

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YALITIM MALZEMESİ ENJEKSİYON SÜRECİ OPTİMİZE EDİLMİŞ YENİ  
BİR BUZDOLABI KABİNİ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FIRAT AKAR**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ**

**YALITIM MALZEMESİ ENJEKSİYON SÜRECİ OPTİMİZE EDİLMİŞ YENİ  
BİR BUZDOLABI KABİNİ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fırat AKAR  
(301121016)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR**

**OCAK 2015**



İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301121016 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Fırat AKAR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YALITIM MALZEMESİ ENJEKSİYON SÜRECİ OPTİMİZE EDİLMİŞ YENİ BİR BUZDOLABI KABİNİ TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Alim Rüstem ASLAN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Üner ÇOLAK**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **15 Aralık 2014**

**Savunma Tarihi :**      **23 Ocak 2015**



*Anneme ve babama,*





## **ÖNSÖZ**

Bu çalışmada bana yol gösteren ve çalışmayı yöneten, zamanını ve bilgilerini cömertçe paylaşan Prof. Dr. İ. Bedii ÖZDEMİR'e bütün yardımları için teşekkür ederim. Ayrıca proje süresince gerekli bilgileri her zaman bana sunan, ARÇELİK Eskişehir Buzdolabı İşletmesi'ne ve ARÇELİK Merkez AR-GE'ye özellikle bu çalışmada firma tarafındaki desteği bize sağlayan Dr. Hüsnü KERPIÇÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bütün eğitim hayatım boyunca beni cesaretlendiren ve her zaman bana destek olan aileme teşekkürü borç bilirim.

Aralık 2015

Fırat AKAR  
Makine Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	5
1.2 Literatürdeki Çalışmalar .....	6
<b>2. POLİÜRETAN KİMYASI .....</b>	<b>7</b>
2.1 Köpük Eldesi Fiziksel Süreci .....	7
2.2 Tepkime Kinetiği ve Termokimyası .....	11
2.3 Tepkime Sürecinin Temel Elemanları.....	13
2.3.1 İzosiyanat (-NCO).....	13
2.3.2 Poliöl (-OH) .....	14
2.3.3 Su (H <sub>2</sub> O).....	15
2.3.4 Üre (-NH).....	15
2.3.5 Fiziksel Kabartıcı (C-70) .....	16
<b>3. TEPKİME KİNETİĞİ MODELİ .....</b>	<b>17</b>
<b>4. TEPKİME KİNETİĞİ MODELİNİN GERÇEK SÜRECE UYARLANMASI</b>	<b>21</b>
<b>5. KABİN DOLUM SÜRESİ VE BAŞLANGIÇ KOŞULLARININ</b>	<b>30</b>
<b>ENİYİLEŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>30</b>
5.1 Tepkime Kinetiği Sayısal Deney Tasarımı .....	30
5.1.1 Durum 1 .....	31
5.1.2 Durum 2 .....	35
5.1.3 Durum 3 .....	38
<b>6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD) MODELİ .....</b>	<b>44</b>
6.1 Korunum Denklemleri.....	44
6.2 Hava Fazı İçin Çalkantı Modeli .....	45
6.3 Buzdolabı Kabini Geometrisi ve Hesaplama Ağı .....	48
6.4 HAD Dizgesi ve Çözüm Değişkenleri .....	52
<b>7. HAD BENZETİMLERİ SONUÇLARI .....</b>	<b>56</b>
<b>8. ÇIKARIMLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>62</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>63</b>



## **KISALTMALAR**

- HAD** : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği  
**UDF** : Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar  
**MDI** : Metilen Difenil Diizosiyanat  
**HDI** : Hidrojenlenmiş Metilen Difenil Diizosiyanat  
**NDI** : Naftalin Diizosiyanat  
**FK** : Fiziksel Kabartıcı  
**URANS** : Zamana bağımlı Reynolds ortalamaları alınmış Navier Stokes denklemleri



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 1.1 : Poliüretan köpük yoğunluğu ve sertliğine göre kullanım alanları .....	3
Çizelge 2.1 : Katı poliüretan köpük oluşumunun ayrıntılı tepkime adımları .....	12
Çizelge 3.1 : Tepkime kinetiği modeli ayrıntılı tepkime adımları.....	17
Çizelge 4.1 : Tepkime kinetiği modeli yazılımı başlangıç koşulları .....	21
Çizelge 6.1 : Yayılım katsayısı ve kaynak terimleri.....	45





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Poliüretan pazarı büyüme hacimi .....	2
Şekil 1.2 : Farklı poliüretan teknolojilerinin pazar payları.....	3
Şekil 1.3 : Açık (sol) ve kapalı (sağ) hücre yapıları .....	4
Şekil 2.1 : Zamana bağlı sıcaklık, yükselti ve tepkime aşamaları .....	8
Şekil 2.2 : Silindirik kapta katı polüretan köpük oluşumu deneyi.....	8
Şekil 2.3 : Farklı fiziksel kabartıcılar kullanılarak oluşturulan köpüklerde ısı geçişi başarımına farklı mekzanizmaların katkısı .....	10
Şekil 2.4 : Hücre içerisindeki gaz basınçlarının zamanla değişimi .....	11
Şekil 2.5 : Isıl iletkenlik başarımında yaşlanma eğrisi .....	11
Şekil 2.6 : MDI atomik gösterimi .....	14
Şekil 2.7 : Katı poliüretan polimer zincirinde poliölün atomik yeri.....	14
Şekil 2.8 : Köpük içerisindeki sert üre yapıları .....	16
Şekil 4.1 : Tepkime kinetiği modelinde zamana bağlı yoğunluk değişimi.....	23
Şekil 4.2 : Tepkime kinetiği modeli hesaplanmış $\rho^{-1}$ 'in zamana bağlı değişimi. ....	24
Şekil 4.3 : Ağdalılığın taslak gösterimi .....	24
Şekil 4.4 : Dinamik ağdalılığın zamana bağlı değişim eğrisi. ....	25
Şekil 4.5 : Tepkime kinetiği modeli zamana bağlı poliüretan kütle oranı değişimi. .	26
Şekil 4.6 : Tepkime kinetiği modeli ile hesaplanmış zamana bağlı üre eğrisi. ....	27
Şekil 4.7 : Üre kütle oranının birim zamandaki artım miktarları eğrisi.....	28
Şekil 4.8 : Tepkime kinetiği modelinde sıcaklık zaman eğrisi.....	29
Şekil 5.1 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolum süresi. ....	31
Şekil 5.2 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri için dolum anında üre derişimleri. ....	32
Şekil 5.3 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki ağdalılık miktarları.....	33
Şekil 5.4 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki sıcaklık değerleri.....	33
Şekil 5.5 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki poliüretan derişimleri.....	34
Şekil 5.6 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolum süresi. ....	35
Şekil 5.7 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki üre derişimleri.....	36
Şekil 5.8 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki ağdalılık miktarları.....	36

<b>Şekil 5.9</b> : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki sıcaklık değerleri.....	37
<b>Şekil 5.10</b> : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki poliüretan derişimleri.....	38
<b>Şekil 5.11</b> : Farklı fiziksel kabartıcı ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolun süresi.....	39
<b>Şekil 5.12</b> : Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki üre derişimleri.....	40
<b>Şekil 5.13</b> : Farklı fiziksel kabartıcı ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki ağdalılık miktarları.....	40
<b>Şekil 5.14</b> : Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki sıcaklık.....	41
<b>Şekil 5.15</b> : Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki poliüretan derişimleri.....	42
<b>Şekil 6.1</b> : Buzdolabı kabini iç kanalları a) önden ve b) arkadan görünümü.....	48
<b>Şekil 6.2</b> : Hesaplama ağı izometrik görünümü.....	49
<b>Şekil 6.3</b> : Hava çıkış deliklerinde hesaplama ağı yapısı.....	50
<b>Şekil 6.4</b> : Malzeme basım deliğinde hesaplama ağı yapısı.....	50
<b>Şekil 6.5</b> : Kabin buzluk kısmında hesaplama ağı yapısı.....	51
<b>Şekil 6.6</b> : Kabin basım süreci duruşu ve delik konumları.....	51
<b>Şekil 6.7</b> : Hesaplama dizgesi çalışma yöntemi gösterimi.....	54
<b>Şekil 7.1</b> : Buzdolabı kabini içerisinde poliüretan köpük akışının farklı anlardaki benzetim görüntüleri.....	57
<b>Şekil 7.2</b> : Kabin içerisinde poliüretan dağılımı.....	58
<b>Şekil 7.3</b> : Kabin içerisinde üre dağılımı.....	59
<b>Şekil 7.4</b> : Kabin içerisinde fiziksel kabartıcı buharı dağılımı.....	60
<b>Şekil 7.5</b> : Poliüretan püskürtme işleminde olası sorunlu bölgeler.....	60

## SEMBOL LİSTESİ

$t$	: zaman
$T$	: sıcaklık
$h$	: yükselti
	: ısı
$A$	: alan
$\lambda$	: ısı iletim katsayısı
$P$	: basınç
$\text{Å}$	: Angstrom
	: kimyasal türlerin mol oranı
	: tepkimeye girenlerin stokiyometrik katsayıları
	: tepkimedan çıkanların stokiyometrik katsayıları
	: kimyasal tür oluşum oranı
	: tepkimelerin ileri yönlü hız sabiti
	: tepkimelerin geri yönlü hız sabiti
	: kimyasal türler için kaynak terimi
$E_a$	: etkinleşme enerjisi
$A_k$	: üstel öncesi sabit
$B$	: sıcaklık üssü
$R$	: evrensel gaz sabiti
	: konsantrasyonlara bağılı tepkime denge sabiti
	: basınca bağılı tepkime denge sabiti
	: entropi farkı
	: entalpi farkı
	: sabit basınçta özgül ısı
	: oluşum entaplisi
$Y_i$	: türlerin kütle oranı
	: ortalama molar kütle
$\rho$	: yoğunluk
$V$	: hacim
$R$	: silindir yarı çapı
$m$	: kütle
	: dinamik ağırlılık
	: kayma gerilmesi
	: bir değişkenin iki farklı değeri arasındaki fark
$t_D$	: buzdolabı kabini dolum süresi
	: taşınan skaler
	: hız
	: yayılım katsayısı
	: taşınan skalerler için kaynak terimi
	: kinematik ağırlılık
	: ortalama hız
	: değişken hız

	: etkin çalkantı gerilmesi
	: kronocker delta işleci
	: çalkantı modeli sabiti
$k$	: çalkantı kinetik enerjisi
$\varepsilon$	: bozunum terimi
	: Lewis sayısı
	: Schmidt sayısı
	: Prandtl sayısı
	: kütle yayılmalığı
$P_b$	: hidrostatik kaldırma kuvvetinden kaynaklı çalkantı kinetik enerjisi
	: dönme tensörü
	: tepkimeye giren toplam tür sayısı
	: Courant sayısı
$G_b$	: çalkantı kinetik enerjisi oluşumu

## **YALITIM MALZEMESİ ENJEKSİYON SÜRECİ OPTİMİZE EDİLMİŞ YENİ BİR BUZDOLABI KABİNİ TASARIMI**

### **ÖZET**

Uluslararası piyasada rekabet hızla büyümekte firmalar enerji verimliliği konusunda yarışmakta ve bu konu üzerine büyük yatırımlar yaparak AR-GE çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu yarış buzdolabı üreticileri arasında da güçlenmektedir. Enerji verimliliği yüksek bir buzdolabının ısı yalıtım kabiliyetlerinin de yüksek olması gerekmektedir. Buzdolaplarında ısı yalıtımı sağlamak için kabin duvarları içerisinde katı poliüretan köpük kullanılmaktadır. İyi bir yalıtıma sahip buzdolabı kabininde poliüretan köpük; kabinin her yerine homojen şekilde dağılmalı, poliüretan köpüğün yalıtım ve mekanik dayanım özellikleri istenen şartları sağlamalı, kabin dolum süresi mümkün olduğu kadar kısa olmalı ve bu kısıtlar sağlanırken köpük üretiminde kullanılan kimyasallara yapılan harcamalar en aza indirilmelidir. Bütün bunların sağlanabilmesi için buzdolabı kabinlerine poliüretan basım işleminde kabin içerisinde hapsolan havanın çıkabilmesi için gerekli olan hava çıkış deliklerinin yerleri, sayıları ve boyutları, tepkimelerin gelişimi, poliüretan köpüğün ilerlediği kanalların yapısı, kalıp içerisine püskürtülen malzemenin sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı işlemin performansını belirleyen değişkenlerdir. Bu değişkenlerin en iyileştirilmesi fiziksel sürecin iyice anlaşılmasına bağlıdır. Ancak bu sayede buzdolabına poliüretan basım işlemi üzerinde en üst derecede kontrol sağlanabilir ve gelecekte üretilmesi planlanan buzdolaplarında yukarıda bahsi geçen değişkenler işlem öncesinde yaklaşık olarak belirlenmesiyle; poliüretan basım süresinden ve süreçte kullanılan malzeme harcamalarından kazanım sağlanır ve işlem verimli bir şekilde uygulanabilir.

Bu bilgilerin ışığında ARÇELİK A.Ş ile SAN-TEZ 01213.STZ-2012-1 adı altında bir proje başlatılmış ve dört kapılı bir buzdolabı benzetimlerde kullanılmak üzere seçilmiştir. Yukarıda söz edilen en uygun koşulların saptanması için bu buzdolabı kabini içerisine poliüretan basım işleminin hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) benzetimleri yapılmıştır. Söz konusu fiziksel süreç zamana bağlı, üç boyutlu, tepkimeli, çalkantılı ve çok fazlı akış niteliğindedir. Kabin içerisindeki akış kimyasal tepkimelerden etkilenmektedir. HAD benzetimlerine ek olarak poliüretan köpük oluşum tepkimelerinin kinetikleri akış olmadan sadece yerel olarak incelenmiş ve en uygun işletim koşullarının saptanması amaçlanmıştır. Kabin geometrisi için örülen çözüm ağları sonlu hacimler yöntemi ile ANSYS MESHING ve ICEM CFD yazılımları ile oluşturulmuştur. Geometri üzerindeki çeşitli iyileştirmeler SOLIDWORKS ve CATIA yazılımları kullanılarak yapılmıştır. Bunun yanında tepkime kinetiklerinin modellenmesi için FORTRAN programlama dilinde yazılmış

ve İTÜ Akışkanlar Grubu içerisinde geliştirilmiş, kimyasal tepkimelerin kinetiklerini çözen bir yazılım kullanılmıştır. HAD benzetimleri FLUENT yazılımında gerçekleştirilmiştir. Tepkime kinetiği çözüm içerisinde kullanıcı tanımlı fonksiyonlar (UDF) aracılığı ile dışarıdan ilintilenecek; FLUENT ve tepkime kinetiği yazılımı eş zamanlı çalıştırılmıştır. Hesaplamaların sonuçları TECPLOT ve MATLAB yazılımları kullanılarak görselleştirilmiştir. Buna ek olarak tepkimeye giren türlerin fiziksel, kimyasal ve termodinamik özelliklerinin hesaplamalarda kullanılacak biçime getirilmesinde EXCEL yazılımı ve proje süresince yazılmış birtakım FORTRAN kodları kullanılmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda buzdolabı kabine poliüretan basım sürecinin daha verimli hale getirilmesi için önerilerde bulunulmuştur. Gelecek çalışma planı, önerilen iyileştirmeler doğrultusunda yeni bir kabin geometrisi hazırlanarak, HAD benzetimlerinin yapılmasıdır. Yeni tasarımla yapılan benzetimlerle, bu çalışmadaki benzetimler karşılaştırılıp iyileşmeler gözlemlenecek ve sonuçlar doğrultusunda eski ve yeni tasarıma poliüretan basımı yapılarak HAD sonuçları ile önerilen düzeltmelerin gerçek buzdolabı geometrisinde sağladığı iyileştirmeler gözlemlenecektir. Sonuç olarak süreç kişiden kişiye aktarılan tecrübeler ek olarak bu çalışmada elde edilen bilgi birikimi ile gerçekleştirilerek, uluslararası pazarda rekabetçi teknolojik ürünlerin geliştirilmesi yolunun açılması amaçlanmaktadır.

# **DESIGNING A NEW REFRIGERATOR CABINET BASED ON OPTIMIZATION OF THE INSULATION MATERIAL INJECTION PROCESS**

## **SUMMARY**

There are many advantages of using polyurethane materials, including low cost, light weight, enhanced thermal and electrical insulation, and high impact strength and, therefore, it has many applications, as for example, producing various kinds of complex parts including automobile interior furnitures, household appliances and housing industry. Use of polyurethane foam is also spreading rapidly in refrigerators as insulation material.

Reaction injection molding of polyurethane foam is a process in that two or more chemical components mix, chemically react and finally form a foam which flows into the mold cavity where the polymerization is initiated. Energy efficiency of modern refrigerators demands a very effective insulation and, hence, the foam is required to fill complex cavities in very short time scales. In order to increase cavity filling efficiency while shorten the injection molding process, it is necessary to understand the phenomena of mixing, reaction kinetics, bubble nucleation and growth and two-phase flow behaviour during mold filling. Lack of control on reactive injection molding parameters results in variations from load to load and even from part to part, leading to serious quality degradation and, thus, the whole process becomes labor-intensive at elevated material costs. International competition between companies is rapidly growing. Hence companies race in the energy efficiency field and invest large amount of money on R&D activities for having more efficient products. For refrigerators; energy efficiency is highly relative to its insulation performance. Rigid polyurethane foam is used as insulation material between the refrigerators cabinet walls. Good insulation performance depends on the homogeneity of foam in the cabinet. Another function of the foam is the mechanical support to thin cabinet walls. Short injection time and minimized chemical costs are desired in mass production. To provide these requirements air outlets orientation, numbers, diameters and progress of chemical reactions, the temperature of the injected mixture and cabinet temperature are important parameters. If we want to find these optimum parameters we have to understand the nature of the polyurethane injection process. Thus polyurethane injection process become more controllable and we can predict process parameters for new designs before the manufacturing. In the light of these informations the aims of the thesis obtained as;

- Decreasing the usage of the foaming materials for single cabinet volume,

- Decreasing the costs due to change of the initial conditions of the process,
- Decreasing the foam filling time of the cabinet,
- Increasing the insulation and structural strength performance of the foam with minimizing the air traps in it,
- Optimization positions, sizes and the numbers of air outlets to make the polyurethane injection process more efficient,
- Understanding the nature of polyurethane flow and getting a solid scientific knowledge about it.

From this point of view a project started by ARCELIK Inc. and ITU Fluids Group with the support of the Ministry of Science Industry and Technology Commissary. A refrigerator with four doors chosen for the computational fluid dynamics (CFD) simulations. Flow of the rigid polyurethane foam in the cabinet is three dimensional, reactive, multiphase and time dependent. Also solidification occurs due to chemical reactions. Chemical reactions effect the flow very strongly. Except the CFD simulations, a chemical kinetics study has been done without flow to obtain optimum initial reaction conditions locally such as initial mass fractions of the species and initial temperature. ANSYS Meshing and ICEM CFD were used for mesh generation. CATIA and SOLIDWORKS were used for CAD and geometry refinements. On the other hand a FORTRAN code were used for modeling the chemical kinetics. Chemistry code was developed in the ITU Fluids Group. CFD simulations were done with the FLUENT software. Chemistry code was implemented in FLUENT by using the user defined functions (UDF) and they run simultaneously. Post processing had been done with the TECPLOT and MATLAB. Furthermore, EXCEL and some FORTRAN codes which were written during the project, are used for converting the physical, chemical and thermodynamic data for calculations.

The validation of the chemical kinetics with real process is done by comparison between an experimental data. Gelling and blowing reaction rates are adjusted with the calibration of the Arrhenius parameters. Thus a similar behavior obtained with real reactions. Density, viscosity and enthalpies are calculated with sixth degree polynomials. Except from the CFD calculations a numerical study has been done with the chemical kinetics only to obtain the optimum process conditions such as; initial temperature, initial mass fraction of the species. Three different cases were investigated; in the first case isocyanate is decreased and the water is increased; in the second case polyol is decreased and water is increased and in the third case physical blowing agent is increased and all other species mass fractions decreased on condition that their ratios remain constant one to another. Temperature is changed 20 to 45 with a step of  $t = 5$ . According to these chemical kinetics are investigated at 11763 different initial conditions. As a result a number of 1411560 element solution space is obtained. This numerical study shows that considerable reduction can be achieved without changing the polyurethane foam properties.



Cutcell meshing method was used for creating computational grid and finite volume method was used to discretization of the governing equations on the grid. Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) equations and twelve scalar equations for enthalpy and mass fractions of isocyanate, polyol, polyurethane, water liquid and vapor, carbamic acid, amine and urea are solved for a mesh size of 1.2 million cells and at a average time step of                      seconds. Complex turbulent flow and chemical reactions limit the time step. As the flow is turbulent, a conventional two-equation *k*- turbulent model was used with wall functions and standart model constants. There is an inlet at the bottom and fifteen air outlets at the top of the refrigerator cabinet. The injected mixture temperature is 21      and the cabinet wall temperature is 40      . Adiabatic boundary condition assumed for all cabinet walls. Hence no heat transfer occurs through the walls. The injection time period is 12.99 s and the inlet mass flow rate is 1.5 kg/s. Generally 64 processors and 2 Gb memory was used for calculations. The results of CFD shows very detailed aspect of the reacting, turbulent, multiphase solidification flow of the polyurethane foam in the refrigerator cabinet. According to the CFD results an asymmetric flow is observed in the cabinet. At the left side of the cabinet foam flow slower than right side and this caused by the thin walls of icemaker. Also it is observed that foam strike to the air outlets and this shows the importance of optimization of locations, sizes and number of air outlets.

Finally some suggestions were made with the results of the CFD simulations and chemical kinetics calculations. The future work plans are designing a new refrigerator cabinet geometry in line with these suggestions and make CFD simulations with new design. Afterward, new and previous results will compare and the improvements will be observed. According to observations some experiments will be done with the new and old designs if it will necessary. Thanks to this, we will have extensive knowledge about polyurethane injection process and manufacture competitive products for global market.



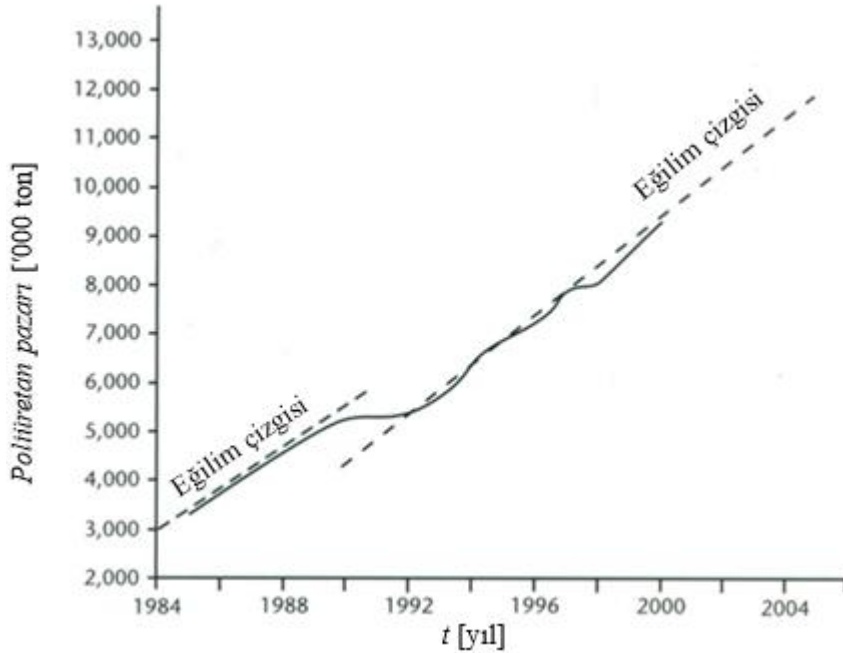
## 1. GİRİŞ

İzosiyanat ve hidroksil grupları arasındaki tepkimeler 19. Yüzyıl'da tanımlanmış olsa da, poliüretanın endüstriyel bir ürün olarak kullanılmaya başlanması 1930'larda Alman bilim adamı Otto Bayer'in diizosiyanat ve diol arasında katılma polimerleşme tepkimesi gerçekleştirerek poliüretan eldesine dayanır. Poliüretanın ilk kullanım alanları elastomerler, yüzey kaplama malzemeleri ve yapıştırıcılarda 1945 ve 1947 yılları arasında olmuştur. Daha sonra 1953 yılında esnek poliüretan ve 1957 yılında katı poliüretanın üretilmesi bunları takip etmiştir. Bu tarihlerden itibaren poliüretanların kullanımı yaygınlaşmıştır. Günümüzde poliüretanlar mobilyalarda, ayakkabı tabanlarında, yapı malzemelerinde, araçlarımızın kabinlerinde ve daha birçok alanda tercih edilen bir malzeme halini almıştır. Evlerimizde ve araçlarımızda kullandığımız koltukların içindeki dayanıklı ve rahat malzeme esnek poliüretandan üretilmektedir. Katı poliüretanlar endüstriyel ve evsel buzdolaplarında ve binalarda ısı yalıtımı sağlamak için kullanılmaktadır. Poliüretan yapıştırıcılar mobilyalarda, yüke dayanıklı ve su geçirmez çatı malzemelerinde, dekoratif duvar kaplamalarında kullanılmaktadır. Ayakkabılar, esnek spor malzemeleri, araç tamponları ise çeşitli poliüretan elastomerlerden elde edilmektedir. Üzerimizdeki kıyafetlerin birçoğu hafif, rahat ve nefes alabilir özelliği olan poliüretan membranlardan üretilmektedir. Tıbbi alanda implant malzemesi olarak ise insan vücudunda kullanılabilen biyouyumlu poliüretanlar geliştirilmiştir. Poliüretan kaplamalar köprülerimizi ve yapılarımızı aşınmadan korumaktadır. Poliüretan yapıştırıcılar ise bilgisayar bileşenlerinden uçak kanatlarına kadar çok geniş bir alanda kullanıma sahiptir.

Poliüretan kullanım alanı bakımından çeşitlilik göstermesinden ve son ürününün özelliklerini değiştirmek çok kolay olduğundan, uluslararası piyasada gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Poliüretan üretimi görece düşük maliyetli olmasa da, uygulanabilirlik üstünlükleriyle aynı alanda kullanılan malzemelere tercih edilir hale gelmişlerdir. Örneğin; poliüretanların çeşitli kalıplara basılmasında dolum benzer işlemlere göre daha düşük basınçlar olmasından dolayı kalıp malzemeleri çelik yerine daha ucuz olan alüminyum, polyster hatta plastik kökenli

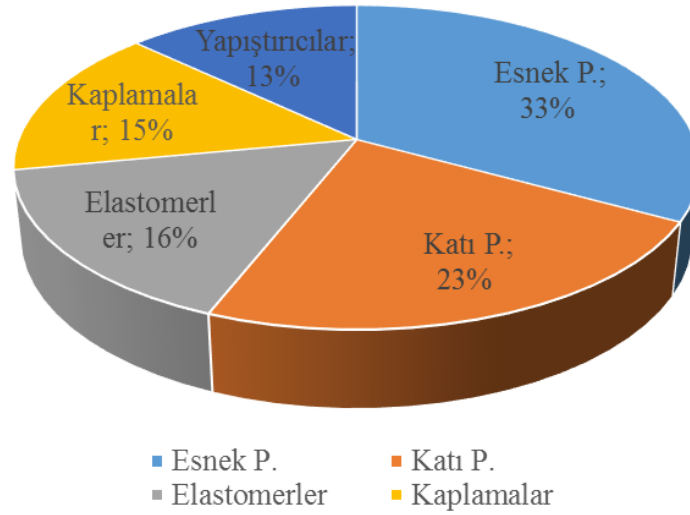
malzemelerden üretilmektedir. Bu üretimi hızlandırdığı gibi , süreç geliştirme çalışmalarına esneklik kazandırmaktadır.

Poliüretan piyasasındaki büyüme sadece populasyonun artmasıyla değil aynı zamanda teknolojik alandaki gelişmelere koşut olarak son 15 yılda ekonomik durgunluk zamanları da buna dahil olmak üzere yılda ortalama %7 bir büyüme gerçekleştirmiştir. Şekil 1.1’de yıllara göre poliüretan pazarındaki büyüme elde edilen veriler dış değer yöntemi ile ötelenerek 2005 yılına kadar verilmiştir. Eğri incelendiğinde pazar artışının sürekli olduğu görülmektedir. 1984 yılında 3 milyon ton olan pazar hacmi 2005 yılında 12 milyon tona ulaşmıştır ve bu da ortalama yılda yaklaşık 476 milyonluk bir pazar artışına denk gelmektedir.



**Şekil 1.1 :** Poliüretan pazarı büyüme hacimi [1].

Bu pazarda farklı poliüretan teknolojilerinin payları Şekil 1.2’deki pasta dilimi çizgede görülmektedir. Toplam pazarın en büyük bölümünü % 33’lük pay ile esnek poliüretanlar kaplamaktadır. Bunu yüzde 23’lük bir oran ile katı ve yarı katı poliüretanlar takip etmektedir. Geri kalan payı ise sırasıyla elastomerler, kaplamalar ve yapıştırıcılar oluşturmaktadır. Buradan yüzde 23’lük pay ile buzdolaplarında ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılan katı poliüretanların toplam kullanımda büyük bir yere sahip olduğu söylenebilir.



**Şekil 1.2 :** Farklı poliüretan teknolojilerinin pazar payları [1].

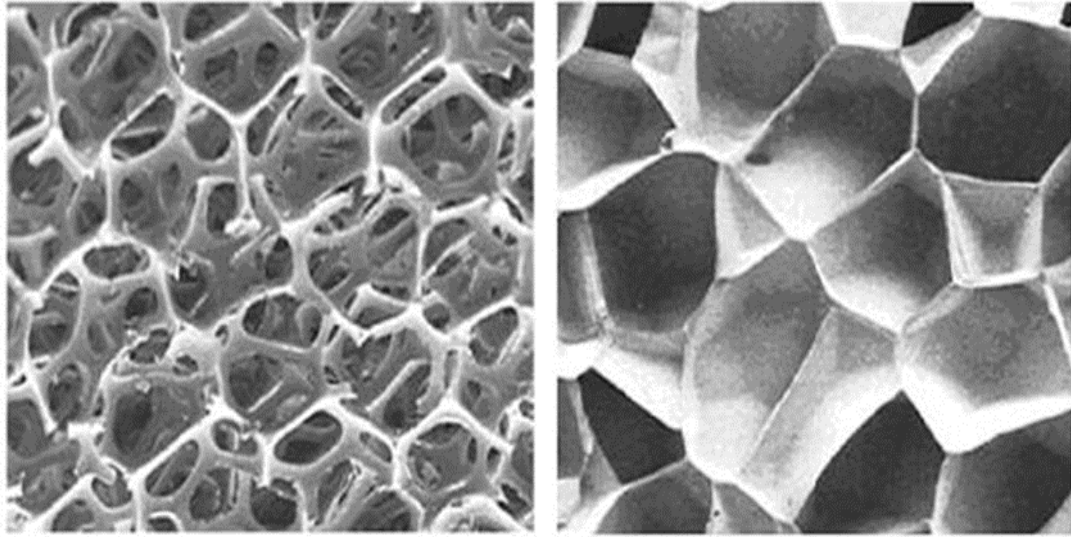
Poliüretan yoğunluğu  $6 \text{ kg/m}^3$  ile  $1220 \text{ kg/m}^3$  aralığında çok geniş bir yelpazede üretilmektedir ve bütün bu yoğunluk değerleri için farklı sertliğe sahiptir. Buraya kadar verilen bilgileri daha anlaşılır hale getirebilmek için Çizelge 1.1’de poliüretan farklı yoğunluk ve sertlik değerleri için kullanım alanları ve türleri verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan katı poliüretanlar çizelgenin en sağ altında düşük yoğunluk ve yüksek sertlik bölgesinde bulunmaktadır.

**Çizelge 1.1 :** Poliüretan köpük yoğunluğu ve sertliğine göre kullanım alanları [1].

↑	Katı P.	Yazıcı silindirleri	Termoplastik poliüretanlar	Elastomerler	Boyalar	Katı poliüretan plastikler	
		Yapıştırıcılar					
	Mikrohücreli P.	Kaplamalar	Sentetik deriler	Yapısal köpükler			
		Araç parçaları					
		Ayakkabı tabanları					
	Yüksek yoğunluklu P.	Halı altlıkları	Yarı katı poliüretanlar	Koltuk kalıpları			
	Düşük yoğunluklu P.	Döşemeler için esnek poliüretanlar	Ambalaj köpükleri			Katı yalıtım poliüretan köpükleri	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <span>→</span> <span>Artan Polimer Sertliği</span> </div>						

Düşük yoğunluk ve yüksek sertlik sayesinde poliüretan köpük buzdolabı ağırlığını çok az arttırmakta ve kabin duvarlarını destekleyici bir görev üstlenmektedir. Aynı

zamanda ısı yalıtım malzemesi olarak poliüretan kullanılan buzdolapları, yalıtım malzemesi fiberglas olan buzdolaplarından yaklaşık %40 daha az enerji tüketmekte ve %40 daha az sera gazı salımı yapmaktadır [2]. Yüksek enerji verimliliği ve düşük sera gazı salınım değerleri poliüretanın tercih edilmesinde önemli bir etkidir. Katı poliüretan köpükler metilen difenil diizosiyanat (MDI), poliöl, fiziksel kabartıcılar, katalizörler, su ve yüzey aktifleştircilerin belirli oranda karıştırılması ile elde edilmektedir. Bu yöntemle elde edilen köpük düşük yoğunluğa, düşük ısı iletim katsayısına ve yüksek mukavemete sahiptir. Düşük ısı iletim katsayısına ve yüksek mukavemete sahip olmasının sebebi köpüğün kapalı hücre yapısıdır. Kapalı hücreler içerisinde düşük ısı iletim katsayısına sahip fiziksel kabartıcı gazı hapsolür. Bu nedenle yalıtım malzemesi olarak kullanılan köpüklerde kapalı hücre yapısı istenirken esnek poliüretanlarda ise açık hücre yapısı istenen bir özelliktir [1]. Şekil 1.3’de açık ve kapalı hücre yapısına sahip köpük örnekleri verilmiştir.



**Şekil 1.3 :** Açık (sol) ve kapalı (sağ) hücre yapıları [1].

## 1.1 Tezin Amacı

Poliüretan yapıların karmaşık kalıplara basım işlemi kullanılan teknolojiye koşut düzeyde bir bilgi birikiminden yoksun olarak, çoğu kez kişiden kişiye aktarılan deneyimler ile sürdürülmektedir. Bu da poliüretan basım sürecini daha verimsiz hale getirmektedir. Kalıp içerisindeki tepkimeli, iki fazlı, çalkantılı ve üç boyutlu akışın davranışları hakkında yeterli miktarda bilgi birikimi olmamasından dolayı işletme şartlarının ve basım yöntemlerinin önceden kestirilmesi neredeyse imkansız hale gelmektedir. Söz konusu işletme şartları başlangıç sıcaklıkları, basılan malzeme miktarları, basım yapılan kabinin duruşu, akışın ilerlediği kanalların yapısı ve kabinden poliüretan köpüğün ittiği havanın çıktığı deliklerin konum, boyut ve sayıları olarak düşünülebilir. Bu değişkenlerin öngörülüp bilimsel bir altyapı ile belirlenememesinden ötürü kabin dolum süreleri uzamakta, kabin dışına malzeme taşması nedeni ile harcanan malzeme miktarları artmakta, kabin geometrilerinin poliüretan köpük akışına uygun tasarlanmamasından dolayı daha verimsiz ve dayanıksız kabinler üretilmektedir. Bunun sonucunda maliyetler artmakta ve daha verimsiz ürünler ortaya çıkmaktadır.

Bu tezin amacı tez çalışmaları boyunca edinilmiş bilgi birikiminin söz konusu işlemde kullanılarak yurtdışı pazarda teknolojik bağlamda daha rekabetçi ürünlerin yolunun açılmasını sağlamaktır. Bunu sağlamak ulaşılmak istenen hedefler;

1. Birim kabin hacmi için kullanılan malzeme miktarını en aza indirmek.
2. Maliyeti yüksek olan türlerin kullanımını azaltmak.
3. Kabin dolum süresini kısaltmak.
4. Kabin içerisinde kalan hava deliklerini en aza indirerek, kabinin yalıtım ve yapısal dayanım özelliklerini iyileştirmek.
5. Kabin hava çıkış deliklerinin konumlarını, boyutlarını ve sayılarını en iyileştirerek poliüretan basım işlemi daha verimli hale getirmek.
6. Bu hedeflere ulaşılması sırasında çok fazlı, tepkimeli, çalkantılı, üç boyutlu ve katılma içeren akışların doğası hakkında bilgi birikimi elde etmektir.

## 1.2 Literatürdeki Çalışmalar

Ulaşılabilir literatürde poliüretan akışı üzerine yapılmış az sayıda çalışma mevcuttur. Bunlardan biri [3] numaralı kaynakta verilen Koreli araştırmacıların çalışmasıdır. Bu çalışmada poliüretan akışı sıkıştırılabilir akış olarak ele alınmış ve zamana bağlı HAD çözümlenmeleri yapılmıştır. Araştırmacılar altıyüzlü hücrelerden oluşan bir hesaplama ağı oluşturmuş ve denklemlerin ayrıklaştırılmasında sonlu hacimler yöntemi kullanmışlardır. Çalışmada poliüretan yüzeyi VOF (*Volume of Fluid*) adı verilen çok fazlı akışlarda, fazlar arası yüzeyin ötelenmesi için kullanılan yöntem kullanılmıştır. Yoğunluk ve ağıdalılıktaki değişimler zamana bağlı tanımlanmış ve tepkimeler hesaplamalara katılmamıştır. Bu durumda akış enerji denklemi çözülmeyen modellenmiştir. Basınç ve hız değerlerinin ikili çözümlerinin bağlanması SIMPLE yöntemi kullanılmıştır. Deneysel olarak belirlenen yoğunluk ve ağıdalılıktaki değişim sadece deneyin yapıldığı özel süreci modelleme yeteneğine sahiptir. Bu tez çalışmasında ise akış içerisinde ayrıntılı poliüretan tepkimeleri hesaplanmış ve tepkimeler sonucunda değişen sıcaklık ve tür kütle oranları ile kabin içerisindeki her bir noktada malzeme kompozisyonu, yoğunluk, ağıdalılık ve sıcaklık ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu durumun avantajı mevcut yerel değişkenler ile ısı iletim katsayısı, basma dayanımı gibi poliüretan köpük için önemli ölçütlerin saptanmasına imkan sağlamasıdır. Seo ve Youn'un [4] çalışmasında ise poliüretan akışında tepkimelerin bir kısmı hesaplanmıştır fakat malzemenin ittiği hava akışındaki davranışlar detaylı olarak incelenmemiştir.



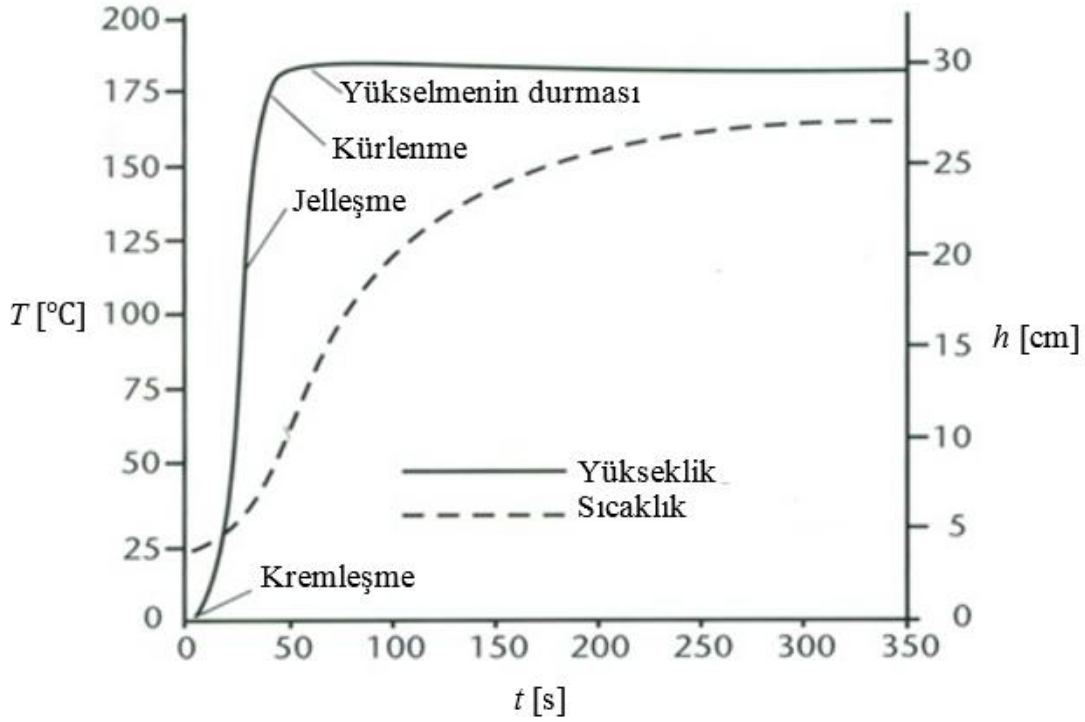
## 2. POLİÜRETAN KİMYASI

### 2.1 Köpük Eldesi Fiziksel Süreci

Katı poliüretan köpük eldesinde izosiyanat ve poliöl karıştırılması ile başlayan tepkimelerle, karışım hacmi başlangıçtaki hacminin yaklaşık 30 katına kadar genişlemektedir [1]. Köpüğün kapalı hücre yapısını karışıma katılan yüzey aktif maddeler ve poliöl içerisine katılan su kontrol etmektedir. Uygun olmayan su oranı ve yüzey aktif maddesi seçimi açık hücre yapısı gibi istenmeyen bir durumla sonuçlanabilir. Tepkimeler sırasında istenen iç yapı bir kere sağlandıktan sonra köpük kendini destekler hale gelir ve kapalı hücre içerisindeki gazların genişlemesi ve tepkimeler sebebiyle yoğunluğun azalması kabarmayı başlatır. Kabarma köpüğün püskürtüldüğü kalıbı tamamen doldurmasıyla veya ağıdalılığın köpüğü durduracak düzeye kadar artmasıyla son bulur. Isı yayan tepkimelerden dolayı köpük eldesi sırasında köpük merkezindeki sıcaklık 190 dereceye kadar yükselmektedir. Merkezdeki sıcaklığın çevre sıcaklığına düşmesi saatler hatta köpüğün boyutuna göre bazen günler sürmektedir.

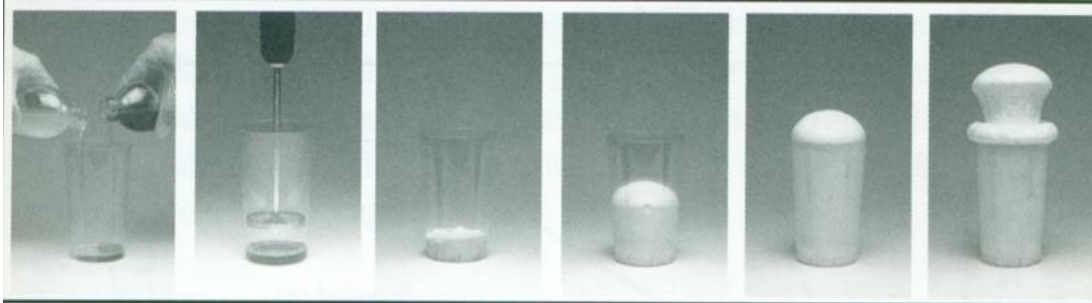
Poliüretan köpük oluşumu bir takım aşamalara ayrılarak tanımlanmaktadır. Bunlar; kremleşme, jelleşme, yapışma öncesi süre ve kabarmanın sona ermesidir [1]. Kremleşme aşaması türlerin karıştırılmasından köpüklenmeye kadar geçen süredir ve işlemin erken evrelerinde gözlemlenir. Jelleşme aşaması ilk andan köpük içerisine bir çubuk batırıldığına polimer ipliklerinin görünür hale gelmesine kadar geçen süredir. Bu süreci yapışma öncesi süre veya kürlenme süresi takip eder. Kürlenme süresi kremleşme aşamasından köpük yüzeyinin yapışkanlığını yitirdiği ana kadar geçen süredir. Son olarak kabarmanın sona ermesi köpük yükselmesini daha fazla sürdüremeyerek en fazla yüksekliğe ulaştığı zamana kadar geçen süre olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.1’de bu aşamaları ve sıcaklığı zamana bağlı olarak gösteren ve kaynaklardan alınmış deney verileri ile oluşturulmuş bir eğri görülmektedir. Eğride kesikli çizgi köpük sıcaklığını ( ) cinsinden, sürekli çizgi ise köpük yüksekliğini (cm) cinsinden temsil etmektedir. Köpük aşamaları sürekli çizgi üzerinde gösterilmiştir. Eğri incelendiğinde kremleşmenin neredeyse  $t = 0$  s anında başladığı ve bunu takip eden diğer aşamaların yaklaşık 60 saniyede sona erdiği görülmektedir. Köpük yüksekliği 60 saniyede 5 cm’den yaklaşık 30 cm’ye ulaşmıştır. Buradan köpüğün ortalama yükselme hızının 0.416 cm/s olduğu elde

edilebilir. Sıcaklık ise kabarmanın sona ermesine rağmen artışını sürdürmekte ve 350 saniye sonunda yaklaşık 160 °C ulaşmaktadır.



Şekil 2.1 : Zamana bağlı sıcaklık, yükselti ve tepkime aşamaları [1].

Bu eğrinin buzdolabına basım sürecinin aksine üstü açık bir silindirde ve karıştırma işleminin basınç altında yapılmadığı bir deneyin sonuçlarına göre oluşturulduğu göz önüne alınmalı; buzdolabı kabini içerisinde gerçekleşen sürece birebir uygunluğu beklenmemelidir. Deneyin yapıldığı silindir ve deneyden alınan fotoğraflar Şekil 2.2’de verilmiştir.



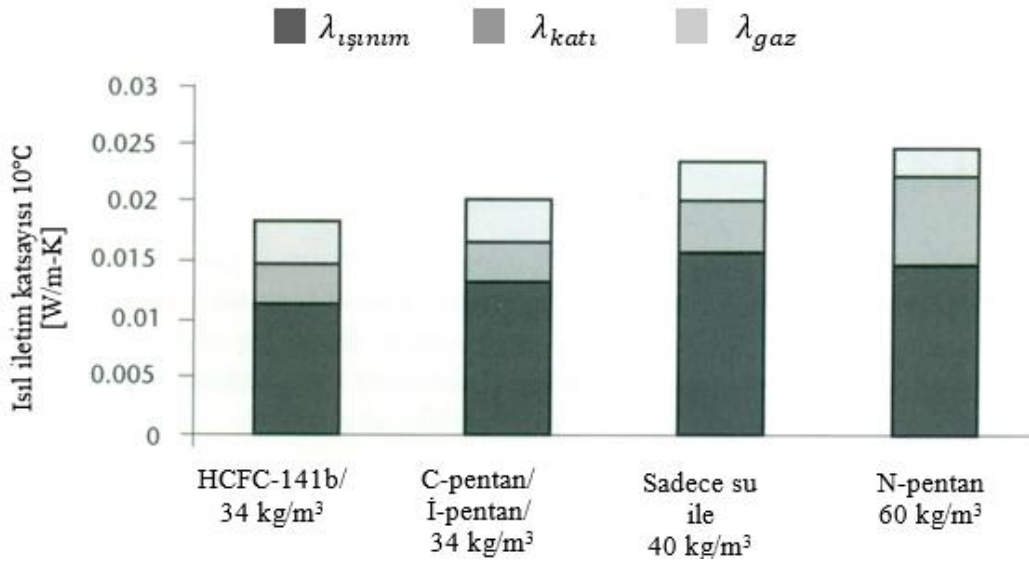
Şekil 2.2 : Silindirik kaptaki katı polüretan köpük oluşumu deneyi [1].

Eğrinin verilmesindeki amaç fiziksel sürecin nasıl gerçekleştiğinin anlaşılmasına yardımcı olmak ve buzdolabı kabini içerisindeki sürece örneksene oluşturmasıdır.

Köpük tepkimelerinde fiziksel kabartıcının seçimi önemli rol oynamaktadır. Seçilen fiziksel kabartıcıya göre köpüğün ısı iletim özellikleri değişkenlik göstermektedir. Köpük içerisindeki ısı akışı aşağıdaki gibi ifade edilir;

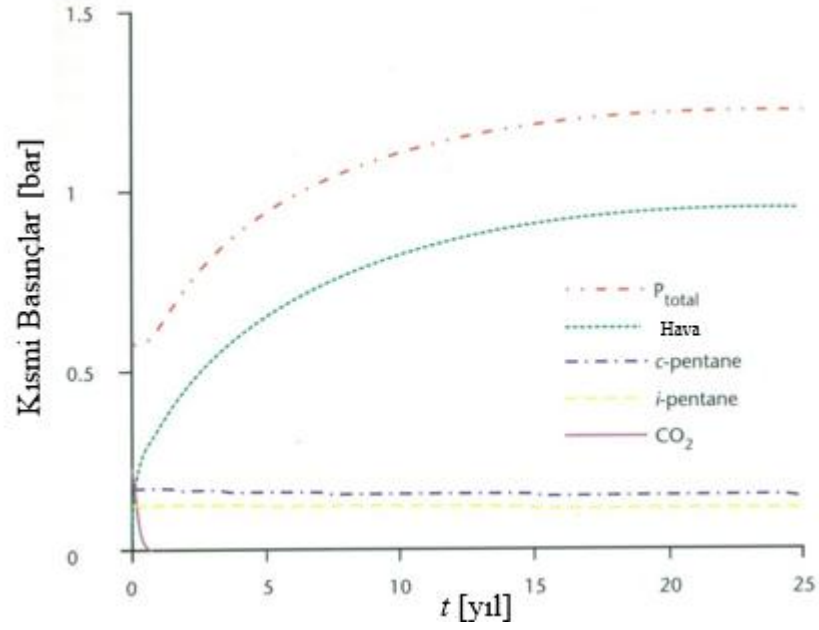
$$- \quad - \quad (2.1)$$

Burada;  $Q$  (W) cinsinden düzlemsel bir elemandan geçen toplam ısı miktarı,  $A$  ( $m^2$ ) cinsinden düzlemsel elemanın yüzey alanı,  $dT$  (K) cinsinden düzlemsel elemanın iki yüzü arasındaki sıcaklık farkı,  $dx$  (m) cinsinden düzlemsel elemanın kalınlığı ve son olarak  $\lambda$  (W/m-K) cinsinden ısı iletim katsayısını temsil etmektedir. Poliüretan katı köpüğün ısı geçişinde dört mekanizma söz konusudur. Bunlar; ışınım, iletim (katı çeperlerde) ve fiziksel kabartıcı gazda olan taşınım ve iletimdir. Poliüretan köpüğün küçük hücre yapısından dolayı fiziksel kabartıcı içerisinde taşınım ile olan ısı geçişi ihmal edilebilir. Bu yaklaşımda gazdan olan ısı geçişi iletimle sınırlı tutulmaktadır. Geriye kalan üç adet mekanizma farklı köpük bileşimleri için çeşitlilik gösterebilir. Şekil 2.3’de farklı fiziksel kabartıcıların kullanıldığı köpüklerin ısı iletim katsayıları çubuk çizgelerde gösterilmiştir. Çubuk çizgelerde üç ayrı ısı geçişi mekanizması farklı renklerle ayrılmıştır. Bu çalışmada benzetimleri yapılan süreçte fiziksel kabartıcı olarak C-pentanin bir türevi kullanılmıştır. C-pentanin kullanılan duruma karşılık gelen ısı iletim katsayısı 10’da yaklaşık 0.02 W/m-K’dir. Aynı sıcaklıkta havanın ısı iletim katsayısı ise yaklaşık 0.025 W/m-K’dir [5]. Sadece su ve N-pentanin fiziksel kabartıcı olarak kullanıldığı durumlarda ısı iletim katsayısı daha yüksek olmaktadır. Sadece HCFC-141b gazı kullanıldığında ısı iletim katsayısı daha düşük olmaktadır, fakat HCFC-141 kullanımı çevreye verdiği zararlardan dolayı sınırlandırılmıştır.

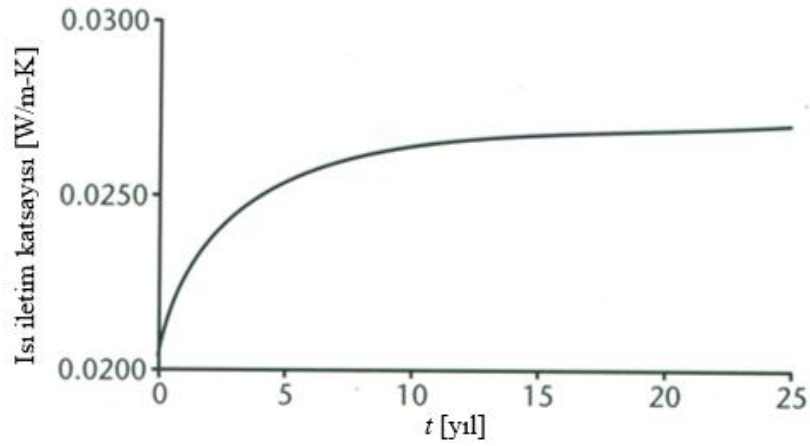


**Şekil 2.3 :** Farklı fiziksel kabartıcılar kullanılarak oluşturulan köpüklerde ısı geçişi başarımına farklı mekanizmaların katkısı [1].

Poliüretan köpük kabin içerisine basıldıktan sonra ısı iletim katsayısı zamanla artmaktadır, bu duruma ısı iletiminde yaşlanma denilmektedir [1]. Isı iletimindeki bu yaşlanmanın sebebi köpük hücrelerinde hapsolmuş gazların zamanla köpük dışına yayılmasıdır. Aynı zamanda dış ortamla ortam hava basınç farkından dolayı köpük içerisine hava girmektedir. Şekil 2.4’de hücre içerisindeki gazların kısmi basınçlarının zamanla değişimini gösteren eğri verilmiştir. Eğri incelenirken hücre içerisindeki kısmi basınçlarla türlerin kütle oranlarının doğru orantılı olduğu kabul edilmiştir. Buna göre; karbondioksit köpük oluştuktan yaklaşık bir yıl sonra tamamen tükenirken, fiziksel kabartıcılardaki azalma karbondioksite oranla çok daha az ve yavaş olmaktadır. Bu türlerin aksine hücre içerisindeki hava miktarı artmakta ve yaklaşık 25 yıl sonra basıncı 1 bar değerine ulaşmaktadır. Bunun bir sonucu olarak ısı iletimindeki yaşlanmayı gösteren eğri Şekil 2.5’te verilmiştir. Köpük ilk üretildiğinde 0.002 W/m-K olan ısı iletim katsayısı 0.0027 W/m-K kadar artmaktadır. Poliüretan hücre duvarlarından hava geçiş mekanizmaları ile ilgili ayrıntılı bilgi [6] numaralı kaynakta verilmiştir.



Şekil 2.4 : Hücre içerisindeki gaz basınçlarının zamanla değişimi [1].

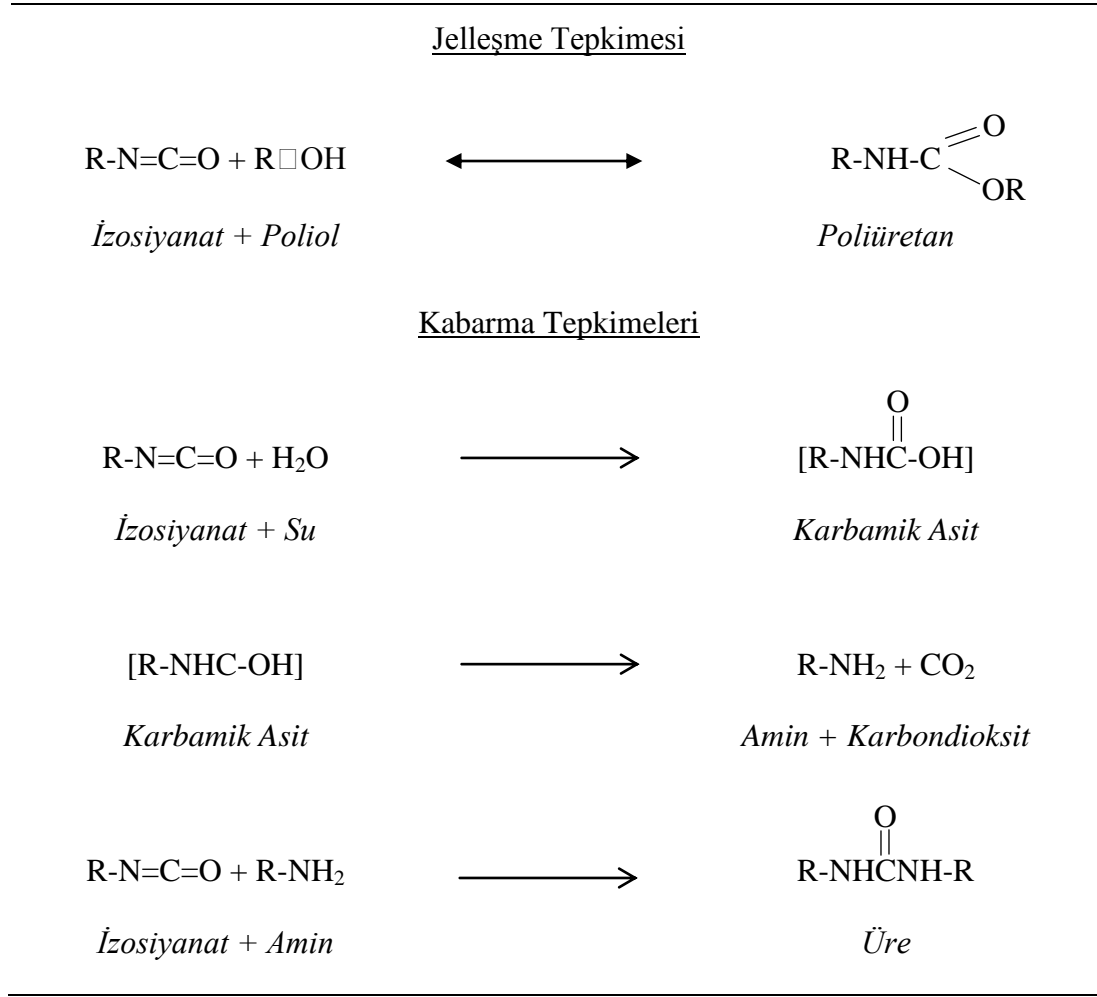


Şekil 2.5 : Isıl iletkenlik başarımında yaşlanma eğrisi [1].

## 2.2 Tepkime Kinetiği ve Termokimyası

Genelde kimyasal tepkimeler tek adımda gerçekleşiyor gibi görünse de aslında bir çok ara tepkime sonrasında son ürünler elde edilmektedir. Uygulamada sadece izosiyanat ve poliölün birtakım katkılarıyla birlikte karıştırılmasından elde edilen poliüretan köpük birden fazla ara tepkimenin ürünlerinin birleşimidir. Birden fazla ve aynı anda gerçekleşen bu tepkimelerin çoğu ısı veren tepkimelerdir. Tepkimelerden açığa çıkan ısı ile tepkimelerin devamlılığı ve kürlenme sağlanmaktadır. Tepkimelerin hangi oranda ve hızda gerçekleşeceği ise katalizörler ile kontrol edilmektedir. Poliüretan ayrıntılı tepkime adımları Çizgelde 2.1'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1** : Katı poliüretan köpük oluşumunun ayrıntılı tepkime adımları [1].



İzosiyanat tepkimeler süresince kendi tepkimelerinin ürünleri ile de tepkimeye girerek katı poliüretan köpükte istenmeyen bir takım türlerin oluşmasına neden olabilir. Bu çalışmada oluşma olasılığı düşük türler alofonat ve biüret ayrıntılı tepkime içerisine dahil edilmemiştir. Alofonat izosiyanatın üretanla tepkimesinden, biüret ise üre ile tepkimesinden oluşmaktadır. Fiziksel kabartıcı tepkimelerin gerçekleştiği ortamda bulunur fakat tepkimeye girmeyerek tepkimelerden açığa çıkan ısı ile sıvı halden gaz haline geçer. Buzdolabı kabininde kullanılan C-70 fiziksel kabartıcı türünün buharlaşma sıcaklığı 48 °C'dir [7]. Aynı zamanda çeşitli katalizörler ve yüzey aktifleştirici maddelerde tepkimelerde görev almaktadır.

Jelleşme tepkimesi olarak adlandırılan izosiyanat ve poliöl arasında gerçekleşen tepkime sonucunda uzun poliüretan zincirleri oluşur. Oluşan bu zincirler birbirlerine kabarma tepkimeleri sonucunda sert üre yapıları ile çapraz bağlanmaktadır. Kabarma tepkimesinin ilk adımına izosiyanat ve su tepkimeye girer ve kararsız karbamik asit oluşur. Kararsız yapısından dolayı hemen daha küçük yapılara ayrışan karbamik asit,

amin ve karbondioksite bölünür. Burada karbondioksit kabarmaya yardımcı bir görev üstlenir. Bu tepkimeden sonra izosiyanat ve amin tepkimeye girerek sert üre yapılarını oluşturmaya başlar. Diğer tepkimelere göre daha yavaş ilerleyen bu tepkime ile polimer yapı dallanır ve zincirler arasında çapraz bağlantılar oluşur. Bu bağlantılar sayesinde sert bir yapıya bürünen köpüğün ağırlığı giderek artar ve sonunda köpük katı halini alır. İzosiyanatın su ile olan tepkimesi de ısı veren bir tepkimedir. Poliüretan oluşum tepkimelerinde bir miktar izosiyanatın artması istenen bir özelliktir. Bu artan izosiyanat ısı çarpılmaları engeller fakat fazla izosiyanat artarsa köpük gevrek bir yapı kazanır ve bu istenmeyen bir durumdur. Köpüğün sertliğini belirleyen ana tür üredir [8].

## 2.3 Tepkime Sürecinin Temel Elemanları

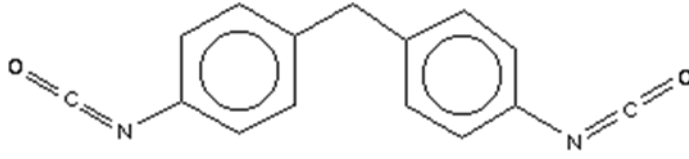
### 2.3.1 İzosiyanat (-NCO)

İzosiyanatlar NCO molekülü içeren, üretan tepkimesinin en önemli türlerinden biridir. Alifatik ve aromatik izosiyanatlar olmak üzere iki ana grupta incelenirler. Poliüretan üretimde kullanılan diizosiyanatlardan bazıları şöyledir; toluen diizosiyanat (TDI), metilen bisfenilizosiyanat veya difenilmetan diizosiyanat (MDI), heksadimetilendiizosiyanat (HDI), naftalin diizosiyanat (NDI), veya hidrojenlenmiş MDI (HMDI), izoforondiizosiyanat (IPDI) [9]. Bunlar arasında en çok kullanılanları MDI ve TDI türleridir. 2000 yılında incelenen pazar payına göre MDI %61,3'lük, TDI ise %34,1'lik bir paya sahiptirler [9]. Rijit poliüretan elde etmek için kullanılacak izosiyanat türü MDI'dır. Oluşan ürünün ağırlık ve asitlik gibi değerlerini, NCO grubu içeren izosiyanat bileşiği belirlemektedir. MDI'nın kapalı formülü  $C_{15}H_{10}O_2N_2$  olarak bilinmektedir. MDI'nın özellikleri kısaca;

- Sıkışmaya dirençli,
- Isıl iletkenliği düşük,
- Petrol ve benzine dirençli olmasıdır.

Katı poliüretan elde etmek için kullanılacak izosiyanat türü aromatik bir izosiyanat olan MDI'dır [1]. Buzdolabı kabininde birtakım izomerler ile birleştirilmiş polimerik MDI kullanılmaktadır. MDI'nın atomik yapısı Şekil 2.6'da verilmiştir. Şekildeki altıgenler aromatik yapıları göstermektedir. Aromatik yapılar beklenenin üzerinde bir

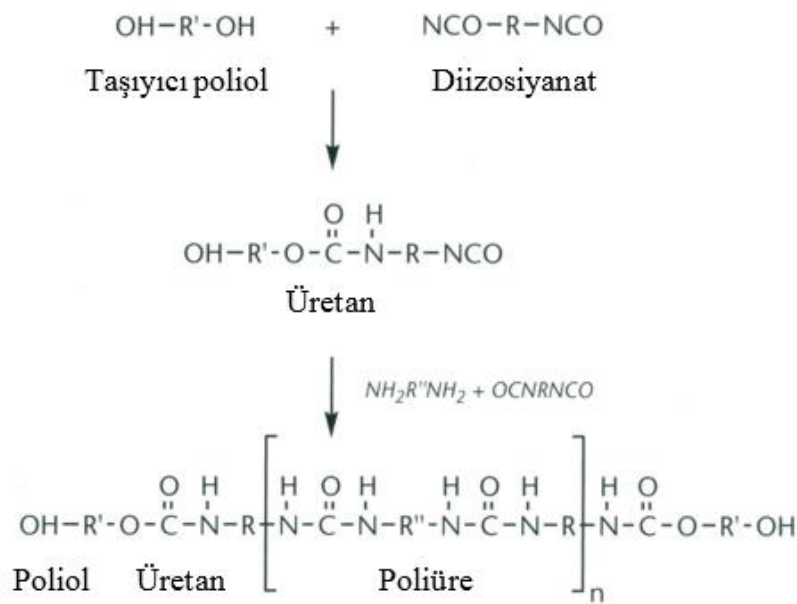
kararlılık gösterirler. Bunun sebebi halka üzerinde atomlar yer değiştirebilmeleridir [10].



Şekil 2.6 : MDI atomik gösterimi [11].

### 2.3.2 Poliöl (-OH)

Poliüretan oluşumunda temel tepkimeyi oluşturan izosiyonat tepkimesinin diğer en önemli türüdür. Bilinen temel iki tane poliöl türü vardır. Bunlar; poliester poliöl ve polieter poliöldür. Polieter poliöl daha baskın bir türdür ve genel olarak %80 oranında kullanım oranına sahiptir [12]. Ana tepkime olarak adlandırılan poliüretan tepkimesinde izosiyonatta yer alan NCO grupları ve poliolda yer alan OH grupları arasında bağ oluşmakta ve tümüyle başka yapıda ve farklı özelliklere sahip bir malzeme ortaya çıkmaktadır ki bu malzeme bilindiği gibi poliüretandır. Poliollerin reaktifliğini içerlerinde barındırdıkları OH grupları belirlemektedir. Poliölün diizosiyonatla tepkimeye girerek oluşturdukları üretan ve poliüretan zincir yapısı Şekil 2.7'de verilmiştir. Poliöl bu süreçteki tepkimeleri tersinir tepkimeler değildir. Yani tepkimeye girip ürün oluşturduktan sonra, oluşan üründen ayrılarak tekrar ilk durumdaki poliöl halini alamazlar [9].



Şekil 2.7 : Katı poliüretan polimer zincirinde poliölün atomik yeri [1].

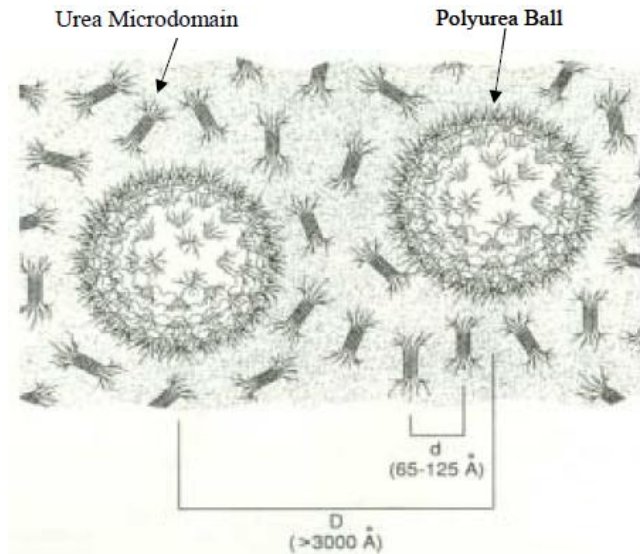


### 2.3.3 Su (H<sub>2</sub>O)

Su poliüretan oluşumunda izosiyonat ile tepkimeye girer. Suyun izosiyonatla tepkimesi sonucunda üre ve karbondioksit çıkışı olur. Karbondioksitin görevi poliüretanın köpürmesini sağlamaktır. Oluşturulmak istenen son ürün içerisindeki türlerin miktarlarına göre suyun katılımı belirlenebilir ve su miktarındaki çok küçük bir değişiklik oluşan son ürünün özelliklerini güçlü bir şekilde etkiler. Bunun nedeni her bir su molekülü için üç adet izosiyonat molekülü harcanmasıdır [8]. Buzdolabı kabininde gerçekleştirilen tepkimelerde poliöl içerisinde önceden karışmış olarak gelen suyun poliölün kütlesine oranı yaklaşık %2.5 olarak üretici tarafından bildirilmiştir. Su oranı arttıkça köpüğün yoğunluğu azalmaktadır. Aynı zamanda suyun artmasıyla kabarma tepkimeleri artar ve üre oluşumu da koşut olarak artar. Bunun bir sonucu olarak köpüğün sertliği artmaktadır. Fakat yapılan deneyler su oranı arttırılıp diğer türler sabit tutulduğunda köpüğün yük dayanımının düştüğünü göstermektedir.

### 2.3.4 Üre (-NH)

Üre uzun polimer zincirleri arasında çapraz bağlanmaları sağlayarak köpüğe sert yapısını kazandıran türdür [8]. Köpük içerisinde sert yapılar oluştururlar ve bunlara sert üre topları denilmektedir. Üre yapıları belirli noktalara toplanarak faz ayrımına sebep olurlar. Kısacası köpük oluşumu sırasında sert ve yumuşak yapılar atomik boyutta incelendiğinde kendi aralarında gruplandıkları görülebilir. Bu üre yapılarının gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir. Sert üre topları arasındaki mesafe yaklaşık 3000 *Angstrom* (Å) olarak verilmiştir ( $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ ).



**Şekil 2.8** : Köpük içerisindeki sert üre yapıları [13].

### **2.3.5 Fiziksel Kabartıcı (C-70)**

Birçok çeşidi olmakla beraber bu çalışmadaki buzdolabı uygulamasında C-70 kullanılmaktadır. C-70'in kaynama sıcaklığı 48 °C'dir [7]. Tepkimelere girmeden olduğu gibi çıkar. Ancak düşük kaynama sıcaklığından dolayı sıvı halinden gaz haline tepkimelerin erken evrelerinde geçer ve köpüğün kabarmasını sağlar. Bunun yanında düşük ısı iletim katsayıları sayesinde, köpük içerisindeki hücrelere hapsolarak köpüğe yalıtkanlık özelliklerini kazandırırılar. Fiziksel kabartıcı miktarı arttıkça köpük yoğunluğunun ve sertliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca fiziksel kabartıcıların poliüretan köpük eldesi ısı veren tepkimelerinden çıkan ısıyı üzerlerine çekerek, sıvı halden gaz haline geçmeleriyle işlem sırasında ulaşılan en yüksek sıcaklığı düşürme etkileri söz konusudur. Bu sayede hem köpükte hem de basım yapılan kabinde ısıl çarpılmalar daha az olmaktadır.

1990'lı yıllara kadar poliüretan köpük eldesinde CFC-11 gazı kullanılmıştır. Fakat 1995'de CFC-11'in ozon tabakasına verdiği zararlardan ötürü kullanımı durdurulmuştur. Takip eden yıllarda HCFC'ler CFC-11 gazının yerini almış fakat 2010 yılında HCFC'ler de çevreye olan olumsuz etkileri sebebiyle kullanımdan kaldırılmıştır.

### 3. TEPKİME KİNETİĞİ MODELİ

Poliüretan tepkime modeli 11 adet tür ve 5 adet tepkime ile oluşturulmuştur. Bu türlerden dokuzu tepkimelerle değişmekte kalan ikisi ise tepkime modeline girdikleri gibi çıkmaktadır. Tepkimelere girdikleri gibi çıkan hava ve fiziksel kabartıcıdaki değişimler kimyasal değil fiziksel değişimlerdir. Tepkime kinetiği modeline eklenmelerinin sebebi, hesaplama hacminde üzerlerine çektikleri ısıyı tepkime kinetiği modelinde gözlemleyebilmektir. Bir hesaplama hücresindeki toplam entalpi; hücre içerisinde bulunan türlerin entalpilerinin kendi kütle oranlarıyla çarpılıp, daha sonra hepsinin toplanmasıyla bulunmaktadır. Tepkime modelinde kullanılan ayrıntılı tepkime adımları Çizelge 3.1’ de verilmiştir. Çizelge 3.1’de bilindik poliüretan tepkimelerine ek olarak yeni bir adım tanımlanmıştır. Bu adımın girdileri ve çıktıları kimyasal olarak aynıdır, yalnızca sıcaklıkları giriş ve çıkışta farklıdır. Burada hava ve fiziksel kabartıcı tepkime uzayında bulunup tepkimeden oldukları gibi çıkarlar.

**Çizelge 3.1 :** Tepkime kinetiği modeli ayrıntılı tepkime adımları.

<i>İzosiyanat + Poliöl</i>	→	<i>Poliüretan</i>
<i>İzosiyanat + Su</i>	→	<i>Karbamik Asit</i>
<i>Karbamik Asit</i>	→	<i>Amin + Karbondioksit</i>
<i>İzosiyanat + Amin</i>	→	<i>Üre</i>
<i>Hava + FK</i>	→	<i>Hava + FK</i>

Genelde K adet tür içeren bir kimyasal tepkime aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

(3.1)

Burada türleri, ve tepkime girdi ve ürünlerinin stokiyometrik katsayılarını, K toplam tür sayısını ve i ise toplam birincil tepkime sayısını simgelemektedir. Normalde bir tepkime üç ya da dört tür içermektedir; bundan dolayı matrisi bir çok adımdan oluşan tepkimeler zincirinin yanında seyrek kalmaktadır.

Türlerin toplam oluşum oranı ;

(3.2)

Burada;

(3.3)

Her bir tepkime için türlerin kaynak terimleri ileri yönlü ve geri yönlü tepkimelerin farkı alınarak;

(3.4)

Burada;  $k$ 'ncı türün molar konsantrasyonu, ve  $i$  numaralı tepkimenin ileri ve geri yönlü tepkime hızlarıdır. 5 numaralı denklemden de görüldüğü gibi stokiometrik katsayılar tür kaynak terimlerine üstel olarak etki etmektedir.

İleri yönlü hız sabiti Arrhenius denklemi ile aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [14].

— (3.5)

Burada,  $k$  tepkime hız sabiti,  $E_a$ , etkinleşme (aktivasyon) enerjisi,  $A_k$  üstel öncesi sabiti,  $\beta$  sıcaklık üssü,  $R$  evrensel gaz sabiti ve  $T$  sıcaklık (K) olarak tanımlanmaktadır.

Geri yönlü hız sabiti ise ileri yönlü hız sabitine bağlı olarak hesaplanabilir.

— (3.6)

Burada denge sabitidir ve konsantrasyon cinsindedir. Denge sabitinin hesaplanması için basınç biriminde termodinamik özelliklerden yararlanılır.

— (3.7)

Burada basınca bağlı ;

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (3.8)$$

Bu ifadede ,  $i$  numaralı tepkime için, tepkimeye girenlerden ürünlere olan aktarımı temsil etmektedir. Buna göre girenlerden ürünlere aktarılan entropiyi, ise entalpiyi simgelemektedir. Bu iki değişken aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (3.9)$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki ifadelerde entropi ve entalpinin genel gösterimidir. Bu çalışmada ise bu değişkenler aşağıdaki şekilde sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmaktadır.

$$\text{---} \quad (3.11)$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (3.12)$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki ifadede  $k$ 'ncı türün sabit basınçta özgül ısısını vermektedir. Yukarıda verilen ifadelerde özgül ısı, entropi ve entalpi türlerin oluşum entalpilerini vermektedir. Bir maddenin oluşum entalpisi o maddeyi oluşturan en saf maddelerin doğada en kararlı buldukları halleri ile gerçekleştirdikleri tepkimenin entalpisidir. Saf maddelerin en kararlı buldukları sıcaklık  $T = 298.15$  K ve basınç  $P = 1$  bar olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle oluşum entalpilerinde referans noktası bu sıcaklık ve basınç değeri olarak alınmaktadır.



#### 4. TEPKİME KİNETİĞİ MODELİNİN GERÇEK SÜRECE UYARLANMASI

Hesaplamalarda kullanılacak FORTRAN programlama dilinde yazılmış kimyasal tepkime kinetiği modelinin deneylerle elde edilen tepkime kinetiklerine uygunluğu Şekil 2.1'e olan benzerliği ile sınanmıştır. Tepkime kinetiklerini belirleyen başlıca özellikler Arrhenius değişkenleri ( , , ) ve ifade (12), (13), (14)'de verilen polinomlardır. Tepkimenin fiziksel sürecini doğrudan etkileyen özellikler yoğunluk ve ağırlıklıdır. Türlerin yoğunlukları ve ağırlıklılarına da özgül ısı, entalpi ve entropi gibi yüksek dereceden polinomlarla sıcaklığa bağlı olarak hesaplanmaktadır. Sıcaklığın zamana bağlı değişimi doğrudan Arrhenius değişkenleri ve termokimyasal özelliklere ( , , ) bağlıdır. Buzdolabı kabiniinde gerçekleşen tepkimeler sonucu oluşan katı poliüretan köpüğün üretici tarafından verilen yoğunluk değeri 35 kg/m<sup>3</sup>'tür. Buradan yola çıkarak tepkime kinetiği modeli çalıştırılmış ve başlangıç koşulları olarak dört kapılı buzdolabında ilk basılan karışımdaki kütle oranları kullanılmıştır. İlk sıcaklık ve tepkime süresi ise Şekil 2.1'de verilen deneydeki sıcaklık ve süreyle aynıdır. Çizelge 4.1'de tepkime kinetiği modeli başlangıç koşulları verilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Tepkime kinetiği modeli yazılımı başlangıç koşulları.

$T_g = 294.15 \text{ [K]}, t = 350 \text{ [s]}$
$Y_{su} = 0.0095$
$Y_{izosiyanat} = 0.57$
$Y_{poliol} = 0.3705$
$Y_{FK} = 0.05$

Çizelge 4.1'de  $T_g$  tepkime başlangıç sıcaklığı,  $Y$  harfi ile gösterilen değerler ise türlerin kütle oranlarıdır.  $Y_{FK}$  fiziksel kabartıcının kütle oranıdır. Hesaplama toplam zamanı  $t$  ile gösterilmiştir. Tür kütle oranlarının toplamı 1 etmektedir. Tepkime kinetiği modeli kütle oranlarını kendi içerisinde mol oranlarına çevirip onlar üzerinden işlemlerini yapmakta ve tepkimeler bittikten sonra tekrar mol oranlarını

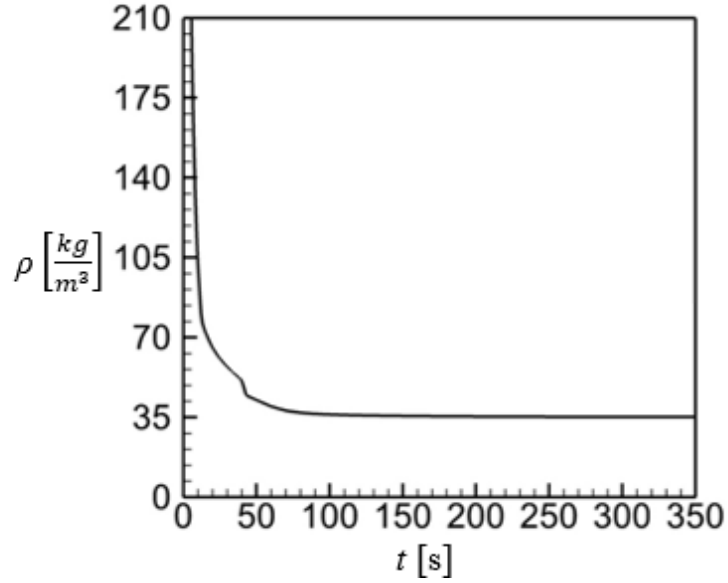
kütle oranlarına çevirip çıktıkları kütle oranları cinsinden vermektedir. Kütle oranları ile mol oranları arasındaki geçişleri veren ifadeler aşağıdaki gibidir;

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{M_1}{M_2} \frac{n_1}{n_2} \quad (4.1)$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{m_1}{m_2} \frac{M_2}{M_1} \quad (4.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde S adet türden i türünün; kütle oranını, mol kütlelerini, mol sayısını, mol oranını, karışımın ortalama molar kütlelerini temsil etmektedir [14]. Şekil 4.1’de tepkime kinetiği modeli ile oluşturulmuş zamana bağlı yoğunluk eğrisi verilmiştir. Yoğunluk hesaplanırken tepkimelerin her bir anında hesaplama uzayında bulunan türlerin sıcaklığa bağlı olarak yoğunlukları hesaplanmış ve her bir türün yoğunluğu kütle oranlarıyla doğru orantılı olarak karışım yoğunluğuna katkıda bulunmuştur. Tepkime kinetiği modelinde türler zamana bağlı ve yerel olarak değişmekte, değişen türler ve devam eden tepkimelerin ısılarına göre yerel yeni entalpi değerleri hesaplanmakta ve termodinamik verilerden yerel sıcaklık değişimleri saptanmaktadır. Şekil 4.1’de  $t = 0$  s anındaki yoğunluk  $1837.78 \text{ kg/m}^3$ ’tür ve eğrinin sınırları dışındadır. Yüksek yoğunluk değerleri, eğrinin davranışının  $35 \text{ kg/m}^3$  civarında daha net incelenebilmesi için gösterilmemiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde yoğunluğun hızlı biçimde düştüğü ve yaklaşık 60 s sonunda  $35 \text{ kg/m}^3$  değerinde sabit kaldığı görülmektedir. Bu değer katı poliüretanın üretici katalog değerlerinde verilen değerle aynıdır. Yoğunluğun sabit kalmasının fiziksel anlamı hacminde sabit kalmasıdır. Çünkü kimyasal tepkimelerde kütle korunur. Öyleyse yaklaşık 60 s sonrasında köpüğün hacmi değişmemektedir. Hacmin değişmemesi kabarmanın dolayısıyla yükselmenin durması olarak yorumlanabilir. Şekil 2.1’de yükselme yaklaşık 60 s sonunda sona ermektedir. Aynı zamanda Şekil 2.1’deki yükselme eğrisi ve Şekil 4.1’deki yoğunluk zaman eğrisine bakıldığında, iki eğrinin birbirlerinin tersi yönde evrildiği görülebilir.





**Şekil 4.1** : Tepkime kinetiği modelinde zamana bağlı yoğunluk değişimi.

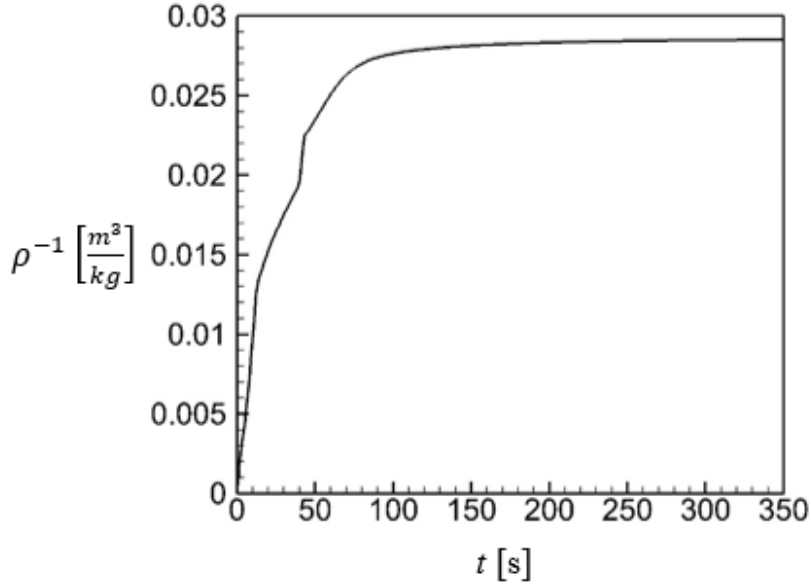
Yükselti ve yoğunluk arasında daha iyi örneksime oluşturulması için yoğunluğun tersinin zamana bağlı gösterilmesi daha uygun olacaktır. Yüksekliğin birimi metredir ve yoğunluk birimi ise  $\text{kg/m}^3$ 'dür. Eğer yoğunluğun tersini alacak olursak bu büyüklüğün birimi  $\text{m}^3/\text{kg}$  olacaktır. Kütle korunumu yasası gereği paydadaki miktar sabittir. Bundan dolayı çizecek eğrideki değişimler hacimin değişmesinden kaynaklanacaktır. Silindirik bir geometride yükselen köpüğün hacmi şu şekilde hesaplanır;

$$(4.3)$$

Burada  $V$  hacimi,  $R$  yarıçapı ve  $h$  silindirik kabın yüksekliğini ve  $t$  zamanı temsil etmektedir. Buna göre bir silindirik kaptaki köpük yoğunluğunun tersi şu şekilde hesaplanır;

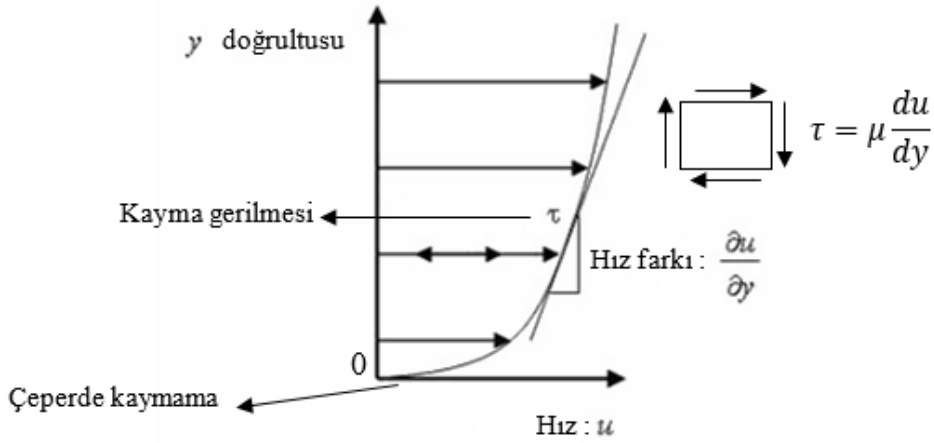
$$(4.4)$$

Yukarıdaki ifadede  $m$  toplam kütle simgelemektedir. Köpüğün kabarması boyunca kabın yarıçapı ve toplam kütle sabit kalacağı için değişken köpük yüksekliği olacaktır. Bu yaklaşım doğrultusunda Şekil 4.2'de yoğunluğun tersinin zamana bağlı değişim eğrisi verilmiştir. Şekil 4.2'deki eğrinin Şekil 2.1'deki yükselti eğrisi ile benzerliğinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Buda tepkime kinetiklerinin ve yoğunluk hesaplamalarının doğruluğunu ispatlar nitelikte bir sonuçtur.



Şekil 4.2 : Tepkime kinetiği modeli hesaplanmış  $\rho^{-1}$ 'in zamana bağlı değişimi.

Basınç, sıcaklık ve yoğunluk gibi büyüklükler, herhangi bir sisteme özgü karakteristik ana termodinamik değişkenlerdir. Akışkanın davranışını mekaniksel olarak karakterize eden bir diğer değişken ağıdalılıktır [15]. Şekil 4.3'de ağıdalılığın oluşum taslağı görülmektedir.



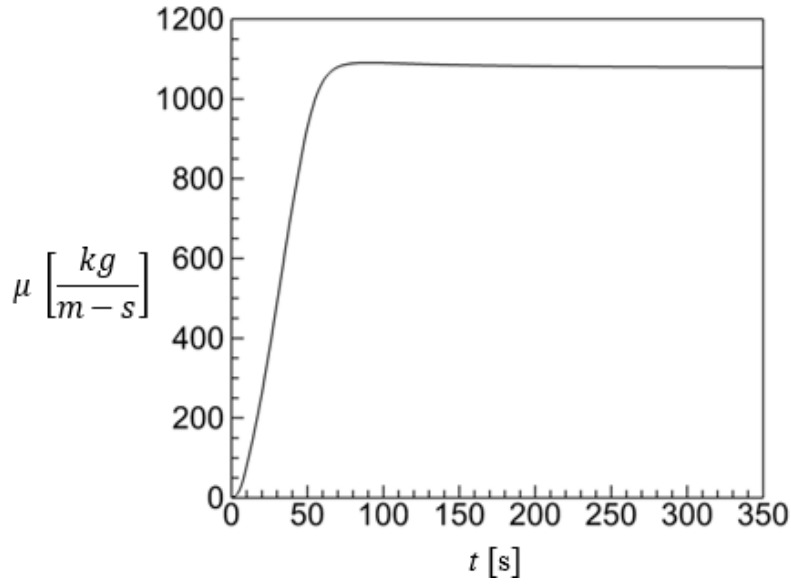
Şekil 4.3 : Ağıdalılığın taslak gösterimi [15].

Akışkanın akmaya karşı uyguladığı direnç olan ağıdalılık yükseldikçe akış yavaşlar. Ağıdalılığın akışkanlar mekaniğindeki ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$\text{---} \quad (4.5)$$

Denklem (4.5)'de uygulanan kayma gerilmesini,  $-y^+$  doğrultusunda oluşan hız farkını, ise dinamik ağıdalılığı temsil etmektedir. Katı poliüretan köpüğün yükselme sürecinde kayma gerilmesi; köpüğün hücreleri içinde hapsolmuş gazların ve yoğunluğun sebep olduğu yukarı yönlü kuvvetlerden kaynaklanmaktadır.

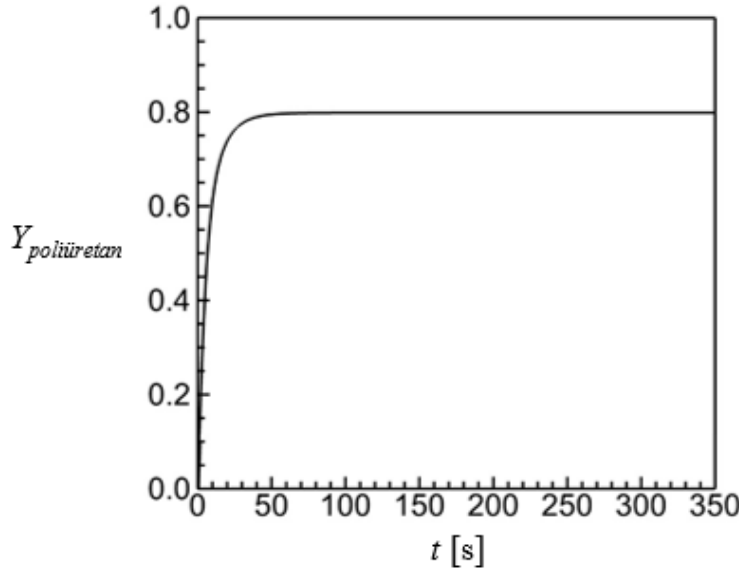
Bundan dolayı Şekil 2.1'de devamlı çizgi gösterilen yükselti eğrisi ile ağıdalılık arasında örnekmeseme kurulabilir. Yükselmenin durduğu bölgede ağıdalılık değerlerinin akmaya karşı uyguladıkları direncin de en yüksek olması beklenmektedir. Şekil 4.4'de dinamik ağıdalılığın zamana bağlı değişimi verilmiştir. Eğri incelendiğinde deney verilerine uyumlu olarak ağıdalılığın yaklaşık 60 saniye sonunda neredeyse en yüksek değerini aldığı görülmektedir. Benzer olarak Şekil 2.1'de de yükselme yaklaşık 60 saniye sonunda durmaktadır. Buna göre yükselmenin durduğu an köpüğün durması için gerekli ağıdalılığın geliştiği nokta olduğu söylenebilir. Ayrıca ilk 50 saniyelik bölümde yükselti ve ağıdalılık eğrileri aynı davranışı göstermektedir. Eğrinin 0 saniye civarındaki küçük kıvrımını dahi tepkime kinetiği modeli ile oluşturulan eğride görmek mümkündür.



Şekil 4.4 : Dinamik ağıdalılığın zamana bağlı değişim eğrisi.

Şekil 2.1'de devamlı çizgilerle gösterilen sıcaklık eğrisiyle poliüretan tepkime süreci birtakım aşamalara ayrılmıştı. Bu aşamalardan jelleşme zamanı MDI ve poliöl arasındaki tepkime ile, kürlenme zamanı ise üre oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. Bu yaklaşımla oluşturulan kimyasal tepkime modelinde jelleşme ile ilişkilendirilen poliüretan oluşumunun tepkime sürecinin ilk evrelerinde başlaması, üre oluşumunun

ise daha geç başlayarak yavaş bir gelişim göstermesi beklenmektedir. Burada tepkime aşamalarının poliüretan ve üre kütle oranlarına ilişkilendirilmesinin sebebi jelleşme ve kabarma tepkimelerinin net çıktıları olmalarıdır. Diğer ara türler oluşup yok olarak etkilerini süreç esnasında göstermektedir, tepkime sonunda fiziksel özellikleri belirleyici türler poliüretan ve üredir. Fiziksel kabartıcı tepkimelerle değişmediği için bu kısımda sürece olan etkilerinden söz edilmemektedir. Şekil 4.5’de poliüretan kütle oranının zamana bağlı değişimi verilmektedir. Eğri incelendiğinde poliüretanın hızlı bir biçimde tepkimenin ilk 50 saniyesinde oluştuğu daha sonra derişiminin değişmediği görülmektedir. Poliüretanın derişimi Şekil 2.1’deki jelleşme aşamasını temsil eden bölgeyle koşut bir davranış sergilemektedir. Poliüretan kütle oranını 50 saniyede 0.7987 değerine ulaşmıştır. Bu da tepkime kinetiği modelinin uygunluğunu destekler niteliktedir.



**Şekil 4.5 :** Tepkime kinetiği modeli zamana bağlı poliüretan kütle oranı derişimi.

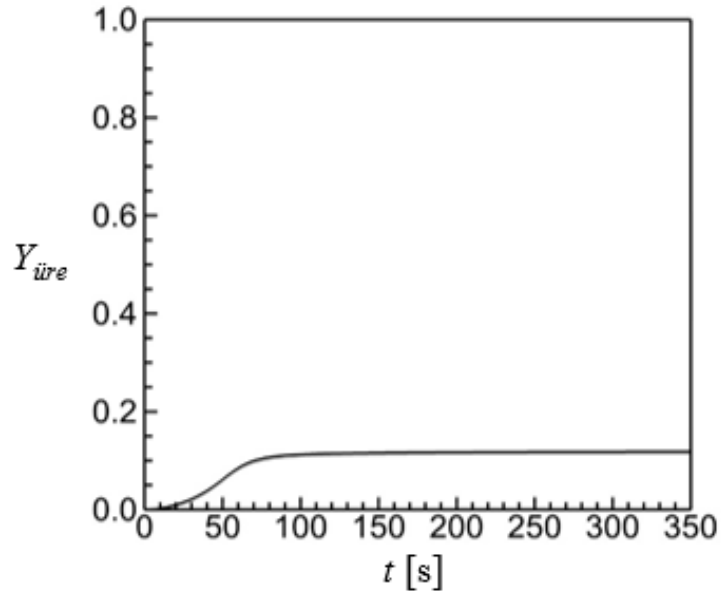
Şekil 4.6’da tepkime kinetiği modeli ile hesaplanan üre kütle oranının zamana bağlı derişim eğrisi verilmiştir. Şekil incelendiğinde üre oluşumunun poliüretan oluşumuna göre daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Bu da beklenen bir durumdur. Şekil 2.1 incelenirse kürlenme evresinin 50-75 saniye civarında olduğu görülebilir. Buna koşut biçimde tepkime kinetiği modelinde üre derişimi 50-75 saniye aralığında doygunluğa ulaşmaktadır. Üre kütle oranı 350 saniye sonunda 0.1180 değerine ulaşmıştır. Eğride 100-350 saniye aralığında üre miktarı artmıyor gibi görülmekte yavaş bir şekilde artmaya devam etmektedir. Bunun daha iyi

görülebilmesi için üre kütleli derişiminin birim zamandaki artım miktarını gösteren eğri Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilde görülen eğri aşağıdaki gibi bir hesaplama yöntemi ile elde edilmiştir;

$$\text{-----} \quad (4.6)$$

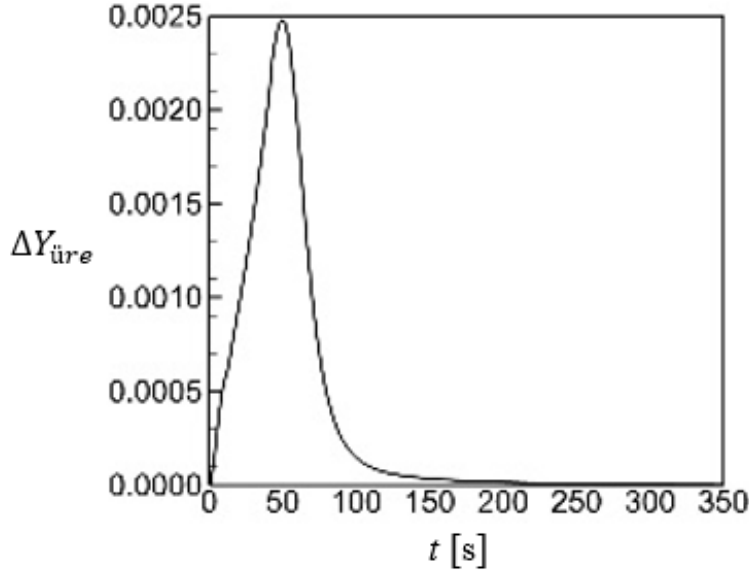
$$(4.7)$$

Burada birim zaman adımındaki üre kütleli derişimindeki artışı; bir önceki zaman adımı hesaplanmış değeri, son zaman adımı hesaplanmış değeri, ise tepkimelerin gerçekleştirildiği zaman adımı göstermektedir. Tepkime kinetiği modelinde hesaplama zamanı kendi içerisinde daha küçük zaman adımlarına bölünmektedir. Bu sayede tepkimenin ilk anlarında sıcaklık ve tür derişimindeki değışiklikler daha yüksek hassasiyet ile gözlemlenebilmektedir.



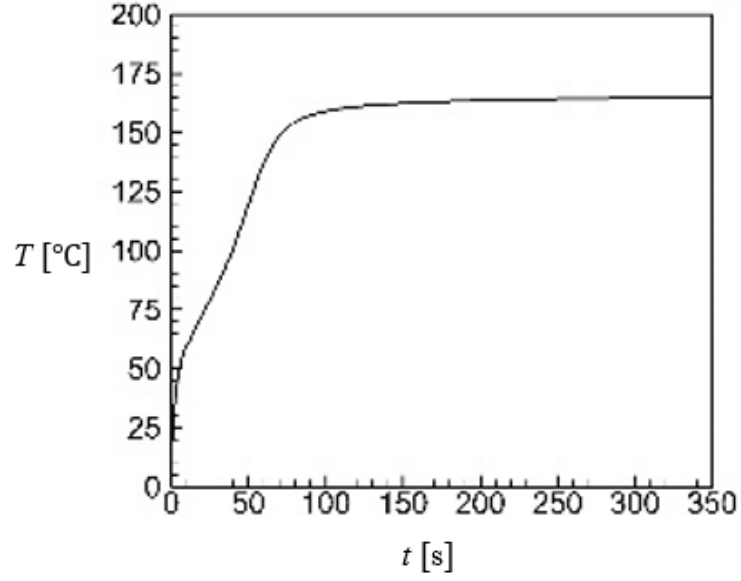
Şekil 4.6 : Tepkime kinetiği modeli ile hesaplanmış zamana bağlı üre eğrisi.

Şekil 4.6’da üre üretiminin asimptotik olarak 350 saniye sonuna kadar devam ettiği görülmektedir.



**Şekil 4.7 :** Üre kütle oranının birim zamandaki artım miktarları eğrisi.

Şekil 4.8’de tepkime kinetiği modeli ile oluşturulmuş sıcaklık eğrisi verilmiştir. Sıcaklık eğrisine bakıldığında Şekil 2.1’deki deney verileriyle oluşturulan sıcaklık eğrisine büyük benzerlik göstermektedir. Her iki eğridede sıcaklık ilk evrelerde hızlı bir şekilde artmakta ve 350 saniye sonunda yaklaşık 160 değerine ulaşmaktadır. Tepkime kinetiği modeli ile oluşturulan eğri, deneysel verilere göre biraz daha sert bir yükseliş göstermektedir. Bu deney ortamında tepkimelere ek olarak köpük akışının etkileriyle ısının; yayılımı, iletilimi ve taşınımından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda deney kabından dışarıya ısı geçişi olmaktadır. Bu etkiler deneysel verilerle oluşturulmuş sıcaklık eğrisinin artış hızını azaltmaktadır. Sadece tepkime kinetiği modelinde ise tepkimeler adyabatik olarak gerçekleştirilmektedir. Isı geçişinin olmadığı bir hal değişimi adyabatik bir hal değişimi olarak adlandırılır. Adyabatik bir hal değişimi sırasında ısı geçişi olmasa da sistemin enerjisi ve buna bağlı olarak sıcaklığı değişebilir [16]. Buna göre tepkime kinetiği modeli ile oluşturulan eğrinin daha hızlı bir artış göstermesi istenen bir durumdur. Bu tepkime kinetiği modeli HAD dizgesi içine ilintilendiğinde akışın etkileri ile sıcaklık artışlarının yavaşlayacağı öngörülmektedir.



**Şekil 4.8 :** Tepkime kinetiği modelinde sıcaklık zaman eğrisi.

Buraya kadar verilen eğriler ve bilgiler ile tepkime kinetiği modelinin gerçekliğe uygunluğu sınanmış ve model çıktılarının deneysel verilere yakınlığı ortaya konulmuştur. Tepkime kinetiği modelinin uygunluğu için Arrhenius değişkenleri, zamana bağlı yoğunluklar, termodinamik özellikler ayarlanmıştır. Bunlara ek olarak katı poliüretan köpük tepkimelerinde tepkime ortamında bulunup tepkimeye girmeyen bir takım katkıların etkileri, tepkimeye giren türlerin yoğunlukları, entalpileri, ağırlıklı ve ayrıntılı tepkimelerin Arrhenius değişkenleri içerisinde dolaylı olarak eklenerek, tepkimelere girmeyen fakat fiziksel ve kimyasal süreç üzerinde etkisi olan olgular hesaplamalara dahil edilmiştir.

## 5. KABİN DOLUM SÜRESİ VE BAŞLANGIÇ KOŞULLARININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ

### 5.1 Tepkime Kinetiği Sayısal Deney Tasarımı

Seri üretimde poliüretan dolum hızı ve niteliği açısından en önemli değişkenlerin, köpüğün soğutucu kalıbını doldurma süresi ve yanısıra kalıp içerisine püskürtülen türlerin derişimleri ve karışım sıcaklığı gibi başlangıç koşullarının olduğu bilinmektedir. Bu nedenle üretim maliyetleri göz önüne alındığında köpüğün buzdolabı kalıbını doldurma süresini kısaltmak ve tepkimelerde kullanılan kimyasal türlere yapılan harcamaları düşürmek önemli hale gelmektedir. Mevcut durumda kabin içerisine  $T_o = 21^\circ \text{C}$ 'de püskürtülen türlerin (su, izosiyanat, polioliol ve fiziksel kabartıcı) kütle oranları,  $Y_{su} = 0.0095$ ,  $Y_{Izosiyanat} = 0.57$ ,  $Y_{polioliol} = 0.3705$ ,  $Y_{FK} = 0.05$  değerlerindedir. Farklı başlangıç koşullarında sistemin nasıl davrandığının anlaşılması için başlangıç sıcaklığı  $T_o = 20^\circ \text{C}$ 'den  $45^\circ \text{C}$ 'e kadar  $\Delta T = 5^\circ \text{C}$ 'lik farklarla 6 değişik karışım sıcaklıklarında; başlangıç kütle oranları içinse üç farklı durum oluşturularak incelenmiştir. Bunlar;

**Durum 1:**  $Y_{polioliol} = 0.3705$  ve  $Y_{FK} = 0.05$  sabit kalmak koşulu ile  $Y_{su}$  0.0095 ile 0.1 değeri arasında  $\Delta Y_{su} = 0.0001$  farklarla arttırılıp, izosiyanat değeri;

(5.1)

tanımı ile hesaplanmıştır.

**Durum 2:**  $Y_{izosiyanat} = 0.57$  ve  $Y_{FK} = 0.05$  sabit kalmak koşulu ile  $Y_{su}$  0.0095 ile 0.1 değeri arasında yine  $\Delta Y_{su} = 0.0001$  farklarla arttırılıp, polioliol değeri;

(5.2)

tanımı ile hesaplanmıştır.

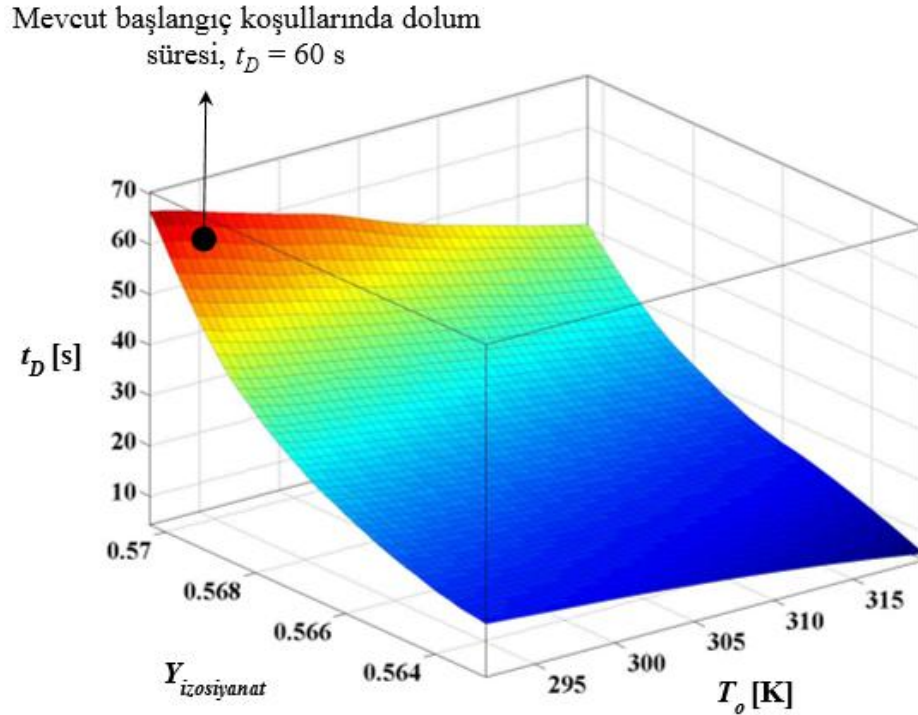
**Durum 3:**  $Y_{FK}$  0.05 ile 0.2 değeri arasında  $\Delta Y_{FK} = 0.001$  farklarla değiştirilirken, diğerleri kendi aralarındaki oranları sabit kalmak koşulu ile tümünün toplamı 1 edecek şekilde değiştirilmiştir. Oluşan 11,763 adet farklı başlangıç koşulunda kimyasal kinetiğin dinamikleri, tepkime gelişiminin her bir anında; anlık sıcaklık, tüm türlerin derişimleri ve her bir türün ve karışımın yoğunluğu ve ağırlığı hesaplanarak toplam 1,411,560 elemanlı bir çözüm uzayı oluşturulmuştur. Bunlar



daha sonra 3 boyutlu çizgelerde incelenmiştir. Püskürtme süresi 8.66 s ve giriş debisi 1.5 kg/s kullanılarak hesaplanan toplam püskürtülen kütle, 12.99 kg hesaplamalarda kullanılan buzdolabı hacmine ( $V = 0.355002677 \text{ m}^3$ ) bölünerek bulunan yoğunluk  $36.56 \text{ kg/m}^3$  olmaktadır. Üretici tarafından verilen yoğunluğu  $35 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Her bir durum için son yoğunluk bu değere eşit olduğu  $t_D$  zamanı dolun süresi olarak belirlenmiştir ki, mevcut durumda bu süre köpüğün çıkış deliklerinden ilk çıktığı an gözlemlenerek yaklaşık 60 s olarak verilmektedir.

### 5.1.1 Durum 1

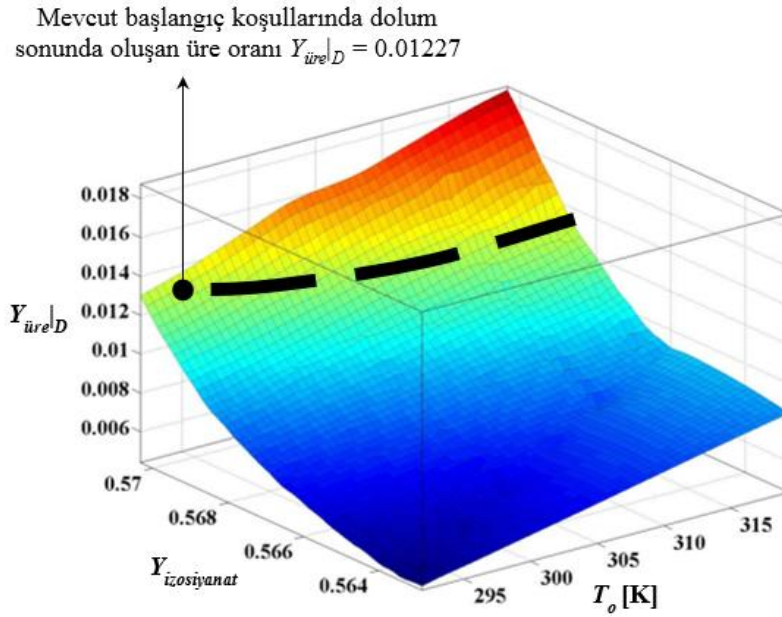
Bu incelemede  $Y_{poliol} = 0.3705$  ve  $Y_{FK} = 0.05$  olarak sabit tutulup, artan su oranında izosiyanat azaltılmaktadır. Şekil 5.1'de farklı izosiyanat ve sıcaklık değerleri başlangıç koşulu alınarak geliştirilen tepkimelerin, kalıbı doldurma süresini gösteren eğri verilmiştir. Başlangıç sıcaklık değeri sabit tutulup izosiyanat miktarı artan su miktarı oranında azaltıldığında, veya izosiyanat değeri sabit tutulup başlangıç sıcaklığı arttırılırsa, kalıp dolma süresinin kısaldığı görülmektedir.



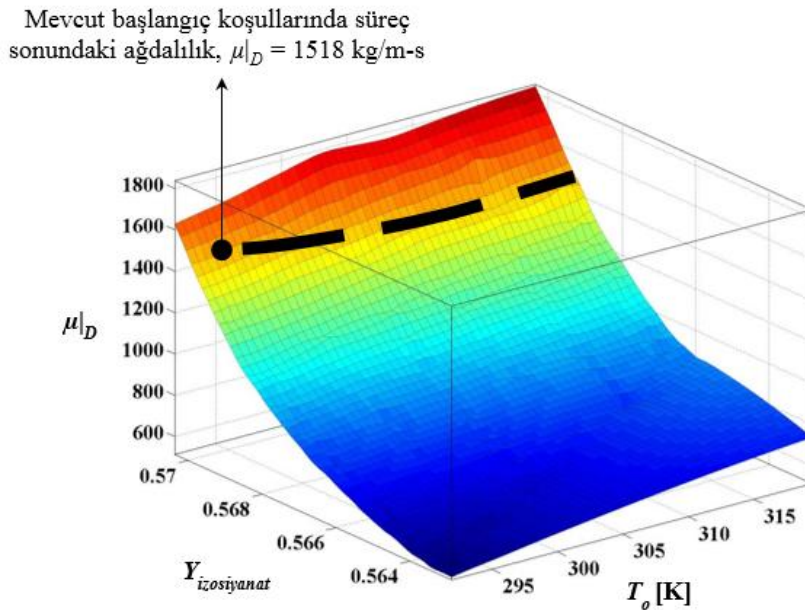
Şekil 5.1 : Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolun süresi.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'de farklı başlangıç koşulları ile gelişen tepkimelerle, kabin dolduğu andaki üre derişimleri ve ağıdalılık miktarları görülmektedir. Katlaşma sonunda erişilen ağıdalılık sürecin birincil belirleyicisidir. Ağıdalılığın temel olarak

üre tarafından sağlanıyor olması göz önüne alınırsa yüksek ağdalılık aynı zamanda yüksek üre oranına işaret etmektedir ki, ürenin köpüğe kattığı katılık ve dayanım özellikleri yapısal anlamda kabini destekleyici unsurlar olmaktadır. Mevcut köpük özelliklerini koruyarak kazanım sağlamak için siyah kuşakta ilerlemek, yani; karışımın başlangıç sıcaklığı artırılırken, izosiyanat derişiminin belirli bir oranda azaltmak gerekmektedir. Ancak izosiyanattaki azalmanın göreceli sınırlı kalması gerektiği, kazanımın daha çok sıcaklık artırımını yönünde gerçekleştiğini göstermektedir.

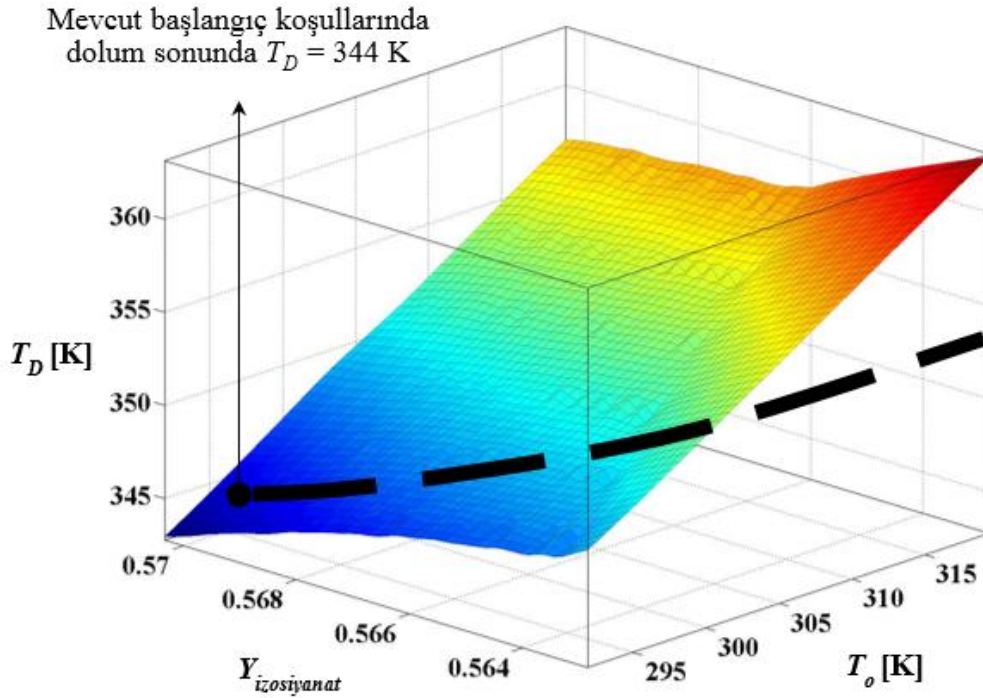


**Şekil 5.2 :** Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri için dolun anında üre derişimleri.



**Şekil 5.3 :** Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki ağıdalılık miktarları.

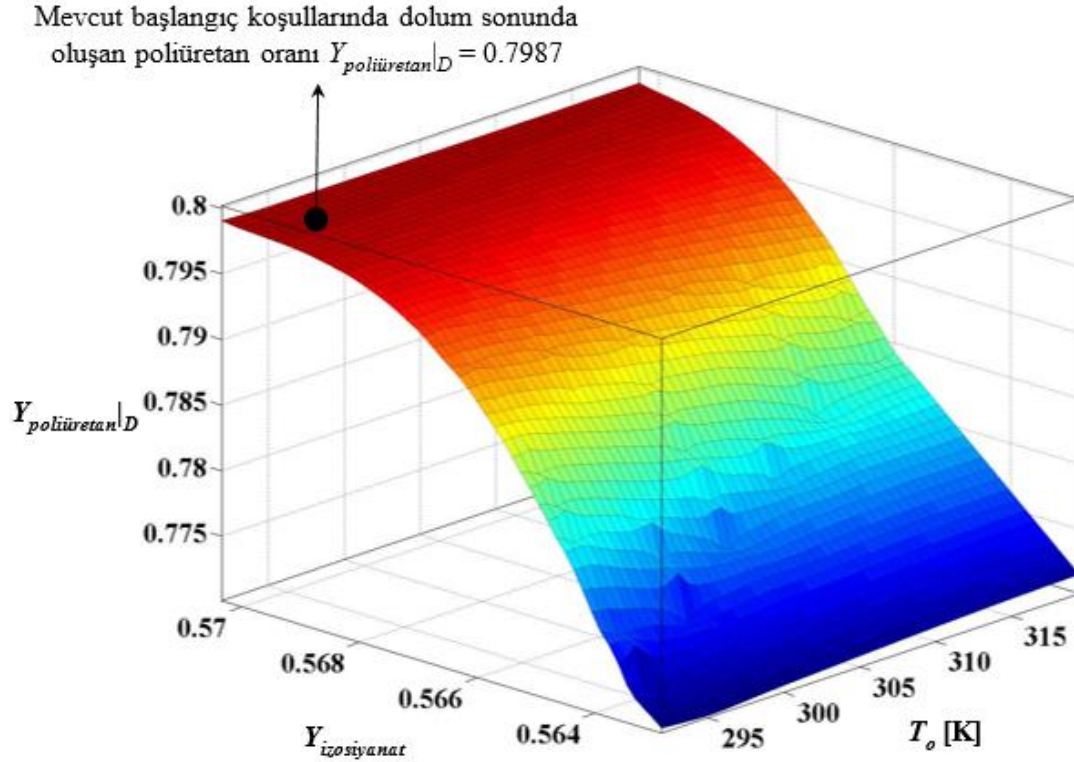
Şekil 5.4’de farklı başlangıç koşulları ile gelişen tepkimelerle, kabin dolduğu andaki sıcaklık değerleri görülmektedir. Dolum süresini kısaltılması ve temel tür (izosiyanat ve/veya poliöl) miktarlarını ve dolayısıyla malzeme masraflarının azaltılması yönündeki çalışmalarda özen gösterilmesi gereken en önemli olgu, süreç sonunda erişilen son sıcaklık değerlerinin buzdolabı kabininde malzeme deformasyonuna neden olmayacak (<90°C, 363 K) biçimde düşük tutulmasıdır. Burada belirtilen <90°C (363 K) kısıtı Arçelik tarafından verilen ve termoform olarak adlandırılan kabin malzemesinin deformasyon olmadan çıkabileceği en yüksek sıcaklık olarak kabul edilmektedir.



**Şekil 5.4 :** Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki sıcaklık değerleri.

Şekil 5.5’de farklı başlangıç koşulları ile gelişen tepkimelerle, kabin dolduğu andaki poliüretan derişimleri görülmektedir. Tepkime sonucunda üretilen poliüretan derişiminin karışım sıcaklığından ve belirli bir değerden ( $Y_{izosiyanat} > 0.567$ ) yüksek olmak koşulu ile başlangıç izosiyanat değerinden neredeyse bağımsız olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi sırasında karışım sıcaklığı ve başlangıç tür derişimlerinde yapılacak değişikliklerin süreç sonunda üretilen poliüretan kütle oranına etkisi neredeyse yok gibidir. Fakat katı

poliüretan köpük içerisinde tüm tepkimeler sona erdiğinde bir miktar izosiyanatın artmasının ısıl deformasyonların giderilmesi için faydalı olduğu unutulmamalıdır.

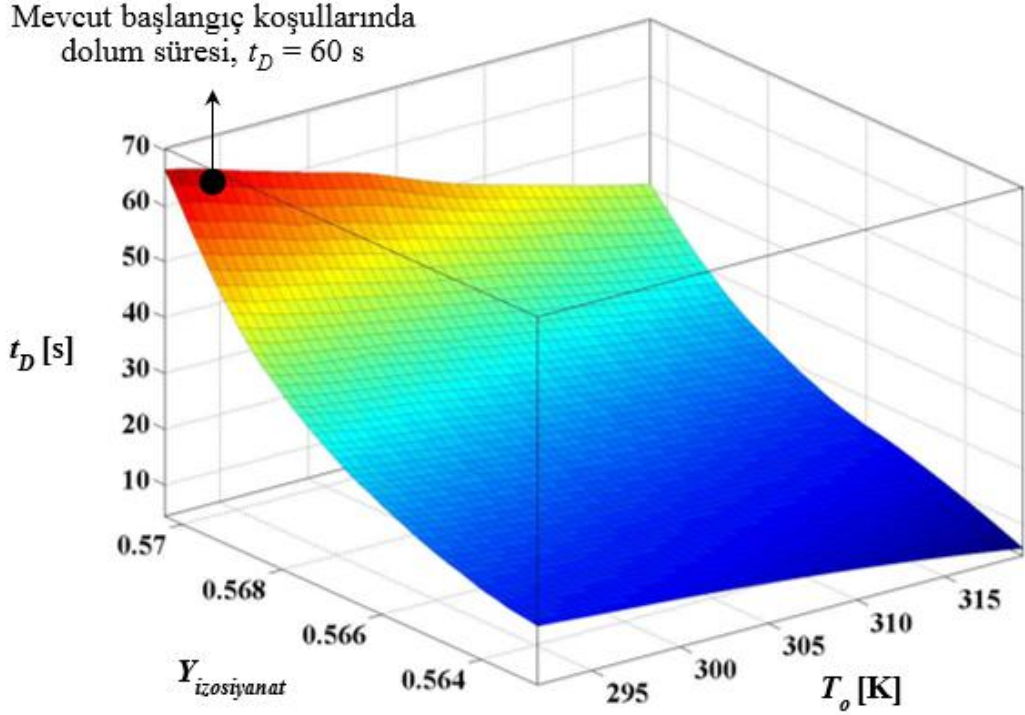


**Şekil 5.5 :** Farklı izosiyanat derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki poliüretan derişimleri.

Özetle, durum 1 için yapılan sayısal deneyler sonucunda kabin dolum süresinin kısaltılabileceği görülmüştür. Buna ek olarak köpük yapısını bozmadan izosiyanattan belirli bir miktar kazanım sağlanabileceği saptanmıştır. Kabin içerisine basılan karışımın ilk sıcaklığının tepkime gelişiminde güçlü etkiye sahip olduğu, ilk sıcaklıktaki artışın tepkime hızlarını arttırdığı gözlemlenmiştir. Ancak ilk sıcaklıktaki artış tepkime sonu sıcaklığında arttırdığından üretici firma tarafından verilen  $<90$  °nin altında kalınması bu noktada kısıt oluşturmuştur. İzosiyanattan küçük miktarlarda kazanım sağlanırken tepkime sonu poliüretan kütle derişiminin bu değişimden belirli bir değere ( $Y_{izosiyanat} > 0.567$ ) kadar hiç etkilenmediği görülmüştür. Kazanımların virgülden sonra üçüncü hanelerde olması çok küçük ve etkisiz oldukları izlenimini oluşturabilir; ancak günde binlerce buzdolabı üreten bir işletme için bu küçük kazanımların uzun süreçte olumlu etkiler yaratacağı düşünülmektedir.

### 5.1.2 Durum 2

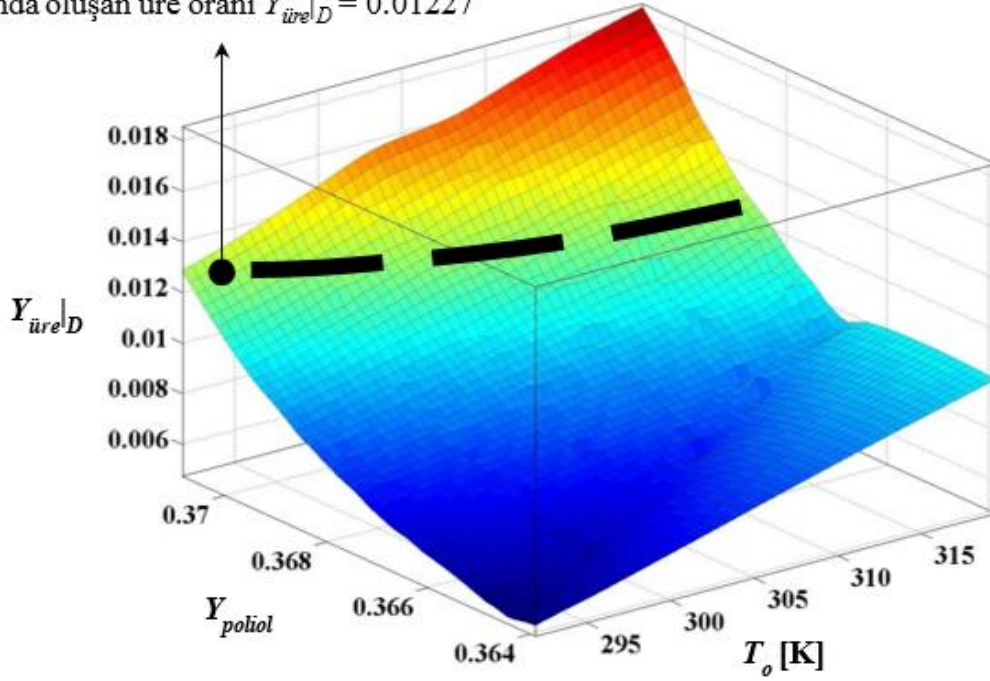
Bu incelemede  $Y_{izosiyanat} = 0.57$  ve  $Y_{FK} = 0.05$  olarak sabit tutulup, artan su oranında polioliol azaltılmaktadır. Şekil 5.6'e bakıldığında başlangıç sıcaklık değeri sabit tutulup izosiyanat miktarı artan su miktarı oranında azaltılırsa veya izosiyanat değeri sabit tutulur başlangıç sıcaklığı arttırılırsa, kalıp dolma süresinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 5.6 : Farklı polioliol derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolum süresi.

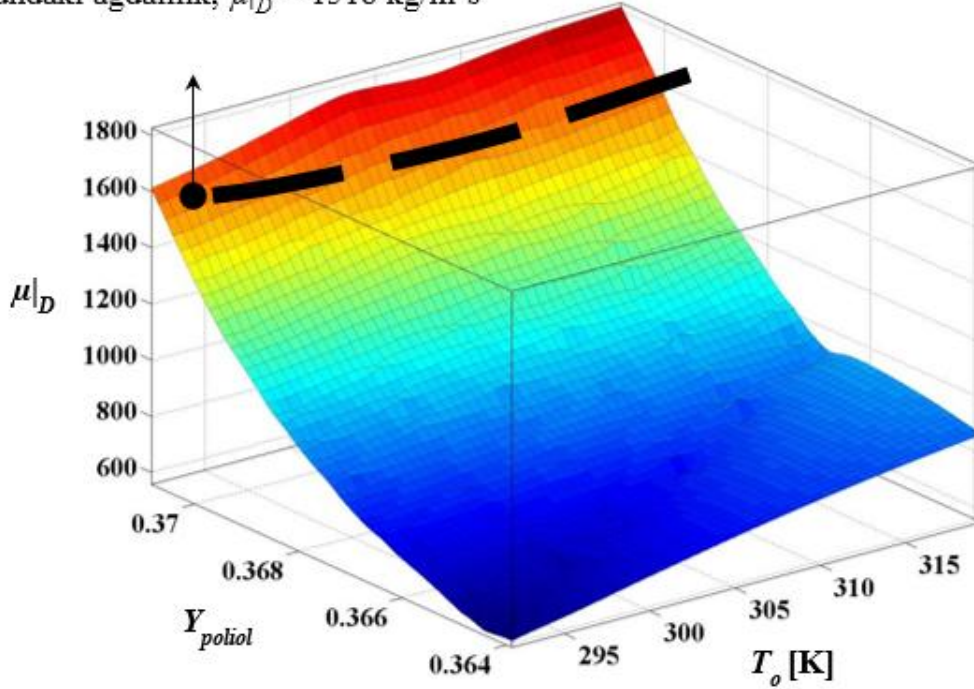
Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de farklı başlangıç koşulları ile gelişen tepkimelerle, kabin dolduğu andaki üre derişimleri ve ağıdalılık miktarları görülmektedir. Hem üre hem de ağıdalılık azalan polioliol miktarı ile azalırken artan başlangıç sıcaklığı ile artmaktadır. Mevcut durumda oluşan köpük özelliklerini koruyabilmek için karışımın başlangıç sıcaklığı arttırılırken, polioliol derişimi azaltılmalıdır. Ancak poliolioldeki azalmanın göreceli sınırlı kalması gerektiği tercihin daha çok sıcaklık arttırımı yönünde yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Mevcut başlangıç koşullarında dolun  
sonunda oluşan üre oranı  $Y_{üre|D} = 0.01227$



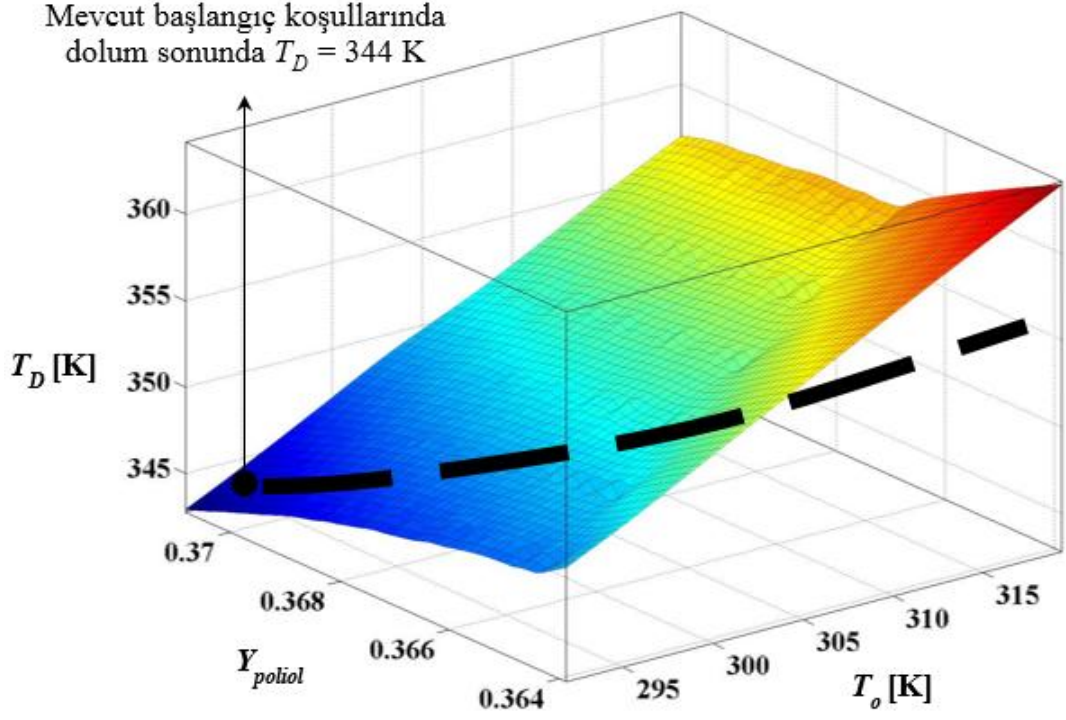
Şekil 5.7 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun  
sonundaki üre derişimleri.

Mevcut başlangıç koşullarında süreç  
sonundaki ağıdalılık,  $\mu|_D = 1518$  kg/m-s



Şekil 5.8 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun  
sonundaki ağıdalılık miktarları.

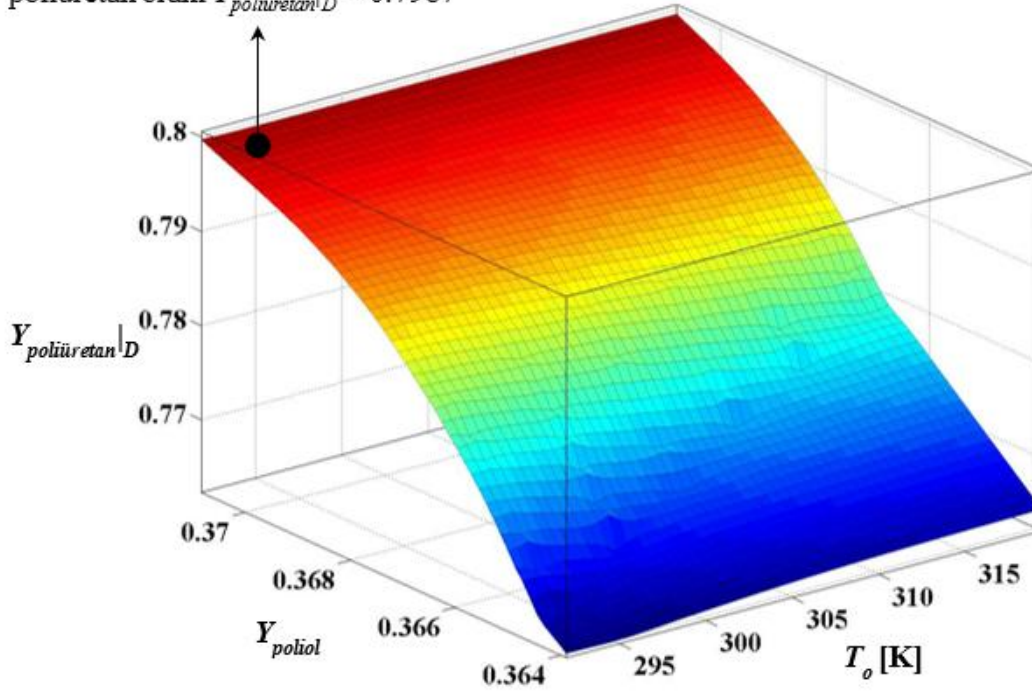
Şekil 5.9’da farklı başlangıç koşulları ile gelişen tepkimeler ile kalıp dolduktan sonra elde edilen sıcaklıkların gösterildiği çizge verilmiştir. Süreç sonunda erişilen son sıcaklık değerlerinin arttığı ve bu nedenle buzdolabı kabini malzeme deformasyonuna neden olmamak için son sıcaklığın ( $<90^{\circ}\text{C}$ , 363 K) olacak şekilde düşük tutulması gerekmektedir.



Şekil 5.9 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki sıcaklık değerleri.

Şekil 5.10’da tepkime sonucunda üretilen poliüretan derişiminin karışım sıcaklığından ve belirli bir değerden ( $Y_{poliol} > 0.368$ ) yüksek olmak koşulu ile başlangıç poliöl değerinden çok az değiştiği görülmektedir. Diğer bir deyişle en uygun çalışma koşullarının belirlenmesi sırasında karışım sıcaklığı ve başlangıç tür derişimlerinde yapılacak değişikliklerin süreç sonunda üretilen poliüretan kütle oranına etkisi neredeyse yok gibidir.

Mevcut başlangıç koşullarında dolum sonunda oluşan poliüretan oranı  $Y_{poliüretan|D} = 0.7987$

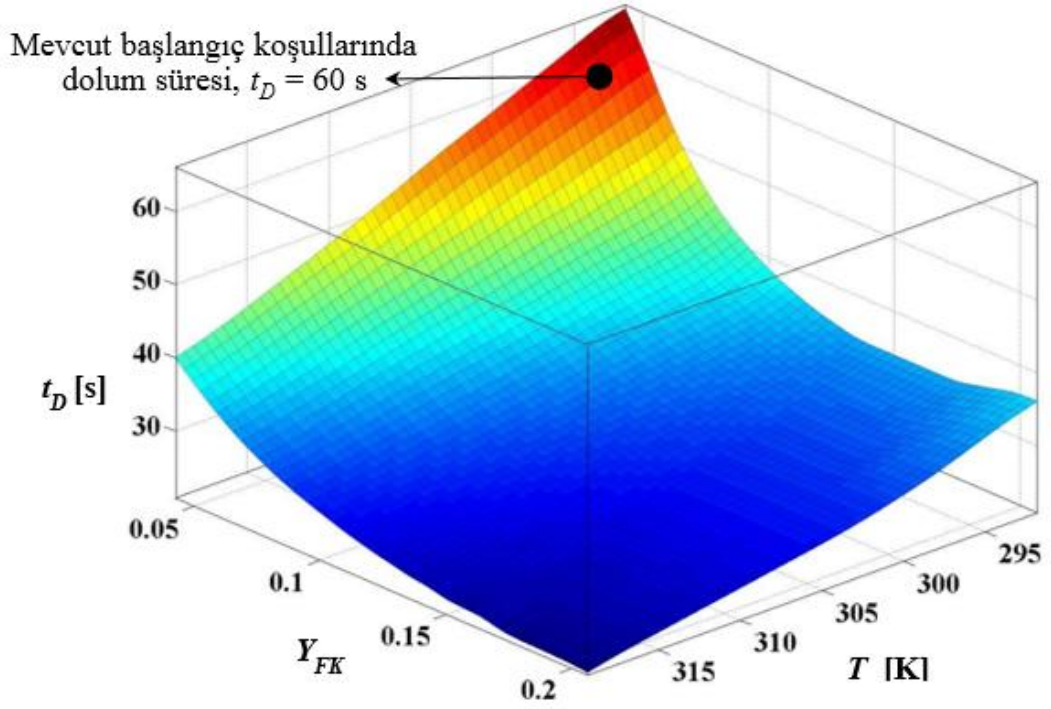


Şekil 5.10 : Farklı poliöl derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki poliüretan derişimleri.

### 5.1.3 Durum 3

Bu incelemede  $Y_{su}$ ,  $Y_{izosiyanat}$  ve  $Y_{poliol}$ 'ün birbirleri arasındaki oranları sabit kalarak kütle oranları azalırken, fiziksel kabartıcı derişimi arttırılmaktadır. Şekil 5.11'da farklı fiziksel kabartıcı ve sıcaklık ilkdeğerleri ile gelişen tepkimeler ile kalıp dolma süreleri verilmiştir. Hesaplamalarda fiziksel kabartıcı miktarı artarken diğer tepkimeye giren türlerin (izosiyanat, poliöl, su) birbirlerine göre bağıl oranları sabit tutulmuştur. Düşük başlangıç sıcaklık değerlerinde artan fiziksel kabartıcı ile önce azalan dolum süresi  $Y_{FK}=0.14$  sonrasında tekrar artmaktadır. Yüksek başlangıç sıcaklık değerlerinde ise  $t_D$  sürekli düşmektedir. Kalıp dolma süresi FK arttırılarak düşürülmek isteniyorsa, bu işlem;  $T_o > 305$  K değerlerinde gerçekleştirilmeli, yada FK'daki artış  $Y_{FK} = 0.14$  ile sınırlı kalmalıdır.

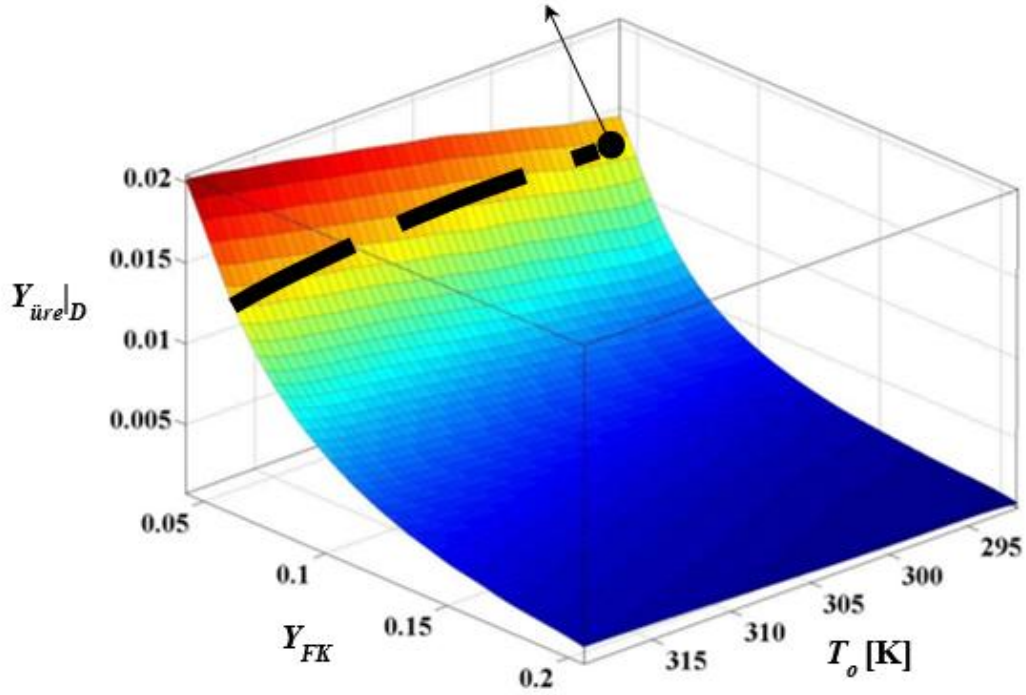




**Şekil 5.11** : Farklı fiziksel kabartıcı ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında kalıp dolum süresi.

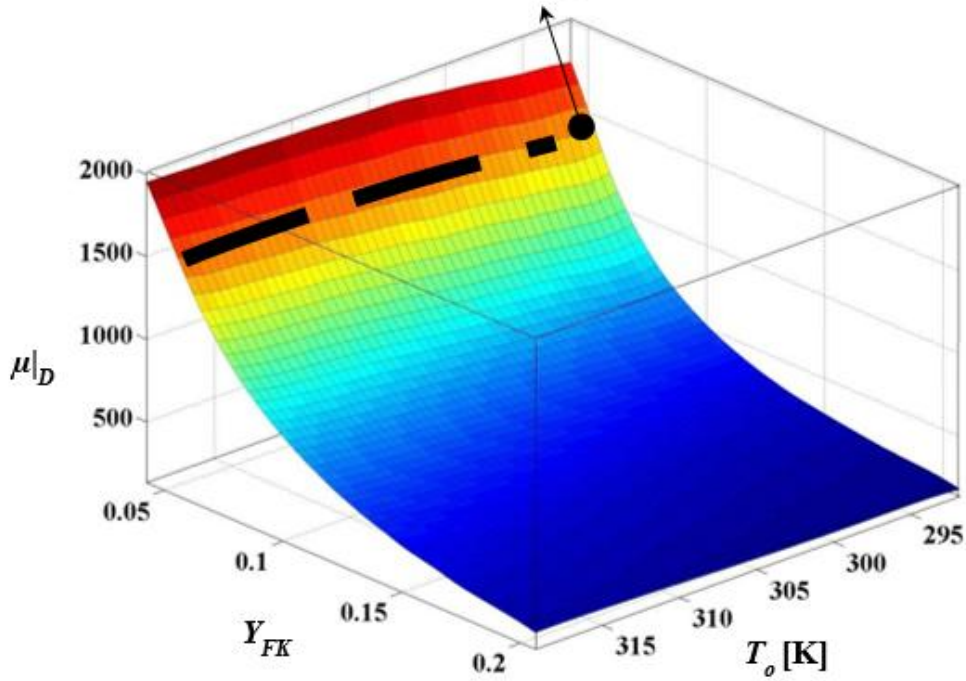
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de farklı FK ve sıcaklık ilk değerleri için kabin dolduğu andaki üre ve ağırlıklık değerleri verilmiştir. Başlangıç sıcaklığı sabit tutulup FK miktarı arttırılırsa, üre ve benzer şekilde ağırlıklık hızla düşmektedir. Bu durum katılaşma sürecini geçiktireceği gibi köpüğün kabine yapısal olarak yeter katılık veremeyeceği anlamına gelmektedir. Başlangıç sıcaklığının etkisi düşük FK oranlarıyla sınırlı kalmakta olup, yüksek FK oranlarında neredeyse tümüyle ortadan kalkmaktadır. Bir kazanım sağlamak amacıyla siyah kuşakta ilerleyebilmek ancak FK'nın sınırlı arttırımı ( $\sim 0.075$ ) ile mümkün gözükmektedir.

Mevcut başlangıç koşullarında dolun sonunda oluşan üre oranı  $Y_{üre|D} = 0.01227$



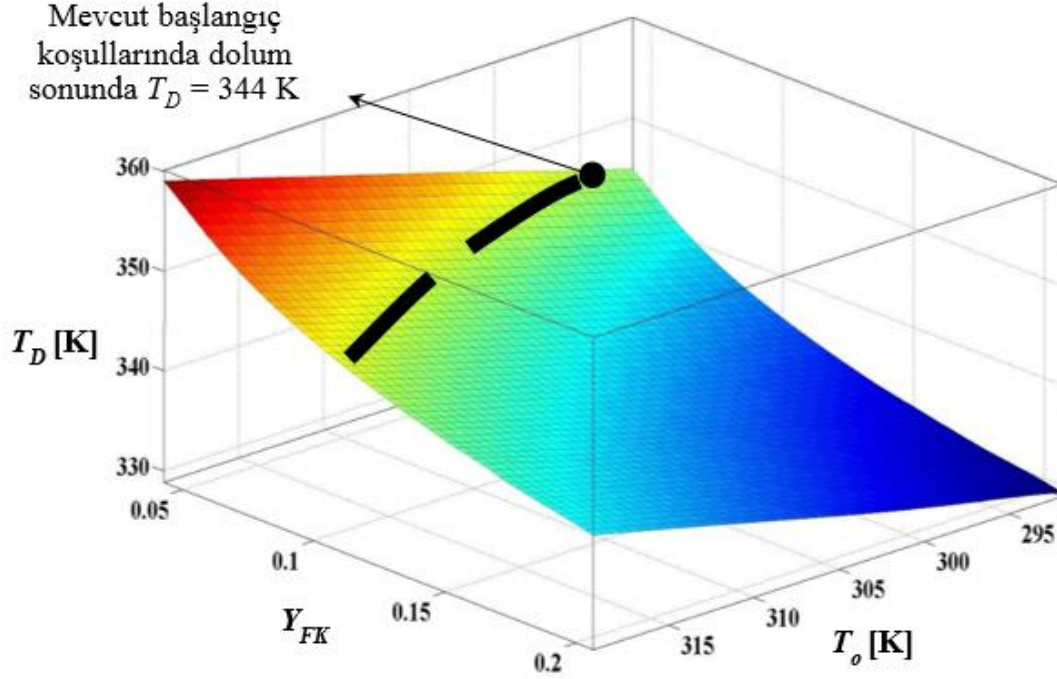
Şekil 5.12 : Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki üre derişimleri.

Mevcut başlangıç koşullarında süreç sonundaki ağıdalılık,  $\mu_D = 1518$  kg/m-s



Şekil 5.13 : Farklı fiziksel kabartıcı ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki ağıdalılık miktarları.

Şekil 5.14'e göre dolum sonundaki sıcaklık,  $T_D$ , başlangıç sıcaklığı  $T_0$  ile artarken, artan FK ile düşmektedir. Sonuç olarak, süreç sonunda erişilen son sıcaklık değerlerinin buzdolabı kabiniinde malzeme deformasyonuna neden olması riski yok gözükmemektedir.

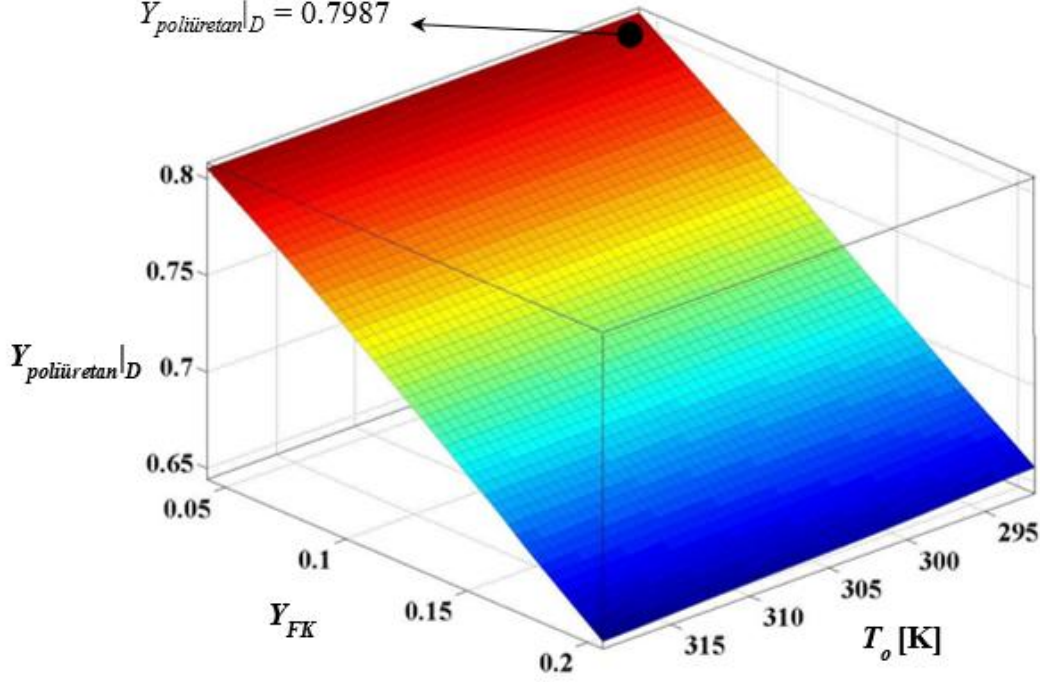


**Şekil 5.14 :** Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolum sonundaki sıcaklık.

Tepkime sonucunda üretilen poliüretan miktarı karışım sıcaklığından bağımsız olmakla birlikte FK derişimi ile doğrusal olarak azalmaktadır. Fakat Şekil 5.15'de görüldüğü gibi FK arttırımı, son ürün poliüretan'ın azalması gibi az tercih edilecek bir sonuç doğurmaktadır. Bunun sebebi poliüretanın izosiyanat ve poliöl türlerinin tepkimeye girerek oluşmasıdır. Doğal olarak fiziksel kabartıcı miktarındaki artış izosiyanat ve poliöl miktarlarında azalmaya sebep olmakta ve bunun sonucunda üretilen poliüretan miktarı doğrusal biçimde azalmaktadır.

Mevcut başlangıç koşullarında dolun  
sonunda oluşan poliüretan oranı

$$Y_{\text{poliüretan}}|_D = 0.7987$$



**Şekil 5.15 :** Farklı fiziksel kabartıcı derişimi ve sıcaklık ilkdeğerleri kullanıldığında dolun sonundaki poliüretan derişimleri.

Buraya kadar tepkime kinetiği ile ilgili verilen eğrilere göre aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

- İzosiyanat ve/veya poliöl miktarları azaltılır ve/veya başlangıç sıcaklığı arttırılırsa köpük özelliklerinde ciddi değişim olmaksızın, kalıp dolma süresi kısılabılır gözükmektedir. Ancak izosiyanat veya poliöldeki azalmanın göreceli sınırlı kalması gerektiği, kazanımın daha çok sıcaklık arttırımı yönünde olması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Yizosiyanat > 0.567 ve Ypoliöl > 0.368 yüksek olmak koşulu ile oluşan poliüretanın başlangıç izosiyanat ve poliöl değerinden neredeyse bağımsız olduğu ve bu durumun süreç sonunda erişilen son sıcaklık değerlerinin buzdolabı kabininde malzeme deformasyonuna neden olmayacak (<90°C, 363 K) biçimde düşük tutulması kısıtını da karşıladığı sonucuna varılmıştır.
- Kalıp dolma süresi FK arttırılarak düşürölmek isteniyorsa, bu işlem;  $T_0 > 305$  K değerlerinde gerçekleştirilmeli veya FK'daki artış  $Y_{FK} = 0.14$  ile sınırlı kalmalıdır. Dahası köpüğün kabine yapısal olarak yeterli katılık vermesi ancak FK'nın çok daha sınırlı arttırımı (~ 0.075) ile mümkün gözükmektedir.

- FK arttırımı, bir yandan süreç sonunda erişilen son sıcaklık değerlerinin buzdolabı kabiniinde malzeme deformasyonuna neden olması riskini ortadan kaldırırken diğer yandan son ürün poliüretan'ın azalması gibi az tercih edilecek bir sonuç doğurmaktadır.

Malzeme kazanımına en uygun tür olarak izosiyanat gözükmektedir. Fakat burada da küçük bir miktar izosiyanatın tepkimeler sonunda ısıl çarpılmaları giderme özelliğinden dolayı artması istenmektedir. Sonuç olarak eğer malzeme miktarları azaltılarak, maliyet ve dolun süresi azaltılmak isteniyorsa sıcaklık arttırımı ve türlerden küçük miktarlarda azaltmanın en uygun yol olduğu sonucuna varılmıştır.

## 6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELİ

### 6.1 Korunum Denklemleri

Bu projede kullanılan zamana bağlı akış modeli için kütle, momentum ve entalpi korunumu herhangi bir skaler büyüklüğün taşınımı kullanılan;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (6.1)$$

denklemleri ile çözülmektedir. Burada  $\rho$  ve  $\mu$  yayılım katsayısı ve kaynak terimi olup her denklem için ayrı ayrı tanımlanmalıdır. Söz konusu katsayı ve terimler her bir skaler için Çizelge 6.1’de verilmiştir.

**Çizelge 6.1 :** Yayılım katsayısı ve kaynak terimleri [17-20].

Süreklilik	1	0	0
x-mom.		—	— — —
y-mom.	$V$	—	— — —
z-mom.	$W$	—	— — —
Entalpi		—	— — — — — — —
Tür Değişim			

Örneğin süreklilik denklemi için  $\rho = 1$ ,  $\mu = 0$  ve  $\gamma = 0$  olarak tanımlanır ki bu kütle korunumuna işaret etmektedir. Navier-Stokes ( $x$ ,  $y$ , ve  $z$ -momentum), entalpi ve tür kütle oranları denklemlerinin sürtünme veya tepkime etkisi nedeniyle oluşan kayıplar nedeniyle kaynak terimleri vardır. Poliüretan akışında çalkantı beklememekle birlikte genişleyerek ittiği hava akışında oluşabilecek çalkantı için Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes (URANS) ile eklentili  $k-\varepsilon$  modeli kullanılmaktadır.

Buzdolabı kabininin katı poliüretan köpükle doldurulma sürecinde hava tarafı çalkantılı akış özelliğindedir. Çalkantılı akışlarda Navier-Stokes denklemlerindeki hızlar ve diğer skalerler Reynolds ortalaması yöntemine göre, ortalama ve değişken kısımlar olmak üzere iki terimin toplamı olarak yazılmaktadır. Toplam hız;

(6.2)

Burada ortalama hız ve değişken hızı temsil etmektedir ( $i = 1, 2, 3$ ). Aynı şekilde basınç ve diğer skalerlerde;

(6.3)

Şeklinde iki terime ayrılmaktadır. basınç, enerji veya türlerin kütle oranlarını ifade edebilir. Süreklilik ve momentum denklemlerindeki terimlerin zaman veya grup ortalamalarının alınmasıyla elde edilen denklemlere Reynolds ortalamaları alınmış denklemler denilmektedir.

## 6.2 Hava Fazı İçin Çalkantı Modeli

Bir önceki bölümde verilen denklemlere ek olarak, duvar fonksiyonu olan  $k$ -çalkantı modeli uygulanmıştır. Etkin çalkantı gerilmesi;

$$\text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} \quad (6.4)$$

Denklem (6.4)'de *Kronocker* delta işlecidir ve aşağıdaki gibi işlemektedir;

(6.5)

Etkin ağdalılık katsayısı;

$$\text{---} \quad (6.6)$$

Ve ise standart  $k$ - $\epsilon$  modeli sabiti şeklinde tanımlanmıştır. ise çalkantılı akış için Prandtl boyutsuz sayısını simgelemektedir.

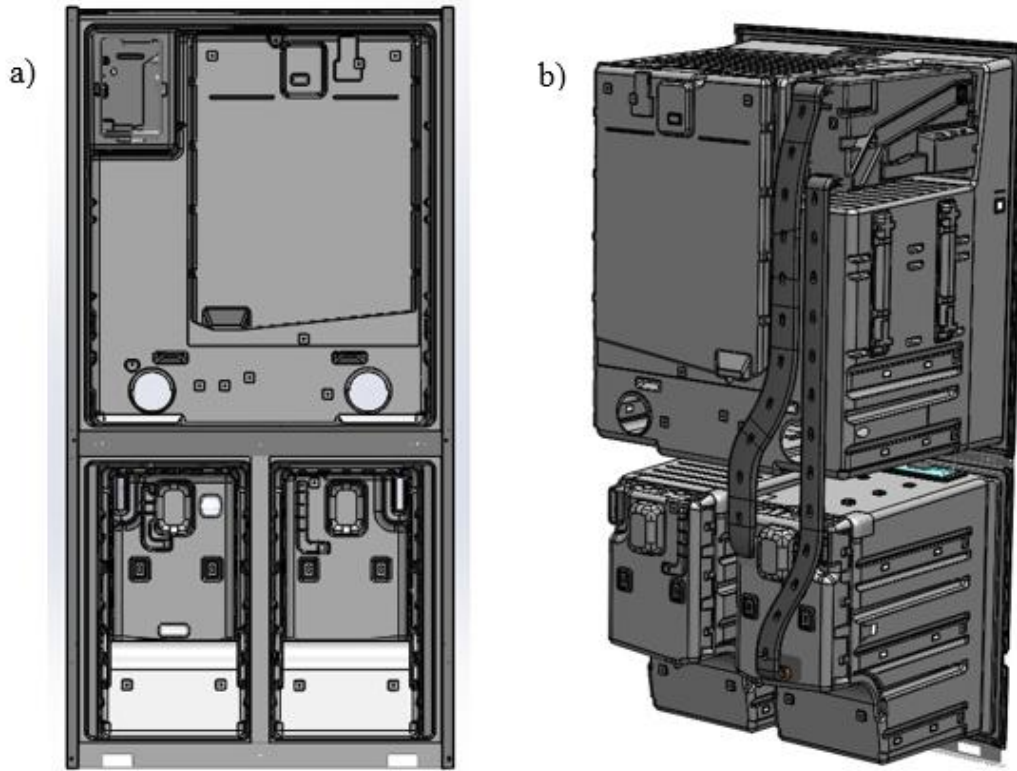






### 6.3 Buzdolabı Kabini Geometrisi ve Hesaplama Ağı

Bu çalışmada kullanılan dört kapılı buzdolabı üç boyutlu tasarım resmi Şekil 6.1’de verilmiştir. Buzdolabının yüksekliği 1787 mm, genişliği 905 mm ve derinliği 709 mm’dir. Kabin içerisinde bir çok detay bulunmaktadır. Üç boyutlu tasarım resminde kabin içerisindeki ufak girintiler ve kompresör hava kanalları görülebilmektedir. Poliüretan köpük bütün bu ayrıntılarla dolu hacim içerisinde akmatadır. Kabinin bu karmaşık yapısı hesaplama ağı eleman sayısını arttırmakta ve hesaplamaları zor hale getirmektedir. Kabin içerisindeki bütün ayrıntıların akışa olan etkilerini gözlemleyebilmek için hesaplama hücrelerinin boyutu küçük tutulmak zorunda kalmıştır. Bu da hesaplama süresini uzun ve hesaplamalarda kullanılan donanımsal kaynakların işlemci ve rastgele erişimli hafıza kapasitesi bazında yüksek kılmıştır.

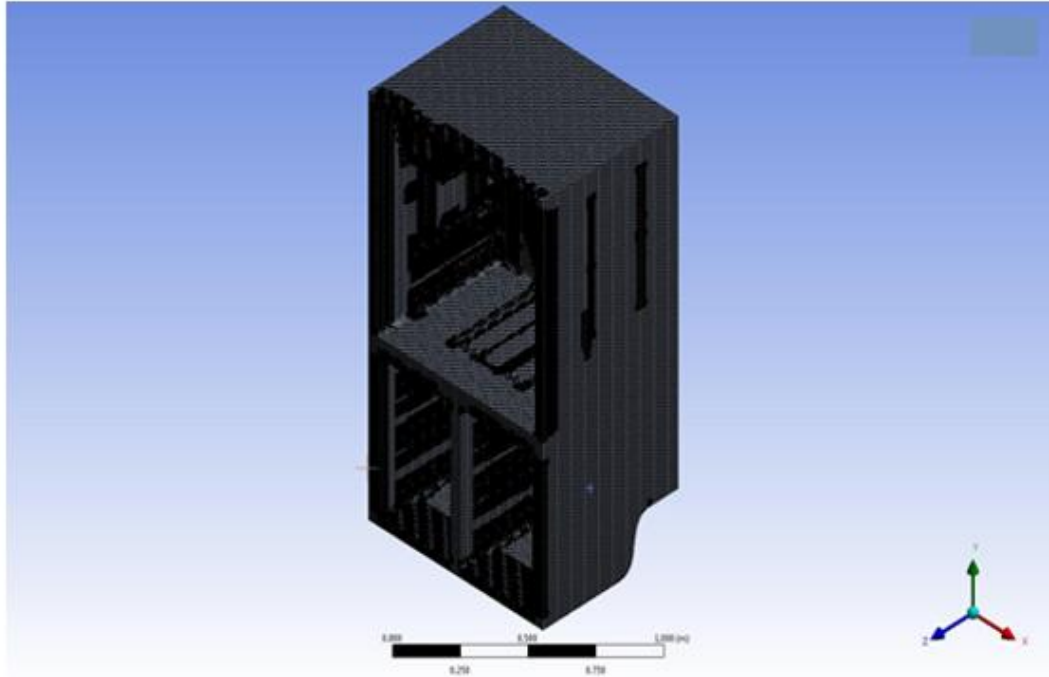


Şekil 6.1 : Buzdolabı kabini iç kanalları a) önden ve b) arkadan görünümü.

Dört kapılı buzdolabı için hesaplama ağı ANSYS Meshing yazılımında Cutcell yöntemi kullanılarak atılmıştır. Cutcell yönteminde akış alanı kartezyen olarak geometrik kısıtlar gözetilmeksizin bölündükten sonra, geometri çizgilerinin kartezyen hesaplama hücrelerini kestiği yerlerde akış alanı dışında kalan hücreler atılarak geneli kübik hücrelerden oluşan; sadece kübik hücre oluşturulması zor

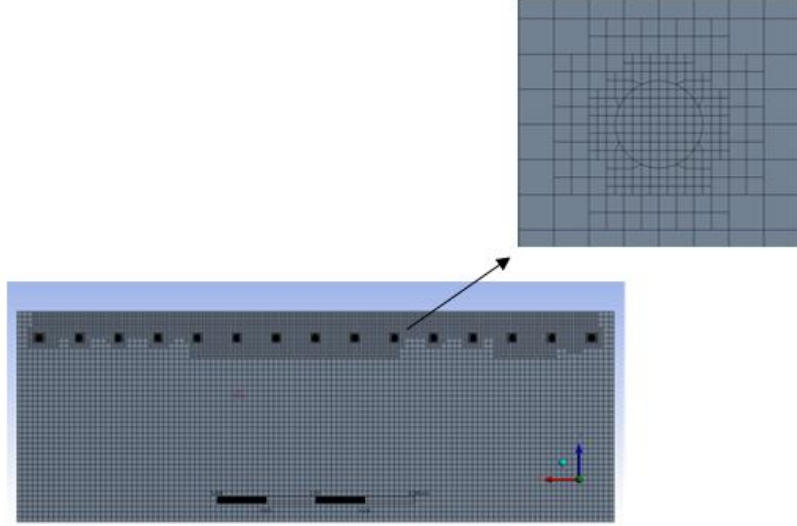
bölgelerde piramit hücrelere sahip bir hesaplama ağı oluşturulmaktadır. Bu yöntem sayesinde HAD hesaplamaları için karmaşık geometrilerin uzaysal ayrıklaştırılması daha kolay hale gelmiştir. Aynı zamanda bir çok özdevinimsel uzaysal ayrıklaştırma yöntemine olan üstünlüğü çeşitli çalışmalarda sınanmıştır [21].

Şekil 6.2, 6.3, 6.4’de örülen hesaplama ağından alınan ekran görüntüleri verilmiştir. Hesaplama ağı 1.300.000 hücreden oluşmaktadır. Çözüm örgüsünde akış denklemlerinin ayrıklaştırılmasında sonlu hacimler yöntemi kullanılmıştır.



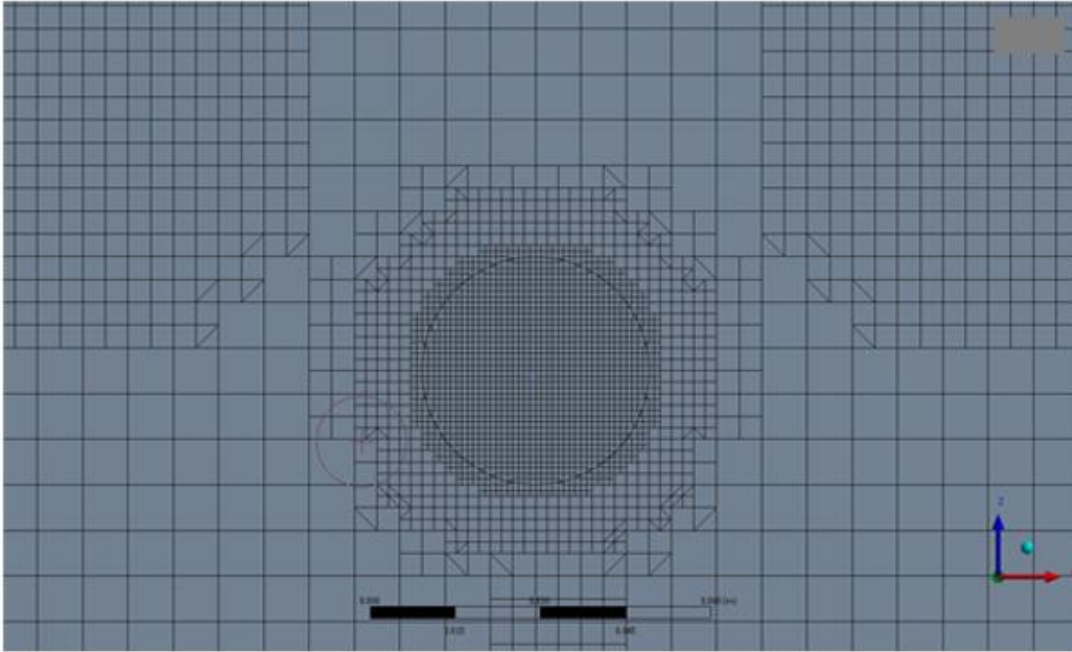
**Şekil 6.2** : Hesaplama ağı izometrik görünümü.

Şekil 6.3 ve şekil 6.4’te kabin hava çıkış delikleri civarında oluşturulmuş hesaplama ağı görülmektedir. Hesaplama ağı delikler içerisinde daha sık olup ve deliklerden uzaklaştıkça kademeli olarak seyrekleşmektedir. Bu sayede delikler ve yakın bölgelerindeki karmaşık çalkantılı akışın daha doğru çözülebilmesi amaçlanmıştır. Hava çıkış deliklerinden geçerken daralan bir kesit içerisine doğru hareket etmekte ve *Bernoulli* prensibine uygun olarak hızı artmaktadır.



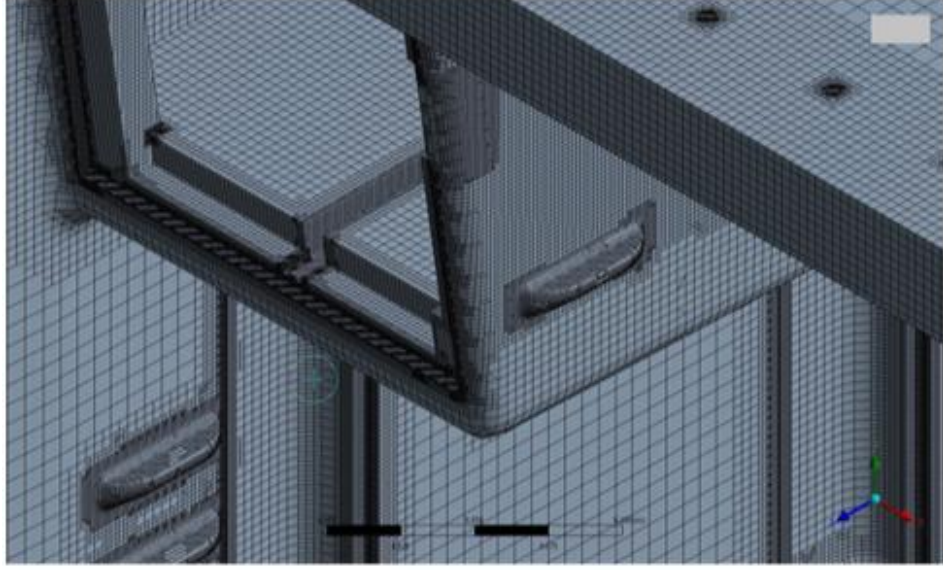
**Şekil 6.3 :** Hava çıkış deliklerinde hesaplama ağı yapısı.

Buzdolabı kabininde toplam on beş adet hava çıkış deliği bulunmaktadır ve her bir deliğin çapı 15 mm'dir. Şekil 6.4'de malzeme basım deliğindeki ağı yapısı gösterilmiştir. Basım deliğinin çapı 40 mm'dir.



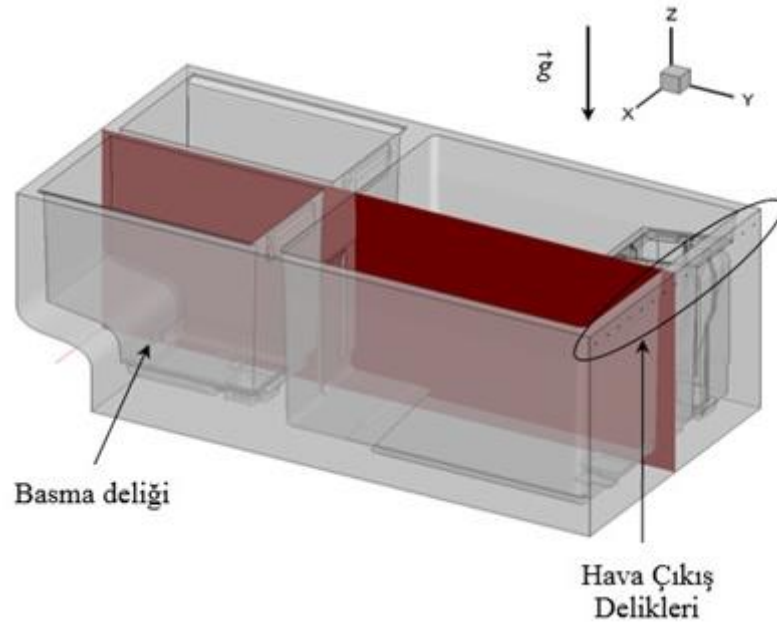
**Şekil 6.4 :** Malzeme basım deliğinde hesaplama ağı yapısı.

Kabin içerisindeki karmaşık geometrik unsurların olduğu diğer bir bölge kabin sol üstünde kalan buzluk kısmıdır. Şekil 6.5'de buzluk kısmındaki hesaplama ağı yapısı görülmektedir.



**Şekil 6.5 :** Kabin buzluk kısmında hesaplama ağı yapısı.

Poliüretan basım sürecinde buzdolabı yatık pozisyonda durmaktadır. Basım esnasındaki duruşu ve delik konumları Şekil 6.6’da verilmiştir. HAD hesaplamalarında da kabin duruşu bu şekildedir. Basım deliği kabinin simetri eksenine konumlandırılmıştır. Simetri eksenini kırmızı ile gösterilen düzlemdir.



**Şekil 6.6 :** Kabin basım süreci duruşu ve delik konumları.

#### 6.4 HAD Dizgesi ve Çözüm Değişkenleri

Bu çalışmadaki HAD benzetimlerinde çalışmakta olan gerçek bir süreçteki işletim koşulları birebir alınarak uygulanmıştır. Benzetimlerle sonuçlarıyla gerçek süreç sonuçlarının uyumluluğu sınıandıktan sonra olası iyileştirmeler için önerilerde bulunulup, düzeltilmiş süreç ile yeni benzetimler yapılarak söz konusu iyileştirmelerin sonuçlarının gözlemlenmesi kararı alınmıştır.

HAD çözümlerinde FLUENT 6.3 yazılımı kullanılmıştır. Tepkime kinetiği modeli HAD yazılımına dışarıdan çağrılarak tepkimeli akış modellenmiştir. Bu işlem HAD yazılımı içerisine Kullanıcı Tanımlı Fonksiyonlar (UDF) sağlanmıştır. UDF'ler FLUENT çözücüsünün ölçün özelliklerini daha ileri seviyelere götürmek için kullanılmaktadır. UDF'ler ile kullanıcı kendi sınır koşullarını, madde özelliklerini ve kaynak terimlerini akış alanına uyarlayabilir, aynı zamanda yeni model değişkenlerini, başlangıç koşullarını ve hesaplama sonrası işlemlerini benzetimlerine ekleyebilir [22]. UDF'ler C progamlama dilinde yazılmaktadır. Bu çalışmada UDF'ler ile 11 adet türün her biri ve oluşturdukları karışım için; yoğunluk, ağırlık, entalpi ve sıcaklık, yayılkanlıklar, tepkimeler ve hal değişimleri hesaplanmıştır.

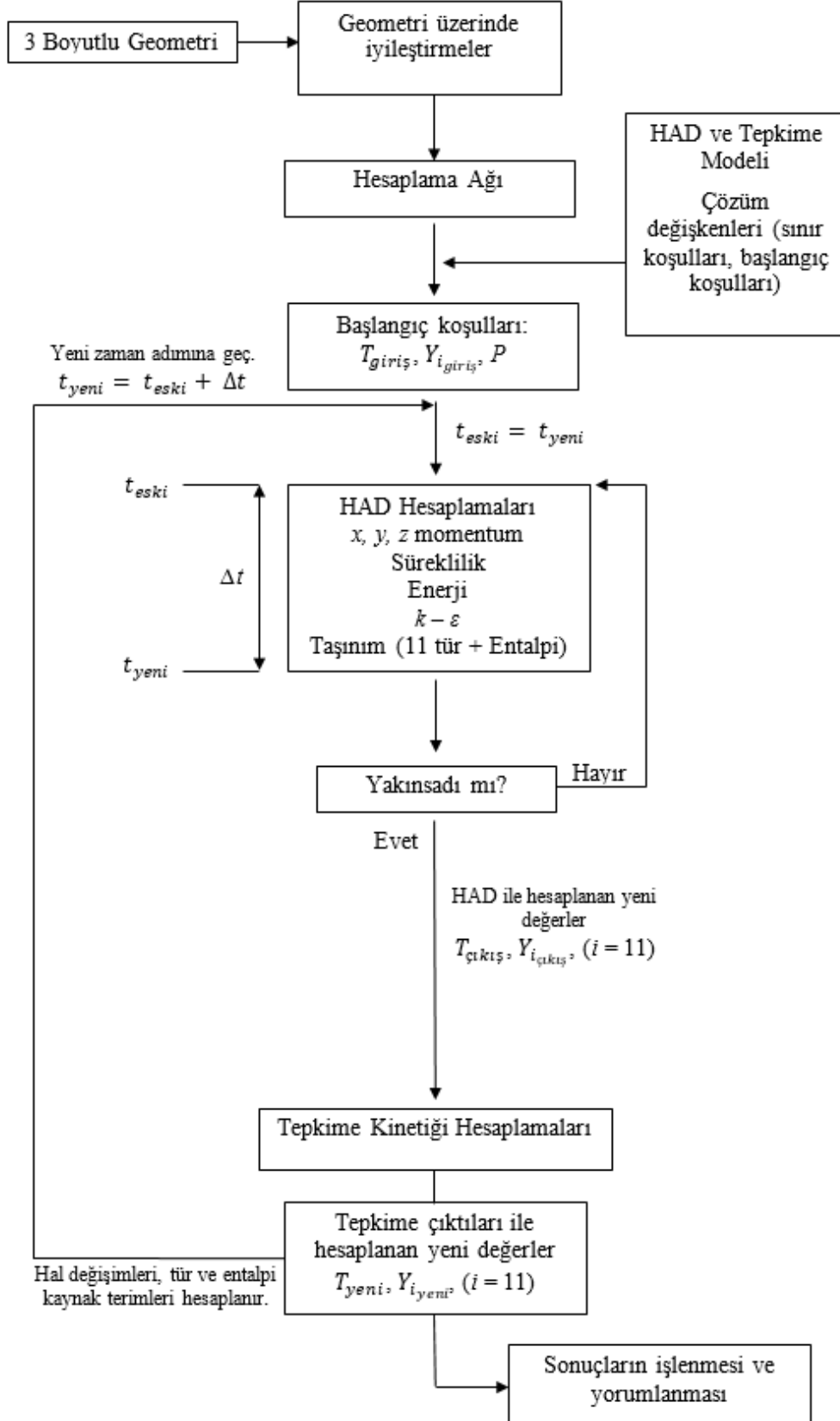
FLUENT'de çözücü olarak basınç-tabanlı çözücü kullanılmıştır. Basınç tabanlı çözücüde süreklilik denklemini sağlaması gereken hız alanı, bir basınç denklemi kullanılarak saptanmaktadır. Söz konusu basınç denklemi, süreklilik ve momentum denklemlerinin hız alanını, hesaplanan basınç değerleri ile iteratif olarak saptayarak süreklilik denklemini sağlar hale getirmektedir. Bu işlemi sonuçlar yakınsayana kadar sürdürmektedir. Momentumun ayrıklaştırılmasında birinci dereceden geriye dönük ayrıklaştırma yöntemi (first order upwind) kullanılmıştır. Basınç içinse standart şema kullanılmaktadır. Hız ve basınç bağlama için PISO çözüm yolu kullanılmıştır. PISO çözüm yolu zamana bağlı süreçlerin benzetimlerinin yapılmasında tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü yüksek zaman adımlarıyla ilerlenmesine durağan bir çözüm sunarak ile olanak sağlar. Hava çıkış deliklerinde skalerler için Neumann sınır koşulu uygulanmıştır. Duvarlarda da aynı sınır koşulu uygulanarak skalerler için sıfır akı belirlenmiştir.

Kabin içerisine türler belirli kütle oranlarında karıştırılarak 8.66 saniye boyunca 1.5 kg/s debiyle basılmaktadır. Basılan türlerin sıcaklığı 21 °dir. Gerçek süreçte kabin türler basılmadan önce 40 °ye kadar ısıtılmaktadır. Sıcaklığın tepkimelere olan

hızlandırıcı etkisine geçmiş bölümlerde değinilmiştir. Buna göre malzemenin kabin ile temas eden bölgelerinde tepkimelerin daha hızlı gerçekleşmesi beklenmektedir. Kabin içerisine basılan karışım içerisindeki tür kütle derişimleri;  $Y_{su} = 0.0095$ ,  $Y_{izosiyanat} = 0.57$ ,  $Y_{poliol} = 0.3705$ ,  $Y_{FK} = 0.05$ 'dir.

Hesaplamalarda akışa ait süreklilik, momentum, enerji ve skaler taşınım denklemleri çözümlenip sonuçlar yakınsadıktan sonra yerel olarak bütün hücrelerde hesaplanmış son sıcaklık ve tür derişimleri tepkime kinetiği yazılımına girdi olarak sokulmuştur. Taşınımı çözümlenen tür sayısı tepkimelere giren 8 ve buna ek olarak fiziksel kabartıcı sıvı ve buharı, su ve su buharı olmak üzere toplam 11 adettir. Bu sıcaklık ve kütle derişimi ilk değerlerine göre tepkimeler gerçekleştirilir ve hesaplanan yeni kütle derişimleri ve sıcaklıklar tekrar HAD yazılımı içine gönderilir. Yeni karışımdaki kütle oranları ve sıcaklıklar için her bir hücrede yerel olarak hal derişimleri gerçekleştirilir.

Hesaplanan yeni sıcaklık ve kütle oranı değerleri eski değerlerinden çıkarılıp zaman adımına bölünerek kaynak terimleri bulunur. Bu kaynak terimleri bir sonraki zaman adımında HAD denklemlerine eklenir. Şekil 6.7'de çözüm yolu gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Hesaplama dizgesi çalışma yöntemi gösterimi.

Şekil 6.7’de  $\Delta t$  zaman adımını; , , sıcaklık değerleri, ve güncel ve geçmiş zamanı simgelemektedir.





## 7. HAD BENZETİMLERİ SONUÇLARI

Hesaplamanın başlıca olgularını yeniden hatırlatacak olursak:

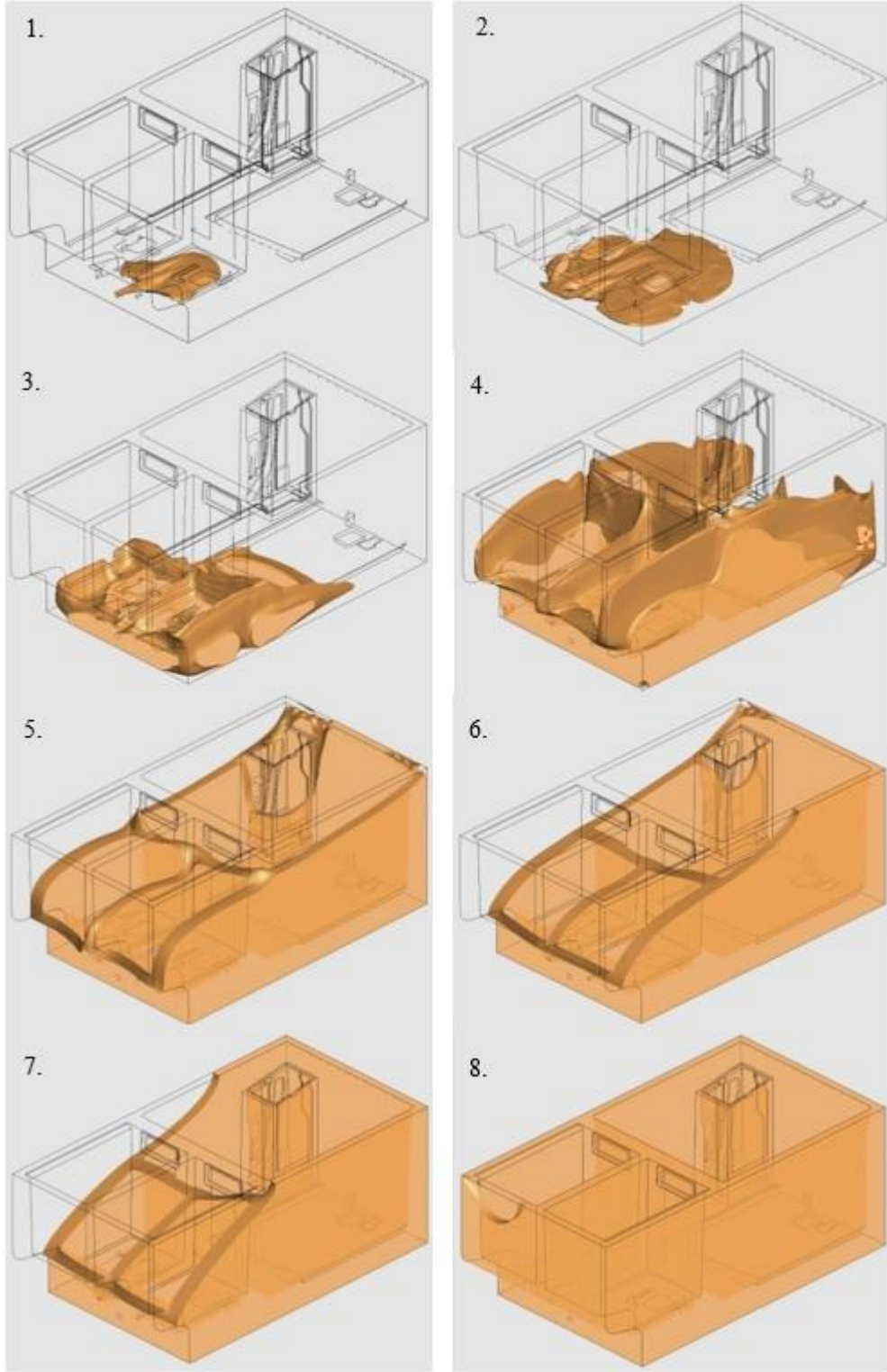
- Çözüm uzayı (kabin dolun geometrisi) hücrelere ayrıklaştırılarak sonlu Hacimler Yöntemi uygulanmıştır.
- Kütle korunumu, Momentum (3 boyutlu) ve Enerji (Entalpi) denklemlerinin yanısıra,
  - Dolun malzemesinin ittiği havanın çalkantılı (türbülanslı) olması nedeniyle  $k-\varepsilon$  URANS çalkantı modeli kullanılmıştır.

Taşınımı çözülen toplam tür sayısı, , tepkimeye giren türlere ( ) ek olarak, fiziksel kabartıcı ve buharı ile su buharını içermektedir;

(7.1)

Zaman adımı tepkimenin yoğun olduğu süreçlerde  $1 \times 10^{-4}$  saniyeye kadar indirilmiş olup, genelde 0.05 saniye, en yüksek 1 saniye ile toplam 60 saniyelik bir benzetim hesaplanmıştır.

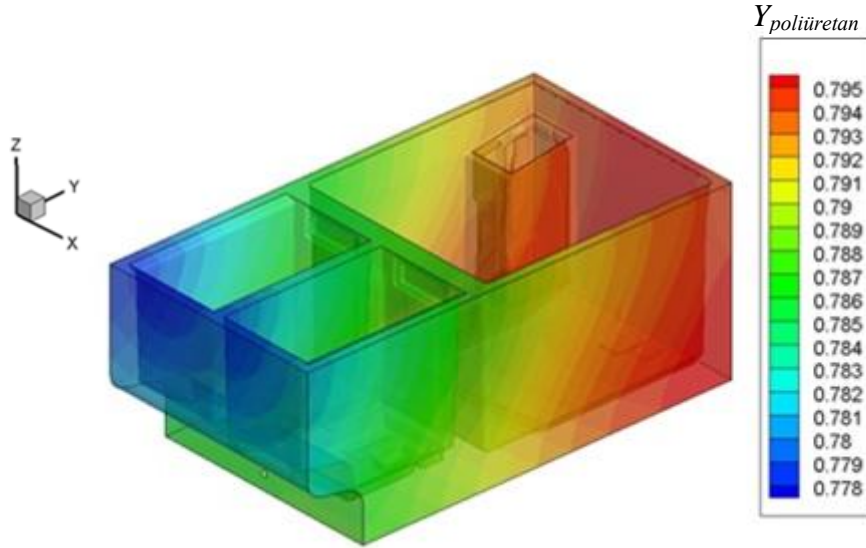
Şekil 7.1'de poliüretan köpüğün kabin içerisinde tepkimeli akışının belirli zamanlarda alınan görüntüleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde genel anlamda köpüğün buzdolabının sol yan ve ön-alt (püskürtmenin hemen üstünde) bölgesinde ilerleyişinin ciddi sorunlu olduğu ve bu bölgede dolunun göreceli geri kaldığı gözlemlenmektedir: Buna göre ön sol-alt bölgede boşluk kaldığı öngörülebilir. Kabin ön-alt bölümüne ilerlemenin geç olması nedeniyle köpük bu bölgeye ulaşana kadar göreceli çabuk dolan ön-üst bölümünden hava çıkış delikleri üzerinden taşma gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Benzer şekilde hava çıkış deliklerinin üstü, buzluk ön sağ-alt köşesi ve dolabın sağ arka-alt ve üst köşeleri sorunlu da olsa doluyor gözükmele birlikte, seri üretimde dolaptan dolaba farklılık gösterecek şekilde boşluklar kalabileceği tahmin edilmektedir.



**Şekil 7.1 :** Buzdolabı kabini içerisinde poliüretan köpük akışının farklı anlardaki benzetim görüntüleri.

Şekil 7.2’de dolum süreci tamamlandıktan sonra kabin içerisindeki poliüretan kütle oranını 3 boyutlu geometri üzerinde gösteren eş renk dağılımı verilmiştir. Şekil incelendiğinde jelleşme tepkimesinin ürünü olan poliüretanın kabinin üst

bölgelerinde daha fazla oluştuğu alt bölgelerde ise boşluk kalan bölgeye doğru derişiminin giderek azaldığı gözlemlenmektedir.



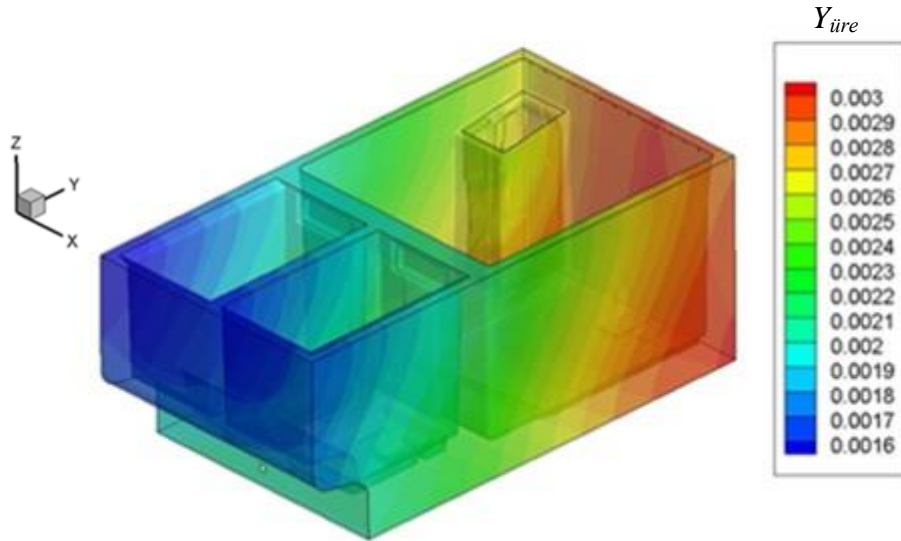
Şekil 7.2 : Kabin içerisinde poliüretan dağılımı.

Şekil 7.3' de kabin 60 saniye sonunda kabin içerisinde üre miktarları verilmektedir. Üre derişimindeki artışın 50 saniyeden sonra hızlandığı ve uzun bir süre devam ettiği unutulmamalıdır. Buna göre verilen şekildeki üre derişimleri satışa hazır bir buzdolabındaki üre derişimlerini temsil etmemektedir. Ancak Şekil 7.3 üre derişiminin olası en yüksek olduğu bölgeler hakkında fikir verebilir. Üre derişiminin en son halinin gözlemlenebilmesi için benzetimlerin çok daha uzun süreler yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada benzetimler tepkimelerin durdurduğu noktaya kadar sürdürülebilmiştir. Bunun nedeni hesaplamalardaki zorlukla koşut olarak işlemci ve hafıza gereksiniminin yüksek olması; 96 çekirdek ve çekirdek başına 2 Gb hafıza ile dahi 60 saniyelik bir benzetim 3 ay süre harcanmasıdır. Hesaplamaların bu kadar zor olmasında, hesaplama ağının boyutu; çok fazlı, tepkimeli, çalkantılı, 3 boyutlu akışın karmaşık doğası belirleyicidir. Hesaplama zaman adımı tepkimelerin yoğun dönemlerde 0.01 saniye ile sınırlı kalmıştır. Daha büyük zaman adımları seçildiğinde çözüm yakınsamadığı tecrübe edilmiştir. Zamana bağlı HAD hesaplamalarında zaman adımını sınırlayan en önemli ölçüt Courant sayısıdır. Bu sayı, ayrıklaştırılmış uzaysal ağ içerisinde ilerleyen bir fiziksel büyüklüğün, bir zaman adımı içerisinde aldığı yol ile uzaysal ayrıklaştırma boyutunu ilişkilendirmektedir.

Hesaplamaların tutarlılığı açısından bu sayının, bir eşik değerin altında olması gerekmektedir. Bu değer her bir fiziksel çözümleme senaryosu için farklılık gösterebilmekle beraber, genellikle kabul edilen görüş, bu sayının 1'in altında olması gerektiğidir. Ancak bu sayıyı sağlayacak zaman adımını kullanmak birçok durumda benzetimin toplam hesaplama süresini arttıracak için; hızlı çözümlerin arzulandığı bu gibi araştırmalarda söz konusu kısıtlamanın belirli bir ölçüde esnetilmesi kabul edilebilir bulunmuştur. Courant sayısı;

$$\text{---} \text{---} \text{---} \quad (7.2)$$

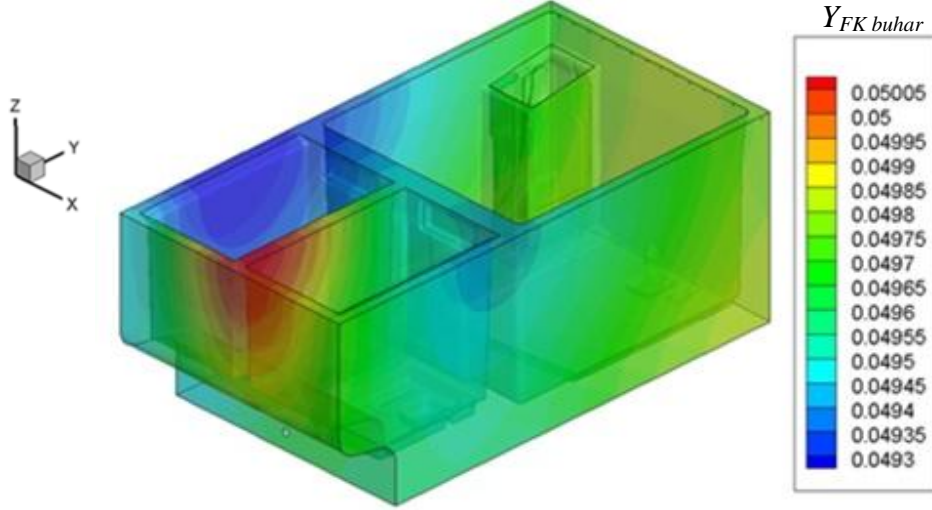
Burada zaman adımını,  $x$  yönündeki,  $y$  yönündeki,  $z$  yönündeki hız bileşenlerini,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  ise akışın geçtiği söz konusu hücrenin  $x$ ,  $y$ ,  $z$  yönlerindeki ayrılarının büyüklüğünü vermektedir.



**Şekil 7.3 :** Kabin içerisinde üre dağılımı.

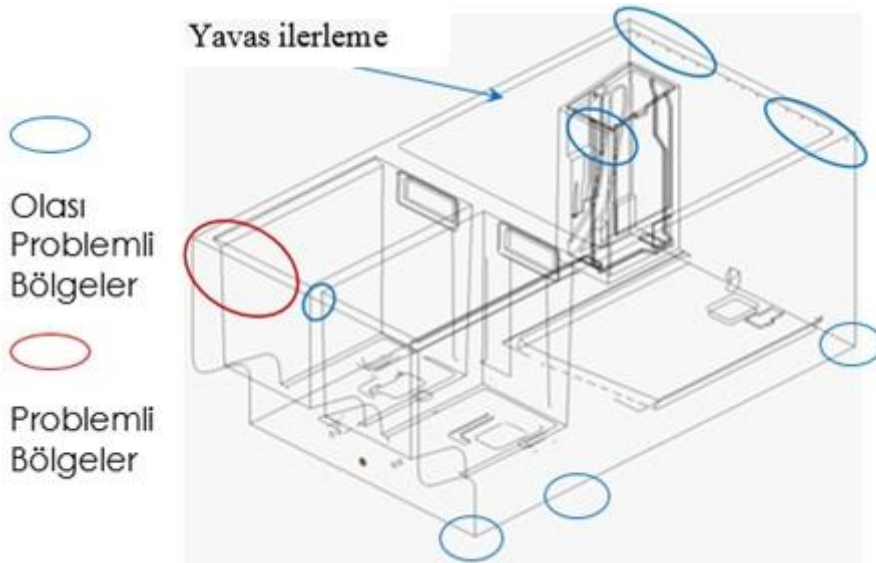
Şekil 7.4' de fiziksel kabartıcı buharının 60 saniye sonunda kabin içerisindeki dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi fiziksel kabartıcı buharıda tıpkı köpüğün akışında olduğu gibi asimetrik bir davranış göstererek kabinin sol tarafında daha az bulunmaktadır. Fiziksel kabartıcı köüğün yalıtım başarımında büyük görev üstlenmektedir. Burada fiziksel kabartıcının kabin içerisindeki heryere eşit dağılmasının istenilen bir durum olduğu söylenebilir. Bunun aksine benzetimlere göre fiziksel kabartıcı kabinin sol tarafında daha seyrek bulunmaktadır. Aynı

zamanda kabinin alt ve üst kısmını ayıran bölmennin yan kabinlerle birleştiği bölgeler sorunlu bölgeler olarak nitelendirilebilir.



Şekil 7.4 : Kabin içerisinde fiziksel kabartıcı buharı dağılımı.

Buraya kadar verilen şekillerden çıkarılabilecek sonuçlar; öncelikle hava çıkış deliklerinin mevcut konumlarında sağdan sola, çapları veya sıklıkları artırılmalıdır. Mümkünse, sol panel ön yüzüne ve/veya alt-önde ön ve/veya alt yüze delik açılmalıdır. Buzluk bölümü sorunları, buzluk duvarları ilerlemenin zor olduğu yanlarda geniş tutularak aşılabilir gözükmemektedir. Şekil 7.5’de sözü edilen sorunlu bölgeler buzdolabı geometrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 7.5 : Poliüretan püskürtme işleminde olası sorunlu bölgeler.



## 8. ÇIKARIMLAR VE ÖNERİLER

Buraya kadar olan tepkime kinetiği ile dolum süresi başlangıç koşullarının eniyileştirilmesi çalışmasından ve HAD benzetimlerinden yapılan gözlemler ve sonuçları, bu sonuçlara göre belirlenmiş sorunların giderilmesi için sunulan öneriler şu şekilde özetlenebilir;

- Genel anlamda köpüğün buzdolabının sol yan ve ön-alt (püskürtmenin hemen üstünde) bölgesinde ilerleyişinin ciddi sorunlu olduğu ve bu bölgede dolunun göreceli geri kaldığı gözlemlenmektedir: Ön sol-alt bölgede boşluk kalmaktadır.
- Kabin ön-alt bölümüne ilerlemenin geç olması nedeniyle köpük bu bölgeye ulaşana kadar göreceli çabuk dolan ön-üst bölümünden hava çıkış delikleri üzerinden taşma gerçekleştiği gözlemlenmektedir.
- Benzer şekilde hava çıkış deliklerinin üstü, buzluk ön sağ-alt köşesi ve dolabın sağ arka-alt ve üst köşeleri sorunlu da olsa doluyor gözükmeyle birlikte, seri üretimde dolaptan dolaba farklılık gösterecek şekilde boşluklar kalabileceği tahmin edilmektedir.
- Öncelikle hava çıkış deliklerinin çapları mevcut konumlarında sağdan sola, çapları veya sıklıkları arttırılmalıdır.
- Mümkünse, sol panel ön yüzüne ve/veya alt-önde ön ve/veya alt yüze delik açılmalıdır.
- Buzluk bölümü sorunları, buzluk duvarları ilerlemenin zor olduğu yanlarda geniş tutularak aşılabilir gözükmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Randall, D., and Lee, S.**, (2002). *The Polyurtehanes Book*. Wiley.
- [2] **S. Hentges**, “Energy Savings and The Reduction in the Emission of Greenhouse Gases Resulting from the Use of Foam Plastic Insualtion in Refrigerators and Freezers. A Lifecycle Analysis.”, *American Plastic Council*.
- [3] **Kim, Y.B., Kim, D. K., Hong, S. E., Kim, J. G., Park, M. H., Kim, J. H., Kweon, J. K.**, (2005). “*Numerical Simulation of PU Foaming Flow in a Refrigerator Cabinet.*”, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 41, May 2005.
- [4] **Seo, D. and Youn, J. R.**, (2005), “*Numerical Analysis on Reaction Injection Molding of Polyurethane Foam by Using a Finite Volume Method.*”, *Polymer*, Vol. 46, July 2005.
- [5] **Incropera, F. P., ve DeWitt, D. P.**, (2000). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*. 4. Baskı. T. Derbentli (çev), İstanbul: Literatür.
- [6] **N.J. Mills**, (2005).“The wet Kelvin Model air flow through open-cell polyurtehane foams.”, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, 2005.
- [7] **Url-1** <<http://www.haltermann.com>>, alındığı tarih 05.12.2014.
- [8] **Szycher, Micheal.**, (1999). *Szycher’s Handbook of Polyurethanes*. CRC Press.
- [9] **Yenigün, M.C ve Karadağ, H.** (2012). Design And Performance Analysis Of A Polyurethane Injection Process In A Refrigerator Cabinet (Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [10] **M.J.S Dewar**, *The Electronic Theory of Organic Chemistry*, Oxford University Press: Oxford, 1949.
- [11] **Url-2** <<http://www.nist.gov>>, alındığı tarih 06.12.2014.
- [12] **Ionescu, M.**, (2008). *Chemistry and Technology of Polyols for Polyurethane*, Smithers Rapra Press.
- [13] **Herrington, R. and Hock K.** (1998). *Flexible Polyurtehane Foams*, 2<sup>nd</sup> Ed., The Dow Chem Co.
- [14] **Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W.**, (2001). *Combustion*. 3rd Edition. Springer, Germany 1996.
- [15] **White, F. M.**, (2004). *Akışkanlar Mekaniği*. 4. Baskı. K. Kırkköprü ve E. Ayder, (çev.), İstanbul: Literatür.
- [16] **Boles, M. A., ve Çengel Y.**, (2008). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla*. 5. Baskı. A. Pınarbaşı (çev.), İzmir: Güven Kitabevi.
- [17] **Anderson, D. A., Tannehill, J. C., Pletcher, R. H.** (1984). *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Second Edition. Mc Graw-Hill, New York.
- [18] **Deen, W. M.** (2013). *Analysis of Transport Phenomena*. Oxford Press.
- [19] **Martin, S., Williams, J. R.** (2009). *Multiphase Flow Research*. Nova Science Publishers.

- [20] **Schlichting, H.** (1955) *Boundary Layer Theory*. Mc Graw-Hill.
- [21] **Ingram., D. M., Causon D.M.,** Mingham C.G., Developments in Cartesian cut cell methods. *Mathematics and Computers in Simulation*. Vol. 61. (2003), pp 561-572.
- [22] **FLUENT 6.3 User's Guide**, (2006). Fluent Inc.

# CURRICULUM VITAE

## **FIRAT AKAR**

---

Adress : Istanbul Technical University Fluids Group,  
Engines and Vehicles Building, Ayazaga,  
34469, Istanbul

Date of birth : 11 Sept 1989  
Place of birth : Istanbul,  
Turkey  
Marital Status : Single

Tel : (+90) 507 225 3015 (Mobile)  
(+90) 212 285 3986 (Lab)

Email : [akarf@itu.edu.tr](mailto:akarf@itu.edu.tr)  
[www.akis.itu.edu.tr](http://www.akis.itu.edu.tr)

---

### **ACADEMIC AND EDUCATIONAL QUALIFICATIONS**

---

M.Sc., 2012-present  
Istanbul Technical University (Turkey)  
Energy Science & Technology

B.Sc., 2012  
Yildiz Technical University (Turkey)  
Mechanical Engineering Department, Energy Program  
Period: five years in between 2007-2012 (including a year in prep. school of English)  
Degree of *Honor Student*

### **WORK EXPERIENCE**

---

September 2012-Present	Resaercher and Project Assistant	ITU Fluids Group
July 2011-October 2011	Trainee	Ambarlı Natural Gas Combined Cycle Power Plant.
August 2010-October 2010	Trainee	Gökçe Burners and Heat Inc.

### **PROJECTS**

---

- Modelling of Reaction and Injection Molding of Polyurethane Foam in Refrigerators (2012-2014). Sponsored by Ministry of Industry and ARCELİK Inc., contract number 01213.STZ.2012-1.
- Simulation of Reactive Flows in Nitriding Furnaces (2010-2013, Participated in 2012). Sponsored by Robert BOSCH San. Tic.
- Assembly and Design of an Internal Combustion Engine. (Sept 2010-Jan 2011)  
Machine Design 1 project at Yildiz Technical University.
- Thermodynamical Analysis of an Internal Combustion Engine with MATLAB.  
(Feb 2011- June 2011). Machine Design 2 project at Yildiz Technical University.

- Design of the Heavy Duty Vehicles Pneumatics Braking Systems. (Sept 2011-Jan 2012). Machine Design 3 project at Yildiz Technical University.

## **THESES**

---

- Energy Efficiency in Industry and Designing a Recuperative Air Preheater for a Steel Factory 2012, B.Sc. thesis, Mechanical Engineering Dept., Yildiz Technical University, supervised by Asst. Prof. Suleyman Hakan SEVILGEN.
- Designing a New Refrigerator Cabinet Based on Optimization of the Insulation Material Injection Process 2014, M.Sc. thesis, Energy Institute, Istanbul Technical University, supervised by Prof. Dr. I. Bedii OZDEMIR.

## **SKILLS**

---

Computer : Ansys Fluent, Icem CFD, Ansys Meshing, Ansys Design Manager, SolidWorks, Fortran, Matlab, Microsoft Office Programs, Linux, Tecplot, C programming.

Language : English (Fluent), Turkish (Native)

## **PUBLICATIONS**

---

- OZDEMIR, I. B. & AKAR, F. 2014 The response of nitriding chemistry to different initial gas compositions, submitted *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- OZDEMIR, I. B. & AKAR, F. 2014 The effect of load orientation on nitriding chemistry, submitted *Applied Surface Science*.
- OZDEMIR, I. B. & AKAR, F. 2014 Local dynamics of chemical kinetics at different phases of nitriding process, submitted *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- OZDEMIR, I. B. & AKAR, F. 2014 Parameter optimization of nitriding process using chemical kinetics, in preparation.

## **CONFERENCE**

---

- OZDEMIR, I. B. & AKAR, F. & LIPPMANN, N. 2014 Simulation of Flow and Reactions in a Nitriding Furnace, 5<sup>th</sup> Bodycote-AGA In-Depth Heat Treatment Seminar, 20-21 May 2014, Stockholm.

## **RESEARCH INTEREST**

---

- Reactive Multiphase Flows
- Turbomachinery
- Surface Chemistry
- Fluid Mechanics
- Computational and Modelling Aspects of Turbulent Flows
- Aerodynamics
- Thermodynamics
- CFD analysis on the Solidification Processes