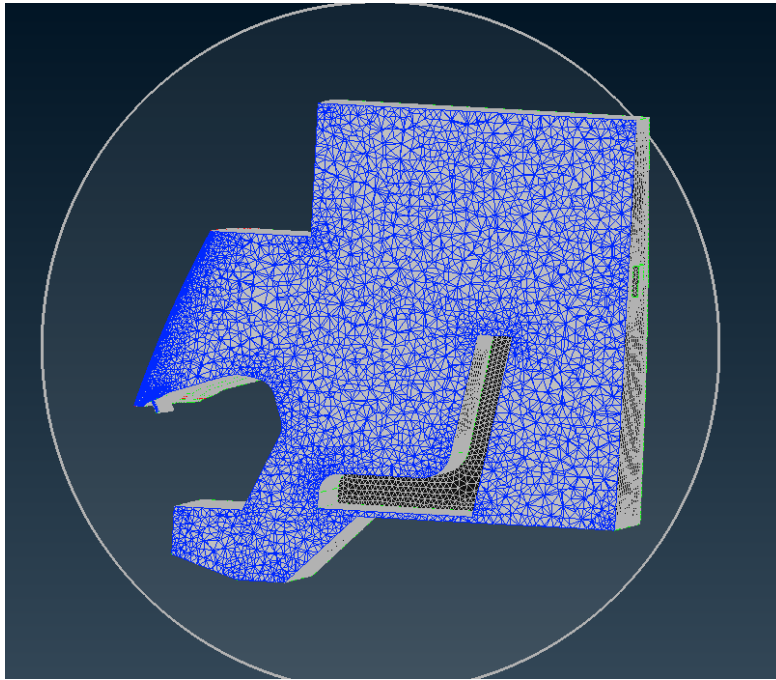
Şekil 6.46 : Ön cam üfleç gözenekleri etrafındaki çözüm ağı detayı.

Kabin içerisinde camdan uzak bölgelerde kullanılan eleman boyutları cam bölgesine göre daha büyüktür. Koltuk yüzeylerinin ve camdan uzak bölgelerin cam bölgesi kadar detaylı örülmesine gerek yoktur. Hava sirkülasyonunun yoğun olduğu cam bölgesinde ve ön konsol civarında oluşturulacak sıkı ağ yapısı analizin amacına uygun olacaktır. Şekil 6.47’de kabin içerisindeki çözüm yapısını anlatabilmek için kesit alınmış yüzey ağı elemanları görülmektedir.



Şekil 6.47 : Üç boyutlu modelde kullanılan yüzey ağı yapısının kesit görünümü.

Şekil 6.48’deki hacimsel çözüm ağı kesitinden ön cam bölgesinde daha fazla eleman ve daha sıkı bir ağ yapısının kullanıldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.48 : Modelde kullanılan sayısal çözüm ağının genel kesit görünümü.

6.4.3 Üç boyutlu analizlerde kullanılan sınır şartları

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi modelde buz tabakasının kalınlığı sabit kabul edilmiştir. Modellenen kabin havası, buz tabakası ve ön camın fiziksel özellikleri 2 boyutlu analizlerde kullanılan değerler ile aynıdır. Bu özellikler Çizelge 6.2’de tanımlanmıştır. Giriş şartı sabit hava debisi, çıkış şartı ise sabit atmosferik basınç olarak belirlenmiştir. 3 boyutlu analizlerde kabin orta eksenine boyunca simetrik kabul edildiğinden, bu eksen simetri eksenine olarak tanımlanmıştır. Zamana bağlı çözümler sırasında ortam sıcaklığı sabit -8°C olarak alınmış, üfleme havasının sıcaklığı test sırasında elde edilen sıcaklık kayıtları yardımıyla giriş şartı olarak belirlenmiştir. Kabin duvarları hem adyabatik hem de ısı taşınımı olacak şekilde modellenerek karşılaştırılma yapılmıştır. Kararlı hal çözümlerinde duvarlarda kaymama sınır şartı kullanılmıştır.

Analizler %5 türbülans yoğunluğunda yapılmış olup, giriş sınır şartının için 0.0457 m hidrolik çap, hava tahliye ağzında ise hidrolik çap 0,106 m olarak hesaplanmıştır.

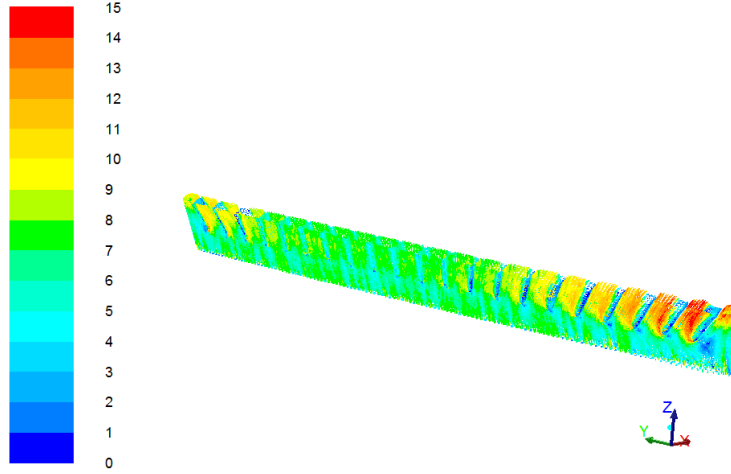
6.4.4 Üç boyutlu kararlı hal çözümü

HAD analizlerin bu aşamasında cam bölgesindeki hava hızlarının kararlı haldeki değerleri ve cam etrafındaki dağılımları belirlenmektedir. Bu analizler genel olarak hava kanalının optimizasyonu için yapılmaktadır. Her ne kadar ele alınan araçtaki üfleç yapısı olduğu gibi tez modeline aktarılmış olsa da, kullanılan türbülans modelinin ve ağ yapısının doğruluğundan emin olabilmek için kararlı hal çözümlenmeleri yapılmıştır. Ayrıca kararlı hal çözümlenmeleri sırasında elde edilen hava hız dağılımı zamana bağlı analizlerde başlangıç şartı için kullanıldığında, zamana bağlı analizlerin yakınsamasını kolaylaştıracaktır.

Analizler sırasında daha iyi sonuçlar elde edebilmek adına “second order upwind” çözüm yöntemi momentum, türbülans ve enerji denklemleri için tercih edilmiştir. İki boyutlu analizlerde olduğu gibi k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Üfleç içerisindeki akış Şekil 6.49’da gösterilmiştir. Hava hızları görüldüğü gibi üflecin köşelerinde kesit daraldığından daha fazladır. Araç içerisinde iki adet üfleç bulunmasından ve bu üfleçlerin aracın orta eksenine yakın olmasından dolayı cam köşelerinde yeterli hava akışını sağlayabilmek için, üfleç hava çıkış kesitleri köşelerde daralmaktadır. Böylece camın uç noktalarına doğru üflenen havanın hızları artarak, cam yüzeyinde yeterli hava hızları elde edilebilmektedir. Modelimizde de

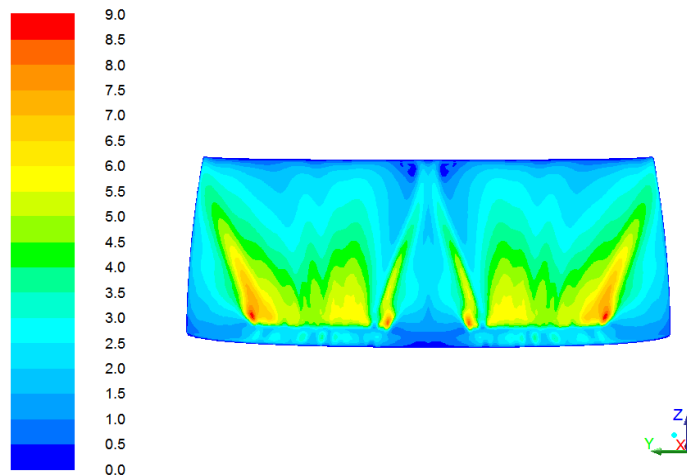
aracın ön cam üfleçleri kabinin ortasına doğru yerleştirilmiş olduğundan cam kenarlarında uygun sürede buzun erimesi ancak hava hızlarının artırılması ile sağlanabilmiştir.



Şekil 6.49 : Üfleç içerisindeki hava hız dağılımı.

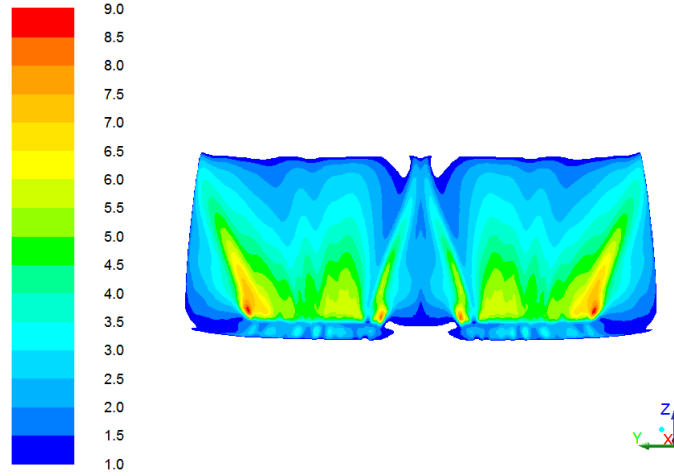
Cam yüzeyi etrafında yeterli hava hızlarının elde edilmesi buz çözme performansı açısından kritik öneme sahip olduğunu daha önce belirtmiştik. Hava hızlarının doğru tahmin edilmesi havadan cama doğru olan taşınım ile ısı geçişinin doğru hesaplanmasını sağlayacaktır.

Şekil 6.50'de cam iç yüzeyinden daha içeri bir bölgede hava hızları incelenmiştir. Görüldüğü gibi hava jetinin üfleçten çıkıp cama çarptığı bölge hizasında en yüksek hızlar elde edilmiştir. Cama çarpan hava ikiye ayrılarak bir kısmı cam boyunca kabinin üst kısımlarına hareket etmekte diğer kısmı ise çarpma bölgesinin altında düşük basınç bölgesine doğru ilerleyerek vorteks oluşturmaktadır.

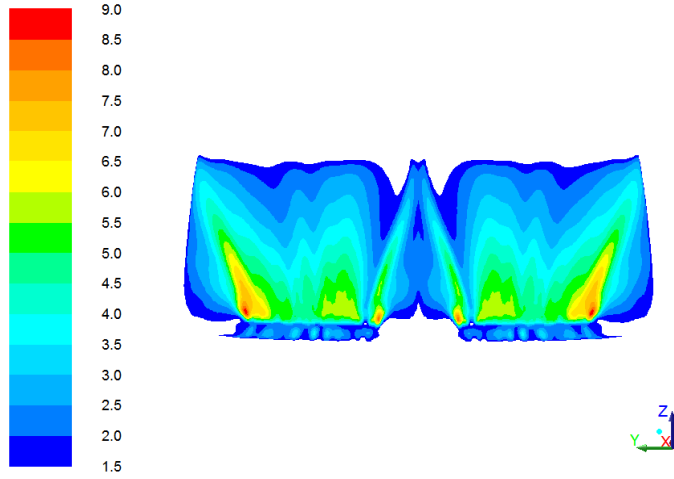


Şekil 6.50 : Cam iç yüzeyi etrafındaki bölgede hava hız dağılımı.

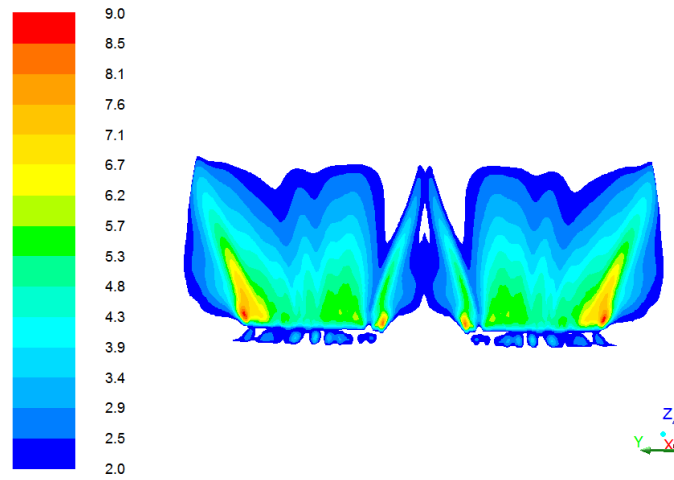
Şekil 6.51’de cam yüzeyi etrafında hakim olan hava hızları gösterilmiştir.



a) Cam bölgesindeki hava hızları ($v \geq 1.0$ m/s)



b) Cam bölgesindeki hava hızları ($v \geq 1.5$ m/s)

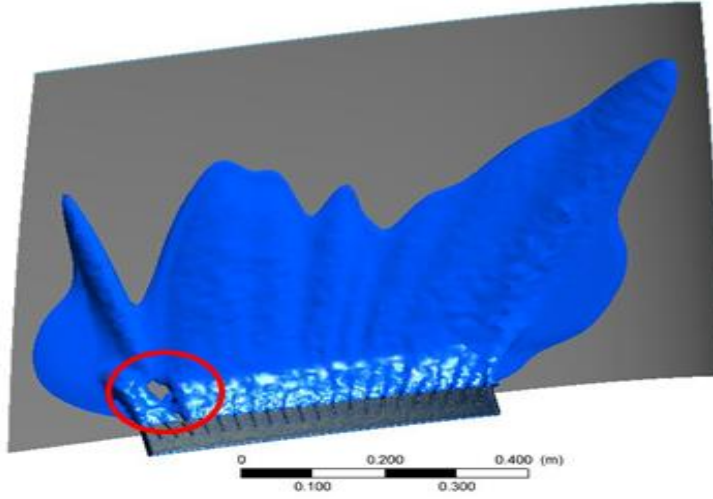


c) Cam bölgesindeki hava hızları ($v \geq 2.0$ m/s)

Şekil 6.51 : Cam yüzeyi üzerinde hakim olan hava hızları.

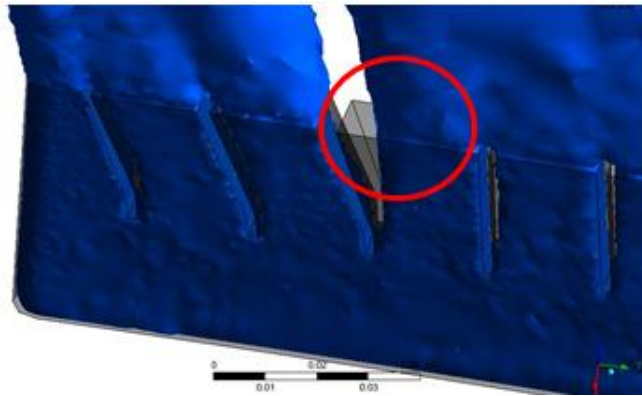
Yüksek hız bölgesi (hava hızı 2 m/s den büyük bölgeler) cam yüzeyini tamamen sarmamıştır. Fakat minimum 1 m/s hava hızı ile kontrol edildiğinde hemen hemen cam yüzeyinin tamamında hava hareketi vardır. Bu nedenle sistemde yeterli bir buz çözme performansı elde edilebileceği öne sürülebilir. Üfleç yapısı üzerinde optimizasyon yapılarak daha homojen bir hava dağılımı elde edilebilir.

Cam bölgesinde hız dağılımını inceleyerek hava jetinin uygun olup olmadığı kontrol edilebilir. Şekil 6.52’de cam iç yüzeyinde 3.5 m/s hızındaki hava jeti için eş yüzey gösterilmiştir. Üfleç çıkışındaki hava dağılımı dikkatlice incelendiğinde kabin simetri eksenini tarafında (resime göre sol) üfleç tasarımının havayı doğru şekilde yönlendiremediği görülmektedir.



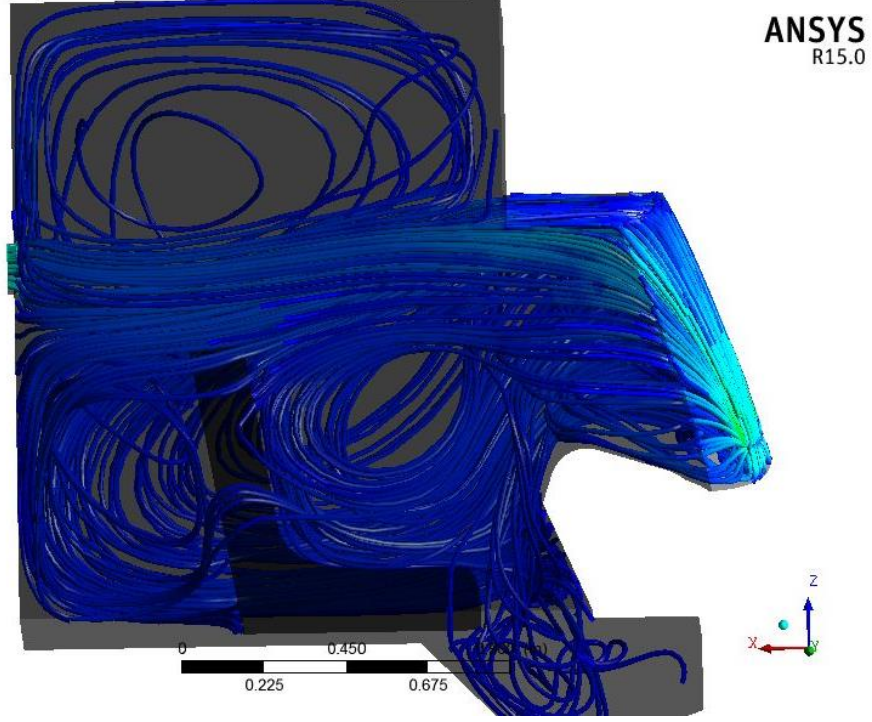
Şekil 6.52 : Cam etrafındaki eş hız yüzeyi ($v = 3.5$ m/s) .

Bu bölge detaylı olarak incelendiğinde üfleç gözünün geometrisinde tasarım hatası olduğu görülmektedir. Tasarım hatasından kaynaklı akış problemi Şekil 6.53’de gösterilmiştir.



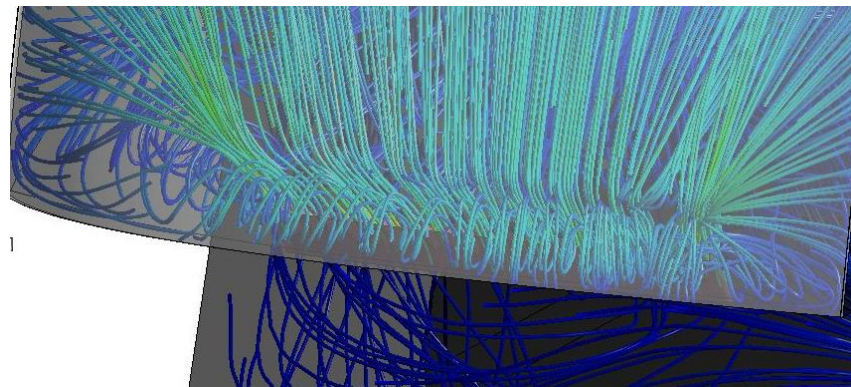
Şekil 6.53 : Hava kanalı geometrisinden kaynaklı hava akış problemi.

Araç içerisinde bulunan koltuk vb. büyük parçalar kabin içi akışı oldukça etkilemektedir. Şekil 6.54’de görüldüğü gibi ön cam üfleçinden çıkan hava kabin içerisine yayılmakta ve büyük kısmı koltuk engeline takılarak tekrar cam bölgesine doğru yönelmektedir. Bu nedenle model içerisine bu tarz hava akışını bozan elemanları alınması analiz sonuçlarını oldukça etkileyecektir.



Şekil 6.54 : Araç içerisindeki hava akışı ve koltuğun akışa etkisi.

Cam bölgesinde hava jetinin cama çarptığı bölgenin hemen altında düşük basınç bölgesi olduğundan havanın bir kısmı bu bölgeye doğru yönelmekte ve girdap oluşturmaktadır. Şekil 6.55’de görülen bu durum camın alt bölgesinde sıcak hava dolaşımına neden olmakta ve buzun erimesini bu bölgede hızlandırmaktadır.

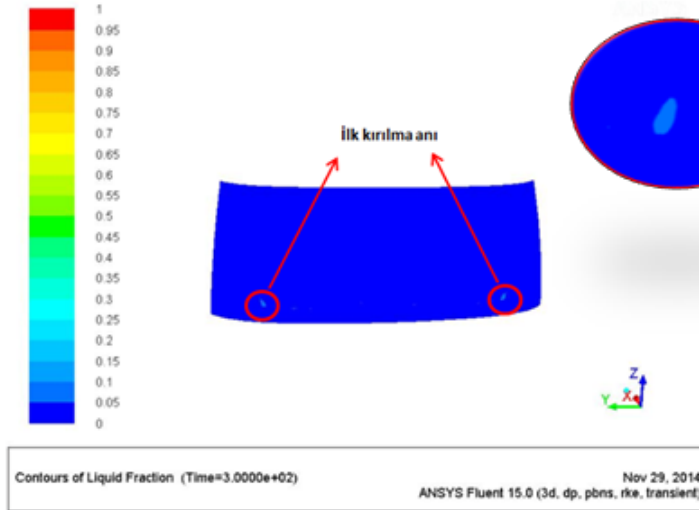


Şekil 6.55 : Cam alt kısmında oluşan girdap bölgesi.

Bu bölüme kadar kabin içerisindeki ve ön cam bölgesindeki hava hızları incelenmiştir. Bundan sonra yapılacak analizlerde kararlı hal çözümü değil zamana bağlı çözümler yapılacak ve enerji denklemini çözdürülecektir. Zamana bağlı çözümler sırasında kabin içerisindeki akış kararlı olarak ele alınacak sadece enerji denkleminin yakınsaması beklenecektir.

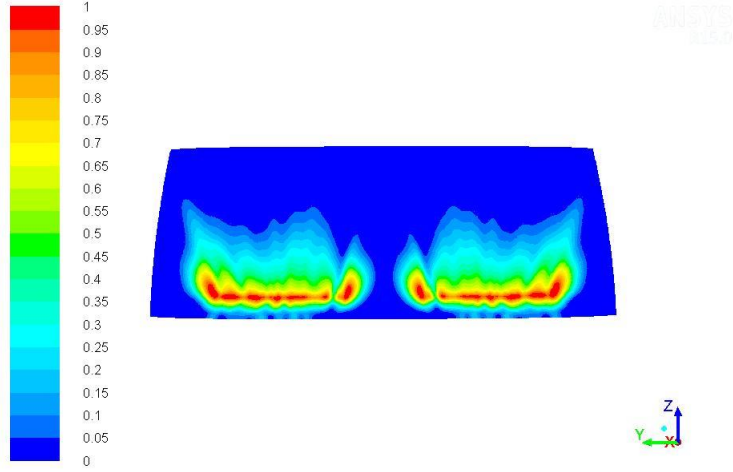
6.4.5 Üç boyutlu zamana bağlı buz erime çözümü

Kalorifer sisteminin performansını gösteren bu analizler sırasında, kararlı hal çözümlerinde elde edilen hava hızları kullanılmış, sadece erime zamana bağlı olarak takip edilmiştir. Analizin ilk başladığı an buz tabakasının sıcaklığı -8°C 'dir ve buz tabakasının içerisindeki sıvı yüzdesi sıfırdır. Kalorifer peteği içerisinden geçen motor suyunun sıcaklığı arttıkça kabin içerisine üflenen havanın sıcaklığı da artmakta ve cam yüzeyi ısınmaktadır. Camdan buza doğru olan ısı transferi dolayısıyla buz erimeye başlamaktadır. İki boyutlu analizlerde gösterildiği gibi hava jetinin cama ilk çarptığı bölgede erime başlayacaktır. Resimlerdeki mavi bölgeler tamamen buz kaplı, kırmızı bölgeler tamamen erimiş ve bu iki rengin arasında olan bölgeler ise su ve buz karışımından oluşan alanlardır. Şekil 6.56'da erimenin başladığı ilk an olan kırılma noktası gösterilmiştir ve kırılma cama sıcak hava üfleme başladıktan 5 dakika sonra gerçekleşmiştir.

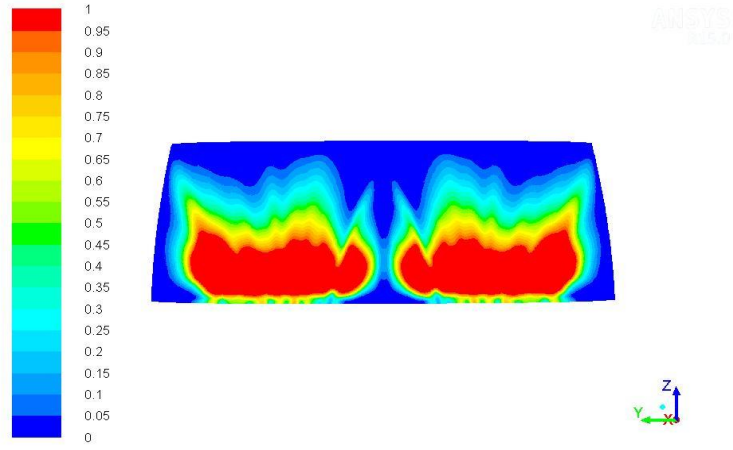


Şekil 6.56 : Yan duvarlarda taşınım sınır şartı için ilk kırılmanın konumu ve süresi.

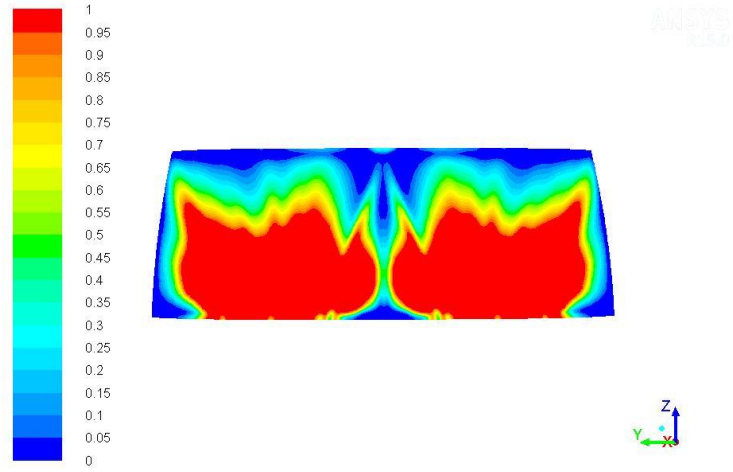
Analizler sonucunda ön görülen buz erime aşaması 5'er dakika aralıklar ile takip edilmiştir. Şekil 6.57, Şekil 6.58 ve Şekil 6.59'da kabin yan duvarlarında taşınım sınır şartı olması durumunda buz çözünme miktarları paylaşılmıştır.



Contours of Liquid Fraction (Time=6.0000e+02) Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)

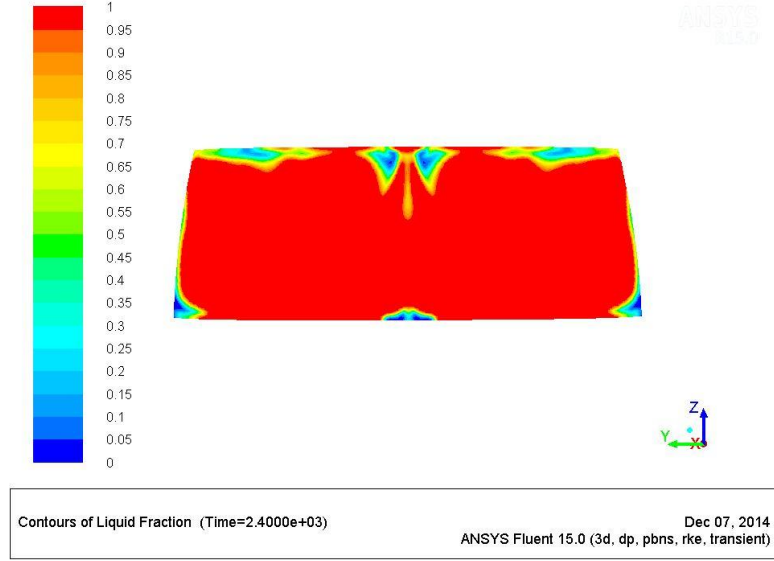


Contours of Liquid Fraction (Time=9.0000e+02) Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)



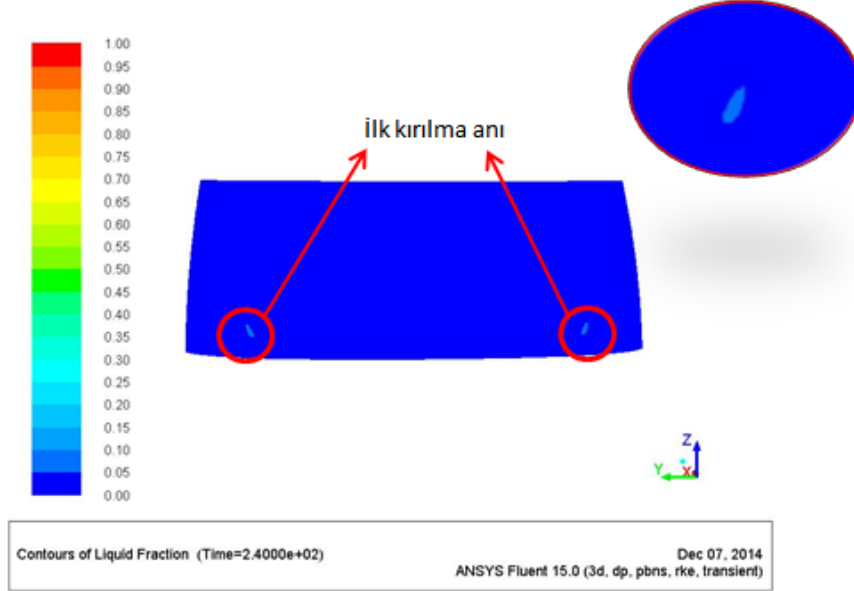
Contours of Liquid Fraction (Time=1.2000e+03) Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)

Şekil 6.57 : Taşınım sınır şartı için 10., 15., 20. dakikalarda erimiş buz miktarı.



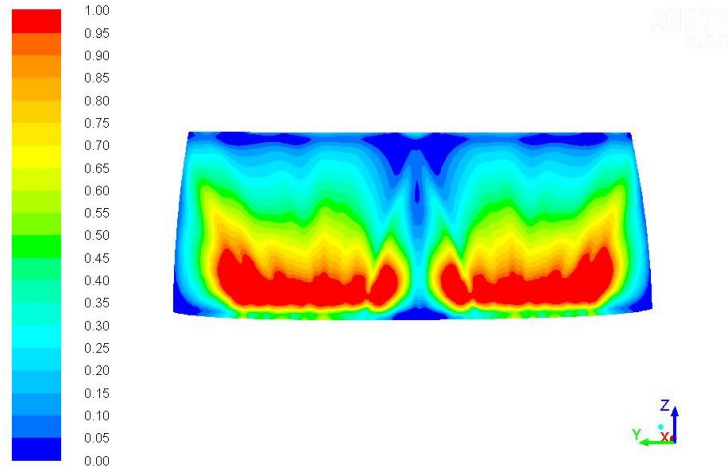
Şekil 6.59 : Taşınım sınır şartı için 40. dakikada çözülmüş buz miktarı.

Kabin duvarlarının hepsinde adyabatik sınır şartı kullanılması durumunda araç içerisinde ısı birikimi olacağından dolayı erime daha hızlı olacaktır. 6.60'da erimenin başladığı ilk kırılma noktası gösterilmiştir. Buz tabakasındaki ilk kırılma bu sefer 4 dakika civarında olmuştur.



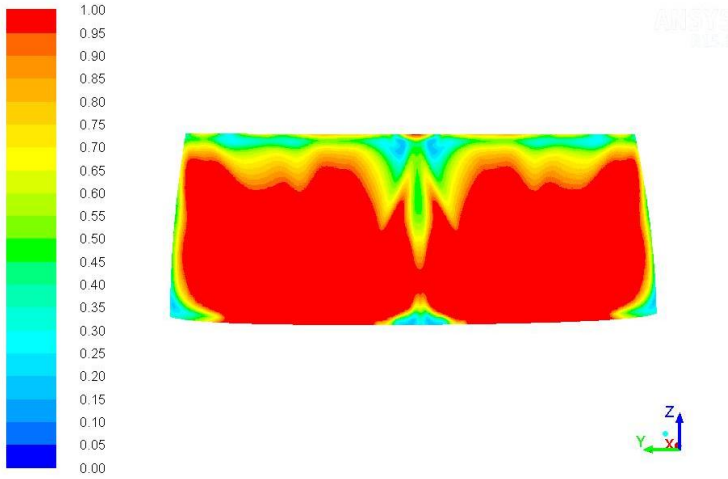
Şekil 6.60 : Yan duvarlarda adyabatik şart için ilk kırılmanın konumu ve süresi.

Şekil 6.61 ve 6.62'de adyabatik şart için erime adımları paylaşılmıştır. Analiz süresi 40 dakikadır ancak 25 dakika sonra cam yüzeyindeki buzun tamamı erimiştir. 10 dakika sonunda erime hızlanmış ve 15 inci dakikada cam yüzeyindeki buzun büyük bir kısmı erimiştir.



Contours of Liquid Fraction (Time=6.0000e+02)

Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)



Contours of Liquid Fraction (Time=9.0000e+02)

Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)



Contours of Liquid Fraction (Time=1.2000e+03)

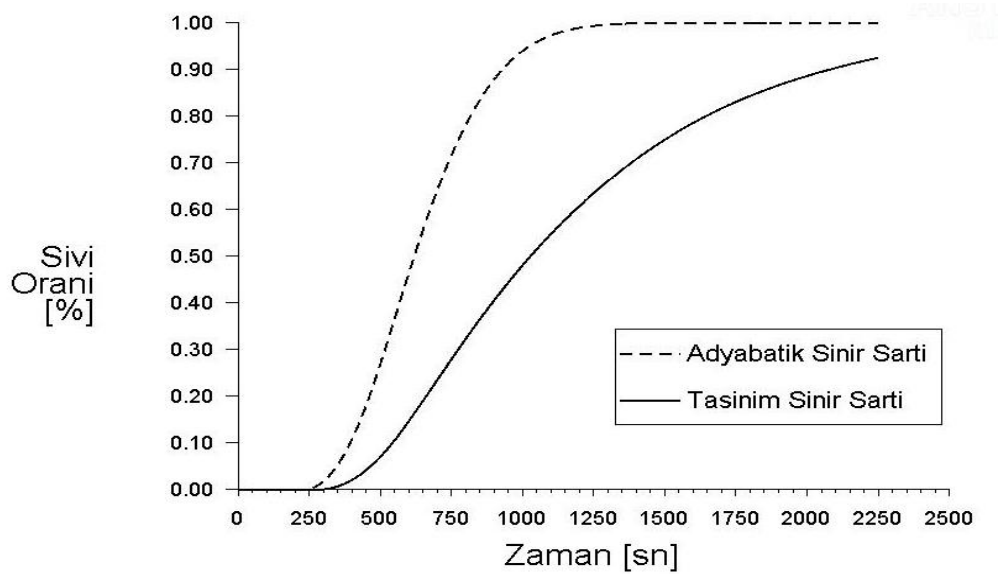
Dec 07, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp, pbns, rke, transient)

Şekil 6.61 : Adyabatik şart için 10., 15., 20. dakikalarda çözülmüş buz miktarı.



Şekil 6.62 : Adyabatik şart için 25. dakikada çözülmüş buz miktarı.

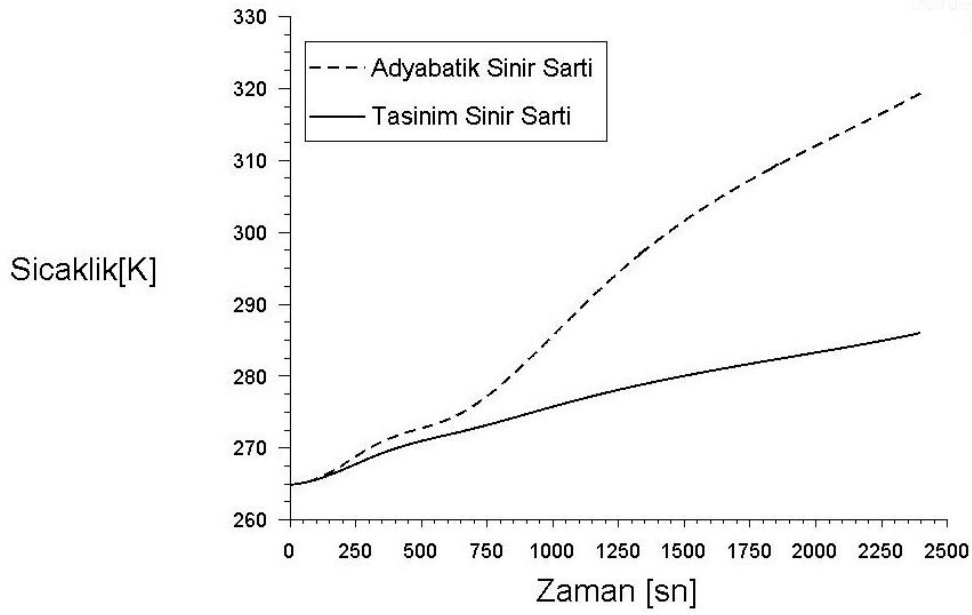
Yan duvarlarda adyabatik sınır şartı ve taşınım sınır şartı olması halinde sıvı yüzdesinin zamana bağlı olarak değişimi Şekil 6.63’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere adyabatik sınır şartı kullanılması durumunda erime 25 dakika civarında tamamlanmıştır. Taşınım şartı olması durumunda ise 40 dakika sonunda cam üzerindeki buzun yaklaşık %5’lik kısmı eriyememiştir.



Şekil 6.63 : Yan duvarlardaki sınır şartına bağlı erime miktarındaki değişim.

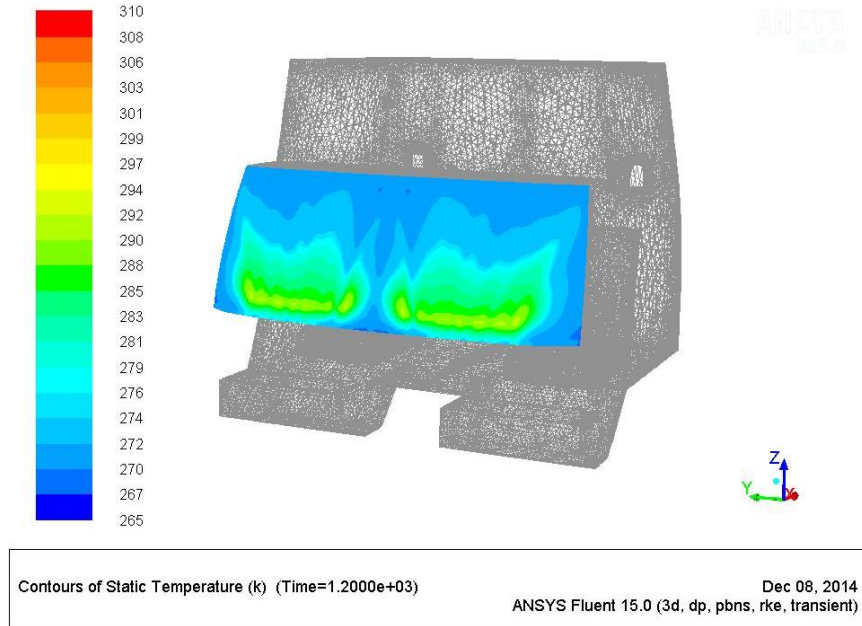
Şekil 6.64’de her iki sınır şartı için cam iç yüzeyinin zamana bağlı ısınması karşılaştırılmıştır. Kabin duvarlarından ortama taşınım ile ısı kaybı olduğundan cam

yüzey sıcaklığı adyabatik sınır şartına göre daha düşük kalmıştır. Bu yüzden adyabatik sınır şartı kullanılan modelde erime daha yavaş gerçekleşmiştir.



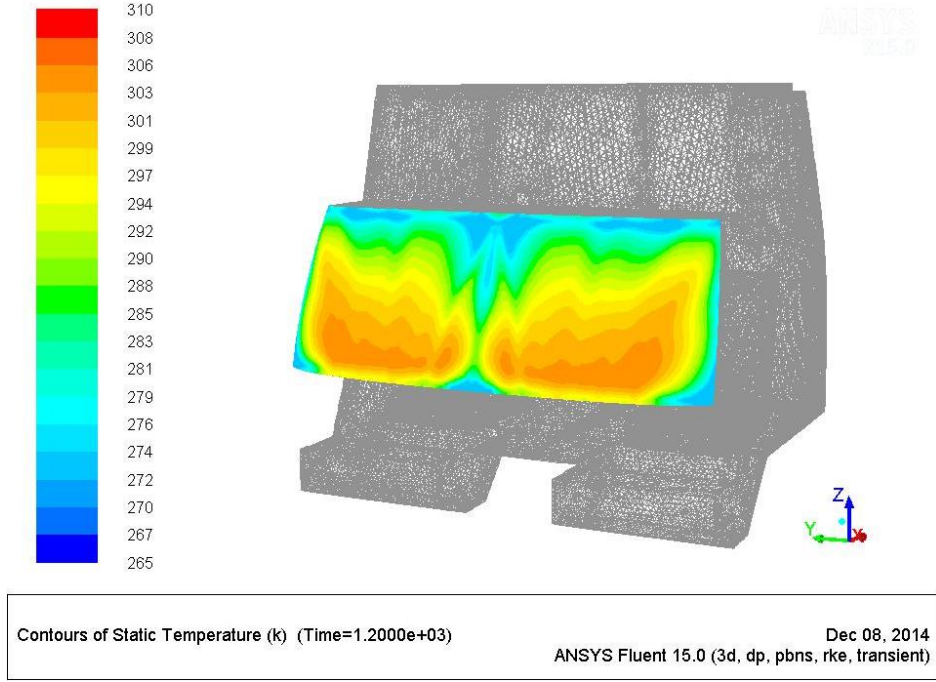
Şekil 6.64 : Yan duvarlardaki sınır şartına bağlı cam iç yüzey sıcaklığındaki değişim.

Adyabatik sınır şart ve taşınım sınır şartının cam boyunca ısı iletimine etkisini gösterebilmek için cam dış yüzey sıcaklıkları karşılaştırılacaktır. 20 dakika sonunda yan duvarlarda taşınım sınır şartı olması halinde cam dış yüzeyinde sıcaklık dağılımını Şekil 6.65'deki gibi olacaktır.



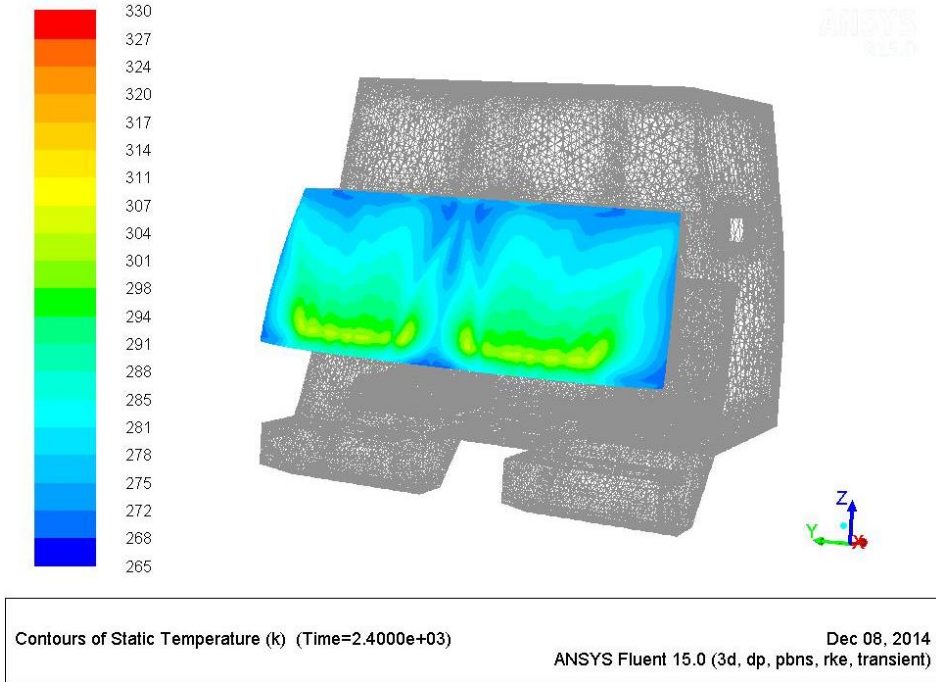
Şekil 6.65 : Yan duvarlarda taşınım sınır şartı için cam dış yüzey sıcaklığı (20. dk).

20 dakika sonunda yan duvarlarda adyabatik sınır şartı olması halinde cam dış yüzeyinde sıcaklık dağılımı Şekil 6.66'daki gibi elde edilmiştir.



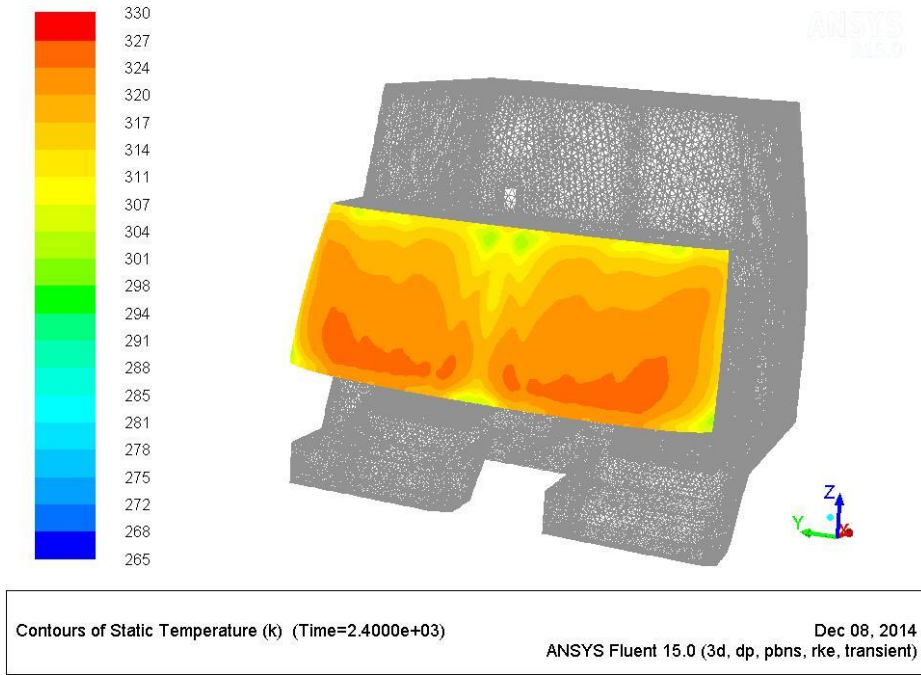
Şekil 6.66 : Yan duvarlarda adyabatik şart için cam dış yüzey sıcaklığı (20. dk).

Şekil 6.67'de 40 dakika sonunda taşınım şartı için cam yüzeyindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 6.67 : Yan duvarlarda taşınım şartı için cam dış yüzey sıcaklığı (40. dk).

Şekil 6.68’de 40 dakika sonunda adyabatik sınır şartı için cam yüzeyindeki sıcaklık dağılımı gösterilmiştir.



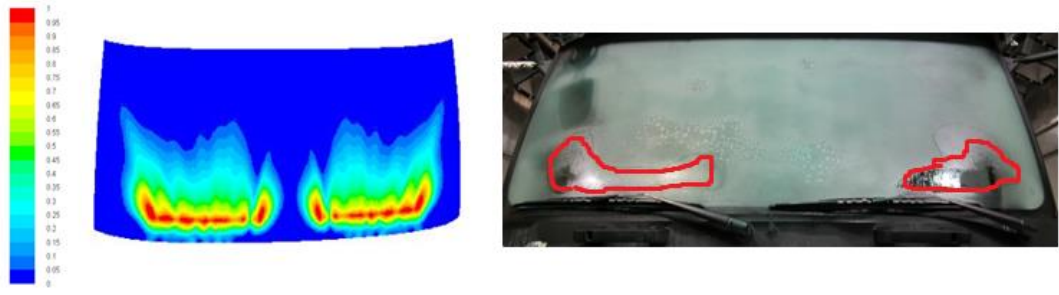
Şekil 6.68 : Yan duvarlarda adyabatik şart için cam dış yüzey sıcaklığı (40. dk).

Üç boyutlu erime analizleri tamamlandıktan sonra analiz sonuçları soğuk oda test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Test sırasında ortam sıcaklığını sabit tutabilmek için kabin etrafında 5 m/s’lik hava akışı olduğundan karşılaştırma yan duvarlarda taşınım sınır şartı için yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 6.69 farklı zamanlar için paylaşılmıştır.

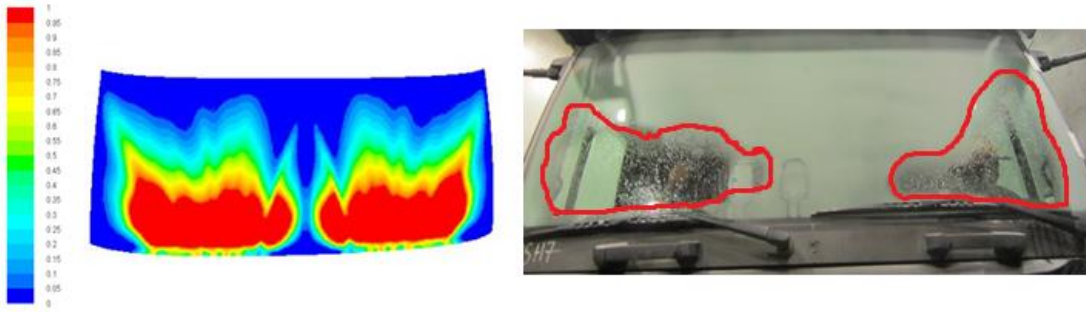
Tez kapsamında yarım kabin modeli kullanıldığından elde edilen analiz sonuçları kabin orta eksenine göre simetriktir. Yani sürücü ve yolcu tarafında aynı sürede eşit miktarda buz erimesi elde edilmiştir. İlk olarak yolcu tarafı modellenmiş ve simetrisi alınarak tam araç modeli oluşturulmuştur. Yolcu tarafı temel alındığından test sonuçları analiz sonuçları ile yolcu tarafında benzeşim göstermiştir. Ancak sürücü tarafında test sonuçları ile analiz sonuçları arasında fark görülmüştür. Kabinin yolcu tarafına göre simetrik olması nedeniyle bu durumun oluşması beklenmektedir.

10 ve 15 dakika sonrasındaki erime profili ile gerçek test sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülebilmektedir. Süre ilerledikçe analizlerdeki erime hızının gerçek sonuçlara göre daha hızlı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak kabin

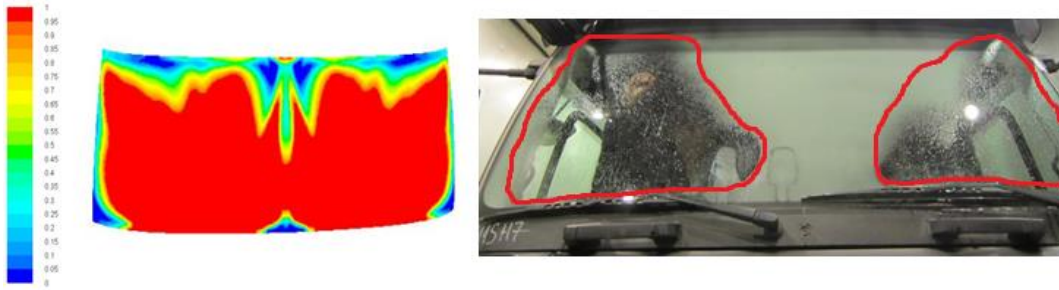
içerisindeki hava akışının simetrik olarak kabul edilmesi, cama üflenen havanın sıcaklık değerinin tüfleç ortalama değeri olarak alınması gösterilebilir.



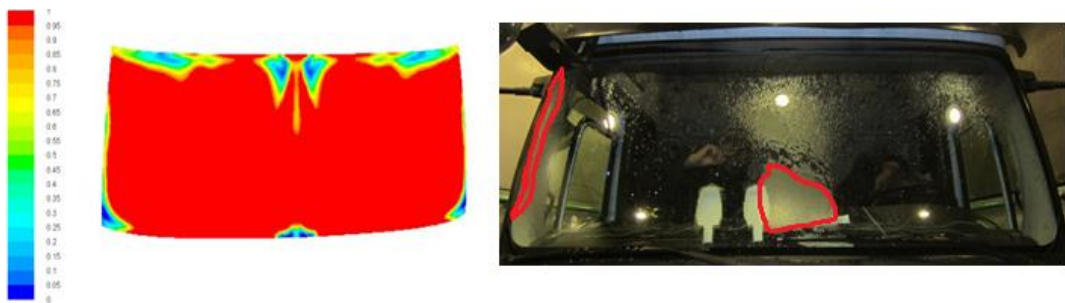
a) 10 dakika sonundaki erime miktarı



b) 15 dakika sonundaki erime miktarı



c) 30 dakika sonundaki erime miktarı



d) 40 dakika sonundaki erime miktarı

Şekil 6.69 : Buz erime analiz sonuçlarının ve test çıktılarının karşılaştırılması.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, otomobil ön cam buz çözme performansına etki eden parametreleri saptayabilmek için daha önceki araştırmalardan faydalanarak hem iki boyutlu hem de üç boyutlu birer model oluşturulmuştur. Literatürde oluşturulan modeller genellikle üç boyutlu olup çok fazla parametrik çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle oluşturulan iki boyutlu model yardımıyla sayısal olarak buzun erimesine etki eden parametreler incelenmiştir.

Modellerde kararlı hal hız dağılımı ve zamana bağlı erime takibi yapılmıştır. Analizlere etki eden eleman boyutu, türbülans modeli, malzeme özellikleri, hava çarpma açısı ve tünel koşulları gibi parametreler iki boyutlu analizler boyunca irdelenmiştir. Analizler sonucunda ağ yapısının ön cam iç yüzeyindeki hava hızlarına ve buzun erime karakteristiğine oldukça etki ettiği görülmüştür. Bu nedenle cam yüzeyine yakın bölgelerde sınır tabaka tanımlamasının yapılması gerektiği vurgulanmıştır. Türbülans modellerinin etkisi çözüm açısından bağımsız sonuç elde edildikten sonra incelenmiş ve uygulanan türbülans modellerine göre buzun erime profilinde farklılaşmalar olduğu görülmüştür. Hız değişimleri dikkatli olarak incelendiğinde maksimum hız değerinin Realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli ile elde edildiği tespit edilmiştir. Cam yüzeyinden uzaklaştıkça $k-w$ türbülans modellerinde farklılaşma oluşmuş, SST $k-w$ türbülans modelinde cam yüzeyinden ayrılma diğerlerine göre daha erken meydana gelmiştir. Hava jetinin cama çarpma açısının buzun erimesine ve ısıl denge üzerine etkisi kontrol edilmiştir. Düşük çarpma açılarında camın üst noktasında ilk temas gerçekleştiğinden maksimum sıcaklık değeri camın daha üst noktasında elde edilmiş ve sıcaklık dağılımına paralel olarak düşük çarpma açısında erime, yüksek çarpma açısına göre cam yüzeyinin daha yukarı seviyesinde başlamıştır. Farklı buz kalınlıklarının kabin içerisindeki hava akışına bir etkisi yoktur sadece ön cama üflenen sıcak havadan buza doğru olan ısı transferi nedeniyle erime zamana bağlı olarak değişmiştir. Buz hacmi fazla olan modelde erime diğerlerine göre daha yavaş gerçekleşmiştir. Son olarak adyabatik sınır şart ile taşınım sınır şartı karşılaştırılmıştır. Kabin duvarlarında taşınım olduğunda buzun erimesi için gereken sürenin arttığı net bir şekilde gözlemlenmiştir.

İki boyutlu analizler sonrasında üç boyutlu model oluşturulmuş ve modelde yolcu kabini, basitleştirilmiş hava kanalı, ön cam, cam üzerindeki buz tabakası ve kabin içerisindeki akışa etki eden koltuk kullanılmıştır. Sabit hava debisi giriş şartı ile kararlı halde analizler yapıp, ön cam bölgesindeki hava hızları elde edilmiştir. Üç boyutlu model oluşturulurken gerçek bir ağır ticari kamyon temel alınmıştır. Araç buz çözme hava kanalının yapısı çok karmaşık olduğundan analizler sırasında hava kanalı akış optimizasyonu yapılmamıştır. Tedarikçi firma ile görüşülüp akışın lineer olduğu kesit belirlenip üfleç modeli basitleştirilmiştir. Hava hızları tespit edildikten sonra test verilerinden yola çıkarak üfleme sıcaklığının zamana bağlı fonksiyonu oluşturulmuş ve giriş şartı olarak bu fonksiyon kullanılmıştır. Entalpi – porozite yöntemi kullanılarak buz hacmi içerisindeki su yüzdesi takip edilerek zamana bağlı erime analizleri yapılmıştır. Analizler sırasında kabin duvarları adyabatik ve kabin etrafında hava akışı (taşınım) olacak şekilde ısıl analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Adyabatik duvar modellemesi yapıldığında erimenin diğer duruma göre çok daha hızlı tamamlandığı ortaya konulmuştur. Bu karşılaştırma yapıldıktan sonra HAD analizleri ile araç seviyesi test sonuçları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Testler sırasında yan duvarlarda adyabatik şart sağlanmadığından karşılaştırma taşınım sınır şartı kullanılan model ile yapılmıştır. Yarım kabin modeli kullanıldığından sürücü tarafındaki erime miktarı analiz sonuçlarında farklı çıkmıştır. Yolcu tarafında ise test sonuçları ile analiz sonuçları birbiriyle önemli ölçüde örtüşmektedir. Ancak süre ilerledikçe analizlerdeki erime hızının gerçek sonuçlara göre daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

Bu tez çalışmasından yola çıkılarak aşağıda belirtien konu başlıkları üzerinde çalışılması önerilmektedir.

- Hava kanalları ve üfleç tasarımı üzerinde çalışma yapılarak bu parametrelerin hava akışına ve sistem buz çözme performansına etkisi incelenebilir. Üfleç gözenek adedi, üfleç ile cam arasındaki açı, üfleç büyüklüğü ve konumu, hava kanallarının yapısı ve basınç düşümleri gibi parametreler bu kapsamda kontrol edilebilir.
- Cam için katı model yerine kabuk model kullanılabilir. Böylece yoğun ağ yapısından kurtulacağından analiz süresi oldukça kısılacaktır. Katı model çalışması ile kabuk model karşılaştırılarak, daha kısa sürede hızlı sonuç almak için kabuk modelin uygulanabilirliği incelenebilir.

- Kalorifer sistemi uzun süre çalıştırıldığında kabin içerisindeki sıcaklık gittikçe artacak ve yolcu konforu olumsuz etkilenecektir. Sürüş güvenliği açısından sürücünün baş bölgesinin ayak bölgesinden daha serin olması istenmektedir. İnsan modeli üç boyutlu analizlere dahil edilerek sürücü ve yolcu termal konforu irdelenebilir ve kabin içerisindeki hava yönlendirmesi bu parametre dikkate alınarak optimize edilebilir.
- Tez çalışması kapsamında sadece ön cam buz çözme performansı incelenmiştir. Yan camlar ve yan al üfleçler de eklenerek yan cam buz çözme modeli oluşturulabilir.
- Katılma / erime modelini VOF metodu ile birleştirerek buz çözme analizi geliştirilebilir. Cam üzerinde eriyen su damlalarının yerçekimi etkisi ile aşağı sürüklenmesi ve erimeye etkisi bu yöntemde hesaba katılabilmektedir. Bunun için buz etrafındaki hava da modele eklenmelidir. Bu yöntem için uzun analiz süresine ve yüksek kapasiteli çözücüye ihtiyaç duyulmaktadır.
- Soğuk mevsimlerde cam üzerinde buzlanma dışında buğulanma da sık sık oluşmaktadır. Cam üzerinde su filminin (buğulanma) oluşması sürücünün görüşünü azaltmakta ve dikkatini dağıtmaktadır. Kurulan modelde buz tabakası yerine su filmi tanımlanıp “Eularian Wall Film” modeli ile üç boyutlu buğu çözme analizleri kolaylıkla yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **J. G. Lee, Y. Jiang, A. J. Przekwas ve M. Sioshansi** (1994). Validation of Computational Vehicle Windshield De-Icing Process. *SAE paper no 940600, International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, USA.*
- [2] **J. K. Wolfahrt, W. B. Baier, Th. Moshhammer** (2005). Numerical Studies for De-Icing Validation. *SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 11-14 Nisan.*
- [3] **Robert A. Brewster, Steffen Frik ve Frank Werner** (1997). Computational Analysis of Automotive Windshield De-Icing with Comparison to Test Data. *Society of Automotive Engineers, INC.*
- [4] **Bashar S. AbdulNour** (1998). Numerical Simulation of Vehicle Defroster Flow Field. *International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, USA, 23-26 Şubat.*
- [5] **William R. Hill ve Sriram Sringari** (2001). A Parametric Approach for Rapid Design and Analysis of Automotive HVAC Defrost Systems. *SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 05-08 Mart.*
- [6] **Subrata Roy, Karim Nasr, Paresh Patel ve Bashar AbdulNour** (2002). Heat Transfer on Vehicle Windshield: An Experimental and Numerical Study. *Mechanical Engineering Department, Kettering University, Flint, MI 48504, USA.*
- [7] **Stefan Becker, Herman Lienhart, Carl Stoots, Max Baier, Jörn Hofhaus, Dieter Schlenz, Stefan Zemsch ve Edna Ryssel** (2001). Investigation of Automotive Defroster and Windshiel Flow. *Automotive & Transportation Technology Congress & Exhibition, Barcelona, Spain, 1-3 Ekim.*
- [8] **Michael B. Roberts, Alexander V. Moultanovsky ve Terry A. Zeigler** (2000). Vehicle Defroster System Evaluation. *Bergstrom Climate Systems, Inc. SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 6-9 Mart.*
- [9] **Jonghyun Park, Chulsoo Kim** (2003). Parametric Study on Automotive Windshield Defrost Pattern using CFD. *Hyundai MOBIS. SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 3-6 Mart.*
- [10] **A. Aroussi, A. Hassan, B. R. Clayton ve B. S. AbdulNour** (2001). An Assessment of Vehicle Side-Window Defrosting and Demisting Process. *Flow Diagnostics Lab., The University of Nottingham & Ford Motor Co., SAE World Congress, Detroit, Michigan, 5-8 Mart.*
- [11] **A. Aroussi, A. Hassan ve B. S. AbdulNour** (2001). Effects of Vehicle Windshield Defrosting and Demisting Process on Passenger Comfort. *Vehicle Thermal Management Systems Conference & Exhibition, Nashville, Tennessee, USA, 14-17 Mayıs.*

- [12] **A. Aroussi, A. Hassan ve B. S. AbdulNour** (2003). Full-and Model-Scale Scrutiny of the Effects of Vehicle Windshield Defrosting and Demisting on Passenger Comfort and Safety. *SAE 2003 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 3-6 Mart.*
- [13] **Bashar S. AbdulNour** (1999). CFD Prediction of Automotive Windshield Defrost Pattern. *International Congress and Exposition Detroit, Michigan, USA, 1-4 Mart.*
- [14] **A. F. Skea, R. D. Harrison, A. J. Baxendale ve D. Fletcher** (2001). Comparison of CFD Simulation Methods and Thermal Imaging with Windscreen Defrost Pattern. *Vehicle Thermal Management Systems Conference & Exhibition, Nashville, Tennessee, USA, 14-17 Mayıs.*
- [15] **Ashok Patidar** (2010). Comparison of CFD Analysis Methods for Simulating De-Icing Pattern over Automotive Windshield and Windows. *SAE Paper No 2010-01-0555.*
- [16] **Karamjit Sandhu** (2011). Simulation of the Windscreen Defrost Performance. *Star European User Conference, 22-23 Mart.*
- [17] **V. Kumar, K. Tare ve S. Kapoor** (2010). Deployment of CFD for Optimization of the Air Flow Distribution Over the Windscreen and Prediction of Defrost Performance. *SAE Paper No 2010-01-1059.*
- [18] **A. Aroussi, A. Hassan, B. Clayton, B. S. AbdulNour ve E. Rice** (2000). Improving Vehicle Windshield Defrosting and Demisting. *SAE Paper No 2000-01-1278, SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 6-9 Mart.*
- [19] **L. Kumbae, J. Yong-Du, K. Md. Faisal ve K. Hyu Goo** (2008). Numerical Analysis of the Automobile HVAC System Through Defrost Mode. *Proceedings of the 4th BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering, Dhaka, Bangladesh, 27-29 Aralık.*
- [20] **Ashraf Farag ve Lin-Jie Huang** (2003). CFD Analysis and Validation of Automotive Windshield De-Icing Simulation. *SAE Paper No 2003-01-1079, SAE 2003 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 3-6 Mart.*
- [21] **Padmesh Mandloi ve Nidhesh Jain** (2000). Case Studies on CFD Simulation of Windshield De-Icing. *SAE Paper No 2000-01-1278, SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 6-9 Mart.*
- [22] **C. M. Robinson ve A. M. Jacobi** (2001). A Study of Frost Formation on a Plain Fin. *Air Conditioning and Refrigeration Center, Ağustos 2001.*
- [23] **Steven Daly** (2006). Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems.
- [24] **O. Velde ve J. Schindler** (2007). Windshield Defrosting Modeling and Simulation for the Assessment of Convection Configurations. *SAE Paper No 2007-01-0761, 2007 SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 16-19 Nisan.*
- [25] **C. Swales, C. Capellmann, M. Crompton ve M. Matthes** (2004). Combining CAE and Experimental Techniques to Develop Optimal Defrost / Demist Performance in a Vehicle. *SAE Paper No 2004-01-1506, 2004 SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 8-11 Mart.*

- [26] **Ansys Fluent Theory Guide Release 14.0** (2011). Ansys,Inc.
- [27] **J. G. Lee, Y. Jiang, A. J. Przekwas ve M. Sioshansi** (1993). Automotive Windshield Ice-Clearing Analysis. *SAE Paper No 930289, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 1-5 Mart.*
- [28] **B. Tavukçu, K. Altay, A. Ogun** (2003). Şehirler Arası Yolcu Otobüsü Ön Cam Hava Üfleme Kanalinin Optimize Edilmesi. *Mühendis ve Makine, cilt 54, sayı 641, s.56-63.*
- [29] **Defrosting and Demisting Systems**. Directive No. 78/317/EEC.
- [30] **Surface Vehicle Recommended Practice** (2011). Passenger Car Windshield Demisting and Defrosting Systems, SAE J902.
- [31] **Surface Vehicle Recommended Practice** (2000). Windshield Defrosting Systems Test Procedure and Performance Requirements – Trucks, Buses and Multipurpose Vehicles, SAE J381.
- [32] **Karim J. Nasir, Bashar S. AbdulNour ve George C. Wiklund** (1998). State of Knowledge and Current Challenges in Defrosting Automotive Windshields. *International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, 23-26 Şubat.*
- [33] **Robert L. Gielow** (1996). Defrost System Development. *Airflow Sciences Corporation.*
- [34] **A. Aroussi, A. Hassan, B. R. Clayton ve B. S. AbdulNour** (2001). Comparison of Performance between Several Vehicle Windshield Deforsting and Demisting Mechanisms. *SAE Paper No 2001-01-0582, 2001 SAE World Congress, Detroit, Michigan, USA, 5-8 Mart.*
- [35] **Ansys Fluent Intro 14.0**. Heat Transfer, Lesson 07, Ansys,Inc.
- [36] **H. Sakamoto, T. Watanabe ve F. Taniguchi** (1987). An Analysis of Frost Formation on Vehicle Windows. *SAE Paper No 870028, 1987, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, USA, 23-27 Şubat.*
- [37] **V. S. Khairatkar, M. Sreenivasulu ve A. V. Mannikar** (2013). Methodology for Defrost and Demist Test. *The Automotive Research Association of India (ARAT), SAE Paper No 2013-26-0062.*

EKLER

EK A: Sıcaklık giriş şartı için yazılan fonksiyon

EK B: Atmosfer basıncında gazların termodinamik özellikleri

EKA

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(temperature,thread,position)
{
    face_t f;
    real t=CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f,thread)
    {

F_PROFILE(f,thread,position)=6.*0.000000001*t*t*t-
3.*0.00001*t*t+0.0636*t+265.;
    }
    end_f_loop(f,thread)
}
```

EK B

TABLO-7 HAVANIN ÖZELLİKLERİ

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Serhan TATAR
Doğum Tarihi ve Yeri: 30.11.1989/İzmir
E-posta : ser_han89@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

Mart 2012 – Ford OTOSAN – Ürün Geliştirme ve Dizayn Mühendisi