

**OTOMOBİLLERDE CAMLAR ÜZERİNDE OLUŞAN
BUZUN GİDERİLMESİNDE MENFEZ GEOMETRİSİ,
HAVA HIZI VE SICAKLIĞIN ETKİSİNİN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
YÖNTEMİYLE ANALİZİ**

Abdulmecit AYDIN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOBİLLERDE CAMLAR ÜZERİNDE OLUŞAN BUZUN
GİDERİLMESİNDE MENFEZ GEOMETRİSİ, HAVA HIZI VE SICAKLIĞIN
ETKİSİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİYLE
ANALİZİ**

Abdulmecit AYDIN

Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TAŞIT TASARIMI ANABİLİM DALI

BURSA – 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOBİLLERDE CAMLAR ÜZERİNDE OLUŞAN BUZUN GİDERİLMESİNDE MENFEZ GEOMETRİSİ, HAVA HIZI VE SICAKLIĞIN ETKİSİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Abdulmecit AYDIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Taşıt Tasarımı Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN

Bu çalışmada otomobil kabininde ön camda oluşan buzun giderilmesi amacıyla iklimlendirme elemanından çıkan havanın hız ve sıcaklık dağılımına bağlı olarak buz çözme süresinin belirlendiği üç boyutlu sayısal analizi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma boyunca ilk analizler, literatürdeki bazı çalışmalar baz alınarak basit modeller üzerinde gerçekleştirilmiştir. Basit modeller üzerinden gerçekleştirilen ilk analizlerin ardından, gerçek otomobil kabini için elde edilen deney verilerinde kullanılan otomobil kabini modelinin matematiksel modelinden ölçüm alınarak yeni bir model tasarlanmıştır. Modelde, iklimlendirme elemanlarının standart ısıtma süreci için sürekli ve geçici rejimde yapılan sayısal analizler sonucunda, hava akışı, ön cam bölgesindeki ve buz tabakasındaki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Sınır ve başlangıç koşulları uygun doğrulama sağlanması açısından deney verisi ile aynı olacak şekilde seçilmiştir. Sayısal analizler iki aşamalı olarak sürekli ve geçici rejimde gerçekleştirilmiş, sürekli rejimde momentum denklemleri çözdürülüp akışkan hareketi incelenmiş, geçici rejimde ise enerji çözdürülerek ön cam bölgesinde zamana bağlı sıcaklık dağılımı ve buz çözme süresi analiz edilmiştir. Sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılarak doğrulama sağlanmıştır.

Analizler sonucunda özellikle soğuk iklimlerin yaşandığı bölgelerde görüş kısıtlaması nedeniyle sürüş güvenliği açısından hayati öneme sahip olan ön cam buz çözme süresinin, sayısal analizler ile çözümlenerek optimizasyon sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HAD, Isı Transferi, Buz çözme, İklim Kontrolü

ABSTRACT

MSc Thesis

THE EFFECTS OF INLET GEOMETRY, AIR VELOCITY AND TEMPERATURE ON THE DE-ICING ANALYSIS OF AUTOMOBILE WINDSHIELD BY USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Abdulmecit AYDIN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan SEVILGEN

In this study, the three-dimensional numerical analysis of the defrosting time based on the speed and temperature distribution of the air exiting the air conditioning element in order to remove the ice formed on the windshield in the automobile cabin was performed using the Computational Fluid Dynamics (HAD) method. First analyzes were carried out on the basis of some studies in the literature on simple models in the literature. New model was designed by taking measurements from the mathematical model of the automobile cabin model used in the experimental data obtained for the real car cabin. In the model, as a result of the numerical analysis of the standard heating process of the air conditioning elements in continuous and transient regime, air flow, temperature distributions in the windshield area and the ice layer are obtained. The boundary and initial conditions were chosen to be identical to the experimental data to provide proper verification. The numerical analyzes performed using CFD method were carried out in two stages in continuous and transient regime, momentum equations were solved in continuous regime and fluid motion was examined, and in transient regime, the percentage of time-dependent defrosting in the windshield region was analyzed by dissolving energy. Validation is provided by comparing the results with experimental data. As a result of the analysis, it was understood that the windshield defrosting time, which is vital for driving safety due to bad visibility conditions, especially in cold climatic zones, can be solved with numerical analysis and optimization can be achieved.

Key words: CFD, Heat Transfer, Deicing/Defrosting, Climate Control

TEŞEKKÜR

Otomobillerde camlar üzerinde oluşan buzun giderilmesinde menfez geometrisi, hava hızı ve sıcaklığın etkisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemiyle analizi hakkında yapmış olduğum yüksek lisans tez çalışmasında benimle bilgilerini ve tecrübesini paylaşan ve her konuda rehberlik eden danışman hocam Sayın Doç. Dr. Gökhan SEVİLGİN'e, yüksek lisans çalışmasına destek vererek deneysel verileri ve her türlü şirket olanaklarını sunan TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.'ne, tüm hayatım boyunca bana gerek maddi gerekse manevi desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Abdulmecit AYDIN

20/01/2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Literatür Taraması.....	4
2.2. Kuramsal Temeller.....	7
2.2.1.Hesaplama Akışkanlar Dinamiği	7
2.2.2. Ayrıklaştırma.....	9
2.2.3. Diferansiyel Akış Analizi.....	9
2.2.4. Türbülans Modelleri.....	11
2.2.5. Katılaşma ve Ergime Modülü (Solidification and Melting)	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM	13
3.1. Analiz-1 Basit Model Üzerindeki Analiz.....	13
3.1.1. Modelin Oluşturulması	13
3.1.2 Ağ Yapısı Oluşturulması (Mesh Atma İşlemi)	15
3.1.3. Hesaplama Akışkanlar Dinamiği Analizi	17
3.2. Analiz-2 Model Geliştirilmesi.....	22
3.3. Otomobil Kabini Buz Çözme Analizi (Analiz-3)	25
3.3.1. Geometrinin Oluşturulması	25
3.3.2. Ağ Yapısının Oluşturulması.....	28
3.3.3. Analiz İşlemi (Processing)	30
3.3. Deney Çalışması.....	31
4. BULGULAR.....	32
4.1. Analiz-1 Basit Kabin Analizi Sonuçlarının Görüntülenmesi.....	32
4.2. Analiz-2 Geliştirilmiş Kabin ile Analiz Sonuçlarının Görüntülenmesi	38
4.3. Buz Çözme Analizi Sonuçları.....	43
4.3. Deney Sonuçlarının Görüntülenmesi	50
4.4. Sonuçların Karşılaştırılması	55
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
P	Basınç (Pa)
M	Dinamik viskozite (Pas)
S_e	Enerji kaynak terimi
V	Hız (m/s)
S_m	Kütle kaynak terimi
SM	Momentum kaynak terimi
K	Sıcaklık (Kelvin) (K)
k	Türbülans kinetik enerjisi
ϕ	Yayınım terimi
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
t	Zaman (saniye)

Kısaltmalar Açıklama

HAD	Hesaplamaalı Akışanlar Dinamğı
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamaalı Akışanlar Dinamiğı)
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
SAE	Sociatey of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Birliğı)
CWT	Climatic Wind Tunnel (Klimatik Rüzgar Tüneli)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ön cam üzerinde görüş bölgeleri (AB Standardı).....	2
Şekil 1.2. Ön cam üzerinde görüş bölgeleri (ABD Standardı).....	3
Şekil 2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak Tasarım Süreci.....	7
Şekil 3.1. Subrata Roy ve arkadaşlarının kullandığı model (Subrata ROY 2002).....	13
Şekil 3.2. Kabin Geometrisi-1.....	14
Şekil 3.3. İsimlendirilmiş kabin	14
Şekil 3.4. Modelin ağ yapısı oluşturulmuş hali.....	15
Şekil 3.5. Model ağ yapısı buz, cam, hava.....	16
Şekil 3.6. Basit model ağ yapısı (Sweep Method)	16
Şekil 3.7. Konsol görünümü	19
Şekil 3.8. İterasyonlar ve yakınsamanın grafiği.....	19
Şekil 3.9. Zamana bağlı Sıcaklık Grafiği	20
Şekil 3.10. Menfez eklenmiş model.....	21
Şekil 3.11. Kabin Geometrisi – 2	22
Şekil 3.12. Kabin-2 Ağ Yapısı	23
Şekil 3.13. İsimlendirme Buz dış ortam ve Kabin yan	23
Şekil 3.14. Giriş ve Çıkış (Alttan bakış)	24
Şekil 3.15. Kabin Alt (Alttan bakış).....	24
Şekil 3.16. Kabin Geometrisi	26
Şekil 3.17. Kabin geometrisini oluşturan elemanlar (hava, cam ve buz).....	26
Şekil 3.18. Kabin görünümü	27
Şekil 3.19. Kabin ağ yapısı	28
Şekil 3.20. Girişi menfezleri	29
Şekil 3.21. Çıkış menfezi	29
Şekil 4.1. Analiz-1 Havanın kabin içindeki hız (m/s) dağılımı.....	32
Şekil 4.2. Analiz başlangıcında model görünümü	33
Şekil 4.3. t=100. saniyedeki buzun sıvılaşma oranı (liquid fraction)	34
Şekil 4.4. t=500. saniyedeki buzun erimeye başladığı görüntü	34
Şekil 4.5. t=700. saniyedeki buzun sıvılaşma oranı	34
Şekil 4.6. t=800. ssaniyedeki buzun sıvılaşma oranı	35
Şekil 4.7. t=900. saniye buzun sıvılaşma oranı	35
Şekil 4.8. t=1000. Saniye buzun sıvılaşma oranı	35
Şekil 4.9. t=1100. saniye buzun sıvılaşma oranı.....	36
Şekil 4.10. t=300. saniyede iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.11. t=600. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	36
Şekil 4.12. t=700. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.13. t=800. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.14. t=900. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.15. t=1000. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması.....	37
Şekil 4.16. Havanın başlangıç şartlarında araç kabini içindeki sıcaklık (K) dağılımı	38
Şekil 4.17. Havanın başlangıç şartlarında kabin içindeki görünümü.....	38
Şekil 4.18. t=300. saniye buz çözünme oranı	39
Şekil 4.19. t=600. saniye buz çözünme oranı	39
Şekil 4.20. t= 900. saniye buz çözünme oranı	40
Şekil 4.21. t= 1200. saniye buz çözünme oranı	40
Şekil 4.22. t= 1500. saniye buz çözünme oranı	41

Şekil 4.23. $t = 1800$. saniye buz çözünme oranı	41
Şekil 4.24. $t = 2100$. saniye buz çözünme oranı	42
Şekil 4.25. $t = 2400$. saniye buz çözünme oranı	42
Şekil 4.26. Havanın kabin içindeki sıcaklık (K) dağılımı.....	43
Şekil 4.27. Ön cam sıcaklık (K) dağılımı $t=900$. Saniye	44
Şekil 4.28. Sıcaklık (K) dağılımı ve kabin içindeki hava hareketi.....	44
Şekil 4.29. $t = 300$. saniye buz çözünme oranı	45
Şekil 4.30. $t = 600$. saniye buz çözünme oranı	46
Şekil 4.31. $t = 900$. saniye buz çözünme oranı	46
Şekil 4.32. $t = 1200$. saniye buz çözünme oranı	47
Şekil 4.33. $t = 1500$. saniye buz çözünme oranı	47
Şekil 4.34. $t = 1800$. saniye buz çözünme oranı	48
Şekil 4.35. $t = 2100$. saniye buz çözünme oranı	48
Şekil 4.36. $t = 2400$. saniye buz çözünme oranı	49
Şekil 4.37. Ön cama çarpan hava hızının (m/s) dağılımı	50
Şekil 4.38. Zamana bağlı ön cam buz çözünme dağılımı	51
Şekil 4.39. Deney başlangıcı $t=0$. Saniye ön cam buz çözünme oranı	51
Şekil 4.40. Deney $t=300$. saniye ön cam buz çözünme oranı	52
Şekil 4.41. Deney $t=600$. saniye ön cam buz çözünme oranı	52
Şekil 4.43. Deney $t=1200$. saniye ön cam buz çözünme oranı	53
Şekil 4.44. Deney $t=1500$. saniye ön cam buz çözünme oranı	53
Şekil 4.45. Deney $t=1800$. saniye ön cam buz çözünme oranı	54
Şekil 4.46. Deney $t=2100$. saniye ön cam buz çözünme oranı	54
Şekil 4.47. Deney $t=2400$. saniye ön cam buz çözünme oranı	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Havının malzeme özellikleri	17
Çizelge 3.2. Buzun malzeme özellikleri	18
Çizelge 3.3. Camın malzeme özellikleri	18
Çizelge 3.4 Model	30
Çizelge 3.5 Çözüm Metotları	30
Çizelge 3.6. Sonuçların karşılaştırması	55



1. GİRİŞ

Otomobil iklimlendirme sistemleri yolcuların güvenliği ve ısı konforunu sağlamakta başlıca rol oynamaktadır. Kış aylarında hava sıcaklıklarının sıfırın altına düştüğü bölgelerde otomobillerin camlarında oluşan buz tabakası sürücünün görüşünü engellemekte ve bu durum sürüş güvenliği açısından önem arz etmektedir. İklimlendirme ünitesi (HVAC) sıcak havayı en az dirençle kabin içerisine sağlamakla görevlidir ve bu uygulama ile ön/yan camlardaki buz ve buğuyu gidermesi soğuk hava koşullarında sürüş güvenliği sağlamaktadır. Camlarda oluşan buzun giderilmesinde iklimlendirme sisteminin verimi son derece etkilidir. Otomotiv endüstrisinde iklimlendirme sistemlerini geliştirmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yönteminden istifade edilmektedir. (Kumar V., Tare K., Sangeet K. 2010)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği alanında son yıllarda kaydedilen gelişmeler neticesinde otomotiv sektörü bu yöntemi aktif bir şekilde kullanarak, uygun test koşullarını sağlamak ve prototip maliyetlerine harcayacakları zaman ve paradan tasarruf ederken aynı zamanda bu yöntemle gerçekleştirilebilen simülasyon çeşitliliği sayesinde tasarladığı geliştirmeleri modellerine uygulayarak farklı çözüm önerilerinden elde edeceği sonuçları hızlıca ve karşılaştırmalı olarak gözlemleyebilmektedir.

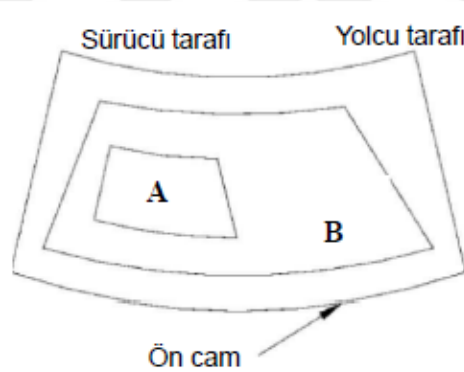
HAD yöntemi, akışkan hareket analizlerini içeren karmaşık mühendislik sistemlerinin, matematiksel modeller ve sayısal çözüm yöntemleri kullanarak sayısal simülasyonu olarak özetlenebilir. Daha önceki çalışmalarda sadece analitik veya deneysel çalışmalar yapılabilirken, HAD analizleri gelişen bilgisayar ve mikro işlemci teknolojisi ile birlikte artan bir hızla ilerlemekte ve ticari amaçlı yazılım şirketleri bu alanda daha çok kaynak aktarmaktadır. HAD yöntemiyle gerçekleştirilen sayısal analizler, deneysel çalışmalarla birlikte yürütülmekte ve deneysel verileri destekleyici ve tamamlayıcı niteliktedirler (Sevilgen 2010).

Buz Çözme Standartları

Otomotiv sektöründe sürüş güvenliği açısından son derece önemli olduğu anlaşılan buz buğu çözme faaliyeti, otomotiv üreticilerine konu ile ilgili bazı kısıtlamaları içeren standartların olması gerekliliğini zorunlu kılmıştır. Bununla ilgili 78/317/EEC Avrupa Birliği Standart'ı ve SAE J902A ABD Standart'ı olmak üzere 2 tür standart bulunmaktadır.

Avrupa Birliği Standardı, 78/317/EEC

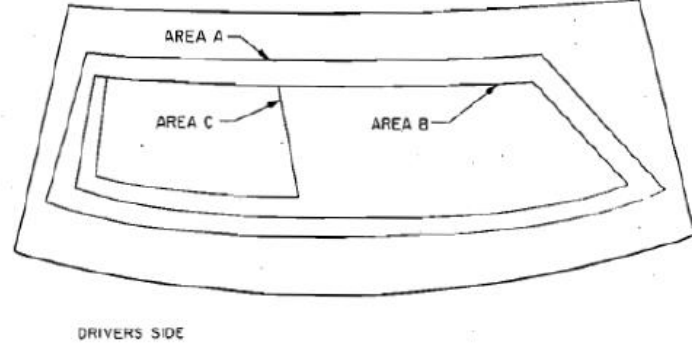
İlgili Avrupa Birliği standardında, şoför önünde kalan dikdörtgen bölge “A” bölgesi, camın kalan diğer tüm kısımları da “B” bölgesi olarak adlandırılır. Defroster açıldıktan 20 dakika sonra, “A” bölgesi içinde bulunan buz tabakasının %80'i açılmış olmalıdır. 25. dakikadan sonra yolcu bölgesinin % 80'i buzdan arınmış olmalıdır. 40 dakika sonunda ise “B” bölgesinin %95'i buzdan arındırılmış olmalıdır.



Şekil 1.1. Ön cam üzerinde görüş bölgeleri (AB Standardı)

ABD Standardı SAE J902A

Bu standarda göre ise binek otomobiller için ilk 30 dakikada minimum A bölgesinin %80'i, B bölgesinin %95'i ve C bölgesinin de %100'ü buzdan arındırılmış olmalıdır.



Şekil 1.2. Ön cam üzerinde görüş bölgeleri (ABD Standardı)

Bu tez çalışmasında, otomobil kabini üzerinde ön cam buz çözme simülasyonu gerçekleştirip elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılarak analizin doğruluğunun belirlenmesi istenmektedir. Bu analizde ön camdaki buzun çözünmesi sadece iklimlendirme elemanın sağladığı sıcak havanın etkisiyle olması amaçlanmıştır. Bunlar dikkate alınarak otomobil kabinin ön kısmı cam ve buz tabakası eklenerek birebir ölçülerde modellenmiştir. Bu cad model üzerinde buz çözme analizi yapılmak üzere ağ yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra uygun sınır şartları uygulanarak sadece iklimlendirme elemanın buzu çözmesini sağlayan sanal analiz gerçekleştirilmiş ve belirli süreler ile ön camda eriyen buzun görüntüleri ve bilgileri elde edilmiştir. Sonuçlar edinilen deneysel çalışma ile karşılaştırılmış ve doğrulanmaya çalışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölüm Literatür Taraması ve Kuramsal Temeller olarak ikiye ayrılmıştır. Literatür Taraması bölümünde daha önce konu ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar incelenerek buz buğu çözme için hız ve sıcaklık dağılımlarına ilişkin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yaklaşımı ile gerçekleştirilen sayısal analizler ve deneysel çalışmalara değinilmiştir. Kuramsal Temeller bölümünde ise Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) hakkında detaylı bilgi ve analiz esnasında gerçekleşen sayısal hesaplamaların temelleri anlatılmıştır.

2.1. Literatür Taraması

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği metodunun kullanılarak oldukça doğru sonuçlar elde edilmesinin yapılan deneyler ile belirlenmesiyle bilim insanları ve otomotiv üreticileri iklimlendirme (HVAC) elemanlarının performansını, gelişen teknolojiyle beraber daha iyi çözücüler vasıtasıyla kolayca ölçme imkânları yakalaması dolayısıyla bu konu hakkında birçok önemli bilimsel çalışma yapılmıştır.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların bir kısmında araştırmacılar, menfezlerden çıkan havanın hareketini incelemiş ön camın iç yüzeyine çarpan hava jeti konusunda analizler ve deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmaların temel amacı ön camdaki buz ve buğuyu temizlemekle beraber havanın kabin içerisindeki hareketini gözlemlemek aynı zamanda ön camdaki sıcaklık dağılımını belirlemektir. Bu veriler ışığında buz buğu çözme olgusu tanımlanarak, iklimlendirme elemanları ve tasarlanan sistemlerin performans kriterleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Nasr ve AbdoulNour, ön camdaki sıcaklık dağılımı ve hava akışı için ölçüm yöntemleri belirleyerek deneysel ve sayısal analizler içeren kapsamlı çalışmalar yapmışlardır. AbdoulNour, sıcak tel anemometresi kullanarak menfez çıkışı ve ön cama yakın bölgelerde hava hızı ölçümleri gerçekleştirmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanarak buz çözücü sistemin akış alanının sayısal simülasyonunu tartışarak test sonuçlarını doğrulamayı amaçlamıştır.

Buz çözme modeli ve buz çözme süreci için hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodolojisi, termograf sıcaklık dağılımı ve rüzgar tüneli testleri ile HAD sonuçlarını karşılaştıran Farag ve Huang tarafından tartışılmıştır.

Park ve arkadaşları, buz çözme sürecinde faz değişimlerini simüle etmiş ve buz çözme olgusunu sayısal analizlerini gerçekleştirmiştir.

Willenborg ve arkadaşları, menfezlerden çıkan ve ön camın iç yüzeyine etkiyen jet akışı sıcak kablo hız ölçümü ile gözlemlemiş ve belgelemiştir.

Ikeda ve arkadaşları, buz çözücünden çıkan ve ön cama etkiyen havanın hem deneysel hem de HAD analizleri sonuçlarını yayınlamıştır. Deneysel ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması için, HAD analizlerinde ticari bir kodun yapısal olmayan ağ yapısı kullanılmıştır.

Sugano ve arkadaşları, buz çözme modeli öngörüsü için deneysel veriler ile uyum gösteren üç boyutlu hava akış analizi kullanarak bir sayısal metot belgelemiştir.

AbdoulNour ve Fous, Brewster ve arkadaşları, akış alanının yönü ve değeri bakımından nitelikli veriler elde edebilmek için buz çözücü ve ön cam hava akışının sayısal analizini gerçekleştirmişlerdir.

Bununla birlikte çarpan hava jetinin yüzeydeki ısı transferi hakkında literatürde geniş ölçüde yayın bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğu, düz yüzeylere asimetric çarpan hava jeti kullanarak laboratuvar kontrollü sistemler ile problemi deneysel veya sayısal olarak modelleme teorisine odaklanmıştır.

Polat ve arkadaşları çarpan hava jeti ile ilgili sayısal çalışmaları içeren yayın yapmışlardır. Çapraz akış içinde sıkıştırılmaz hava jeti konusunda Andreopoulos ve Rodi deneysel bir çalışma raporlamışlardır.

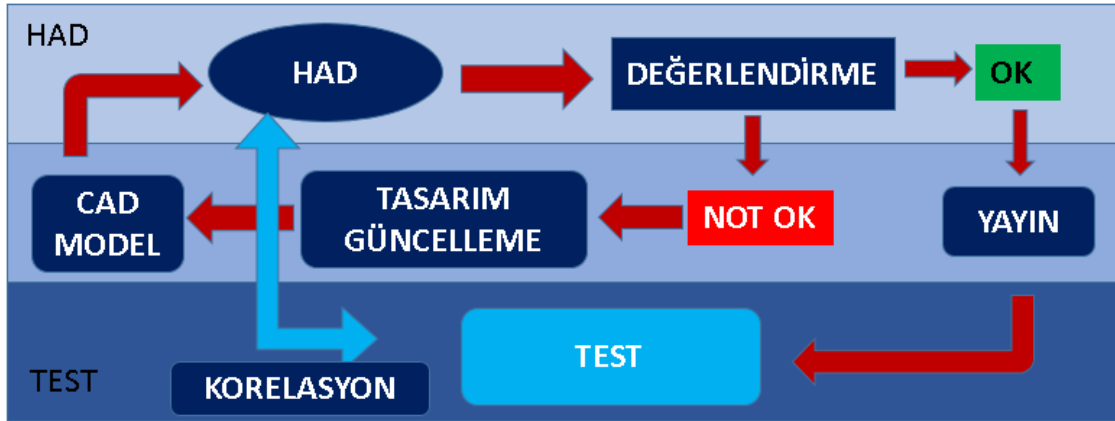
Subrata ROY, Karim NASR, Paresh PATEL ve Bashar AbdoulNour, eğimli bir yzeydeki çarpan hava jetinin termal akış karateristiklerini tanımlayan bir çalışmaya imza atmışlardır. Isı akısı bilgisi için bölgesel yzey sıcaklığının deneysel ölçümleri, sıvı kristaller kullanılarak gerçekleştirilmiş ve Simmonich ve Moffat'ın çalışmalarındaki benzer bir teknik referansı ile bölgesel ısı transfer katsayıları belirlenmiştir. Yzey ve çarpan hava jeti arasındaki ısı transfer katsayıları haritası gösterilmiş, sayısal sonuçlar ile deneysel veriler karşılaştırılıp sonuçlar doğrulanmıştır.

Vivek Kumar, Kedar Tare ve Sangeet Kapoor HAD yöntemiyle komple bir araç kabin geometrisi kullanarak ön cam üzerinde hava akış optimizasyonu üzerinde çalışmış ve bu sayede iklimlendirme elemanlarının buz çözme performansını daha az maliyet, zaman ve iç gücüyle değerlendirme imknı bulmuşlardır.

2.2. Kuramsal Temeller

2.2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi, akışkan davranışını matematiksel modeller yardımıyla bilgisayar üzerinden hesaplama esasına dayanan bir sayısal analiz metodudur. Bir diğer deyişle, akışkan hareketini içeren sistemler ısı transferi ve ilgili olaylarını bilgisayar tabanlı simülasyonlar yoluyla analiz edilir. Tasarım döngüsünde CFD (HAD) analizlerin kullanımı, final tasarımın oluşmasındaki adımları direkt azaltmakta, daha kısa teslim süresi ve prototip maliyetlerinde iyileşme sağlamaktadır. CAD model olduğu ilk andan itibaren, termal veya akış açısından bir sorun olup olmadığının doğrulaması CFD analizi ile gerçekleştirilebilir. Datanın uygunluğu, prototip üretimini beklemek yerine tasarımın erken aşamalarında ayarlanabilir ve optimize edilebilir. Bu durum zaman ve maliyetler açısından önemli kazançlar sağlamaktadır.



Şekil 2.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi Kullanılarak Tasarım Süreci

Her ne kadar HAD (CFD) ile ilgili çalışmaların kökeni sonlu farklar ve çeşitli sayısal modeller kullanılarak yapılan araştırmalar vasıtasıyla 1920'lere kadar dayansa da en somut örnek olarak gösterilebilecek bilimsel çalışmalar 1950 lerde Amerika Birleşik Devletleri'nin Los Alamos ve Livermore laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra HAD yöntemi, birçok matematikçi, fizikçi ve mühendis bilim adamının ilgisini çekmiş ve günümüze kadar çok sayıda çalışma yapılarak farklı alanlarda problemlerin çözümünde kilit rol oynamıştır. (Bram van Leer and Kenneth G. Powell)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi, endüstriyel alanlarda ve endüstriyel olmayan uygulama alanlarında oldukça güçlü ve yaygındır. Bazı örnekler:

- Uçak ve araç aerodinamiği
- Gemilerin hidrodinamiği
- İçten yanmalı motorlar ve gaz türbinleri
- Turbomakinalar
- Elektrik ve Elektronik Mühendisliği uygulamaları
- Kimyasal Proses Mühendisliği uygulamaları
- Yapıların iç ve dış ortamları ile ilgili uygulamalar
- Çevre Mühendisliği uygulamaları
- Hidroloji ve okyanus bilimi uygulamaları
- Meteoroloji
- Biomedical Mühendisliği uygulamaları

olarak ifade edilebilir. (Versteeg and Malalasekera, 1995)

HAD metodu yardımıyla ilgili alanlardaki fiziksel problemler 3 aşamalı bir çözüm yöntemi ile çözülür.

- Pre Processing (Ön-işlem): Modelin oluşturulması, tanımlamalar ve ağ yapısı düzenlemelerini içeren işlemlerdir.
- Processing (Ana-işlem): Sınır şartlarının tanımlandığı ve çözümün gerçekleştiği aşamadır.
- Post-Processing (Son- işlem): Sonuçların model üzerinde ve grafiksel olarak görüntülendiği ve değerlendirildiği son aşamadır.

2.2.2. Ayırıklaştırma

Bir bilgisayar yalnızca sınırlı sayıda bilgi taşıyabilir ve işleyebilir, böylece kısmi diferansiyel denklemlerin çözümleri sınırlı bir data tarafından temsil edilmiş olmalıdır. Bu sebeple uzay zaman sürekliliği hesaplamalı mesh yapısı olarak bilinen küçük hücrelere bölünür. Data sonlu farklar için uygun şekilde ağın düğüm noktasında nokta örnekleri gibi yazılmış olabilir yada sonlu hacimlere uygun olarak meshin iç yüzeyinin ortalama değeri olabilir. Bu çalışmada mesh içindeki çözümün davranışı detaylıca enterpolasyonla tahmin edilmiş olmalıdır. Buna karşın sonlu elemanlar metodunda bir mesh içindeki çözüm ağırlıkları bağımsız veriler temel fonksiyonların toplamı tarafından detaylı olarak tanımlanır. Kısmi diferansiyel denklemler yardımıyla azaltılmış bir veri kümesi ile sonucu tayin etme işlemine ayırıklaştırma denir.

2.2.3. Diferansiyel Akış Analizi

Hesaplamalı akışlar dinamiğinde akış diferansiyel denklemler ile tanımlanır. Akışkan analizinde en doğru sonuçları veren teknik deneysel çalışmalardır. Ancak deneysel çalışmalar için kullanılan prototip, test düzeneği maliyetleri ve zaman kaybı göz önüne alınarak farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin başında teorik yaklaşımlar gelmektedir. Teorik yaklaşım içinde de diferansiyel analiz yapılmakta bu da diferansiyel denklemler ile elde edilmektedir. Bu diferansiyel denklemlerin analitik olarak çözülemediği durumlarda sayısal çözümler kullanılmaktadır. Bu sayısal çözümleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi olarak adlandırabiliriz.

Sayısal hesaplamalar sürekli ve geçici rejim durumu için gerçekleştirilmiştir. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri genel olarak gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = S_m \quad (2.1)$$

Bu denklemde yer alan S_m kaynak terim şeklinde ifade edilir. Sisteme eklenen kütleyi ifade eder. Örneğin faz değişimi sırasında buharlaşma sonucunda eklenen kütle miktarını gösterir. Momentum ve enerji denklemleri ise 2.2 – 2.5 'de ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{M_x} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \nabla(\mu \nabla v) + S_{M_y} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \nabla(\mu \nabla w) + S_{M_z} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla(\rho e \vec{V}) = -p \nabla \vec{V} + \nabla(k \nabla T) + \Phi + S_e \quad (2.5)$$

Yukarıda kartezyen koordinat sisteminde ifade edilen denklemlerde; ρ yoğunluğu, $\vec{V}$ hız vektörünü, u , v ve w hız vektörlerinin sırasıyla x , y ve z bileşenlerini, S_m kütle kaynak terimini, S_M momentum kaynak terimini, p basıncı, S_e enerji kaynak terimini, Φ ise disipasyon (yayınım) terimini temsil etmektedir. Disipasyon terimi enerji kaybını ifade eder. Sayısal hesaplamalarda standart k - ϵ türbülans modeli seçilmiştir. Bu türbülans modeli, literatürdeki sayısal sonuçların kararlılığından dolayı bu tür hesaplamalar için kullanılır (Sevilgen ve Kılıç 2012).

HAD yönteminde diferansiyel denklemler çözüldüğü için bu denklemler belirli sınır şartları ve başlangıç şartları ile tamamlanmalıdır.

2.2.4. Türbülans Modelleri

Üç yönde hız bileşenlerinin sürekli ve periyodik olmayan çalkantı hareketlerine türbülans denilmektedir. Türbülanslı akış çalkanan hız alanı olarak karakterize edilmektedir. Bu çalkantılar momentum, enerji ve konsantrasyon türleri gibi taşınan niceliklerin karışımıdır ve küçük ölçek ve yüksek frekansta olmasından dolayı onların direk olarak pratik mühendislik hesaplarında simüle edilmesi hesaplamasal olarak çok zordur. Gerçek ana denklemleri kullanmak yerine ana denklemler üzerinde değişiklikler yapılarak hesaplama maliyeti ve çözümlenememe olayı azaltılır. Ancak değiştirilmiş bu denklemler ek bilinmeyen değişkenler içerecek ve türbülans modelleri bu değişkenleri bilinen nicelikler kullanarak hesaplaması gerekecektir. (ÖZCAN 2004)

Fluent yazılımının kullandığı türbülans modelleri;

1. Spalart Allmaras
2. k- ϵ modelleri (iki denklemliler)
 - Standart
 - Renormalization-Group (Yeniden normalize edilmiş)
 - Realizable
3. k- ω modelleri (iki denklemliler)
 - Standart
 - Shear Stress Transport (SST)
4. v^2 -f Model
5. Reynolds Stress Model (beş denklemliler)
6. Large Eddy Simulation Model (LES)

Her akışın farklı başlangıç ve sınır şartları olmasından dolayı her akış için aynı türbülans modeli kullanılarak doğru sonuçlar elde etmek mümkün değildir. Bu nedenle akışın başlangıç ve sınır şartları, simülasyon zamanı, doğruluk seviyesi, akışın fiziksel çevresi incelenerek doğru türbülans modeli seçilmelidir. (ÖZCAN 2004)

2.2.5. Katılaşma ve Ergime Modülü (Solidification and Melting)

Otomobil camlarındaki buz çözme analizleri, menfezlerden çıkan zamana bağlı sıcaklığı artan havanın ön cama çarpmasıyla (bu olay çarpan hava jeti olarak bilinir (impinging jet)) cam üzerinde ve camdan da dış yüzeydeki buz tabakasına ısı transferi gerçekleşmesi sonucunda yapılmaktadır. HAD analizleri için Fluent ticari yazılımı ısı transferinin iletim ve taşınım modlarını kullanır. Katılaşma ve ergime modülü için Fluent entalpi-gözeneklilik (enthalpy-porosity) tekniği kullanılmaktadır. Bu teknikte, “ β ” değişkeni herhangi bir hücredeki sıvılaşma oranını tanımlamaktadır. Sıvı yüzdesi “ β ”, buz tabakasındaki her bir hücre ile ilişkilendirilir ve hücrenin sıvı içeriğini belirlemek için her bir hücrede entalpi dengesi hesaplamaları yapılır. Malzemenin entalpisi aşağıda belirtildiği gibi tanımlanır.

$$H = h + \Delta H$$

h = duyulur entalpi

$$\Delta H = \text{gizli ısı} = \beta L$$

L = Malzemenin gizli ısı

β = Sıvılaşma oranı

Her hücre için tanımlanan sıvılaşma oranı ' β ', hücrede bulunan sıvı içeriğine bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır. (Ansys Fluent 17.1 Theory Guide)

$$\beta = \begin{cases} \frac{\Delta H}{L} = 0 & \text{ise } T < T_{katı} \\ \frac{\Delta H}{L} = 1 & \text{ise } T > T_{katı} \\ \frac{\Delta H}{L} = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}} & \text{ise } T_{katı} < T < T_{sıvı} \end{cases}$$

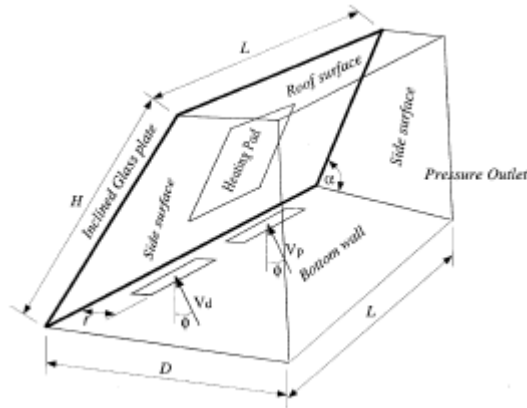
3. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla gerçekleştirilen araç ön cam buz çözme analizleri anlatılmıştır. Öncelikle basit modeller ile yapılan analizler açıklanmış daha sonra birebir boyutlardaki matematiksel modelinden ölçülerek tasarlanan FIAT DOBLO kabini üzerinde buz çözme analizleri gösterilmiştir. Son kısımda ise TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. tarafından gerçekleştirilen deney verileri ile sonuçların doğrulanması sağlanmaya çalışılmıştır.

3.1. Analiz-1 Basit Model Üzerindeki Analiz

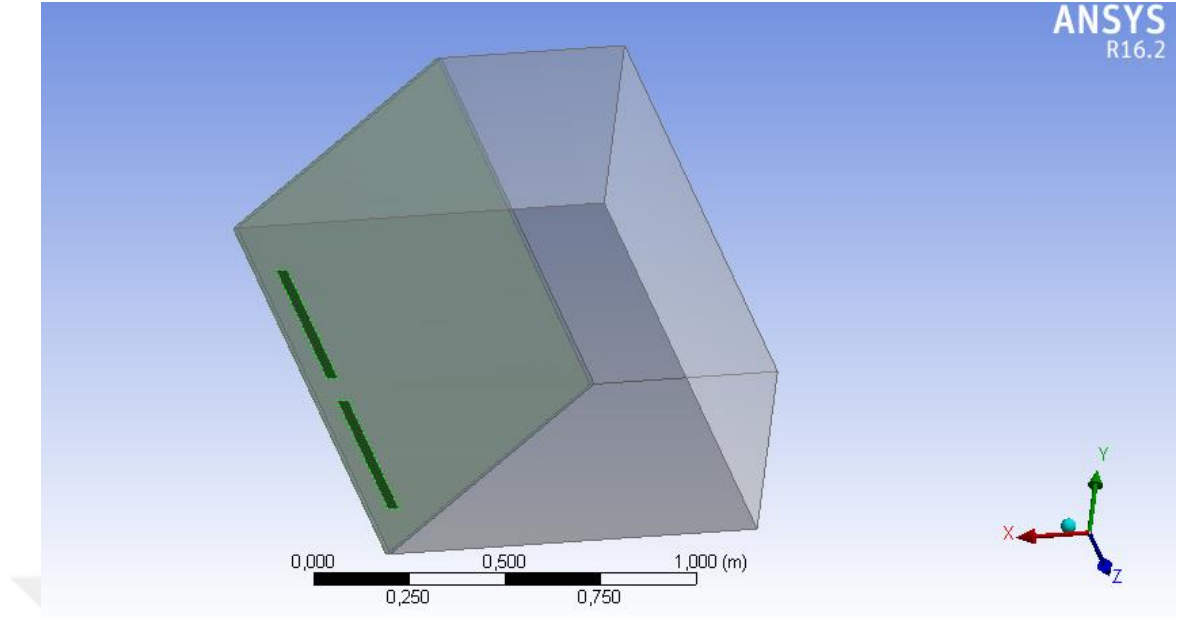
3.1.1. Modelin Oluşturulması

Buz çözme analizleri ilk aşamada, araç kabinini kısmen temsil eden Subrata Roy ve arkadaşlarının ‘An experimental and numerical study of heat transfer off an inclined surface subject to an impinging airflow’ isimli çalışmasındaki modele benzer bir geometri kullanılarak çalışma yapılmıştır. Bu çalışmanın farkı ön camda bir ısıtıcı yastığının bulunmasıdır. (Subrata Roy, Karim Nasr, Paresh Patel ve Bashar AbdulNour, 2002)



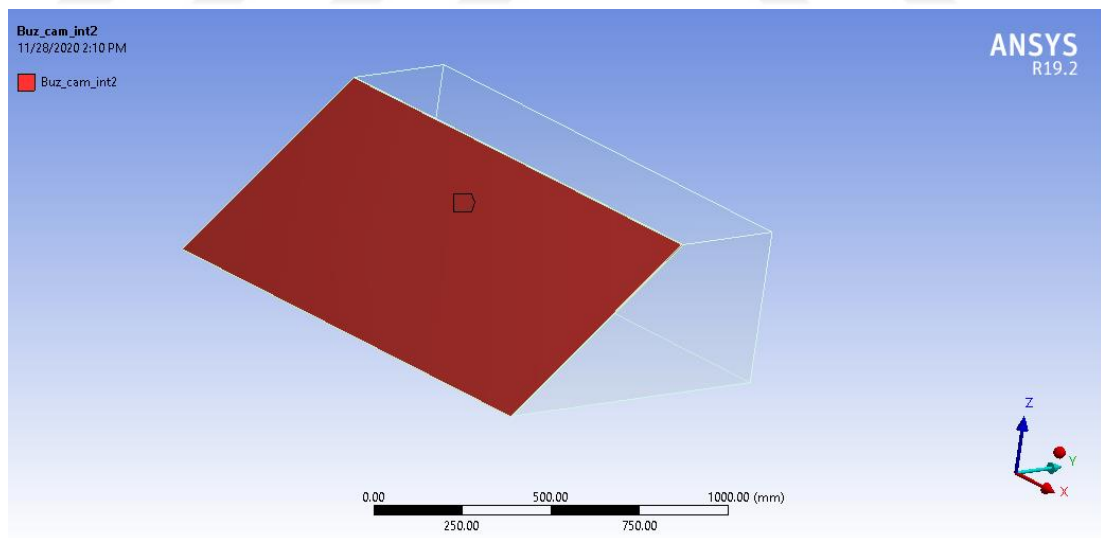
Şekil 3.1. Subrata Roy ve arkadaşlarının kullandığı model (Subrata ROY 2002)

Geometri Ansys Workbench'in 'Design Modeler' bölümünde tasarlanmıştır. Kabin bölgesi için hava, kabinin ön tarafına 10 mm kalınlığında cam ve camın önünde de 1 mm kalınlığında buz tanımlanmıştır. Kabin, cam ve buz tabakaları 'Form New Part' komutu kullanılarak ilişkilendirilmiş ve tek bir model haline getirilmiştir. Bunun nedeni ağ yapısı oluşturulurken düğüm noktalarının kabin, cam ve buz için kesişmesini sağlamaktır.



Şekil 3.2. Kabin Geometrisi-1

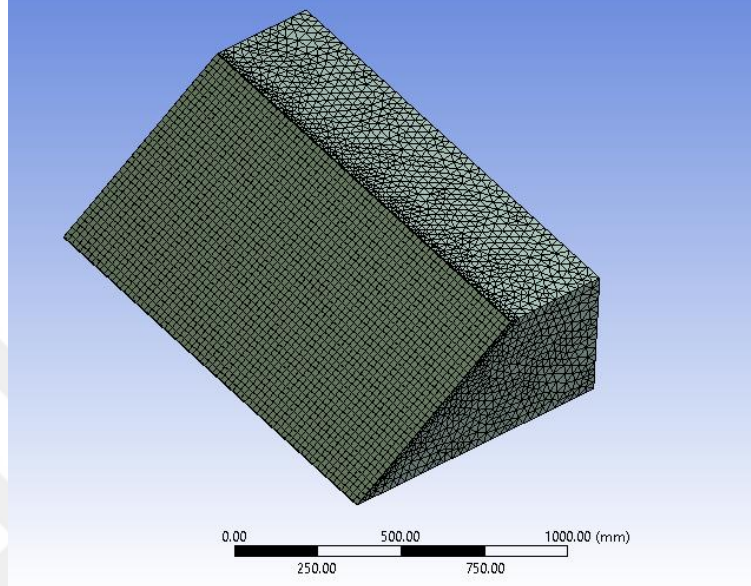
Model üzerinde isimlendirme yapılarak sınır şartlarının rahatça tanımlanmasına olanak sağlanmıştır.



Şekil 3.3. İsimlendirilmiş kabin

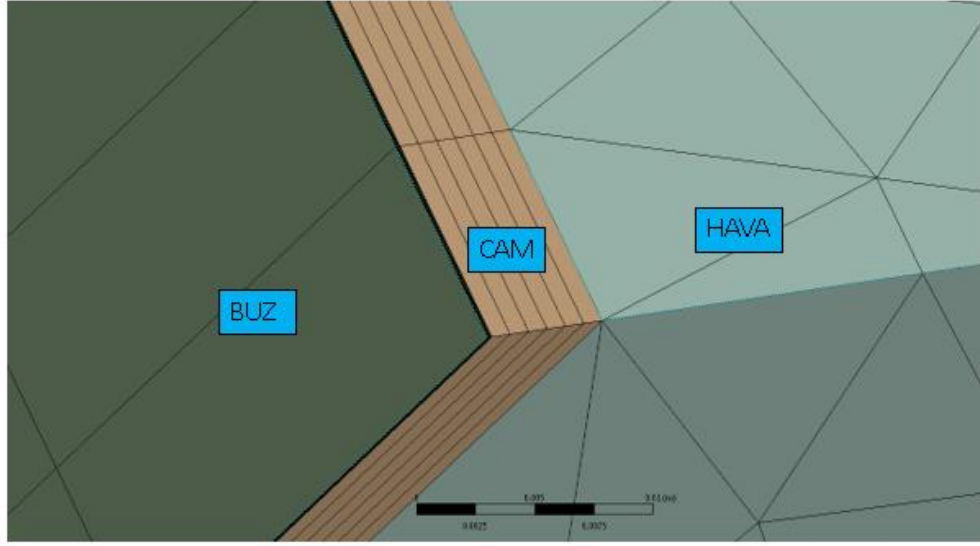
3.1.2 Ağ Yapısı Oluşturulması (Mesh Atma İşlemi)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinin bir sonraki aşaması model için ağ yapısı oluşturulmasıdır. Mesh atılması olarak da söylenebilir. Ansys Workbench yazılımının ‘Mesh’ sekmesi kullanılarak oluşturulan model için ağ yapısı oluşturulmuştur.

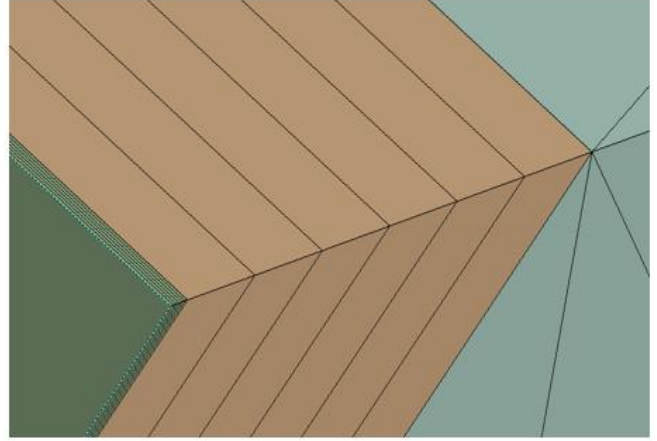
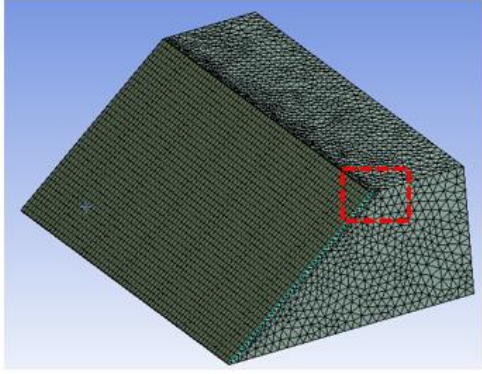


Şekil 3.4. Modelin ağ yapısı oluşturulmuş hali

Sayısal çalışmalarda buz ve cam tabakaları için hexahedron elemanlar kullanılmış kabin ortamı için ise tetrahedron elemanlar kullanılmıştır. Buz, cam ve kabini ‘Form New Part’ komutu sayesinde tek bir part altında toplandığından dolayı düğüm noktaları aynı noktada birbiri ile eşleşmektedir. Ayrıca cam ve buz çok iki tabaka olduğundan dolayı o bölgelerdeki hesaplamaların daha doğru sonuçlar vermesi açısından kalınlıkları yönünde tabakalara ayrılmışlardır. Bu Ansys Workbench’in Mesh Metotları içindeki ‘Sweep Method’ sayesinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.5’de ağ yapısı üzerinde buz, cam ve hava tabakalarının hangi bölgeleri ifade ettiği gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Model ağ yapısı buz, cam, hava



Şekil 3.6. Basit model ağ yapısı (Sweep Method)

Basit model için oluşturulan ağ yapısı 197756 elemandan ve 64580 düğüm noktasından oluşmuştur.

3.1.3. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

Modelin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri için mesh atılmış model Ansys Fluent içinde açılarak analiz işlemi için gerekli işlemler başlatılmıştır. Analiz aşaması iki farklı çözümden oluşmaktadır. İlk aşamda akış (Flow) ve türbülans (Turbulence) denklemleri zamandan bağımsız (Steady State) olarak çözödürölmekte daha sonra enerji (Energy) denklemi zamana bağılı (Transient) olarak çözödürölmüştür. Türbölans modeli olarak iki denklemlili Standard k-epsilon seçölmüştür. Energy sekmesi aktif edilmiş ve buz çözme analizleri için kullanılan Katılaşma ve Ergime modölü (Solidification and Melting) aktifleştörlmüştür.

Hava, cam ve buz için malzeme özellikleri aşğıdaki tablolarda verilen şekilde Fluent'e tanımlanmıştır.

Kabin için Fluent içinde varsayılan olarak verilen havanın malzeme özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Havinin malzeme özellikleri

HAVA (AIR)	
Yoğunluk (Density) kg/m^3	1,225
Cp (Specific Heat) $J/kg\cdot K$	1006,43
Isıl iletkenlik (Thermal Conductivity) $W/m\cdot K$	0,0242
Viskozite (Viscosity) $kg/m\cdot s$	1.7894e-05
Saf çözücü erime ısısı (Pure solvent heat melting) J/kg	0
Katılaşma sıcaklığı (Solidus temperature) K	0
Erime sıcaklığı (Liquidus temperature) K	0

Buz için belirlenen malzeme özellikleri Fluent'e tanıtılmış ve modelin buz kısmı olarak tasarlanan bölümü bu malzeme ile eşleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Buzun malzeme özellikleri

BUZ (ICE-WATER)	
Yoğunluk (Density) kg/m^3	920
Cp (Specific Heat) $J/kg\cdot K$	2040
Isıl iletkenlik (Thermal Conductivity) $W/m\cdot K$	1,88
Viskozite (Viscosity) $kg/m\cdot s$	0,00553
Saf çözücü erime ısısı (Pure solvent heat melting) J/kg	334960
Katılaşma sıcaklığı (Solidus temperature) K	271
Erime sıcaklığı (Liquidus temperature) K	273

Cam için ise aynı şekilde malzeme özellikleri Fluent'e tanımlanmış ve modelin ilgili kısmı cam olarak tanıtılmıştır.

Çizelge 3.3. Camın malzeme özellikleri

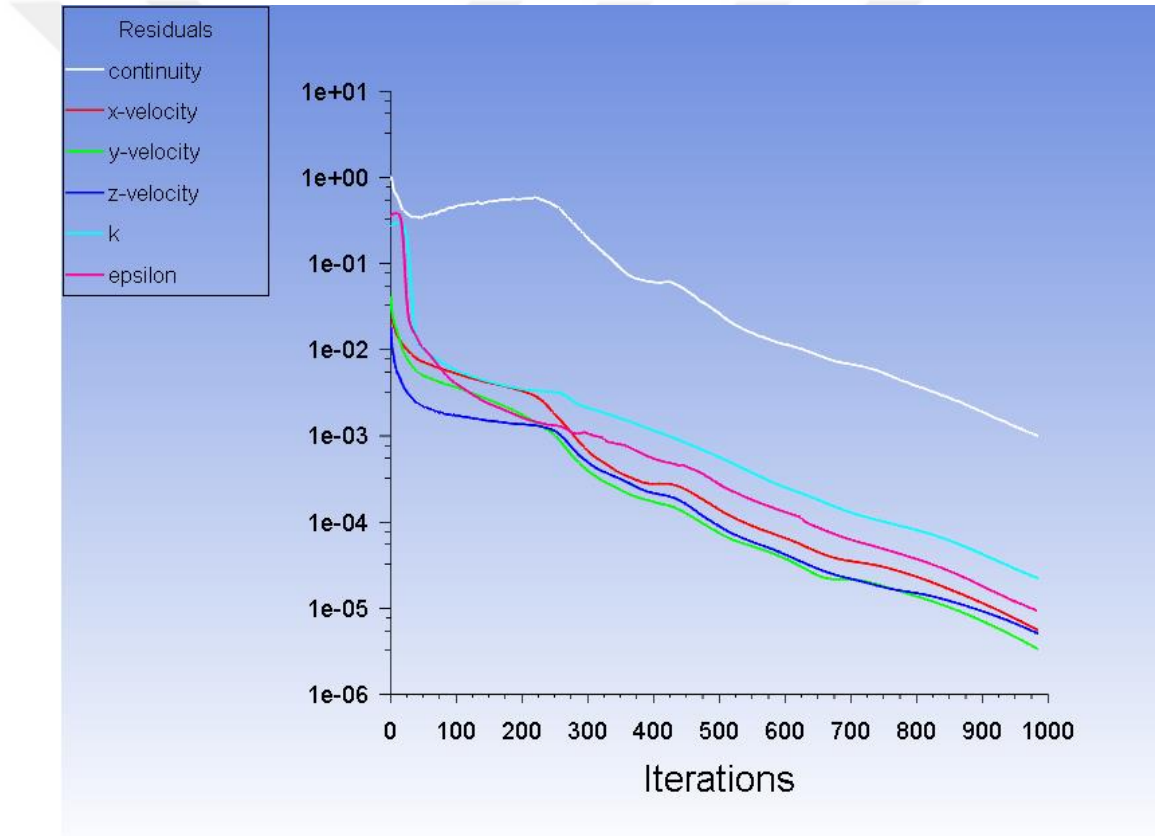
CAM (GLASS)	
Yoğunluk (Density) kg/m^3	2400
Cp (Specific Heat) $J/kg\cdot K$	750
Isıl iletkenlik (Thermal Conductivity) $W/m\cdot K$	0,93

Malzemeler tanımlandıktan ve ilgili bölgelerin hangi malzeme cinsinden olacağı programa tanıtıldıktan sonra sınır şartları girilmiştir. Ön cam bölgesine gelen sıcak havanın cama çarpıp cama ısı transferi sağlaması ve camın dış tarafındaki buza sıcaklığı iletip buzun sıvılaşmasını sağlamak burada temel amaçtır. Bu nedenle menfez olarak belirlenen yüzeyler giriş (velocity-inlet) olarak tanımlanmıştır. Havanın hızı 3,2 m/s ve sıcaklığı ise 273 K olarak seçilmiştir. Havanın çıkış yüzeyi ise modelin arka yüzeyi seçilmiş (pressure-outlet) ve çıkış basıncı için ölçülen basınç 0 Pascal girilmiştir.

Analizin ilk aşaması için Türbülans ve Akış eşitlikleri seçilmiştir. Artık terimlerin (Residuals) yakınsamasının (converge) sağlanmasının sınır değeri olarak her terim için 10^{-3} değeri seçilmiştir. Analiz için model başlangıç koşullarına uygun şekle getirilerek analizin ilk aşaması gerçekleştirilmiştir. 985 iterasyon sonunda yakınsama sağlanmıştır. İterasyonların bilgisinin gösterildiği konsol görünümü Şekil 3.7.'de gösterilmiştir.

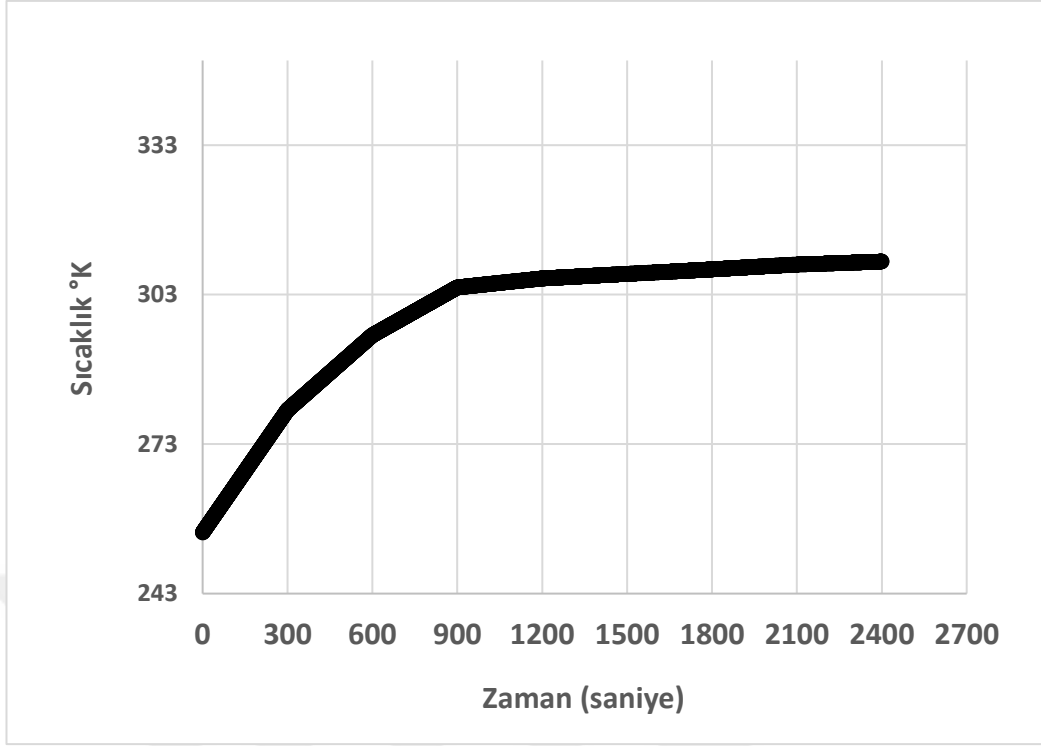
```
reversed flow in 127 faces on pressure-outlet 12.
! 985 solution is converged
985 9.9599e-04 5.5761e-06 3.3661e-06 5.0855e-06 2.2298e-05 9.2882e-06 0:04:04 515
Calculation complete.
```

Şekil 3.7. Konsol görünümü



Şekil 3.8. İterasyonlar ve yakınsamanın grafiği

Analizlerin ikinci aşaması için ise öncelikle zamana bağlı olacağı için Transient çözüme geçilmiştir. Menfezlerden çıkan havanın zamana bağlı sıcaklık değişimini ifade eden “Deicing_temp” isimli tab dosyası formatındaki tablo Fluent yazılımına tanımlanmıştır.



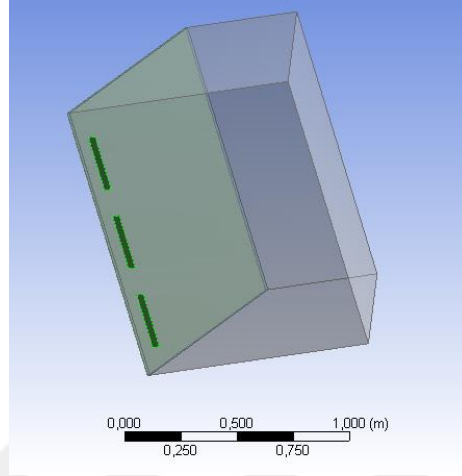
Şekil 3.9. Zamana bağlı Sıcaklık Grafiği

Giriş menfezinden çıkan havanın zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Burada sıcaklık Kelvin zaman saniye cinsinden ifade edilmiş ve programa bu şekilde tanımlanmıştır.

Sınır şartları bu tablo ile beraber değiştirilmiştir. Analizin ikinci aşamasında enerji çözümü gerçekleştirilirken giriş havasının sıcaklığı zamana bağlı olarak tabloya göre değişecektir. Bunun için giriş menfezine, programa tanımlanan tablo girilmiştir. Giriş havasına sıcaklık tanımı yapıldıktan sonra Enerji hesaplaması aktif edilmiştir.

Enerjinin zamana bağlı çözümü ile birlikte analizlerin ilk aşaması tamamlanmaktadır. Bu çalışma içerisinde aynı kabin model için menfez geometrisinde değişikliğe gidilerek analizler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

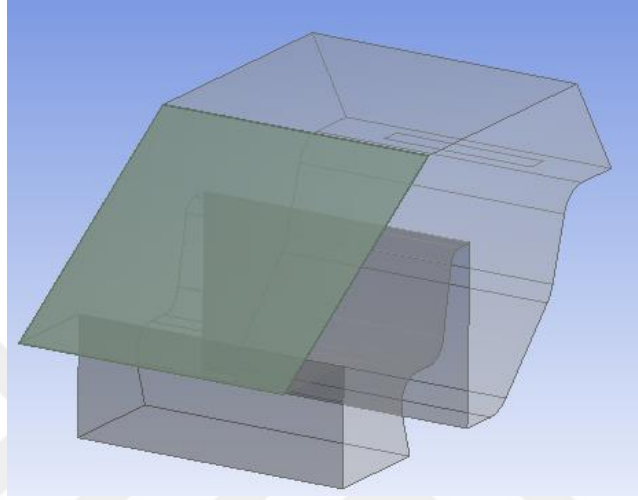
Menfez geometrisinde değişiklik yapılmış modele fazladan bir menfez eklenmiş ancak kabin içine giren hava debisinde değişiklik olmaması açısından debi hesabı yapılmıştır. Bu hesaba göre menfezlerden girecek hava hızı belirlenmiştir.



şekil 3.10. Menfez eklenmiş model

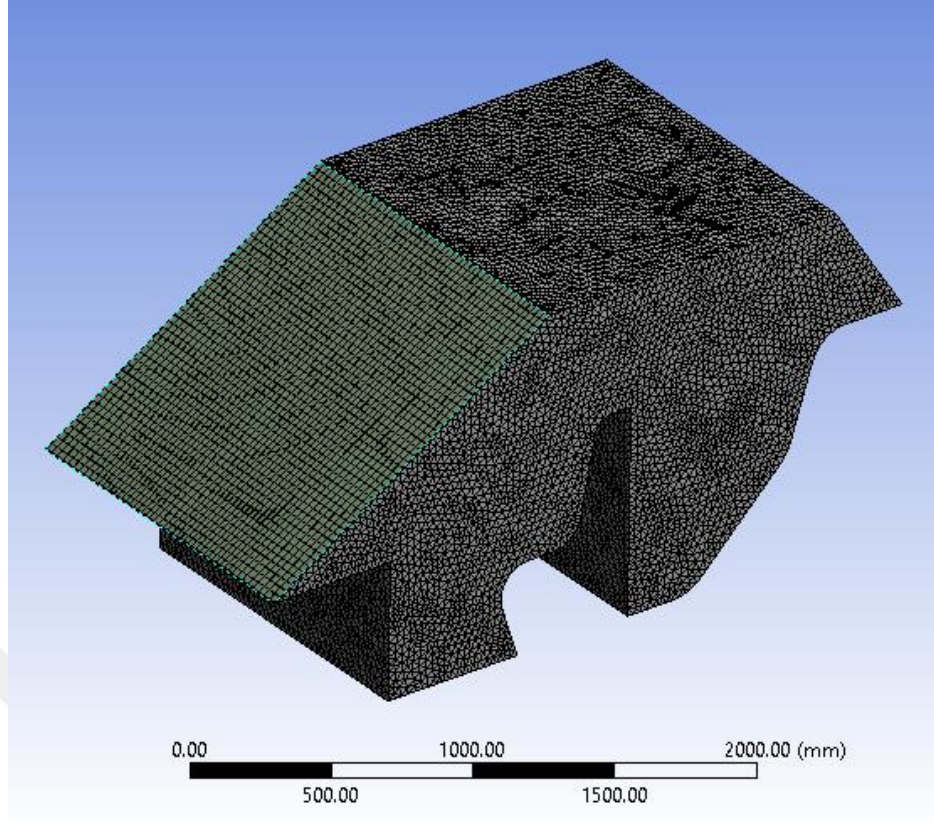
3.2. Analiz-2 Model Geliştirmesi

Oluşturulan basit geometri ile yapılan çalışmadan sonra model otomobil kabinine biraz daha benzer olacak şekilde geliştirilmiş ve gerçek boyutlarda bir araç kabinin, ön cam ve buz tabakası modeli oluşturulmuştur.

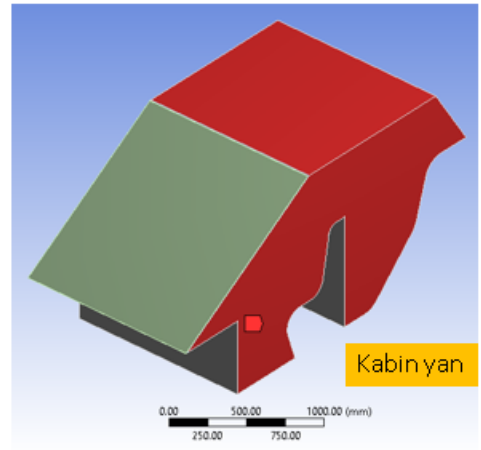
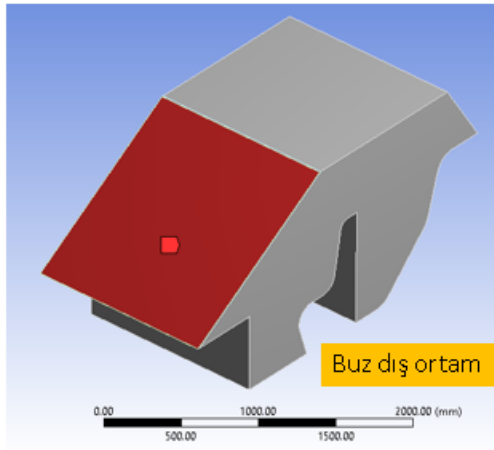


şekil 3.11. Kabin Geometrisi – 2

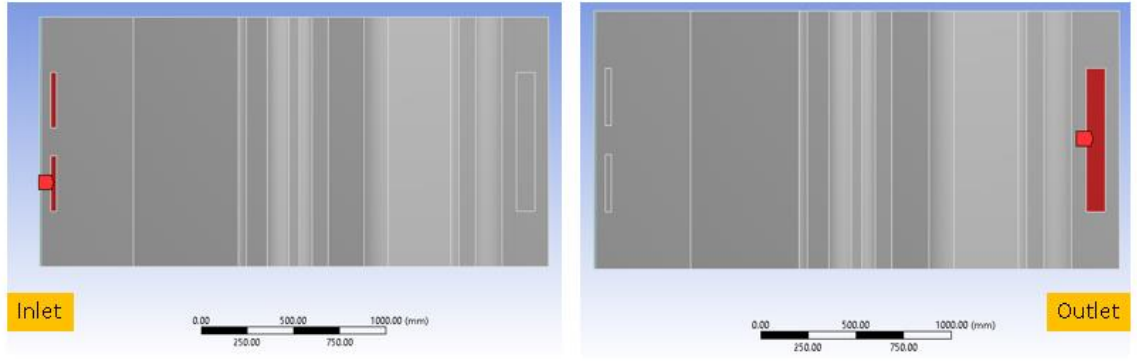
Oluşturulan modelde ağ yapısı oluşturulmuştur ve yapılan ilk analizle benzer şekilde kabin, cam ve buz tabakaları ortak bir part haline getirilip mesh işleminde “sweep method” kullanılmıştır. İsimlendirme işlemi de ilk analize benzer şekilde yapılmıştır. İsimlendirmelerde modelin tüm yüzeyleri tanımlanmış havanın kabine alınacağı giriş menfezini temsil eden yüzey Fluent’in sınır şartlarında algılaması açısından “inlet” olarak isimlendirilmiş çıkışta aynı nedenden ötürü “outlet” olarak isimlendirilmiştir.



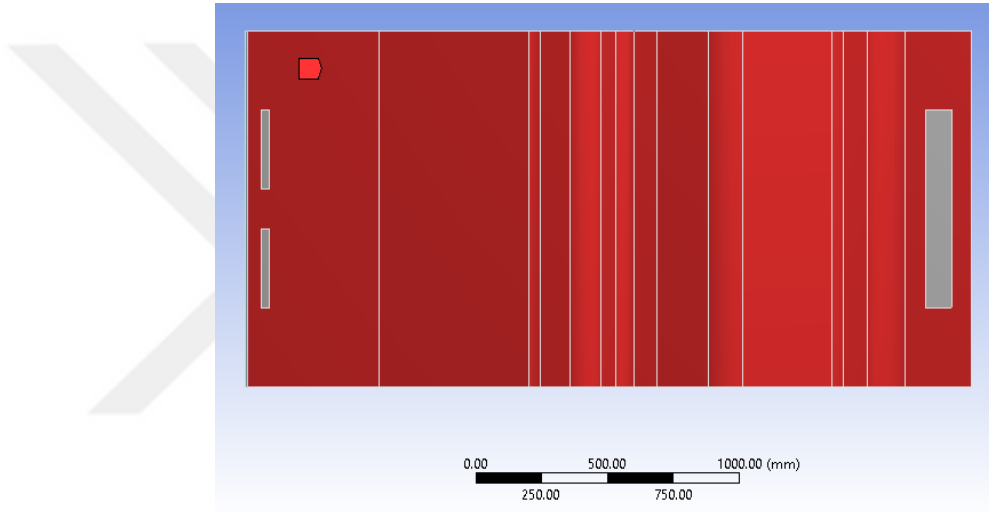
Şekil 3.12. Kabin-2 Ağ Yapısı



Şekil 3.13. İsimlendirme Buz dış ortam ve Kabin yan



Şekil 3.14. Giriş ve Çıkış (Alttan bakış)



Şekil 3.15. Kabin Alt (Alttan bakış)

Modelin ağ yapısı 934212 elaman ve 183174 düğüm noktasından oluşmaktadır. Kabin-2 olarak adlandırılan bu model daha sonra Fluent Mesh formatında kaydedilip Fluent içinde açılmıştır ve basit modelin analizindeki adımlar aynı şekilde izlenerek iki aşamalı analiz gerçekleştirmiştir. General sekmesinde ilk aşamada “steady state” seçilir, check işlemi yapılarak maksimum ve minimum yüzey alan değerlerinin negatif olmamasına dikkat edilmiştir. Models sekmesinde Enerji ve Solidification and Melting aktif edilerek Viscous model Standard k-epsilon seçilmiştir. Malzeme bilgileri kabin, cam ve buz için Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3’ teki bilgiler baz alınarak tanımlanmıştır. Sınır şartları giriş hızı deney verilerine uygun şekilde ve çıkış basıncı da 0 Pa olarak tanımlanmıştır. Solution Controls kısmında Equations sekmesinde analizin ilk aşaması için Turbulance ve Flow eşitlikleri aktif edilmiştir. Yakınsama değerleri için artık katsayıları minimum $1e-3$ ’e kadar azalma

limiti tanımlanmıştır. Initialization kısmında durum başlangıç koşullarına alınır. Run Calculation kısmında da iterasyon başlatılmıştır.

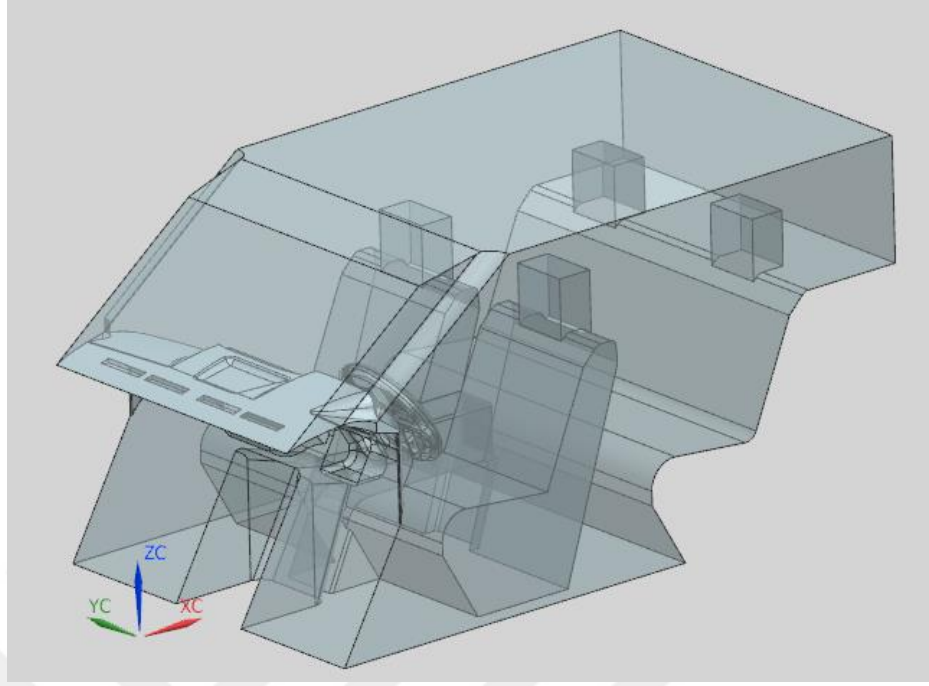
Analizin ikinci kısmında ise ‘transient’ durumu aktif edilerek Şekil 3.9’da belirtilen giriş havasının zamana bağlı sıcaklık değişim tablosu Fluent’e yüklenmiştir. Şekil 3.9’da gösterilen grafikte sıcaklığın birimi °K, zamanın birimi saniye olarak verilmiştir. Bu tablo sınır şartlarında giriş havasına tanımlandıktan sonra Enerji eşitliği aktif edilmiştir. Run Calculation kısmında zaman adımı sayısı ve bu adımların saniye cinsinden süresi girilerek analiz başlatılmıştır. Analizlerin sonuçları ve değerlendirmeleri ilerleyen bölümlerde paylaşılacaktır.

3.3. Otomobil Kabini Buz Çözme Analizi (Analiz-3)

Çalışmaların başından itibaren basit modellerden başlamak suretiyle giderek otomobil kabinine daha çok benzeyen modeller tasarlanmış ve bu modeller ile ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri gerçekleştirilmiştir. Basit modeller ile gerçekleştirilen analizler ile hızlıca sonuçlar alınmış ve bu sonuçları detaylı kabin modellerine uygulanması üzerinde çalışılmıştır. Literatürden yararlanarak çeşitli sınır şartları ve çözüm metotları üzerinde denemeler yapılmıştır. Bu çalışmalara örneklem olacak 3 farklı analiz daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu bölümde ise TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş. ‘den elde edilen buz çözme deneyi doğrulama sağlaması için kullanmak amacıyla deney verilerinde kullanılan modeli yansıtan bir model ve deney verilerindeki başlangıç ve sınır şartları birebir kullanılarak detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

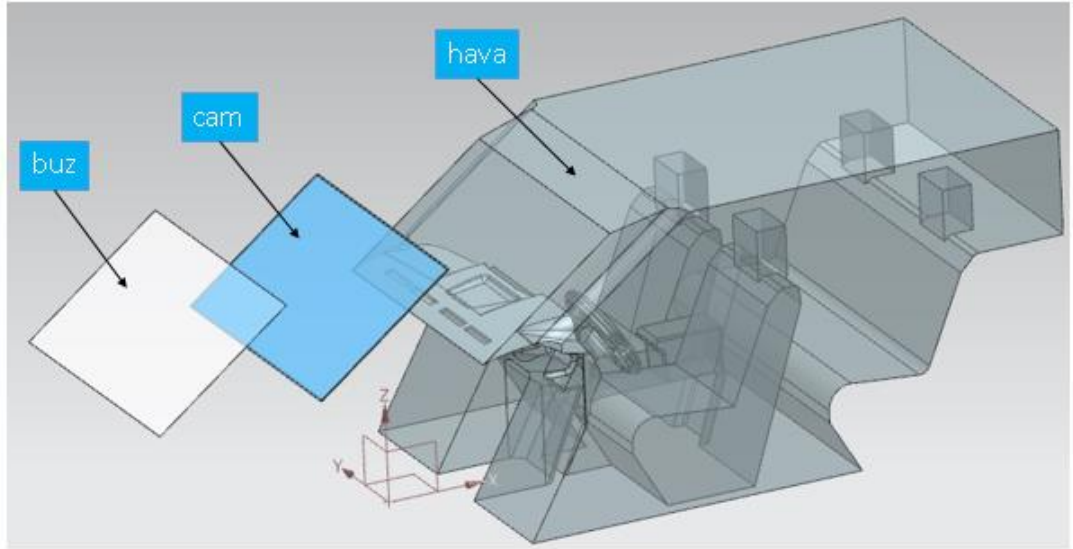
3.3.1. Geometrinin Oluşturulması

Buz çözme analizi için deney verisinde kullanılan araç olan FIAT Doblo aracının matematiksel modelinden ölçümler alınarak kabin, cam ve buzdan oluşan geometri SIEMENS NX 9.0 tasarım programı vasıtasıyla oluşturulmuştur.

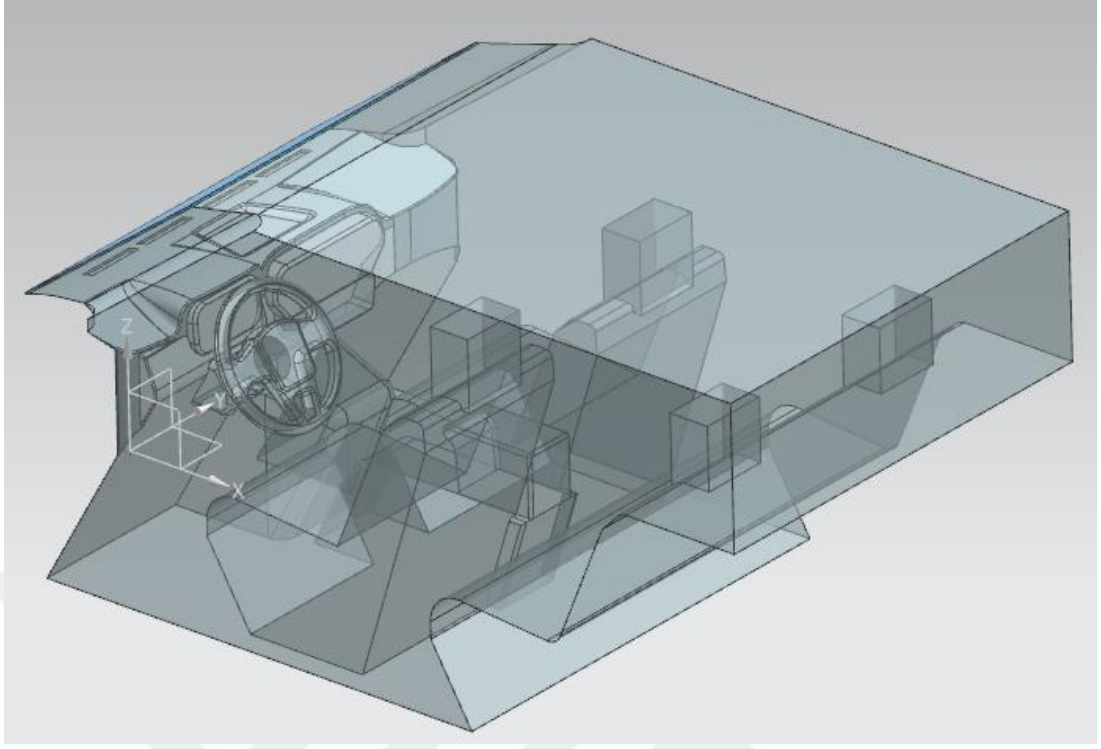


Şekil 3.16. Kabin Geometrisi

Mesh yapısı oluşturulurken elaman sayısını sınırlamak amacıyla modelde basitleştirmelere gidilmiştir.



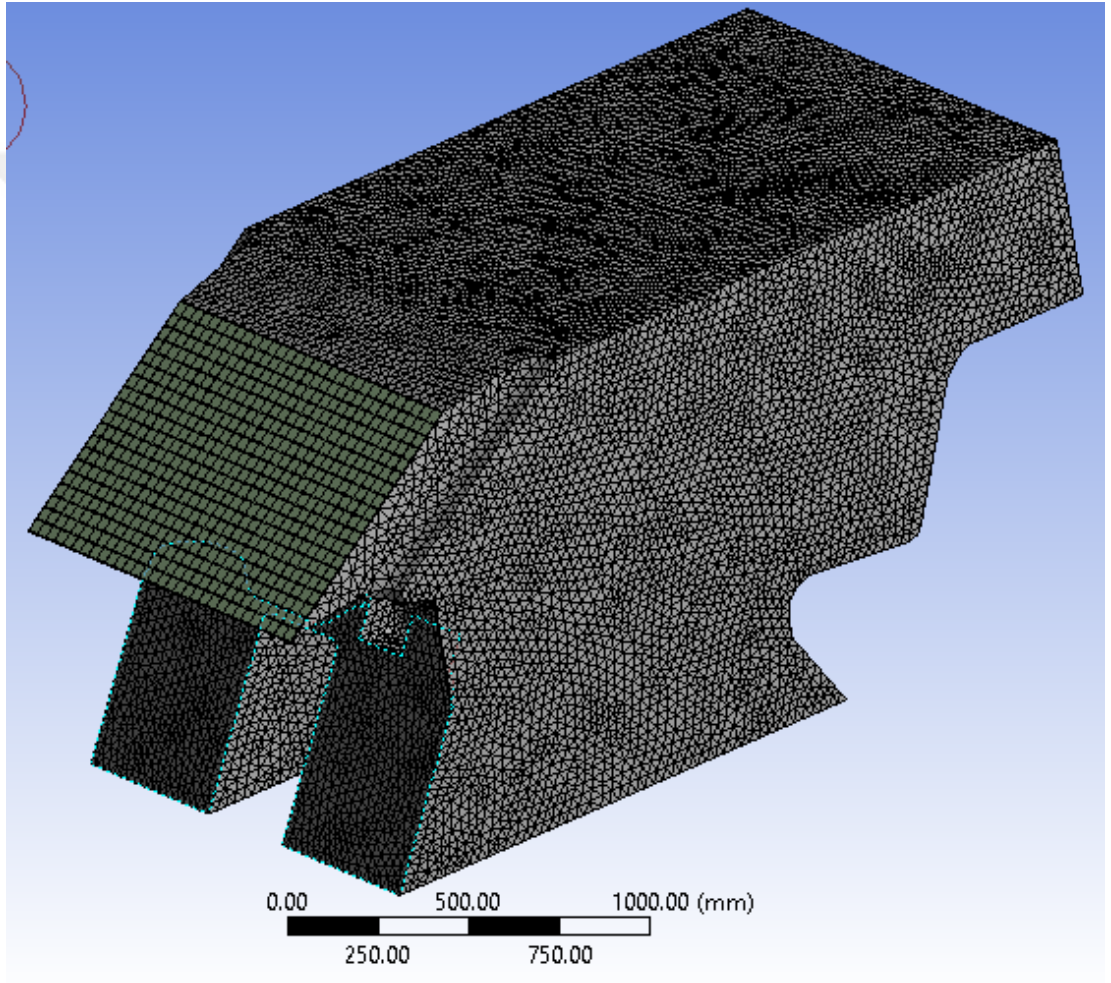
Şekil 3.17. Kabin geometrisini oluşturan elemanlar (hava, cam ve buz)



Şekil 3.18. Kabin görünümü

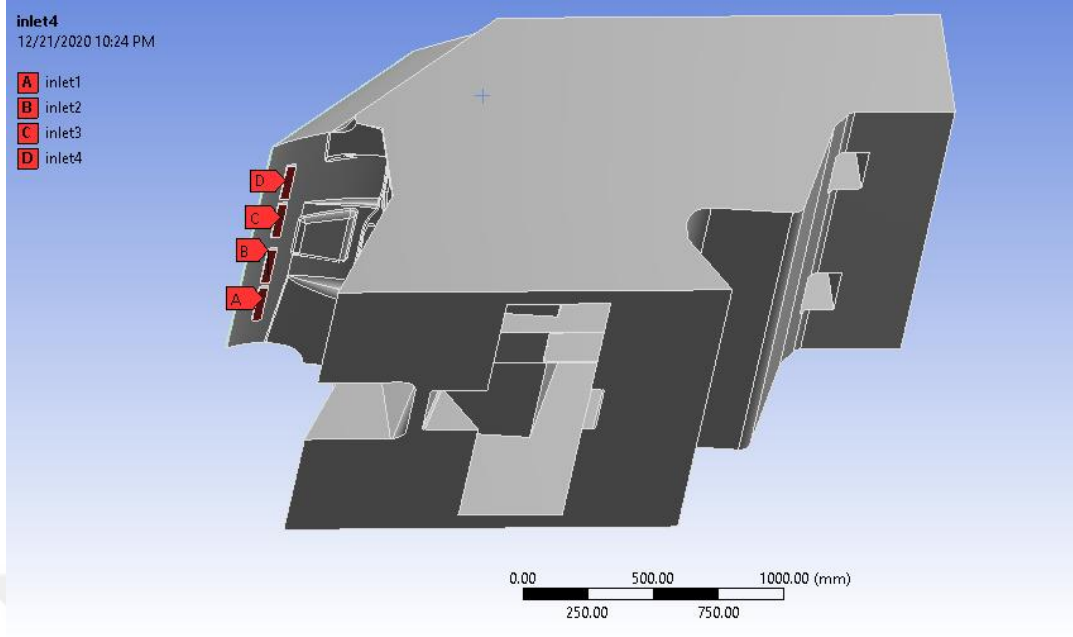
3.3.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

Kabin modeli step formatında kaydedilip ANSYS Workbench içinde açılmıştır. Geometri sekmesinde Design Modeler açılarak model yüklenmiş ve kabin, cam ve buz kısmı Form New Part komutu kullanılarak tek parça haline getirilmiş ve mesh yapısındaki elemanların eşleşmesi sağlanmıştır. Model daha sonra Mesh kısmında açılarak ağ yapısı oluşturulmuştur.

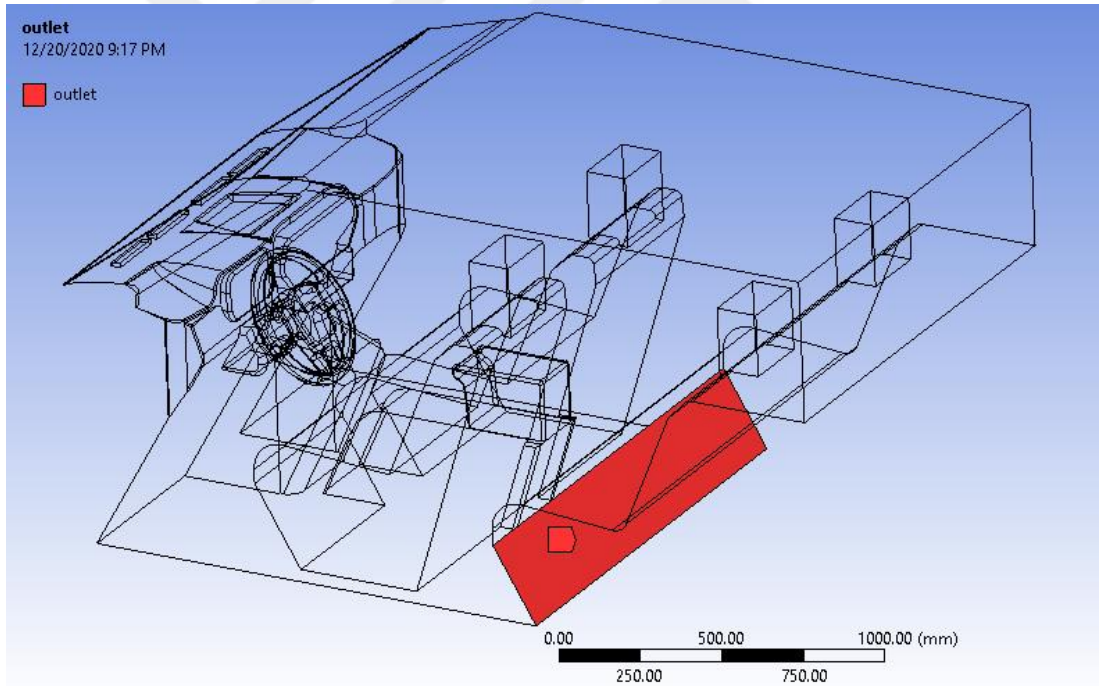


Şekil 3.19. Kabin ağ yapısı

Ağ yapısı 969621 eleman ve 180315 düğüm noktasından oluşmaktadır.



Şekil 3.20. Giriş menfezleri



Şekil 3.21. Çıkış menfezi

3.3.3. Analiz İşlemi (Processing)

Analizin ilk aşaması sürekli rejimde gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak k-epsilon seçilmiştir Enerji ve Katılaşma & Ergime modülü aktifleştirilmiştir.

Çizelge 3.4 Model

Model	k-epsilon – Standard Wall Function
	Enerji
	Solidification & Melting (Katılaşma ve Ergime)

Malzeme olarak kabin için hava, cam ve buz için gerekli malzeme özellikleri Çizelge 3.1 3.2 ve 3.3’de belirtildiği gibidir. Sınır şartları için giriş menfezleri “Velocity inlet” çıkış menfezi ise “Pressure outlet” olarak tanımlanmış ve çıkış basıncı 0 Pa olarak girilmiştir.

Çizelge 3.5 Çözüm Metotları

Çözüm Metotları (Solution Method)	
Schema	SIMPLE
Gradient	Green Gauss Cell Based
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order Upwind
Energy	Second Order Upwind

Sürekli rejim momentum çözümünde Flow (Akış) ve Turbulance (Türbülans) denklemleri çözülmektedir.

Momentum sonuçlarında yakınsama sağlandıktan sonra Enerji çözümü için “Transient” zamana bağlı çözüme geçilmiştir. Fluent konsoluna Şekil 3.7 de gösterilen zamana bağlı sıcaklık değişim tablosunu içeren tab uzantılı dosya girilmiştir. Sınır şartlarında bu tablo giriş menfezine tanımlanmıştır. Bu çözümde sadece Enerji denklemi aktif edilmiştir ve 0.1 zaman adımında çözülmüştür.

3.3. Deney Çalışması

Ansys Fluent üzerinde yapılan çalışmaları doğrulamak amacıyla buz çözme deneyi kullanılmıştır. Deney verileri TOFAŞ Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.'den alınmıştır. Klimatik kabinde FIAT normlarına göre FIAT Doblo aracına uygulanan buz çözme deneyi bu tezin doğrulama amaçlı deney verileridir. Deney 40 dakika sürmüştür ve kabin sıcaklığı deney boyunca -19°C olarak ayarlanmıştır. Menfezlerden çıkan havanın zamana bağlı sıcaklık değişimini gösteren grafik Şekil 3.9'da gösterildiği gibidir.



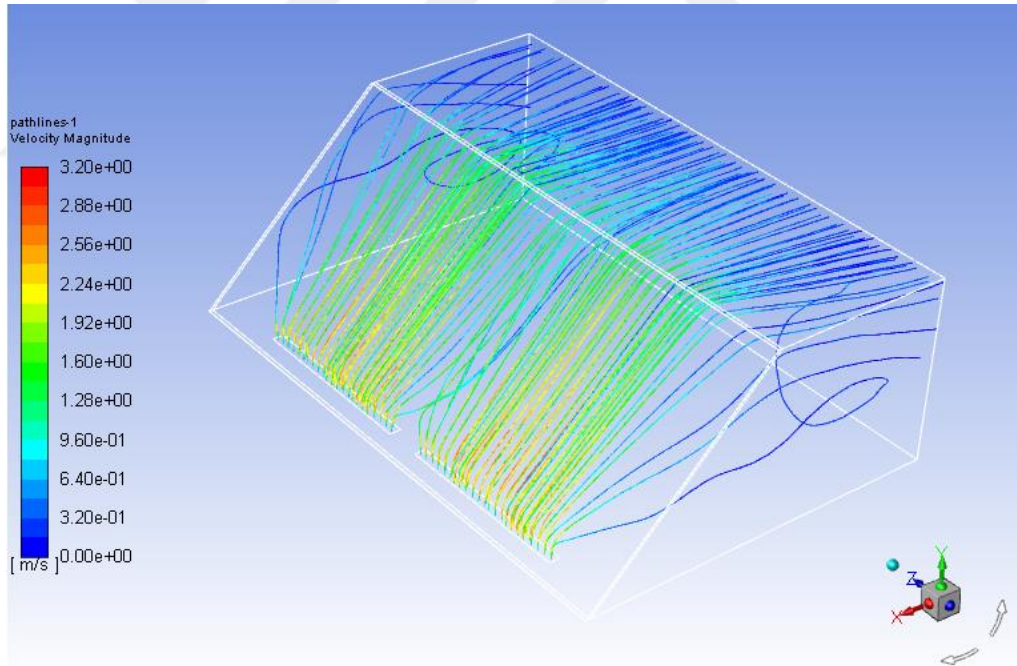
4. BULGULAR

Bu bölümde ANSYS Fluent üzerinden buz çözme için gerçekleştirilen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ve FIAT normlarına göre iklimatik kabin içerisinde gerçekleştirilen buz çözme deneyi sonuçları paylaşılmıştır.

4.1. Analiz-1 Basit Kabin Analizi Sonuçlarının Görüntülenmesi

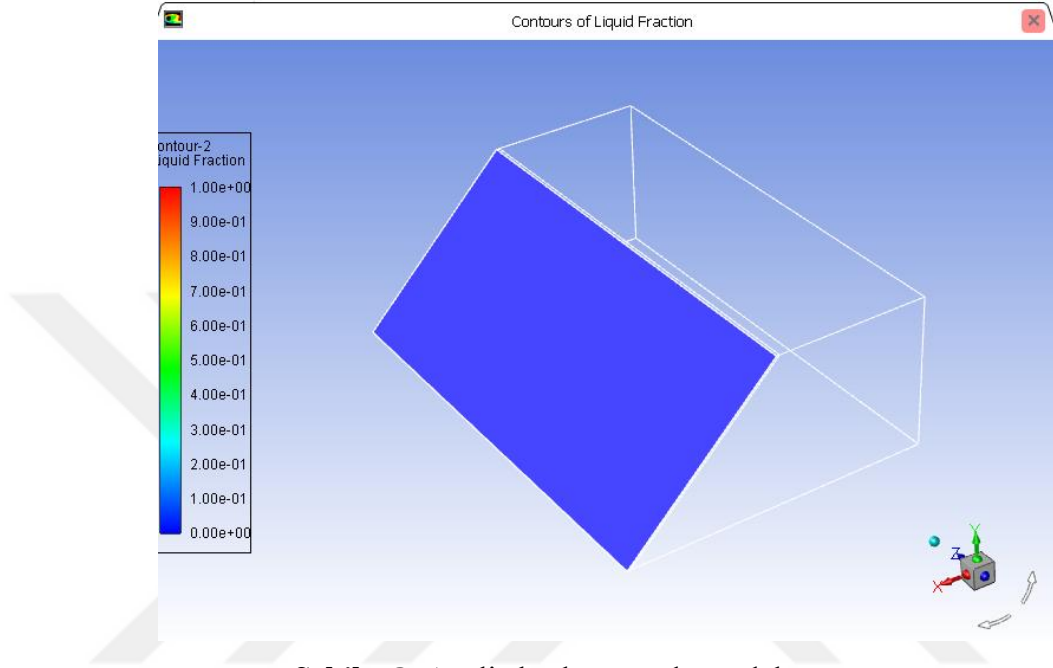
Basit model üzerinde yapılan analiz iki ayrı çözümden oluşmaktadır. İlk çözümde kabin içindeki akışkan hareketi analiz edilmiş ikinci çözümde ise katılaşma ve ergime modülü ve zamana bağlı buzdaki erime miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

Analiz-1 için menfezlerden giriş yapan havanın kabin olarak modellenen geometri içindeki hareketi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



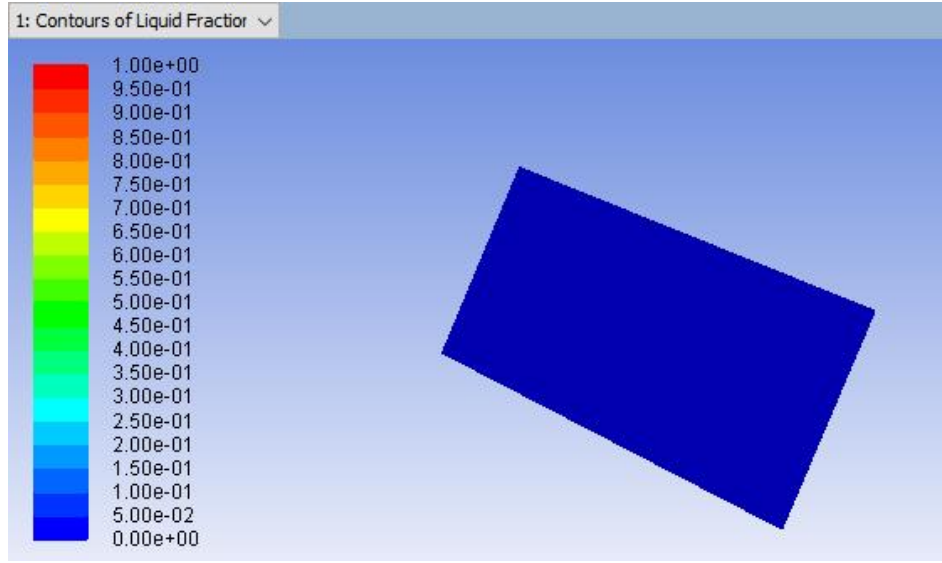
Şekil 4.1. Analiz-1 Havanın kabin içindeki hız (m/s) dağılımı

Analizin zamana bağlı enerji çözümünde ise ön camdaki buz çözme miktarı görüntülenmiştir. Katılaşma ve ergime modülü görüntülenmesinde ölçek kısmı 0 ile 1 arasında değer almaktadır. 0'dan 1'e renk değişimi maviden kırmızıya gitmekte ve 0 tamamen katı olan buz, 1 ise tamamen buzun eridiğini ifade etmektedir.

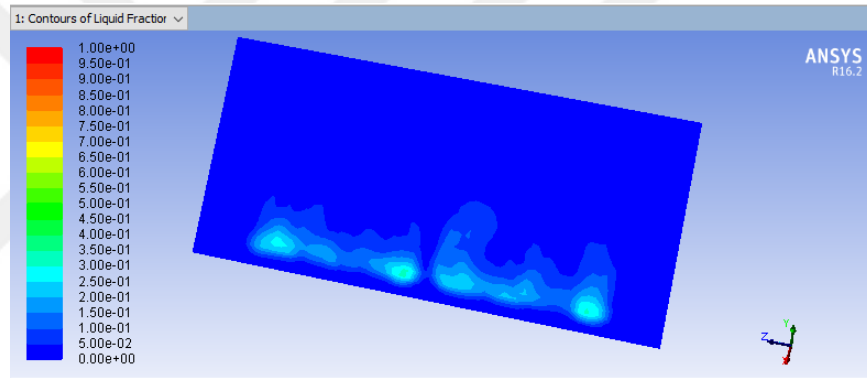


Şekil 4.2. Analiz başlangıcında model görünümü

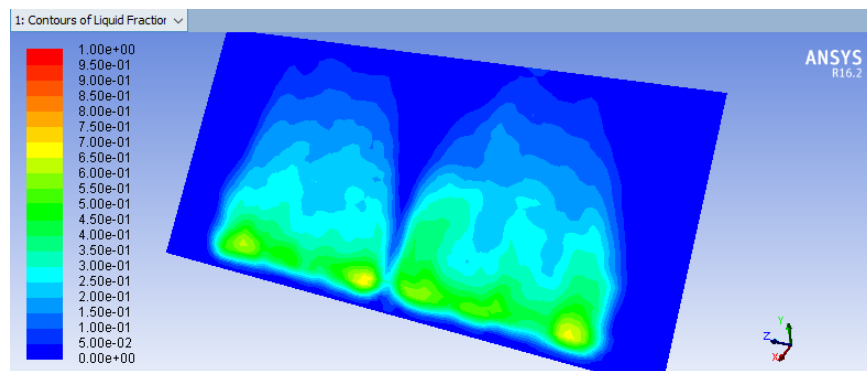
Şekil 4.2'de sol taraftaki skala 0'dan 1'e maviden kırmızıya modeldeki buz çözme yi göstermektedir. Aşağıdaki şekillerde buzun çözünme sürecindeki zamana bağlı olarak sonuçların görüntülenmesi gösterilmiştir.



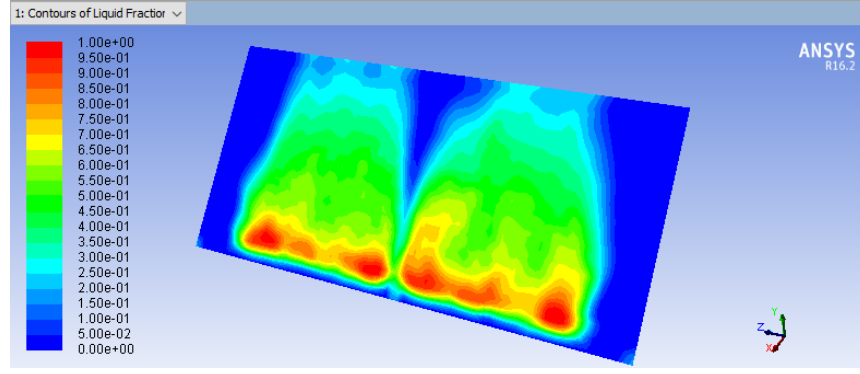
Şekil 4.3. $t=100$. saniyedeki buzun sıvılaşma oranı (liquid fraction)



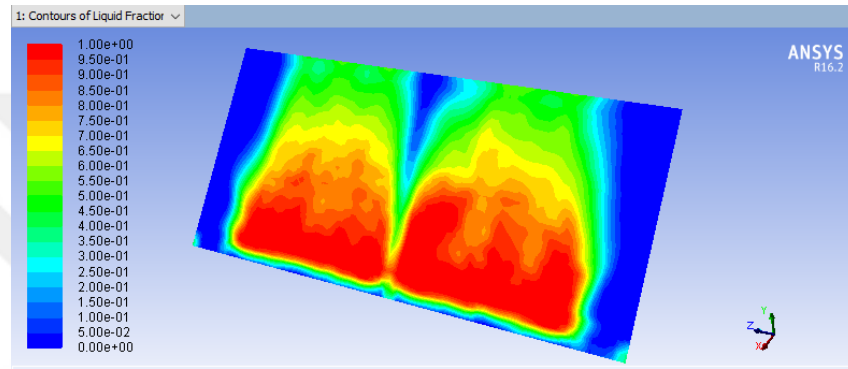
Şekil 4.4. $t=500$. saniyedeki buzun erimeye başladığı görüntü



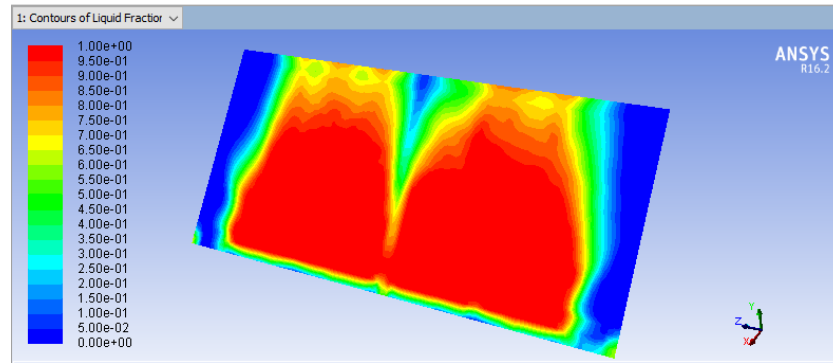
Şekil 4.5. $t=700$. saniyedeki buzun sıvılaşma oranı



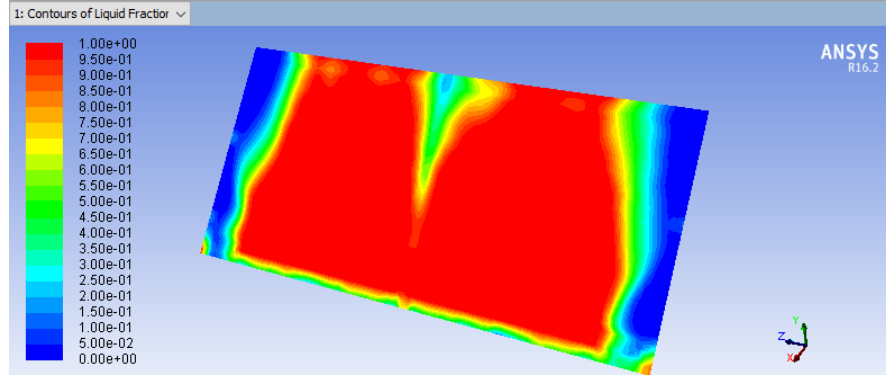
Şekil 4.6. t=800. ssaniyedeki buzun sıvılaşma oranı



Şekil 4.7. t=900. saniye buzun sıvılaşma oranı



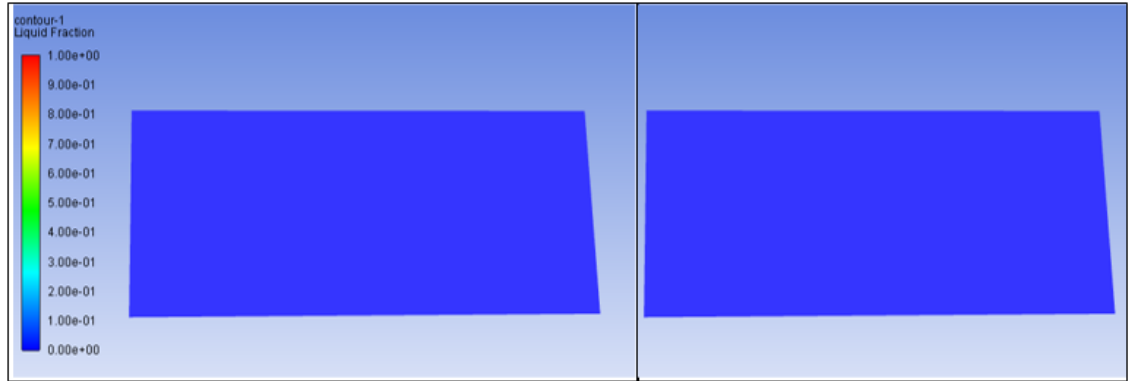
Şekil 4.8. t=1000. Saniye buzun sıvılaşma oranı



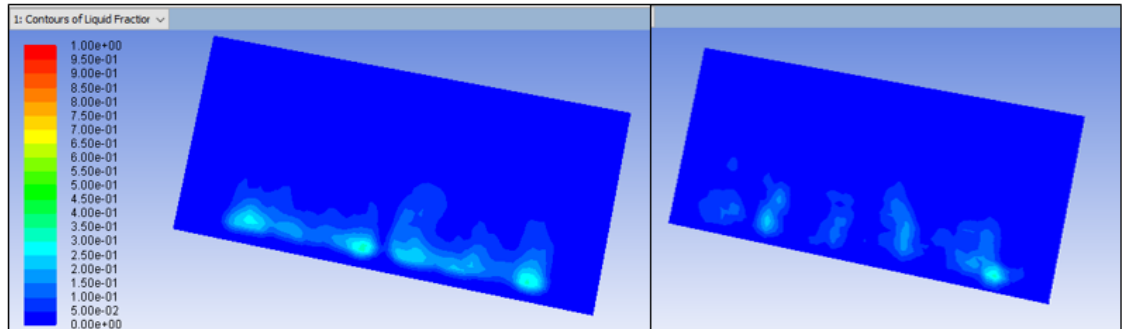
Şekil 4.9. $t=1100$. saniye buzun sıvılaşma oranı

Aynı model için menfez geometrisinin değiştirilmesi ile gerçekleştirilen analizdeki akışkan hareketi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

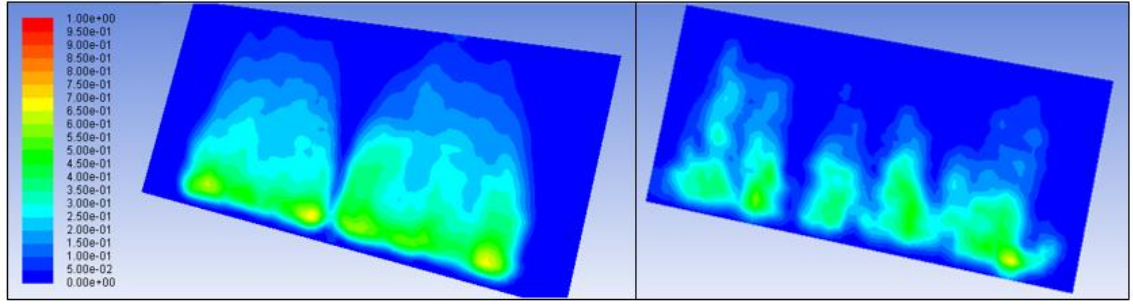
İki modelin zamana bağlı olarak buz çözme görüntülerinin karşılaştırılması Şekil 4.10’den itibaren gösterilmiştir. Şekillerin sol tarafındaki buz modeli 2 menfezli sağ tarafındaki 3 menfezli buz modelin görüntüleridir.



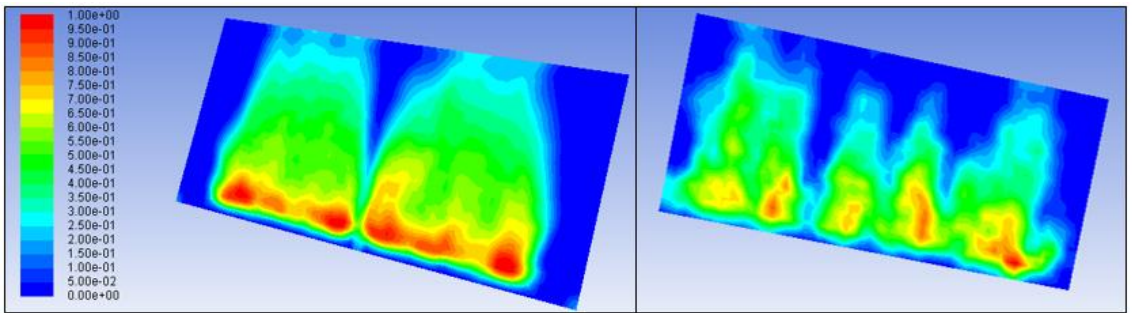
Şekil 4.10. $t=300$. saniyede iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması



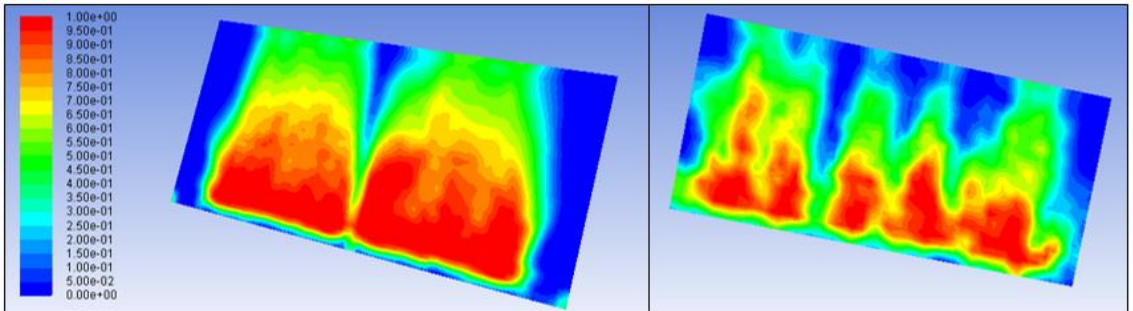
Şekil 4.11. $t=600$. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması



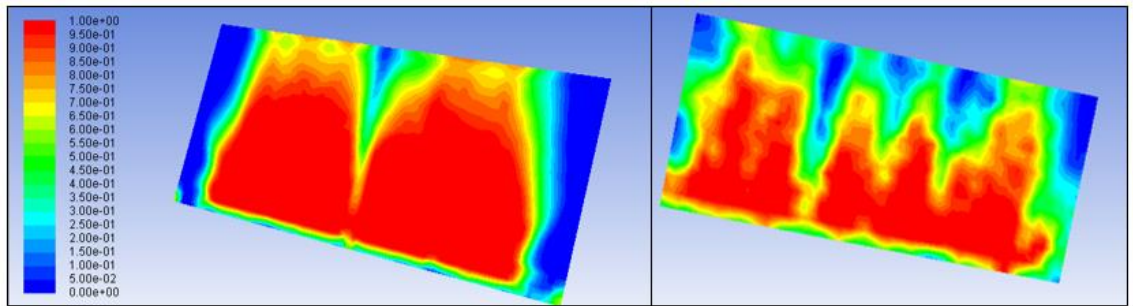
Şekil 4.12. t=700. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması



Şekil 4.13. t=800. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması



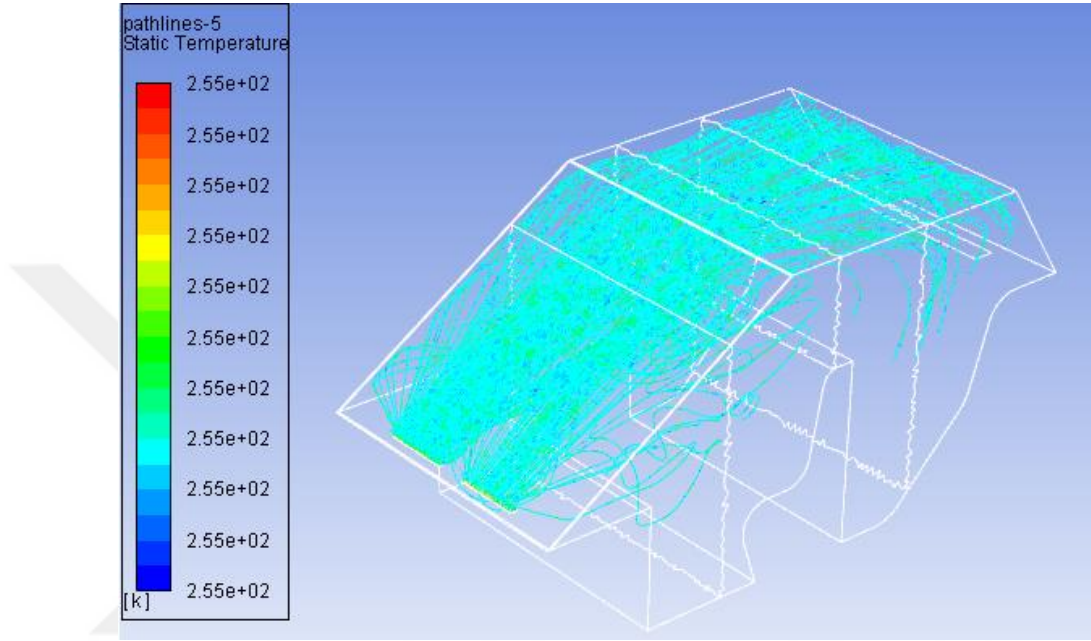
Şekil 4.14. t=900. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması



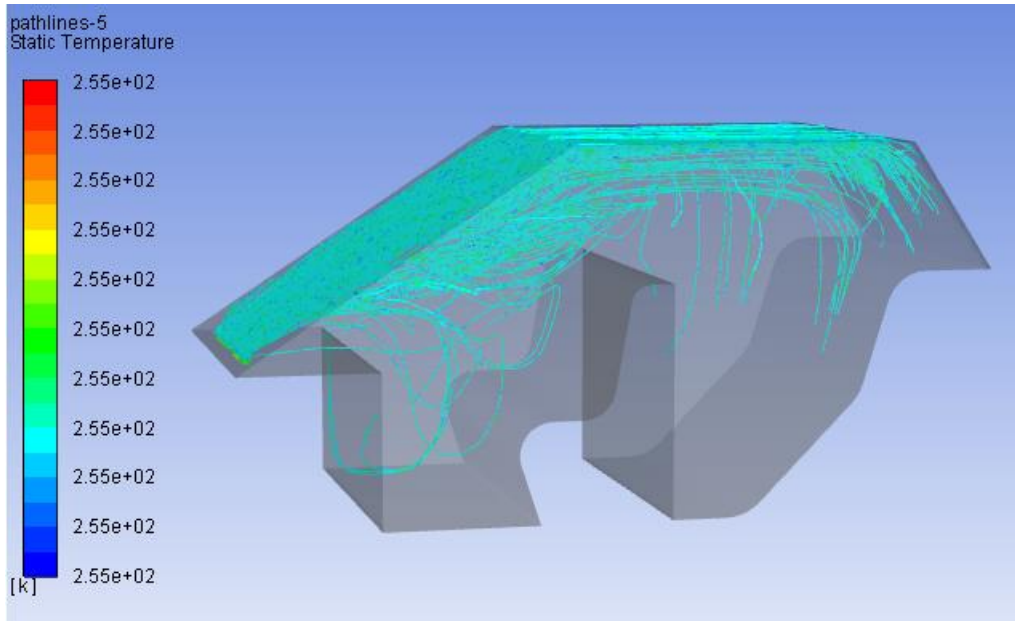
Şekil 4.15. t=1000. saniye iki modelin sıvılaşma oranı karşılaştırılması

4.2. Analiz-2 Geliştirilmiş Kabin ile Analiz Sonuçlarının Görüntülenmesi

Otomobil kabini baz alınarak tasarlanan geliştirilmiş model üzerinde yapılan analiz sonuçlarının görüntülenmesi bu bölümde gösterilecektir. Şekil 4.16 ve 4.17’de havanın menfezlerden girip kabin içindeki hareketi gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Havanın başlangıç şartlarında araç kabini içindeki sıcaklık (K) dağılımı



Şekil 4.17. Havanın başlangıç şartlarında kabin içindeki görünümü

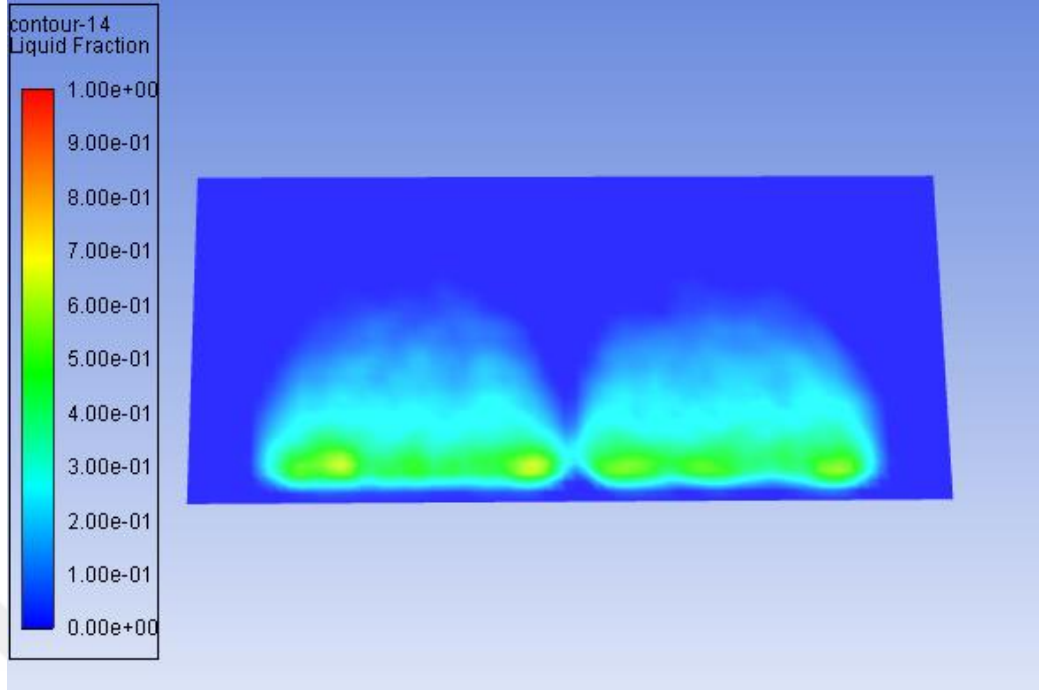
Şekil 4.18’den itibaren Analiz-2 için enerji çözümü ve ön camdaki buzun zamana bağlı çözünme durumu gösterilmiştir.



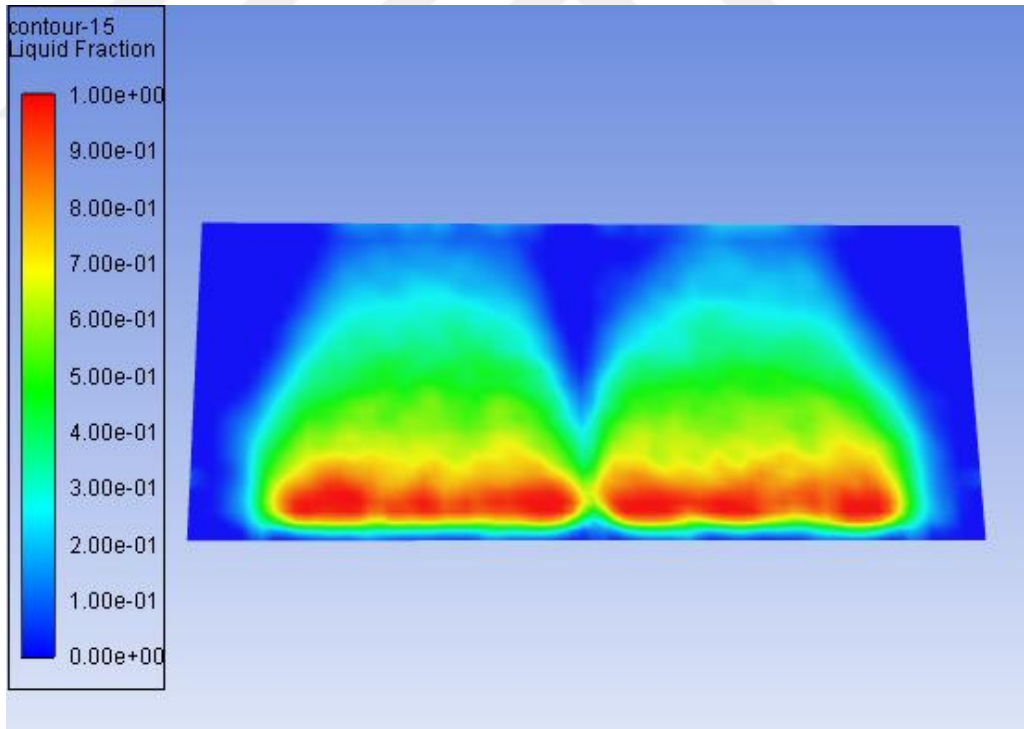
Şekil 4.18. t=300. saniye buz çözünme oranı



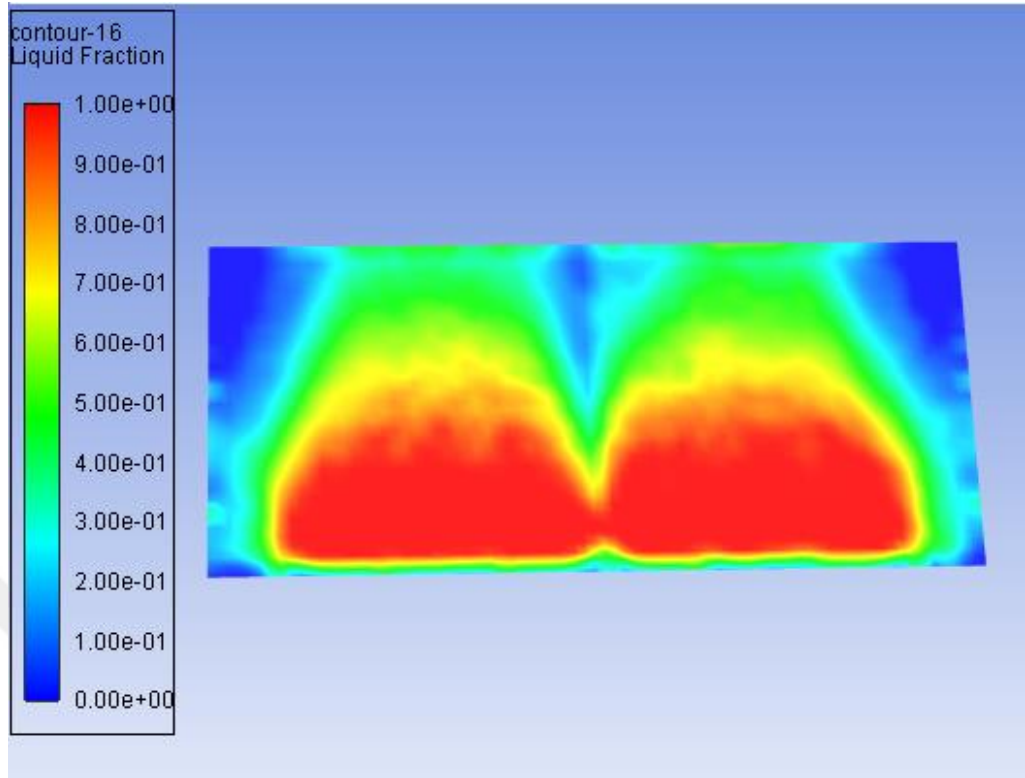
Şekil 4.19. t=600. saniye buz çözünme oranı



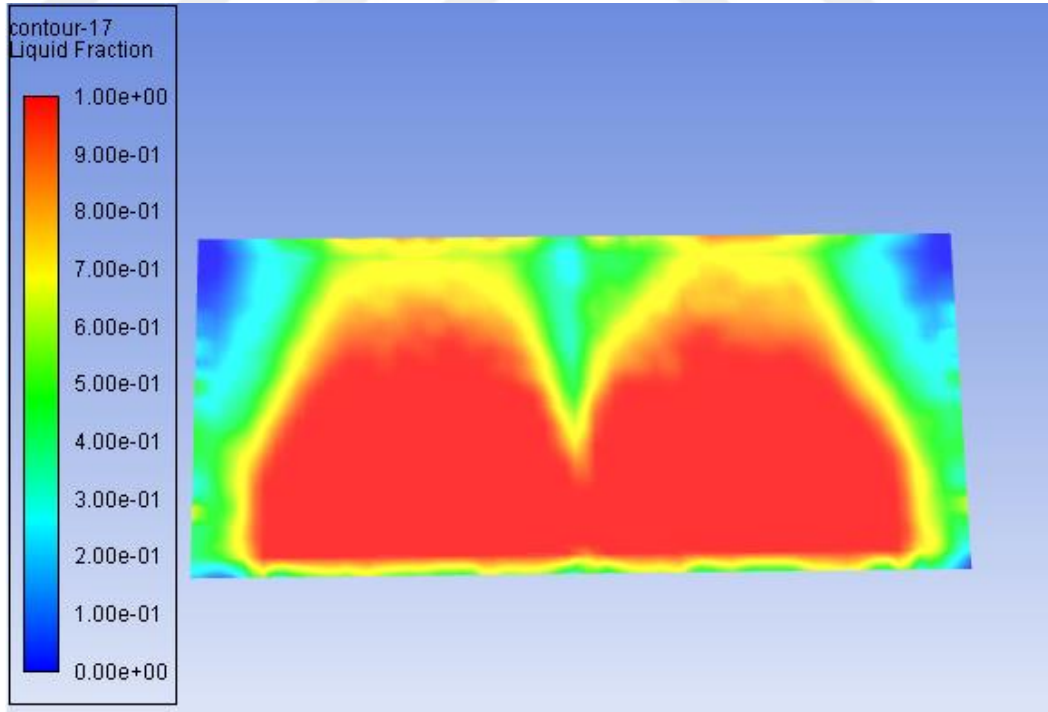
Şekil 4.20. $t= 900$. saniye buz çözünme oranı



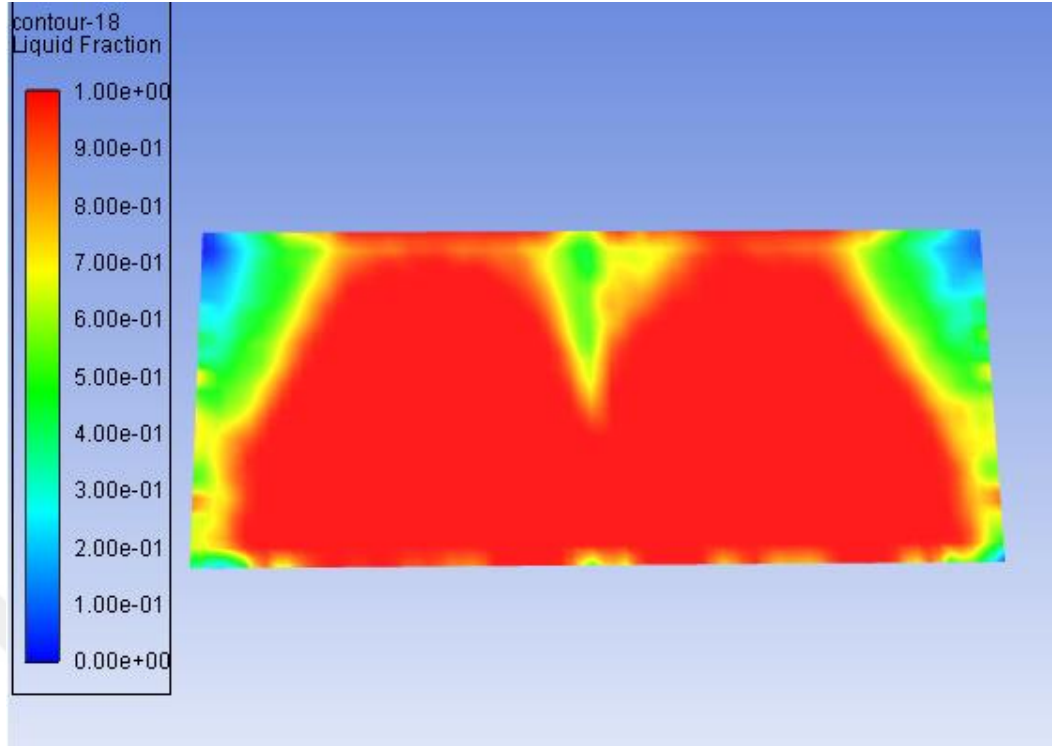
Şekil 4.21. $t= 1200$. saniye buz çözünme oranı



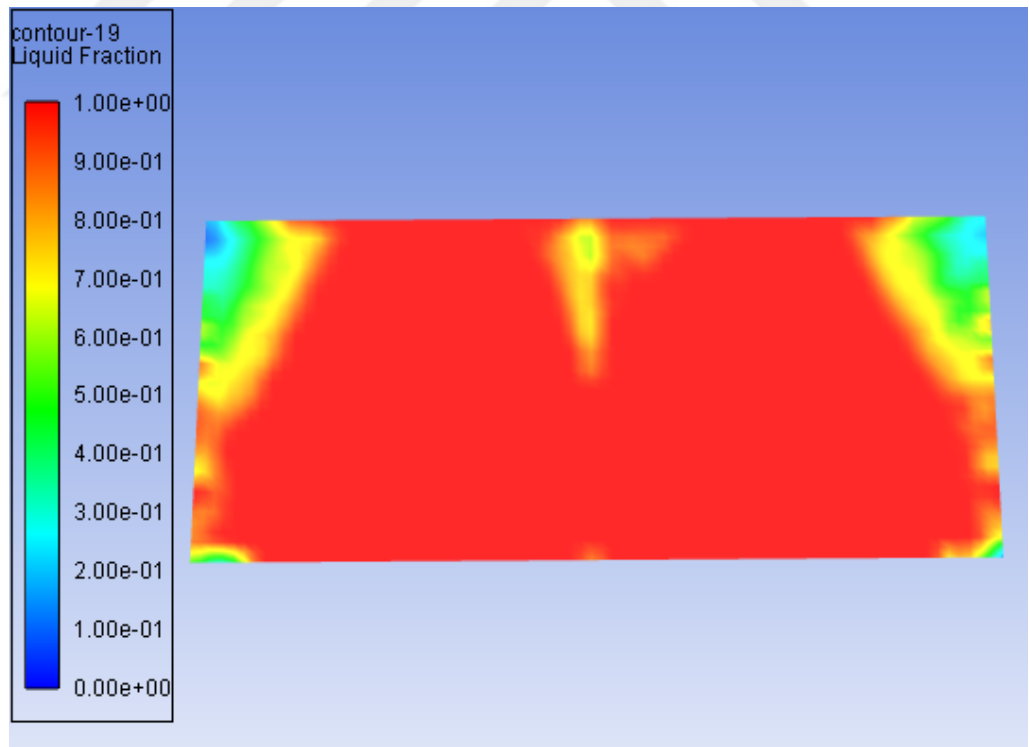
Şekil 4.22. $t = 1500$. saniye buz çözünme oranı



Şekil 4.23. $t = 1800$. saniye buz çözünme oranı



Şekil 4.24. $t=2100$. saniye buz çözünme oranı

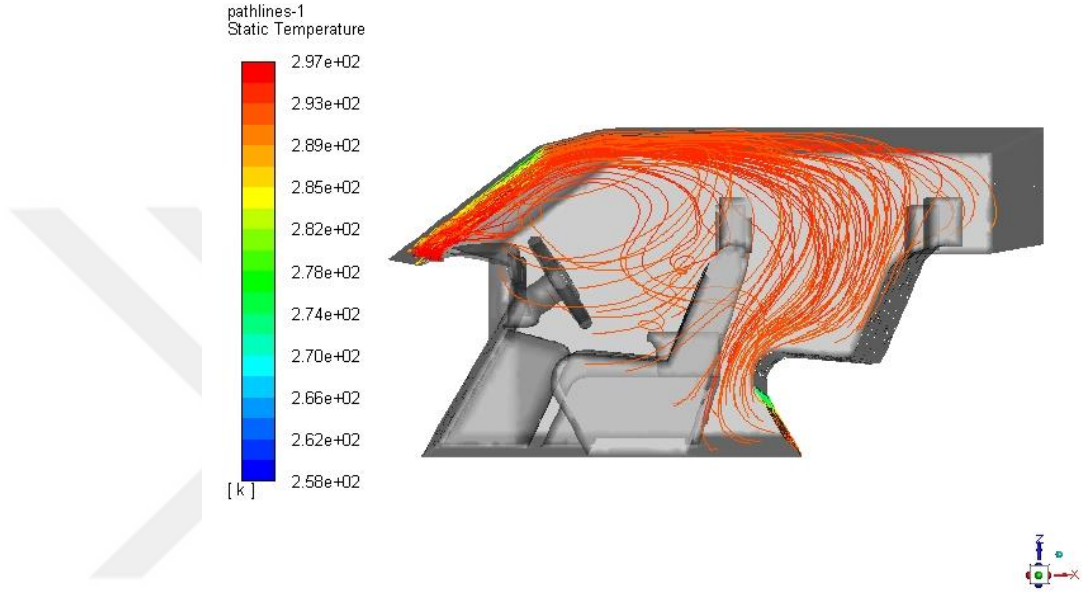


Şekil 4.25. $t=2400$. saniye buz çözünme oranı

4.3. Buz Çözme Analizi Sonuçları

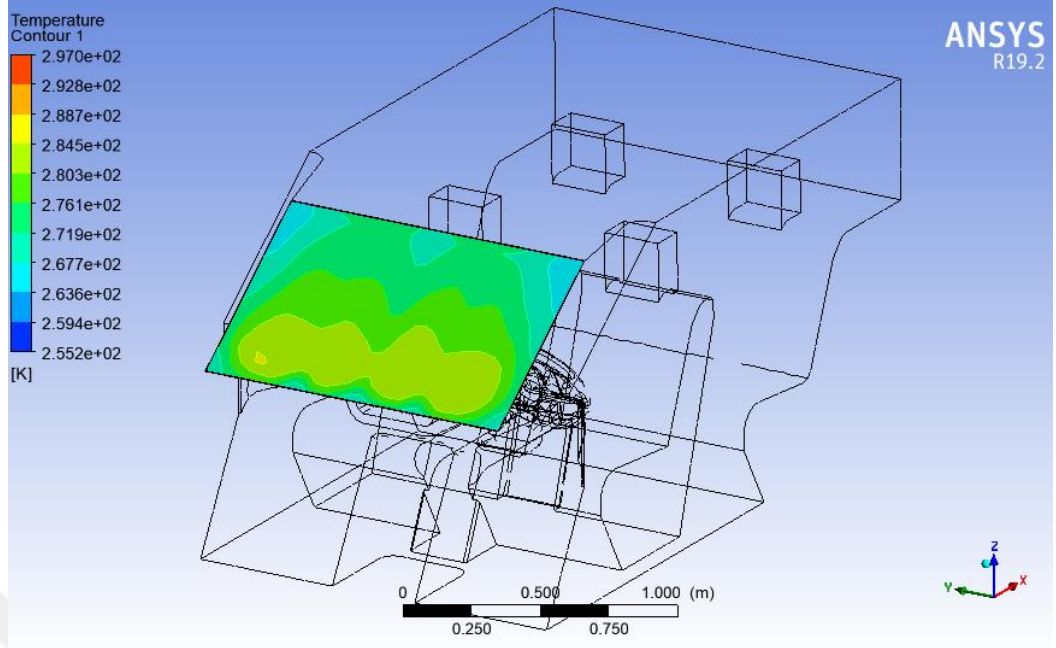
Sürekli rejim momentum çözümünde yakınsama sağlanmıştır.

Momentum çözümünde yakınsama sağlanmasıyla birlikte enerji çözümüne geçilmiş ve 900 saniye çözdürüldükten sonra sıcaklık dağılımı belirlenmiştir.

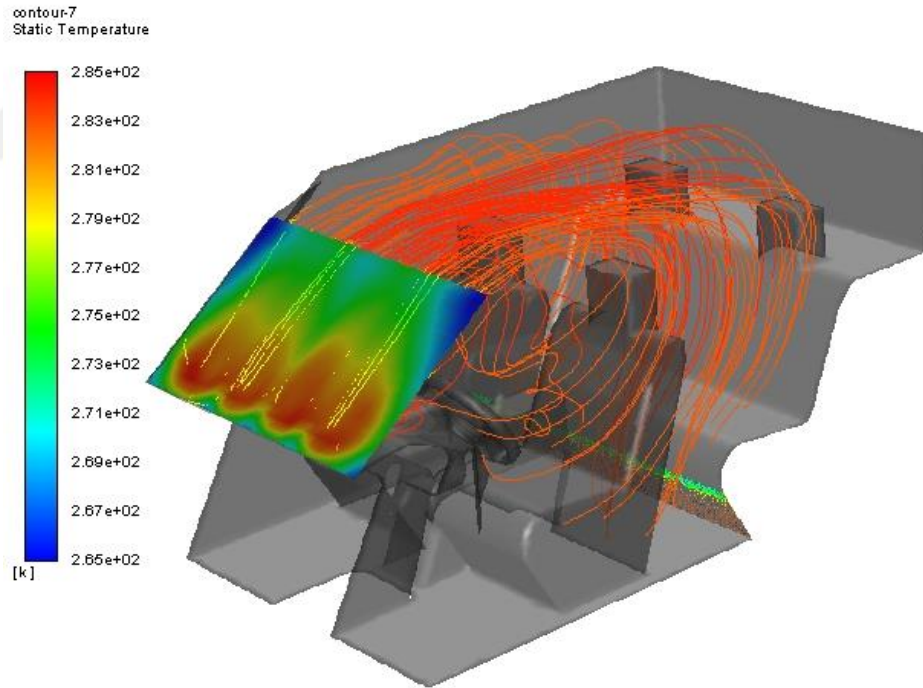


Şekil 4.26. Havanın kabin içindeki sıcaklık (K) dağılımı

Kabin içindeki hava hareketi Şekil 4.27’de gösterilmiştir. Ön camdaki sıcaklık dağılımı Şekil 4.27’de belirtilmiştir.



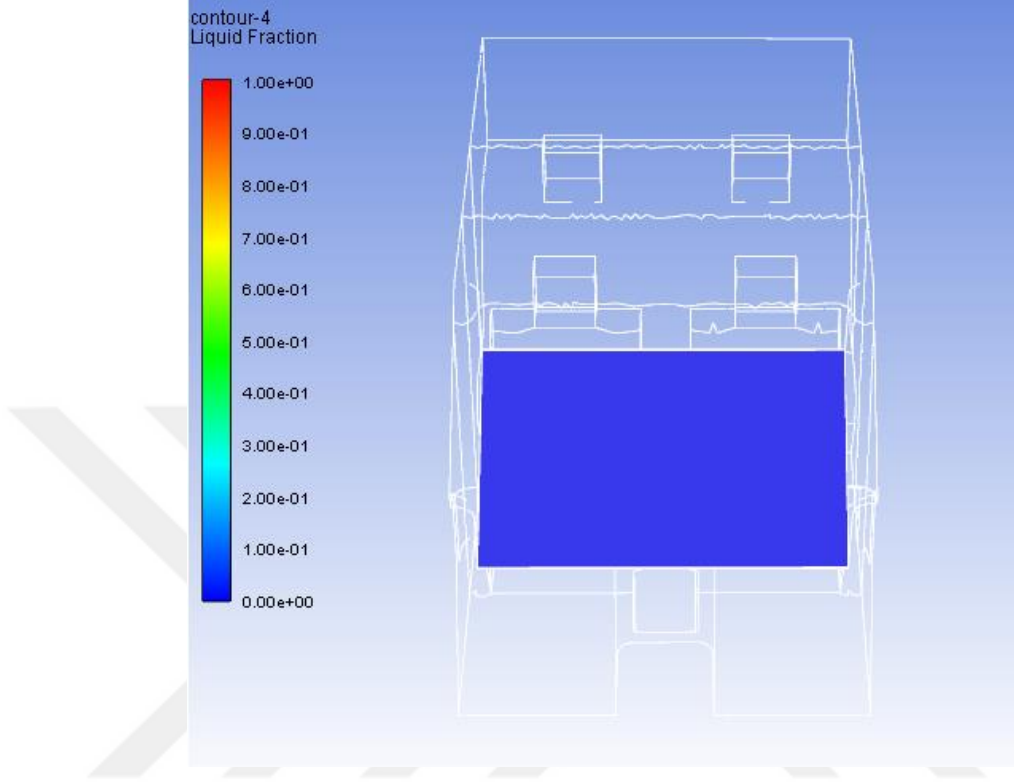
Şekil 4.27. Ön cam sıcaklık (K) dağılımı t=900. Saniye



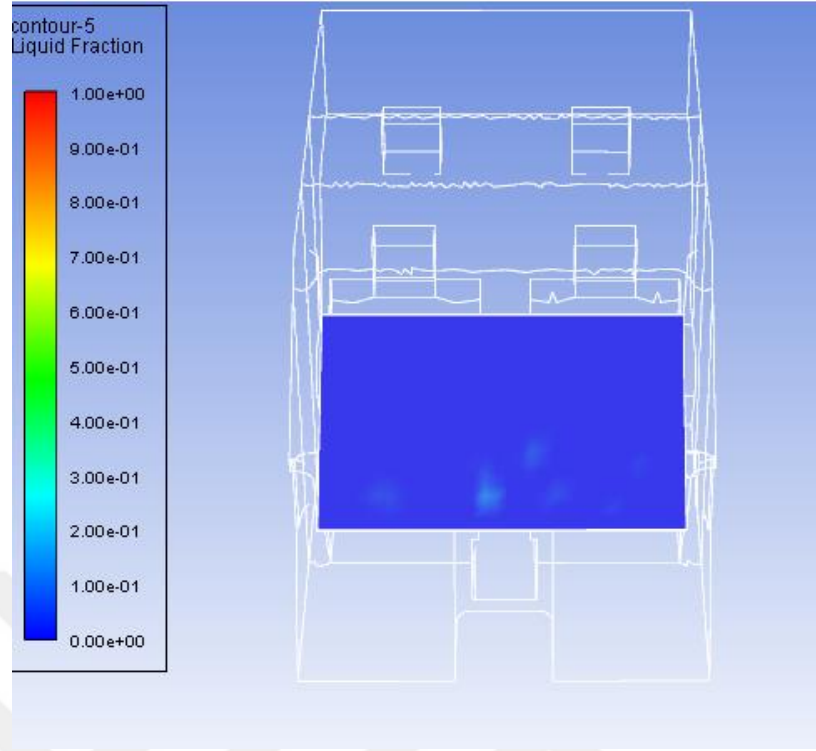
Şekil 4.28. Sıcaklık (K) dağılımı ve kabin içindeki hava hareketi

Şekil 4.26, 4.27 ve 4.29’da 900. Saniyedeki görüntüler daha önce yapılan analizler ve deney verileri ile benzerlik göstermektedir. Bu durum yapılmış olan sayısal analizin

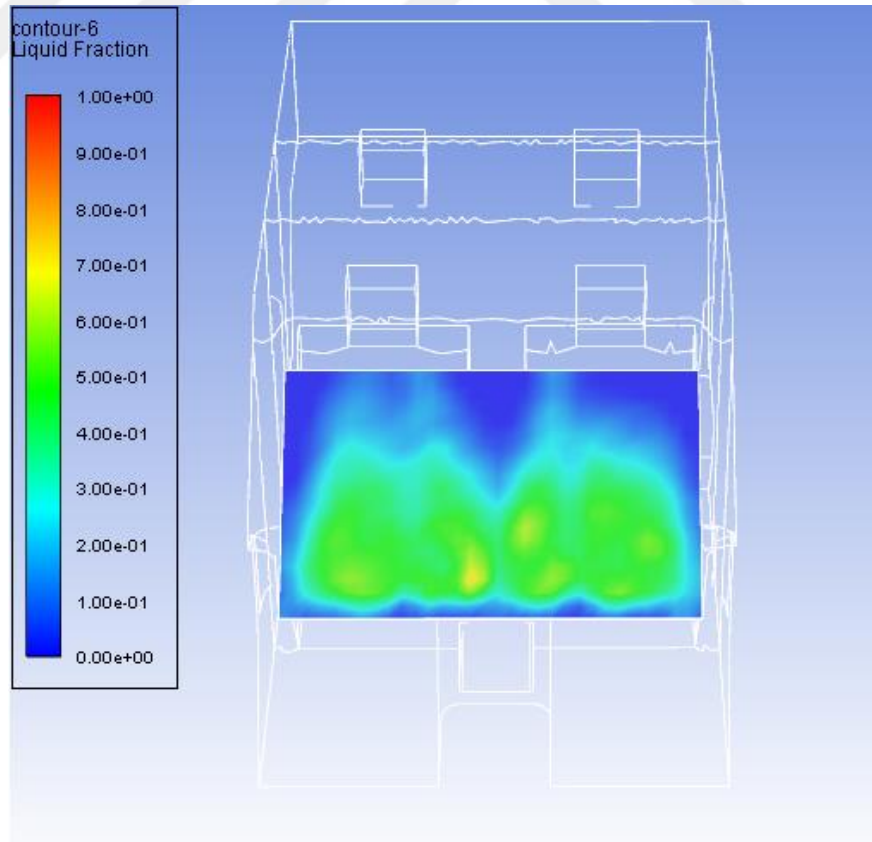
doğrulanması olarak kabul edilebilir ve buz çözme sonuçlarının benzer olacağı öngörüsünde bulunulmasına olanak sağlamaktadır.



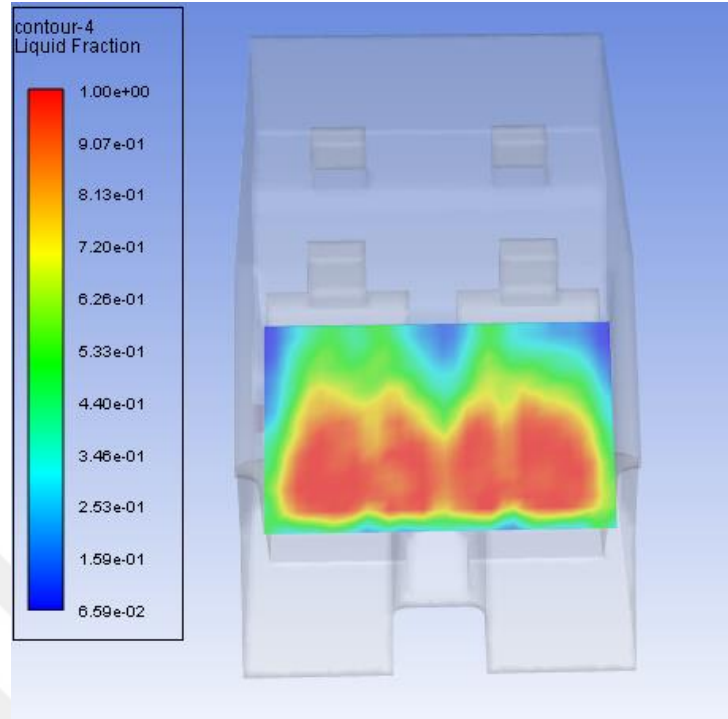
Şekil 4.29. $t=300$. saniye buz çözünme oranı



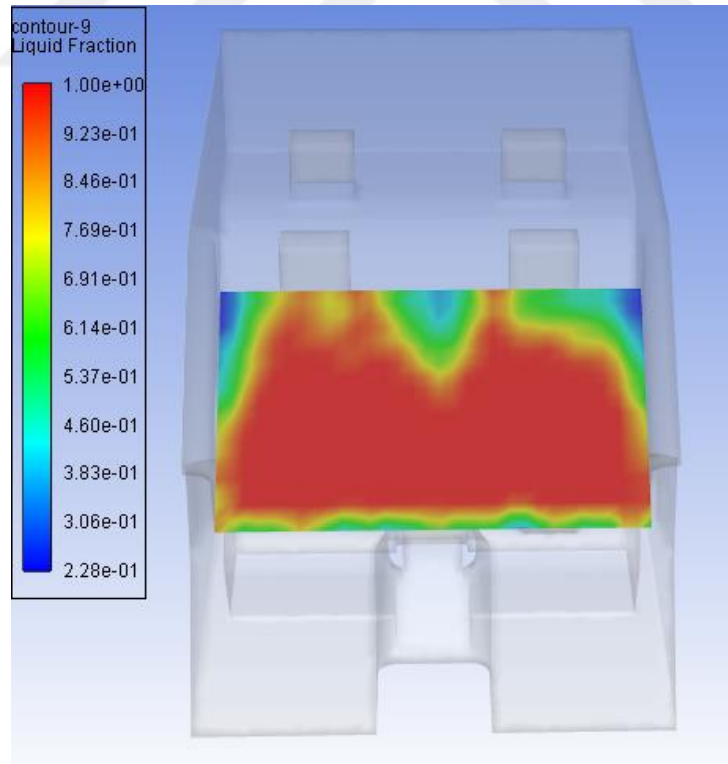
Şekil 4.30. $t=600$. saniye buz çözünme oranı



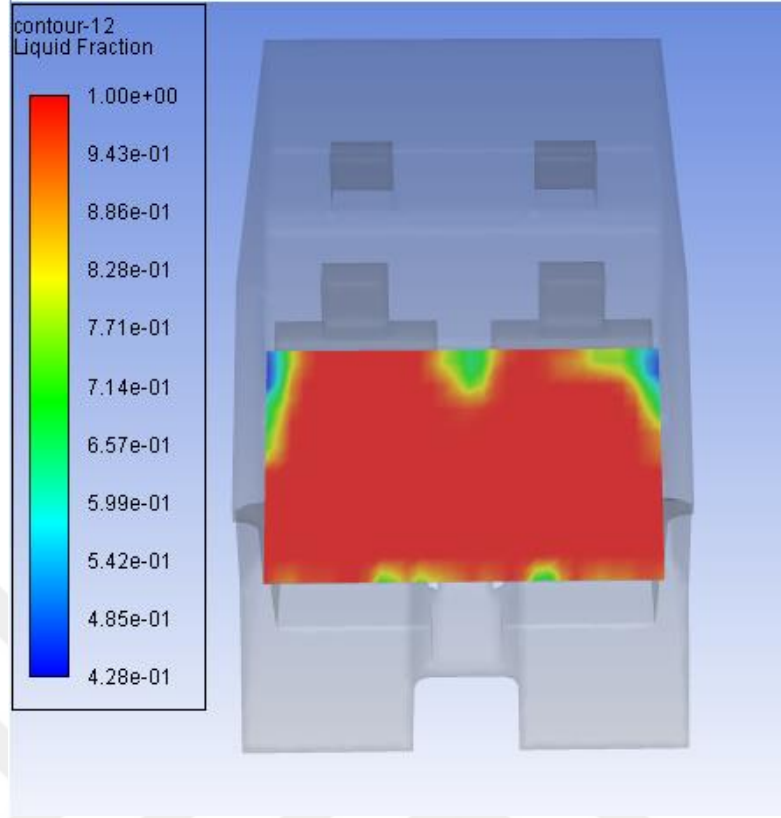
Şekil 4.31. $t=900$. saniye buz çözünme oranı



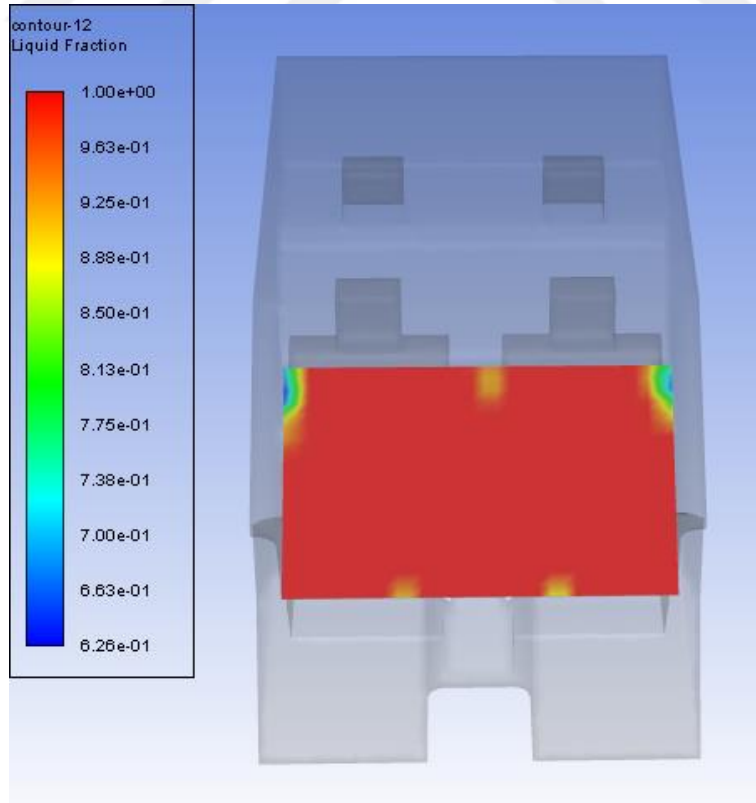
Şekil 4.32. $t= 1200$. saniye buz çözünme oranı



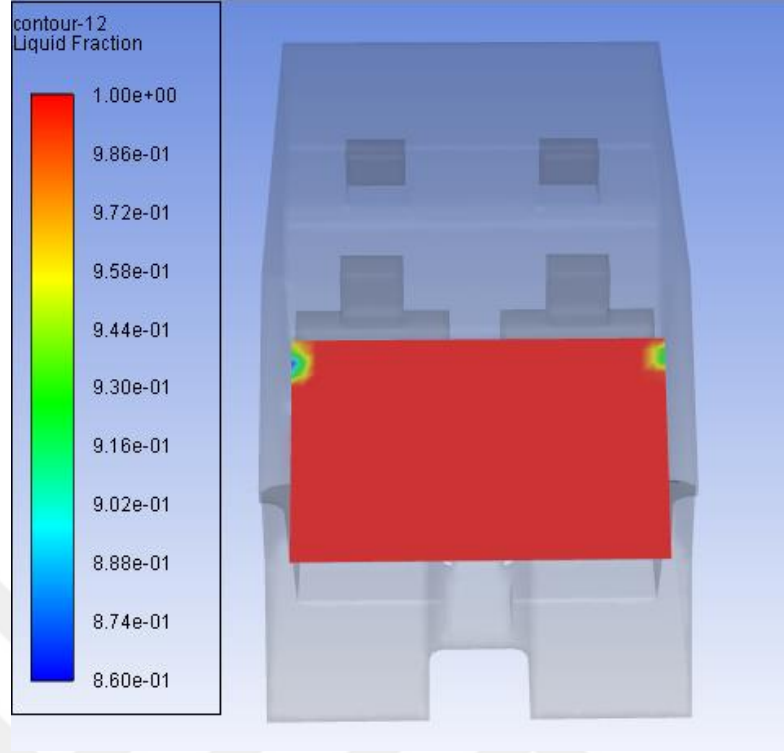
Şekil 4.33. $t= 1500$. saniye buz çözünme oranı



Şekil 4.34. $t = 1800$. saniye buz çözünme oranı



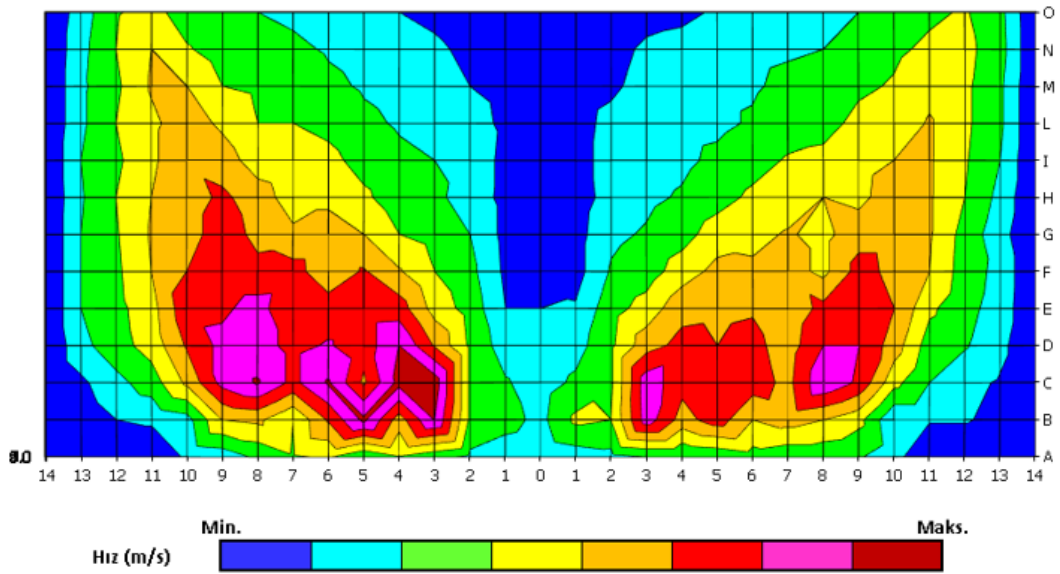
Şekil 4.35. $t = 2100$. saniye buz çözünme oranı



Şekil 4.36. $t = 2400$. saniye buz çözünme oranı

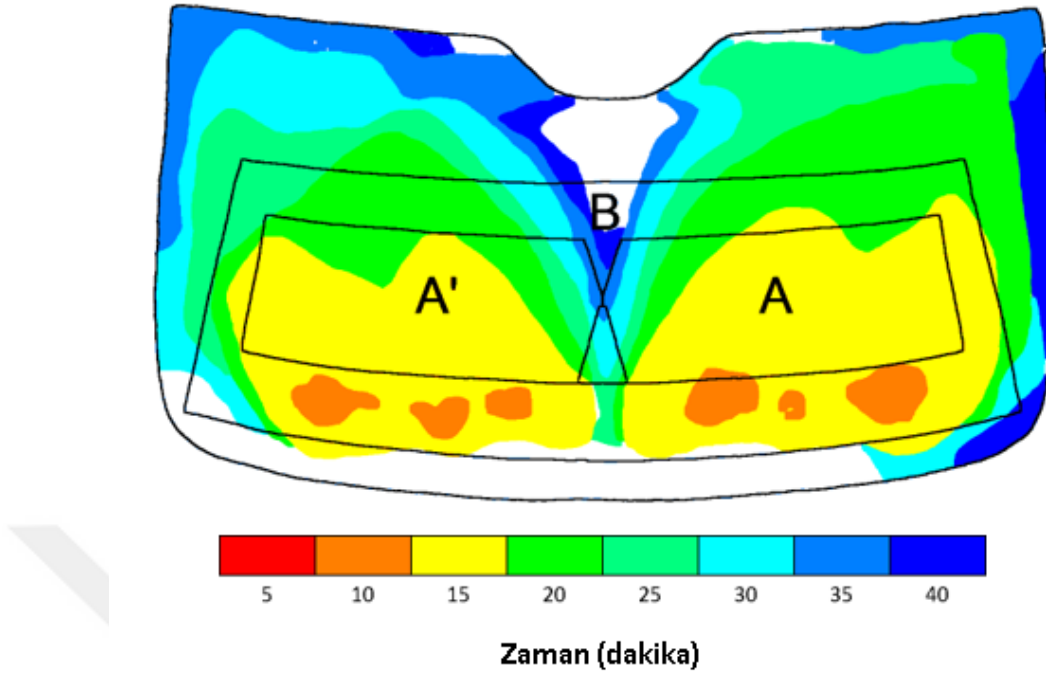
4.3. Deney Sonuçlarının Görüntülenmesi

Klimatik kabin içerisinde gerçekleştirilen deney çalışmasının sonuçlarına bakılacak olursa; Şekil 4.37’de ön cama çarpan hava hızının ön cam üzerindeki dağılımı gösterilmiştir. Mavi renkli bölgeler ön cama çarpan hava hızının en düşük olduğu bölgeleri gösterirken, yeşil, sarı ve kahverengiye doğru çarpan havanın hızının maksimuma ulaştığı gözlenmektedir. Kahverengi, pembe ve kırmızı bölgelerde menfezlerden çıkan havanın yaklaşık olarak aynı hızda cama çarptığı söylenebilir.



Şekil 4.37. Ön cama çarpan hava hızının (m/s) dağılımı

Şekil 4.38’de ise zamana bağlı olarak ön camdaki çözünme dağılımı gösterilmiştir. Normlardaki ön cam için tarif edilen A ve B bölgeleri de dağılım görüntüsünde belirtilmiştir. 10. Dakikadan itibaren ön cama çarpan havanın hızının yüksek olduğu bölgelerden başlamak üzere çözünme başlamış ve 40 dakika sonunda yaklaşık olarak tüm bölgelerde buzun çözündüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 4.38. Zamana bağlı ön cam buz çözünme dağılımı

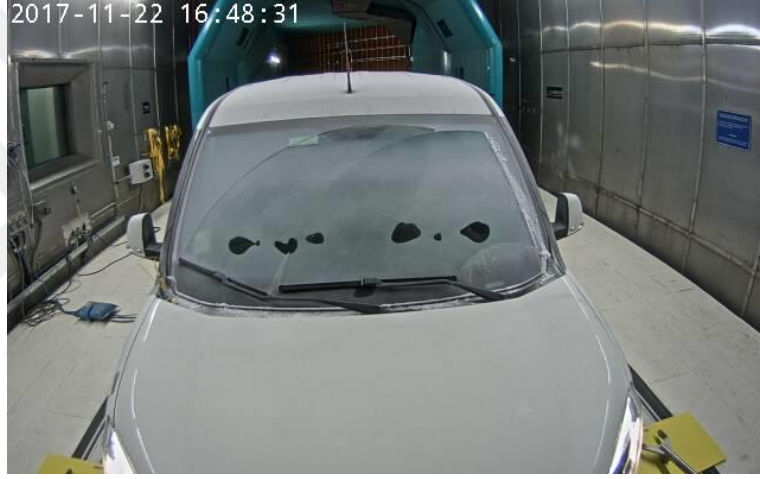
Şekil 4.39'den itibaren iklimatik kabin içindeki FIAT Doblo marka aracın ön camındaki buzun çözünme görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.39. Deney başlangıcı t=0. Saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.40. Deney $t=300$. saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.41. Deney $t=600$. saniye ön cam buz çözünme oranı

10. dakikadan itibaren ön camın A ve A' bölgesinde çözünme başlamıştır.



Şekil 4.42. Deney $t=900$. saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.43. Deney $t=1200$. saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.44. Deney $t=1500$. saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.45. Deney $t=1800$. saniye ön cam buz çözünme oranı



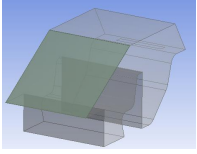
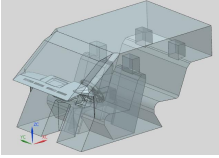
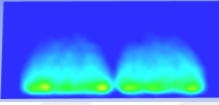
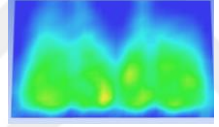
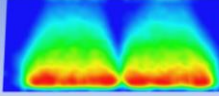
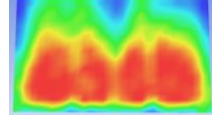
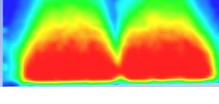
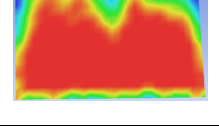
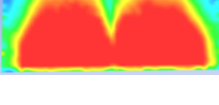
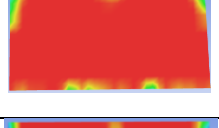
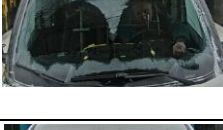
Şekil 4.46. Deney $t=2100$. saniye ön cam buz çözünme oranı



Şekil 4.47. Deney $t=2400$. saniye ön cam buz çözünme oranı

4.4. Sonuçların Karşılaştırılması

Çizelge 3.6. Sonuçların karşılaştırması

(s: saniye)	Analiz 2	Analiz 3	Deney
Model			
t=300 s			
t=600 s			
t=900 s			
t=1200 s			
t=1500 s			
t=1800 s			
t=2100 s			
t=2400 s			

Çizelge 3.6.da sayısal analizler ve deney verilerinin ön camdaki zamana bağlı buz çözme görüntüleri karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı olarak buzun çözünme davranışını yaklaşık bir biçimde benzer olduğu görülmektedir. Analizler ve deney arasındaki ufak farklılıkların ise, çözüm kısıtları nedeniyle model üzerindeki ciddi basitleştirmeler, ağ yapısındaki değişkenlikler ve deney koşullarındaki dış etkenler, doğal sıcaklık değişimleri, motor devrinin değişken olması vb. nedenlerden dolayı oluşmuştur.



5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri için üç farklı analiz ve deneysel çalışma incelenmiştir. ANSYS Fluent üzerinden yapılan analizlerde 2 farklı geometri için toplamda 3 analiz yapılmıştır. İlk model basit model olarak tanımlanmış ve literatürden örneklere dayandırılarak çalışma yapılmıştır. Diğer analiz için model araç kabini boyutlarında tasarlanmış sınır şartları deneysel çalışmadaki duruma göre uyarlanmıştır. Deneysel çalışma için FIAT Doblo aracına klimatik kabin içinde zamana bağlı buz çözme testi gerçekleştirilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Yapılan analizler ve deney verilerindeki buz çözme süreleri karşılaştırılmış ve benzer sıcaklık ve buz çözme dağılımları gözlenmiştir. Bu duruma göre aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir:

Ön cam üzerindeki hava akışı, HAD simülasyon araçları kullanılarak buz çözücü nozülün tasarım yinelemeleriyle düzeltilebilir ve optimize edilebilir. Kısa bir süre içinde çeşitli tasarımlar sayısal yöntemlerle değerlendirilebilir ve bu çok fazla tasarım esnekliği sağlamaktadır.

Hava akışı için HAD sonuçları ve sıcaklık modeli deneysel sonuçlarla uyumludur ve bu sayısal analizlerin kullanımını doğrulamaktadır. Çalışma, deneyler yerine iklimsel araç analizinde HAD simülasyonlarının kullanılması için bir model görevi görebilir.

Buz çözme performansı, HAD araçları kullanılarak başarıyla tahmin edilmiştir. Sıvılaşma oranı HAD sonuçlarının görselleştirilmesi, prototip parçaların ve maliyetli iklimsel rüzgâr tüneli testlerinin yokluğunda buz çözme performansını iyileştirecek alanların belirlenmesine yardımcı olur.

Buz çözme performans tahmini için HAD simülasyon araçlarına ilk aşama yatırımı, prototip parçalarının ve testlerin sayısını önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptir ve bu da zaman çizelgesini ve ilgili maliyetleri azaltır. Bu, genel ürün tasarımı ve geliştirme sürecine fayda sağlar.

Buz çözme analizinin sonucunda araç modelinin birebir boyutlarında ve benzer geometride yapılan analizlerin deney verileri ile doğrulaması sağlanmıştır. Bu veriler ışığında, özellikle kış aylarında iklim şartlarının zorlu olduğu bölgelerde sürüş güvenliği sağlamak amacıyla buz çözme hızının optimizasyonunun sanal analizler ile sağlanabileceğini bize göstermiştir.



KAYNAKLAR

- Ansys Fluent 17.1** Theory Guide, ANSYS, Inc. USA, 2016.
- Ansys Cfx 15 Reference Guide**, ANSYS, Inc. USA, 2013.
- FLUENT 6 (2006)** Fluent Inc. User's guide, Lebanon, NH 03766, USA
- Chui, E. H., & Raithby, G. D. 1993.** Computation of radiant heat transfer on a nonorthogonal mesh using the finite-volume method. *Numerical Heat Transfer*, 23(3), 269-288.
- KILIÇ M., SEVİLGEN, G. (2009)** Evaluation of Heat Transfer Characteristics in an Automobile Cabin with a Virtual Manikin During Heating Period, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 56: 515–539.
- Kılıç, M., Sevilgen, G. 2008.** Modelling airflow, heat transfer and moisture transport around a standing human body by computational fluid dynamics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(9), 1159-1164.
- Kılıç, M., Sevilgen, G. 2012.** The effects of using different type of inlet vents on the thermal characteristics of the automobile cabin and the human body during cooling period. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(5-8), 799-809.
- KUMAR V., TARE K., SANGEET K.,** Deployment of CFD for Optimization of the Air Flow Distribution Over the Windscreen and Prediction of Defrost Performance, SAE International 2010-01 – 1059
- MURTHY J. Y. and Mathur S. R. (1998)** A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes. AIAA-98-0860, January.
- Mutlu, M., Sevilgen, G., Kılıç, M. 2016.** Evaluation of windshield defogging process in an automobile. *International journal of vehicle design*, 71(1-4), 103-121.
- Mutlu, M., Sevilgen, G., Kılıç, M., 2016.** Three dimensional numerical investigation of thermal sensation of an automobile driver at steady state conditions. *OTEKON 2016 8. Automotive Technologies Congress* 23 – 24 Mayıs 2016, Bursa, TURKEY.
- ÖZCAN Osman AYSAN (2004)** Uçak Kanatlarının CFD Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- RUGH, J. (2002)** Integrated Numerical Modeling Process for Evaluating Automobile Climate Control Systems, SAE Technical Paper Series 2002-01-1956
- ROY Subrata, NASR Karim, PATEL Paresh, (2002)** 'An experimental and numerical study of heat transfer off an inclined surface subject to an impinging airflow' *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 1615–1629
- SAE standard J902.** Passenger Car Windshield Defrosting Systems, issued Aug. 1964 reaffirmed Feb. 1999; SAE standard J902a revised Mar.1967.
- SEVİLGEN Gökhan, KILIÇ Muhsin, 2011,** 'Otomobil Kabininde Isıtma Sürecinde Isı Transfer Karakteristiklerinin Farklı Işınım Modelleri Kullanılarak Sayısal Olarak Karşılaştırılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 16, Sayı 1,
- SEVİLGEN Gökhan, KILIÇ Muhsin, 2012,** 'Otomobillerde Camlar Üzerinde Oluşan Buğunun Hızlı Olarak Giderilmesinde Menfez Geometrisi, Hava Hız, Nem Ve Sıcaklığın Etkisinin HAD Yöntemi İle Analizi', *Uludağ Üniversitesi, BURSA*
- VERSTEEG, H.K. and W. MALALASEKERA. 1995** An Introduction to computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method, p.11.

WOLFHART J., RAULOT A., (2005), Aspects of Cabin Fluid Dynamics, Heat Transfer, and Thermal Comfort in Vehicle Thermal Management Simulations, SAE Technical Papers, 2005-01-2000

