

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM AMBALAJ ENDÜSTRİSİNDE
KULLANILAN EBİŞÖR KALIPLARINDAKİ
ISITMA DELİKLERİNİN OPTİMUM
TASARIMI

Emre ÖZTOP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2007

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CAM AMBALAJ ENDÜSTRİSİNDE
KULLANILAN EBİŞÖR KALIPLARINDAKİ
ISITMA DELİKLERİNİN OPTİMUM
TASARIMI

Emre ÖZTOP
YÜKSEK LİSANS TEZİ
TASARIM VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN

GEBZE
2007



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/01/2007 tarih ve 2007/04 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 13/02/2007 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Emre ÖZTOP'un tez çalışması Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali ARSLAN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet GÖKTÜRK

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/01/2007 tarih ve 2007/04 sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

**TEZ BAŞLIĞI : Cam Ambalaj Endüstrisinde Kullanılan Ebişör
Kalıplarındaki Isıtma Deliklerinin Optimum Tasarımı**

YAZAR ADI : Emre ÖZTOP

Cam ambalaj, sıvı ve katı maddelerin korunması amacıyla, soda – kireç camının ısıtma yöntemleri ile oluşturulup şekillendirilmesi sonucu elde edilen bir ara üründür. Cam ambalaj ürününün üretim prosesi iki aşamadan oluşmaktadır. Ebişör kalıbı ve yardımcı komponentleriyle gerçekleştirilen, ara ürün olarak parizonun oluşturulduğu kısım prosesin ilk aşamasını oluşturur. İlk aşamada presleme yada üfleme metotlarından biri kullanılarak şekillendirme işlemi gerçekleştirilir. İkinci aşama ise son ürünün elde edildiği finişör kalıbı ve yardımcı komponentleriyle gerçekleştirilen kısımdır.

Cam damlasının ergitme fırınından düşerek ilk şekillenmesinin meydana geldiği ebişör kalıplarında; kalıp alt yüzeyinden kalıp merkezine göre belirli bir radyal çapta ısıtma delikleri açılır. Bu ısıtma delikleri, kalıpta izolatör olarak görev yapıp ısının kalıptan kaçmasını engelleyerek oluşturulan parizonun dengeli bir sıcaklık dağılımına sahip olmasını sağlar. Böylelikle üretilen cam ambalaj ürünündeki cam dağılımının homojen olmasına yardımcı olur.

Bu çalışmada ebişör kalıbına açılan ısıtma deliklerinin maksimum ısıyı kalıpta tutması için nasıl konumlanması gerektiğinin araştırması yapılmıştır. Bu amaçla ANSYS programında termal analizler gerçekleştirilmiştir. Optimum çözümün bulunması için deneysel tasarım metodu kullanılarak ısıtma deliklerinin dizayn değişkenlerinin sisteme etkileri görülmüş, hata payı hesaplanmıştır.

SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS : Optimum Design Of Heating Holes Located At
Blankmolds Used In Glass Packing Industry**

AUTHOR : Emre ÖZTOP

Glass packing is a semi product which is produced by giving shape to sodium carbonate – lime's glass via thermal processes in order to protect liquid or solid materials. Manufacturing process of glass packing is composed of two steps. The step which is accomplished by blankmold and it's auxiliary components to produce parison as semi product is the first step. Embodying process is realized via press or blowing methods. The second step is the phase at which final product is produced by blowmold and it's auxiliary components.

On blankmolds –in which first embodying of glass driblet which drops from melting ovens occurs-, heating holes with a radial diameter are created due to the mold center. These heating holes warrant the parison to have a balanced temperature dispersion by attempting as an isolator and avoiding the temperature in the mold to go outside. By this way it helps to produce a final product with a structure of homogeneous glass dispersion.

This study is a research and analysis of positioning heating holes on blankmold to keep maximum possible heat inside the mold. Many thermal analysis are realised on ANSYS software for this purpose. Experimental design method is benefited to find optimum solution by evaluating effects of design variables to the system and error of experiment is calculated.

TEŞEKKÜR

Proje çalışmalarım boyunca her türlü yardım, destek ve anlayışını hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan KURTARAN'a, OMCO İstanbul Kalıp San. A.Ş. çalışanlarından Tasarım Şefi Sayın Süha GÖKBEN'e, bu süreç boyunca bana yardımcı olan sevgili eşime ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
 1. GİRİŞ	 1
2. ISI TRANSFERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Temel Kavramlar Ve Isı Transferi Metodları	5
2.2.1. Isı İletimi	5
2.2.1.1. Silindirik Geometriye Sahip Sistemler	8
2.2.2. Isı Taşınımı	10
2.2.2.1. Laminer ve Türbülanslı Akış	13
2.2.2.2. Gerekli Boyutsuz Sayılar ve Fiziksel Anlamları	14
2.2.2.3. Dış Yüzeylerden Zorlanmış Akışta Isı Taşınımı	14
2.3. Isı Transferi İçin Sonlu Elemanlar Denklemleri	17
2.3.1. Isı Transferi Denklemlerinin Sonlu Elemanlara Uygulanması	19
3. CAM AMBALAJ ÜRETİMİ	22
3.1. Camın Genel Tanımı	22
3.1.1. Camın Yapısı	22
3.1.2. Cam Yapımında Kullanılan Hammaddeler	23
3.2. Cam Üretimi	23
3.2.1. Harman Hazırlanması	23
3.2.2. Fırında Cam Ergitme Operasyonu	24

3.2.3. Cam Üretim Hattı	25
3.2.3.1. Forehearth	26
3.2.3.2. Feeder	26
3.2.3.3. IS Makinesi	26
3.2.3.4. Nakil Sistemleri	26
3.2.3.5. Soğutma (Tavlama) Fırını	26
3.2.4. IS Makinesi	27
3.2.5. Ürün ve Kalıp Bilgisi	29
3.2.5.1. Ürünün Tarifi	29
3.2.5.2. Kalıp Parçaları ve İşlevleri	32
3.2.5. Üretim Prosesleri	38
3.2.5.1. Üfleme – Üfleme (Blow – Blow) Prosesi	38
3.2.5.2. Presleme – Üfleme (Pres – Blow) Prosesi	40
4. DİZAYN OPTİMİZASYONU TEORİSİ	42
4.1. Optimizasyon Nedir?	42
4.2. Optimizasyonda Mühendislik Uygulamaları	44
4.3. Dizayn Optimizasyonu Probleminin Formülasyonu	45
4.3.1. Dizayn Değişkenleri	46
4.3.2. Amaç Fonksiyonu	48
4.3.3. Dizayn Kısıtları	49
4.3.3.1. Doğrusal (Lineer) ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Kısıtlamalar	49
4.3.3.2. Eşitlik (Equality) ve Eşitsizlik (Inequality) Kısıtlamaları	49
4.3.4. Kısıtlanmamış (Unconstrained) ve Kısıtlanmış (Constrained) Optimizasyon Problemlerinin Formüle Edilmesi	50
4.4. Genel Bir Dizayn Optimizasyonu Örneği	51
5. DENEYSEL TASARIM VE ANOVA	54
6. EBİŞÖR KALIPLARINDAKİ ISITMA DELİKLERİNİN OPTİMİZASYONU	62
6.1. Ebişör Kalıpları	62
6.2. Sisteme Etki Eden Yükler	65
6.3. Isıtma Delikleri Değişkenleri	73

6.4. Değişkenlerin Etkisinin İncelenmesi	74
6.4.1. Delik Boyu Değişkeni	74
6.4.2. Delik Çapı Değişkeni	76
6.4.3. Delik Sayısı Değişkeni	78
6.4.4. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığı Değişkeni	79
6.5. ANSYS Programı İle Isıtma Deliklerinin Optimizasyonu İçin Yapılan Termal Analizler	81
6.6. ANSYS Programı ile Bulunan Değerlerin Doğrulanması	90
6.7. Regresyon Denkleminin Önerilmesi ve Deneylerin Gerçekleştirilmesi	91
6.7.1. Verilerin Analizi	92
6.7.1.1. Çoklu ANOVA Tablosunun Oluşturulması	92
6.7.1.2. Faktörler ve Etkileşimlerine Ait ANOVA Tablosu Hipotezleri	96
6.7.2. Regresyona Ait ANOVA Tablosu Hipotezleri	99
6.7.3. Regresyon Denklemi Katsayılarının Hesaplanması	99
6.8. Sonuçlar ve Değerlendirmeler	102
KAYNAKLAR DİZİNİ	104
ÖZGEÇMİŞ	106
EKLER	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kesit Alanı
a	Aks Aralığı
$ANOVA$	Analysis Of Variance – Varyans Analizi
B	Sıcaklık Gradyan Enterpolasyon Matrisi
c_p	Sabit Basıncıta Özgöl Isı
D, d	Delik Çapı
F	F İstatistiği
h	Ortalama Isı Taşınım Katsayısı
k	Isı İletim Katsayısı
L, x	Uzunluk
l	Delik Boyu
MS	Kareler Ortalaması
n	Devir Sayısı, Koşum Sayısı
Na	Sodyum
N_i	Şekil Fonksiyonları
Nu	Nusselt Sayısı
Pr	Prandtl Sayısı
q	Isı Akısı
q_r	Birim Yüzey Alanı Başına Gelen Isı Akış Oranı
q_x, q_y, q_z	Birim Alandaki Isı Akış Bileşenleri
Q	Birim Zamanda Transfer Edilen Isı Miktarı
r	Radyal Mesafe
Re	Reynolds Sayısı
Si	Silisyum
SS	Kareler Toplamı
t	Et Kalınlığı, Zaman
T	Sıcaklık
T_s	Yüzey Sıcaklığı
T_e	Çevresel Sıcaklık

u_{∞}	Serbest Akış Hızı
x, y, z	Konum Koordinatları
z	Dişli Sayısı, Delik Sayısı
Z	Amaç Fonksiyonu
α	Isıl Yayılm Katsayısı, Yüzey Soğurma Katsayısı
ν	Kinematik Viskozite
μ	Dinamik Viskozite
ρ	Yoğunluk
β	Regresyon Denklemindeki x Bağımlı Değişkenlerin Katsayıları
ε	Regresyon Denkleminin Hata Değeri, Yüzey Yayma Katsayısı
σ	Stefan – Boltzmann Sabiti

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yan Yüzeyi Yalıtılmış Silindirden Isı İletimi	7
2.2. İçi Boş Bir Silindir Duvarından Isı İletimi	8
3.1. Camın Düzensiz Atomik Yapısı	23
3.2. Tipik Fırın Kesiti	24
3.3. Üretim Hattı	25
3.4. IS Makinesi	28
3.5. Ürün Biçimleri	30
3.6. Kafa Tipleri	31
3.7. Ürünün Bölümleri	32
3.8. Müldebak	33
3.9. Ring	33
3.10. Mandren	33
3.11. Mastor	34
3.12. Mastor Soğutucu	34
3.13. Ebişör	35
3.14. Tampon	35
3.15. Huni	36
3.16. Finişör	36
3.17. Müldefon	36
3.18. Süflaj Başlığı	37
3.19. Alıcı Maşa	37
3.20. Üfleme - Üfleme Prosesi	38
3.21. Presleme – Üfleme Prosesi	40
4.1. Optimizasyon Eğrisi	42
4.2. Dizayn Optimizasyonu Algoritması	43
4.3. Çeşitli Kesitler ve Bunlara Ait Dizayn Parametreleri	47
4.4. Minimum ve Maksimum Bulma	49
4.5. Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtlamaları Arasındaki Fark	50
4.6. Uygun Çözüm Bölgesi	52
5.1. Sistem Girdi ve Çıktısı Arasındaki İlişkiler	55
6.1. Ebişör Kalıbındaki Isıtma Delikleri	63

6.2. ANSYS Programında Yapılan Analizlerde İptal Edilen Kısımlar	64
6.4. ANSYS Programında Kullanılan Sadeleştirilmiş Model	65
6.5. Soğutma Havaına Maruz Kalan Yüzeyler	66
6.6. Delik Boyu Analizi Örneği	75
6.7. Delik Boyu – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği	76
6.8. Delik Çapı Analiz Örneği	77
6.9. Delik Çapı – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği	77
6.10. Delik Sayısı Analiz Örneği	78
6.11. Delik Sayısı – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği	79
6.12. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığının Analiz Örneği	79
6.13. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığı– Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği	80
6.14. Kalıp ve Forma Yarımları	83
6.15. SOLİD 70 Termal Eleman Tipi Geometrisi	84
6.16. Elemanlara Ayrılmış (Mesh Edilmiş) Kalıp, Forma ve Isıtma Delikleri	86
6.17. Kalıp Yüzeylerine Uygulanan Taşınım Yükleri	87
6.18. Kalıba Etki Eden Diğer Yükler	87
6.19. Optimum Delik Kombinasyonu	89
6.20. Termal Kamerayla Elde Edilen Kalıp Sıcaklık Değerleri	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Uygun Çözüm Bölgesinin Köşe Noktalarındaki Amaç Fonksiyonu Değerleri	53
5.1. ANOVA Tablosu	56
5.2. İki Değişkenli ANOVA Örneği	58
5.3. İki Değişkenli Örnek Sistemin ANOVA Hesaplamaları	60
6.1. Delik Boyu Analiz Sonuçları	75
6.2. Delik Çapı Analiz Sonuçları	77
6.3. Delik Sayısı Analiz Sonuçları	78
6.4. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığının Analiz Sonuçları	80
6.5. ANSYS Programında Yapılacak Termal Analizlerdeki Değişken Değerleri	81
6.6. ANSYS Programında Yapılan Termal Analizlerin Sonuçları	88
6.7. Faktörler ve Etkileşimlerine Ait ANOVA Tablosu	96
6.8. Regresyona Ait ANOVA Tablosu	96

1.GİRİŞ

Cam ambalaj üretimi değişik aşamalardan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; harmanın hazırlanması, fırında ergitilmesi ve IS makineleri yardımıyla camın şekillendirilmesi olarak sayılabilir. Camın şekillendirilmesi, IS makinelerine bağlanan kalıplar ve yardımcı kalıp komponentleriyle gerçekleşir.

Bu çalışmada, camın şekillendirilmesi esnasında kullanılan ebişör kalıplarındaki ısıtma deliklerinin optimum yerleşim şeklinin bulunmasına çalışılmıştır. Ebişör kalıpları, fırından gelen cama şişirme yada presleme yöntemlerinden biriyle ilk şeklin verildiği kalıplardır. Ebişör kalıplarından çıkan ara ürüne, finişör kalıplarında şişirme yöntemi ile son şekli verilerek cam ambalaj üretimi gerçekleştirilir. Ebişör kalıplarından çıkan bu ara ürün parizon olarak adlandırılır.

Ebişör kalıplarındaki ısıtma deliklerinin görevi; oluşturulan cam parizonunda dengeli bir sıcaklık dağılımı sağlayarak camın boyun kısmından alınıp, parizonun diğer kısımlarına iletilmesine yardımcı olmaktır. Aynı zamanda dengeli bir cidar kalınlığı elde edilmesine ve daha hafif bir ürünün üretilmesine de doğrudan etki etmektedir.

Bu zamana kadar ebişör kalıplarına açılan ısıtma deliklerinin yerleşimi, herhangi bir deneysel veriye dayanmadan belirlenmektedir. Bu çalışma sayesinde, spesifik bir ürün için oluşturulan ebişör kalıbındaki ısıtma deliklerinin optimum şekilde nasıl konumlandırılacağına kararı verilebilecektir. Böylelikle; bu optimizasyon ısıtma deliklerinin daha verimli kullanılmasını sağlayarak gerektiğinden daha fazla sayıda, daha büyük çapta ve yanlış konumda delik delinmesinin önüne geçilmiş olunacaktır. Bu da kalıp maliyetinin azalmasına ve oluşacak cam ambalaj ürünü problemlerinin ortadan kalkmasına yardımcı olacaktır.

Ebişör kalıplarındaki ısıtma deliklerinin kalıp üzerinde optimum şekilde nasıl konumlanması gerektiğini saptamak için öncelikle kalıp modeli hazırlanır. ANSYS programında, kalıbın bulunduğu ortamdaki etkenler göz önüne alınarak gerekli termal analizler gerçekleştirilir. Termal analizler neticesinde elde edilen kalıp minimum sıcaklık değerlerine bakılarak, ısıtma deliklerinin hangi dizayn değişkenlerine sahipken optimum çözümü sağladığı bulunur. Bulunan değerlerin doğruluğu, dizayn değişkenlerinin sonuca etkileri ve bu sonuçların hata paylarının ne olduğu deneysel tasarım metodu kullanılarak görülür.

Bundan sonraki bölümlerde; konumuza temel oluşturan cam ambalaj üretiminden, ısı transferi teorilerinden ve sonlu elemanlardaki ısı transferi denklemlerinden, dizayn optimizasyonundan, deneysel tasarımdan ve bu teorilerin ışığında gerçekleştirilen analizlerden bahsedilecektir.

2. ISI TRANSFERİ

2.1. Giriş

Enerjinin değişik formları ve bir formdan diğerine geçişi, özellikle enerjinin geçiş formları olarak tanımlanan **iş** ve **ısı** ile ilgilenen bilim dalı termodinamiktir. Isı ve iş enerjinin geçiş formu olarak tanımlanmaktadır. Çünkü bunlar sadece iki sistem yada bir sistem ve çevresi arasında enerji alışverişi olması, yani bir sistemdeki enerji formu diğer sistem yada çevrede bir enerji formuna dönüşmesi, durumunda mevcuttur. Böyle bir enerji transferi kütle transferi ve sıcaklık farkı olmadan sistem sınırlarının değişmesi şeklinde gerçekleşiyorsa, enerji transferinin **iş** formunda gerçekleştiği söylenir. Diğer yandan, alışveriş sıcaklık farkı nedeniyle ise, enerjinin **ısı** olarak transfer edildiği söylenir. Diğer bir deyişle, **sıcaklık farkı nedeniyle gerçekleşen enerji nakline ısı (geçiş) transferi denilmektedir**. Bir sıcaklık farkının bulunmasının enerjinin ısı formunun tanımlanmasında ayırt edici bir özellik olduğuna dikkat edilmelidir.

Termodinamik daima denge durumu ile alakadar olur. Bir denge durumundan başka bir denge durumuna ulaşmak için gerekli olan enerji transferi miktarı termodinamik kanunları ile bulunabilir. Ancak, termodinamik herhangi bir hal değişimi esnasında, enerjinin nasıl transfer edildiği yada bu esnadaki enerji transferinin zamana oranı hakkında bilgi vermez. Bu bilgilerin elde edilmesi **Isı Transferi Bilim Dalının** amacını oluşturur.

Giderek daha kompleks bir duruma gelen modern teknolojiye ısı transferini de içeren problemlerin nitelik ve nicelik olarak analizinin gerekliliği ısı transferi biliminin doğru kavranmasının önemini arttırmaktadır. Hemen hemen bütün bilim mühendislik dallarındaki enerji alışverişinde ısı transferinin de bulunduğu işlemler bulunmaktadır.

Modern güç üretiminde, yanabilen yakıtlar yada nükleer reaksiyonlardan iş elde edilmektedir. Bu enerji kullanılabilir işe buhar üreticileri, türbinler, yoğuşturucular, hava ısıtıcıları, su ön ısıtıcıları, pompalar v.b. gibi elemanlar vasıtasıyla çevrilmektedir. Bütün bu elemanlar ve bunların ekipmanlarında ısı transferi söz konusudur. Bir içten yanmalı motoru, gaz türbinini, jet motorunu dizayn edebilmek yanma ve soğuma işlemlerindeki ısı transferi mekanizmasının tam olarak anlaşılmasını gerektirmektedir.

Hızla gelişen elektronik ve bilgisayar teknolojisinde, elektronik elemanların hassas biçimde çalışabilecekleri sıcaklık aralıkları bellidir. Dolayısıyla bu sıcaklık aralıklarını sağlamak için gerekli ısı transferi mekanizmalarına gereksinim duyulmaktadır. Elektronik malzemelerin soğutulması günümüzde mühendislerin en önemli problemlerinden biridir. Son yıllarda bu konuda giderek artan çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Bütün işlemler doğal olarak tersinmezdir, dolayısıyla mekanik enerjinin çeşitli formlarından tersinmezlikler dolayısıyla ısı enerji yayılımı dolayısıyla ısı transferi işlemi ortaya çıkar. Artık ısıнын kaçınılmaz olarak çevreye (su ve havaya) bırakılması nedeniyle oluşan “ısı kirlenme“ problemi termodinamiğin ikinci kanununun ifade ettiği bir sonuçtur. Isıl kirlenmeye karşı alınacak önlemler konusu günümüzde ısı transferi bilgisinin belkide en önemli uygulama sahalarından birisi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Her çeşit ısıtma, soğutma, iklimlendirme ve havalandırma uygulamalarında ısı transferi bilgisi temel oluşturmaktadır. Konfor soğutması ısıtmasında ısı transferinin önemi açıktır. İnsanların faydalanacağı her çeşit bina yapısı ve hatta taşıt dizaynlarını ısı transferi etkilemektedir. [Kılıç ve Yiğit, 2000]

2.2. Temel Kavramlar Ve Isı Transferi Metodları

Bir ortamda yada ortamlar arasında bir sıcaklık farkı mevcutsa burada ısı geçişi (transferi) olacaktır. Isı geçişi olayı gerçekleştiği fiziksel durumuna göre farklı mekanizma yada modlarda incelenir. Bir katı yada durgun akışkan ortamında bir sıcaklık gradyanı (farkı) mevcut ise bu ortamdaki ısı geçişini tanımlamak için **iletim** (kondüksiyon) terimi kullanılır. Bir yüzey ve hareketli bir akışkan arasında sıcaklık gradyanı söz konusu ise bu iki ortam arasındaki ısı geçişi modunu tanımlamak için **taşıyım** (konveksiyon) terimi kullanılır. Sonlu sıcaklıktaki bütün yüzeyler elektromanyetik dalga formunda enerji yayarlar. Bu nedenle farklı sıcaklıklarda bulunan ve birbirini aralarında engelleyici bir ortam olmadan gören iki yüzey arasında **ışınım** (radyasyonla) ısı transferi vardır.

Isı transferi modlarının temellerini oluşturan ve birim zamanda transfer edilen enerji miktarını belirlemekte kullanılan eşitliklerinin elde edilmesini sağlayan fiziksel mekanizmaların anlaşılması mühendisler ve bilim adamları için oldukça önemlidir. [Kılıç ve Yiğit, 2000]

2.2.1. Isı İletimi

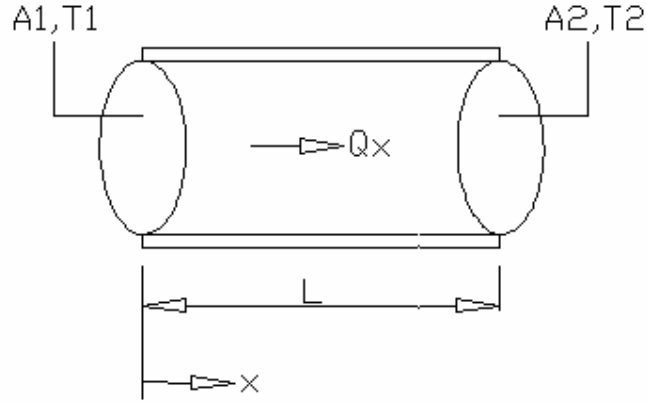
Isı transferinin bu modu atomik yada moleküler seviyedeki aktiviteler ile ilişkilidir. İletim (conduction) bir maddenin partikülleri arasındaki ilişki esnasında daha fazla enerjiye sahip partiküllerden daha az enerjiye sahip partiküllere enerji transferi olarak görülebilir.

Fiziksel mekanizmayı açıklamak için içinde sıcaklık gradyanı olan hareketsiz bir gaz kütlesini ele alalım. Gaz farklı sıcaklıkta bulunan iki yüzey arasındaki hacmi dolduracaktır. Bu hacim içinde seçilen belli bir noktadaki sıcaklık bu noktadaki gaz moleküllerinin enerjisi ile ilişkilidir. Bu enerji moleküllerin rastgele yer değiştirmesi, dönmesi ve titreşim hareketleri ile

bağlantılıdır. Yüksek sıcaklıklar yüksek moleküler enerjiyle ilişkilidir ve sürekli olarak komşu moleküllerin birbirleriyle çarpışması enerjisi fazla olan moleküllerden daha düşük enerjili moleküllere enerji transferine sebep olmaktadır. Sıcaklık gradyanının olması ile iletimle olan ısı transferi azalan sıcaklık yönünde gerçekleşir. Moleküllerin rastgele hareketleri dolayısıyla gerçekleşen net enerji transferi enerjinin difüzyonu (yayılımı) olarak adlandırılabilir.

Sıvılarda da fiziksel mekanizma aynıdır, fakat moleküller birbirlerine daha yakın olarak bulundukları için moleküller arası ilişkiler daha kuvvetli ve daha yüksek frekanslarda gerçekleşir. Benzer olarak katılarda iletim kafes yapılarında ortaya çıkan atomik titreşimler ile ilişkilendirilebilir. İletken olmayan katılarda enerji transferi atomik kafes yapısında ortaya çıkan titreşimler ile olur. İletken katılarda ise buna ilave olarak serbest elektronların hareketleri de enerji transferinde etkindirler.

Isı iletiminin temel denklemi **Fourier Isı İletimi Kanunu** ile ifade edilir. Fourier ısı iletimi kanunu yapılan gözlemler ve deneyler sonucu elde edilmiştir. Bu kanunu açıklamak için yan yüzeyi yalıtılmış (ısı kaybı olmayan) bir metal çubuğu ele alalım. Silindir şeklindeki metal çubuğun uç yüzeyleri $T_1 > T_2$ olacak şekilde sabit sıcaklıkta tutulduğunu kabul edelim. Bu durumda iki uç yüzey arasındaki sıcaklık farkı pozitif x yönünde ısı transferine neden olacaktır. Birim zamanda transfer edilen ısı (ısı transfer oranı) Q_x ölçülebilir ve Q_x 'in, yüzeyler arası sıcaklık farkı $\Delta T (= T_1 - T_2)$, kesit alanı $A (= A_1 = A_2)$ ve çubuğun boyu $L (= x_2 - x_1)$ ile değişimi incelenebilir.



Şekil 2.1. Yan Yüzeyi Yalıtılmış Silindirden Isı İletimi

İlk olarak ΔT ve L 'yi sabit tutalım ve kesit alanı A 'yı değiştirelim. Bu durumda Q_x 'in A ile doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenecektir. Benzer olarak ΔT ve A 'yı sabit tutarsak ve L 'yi değiştirirsek Q_x 'in L ile ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenecektir. Son olarak A ve L sabit tutulup ΔT değiştirilirse, Q_x 'in ΔT ile doğru orantılı olarak değiştiğini gözlemleyebiliriz. O halde toplu olarak bunları aşağıdaki şekliyle ifade edebiliriz:

$$Q_x \propto A \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

Çubuğun malzemesi (örneğin metal yerine plastik) değiştirirsek yukarıdaki orantının geçerli kaldığı gözlenecektir. Ancak aynı A , L ve ΔT için plastik çubukta Q_x daha küçük olacaktır. Bu sonuç orantının bir eşitlik şekline dönüştürülebileceğini gösterir. Malzemenin ısı iletimindeki davranışının bir ölçüsü olarak orantı katsayısı da tanımlanarak (2.1) eşitliği:

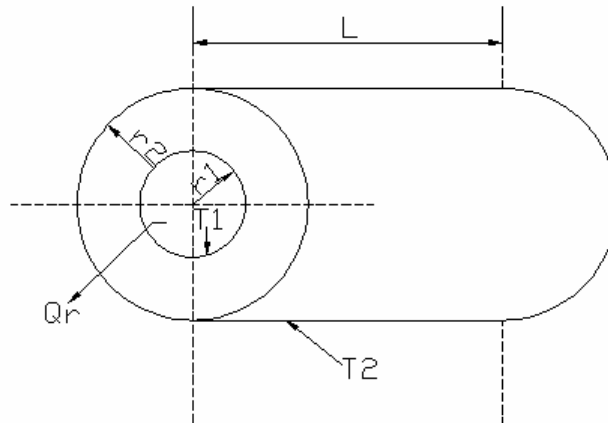
$$Q_x = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [W] \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada k , ısı iletim katsayısı (W/mK), malzemenin önemli bir özelliğidir. [Kılıç ve Yiğit, 2000]

2.2.1.1. Silindirik Geometriye Sahip Sistemler

Silindirik geometriye sahip sistemlerle pratikte oldukça sık karşılaşılır. Bu geometriye en güzel örnek borular ve dairesel kesitli kanallardır. Kesit alanı boya göre çok küçük ve geometrik olarak Q -yönünde simetri söz konusu olduğundan bu sistemlerde ısı transferinin sadece radyal yönde gerçekleştiği kabul edilir. Dolayısıyla problem silindirik koordinat sisteminde bir boyutlu ısı transferi problemi olarak ele alınır. Şekil 2.2 iç yarıçapı r_1 ve dış yarıçapı r_2 olan içi boş bir silindiri göstermektedir. Silindirin iç ve dış yüzey sıcaklıklarını sırasıyla T_1 ve T_2 olarak kabul edelim. Silindir duvarlarından olan birim zamandaki ısı transferini hesaplamak için sabit ısı iletim katsayısı kabulüyle;

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$



Şekil 2.2. İçi Boş Bir Silindir Duvarından Isı İletimi

Sistemimizde sürekli rejimde, ısı üretimi yok ve sıcaklık sadece r ile değişmektedir. O halde (2.3) eşitliği:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{yada} \quad \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.4)$$

şeklini alır. bu eşitliğin integralini alırsak:

$$r \frac{dT}{dr} = C_1 \quad (2.5a)$$

bulunur. Bu ifadenin de integrali alınırsa:

$$T = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (2.5b)$$

elde edilir. Sınır şartlarımız ise:

$$r = r_1 \quad \text{de} \quad T = T_1 \quad (2.6a)$$

$$r = r_2 \quad \text{de} \quad T = T_2 \quad (2.6b)$$

şeklindedir. Sınır şartlarını kullanarak C_1 ve C_2 integral sabitleri bulunabilir:

$$T_1 = C_1 \ln(r_1) + C_2 \quad \text{yada} \quad C_2 = T_1 - C_1 \ln(r_1) \quad (2.7a)$$

$$T_2 = C_1 \ln(r_2) + C_2 \quad \text{yada} \quad C_2 = T_2 - C_1 \ln(r_2) \quad (2.7b)$$

C_2 için bulunan iki ifadeyi eşitleyerek:

$$T_1 - C_1 \ln(r_1) = T_2 - C_1 \ln(r_2) \quad \text{ve} \quad T_1 - T_2 = C_1 [\ln(r_1) - \ln(r_2)]$$

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1 / r_2)} \quad (2.8a)$$

bulunur. Bu ifadeyi (2.7a) eşitliğinde yerine yazarsak:

$$C_2 = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_1 / r_2)} \ln(r_1) \quad (2.8b)$$

bulunur. (2.8a ve b) eşitliklerini (2.5) eşitliğinde yerine yazarsak sıcaklık dağılımı aşağıdaki formda elde edilir:

$$\frac{T - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{\ln(r_1 / r)}{\ln(r_1 / r_2)} = \frac{\ln(r / r_1)}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (2.9)$$

Isı akışı, Fourier ısı iletim kanununun r-boyutu için olan ifadesi:

$$Q_r = -kA_r \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.10)$$

buradan dT / dr yerine yazılırsa:

$$Q_r = -k(2\pi rL) \left[\frac{1}{r} \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2 - r_1)} \right] \quad (2.11)$$

2.2.2. Isı Taşınımı

Akışkan hareketiyle ilgili olan ısı transferinin bu modu esas olarak hem akışkan içinde moleküllerin etkileşmesiyle gerçekleşen iletimle ısı transferi ve hem de akışkanın hareketi dolayısıyla enerjinin taşınması mekanizmalarının her ikisini de içerir. Eğer akışkanın hareketi yardımcı bir araç vasıtasıyla (fan

yada pompa gibi) sağlanıyorsa, yada incelenen hacme belli bir hızla giriyorsa **zorlanmış taşınım** söz konusudur. Diğer taraftan, incelenen hacimde akışkan hareketi yoğunluk farklılığı dolayısıyla oluşuyorsa **doğal taşınım** ifadesi daha uygundur. Örneğin güneşli bir günde otomobilin metal kısımları belli bir zaman diliminde güneş ışınlarına maruz kaldığında güneş ışınımı dolayısıyla ısı transferine maruz kalacaktır. Otomobilin metal aksamının her yönde ışıma ile ısı kaybetmesinin yanında, çevre havasına da doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşecektir. Otomobil hareket ettiğinde ise çevre havasına zorlanmış taşınım ile ısı transferi gerçekleşecektir. Zorlanmış taşınım genelde doğal taşınımdan çok daha fazla ısı transferine neden olduğu bilinmektedir.

Akışkan hareketi taşınım ile ısı transferinin ayırt edici bir özelliği olduğuna göre ısı transferinin bu modunu tanımlayabilmek için akışkanlar mekaniğinin prensiplerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Herhangi bir akışkan bir katı yüzey üzerinden akarken yüzey ile temas eden molekülleri sürtünme yada viskoz etkiler nedeniyle yüzeye yapışırlar. Yüzeye yapışan (yüzeyi ıslatan) bu moleküllerin yüzey üzerinde kaymadığı kabul edilirse burada akışkanın hızı sıfır olacaktır. Dolayısıyla katı bir yüzey üzerinden akan akışkanın hızı yüzeyde sıfır iken yüzeyden uzaklaştıkça artacak ve yüzeyden etkilenmeyen yeterince uzaktaki akışkan moleküllerinin serbest akış bölgesindeki hızına kadar çıkacaktır. Yüzey üzerinde akışkan hızının değiştiği bu bölge taşınım ile ısı transferinde önemli rol oynamaktadır. Akışkan hızının değiştiği bu bölge hidrodinamik sınır tabaka olarak isimlendirilir.

Hidrodinamik sınır tabaka içinde viskoz akış laminar veya türbülanslı olabilir. Laminar akış durumunda akışın birbirleri üzerinde kayan yüzeye paralel katmanlar halinde olduğu ve katmanlar arasında akışkan alışverişinin olmadığı düşünülebilir.

Türbülanslı akışta ise ortalama akış hareketi yüzeye paralel olmasına rağmen sınır tabaka içindeki akışkan hareketinde hem yüzeye paralel hem de normal doğrultuda dalgalanmalar ve bir karışıklık söz konusudur ve bu

akışkanın karışmasına neden olur. Türbülanslı akışta laminar akışa göre daha fazla ısı transferi gerçekleşir

Katı yüzey sıcaklığının serbest akış bölgesindeki akışkanın sıcaklığından büyük olduğunu kabul edelim. Bu durumda yüzeydeki akışkan moleküllerinin sıcaklığı yüzey sıcaklığına eşit olacaktır. Yüzeyden normal doğrultuda uzaklaştıkça akışkanın sıcaklığı azalacak ve yeterince yüseyden uzak bir mesafede akışkanın sıcaklığı serbest bölgedeki akışkan sıcaklığına eşit olacaktır. Yüzey üzerindeki sıcaklığın değiştiği bu bölge hidrodinamik sınır tabaka benzeri (fakat aynısı değil) bir tabaka oluşturacaktır. Bu tabaka ısı sınır tabaka olarak isimlendirilir. [Kılıç ve Yiğit, 2000]

Birim zamandaki taşınım ile ısı transferini hesaplayabilmek için akışkanlar mekaniği, ısı iletimi ve sınır tabaka teorilerini bilmek gerekmektedir. Ancak bu kompleks durum tek bir parametrenin üzerine indirgenip işlemler yapılabilir. Taşınım ile transfer edilen ısı ile sıcaklık farkı ile orantılı olduğu bulunmuştur. Bu durumda;

$$Q_t \propto T_y - T_\infty \quad [W / m^2] \quad (2.12)$$

Yazılabilir. Bir orantı sabiti tanımlayarak 2.3 eşitliği

$$q_{taş} = \frac{Q_t}{A} = h_t (T_y - T_\infty) \quad [W / m^2] \quad (2.13)$$

Şeklinde yeniden düzenlenebilir. (2.13) Eşitliği Newton'un Soğuma Kanunu olarak bilinmektedir. Burada h_t $[W / m^2 K]$ ortalama ısı taşınım katsayısı olarak tanımlanır. Isı taşınım katsayısı, akış türü (laminar yada türbülanslı), akışkan hızı, akışkan özellikleri (viskozite, yoğunluk, ısı iletim katsayısı vb), sıcaklık, geometri gibi birçok etkene bağlı olarak değişir. Isı taşınım

katsayısının tayini için yapılan analitik ve deneysel çalışmalar sonucu akış karakteristiklerine ve geometriye bağlı olarak ampirik bağıntılar geliştirilmiştir.

2.2.2.1. Laminer ve Türbülanslı Akış

Taşıyıcıyla ısı transferi probleminin çözümünde akışın laminar veya türbülanslı olması çok önemlidir. Sürtünme kuvveti, basınç düşümü ve ısı transferi akışın laminar veya türbülanslı karakterine bağlıdır. Bir levha üzerinden akış durumunda akışkan u_{∞} serbest akış hızı ile levha üzerinden akmaktadır. Akışkan levha ile temas ettiğinde cidar şartı ve sürtünmelere bağlı olarak hız sınır tabaka gelişmeye başlayacaktır. Levha girişinden itibaren akış incelendiğinde, başlangıçta akışkan iplikçikleri birbirine paralel olacak ve akış düzenli bir karakterde olacaktır. Bu sınır tabaka akışına laminar sınır tabaka akışı denir. Levha girişinden itibaren belli bir uzaklıktan sonra akışın bu karakteri yavaş yavaş bozulacak ve bir geçiş bölgesini müteakip, akışın düzeni tamamen bozulacak ve akış içinde vorteks ve dönmeler meydana gelecektir. Bu sınır tabaka akışına ise türbülanslı sınır tabaka akışı denir. Türbülanslı akış bölgesinde, büyük akışkan tabakaları arasında yer değiştirmeler sebebiyle ısı ve momentum transferi artar. Yani diğer bir ifadeyle, türbülanslı akışta ısı ve momentum transferi daha büyüktür.

Akışın karakterini belirlemek için kullanılan boyutsuz Reynolds sayısı Re şu şekilde tarif edilir:

$$Re_x = \frac{u_{\infty} x}{\nu} \quad (2.14)$$

burada x alt indisi yerel reynolds sayısını göstermektedir. Levha üzerinde akışın laminar karakterden türbülanslı karaktere dönüştüğü nokta ise kritik Reynolds sayısı ile bilinir. Kritik Reynolds sayısı,

$$Re_k = \frac{u_\infty x_k}{\nu} = 5.10^5 \quad (2.15)$$

değerindedir.

2.2.2.2. Gerekli Boyutsuz Sayılar ve Fiziksel Anlamları

Reynolds Sayısı (Re) : Akışta, atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını gösteren ve akışkanlar mekaniğinde de son derece önemli olan bu boyutsuz sayı bir akışta akışın laminar veya türbülanslı olduğunu belirler.

Prandtl Sayısı (Pr) : Moleküler momentum yayılımının moleküler ısı yayılımına oranıdır.

Nusselt Sayısı (Nu) : L karakteristik akışkan kalınlığı içinde taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranıdır.

2.2.2.3. Dış Yüzeylerden Zorlanmış Akışta Isı Taşınımı

Düz Bir Levha Üzerinden Akış

Isıl sınır tabaka içindeki sıcaklık dağılımına bağlı olarak ısı taşınım katsayısı tanımı yapılırsa, tam cidar üzerinde akışkan durgun olduğundan ısı transferi şu şekilde yazılır:

$$q(x) = k \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.16)$$

Burada k akışkanın ısı iletim katsayısıdır. Cidarın biraz üstünde akışkan hareketli olduğundan Newton'un Soğuma Kanunu yazılırsa,

$$q(x) = h(x)(T_{\infty} - T_y) \quad (2.17)$$

olur. Sürekli rejim halinde taşınım ile olan ısı transferi iletimle olan ısı transferine eşit olur. Yani (2.16) eşitliği (2.17) eşitliğine eşitlenip ısı taşınım katsayısı çekilirse,

$$h(x) = k \frac{(\partial T / \partial y)|_{y=0}}{T_{\infty} - T_y} \quad (2.18)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten görüldüğü gibi ısı taşınım katsayısının bulunabilmesi için sıcaklık dağılımının bilinmesi gerekir. Sıcaklık dağılımını da bulabilmek için, sınır tabaka içinde enerji denkleminin yazılıp sınır şartları ile çözülmesi gerekir. Boyutsuz formda enerji denklemi yazılırsa,

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (2.19)$$

olur. Burada,

$$\theta = \frac{T - T_y}{T_{\infty} - T_y} \quad (2.20)$$

olarak tarif edilmiştir. Sınır tabaka içinde sınır şartları,

$$y = 0 \quad \text{da} \quad \theta = 0 \quad (2.21a)$$

$$y = \delta_t(x) \quad \text{de} \quad \theta = 1 \quad (2.21b)$$

şeklindedir.

Laminer Sınır Tabaka:

Laminer sınır tabaka içinde, yaklaşık çözüm metadıyla, kübik bir sıcaklık profili tahmin edilip, sınır şartları ile sıcaklık dağılımı elde edilir.

Uzunluğu L olan düz bir levha için ortalama ısı taşınım katsayısı şu şekilde tarif edilir:

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h(x) dx \quad (2.22)$$

Ortalama Nusselt sayısı için ise bu tanıma bağlı olarak şu ifade bulunur:

$$Nu_m = h_m L / k = 0,664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (2.23)$$

Tek Bir Silindire Dik Akış

Tek bir silindire dik akıştaki ısı taşınımı problemi, eğrisel yüzeylerden akış probleminin özel bir halidir. Borular dışından akışı mühendislikte çok karşılaşılan bir problemdir. Özellikler ısı eşanjörlerinde boru demetine dik akış olarak uygulaması bulunur. Serbest akış hızı u_∞ ile silindire dika akan akışkanın silindir etrafındaki akışında, silindir ön yüzünde laminer bir sınır tabaka meydana gelmekte, Q açısına bağlı olarak belli bir açıdan sonra akış yüzeyden kopmakta ve bu noktadan itibaren vorteksler oluşmaktadır. Böylece akış türbülanslı sınır tabaka akışı haline dönüşmektedir. Özellikle, silindirin arka yüzeylerinde türbülans yoğunluğu artmaktadır. Akışın yüzeyden kopma noktası ise, akışkana ve hızına dolayısıyla Re sayısına bağlıdır. Silindire dik akışta Re sayısı şu şekilde tarif edilir:

$$Re_D = \frac{\rho u_\infty D}{\mu} = \frac{u_\infty D}{\nu} \quad (2.24)$$

Silindire dik akışta sınır tabakanın laminar veya türbülanslı olduğunu belirleyen Re sayısıdır. $Re \leq 5.10^5$ olduğunda laminar sınır tabaka akışı meydana gelmektedir.

Bir silindire dik akış için ısı taşınım katsayısını veren birçok ampirik ifade verilmiştir. Ortalam ısı taşınım katsayısı için Churchill ve Bernstein tarafından verilen ifade:

$$Nu_m = \frac{h_m D}{k} = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (2.25)$$

2.3. Isı Transferi İçin Sonlu Elemanlar Denklemleri

Bir izotropik madde ısı transferine bağlı bir sıcaklık ile düşünüldüğünde; ısı transferinin temel denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.26)$$

Burada q_x , q_y ve q_z birim alandaki ısı akışının bileşenleridir. Q birim hacimde üretilen iç ısı oranı, ρ malzeme yoğunluğu, c ısı kapasitesi (öz ısı), T sıcaklık ve t de zamandır. Fourier kanununa göre ısı akışının bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.27)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

k ısı iletim katsayısı olmak üzere, Fourier kanunundaki yer değiştirmeler aşağıdaki temel ısı transferi denklemini vermektedir:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.28)$$

Sınır şartlarının aşağıdaki şekilde olduğu farzedilmiştir:

1. Belirlenen sıcaklık;

$$S_1 \text{ yüzeyine etkiyen } T_s = T(x, y, z, t)$$

2. Belirlenen ısı akışı;

$$S_2 \text{ yüzeyine etkiyen } q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = -q_s$$

3. Taşınım sınır şartları;

$$S_3 \text{ yüzeyine etkiyen } q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = h(T_s - T_e)$$

h taşınım katsayısı, T_s bilinmeyen yüzey sıcaklığı ve T_e bilinen çevresel sıcaklıktır.

4. Işınım;

$$S_4 \text{ yüzeyine etkiyen } q_x n_x + q_y n_y + q_z n_z = \sigma \varepsilon T_s^4 - \alpha q_r$$

σ Stefan – Boltzmann sabiti, ε yüzey yayma katsayısı, α yüzey soğurma katsayısı ve q_r birim yüzey alanı başına gelen ısı akış oranıdır.

2.3.1. Isı Transferi Denklemlerinin Sonlu Elemanlara Uygulanması

Malzeme, birbirine noktalarla bağlı olan sonlu elemanlara ayrılır. Şekil fonksiyonları N_i , sonlu eleman içindeki sıcaklığın enterpolasyonu için kullanılmaktadır:

$$T = [N]\{T\}$$

$$[N] = [N_1 \quad N_2 \quad \dots] \quad (2.29)$$

$$\{T\} = \{T_1 \quad T_2 \quad \dots\}$$

Sıcaklık denkleminin enterpolasyonundan meydana gelen ayırım, sıcaklık farkı için aşağıdaki enterpolasyon ilişkisini vermektedir:

$$\begin{Bmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial N_1 / \partial x & \partial N_2 / \partial x & \dots \\ \partial N_1 / \partial y & \partial N_2 / \partial y & \dots \\ \partial N_1 / \partial z & \partial N_2 / \partial z & \dots \end{bmatrix} \{T\} = [B]\{T\} \quad (2.30)$$

Burada T noktalardaki sıcaklık vektörü, N şekil fonksiyonu matrisi ve B sıcaklık farkı enterpolasyon matrisidir.

Galerkin metodu kullanılarak temel ısı transfer denklemi aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir:

$$\int_V \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - Q + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i dV = 0 \quad (2.31)$$

İlk 3 terime sapma teoremi uygulandığında aşağıdaki ilişkiye varılmış olur:

$$\begin{aligned} & \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i dV - \int_V \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \{q\} dV \\ & = \int_V Q N_i dV - \int_S \{q\}^T \{n\} N_i dS \end{aligned}$$

$$\{q\}^T = [q_x \quad q_y \quad q_z] \quad (2.32)$$

$$\{n\}^T = [n_x \quad n_y \quad n_z]$$

n malzeme yüzeyine olan dış normal vektörüdür. Sınır şartlarının aşağıdaki denklemlere uygulanmasından sonra elde edilenler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} & \int_V \rho c \frac{\partial T}{\partial t} N_i dV - \int_V \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} \quad \frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \{q\} dV \\ & = \int_V Q N_i dV - \int_{S_1} \{q\}^T \{n\} N_i dS \\ & + \int_{S_2} q_s N_i dS - \int_{S_3} h(T - T_e) N_i dS - \int_{S_4} (\sigma \epsilon T^4 - \alpha q_r) N_i dS \end{aligned} \quad (2.33)$$

Isı transferi problemlerinde kullanılan türetilmiş sonlu elemanlar denklemlerinin son formu da aşağıdaki gibidir: [Nikishkov, 2004]

$$\begin{aligned}
& [C]\{\dot{T}\} + ([K_c] + [K_h] + [K_r])\{T\} \\
& = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\}
\end{aligned} \tag{2.34}$$

$$[C] = \int_V \rho c [N]^T [N] dV$$

$$[K_c] = \int_V k [B]^T [B] dV$$

$$[K_h] = \int_{S_3} h [N]^T [N] dS$$

$$[K_r]\{T\} = \int_{S_4} \sigma \varepsilon T^4 [N] dS$$

$$[R_T] = - \int_{S_1} \{q\}^T \{n\} [N]^T dS \tag{2.35}$$

$$[R_Q] = \int_V Q [N]^T dV$$

$$[R_q] = - \int_{S_2} q_s [N]^T dS$$

$$[R_h] = - \int_{S_3} h T_e [N]^T dS$$

$$[R_r] = - \int_{S_4} \alpha q_r [N]^T dS$$

3.CAM AMBALAJ ÜRETİMİ

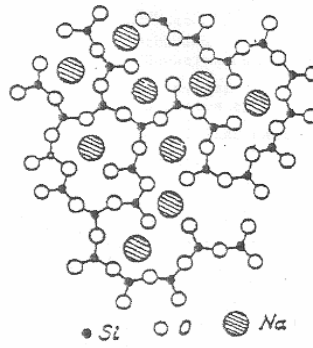
3.1. Camın Genel Tanımı

3.1.1. Camın Yapısı

Cam, soğutma sonucu kristalleşmeden katılaşan inorganik bir ergitme ürünüdür. Isıtılınca akışkanlık kazanan, soğuyunca sertleşerek saydam ve mat görünüm verebilen kırılğan bir malzemedir. Camın mekanik dayanımı oldukça yüksek olmasına rağmen, yapısal özelliği nedeni ile camın işlenmesi sırasında yüzeyde oluşan ve gözle görülmeyen çatlaklar bu özelliğini bozar.

Cam, kısaca oksitler karışımı olan bir maden olmakla birlikte ergime noktası yerine yumuşama noktasına sahiptir. Isıtılınca önce yumuşar, giderek akıcılığı artarak sıvı hale geçer.

Camın en önemli özelliği atomik yapısının düzensiz olmasıdır. Bir oksitin cam oluşturabilmesi için metal ve oksijen bağının düzensiz bir yapıya olanak sağlayacak esneklikte olup, aynı zamanda düzensiz yapıyı koruyacak kadar da sağlam olması gerekmektedir. Bu özelliğe sahip oksitlere cam yapıcı oksitler adı verilir. Cam yapıcı oksitler olarak silisyum oksit, bor oksit, fosfor penta oksit, arsenik penta oksit sayılabilir. Cama farklı özellikler sağlamak üzere düzensiz yapıdaki boşluklara giren oksitlere yardımcı oksitler denir. [Topkapı Şişe San.A.Ş., 1992]



Şekil 3.1. Camın Düzensiz Atomik Yapısı

3.1.2. Cam Yapımında Kullanılan Hammaddeler

Cam yapımında üretime uygun özelliklerde kullanılan başlıca hammaddeler; kum, kalker, dolomit, soda, feldspat ve sodyum sülfattır. Ayrıca cama renk vermek veya renksizleştirmek amacıyla pirit, kömür, seryum oksit, çinko selenit, kobalt oksit gibi maddeler kullanılır.

3.2. Cam Üretimi

3.2.1. Harman Hazırlanması

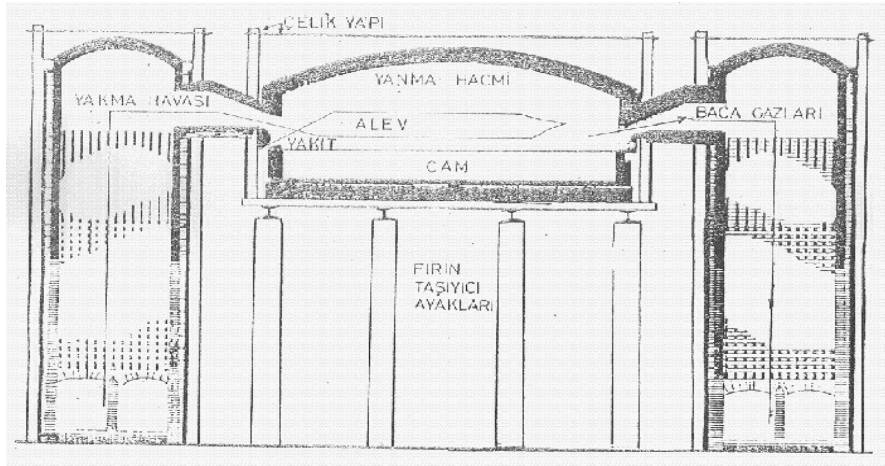
Cam üretiminde en önemli basamaklardan biri harmanın hazırlanmasıdır. İstenen cam kompozisyonunun elde edilebilmesi için, kullanılacak hammaddelerin uygun miktarlarda ve yeterli hassasiyetlerde tartılıp homojen bir karışım elde edilmesi, bir değişime neden olmaksızın fırına nakledilmesi gerekir.

3.2.2. Fırında Cam Ergitme Operasyonu

Harman bölümünde hazırlanan harman, değişik tiplerde olan harman verici sistemlerle fırında sabit cam seviyesi olacak şekilde fırına beslenir. Fırın yakma sistemlerinin verdiği ısıl enerji ile harman ergime reaksiyonları başlar. Kimyasal reaksiyonlar sonucu açığa çıkan gazlar cam kütlesi içinde dağılır veya yükselerek cam yüzeyinden fırın atmosferine çıkar. Bu olaya afinasyon adı verilir.

Cam harmanında bulunan hammaddelerden soda 850°C 'de erimeye başlar ve kum taneciklerinin etrafını sararak sodyum silikat ve karbon dioksit verir. 900°C 'de kalker ve dolomit karbon dioksit vererek bozunur. 1400°C 'de sodyum sülfat ergiyerek kükürt dioksit ve oksijen açığa çıkararak afinasyonu hızlandırır.

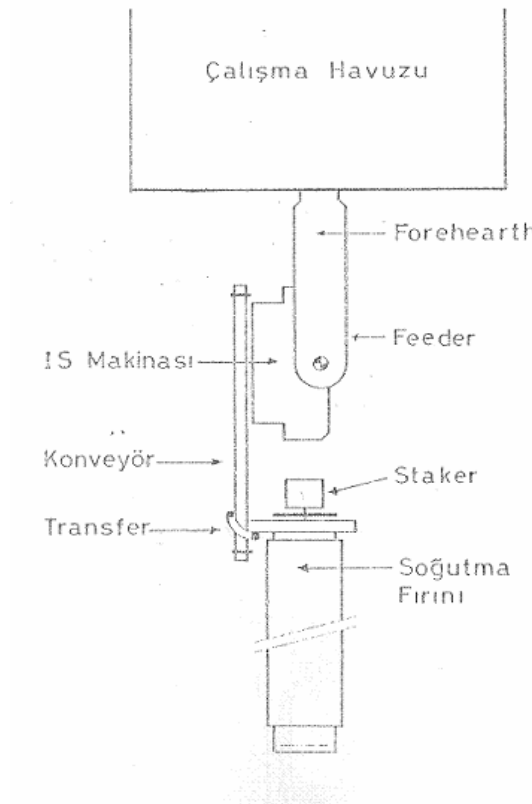
Harmanın ergime reaksiyonları sırasında açığa çıkan karbon dioksit ve kükürt dioksit dışında su buharı, azot gibi gazlar da cam kütlesi içinde kalabilir. Bu gazların cam kütlesini afinasyon süresi içinde terk etmeleri için camdaki ısı transferinin, fırın çekişinin, ergitme ve afinasyon sıcaklıklarının yeterli olması gereklidir.



Şekil 3.2. Tipik Fırın Kesiti

3.2.3. Cam Üretim Hattı

Üretim hattında yapılan işlem, camın viskozite-sıcaklık eğrisine uygun şekilde soğutulurken şekillendirilmesidir. Camın şekillendirilmesi ard arda sıralanmış bir takım sistemlerin birlikte çalışması ile gerçekleşir. Bu sistemlerin hepsine birden üretim hattı adı verilir. Üretim hattı; forehearth, feeder, IS makinesi, nakil sistemleri ve soğutma fırınından oluşur.



Şekil 3.3. Üretim Hattı

3.2.3.1. Forehearth

Çalışma havuzundan alınan ergimiş camı, feeder mekanizmasına uygun sıcaklık ve viskozitede verebilmek için gerekli ısıtma ve soğutmanın yapıldığı (şartlandırıldığı) bölümdür.

3.2.3.2. Feeder

Forehearth'dan aldığı şartlandırılmış camı, aynı ölçü, şekil ve sıcaklıkta erimiş cam damlaları haline getiren mekanizmadır.

3.2.3.3. IS Makinesi

Erimiş cam damlalarının, şekillendirilerek cam ambalaj haline getirildiği yerdir.

3.2.3.4. Nakil Sistemleri

Nakil sistemleri; makine konveyörü, transfer ve staker'dan meydana gelmiştir. IS makinesinden çıkan sıcak ürünü soğutma fırınına taşırlar.

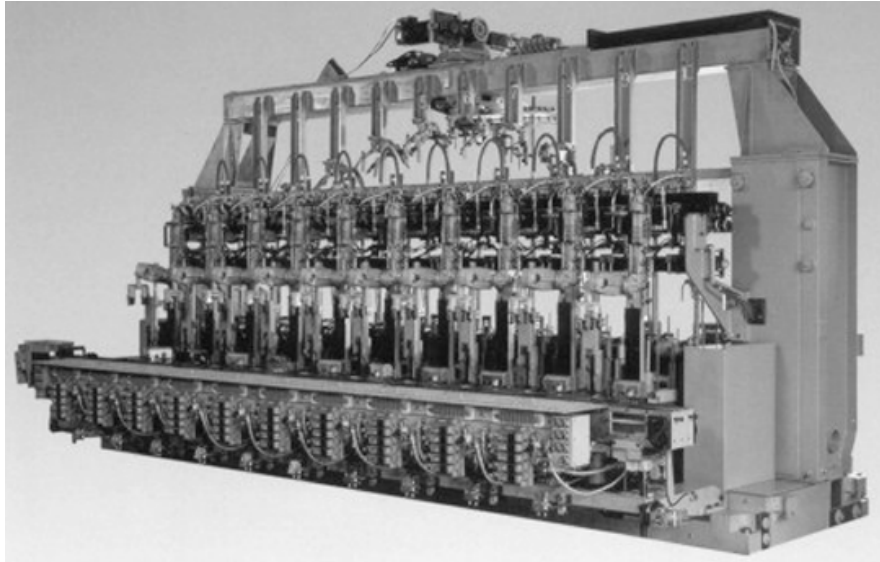
3.2.3.5. Soğutma (Tavlama) Fırını

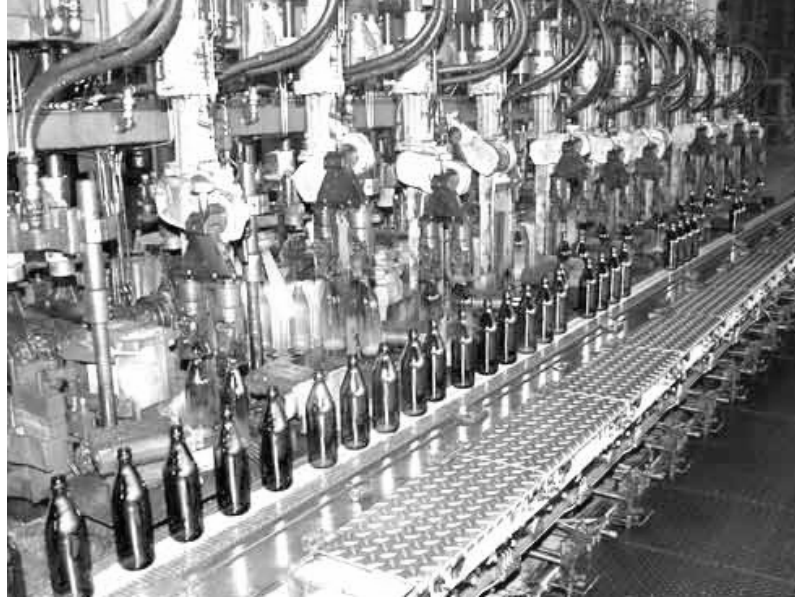
Soğutma fırını, nakil sistemleriyle gelen sıcak ürünün, ortam sıcaklığına kadar soğutulması sırasında, iç gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlara kadar indirildiği kısımdır.

3.2.4. IS Makinesi

Cam ambalaj şekillendirme işlemlerinde üniversal olarak kullanılan IS makineleri, ilk kez 1925 yılında 4 kollu üniteler olarak geliştirilmiştir. Tam otomatik olan bu makinelerde başlangıçta yalnızca üfleme tekniği, daha sonra geliştirilen teçhizatların kullanımı ile presleme-üfleme tekniği kullanılabilir hale gelmiştir.

IS makineleri kol olarak isimlendirilen ve birbirinin aynı olan ünitelerin yan yana gelmesinden oluşan makinelerdir ve kol adetlerine göre (2,4,5,8) isimlendirilirler. Ayrıca bir kol üzerinde her bir makine çevriminde 1,2,3 veya 4 damlayı aynı anda işlemek mümkündür. Bu makinelerde kolların bir kısmında üretim yapılırken, bir kısmı da tamir, kalıp değişimi gibi nedenlerle durabilir veya gramajı aynı olmak kaydı ile farklı kollarda farklı ürünler üretilir.





Şekil 3.4. IS Makinesi

Feeder mekanizmasından belli şekil ve gramajda gelen damlalar IS makinelerinde tamamen otomatik olarak iki aşamada şekillendirilirler. Bunun için her bir kolda yer alan ve hareketleri pnömatik olarak sağlanan mekanizmaların hız ve zaman ayarlarının doğru biçimde yapılması gerekmektedir. Zamanlama ayarı tamburlarla mekanik olarak sağlanabildiği gibi mekanizmaları harekete geçirecek basınçlı havaya elektronik olarak kumanda eden ünitelerde mevcuttur.

Feeder’da oluşturulan damla her bir kol için kepçe, oluk ve saptırıcı denilen üç parçalı bşr damla yolundan geçerek şekillendirme makinesine ulaşır. Bunun için makineyi oluşturan kolların her birine ait kepçeler “ateşleme sırası” denilen belli bir sıralamaya göre feeder’in altına gelerek, damlayı alır ve kendi damla yoluna iletir. Damlanın kollara dağıtımı için geliştirilmiş bir başka sistemde ise tek bir kepçe, feeder’in altında kollara göre konum değiştirerek damlanın istenen kola ait damla yoluna girmesini sağlar.

Makineye iletilen damlanın şekillendirilmesi üretilen ürünün dar ağızlı veya geniş ağızlı olmasına göre üfleme-üfleme veya presleme-üfleme tekniği

kullanılarak sağlanır. Son yıllarda geliştirilen bir diğer yöntem ise, dar ağızlı ürünler için de uygulanabilen presleme-üfleme tekniğidir.

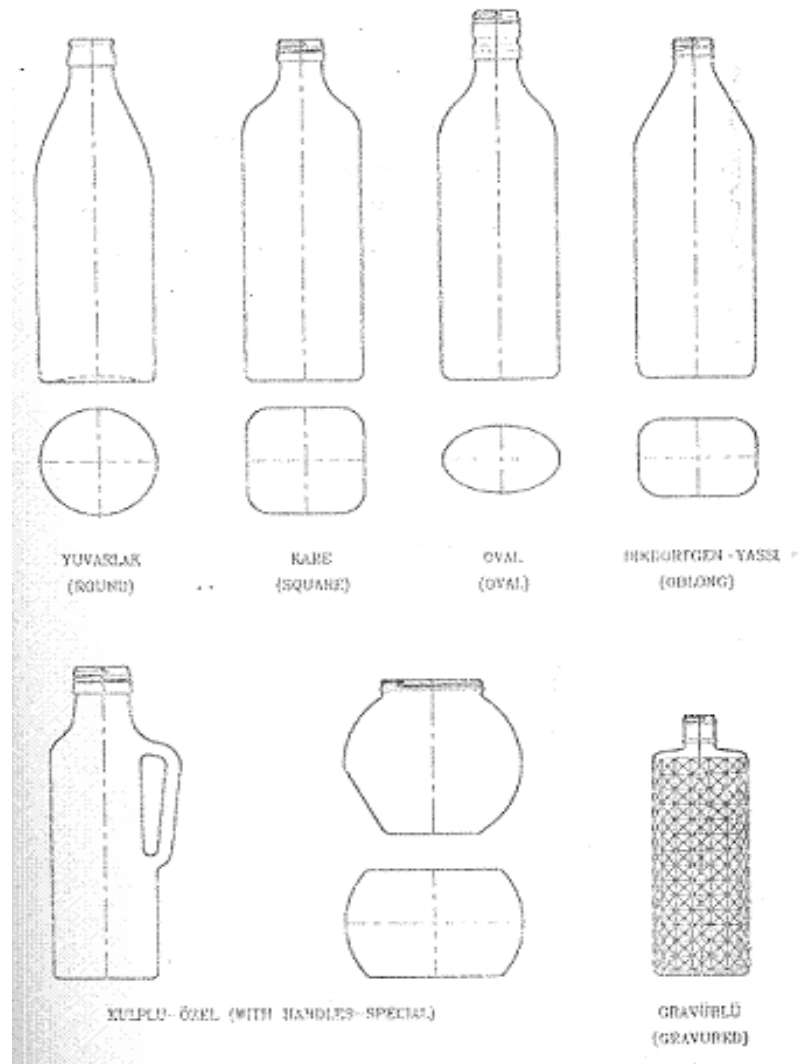
Bir makine çevrimi (damla gelişinden, ürün çıkışına kadar geçen süre) boyunca her bir kol üzerinde pnömatik olarak aktive edilmesi gerekli mekanizmalar şunlardır:

- Kepçe
- Göbek
- Kalıp kolları (açma-kapama)
- Huni, tampon, süflaj başlığı
- İnvert (parizonun 180° çevrilerek, ebişör adı verilen 1. kalıptan finisör adı verilen 2. kalıba verilmesi için)
- Müldebak
- Alıcı maşa

3.2.5. Ürün ve Kalıp Bilgisi

3.2.5.1. Ürünün Tarifi

Cam ambalaj, sıvı ve katı maddelerin korunması amacıyla ve soda – kireç camının ısıl yöntemle oluşturulup şekillendirilmesi sonucu elde edilen bir ara maldır. Bir sınai üründür.



Şekil 3.5. Ürün Biçimleri

Cam ambalaj kısımlarını sırasıyla açıklarsak;

Kafa : Ürünün kapakla temasta olan bölümüdür. Kullanış yerlerine göre çeşitli kafa tipleri mevcuttur. Bütün bu kafaların ortak özelliği üretimin bir gereği olan üzerinde bilezik veya girinti şeklinde bir bölgenin bulunma şartıdır.



Şekil 3.6. Kafa Tipleri

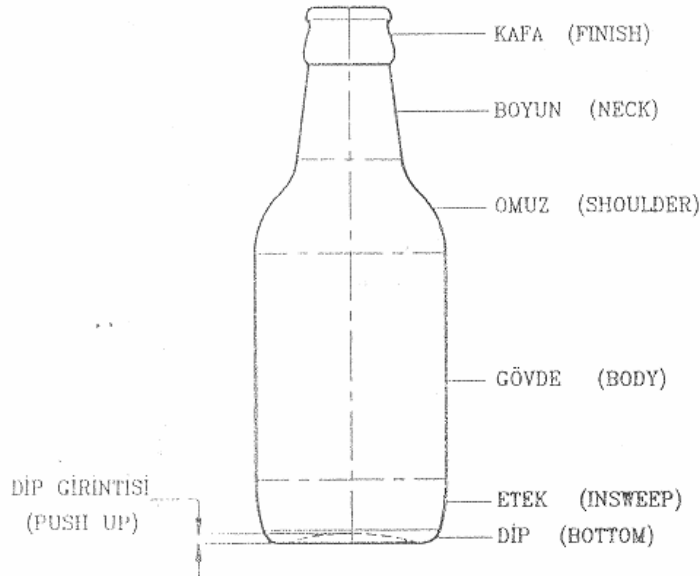
Boyun : Kafayı omuza bağlayan (genellikle konik) bölümdür. Kimi tip şişelerde bu bölgede etiket uygulaması yapılabilmektedir.

Omuz : Boyundaki darlığı gövdeye bağlayan, sade veya gravürlü olabilen, profiline göre baskı veya etiket uygulanabilen bölümdür.

Gövde : Şişenin şekil özelliklerine göre değişik gösteren ve genelde baskı veya etiket uygulanan bölümdür.

Etek : Gövde ile şişe dibini birbirine bağlayan bölümdür. Şişe dayanımlarının fazla olduğu bu bölge şişe bilgilerinin belirtilmesinde kullanılabilir. (amblem, hacim, kalıp no gibi.)

Dip : Şişe oturma yüzeyinin, dolayısıyla dip tırtıllarının ve dip girintisinin bulunduğu bölgedir. Şişe bilgileri bu bölümde de bulunabilir.

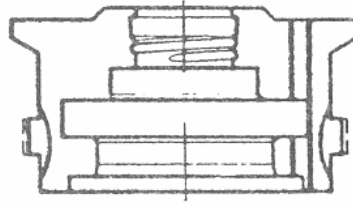


Şekil 3.7. Ürünün Bölümleri

3.2.5.2. Kalıp Parçaları ve İşlevleri

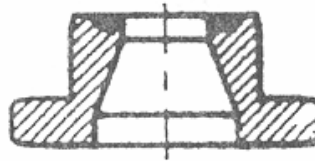
Kafa Yapıcılar

Müldebak : Ürünün kafa dış profilinin yapımında kullanılır. Diş ve bilezik burada oluşur.



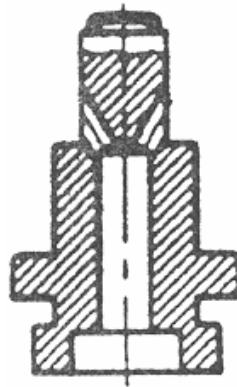
Şekil 3.8. Müldebak

Ring : Kafa ağız kısmının yapımında kullanılır. Bu bölümün izsiz lmasını sağlar.



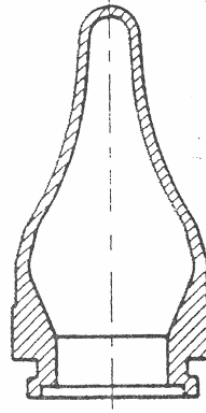
Şekil 3.9. Ring

Mandren : Ağız içinin istenilen ölçüde üretilmesini sağlar. (üfleme – üfleme prosesi)



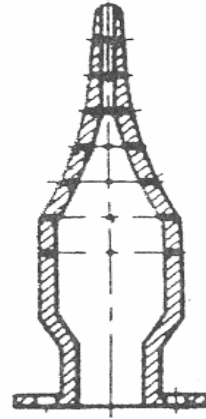
Şekil 3.10. Mandren

Mastor : Parizonun iç profilinin ve ağız içinin şekillendirilmesinde kullanılır. (presleme – üfleme prosesi)



Şekil 3.11. Mastor

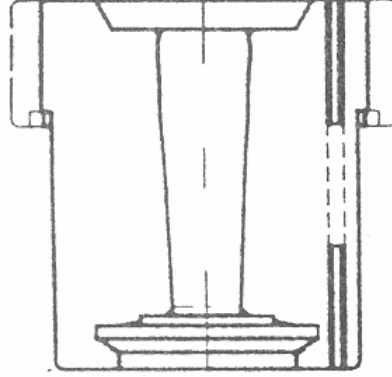
Mastor Soğutucu : Üretim sırasında aşırı ısınan mastorun hava ile soğutulmasını sağlar. (Presleme – üfleme prosesi)



Şekil 3.12. Mastor Soğutucu

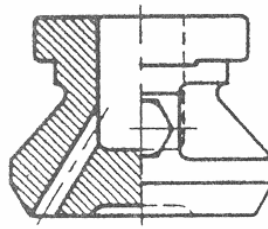
Hazırlayıcı Kalıplar

Ebişör : Ürünün cam dağılımını yönlendiren ve parizon adı verilen ilk aşamanın gövde bölümünü oluşturan kalıptır.



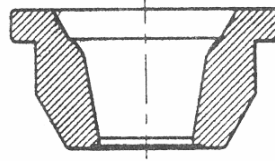
Şekil 3.13. Ebişör

Tampon : Ürünün dip kısmındaki cam dağılımını yönlendiren ve parizonun dibini oluşturan kalıptır.



Şekil 3.14. Tampon

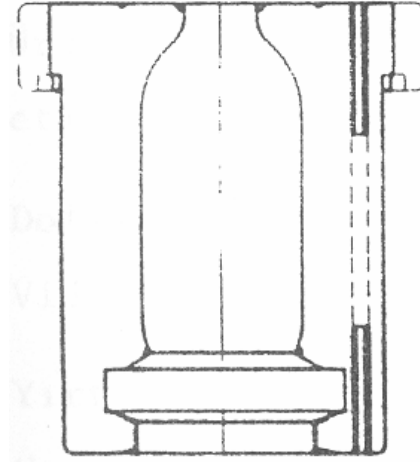
Huni : Damlanın ebişör kalıbına girerken merkezlenmesini sağlar.



Şekil 3.15. Huni

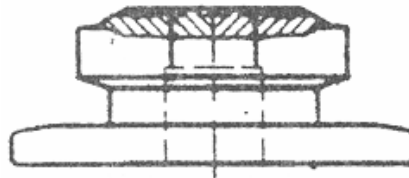
Tamamlayıcı Kalıplar

Finişör : Ürün gövdesinin son şeklini veren kalıptır.



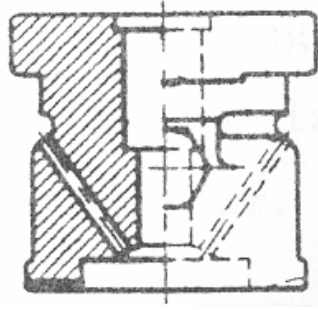
Şekil 3.16. Finişör

Müldefon : Ürünün dip kısmını oluşturan kalıptır.



Şekil 3.17. Müldefon

Süflaj Başlığı : Parizonun finisör içinde son şeklini almasını hava üfleyerek sağlar.



Şekil 3.18. Süflaj Başlığı

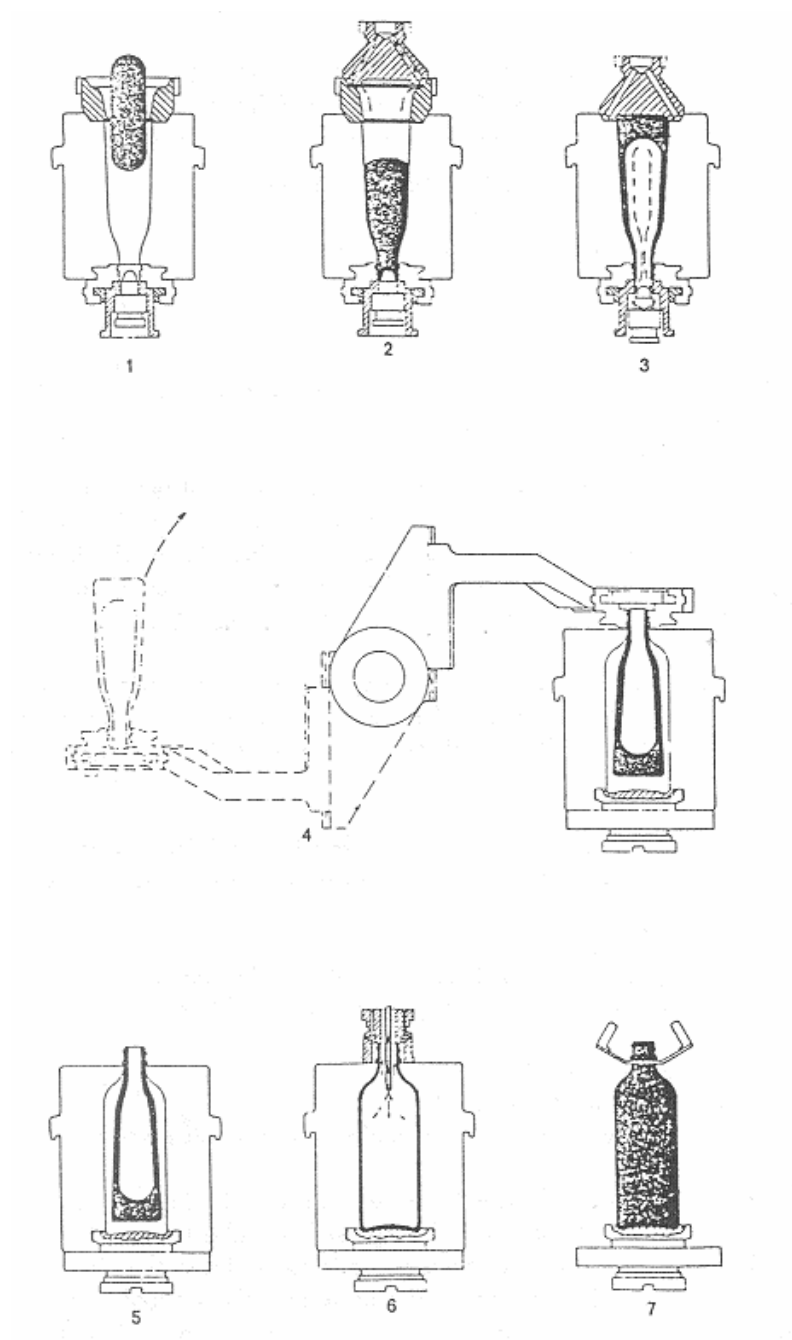
Alıcı Maşa : İşlemleri tamamlanmış ürünü finisörden alarak soğutma fırınına götüren taşıyıcı banda itilmeden önce bir süre durduğu “dead plate” denilen plakaya bırakır.



Şekil 3.19. Alıcı Maşa

3.2.5. Üretim Prosesleri

3.2.5.1. Üfleme – Üfleme (Blow – Blow) Prosesi

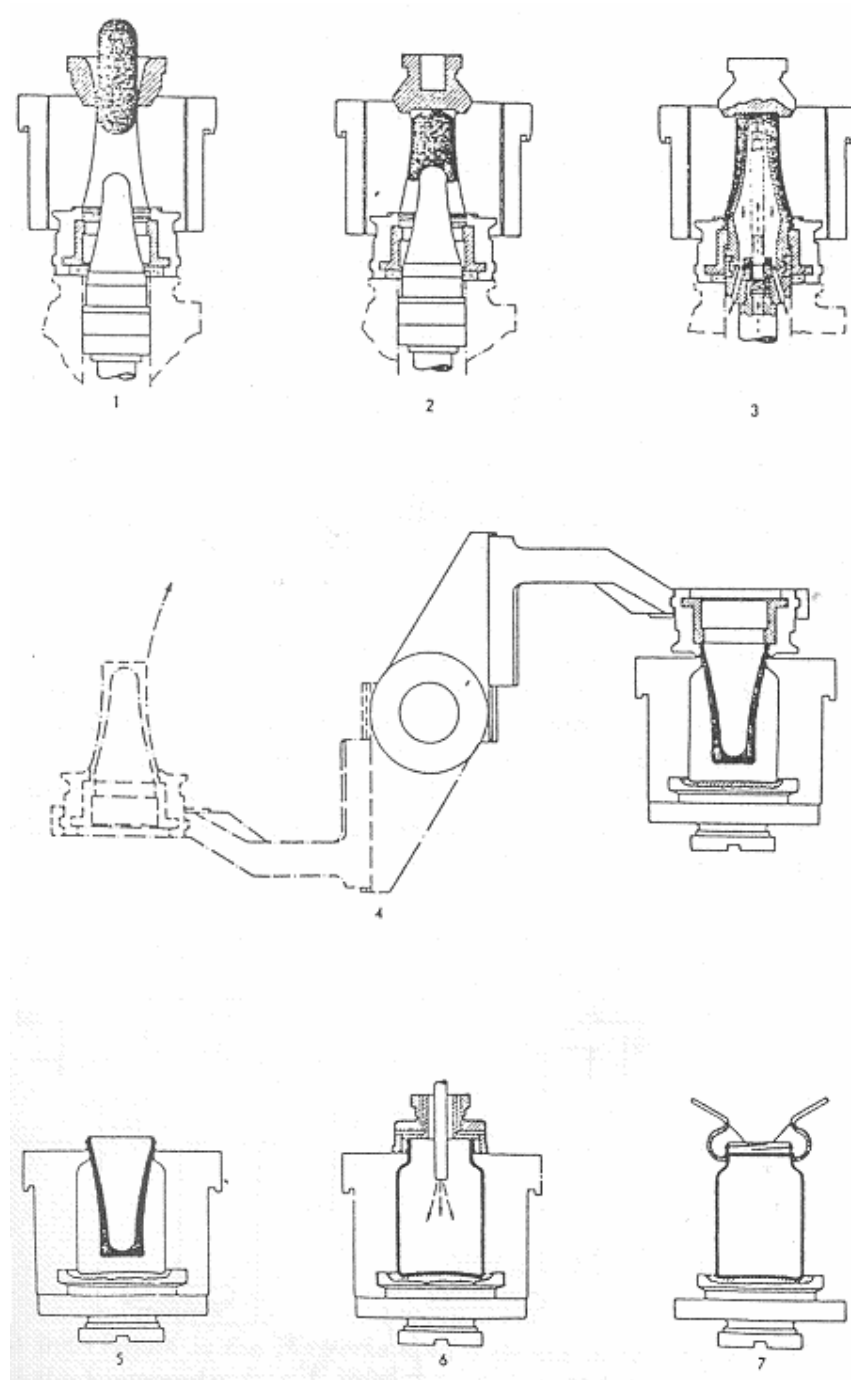


Şekil 3.20. Üfleme - Üfleme Prosesi

Damla huniden geçerek ebişörün içine düşer. Damla ebişöre girer girmez, tampon huninin üzerine oturur ve yerleştirme havası üflenerek şişenin kafası oluşturulmaya başlanır. Kafanın oluşması için yeterli zaman geçtikten sonra (bu süre kafanın şekline göre değişir) tampon kalkar, ardından huni de kalkar. Tampon tekrar gelir ve ebişörün üzerine oturur. Bu kez şekli ebişöre uygun olan tampon, bir sızdırmazlık elemanı gibi görev yapar. Tampon ebişör üzerine oturduktan ve mandren aşağı indikten sonra cama ebişörün şeklini vermek için mandrenin ağız içinde bıraktığı boşluktan persaj havası üflenir. Cam ebişörün şeklini aldıktan sonra persaj havası kesilir. Ebişör açıldığında, müldebak parizonu kafasından tutmaktadır. Müldebakları tutan müldebak kolları, invert mekanizması aracılığı ile 180° çevrilerek, ebişör tarafından finisör tarafına geçilir. Ebişör tarafında baş aşağı duran parizon, finisör tarafına geçince kafa kısmı yukarı gelir. Finisör kapanır kapanmaz, müldebak açılır ve parizonu finisöre bırakır. Müldebak kolları, müldebağı tekrar ebişör tarafına döndürür. Ebişör tarafındaki çevrim tekrarlanmaya başlar.

Parizonun (kafası hariç) metal kalıba temas etmediği transfer sırasında yüzeyünde yeniden ısınma olayı (reheat) meydana gelir. Süflaj başlığı finisörün üzerine oturur. Ürün, süflaj başlığından üflenerek süflaj havası ve vakum uygulaması ile son şekli olan finisör iç formasının şeklini alır. Süflaj havası kesilir, süflaj başlığı kalkar. Finisör açılır ve alıcı maşalar ürünü kafa altından kavrayarak “dead plate” denilen delikli bir plaka üzerinde getirir. Buradan üflenerek hava ile soğuması için bir süre alıcı maşada bekleyen ürün, daha sonra dead plate’in üzerine bırakılır ve itici tırnakları ile soğutma fırınına yüklenmek üzere makine konveyörüne iletilir. [Topkapı Şişe San.A.Ş., 1992]

3.2.5.2. Presleme – Üfleme (Pres – Blow) Prosesi



Şekil 3.21. Presleme – Üfleme Prosesi

IS makinesinde üfleme – üfleme tekniğinden presleme – üfleme tekniğine geçilmesi içim göbek mekanizmasının değiştirilmesi ve bu teknikle ilgili teçhizatın kullanılması gerekir. Presleme – üfleme prosesinde göbek mekanizmasına bağlı olarak çalışan kalıp parçası mandren yerine mastordur ve mastorun dış profili, oluşturulacak parizonun iç profilinin aynısıdır. Dolayısıyla presleme işlemi tamamlandığında mastorla kalıp arasında kalan hacim parizon şeklini oluşturur.

Damla huniden geçerek ebişörün içine düşer. Bu esnada mastor, “yükleme pozisyonu” denilen belli bir seviyede, düşen damlayı beklemektedir. Damla düştükten sonra huni kalkar ve tampon ebişörün üzerine oturur. Mastorun presleme hareketi, tampon oturduktan sonra mümkün olduğu kadar çabuk başlamalıdır. Presleme ile cam kalıp içinde kalan boşluğu dolduracak şekilde sıkıştırılır. Presleme hareketi tamamlandığında parizon ve kafa oluşmuştur.

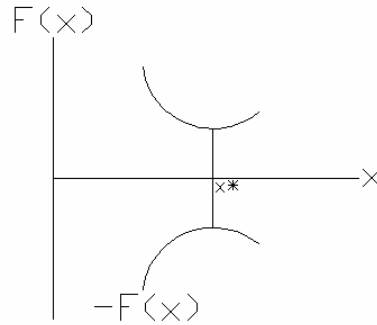
Mastor en alt pozisyonuna kadar aşağı iner ve tampon kalkar. Ebişör açıldığında müldebak parizonu kafasından tutmaktadır. Müldebakları tutan müldebak kolları, invert mekanizması aracılığı ile 180° çevrilerek ebişör tarafından finisör tarafına geçirilir. Ebişör tarafında baş aşağı duran parizon, finisör tarafına geçince kafa kısmı yukarı gelir. Finisör kapanır kapanmaz müldebak açılır ve parizonu finisöre bırakır. Müldebak kolları, müldebağı tekrar ebişör tarafına döndürür. E bişör tarafındaki çevrim tekrarlanmaya başlar. Finisör tarafında ise üfleme – üfleme prosesinde anlatılan işlemler aynen uygulanır. [Topkapı Şişe San.A.Ş., 1992]

4. DİZAYN OPTİMİZASYONU TEORİSİ

4.1. Optimizasyon Nedir?

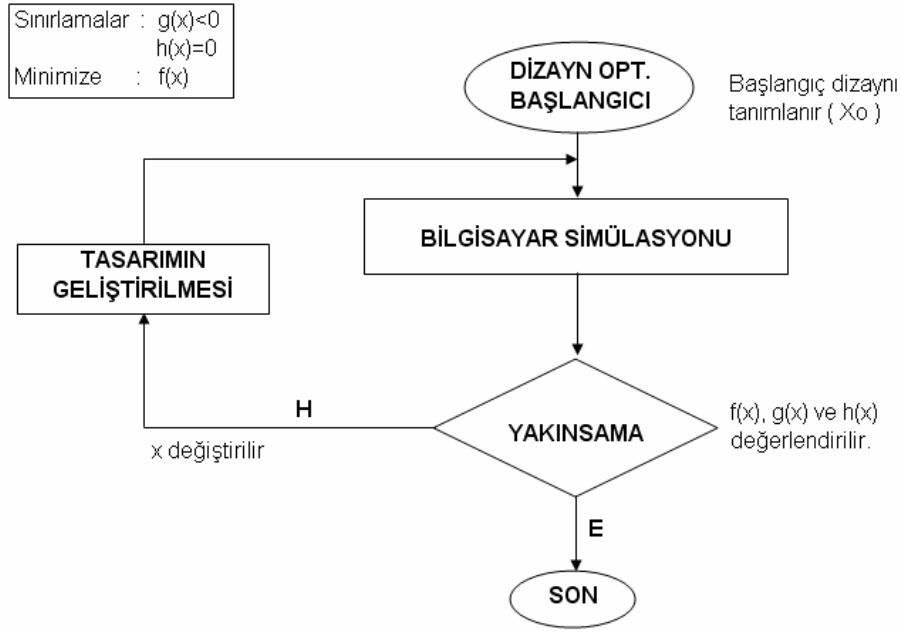
Optimizasyonun matematiksel anlamı, bir fonksiyonun maksimum veya minimum değerini veren durumların bulunması işlemidir. Bir optimizasyon problemi genel olarak;

$F(x)$ fonksiyonunu minimize eden $g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m$ ve $h_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ kısıtlarını sağlayan $x = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ değerlerinin bulunması şeklinde tanımlanabilir. Burada $F(x)$ fonksiyonu amaç fonksiyonudur. $g_j(x)$ ve $h_i(x)$ eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarıdır. $x_1, x_2, \dots, x_p$ ise dizayn değişkenleridir.



Şekil 4.1. Optimizasyon Eğrisi

x^* noktası $F(x)$ fonksiyonunun minimum noktası ise, $-F(x)$ fonksiyonunun maksimum noktasıdır.



Şekil 4.2. Dizayn Optimizasyonu Algoritması

Optimizasyonun mühendislik anlamı ise, verilen koşullar altında en iyi sonucu elde etme işidir. Herhangi bir mühendislik sisteminin tasarımında, konstrüksiyonunda veya bakımında mühendisler bir çok aşamada teknolojik ve idari kararlar alırlar. Bunlar, karın maksimum olması, maliyetlerin minimum olması, ürün ağırlığının minimum olması ve verimin maksimum olması gibi kararlardır. Bu kararlar belirli değişkenlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilirse optimum dizayn problemini oluşturabilirler. Elbetteki farklı optimizasyon problemleri için farklı optimizasyon metotları geliştirilmiştir.

Matematiksel Programlama Teknikleri: Bir fonksiyonun verilen koşullar altında minimumunu bulmada işe yarar.

- **Stokastik Metot :** Rastgele değişen değişkenler ile tanımlanan problemlerin analizinde kullanılır.

- **İstatistiksel Metot** : Deneysel verilerin analizi ve fiziksel durumun tam kesin olarak anlatılabilmse için ampirik modellerin kurulmasına olanak sağlar.

4.2. Optimizasyonda Mühendislik Uygulamaları

Optimizasyon herhangi bir mühendislik probleminde kolayca uygulanabilir. Önemli olan amaç fonksiyonunu sağlamak için kullanacağımız parametreleri ve kısıtları yani optimizasyon değişkenlerini iyi belirlemektir. Optimizasyonun kullanılabileceği farklı alanlarda mühendislik uygulamalarına dair aşağıda birkaç örnek verilmiştir;

- Uzay yapıları ve uçakların minimum ağırlıkta dizaynı için,
- İnşaat yapılarının minimum maliyetlerde tasarımı ve yapımı için,
- Su kaynak sistemlerinin maksimum karlılıkta dizaynı için,
- Yapıların deprem, rüzgar ve diğer tip düzensiz zorlanmalarda minimum ağırlıkta dizaynı için,
- Mekanizmalar, kamlar, dişliler ve diğer makine elemanlarının optimum tasarımı için,
- İletim makinelerinin minimum maliyeti için dizayn çalışmalarında,
- Minimum üretim maliyeti için metal kesme işlemlerinde,
- Elektrik ağlarının optimum dizaynında,
- En kısa yol problemlerinde,
- Boru hattı sistemlerinin dizaynında,
- Sanayi için şehir seçimlerinde,
- Kontrol sistemlerinin optimum dizaynında,
- Amaç olarak minimize yada maksimize edilebilecek her türlü problemde,
- Endüstri mühendislerinin amaç aldığı her türlü yöneylem çalışmasında,

optimizasyon metotları kullanılır.

4.3. Dizayn Optimizasyonu Probleminin Formülasyonu

Bir optimizasyon probleminin matematiksel olarak formüle edilebilmesi için aşağıdaki üç basamak takip edilmelidir;

- **Dizayn Değişkenlerinin Belirlenmesi;**

Herhangi bir mühendislik sistemi bazı nicelikler ile tanımlanır. Bu niceliklerden bazıları başlangıçta sabit kabul edilir. Diğerleri dizayn işlemi boyunca değişken olarak davranır. Bunlara dizayn değişkenleri denir. Örneğin, giriş devri n_1 ve çıkış devri n_2 olan bir dişli grubu dizaynında, dişli sayıları olan z_1 ve z_2 , aks aralığı a , malzeme ve dişli profili karakterize edilir. Diş profili ve malzeme başlangıçta sabit kabul edilirse z_1 , z_2 ve a dizayn değişkenleridir.

- **Amaç Fonksiyonunun Tanımlanması ve Dizayn Değişkenleri Cinsinden İfade Edilmesi;**

Klasik bir dizayn, problemin sadece fonksiyonel ve diğer bazı gereksinimlerinin karşılandığı kabul edilen dizaynın bulunmasıdır. Genelde birden fazla kabul edilebilir dizayn vardır. Optimizasyonun amacı bunlar arasında “en iyi” olanını seçmektir. En iyiyi seçebilmek içinde bir kriter olmalıdır. Bu kriter dizayn değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebildiğinde amaç fonksiyonu adını alır. Amaç fonksiyonunun seçimi en önemli kararlardan biridir. Örneğin maksimum gücü ileten bir dişli kutusu minimum ağırlıkta olmayabilir veya bir yapıyı minimum ağırlıkta yaparsınız fakat gerilmeler çok fazla olur. Bazı durumlarda ise eş zamanlı sağlanması gereken birden fazla kriter olabilir. Örneğin bir dişli çifti minimum ağırlık ve maksimum verim için tasarlanabilir. Böyle problemlere çok amaçlı

(multiobjective) programlama problemi ya da optimizasyon problemi adı verilir.

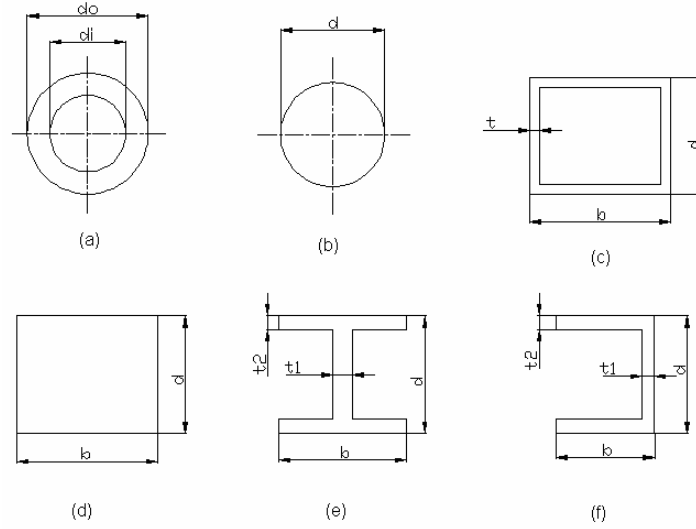
- **Kısıtlarının Tanımlanması ve Dizayn Değişkenleri Cinsinden İfade Edilmesi;**

Tüm mühendislik sistemleri verilen kaynaklara ve işleyiş gereksinimlerine göre tasarlanıp üretilirler. Örnek olarak yapı işletme yükü altında hasara uğramamalıdır, ya da bir makine elemanı çalıştığı yerde üzerinde oluşan gerilmelere dayanabilmelidir. Yani makine elemanı emniyetli gerilme değerlerinde çalışmalıdır. Uygun tasarımı elde etmek için sağlanması gereken bu sınırlamalar dizayn kısıtları olarak adlandırılırlar.

4.3.1. Dizayn Değişkenleri

Bir sistemin dizaynını tanımlamak için seçilen değişkenlere **dizayn değişkenleri** denir. Bu değişkenlere ilk olarak rastgele değerler verilerek sistem oluşturulur. Dizayn değişkenlerinin doğru seçilmesei gerekmektedir. Bunlar, mümkün olduğu kadar birbirlerinden bağımsız olmalıdırlar. Bazen bağımlı dizayn değişkenleri seçilmişse de, bu problem formülasyonunun gereksiz yere karmaşık hale gelmesine neden olur.

Örnek olarak Şekil 4.3(a)'daki boru incelenirse; bu boruya ilk bakışta dizayn değişkenleri olarak iç çap (d_i), dış çap (d_o) ve et kalınlığı (t) söylenebilir. Fakat burada t 'nin ve d_o 'a bağımlı olduğu gözden kaçırılmamalıdır.



Şekil 4.3. Çeşitli Kesitler ve Bunlara Ait Dizayn Parametreleri

Mesela; $d_i = 20$, $d_o = 22$ ve $t = 2$ olarak alınamaz. Çünkü $t = 0,5(d_o - d_i)$ dir. Eğer problemde d_o , d_i ve t dizayn değişkenleri olarak tanımlanırsa, $t = 0,5(d_o - d_i)$ de sınırlama olarak almak zorunda kalınır. Böylece problem gereksiz yere karmaşık hale getirilip zaman kaybetmiş olunur. Dizayn değişkenleri olarak d_i ve d_o 'yi almak daha uygun ve yeterlidir. Şekil 4.3'de bazı kesitler ve bunlara ait dizayn değişkenleri de gösterilmiştir.

Özet olarak, bir problemin dizayn değişkenlerini belirlemek için aşağıdaki hususlar dikkate alınır:

- Dizayn değişkenleri mümkün olduğu kadar birbirinden bağımsız olarak alınmalıdır.
- Bir dizayn problemini doğru olarak formüle edebilmek için minimum sayıda dizayn değişkeni gerekir. [Arora, 1989]

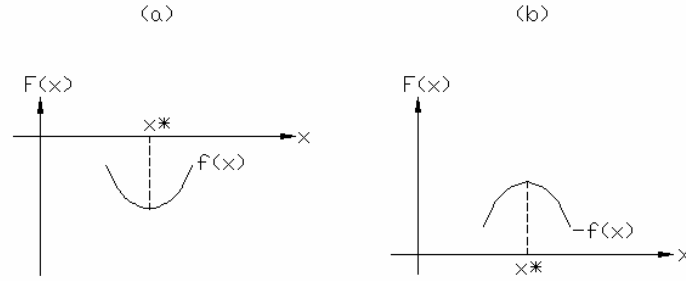
4.3.2. Amaç Fonksiyonu

Bir sistem ile ilgili birden fazla ve bazıları diğerlerinden daha iyi uygun dizaynlar olabilir. Bunları birbirleri ile kıyaslamak için bir kritere ihtiyaç vardır. İşte bu kritere optimum dizayn problemi için **amaç fonksiyonu** denir. Bu fonksiyon dizayn değişkenlerine bağlıdır. x dizayn değişeni vektörü olmak üzere, amaç fonksiyonu $f(x)$ ile gösterilir.

Amaç fonksiyonunu doğru seçmek dizayn işleminde çok önemlidir. Minimum maliyet, maksimum kar, minimum ağırlık, minimum enerji gibi birçok amaç fonksiyonu kullanılmaktadır. Eğer amaç fonksiyonu maksimum kar problemindeki gibi bir maksimum bulma problemi ise $-f(x)$ olarak alınır. (Şekil 4.4)

Birçok dizayn problemlerinde, amaç fonksiyonu ve bunun dizayn değişkenleri ile nasıl bir ilişkisi olacağı açık değildir. Genelde bu tip problemler birçok alt probleme ayrılaraki her birinin dizayn optimizasyonu yapılarak çözülür. Örneğin bir binek arabanın optimizasyonu için dizayn değişkenleri nelerdir? Amaç fonksiyonu nedir? Dizayn değişkenleri ile ifade edilecek fonksiyonel hali nasıldır? Bu oldukça karmaşık bir problemidir.

Fakat problem, kapılar, yan paneller, tavan, süspansiyon sistemi, iletim sistemi vb. Gibi alt problemlere ayrılıp her biri optimize edilerek çözülebilir.



Şekil 4.4. Minimum ve Maksimum Bulma

4.3.3. Dizayn Kısıtları

4.3.3.1. Doğrusal (Linear) ve Doğrusal Olmayan (Nonlinear) Kısıtlamalar

Kısıt fonksiyonu dizayn değişkenlerinin sadece birinci derecedeki terimlerini içeriyorsa bunlara doğrusal kısıtlar denir. Eğer dizayn değişkenlerinin daha yüksek derecedeki terimleri varsa, bunlara doğrusal olmayan kısıtlar denir.

4.3.3.2. Eşitlik (Equality) ve Eşitsizlik (Inequality) Kısıtlamaları

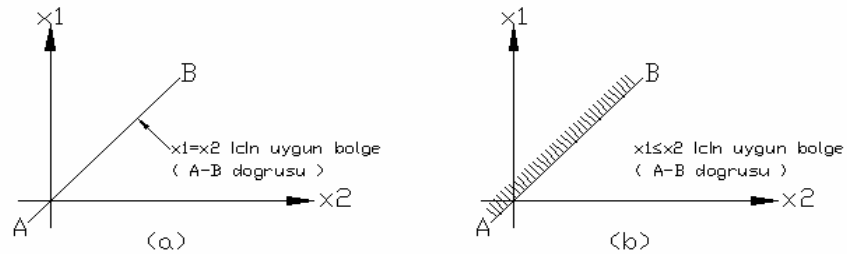
Dizayn problemleri eşitlik ve eşitsizlik kısıtlarını içerebilirler. Örneğin; istenen operasyonu yapabilmek için bir makine parçasının tam olarak ∇ kadar hareket etmesi gerekiyorsa, bunun bir eşitlik sınırlaması olarak ele alınması gerekir. Uygun bir dizayn tüm eşitlik kısıtlamalarını tam olarak sağlamalıdır.

Eşitsizlik kısıtlamalarında ise, hesaplanan değerlerin bazı değerlerin üstüne çıkmaması veya bazı değerlerin altına düşmemesi istenir. Örneğin;

gerilme değeri malzeme emniyet gerilmesi kısıtını aşmamalı, malzemede oluşacak deformasyon belirtilen alanları aşmamalı vb.

Eşitsizlik kısıtlamalarına göre birçok uygun dizayn olabilir. Fakat eşitlik kısıtlamalarına göre uygun dizayn bulmak daha zordur.

Bu durumu daha iyi anlayabilmek için Şekil 4.5 incelenebilir. Şekil 4.5(a) $x_1 = x_2$ eşitlik kısıtlamasını göstermektedir. Bu kısıtlamaya göre uygun dizaynlar $A - B$ doğrusu üzerinde bulunmalıdır. Fakat kısıtlama Şekil 4.5(b)'deki gibi $x_1 \leq x_2$ eşitsizlik kısıtlaması şeklinde yazılırsa uygun bölge çok daha geniş olur. $A - B$ doğrusu üzerinde veya altında kalan bölgenin içindeki herhangi bir nokta uygun dizaynı vermektedir. [Arora, 1989]



Şekil 4.5. Eşitlik ve Eşitsizlik Kısıtlamaları Arasındaki Fark

4.3.4. Kısıtlanmamış (Unconstrained) ve Kısıtlanmış (Constrained) Optimizasyon Problemlerinin Formüle Edilmesi

Optimizasyon problemleri kısıtlanmamış (unconstrained) ve kısıtlanmış (constrained) olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Adından da anlaşılacağı gibi kısıtlanmamış optimizasyon, amaç fonksiyonu üzerinde hiçbir kısıtlamanın olmadığı problemlerin optimum çözümünün bulunmasıdır. Kısıtlanmış optimizasyon ise en az bir adet kısıtlamanın tanımlandığı problemlerdir.

Her iki problem tipi için de geliştirilmiş çözüm teknikleri vardır. İlk bakışta mutlaka kısıtlamalar olacağı düşünülerek, kısıtlanmamış problemlerin mühendislik sahasındaki bir dizayn problemi ile ilişkisi olamayacağı düşünülebilir. Fakat kısıtlanmış problemler bazı tekniklerle, daha basit çözüm teknikleri içeren kısıtlanmamış problemlere dönüştürülerek de çözülebilir.

Dizayn optimizasyonu problemlerinin genel tanımı aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$	dizayn değişkenleri vektörü olmak üzere;
$F(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$	amaç fonksiyonu
$h_i(x) = 0 \quad i = 1 \rightarrow p$	eşitlik kısıtlamaları
$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1 \rightarrow m$	eşitsizlik kısıtlamalarına göre
minimum yap.	

Eğer kısıtlanmamış bir optimizasyon problemi ise sadece;

$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ amaç fonksiyonunu minimum yap. [Arora, 1989]

4.4. Genel Bir Dizayn Optimizasyonu Örneği

Bu örnekte bir şirkete lazım olan depolama tanklarının alınması konu edilmiştir. Bu tankların satın alınması için ayrılan bütçe 1680 YTL'dir. Araştırmalar sonucunda şirket gereksinimlerine uyan iki adet üretici ile tenasa geçilmiştir. A üreticisi; 7,5 m² taban alanına sahip 16 m³ kapasiteli tanklar üretmektedir ve her bir tankı 120 YTL'ye satmaktadır. B üreticisi ise; 10 m² taban alanına sahip 24 m³ kapasiteli tanklar üretmektedir ve her bir tankı 240 YTL'ye satmaktadır. Alınacak tanklar 90 m² taban alanı olan bir kısma yerleştirilecektir. Taban alanı ve bütçe kısıtlamalarının ışığında en büyük depolama kapasitesi için bu tanklardan kaç tane almak gerekir?

Çözümün hemen başında minimize yada maksimize edilecek olan amaç fonksiyonu tanımlanır. Bu örnekte depolama kapasitesi maksimize edilmek istenmektedir. Bu gerekliliği matematiksel olarak yazacak olursak;

Maksimize $Z = 16x_1 + 24x_2$

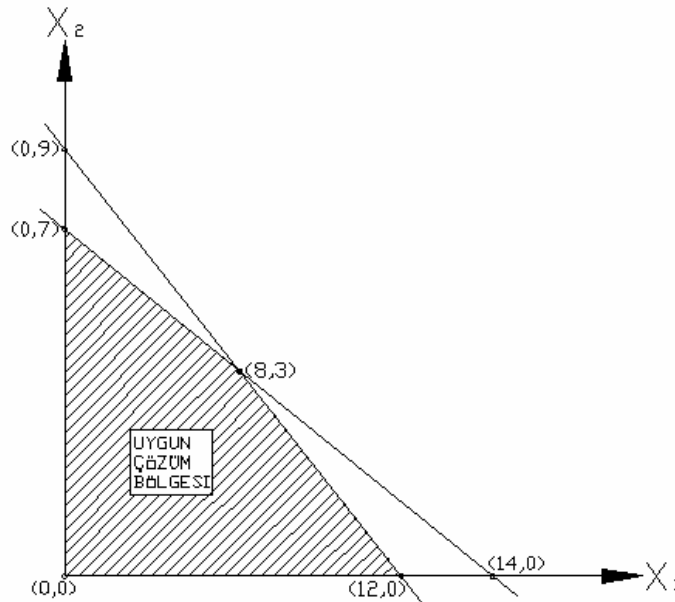
Diğer kısıtlar $120x_1 + 240x_2 \leq 1680$

$$7,5x_1 + 10x_2 \leq 90$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

Z amaç fonksiyonu, x_1 ve x_2 de dizayn değişkenleri olarak adlandırılır. Lineer programlama problemlerinin çözümü için spesifik teknikler olmasına karşın grafisel olarak probleme bakıldığında;



Şekil 4.6. Uygun Çözüm Bölgesi

Şekil 4.6'da gösterilen taralı alan "Uygun Çözüm Bölgesi" olarak isimlendirilir. Bu bölge içindeki her nokta kısıtları karşılar. Hedef amaç fonksiyonunu maksimize etmek olduğundan, amaç fonksiyonu uygun bölge üzerinde hareket ettirilerek değerinin nerede maksimuma ulaştığı belirlenir.

Amaç fonksiyonunun maksimum değerini uygun çözüm bölgesinin köşe noktalarında aldığı görülür. Uygun çözüm bölgesinin köşe noktalarındaki amaç fonksiyonu değerleri incelenerek; maksimum değerlerin $x_1=8$ ve $x_2=3$ te meydana geldiği bulunur.

Çizelge 4.1. Uygun Çözüm Bölgesinin Köşe Noktalarındaki Amaç Fonksiyonu Değerleri

Köşe Noktaları (X_1, X_2)	Amaç Fonksiyonu Değeri $Z=16X_1+24X_2$
(0,0)	0
(0,7)	168
(12,0)	192
(8,3)	200(max)

Böylece; verilen kısıtlamalar ışığında depolama kapasitesinin maksimize edilmesi için A üreticisinden 8 tane 16 m³'lük tanklardan ve B üreticisinden 3 tane 24 m³'lük tanklardan satın alınmalıdır. [Moaveni, 1999]

5. DENEYSEL TASARIM VE ANOVA

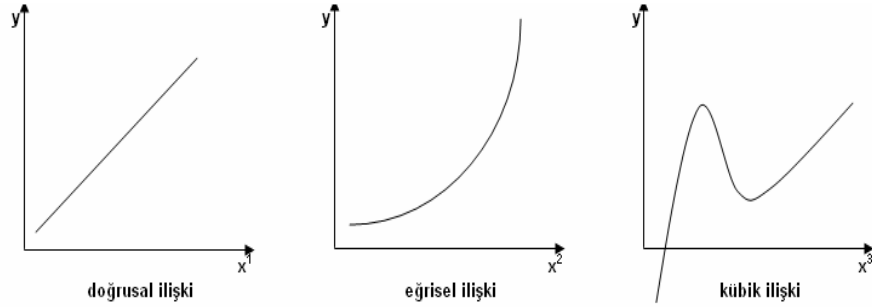
Her sistemin veya prosesin, etkisi altında kaldığı birtakım değişkenler vardır. Bu değişkenlerin bir kısmı bağımlı, bir kısmı bağımsız değişkenlerdir.

Bağımsız değişkenler, araştırmacının üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı değişkenlerdir ve müdahale edilemezler. Örneğin hava sıcaklığı, incelenen deneyden ve araştırmacıdan bağımsızdır, değişimine müdahale edilemez. Bağımlı değişkenler ise, araştırmacının değerleri hakkında karar verebildiği, değiştirebildiği değişkenlerdir. Örneğin, bir kalıptaki kalıp göz sayısı, araştırmacının müdahale edebildiği, değiştirebildiği bir değişken olup, bağımlı değişken olarak adlandırılır.

Bir sistemi optimum konuma getirmek için çalışmalar yaparken öncelikle sistemin değişkenleri ve bunların bağımlı/ bağımsız olma özellikleri irdelenmelidir. Bağımlı değişkenler belirlendikten sonra, bu değişkenlerin sistem çıktısını ne şekilde etkilediği gözlemlenir. Bu gözlemler doğrultusunda çeşitli bağımlı değişken kombinasyonlarının test edilerek sonuçların analiz edilmesiyle optimum değişken kombinasyonunun seçilmesine “deneysel tasarım” denmektedir.

Bağımlı değişkenlerden oluşan test kombinasyon sayıları çok fazla olduğu durumda, yapılan deney (test) sayıları çok zaman kaybına sebep olacağından, deney sayısında azaltma yapılabilir. Toplam deney kombinasyonunu oluşturan uzaydan öyle bir örneklem seçilmelidir ki, seçilen bu örneklem denendiğinde yapılan çalışma, tüm kombinasyon uzayının denenmesinde yapılacak olan çalışmanın sonuçlarını temsil etmelidir. Bu kombinasyon elemesi ile yapılan deneysel tasarıma “kısmi faktöriyel deneysel tasarım”, tüm kombinasyonların denenmesi ile yapılan deneysel tasarıma ise “tam faktöriyel deneysel tasarım” adı verilir.

Her bağımlı değişken sistemi farklı şekilde etkileyecektir. Doğru kombinasyonları bulabilmek için yapılması gereken, her bağımlı değişkenin tek başına sistem çıktısını nasıl etkilediğini gözlemlemektir. Bu etkiler Şekil 5.1 üzerindeki alternatiflerden biri olacaktır.



Şekil 5.1. Sistem Girdi ve Çıktısı Arasındaki İlişkiler

Sistem çıktısı ile doğrusal ilişki gösteren bir bağımlı değişken minimum 2, sistem çıktısı ile eğrisel ilişki gösteren bir bağımlı değişken minimum 3 ve sistem çıktısı ile kübik ilişki gösteren bir bağımlı değişken minimum 4 seviye ile temsil edilebilir.

Bağımlı değişkenlerin seviyeleri, yapılacak toplam deney sayısını belirlemektedir. Öyle ki, toplam deney sayısı kombinasyonu her bir değişkenin değişim seviyelerinin çarpımına eşittir. Örneğin ikisi 2, biri 3 seviye ile temsil edilebilen üç adet bağımlı değişkene sahip bir sistemin toplam kombinasyon sayısı $2 \times 2 \times 3 = 12$ olacaktır.

Eğer incelenmekte olan sistemi etkilediği düşünülen bağımlı değişkenler ve bu değişkenlerin seviyeleri belirlenmişse, bağımlı değişkenler ile sistem çıktısı arasındaki ilişki bir regresyon denklemi ile ifade edilebilmelidir. β regresyon denklemindeki x bağımlı değişkenlerinin katsayıları ve ε önerilen regresyon denkleminin hata değeri olmak üzere, denklem matris halinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir: [Montgomery, 1991]

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (5.1)$$

Deney sistemindeki tüm kombinasyonlara denk gelen sistem çıktısı değeri hesaplandıktan sonra, bağımlı değişkenlerin ve bağımlı değişken etkileşimlerinin sistem çıktısına etkisi sayısal olarak hesaplanabilir. Bunun için ANOVA (Analysis of Variance-Varyans Analizi) istatistiksel yöntemi kullanılır. Bu yöntemin amacı genel olarak regresyon denklemindeki toplam hatayı minimize edecek bağımlı değişken kombinasyonlarını bulabilmektir.

İki faktörden oluşan bir çoklu ANOVA tablosu $SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E$ olmak üzere Tablo 5.1'deki gibi oluşturulabilir. [Montgomery, 1991]

Çizelge 5.1. ANOVA Tablosu

Değişk. kaynağı	Kareler Toplamı (SS)	Serb. Derc.	Kareler Ort.	F0
A değişkeni	SS_A	a-1	$MS_A = SS_A / (a-1)$	$F_0 = MS_A / MS_E$
B değişkeni	SS_B	b-1	$MS_B = SS_B / (b-1)$	$F_0 = MS_B / MS_E$
Etkileşim	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB} = SS_{AB} / ((a-1)(b-1))$	$F_0 = MS_{AB} / MS_E$
Hata	SS_E	ab(n-1)	$MS_E = SS_E / ab(n-1)$	
Toplam	SS_T	abn-1		

Burada SS_T regresyon değerlerindeki toplam değişkenliği, yani varyansı temsil ederken, SS_A bu varyansın ne kadarının A değişkeninden kaynaklandığını, SS_B ne kadarının B değişkeninden kaynaklandığını, SS_{AB} ne kadarının AB etkileşiminden kaynaklandığını ve SS_E ne kadarının hatadan (regresyon denklemi hatası ve bağımsız değişkenler) gösterir.

Çizelge 5.1'de görülen iki değişkenli sistemde SS kareler toplamı hesaplaması formülasyonu aşağıdaki gibi olacaktır. n her bir kombinasyon için deney (koşum) sayısı olmak üzere:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{....}^2}{abn} \quad (5.2)$$

Ana etkilerin kareler toplamı:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bn} - \frac{y_{....}^2}{abn} \quad (5.3)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j..}^2}{an} - \frac{y_{....}^2}{abn} \quad (5.4)$$

Etkileşime ait kareler toplamı:

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{n} - \frac{y_{....}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (5.5)$$

ve regresyon hatasına ait kareler toplamı da

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (5.6)$$

olacaktır.

Hesaplamaların daha net anlaşılması açısından iki faktörün değişimlerini gösteren Çizelge 5.2 üzerinden ANOVA hesaplamaları yapılacaktır.

Çizelge 5.2. İki Değişkenli ANOVA Örneği

Değişken A	Değişken B									y _{i..}
	15			70			125			
1	130	155	539	34	40	229	20	70	230	998
	74	180		80	75		82	58		
2	150	188	623	136	122	479	25	70	198	1300
	159	126		106	115		58	45		
3	138	110	576	174	120	583	96	104	342	1501
	168	160		150	139		82	60		
y _{j..}	1738			1291			770			3799=y _{...}

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{....}^2}{abn}$$

$$= (130)^2 + (155)^2 + (74)^2 + \dots + (60)^2 - \frac{(3799)^2}{36} = 77646,97$$

Ana etkilerin kareler toplamı:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bn} - \frac{y_{....}^2}{abn}$$

$$= \frac{(998)^2 + (1300)^2 + (1501)^2}{3 \times 4} - \frac{(3799)^2}{36} = 10683,72$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j..}^2}{an} - \frac{y_{....}^2}{abn}$$

$$= \frac{(1738)^2 + (1291)^2 + (770)^2}{3 \times 4} - \frac{(3799)^2}{36} = 39118,72$$

Etkileşime ait kareler toplamı:

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{n} - \frac{y_{....}^2}{abn} - SS_A - SS_B$$

$$= \frac{(539)^2 + (229)^2 + \dots + (342)^2}{4} - \frac{(3799)^2}{36} - 10683,72 - 39118,72 = 9613,78$$

ve regresyon hatasına ait kareler toplamı da

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB}$$

$$= 77646,97 - 10683,72 - 39118,72 - 9613,78 = 18230,75 \text{ olacaktır.}$$

Her bir değişkenin serbestlik derecesi, değişim seviyesinin 1 eksiğine eşittir; dolayısıyla A ve B değişkenlerinin serbestlik dereceleri her ikisi de 3. derecede değişim gösterdiğinden 2 olacaktır. AB etkileşiminin serbestlik derecesi ise A ve B değişkenlerinin serbestlik dereceleri çarpımına yani 4'e eşit olacaktır. Toplam varyansın serbestlik derecesi ise $abn - 1 = 2 \times 2 \times 2 \times 4 - 1 = 15$ olacaktır.

Çizelge 5.1'deki hesaplamalar tamamlandığında elde edilen sonuç Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. İki Değişkenli Örnek Sistemin ANOVA Hesaplamaları

Değişk. kaynağı	Kareler Toplamı (SS)	Serb. Derc.	Kareler Ort.	F0
A değişkeni	10683,72	2	5341,86	7,91
B değişkeni	39118,72	2	19558,36	28,97
Etkileşim	9613,78	4	2403,44	3,56
Hata	18230,75	27	675,21	
Toplam	77646,97	35		

Çoklu regresyonda model parametreleri ile ilgili hipotezleri test etmekte fayda vardır. Bunun için hataların ortalaması 0 olan normal dağılıma uygun olduğu varsayılır. Çoklu regresyonda test hipotezleri regresyonun toplam etkisini değerlendirmek için aşağıdaki gibi olacaktır [Montgomery, 1991]:

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 = \beta_i \neq 0, \text{ en az bir } i \text{ için.}$$

H_0 hipotezinin reddedilememesi gösterir ki, modeldeki en az bir değişkenin çıktıya katkısı bulunmaktadır.

Benzer hipotez değişkenlerin her birinin ayrı ayrı etkilerini değerlendirirken de aşağıdaki gibi olacaktır [Montgomery, 1991]:

$$H_0 = \beta_i = 0$$

$$H_1 = \beta_i \neq 0$$

H_0 hipotezinin reddedilememesi gösterir ki, hipotezlerin değerlendirildiği bağımlı değişkenin çıktıya katkısı bulunmaktadır.

Hipotezleri kanıtlamak için öncelikle çalışma için bir güvenilirlik seviyesi ele alınır. Örneğin %95 güvenilirlik seviyesinin seçildiği durumda Çizelge 5.3'deki A değişkeninin etkisi için;

$$H_0 = \beta_i = 0$$

$H_1 = \beta_i \neq 0$ hipotezleri şu şekilde çözümlenecektir:

$$F_{kritik} = F_{0.95, v_1, v_2}$$

$$F_{kritik, A} = F_{0.95, 2, 35} = 3,275$$

A değişkeni için $F_0 = 7,91$ iken $F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 hipotezi reddedilemez. Yani, A değişkeninin sistem çıktısı üzerindeki etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır.

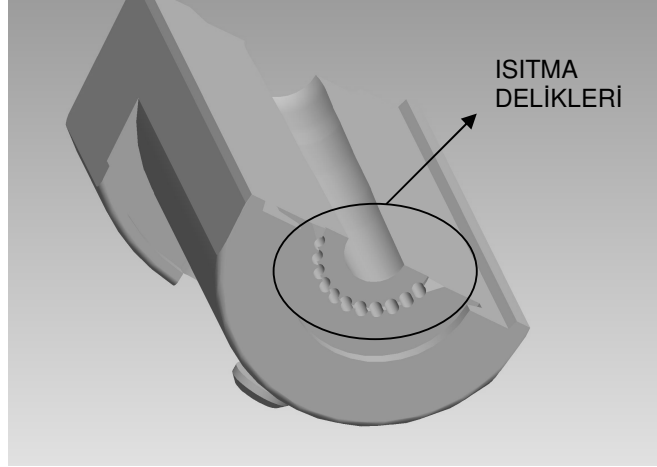
Benzer değerlendirme B değişkeni, AB etkileşimi ve toplam regresyon için de yukarıdaki gibi yapılabilir.

6. EBİŞÖR KALIPLARINDAKİ ISITMA DELİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

6.1. Ebişör Kalıpları

Ebişör kalıpları cam ambalaj üretiminde kullanılan, ergitme fırınlarından gelen cam damlasının içine düştüğü kalıplardır. Ebişör kalıplarının içine düşen cam damlası, son ürün özelliklerine göre belirlenen presleme yada üfleme metoduyla şekillendirilerek parizon adı verilen cam ambalaj ara ürününe dönüştürülür. Ebişör kalıplarının görevi iki safhalı gerçekleşen cam ambalaj üretiminde ikinci safhaya daha homojen bir cam dağılımına sahip parizonu iletmektir. Finişör kalıplarında gerçekleşen ikinci safhadaki üfleme prosesi sonunda elde edilen ürün, ebişör kalıplarında oluşturulan parizondan direkt olarak etkilenmektedir.

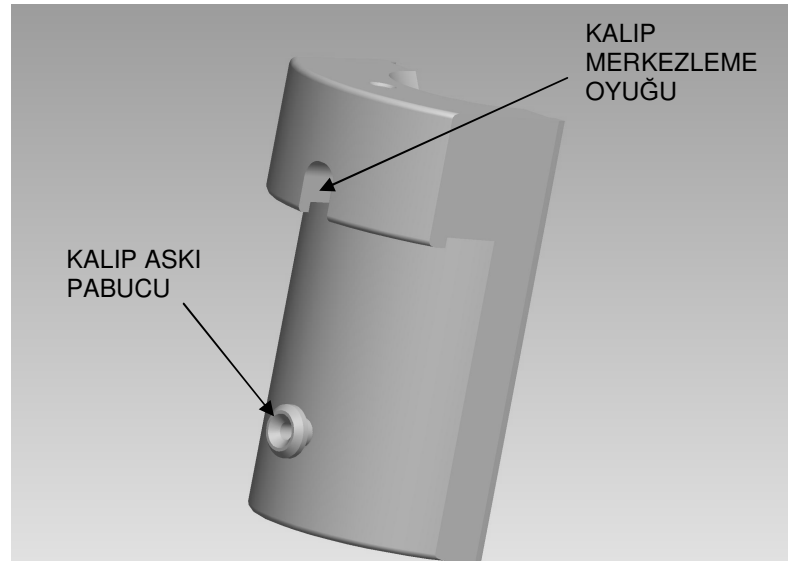
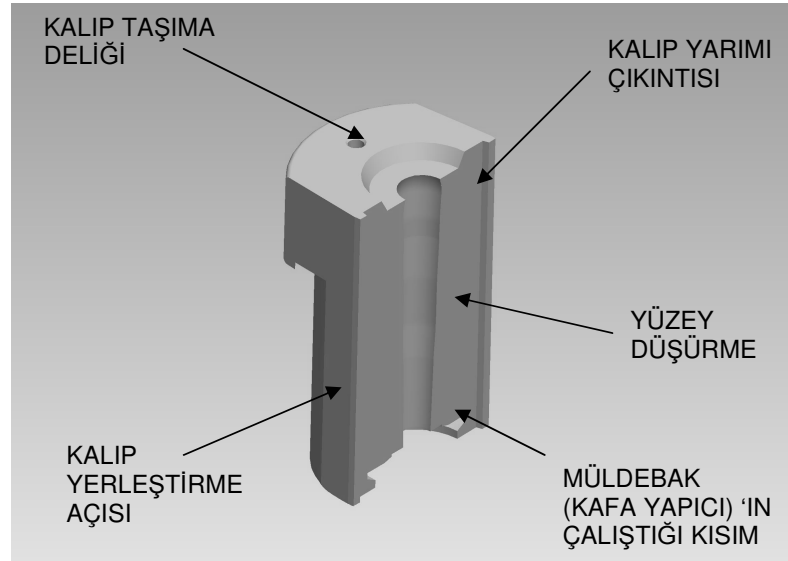
Ebişör kalıplarındaki ısıtma delikleri bu homojen dağılıma katkıda bulunmak için düşünülmüş bir kalıp detayıdır. Kalıba açılan bu ısıtma delikleri ısıнын kalıpta daha fazla muhafaza edilmesine imkan sağlayarak camın hareket süresini arttırır. Hareket süresi artan cam damlasının boyun bölgesinden parizonun diğer kısımlarına akışı hızlanır. Böylelikle de boyun bölgesinde istenilenden daha kalın cam oluşumuna izin verilmez ve ürünün tamamında cidar kalınlığının homojen dağılıma sahip olması sağlanmış olur. Aynı zamanda daha hafif bir cam ambalaj ürünü meydana getirilir.



Şekil 6.1. Ebişör Kalıbındaki Isıtma Delikleri

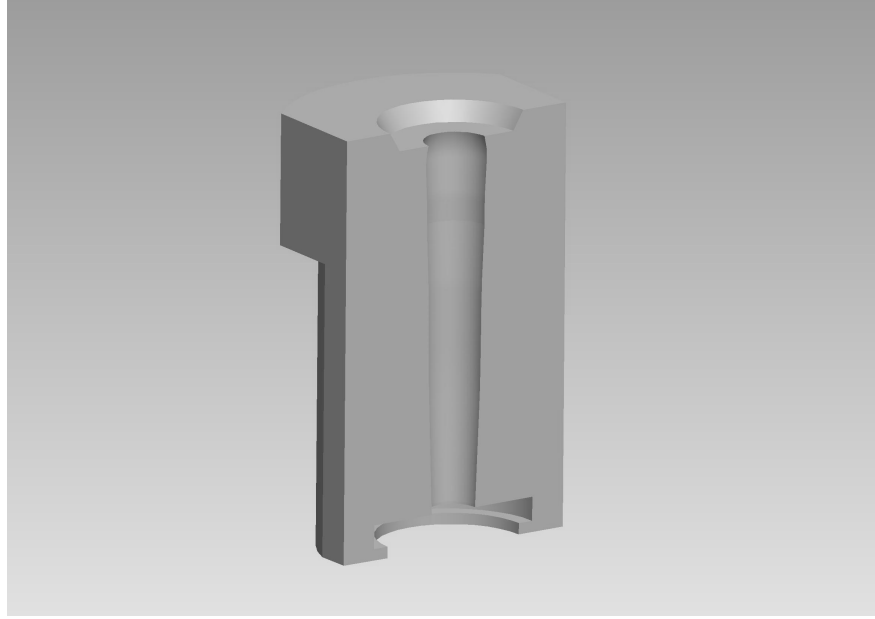
Ebişör kalıpları dişi ve erkek olmak üzere iki yarımdan meydana gelmektedir. Yapılan bu çalışmada sadece tek bir kalıp yarımı üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

Proses gerekliliklerinden dolayı ebişör kalıbında çeşitli fonksiyonel bölümler mevcuttur. Yapılan çalışmada bu bölümler; Pro/ENGINEER programından ANSYS programına geometri aktarımı, ANSYS programında sonlu elemanlara ayırma gibi kısımlarda kolaylık sağlaması açısından iptal edilmiştir. Şekil 6.2’de ANSYS programında yapılan analizlerde iptal edilen kısımlar gösterilmiştir.



Şekil 6.2. ANSYS Programında Yapılan Analizlerde İptal Edilen Kısımlar

Ebişör kalıbının gerekli sadeleştirmeler sonrasındaki hali Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



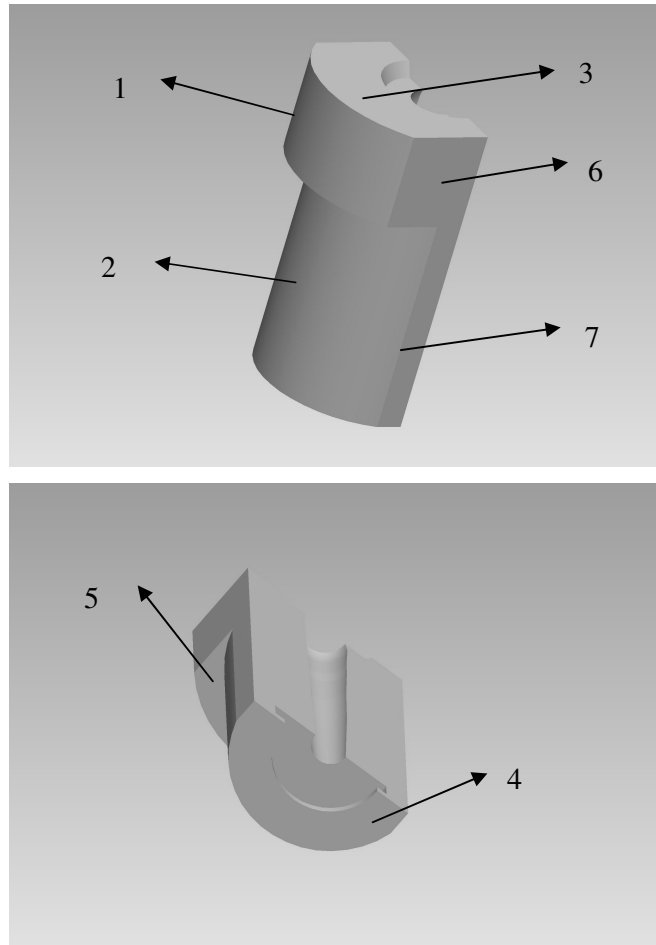
Şekil 6.4. ANSYS Programında Kullanılan Sadeleştirilmiş Model

Üretimde kullanılan ebişör kalıbının, ebişör formasının, ebişör tarafının montaj resminin ve cam ambalaj ürününün teknik resimleri Ek-1'de görülmektedir. Bu çalışmada üzerinde ısıtma deliklerinin optimizasyonunun yapıldığı ürün 275ml'lik bir şişedir.

6.2. Sisteme Etki Eden Yükler

Kalıp içinde cam damlası kalıbın şeklini aldıktan sonra, kalıba temas halinde olduğu süre boyunca kalıba ısınıyı aktarmaktadır. Kalıbın ısısının çok yükseğe çıkmaması için de dışarıdan kalıp üzerine bir soğutma havası üflenmektedir. Kompresörden IS makinesine gelen hava IS makinesinde ebişör tarafı ve finişör tarafı olmak üzere 2 kola ayrılmaktadır. Ebişör tarafına gelen hava da 10 ayrı istasyona, buradan da her bir istasyonda bulunan iki ayrı kalıba ayrılmaktadır. Kompresörden çıkan havanın tek bir kalıba gelene kadar izlediği yol boyunca belli oranlarda kayıp da olmaktadır. Kalıp yüzeyine soğutma havası olarak gelen havanın hızı ebişör kalıbının çalışma anında ölçülmüştür.

Her bir kalıba $\sim 8 \text{ m/s}$ hızında, 300°K sıcaklığında soğutma havası üflenmektedir. Bu soğutma havası kalıp yüzeylerinden taşınım ile ısı transferi gerçekleşmesini sağlar. Kalıp üzerinde soğutma havasına maruz kalan yüzeyler belirlenmiş ve bu yüzeylerde meydana gelen taşınımlara ait katsayılar hesaplanmıştır. Soğutma havası etkisinde kalan 7 adet yüzey Şekil 6.5'de gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Soğutma Havasına Maruz Kalan Yüzeyler

1. Kalıp üst çap yüzeyi
2. Kalıp alt çap yüzeyi

3. Kalıp üst yüzeyi
4. Kalıp alt yüzeyi
5. Kalıp ara yüzeyi
6. Kalıp kesme üst yüzeyi
7. Kalıp kesme alt yüzeyi

Kalıpta belirtilen yüzeylerden oluşan ısı taşınımı hesaplanırken dairesel yüzeye dik akış ve yüzeye paralel akış formüllerinden faydalanılmıştır. Şekil 6.5'te de tanımlandığı üzere kalıp üst ve alt çap yüzeylerinden olan taşınım dairesel yüzeye dik akış, diğer yüzeylerden olan taşınım ise yüzeye paralel akış formüllerinden hesaplanmaktadır. Isı taşınım katsayısını bulmak için öncelikle Reynolds sayısı hesaplanır. Reynolds sayısından faydalanarak akışın laminar veya türbülanslı akış tiplerinden hangisine uygun olduğu bulunur. Akış türü bulunduğundan sonra Bölüm 2'de tanımlanan formüller yardımıyla önce Nusselt sayısı, ardından da ısı taşınım katsayısı hesaplanır.

300°K sıcaklıkta ve atmosfer basıncında havanın bazı termodinamik özellikleri;

$$\nu = 15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \text{ (Kinematik viskozite)}$$

$$k = 0,0338 \text{ W} / \text{m}^\circ \text{K} \text{ (Isı iletim katsayısı)}$$

$$\text{Pr} = 0,707 \text{ (Prandtl sayısı)}$$

Kalıp Üst Çap Yüzeyi

$$D = 0,17 \text{ m} \text{ olduğunda;}$$

$$\text{Re}_D = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (6.1)$$

$$Re_D = \frac{u.D}{\nu} = \frac{8,0,17}{15,89.10^{-6}} = 85588,42$$

$85588,42 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (6.2)$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62.85588,42^{1/2}.0,707^{1/3}}{\left[1 + (0,4/0,707)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{85588,42}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \cong 193,822$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.D}{k} \quad (6.3)$$

$$Nu = \frac{h.D}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{D} = \frac{193,822.0,0338}{0,17} = 38,54 W / m^2 \cdot K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Alt Çap Yüzeyi

$D = 0,13m$ olduğunda;

$$Re_D = \frac{u.D}{\nu} = \frac{8,0,13}{15,89.10^{-6}} = 65449,97$$

$65449,97 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0,4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62.65449,97^{1/2} 0,707^{1/3}}{\left[1 + (0,4/0,707)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{65449,97}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \cong 162,768$$

Isı taşıyım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.D}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{D} = \frac{162,768.0,0338}{0,13} = 42,32 W / m^2 \circ K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Üst Yüzeyi

$x = L = 0,046m$ olduğunda;

$$Re_x = \frac{u.x}{\nu} \quad (6.4)$$

$$Re_x = \frac{u.x}{\nu} = \frac{8.0,046}{15,89.10^{-6}} = 23159,22$$

$23159,22 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (6.5)$$

$$Nu = 0,664.23159,22^{1/2}.0,707^{1/3} = 89,933$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.L}{k} \quad (6.6)$$

$$Nu = \frac{h.L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{L} = \frac{89,933.0,0338}{0,046} = 66,08 W / m^2 \circ K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Alt Yüzeyi

$x = L = 0,027m$ olduğunda;

$$Re_x = \frac{u.x}{\nu} = \frac{8,0,027}{15,89.10^{-6}} = 13593,45$$

$13593,45 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,664.13593,45^{1/2}.0,707^{1/3} = 68,9$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{L} = \frac{68,9.0,0338}{0,027} = 86,25 W / m^2 \circ K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Ara Yüzeyi

$x = L = 0,019m$ olduğunda;

$$Re_x = \frac{u.x}{\nu} = \frac{8,0,019}{15,89.10^{-6}} = 9565,76$$

$9565,76 \leq 10^5$ olduğundan akış laminardır. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,664.9565,76^{1/2}.0,707^{1/3} = 57,798$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{L} = \frac{57,798.0,0338}{0,019} = 102,82 W / m^2 \circ K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Kesme Üst Yüzeyi

$x = L = 0,055m$ olduğunda;

$$Re_x = \frac{u \cdot x}{\nu} = \frac{8,0,055}{15,89 \cdot 10^{-6}} = 27690,37$$

$27690,37 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,664 \cdot 27690,37^{1/2} \cdot 0,707^{1/3} = 93,338$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{93,338 \cdot 0,0338}{0,055} = 57,36 W / m^2 \cdot ^\circ K$$

olarak hesaplanır.

Kalıp Kesme Alt Yüzeyi

$x = L = 0,018m$ olduğunda;

$$Re_x = \frac{u \cdot x}{\nu} = \frac{8,0,018}{15,89 \cdot 10^{-6}} = 9062,3$$

$9062,3 \leq 10^5$ olduğundan akış laminerdir. Bu durumda Nusselt sayısı;

$$Nu = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$$

$$Nu = 0,664 \cdot 9062,3^{1/2} \cdot 0,707^{1/3} = 56,257$$

Isı taşınım katsayısı;

$$Nu = \frac{h.L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu.k}{L} = \frac{956,257.0,0338}{0,018} = 105,64 W / m^2 \circ K$$

olarak hesaplanır.

Sistemdeki bir diğer yük ise camın kalıp iç cidarlarına değdiği anda verdiği ısıdır. Camın bu andaki sıcaklığı yaklaşık olarak $700 - 750^\circ C$ arasındadır. Dolayısıyla sisteme dışarıdan gelen yükler; dış yüzeylere gelen soğutma havasının meydana getirdiği taşınım ile olan ısı transferi ve parizon ile kalıp cidarı arasında meydana gelen iletimle olan ısı transferidir.

6.3. Isıtma Delikleri Değişkenleri

Isıtma deliklerinin kalıp üzerindeki etkisi deliklerin bulunduğu yerleşimle doğrudan alakalıdır. Bu yerleşim ise ısıtma deliklerinin sayısına ve geometrisine bağlıdır. Amaç ısıtma deliklerinin yerleşimini optimize etmek olduğundan, optimizasyon değişkenleri olarak delik boyu, delik çapı, delik sayısı ve deliğin kalıp merkezine uzaklığı alınmaktadır. Üretim şartları, malzeme özellikleri ve kalıp dizayn kriterleri ışığında belirlenen değişkenlerin üst ve alt limitleri aşağıdaki gibidir.

Delik boyu l , delik çapı d , delik sayısı z ve deliğin kalıp merkezine uzaklığı r olmak üzere;

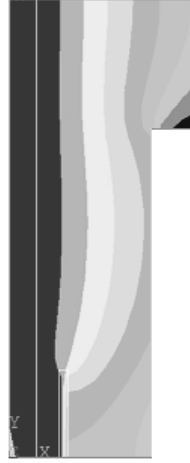
$$40 \leq l \leq 50, 4 \leq d \leq 6, 7 \leq z \leq 11, 25 \leq r \leq 30.$$

6.4. Değişkenlerin Etkisinin İncelenmesi

Belirlenen değişkenlerin her bir değerinin kullanımından çok sayıda kombinasyon oluşmaktadır. Bu kombinasyon sayısını daha az indirmek için her bir değişkenin tek başına sisteme etkisinin incelenmesi gerekir. Bu nedenle herhangi bir değişkenin tek başına etkisini incelemek için, diğer değişkenler sabit tutulup analizler gerçekleştirilir. Analizler sonucunda sistem çıktısının değişimi incelenerek, salt incelenen değişkenin sisteme etkisine bakılır. Bu şekilde analizlerde kullanılacak değişken seviyeleri belirlenmiş olur. Bu değişkenlerin etkilerini görebilmek için ANSYS programında ebişör kalıbının 2 boyutlu modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilir. Kalıp yüzeyinde oluşacak sıcaklık değerleri de, incelenen değişkenlerin değerleri değiştirildikçe farklı olacaktır. Bu analizler yapılırken kalıbın merkezinde bulunan camın her noktasındaki sıcaklık değeri 1000°K olarak tanımlanır. Kalıp yüzeyine gelen soğutma havasının hesaplanan değerleri 2 boyutlu analizlerde yük olarak programa girilir.

6.4.1. Delik Boyu Değişkeni

ANSYS programında delik çapı, delik sayısı ve deliğin kalıp merkezine uzaklığı sabit tutulup delik boyu değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.6'da delik boyu değişkeninin etkisini görmek için yapılmış termal analizlerden birinin sonucu görülmektedir.

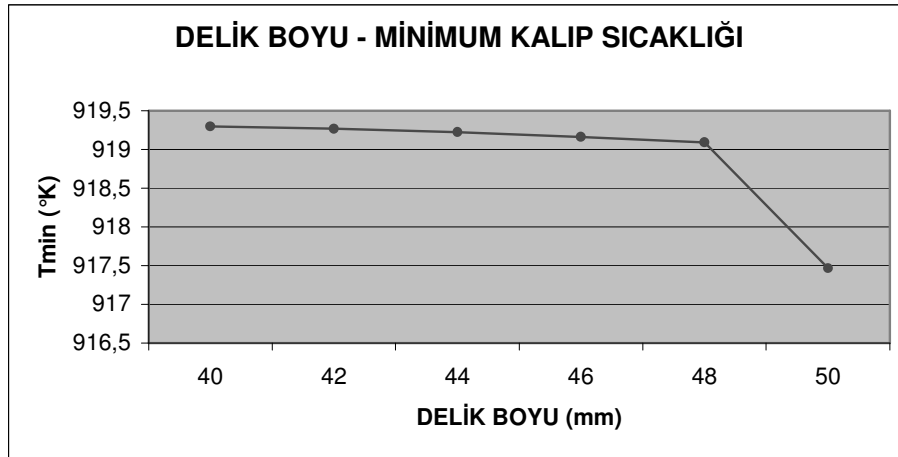


Şekil 6.6. Delik Boyu Analizi Örneği

Delik çapı 4 mm, delik sayısı 11 ve deliğin merkeze uzaklığı 25 mm olarak sabit tutulup; delik boyunun alt ve üst sınırları arasındaki tüm değerleri için yapılan analizler sonucunda aşağıdaki neticeler bulunmuştur:

Çizelge 6.1. Delik Boyu Analiz Sonuçları

DELİK BOYU (mm)	MİNİMUM KALIP SICAKLIĞI (°K)
40	919,297
42	919,268
44	919,224
46	919,163
48	919,092
50	917,466

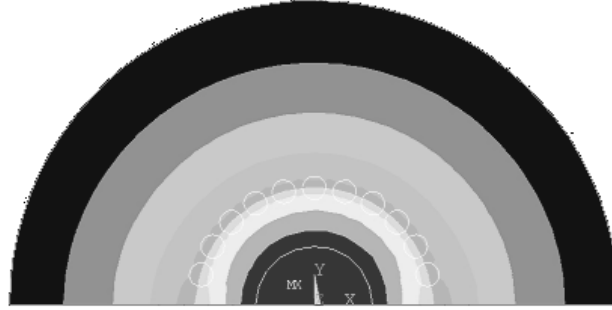


Şekil 6.7. Delik Boyu – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği

Delik boyunun etkisine minimum sıcaklık – delik boyu grafiğine bakarak karar verilebilir. Normal şartlarda delik boyu değeri yükseldikçe kalıpta oluşan minimum sıcaklık değeri doğrusala yakın bir azalma göstermektedir. Ancak delik boyu 48 mm iken bir kırılma noktası göze çarpmaktadır. Böylelikle bu değişkenin sisteme etkisinin 3. dereceden olduğu bulunmuş olur. İleride yapılacak analizlerde tüm delik boylarının denenmesi yerine 46 – 48 – 50 mm değerlerinin denenmesi tüm delik boylarını temsil etmiş olacaktır.

6.4.2. Delik Çapı Değişkeni

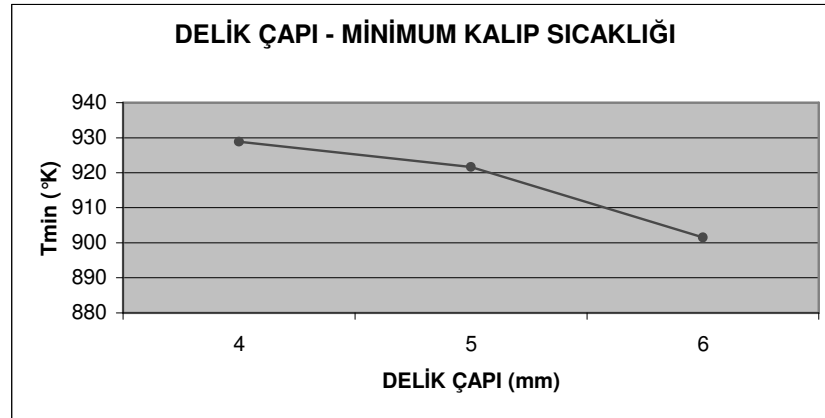
ANSYS programında diğer değişkenler sabit tutulup delik çapı değiştirilerek yapılan analizlerde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir:



Şekil 6.8. Delik Çapı Analiz Örneği

Çizelge 6.2. Delik Çapı Analiz Sonuçları

DELİK ÇAPI (mm)	MİNİMUM KALIP SICAKLIĞI (°K)
4	928,868
5	921,658
6	901,523



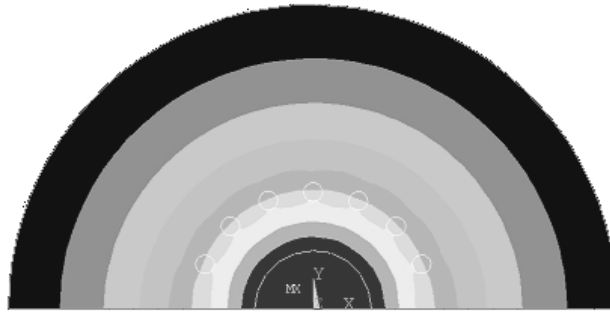
Şekil 6.9. Delik Çapı – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği

Isıtma deliklerinin çapı da delik boyunda olduğu gibi 5 mm değerinde bir kırılma gösterdiğinden delik boyunun da sisteme etkisinin 3. dereceden

olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılacak analizlerde verilen tüm delik çap değerlerinin kullanılacağını ortaya koymaktadır.

6.4.3. Delik Sayısı Değişkeni

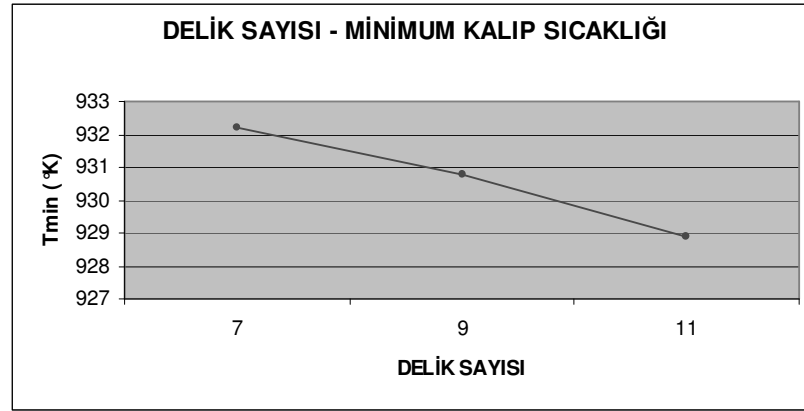
Delik sayısı değişkeninde de diğer değişkenler sabit tutulup analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler neticesinde delik sayısının tek başına minimum kalıp sıcaklığına etkisi aşağıdaki gibi gözlemlenmiştir:



Şekil 6.10. Delik Sayısı Analiz Örneği

Çizelge 6.3. Delik Sayısı Analiz Sonuçları

DELİK SAYISI	MİNİMUM KALIP SICAKLIĞI (°K)
7	932,201
9	930,756
11	928,868

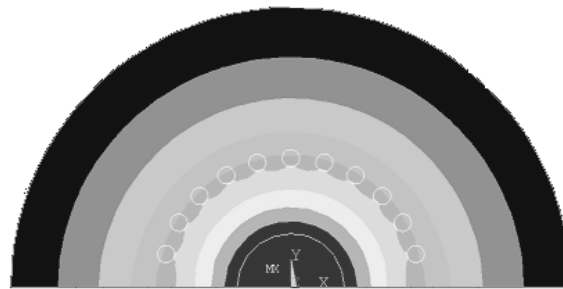


Şekil 6.11. Delik Sayısı – Minimum Kalıp Sıcaklığı Grafiği

Analizler neticesinde delik sayısının doğrusal artışı ile kalıp minimum sıcaklığının da doğrusal olarak azaldığı görülmüştür. Oluşan grafikte herhangi bir kırılma noktası göze çarpmadığından değişken etkisinin doğrusal olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda da delik sayısı değişkeninin sisteme etkisi 2. derece olarak tanımlanır ve dolayısıyla yapılacak analizlerde ilk ve son değişken değerlerinin kullanılması yeterli olacaktır.

6.4.4. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığı Değişkeni

Diğer değişken değerleri sabit tutulup deliğin kalıp merkezine olan uzaklığı değişkeninin değerleriyle yapılan analizler aşağıdaki gibi neticelenmiştir:



Şekil 6.12. Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığının Analiz Örneği

Çizelge 6.4. Deliğın Kalıp Merkezine Uzaklığının Analiz Sonuçları

DELIĞIN MERKEZE UZAKLIĞI (mm)	MİNİMUM KALIP SICAKLIĞI (°K)
25	928,868
26	929,57
27	930,165
28	930,674
29	931,113
30	931,496

**Şekil 6.13.** Deliğın Kalıp Merkezine Uzaklığı– Minimum Kalıp Sıcaklığı
Grafiğı

Deliğın kalıp merkezine uzaklığı değışkeninin etkisi de delik sayısı değışkeninde olduğı gibi doğrusal çıkmıştır. Bu nedenle deliğın merkeze olan uzaklığı değışkenlerinden en büyük ve en küçük olanının seçilip, yapılacak analizlerde kullanılması uygun görülmüştür.

6.5. ANSYS Programı İle Isıtma Deliklerinin Optimizasyonu İçin Yapılan Termal Analizler

Deneysel tasarımın ilk süreci olan değişkenlerin bireysel etkilerinin incelenmesi neticesinde delik boyu ve delik çapı değişkenlerinin etkilerinin 3. dereceden, delik sayısı ve deliğin merkeze olan uzaklığı değişkenlerinin etkilerinin de 2. dereceden olduğu görülmüştür. Buna göre değişkenlerin tüm seviyelerinden elde edilecek toplam deney kombinasyonu sayısı değişkenlerin derecelerinin çarpımına eşit olacaktır. Toplam sistem kombinasyonu sayısı $= 3^2 \times 2^2 = 36$ olmaktadır.

Dolayısıyla toplam 36 adet sistem kombinasyonu incelenerek; delik sayısı, deliğin merkeze uzaklığı, deliğin çapı, deliğin boyu değişkenleri dikkate alındığında seçilmesi gereken optimum sistem tasarımı bulunabilir.

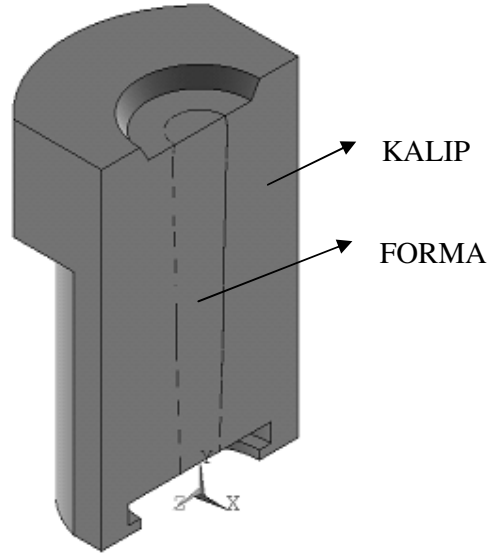
Toplam kombinasyon sayısı 36 olduğundan ve bu değer tam faktöriyel deneysel tasarımının gerçekleştirilmesini zorlaştıracak kadar büyük olmadığından, tüm değişken etki seviyelerini içerecek tam faktöriyel deneysel tasarım yapılmıştır. Yani 36 adet değişken seviyesi kombinasyonunun tamamı test edilerek, optimum sistem çıktısını sağlayan kombinasyon seçilmiştir. Kombinasyonların her biri ANSYS programında denenecek sonuçlar değerlendirilmiştir. ANSYS programında denenecek kombinasyonlar Çizelge 6.5'te görülmektedir.

Çizelge 6.5. ANSYS Programında Yapılacak Termal Analizlerdeki Değişken Değerleri

ANALİZ	A(l)	B(d)	C(z)	D(r)
1	46	4	7	25
2	46	4	7	30
3	46	4	11	25
4	46	4	11	30
5	46	5	7	25
6	46	5	7	30

7	46	5	11	25
8	46	5	11	30
9	46	6	7	25
10	46	6	7	30
11	46	6	11	25
12	46	6	11	30
13	48	4	7	25
14	48	4	7	30
15	48	4	11	25
16	48	4	11	30
17	48	5	7	25
18	48	5	7	30
19	48	5	11	25
20	48	5	11	30
21	48	6	7	25
22	48	6	7	30
23	48	6	11	25
24	48	6	11	30
25	50	4	7	25
26	50	4	7	30
27	50	4	11	25
28	50	4	11	30
29	50	5	7	25
30	50	5	7	30
31	50	5	11	25
32	50	5	11	30
33	50	6	7	25
34	50	6	7	30
35	50	6	11	25
36	50	6	11	30

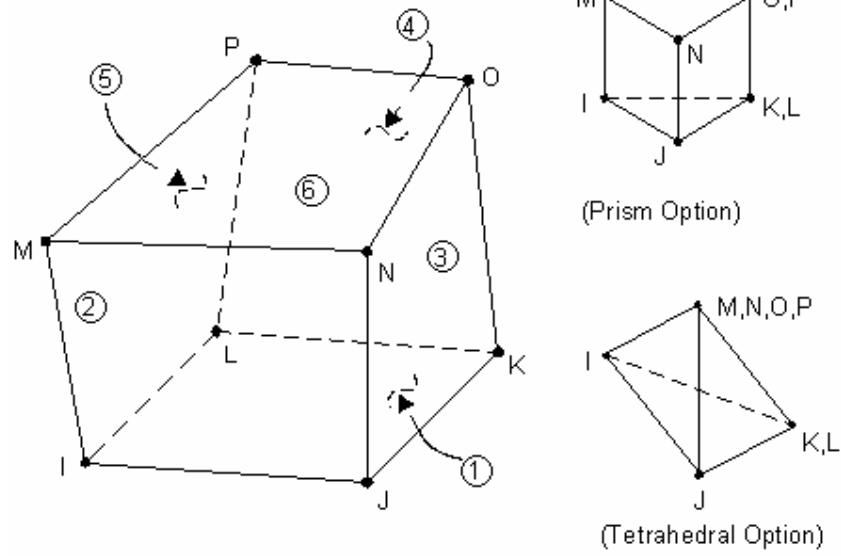
Pro/ENGINEER programında modellenen ebişör kalıbı ve ebişör forması yarımları ANSYS programına aktarılır. Şekil 6.14'te kalıp ve forma yarımları görülmektedir.



Şekil 6.14. Kalıp ve Forma Yarımları

ANSYS programına aktarılan modele kombinasyonlarda belirtilen değişken değerleri girilerek ısıtma delikleri oluşturulur. Isıtma delikleri, ebişör kalıp yarımı ve ebişör forması yarımı, programdaki *glue* ve *overlap* komutlarıyla birbirleriyle sonlu elemanlara ayırma işlemi öncesinde ilişkilendirilir. Böylelikle hacimler birbirlerini algılamış olurlar.

Analiz tipi olarak termal analiz seçildikten sonra, eleman tipi olarak 3 boyutlu termal eleman tipi olan *Solid70* seçilir. *Solid70* sadece taşınım ve iletim içeren bir analiz için yeterli gelmektedir. Şekil 6.15'te *Solid70* elemanının geometrisi görülmektedir.



Şekil 6.15. SOLİD 70 Termal Eleman Tipi Geometrisi

Eleman tipini belirledikten sonra sonlu elemanlara ayırma işlemini gerçekleştirmeden önce malzeme özellikleri girilir. Temel olarak sistemde sadece kalıp malzemesi olmakla beraber, malzemesi cam olan forma ve malzemesi hava olan ısıtma delikleri de sistemi tam ifade edebilmek açısından katı olarak modellenmiştir. Bu durum malzeme sayısını 3'e çıkarmış olur. Termal bir analizde kullanılan malzeme özellikleri yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayısıdır.

Kalıp malzemesi dökme demirin gerekli termofiziksel özellikleri;

$$YOGUNLUK = \rho = 7272 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\text{ÖZGÜL ISI} = c_p = 420 \text{ J} / \text{kg}^\circ \text{K}$$

$$\text{ISI İLETİM KATSAYISI} = k = 45 \text{ W} / \text{m}^\circ \text{K}$$

Camın gerekli termofiziksel özellikleri;

$$YOGUNLUK = \rho = 2720 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\text{ÖZGÜLİSİ} = c_p = 840 \text{ J} / \text{kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{ISI İLETİM KATSAYISI} = k = 0,78 \text{ W} / \text{m}^\circ\text{K}$$

Havanın gerekli termofiziksel özellikleri;

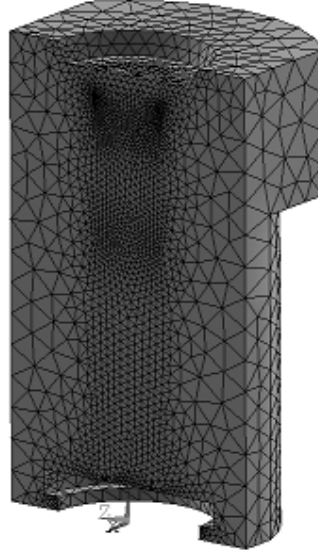
$$YOGUNLUK = \rho = 1,1614 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\text{ÖZGÜLİSİ} = c_p = 1007 \text{ J} / \text{kg}^\circ\text{K}$$

$$\text{ISI İLETİM KATSAYISI} = k = 0,0338 \text{ W} / \text{m}^\circ\text{K}$$

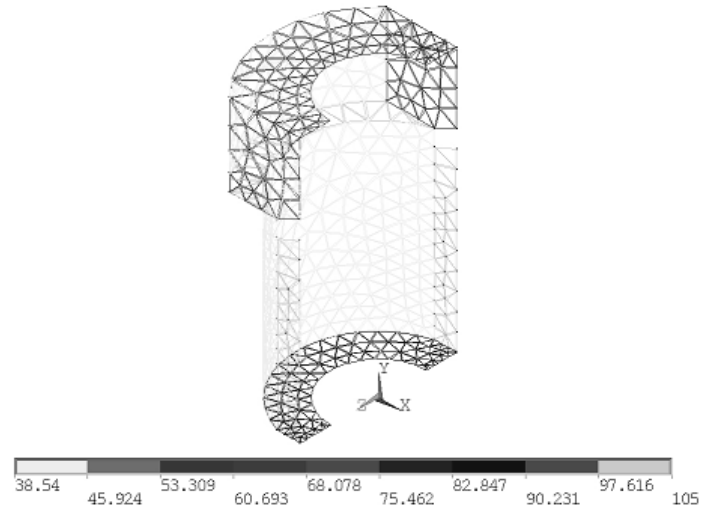
Malzeme özellikleri girilen hacimler teker teker sonlu elemanlara ayrılır. Sonlu elemanlara ayırma işlemi modelin dairesel geometriye sahip olmasından dolayı serbest şekilde yapılır. Bunun için de *free mesh* komutu seçilir.





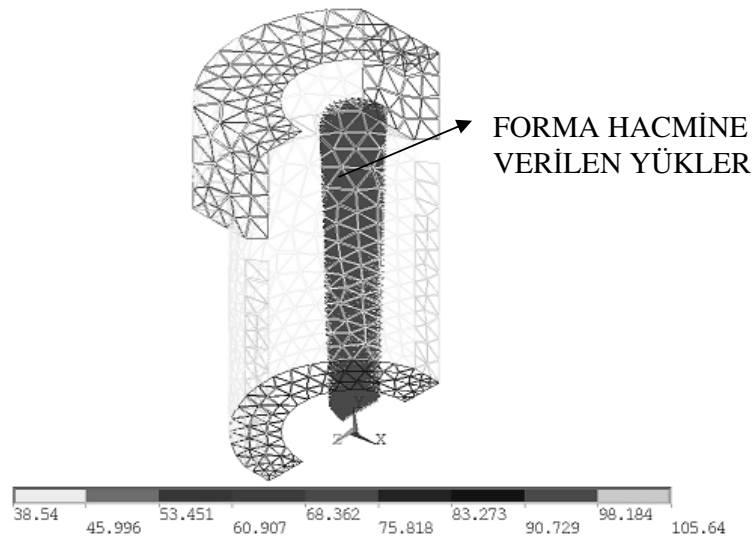
Şekil 6.16. Elemanlara Ayrılmış (Mesh Edilmiş) Kalıp, Forma ve Isıtma Delikleri

Sonlu elemanlara ayrılan hacimlere daha önceden hesaplanan yükler girilir. Kalıbın dış yüzeyine etki eden soğutma havasının yarattığı yüzeylerden taşınılma olan ısı transferi ve camın kalıp iç cidarlarına teması ile gerçekleşen yüzeylerden iletimle olan ısı transferi sistemde tanımlanması gereken yüklerdir. Hesaplanan ısı taşınım katsayıları ile yüzeylere taşınım yükleri verilir.



Şekil 6.17. Kalıp Yüzeylerine Uygulanan Taşınım Yükleri

Dış yüzeylere uygulanan yüklerden sonra sisteme cam sıcaklığını vermek; ebişör forması hacminin içinde kalan her noktaya aynı sıcaklığı vermekle mümkün olmaktadır. Forma hacminin her noktasına 1000°K sıcaklık verilir.



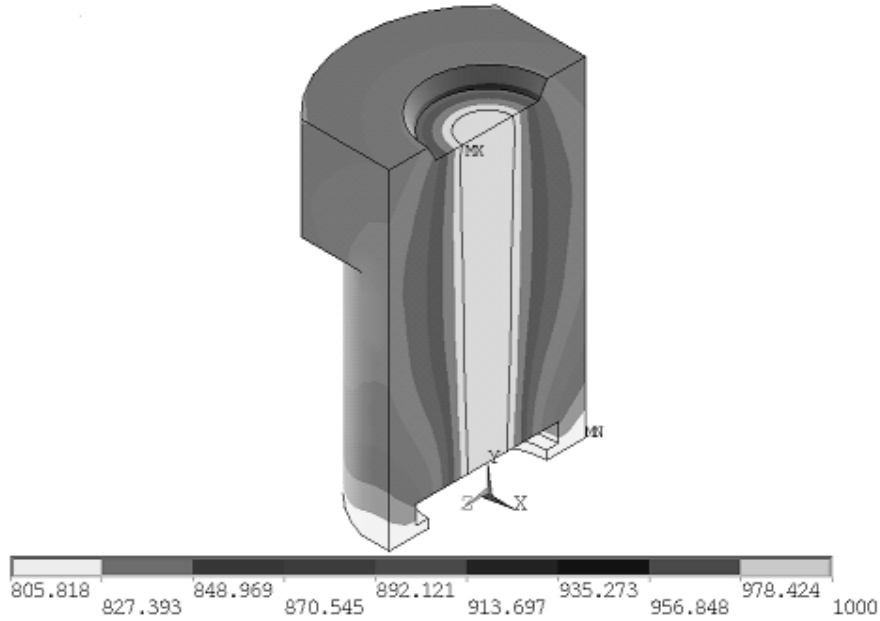
Şekil 6.18. Kalıba Etki Eden Diğer Yükler

Analizler ANSYS programında yapıldıktan sonra elde edilen minimum kalıp sıcaklığı değerleri Çizelge 6.6'da görülmektedir.

Çizelge 6.6. ANSYS Programında Yapılan Termal Analizlerin Sonuçları

ANALİZ	A (l)	B (d)	C (z)	D (r)	MİNİMUM SICAKLIK (°K)
1	46	4	7	25	821,664
2	46	4	7	30	822,558
3	46	4	11	25	819,418
4	46	4	11	30	820,921
5	46	5	7	25	819,757
6	46	5	7	30	821,112
7	46	5	11	25	814,894
8	46	5	11	30	817,868
9	46	6	7	25	817,308
10	46	6	7	30	819,29
11	46	6	11	25	806,45
12	46	6	11	30	813,928
13	48	4	7	25	821,699
14	48	4	7	30	822,562
15	48	4	11	25	819,331
16	48	4	11	30	820,882
17	48	5	7	25	819,928
18	48	5	7	30	821,04
19	48	5	11	25	814,919
20	48	5	11	30	818,152
21	48	6	7	25	817,064
22	48	6	7	30	819,216
23	48	6	11	25	805,853
24	48	6	11	30	813,708
25	50	4	7	25	821,588
26	50	4	7	30	822,469
27	50	4	11	25	818,875
28	50	4	11	30	820,854
29	50	5	7	25	819,827
30	50	5	7	30	821,104
31	50	5	11	25	814,825
32	50	5	11	30	818,15
33	50	6	7	25	816,895
34	50	6	7	30	819,124
35	50	6	11	25	805,818
36	50	6	11	30	813,638

Yapılan analizler neticesinde 35. kombinasyonun kalıptaki minimum sıcaklığın en düşük değerini aldığı kombinasyon olduğu görülür. Bu da 35. kombinasyonun ısıtma delikleri için optimum değişken değerlerini vermesi anlamına gelmektedir. Sonuç olarak ANSYS programında yapılan analizler neticesinde kalıp merkezine uzaklıkları 25 mm. olan 6 mm. çaplı 50 mm. boyunda 11 adet ısıtma deliğinin optimum çözüm olduğu görülür.



Şekil 6.19. Optimum Delik Kombinasyonu

ANSYS programında ısıtma deliklerinin termal optimizasyonu değişkenler parametrik olarak tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde sadece değişken değerleri değiştirilerek analizleri gerçekleştirmek *log file* dosyası oluşturmak yoluyla mümkün olmaktadır. Isıtma deliklerinin termal optimizasyonu analizi için oluşturulan *log file* dosyası Ek 2'te görülmektedir.

6.6. ANSYS Programı ile Bulunan Değerlerin Doğrulanması

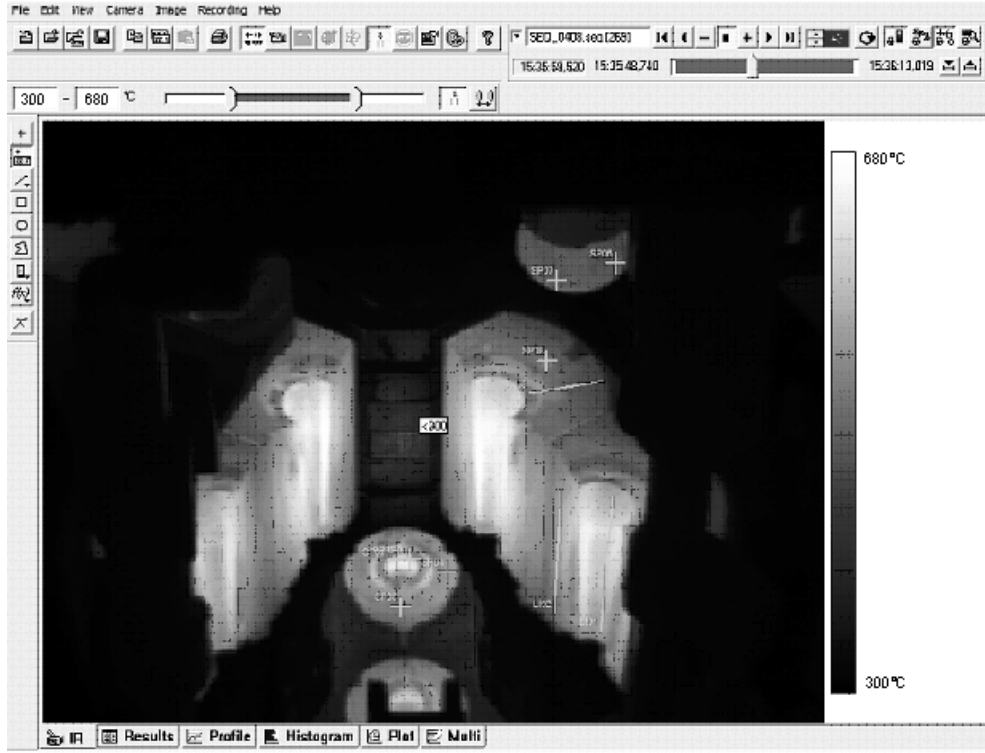
ANSYS programı ile yapılan analizler neticesinde bulunan minimum kalıp sıcaklık değerlerinin, gerçekte çalışan bir ebişör kalıbını ne kadar temsil ettiğini görmek amacıyla, ebişör kalıbının normal çalışma şartları altındayken termal kamerayla görüntüsü alınmıştır.

Termal kamera kullanımıyla yapılan ebişör kalıbı çekimleri neticesinde kalıp üzerinde belirlenen sıcaklık değerleri bazı etkiler sebebiyle normal şartlarda ulaşılması gereken sıcaklık değerlerinden bir miktar sapma göstermiştir. Bu etkenler; ebişör kalıbı içinden çıkan parizonun sahip olduğu yüksek sıcaklık değeri neticesinde ısıma miktarındaki fazlalığın termal kameranın yaptığı ölçümün değerini bir miktar değiştirmesi; iki ebişör kalıbının yan yana çalışmasından dolayı birbirlerinin sıcaklık değerlerini arttırmaları ve sistemin, sürekli çalışmaktan dolayı oluşmuş olan bir rejim sıcaklığına sahip olmasıdır.

ANSYS programında yapılan analizler yukarıda bahsedilen etkilerin olmadığı varsayılarak gerçekleştirildiğinden termal kamerayla elde edilen görüntülerdeki sıcaklık değerleri ANSYS programı ile yapılan analizler neticesinde elde edilen sıcaklık değerlerinden bir miktar daha düşüktür. Çünkü yapılan analizlerde ebişör kalıbının simetrik yarımlarından birisi kullanılmış, başka bir ebişör kalıbının etkisi incelemeye dahil edilmemiş, parizonun ısımasının termal kameraya etkisi sisteme girdi olarak girilmemiş ve sistem rejim sıcaklığı belirtilmemiştir.

Termal kamerayla yardımıyla elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 6.20'de görülmektedir. Buna göre, ebişör kalıbında oluşan maksimum sıcaklık değeri yaklaşık 680°C (953°K) civarında gözlemlenmiştir. ANSYS programında oluşan maksimum sıcaklık değeriyle yaklaşık 50°K sıcaklık farkı

görülmektedir. Kalıp minimum sıcaklığı da termal kamera yapılan ölçümlerde 495°C (768°K), ANSYS programında yapılan analizler neticesinde ise yaklaşık 547°C (820°K) olarak bulunmuştur. Belirtilen etkiler göz önünde bulundurulduğunda yapılan analizlerin gerçek sistemi doğru temsil ettiği görülmektedir.



Şekil 6.20. Termal Kamerayla Elde Edilen Kalıp Sıcaklık Değerleri

6.7. Regresyon Denkleminin Önerilmesi ve Deneylerin Gerçekleştirilmesi

İki faktörün 3, iki faktörün 2 seviyeli olarak seçildiği sistemde, faktörlerin sistem çıktısına göre ilişkisini incelemek için aşağıdaki regresyon modeli önerilmiştir:

$$\begin{aligned}
y = & \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_5 A^2 + \beta_6 B^2 + \beta_7 C^2 + \beta_8 D^2 + \beta_9 AB + \beta_{10} AC + \\
& \beta_{11} AD + \beta_{12} BC + \beta_{13} BD + \beta_{14} CD + \beta_{15} A^2 B + \beta_{16} A^2 C + \beta_{17} A^2 D + \beta_{18} AB^2 + \beta_{19} B^2 C + \\
& \beta_{20} B^2 D + \beta_{21} AC^2 + \beta_{22} BC^2 + \beta_{23} C^2 D + \beta_{24} AD^2 + \beta_{25} BD^2 + \beta_{26} CD^2 + \beta_{27} A^2 B^2 + \\
& \beta_{28} A^2 C^2 + \beta_{29} A^2 D^2 + \beta_{30} B^2 C^2 + \beta_{31} B^2 D^2 + \beta_{32} C^2 D^2
\end{aligned} \quad (6.7)$$

6.7.1. Verilerin Analizi

Verileri analiz ederken bağımsız değişken sayısı 1'den fazla olduğundan değişkenlerin etkilerinin analizi için çoklu ANOVA tablosu oluşturulacaktır.

6.7.1.1. Çoklu ANOVA Tablosunun Oluşturulması

ANOVA tablosunda ana etkiler ile doğrusal ve karesel tüm etkileşimler için SS (kareler toplamı) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada ana etkiler ile doğrusal etkileşimlere ait SS değerleri incelenmesi, faktörlerin etkileri ile ilgili karar verme açısından yeterlidir.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \sum_{m=1}^n y_{ijklm}^2 - \frac{y_{....}^2}{abcdn} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned}
SS_T = & [(821,664)^2 + (822,558)^2 + ... + (813,638)^2] - \\
& \frac{(821,664 + 822,558 + ... + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} = 688,63969
\end{aligned}$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{y_{i...}^2}{bcdn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} \quad (6.9)$$

$$SS_A = \frac{(9815,168)^2 + (9814,354)^2 + (9813,167)^2}{3 \times 2 \times 2 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} = 0,168766$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{y_{.j..}^2}{acdn} - \frac{y_{.....}^2}{abcdn} \quad (6.10)$$

$$SS_B = \frac{(9852,821)^2 + (9821,576)^2 + (9768,292)^2}{3 \times 2 \times 2 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} = 304,460737$$

$$SS_C = \sum_{k=1}^c \frac{y_{..k.}^2}{abdn} - \frac{y_{.....}^2}{abcdn} \quad (6.11)$$

$$SS_C = \frac{(14764,21)^2 + (14678,48)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} = 204,113607$$

$$SS_D = \sum_{l=1}^d \frac{y_{...l}^2}{abcn} - \frac{y_{.....}^2}{abcdn} \quad (6.12)$$

$$SS_D = \frac{(14696,11)^2 + (14746,58)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} = 70,736510$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{y_{ij..}^2}{cdn} - \frac{y_{.....}^2}{abcdn} - SS_A - SS_B \quad (6.13)$$

$$SS_{AB} = \frac{(3284,561)^2 + (3273,631)^2 + (3256,976)^2 + ...(3255,475)^2}{2x2x1} - \frac{(821,664 + 822,558 + ... + 813,638)^2}{3x3x2x2x1} - 0,169 - 304,461 = 0,249276$$

$$SS_{AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{y_{i.k.}^2}{bdn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} - SS_A - SS_C \quad (6.14)$$

$$SS_{AC} = \frac{(4921,689)^2 + (4893,479)^2 + ... + (4892,16)^2}{3x2x1} - \frac{(821,664 + 822,558 + ... + 813,638)^2}{3x3x2x2x1} - 0,169 - 204,114 = 0,017927$$

$$SS_{AD} = \sum_{i=1}^a \sum_{l=1}^d \frac{y_{i..l}^2}{bcn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} - SS_A - SS_D \quad (6.15)$$

$$SS_{AD} = \frac{(4899,491)^2 + (4915,677)^2 + ... + (4915,339)^2}{3x2x1} - \frac{(821,664 + 822,558 + ... + 813,638)^2}{3x3x2x2x1} - 0,169 - 70,736 = 0,073529$$

$$SS_{BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{y_{.jk.}^2}{adn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} - SS_B - SS_C \quad (6.16)$$

$$SS_{BC} = \frac{(4932,54)^2 + (4920,281)^2 + ... + (4859,395)^2}{3x2x1} - \frac{(821,664 + 822,558 + ... + 813,638)^2}{3x3x2x2x1} - 304,461 - 204,114 = 60,454117$$

$$SS_{BD} = \sum_{j=1}^b \sum_{l=1}^d \frac{y_{.jl}^2}{acn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} - SS_B - SS_D \quad (6.17)$$

$$SS_{BD} = \frac{(4922,575)^2 + (4930,246)^2 + \dots + (4898,904)^2}{3 \times 2 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} - 304,461 - 70,736 = 21,457379$$

$$SS_{CD} = \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^d \frac{y_{..kl}^2}{abn} - \frac{y_{....}^2}{abcdn} - SS_C - SS_D \quad (6.18)$$

$$SS_{CD} = \frac{(7375,73)^2 + (7388,47)^2 + \dots + (7358,101)^2}{3 \times 3 \times 1} - \frac{(821,664 + 822,558 + \dots + 813,638)^2}{3 \times 3 \times 2 \times 2 \times 1} - 204,114 - 70,736 = 17,323631$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_A = a - 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_B = b - 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_C = c - 1 = 1$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_D = d - 1 = 1$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{AB} = (a - 1) \times (b - 1) = 2 \times 2 = 4$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{AC} = (a - 1) \times (c - 1) = 2 \times 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{AD} = (a - 1) \times (d - 1) = 2 \times 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{BC} = (b - 1) \times (c - 1) = 2 \times 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{BD} = (b - 1) \times (d - 1) = 2 \times 1 = 2$$

$$(\text{serbestlik derecesi})_{CD} = (c - 1) \times (d - 1) = 1 \times 1 = 1.$$

$$(\text{kareler ortalaması})_X = (\text{kareler toplamı})_X / (\text{serbestlik derecesi})_X$$

X değişkeni için $F_0 = (\text{kareler ortalaması})_X / (\text{kareler ortalaması})_{\text{HATA}}$ olmak üzere;

Çizelge 6.7. Faktörler ve Etkileşimlerine Ait ANOVA Tablosu

Değişk. kaynağı	Kareler Toplamı (SS)	Serb. Derc.	Kareler Ort.	F0
A	0,1687657	2	0,084383	0,140825639041
B	304,46074	2	152,2304	254,055598044875
C	204,11361	1	204,1136	340,642967467173
D	70,73651	1	70,73651	118,051388877973
AB	0,2492758	4	0,062319	0,104003403630
AC	0,0179271	2	0,008964	0,014959129404
AD	0,0735292	2	0,036765	0,061356010136
BC	60,454117	2	30,22706	50,445607631552
BD	21,454379	2	10,72719	17,902489462820
CD	17,323631	1	17,32363	28,911219062543
Hata	9,587216	16	0,599201	
Toplam	688,63969	35		

$$SS_R = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{BC} + SS_{AC} \quad (6.19)$$

olmak üzere;

Çizelge 6.8. Regresyona Ait ANOVA Tablosu

Değişk. kaynağı	Kareler Toplamı (SS)	Serb. Derc.	Kareler Ort.	F0
Regresyon	679,05248	19	35,7396	59,64543478
Hata	9,587216	16	0,599201	
Toplam	688,63969	35		

6.7.1.2. Faktörler ve Etkileşimlerine Ait ANOVA Tablosu Hipotezleri

$$H_0: \beta_i = 0 \quad i=1, \dots, 18$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \quad i=1, \dots, 18 \text{ olmak üzere;}$$

Tüm hipotezler için %95 güvenilirlik seviyesi baz alınarak A faktörü için;

$$F_{kr} = F_{0.05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 0,141$$

$F_0 < F_{kr}$ olduğundan H_0 reddedilemez.

B faktörü için;

$$F_{kr} = F_{0.05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 254,05$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

C faktörü için;

$$F_{kr} = F_{0.05,1,16} = 4,49 \quad F_0 = 340,64$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

D faktörü için;

$$F_{kr} = F_{0.05,1,16} = 4,49 \quad F_0 = 118,05$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

AB etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0.05,4,16} = 3,01 \quad F_0 = 0,104$$

$F_0 < F_{kr}$ olduğundan H_0 reddedilemez.

AC etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0,05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 0,015$$

$F_0 < F_{kr}$ olduğundan H_0 reddedilemez.

AD etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0,05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 0,061$$

$F_0 < F_{kr}$ olduğundan H_0 reddedilemez.

BC etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0,05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 50,44$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

BD etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0,05,2,16} = 3,63 \quad F_0 = 17,90$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

BD etkileşimi için;

$$F_{kr} = F_{0,05,1,16} = 4,49 \quad F_0 = 28,91$$

$F_0 > F_{kr}$ olduğundan H_1 reddedilemez.

6.7.2. Regresyona Ait ANOVA Tablosu Hipotezleri

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_{32} = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0 \quad \text{en azından biri için} \quad i=1, \dots, 32 \text{ olmak üzere;}$$

Hipotez için %95 güvenilirlik seviyesi baz alınarak;

$$F_{kr} = F_{0.05, 19, 16} = 2,294 \quad F_0 = 59,64$$

$$F_0 > F_{kr} \text{ olduğundan } H_1 \text{ reddedilemez.}$$

6.7.3. Regresyon Denklemi Katsayılarının Hesaplanması

En küçük kareler yöntemine uyacak şekilde, önerilen regresyon denklemi;

$$y = \beta_0' + \beta_1(A - \bar{A}) + \beta_2(B - \bar{B}) + \dots + \beta_{32}(C^2, D^2 - \overline{C^2 D^2}) + \varepsilon \quad (6.20)$$

şeklinde yazıldığında;

$$Y = \begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ \vdots \\ \vdots \\ Y36 \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta1 \\ \beta2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ B36 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & (A1-Aort) & (B1-Bort) & . & . \\ 1 & (A2-Aort) & (B2-Bort) & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ 1 & (A36-Aort) & (B36-Bort) & . & . \end{bmatrix}$$

iken $Y = X\beta + \varepsilon$ ve $\beta = (X^T X)^{-1} (X^T Y)$ olmak üzere elde edilen X,Y, β matrisleri aşağıda görülmektedir.

821,7	$\beta =$	817,9
822,6		-15328,4
819,4		-899,8
820,9		2926918760380240,0
819,8		-191013293257396,0
821,1		161,3
814,9		97,8
817,9		-162606597798909,0
817,3		3472968968318,9
819,3		24,0
806,5		6,0
813,9		-9,4
821,7		-18,8
822,6		15,5
819,3		7,2
820,9		-0,2
819,9		0,0
821		0,0
814,9		-2,1
818,2		-5,3
817,1		-1,4
819,2		-0,2
805,9		1,4
813,7		-0,4
821,6		0,1
822,5		-0,3
818,9		-0,1
820,9		0,0
819,8		0,0
821,1		0,0
814,8		0,3
818,2		0,0
816,9		0,0
819,1		0,0
805,8		0,0
813,6		0,0

	A	B	C	D	A2	B2	C2	D2	AB	AC	AD	BC	BD	CD	A2B	A2C	A2D	AB2	B2C	B2D	AC2	BC2	C2D	AD2	BD2	CD2	A2B2	A2C2	A2D2	B2C2	B2D2	C2D2	
1	-2	-1	-2	-2.5	-190.7	-9.7	-36	-137.5	-56	-110	-170	-17	-37.5	-72.5	-3083.3	-5948.0	-10533.3	-496	-119	-306	-1826	-229	-88	-760	-1313	-2488	-25348	-92383	-436333	-1398	-9571	-34188	
1	-2	-1	-2	2.5	-190.7	-9.7	-36	137.5	-56	-110	60	-17	-17.5	-37.5	-3083.3	-5948.0	46.7	-496	-119	-226	-1826	-229	-88	4800	-213	-563	-25348	-92383	145567	-1398	-5171	-20713	
1	-2	-1	2	-2.5	-190.7	-9.7	36	-137.5	-56	74	-170	-1	-37.5	27.5	-3083.3	2516.0	-10533.3	-496	-55	-306	1486	59	688	-760	-1313	13	-25348	-9969	-436333	-246	-9571	10813	
1	-2	-1	2	2.5	-190.7	-9.7	36	137.5	-56	74	60	-1	-17.5	82.5	-3083.3	2516.0	46.7	-496	-55	-226	1486	59	1293	4800	-213	3038	-25348	-9969	145567	-246	-5171	44088	
1	-2	0	-2	-2.5	-190.7	-0.7	-36	-137.5	-10	-110	-170	-10	-12.5	-72.5	-963.3	-5948.0	-10533.3	-82	-56	-81	-1826	-180	-1113	-760	-888	-2488	-6304	-92383	-436333	-957	-3946	-34188	
1	-2	0	-2	2.5	-190.7	-0.7	-36	137.5	-10	-110	60	-10	-12.5	-72.5	-963.3	-5948.0	46.7	-82	-56	44	-1826	-180	-88	4800	-888	-563	-6304	-92383	145567	-957	-2929	-20713	
1	-2	0	2	-2.5	-190.7	-0.7	36	-137.5	-10	74	-170	10	-12.5	27.5	-963.3	2516.0	-10533.3	-82	44	-81	1486	180	688	-760	-888	13	-6304	-9969	-436333	843	-3946	10813	
1	-2	0	2	2.5	-190.7	-0.7	36	137.5	-10	74	60	10	-12.5	82.5	-963.3	2516.0	46.7	-82	44	44	1486	180	1293	4800	-888	3038	-6304	-9969	145567	843	-2929	44088	
1	-2	1	-2	-2.5	-190.7	10.3	-36	-137.5	36	-110	-170	-3	12.5	-72.5	1162.7	-5948.0	-10533.3	424	21	194	-1826	-131	-1113	-760	-63	-2488	16972	-92383	-436333	-418	-2929	-34188	
1	-2	1	-2	2.5	-190.7	10.3	-36	137.5	36	-110	60	-3	42.5	-37.5	1162.7	-5948.0	46.7	424	21	374	-1826	-131	-88	4800	1598	-563	16972	-92383	145567	-418	12829	-20713	
1	-2	1	2	-2.5	-190.7	10.3	36	-137.5	36	74	-170	21	12.5	27.5	1162.7	2516.0	-10533.3	424	165	194	1486	301	688	-760	-63	13	16972	-9969	-436333	2174	-2929	10813	
1	-2	1	2	2.5	-190.7	10.3	36	137.5	36	74	60	21	42.5	82.5	1162.7	2516.0	46.7	424	165	374	1486	301	1293	4800	1598	3038	16972	-9969	145567	2174	12829	44088	
1	0	-1	-2	-2.5	-2.7	-9.7	-36	-137.5	-48	-96	-120	-17	-37.5	-72.5	-2317.3	-4632.0	-5833.3	-464	-119	-306	-1728	-229	-88	-1113	-6800	-1313	-2488	-22340	-83171	-318833	-1398	-9571	-34188
1	0	-1	-2	2.5	-2.7	-9.7	-36	137.5	-48	-96	120	-17	-17.5	-37.5	-2317.3	-4632.0	5886.7	-464	-119	-226	-1728	-229	-88	6800	-213	-563	-22340	-83171	314767	-1398	-5171	-20713	
1	0	-1	2	-2.5	-2.7	-9.7	36	-137.5	-48	96	-120	-1	-37.5	27.5	-2317.3	-4584.0	-5833.3	-464	-55	-306	1728	59	688	-6800	-1313	13	-22340	-82717	-318833	-246	-9571	10813	
1	0	-1	2	2.5	-2.7	-9.7	36	137.5	-48	96	120	-1	-17.5	82.5	-2317.3	-4584.0	5886.7	-464	-55	-226	1728	59	1293	6800	-213	3038	-22340	-82717	314767	-246	-5171	44088	
1	0	0	-2	-2.5	-2.7	-0.7	-36	-137.5	0	-96	-120	-10	-12.5	-72.5	-13.3	-4632.0	-5833.3	-32	-56	-81	-1728	-180	-88	-1113	-6800	-888	-2488	-1604	-83171	-318833	-957	-3946	-34188
1	0	0	-2	2.5	-2.7	-0.7	-36	137.5	0	-96	120	-10	-12.5	-72.5	-13.3	-4632.0	5886.7	-32	-56	44	-1728	-180	-88	6800	-888	-563	-1604	-83171	314767	-957	-2929	-20713	
1	0	0	2	-2.5	-2.7	-0.7	36	-137.5	0	96	-120	10	-12.5	27.5	-13.3	-4584.0	-5833.3	-32	44	-81	1728	180	688	-6800	-888	13	-1604	-82717	-318833	843	-3946	10813	
1	0	0	2	2.5	-2.7	-0.7	36	137.5	0	96	120	10	-12.5	82.5	-13.3	-4584.0	5886.7	-32	44	44	1728	180	1293	6800	-888	3038	-1604	-82717	314767	843	-2929	44088	
1	0	1	-2	-2.5	-2.7	10.3	-36	-137.5	48	-96	-120	-3	12.5	-72.5	2290.7	-4632.0	-5833.3	496	21	194	-1728	-131	-1113	-6800	-63	-2488	23740	-83171	-318833	-418	-2929	-34188	
1	0	1	-2	2.5	-2.7	10.3	-36	137.5	48	-96	120	-3	42.5	-37.5	2290.7	-4632.0	5886.7	496	21	374	-1728	-131	-88	6800	1598	-563	23740	-83171	314767	-418	12829	-20713	
1	0	1	2	-2.5	-2.7	10.3	36	-137.5	48	96	-120	21	12.5	27.5	2290.7	-4584.0	-5833.3	496	165	194	1728	301	688	-6800	-63	13	23740	-82717	-318833	2174	-2929	10813	
1	0	1	2	2.5	-2.7	10.3	36	137.5	48	96	120	21	42.5	82.5	2290.7	-4584.0	5886.7	496	165	374	1728	301	1293	6800	1598	3038	23740	-82717	314767	2174	12829	44088	
1	2	-1	-2	-2.5	193.3	-9.7	-36	-137.5	-40	-82	-70	-17	-37.5	-72.5	-1533.3	-3260.0	-933.3	-432	-119	-306	-1630	-229	-88	-1113	-5350	-1313	-2488	-19204	-73567	-196333	-1398	-9571	-34188
1	2	-1	-2	2.5	193.3	-9.7	-36	137.5	-40	-82	180	-17	-17.5	-37.5	-1533.3	-3260.0	11566.7	-432	-119	-226	-1630	-229	-88	8400	-213	-563	-19204	-73567	491167	-1398	-5171	-20713	
1	2	-1	2	-2.5	193.3	-9.7	36	-137.5	-40	118	-70	-1	-37.5	27.5	-1533.3	6740.0	-933.3	-432	-55	-306	1970	59	688	-5350	-1313	13	-19204	-106433	-196333	-246	-9571	10813	
1	2	-1	2	2.5	193.3	-9.7	36	137.5	-40	118	180	-1	-17.5	82.5	-1533.3	6740.0	11566.7	-432	-55	-226	1970	59	1293	8400	-213	3038	-19204	-106433	491167	-246	-5171	44088	
1	2	0	-2	-2.5	193.3	-0.7	-36	-137.5	10	-82	-70	-10	-12.5	-72.5	-966.7	-3260.0	-933.3	18	-56	-81	-1630	-180	-1113	-5350	-888	-2488	-3296	-73567	-196333	-957	-3946	-34188	
1	2	0	-2	2.5	193.3	-0.7	-36	137.5	10	-82	180	-10	-12.5	-72.5	-966.7	-3260.0	11566.7	18	-56	44	-1630	-180	-88	8400	-888	-563	-3296	-73567	491167	-957	-2929	-20713	
1	2	0	2	-2.5	193.3	-0.7	36	-137.5	10	118	-70	10	-12.5	27.5	-966.7	6740.0	-933.3	18	44	-81	1970	180	688	-5350	-888	13	-3296	-106433	-196333	843	-3946	10813	
1	2	0	2	2.5	193.3	-0.7	36	137.5	10	118	180	10	-12.5	82.5	-966.7	6740.0	11566.7	18	44	44	1970	180	1293	8400	-888	3038	-3296	-106433	491167	843	-2929	44088	
1	2	1	-2	-2.5	193.3	10.3	-36	-137.5	60	-82	-70	-3	12.5	-72.5	3466.7	-3260.0	-933.3	568	21	194	-1630	-131	-1113	-5350	-63	-2488	30796	-73567	-196333	-418	-2929	-34188	
1	2	1	-2	2.5	193.3	10.3	-36	137.5	60	-82	180	-3	42.5	-37.5	3466.7	-3260.0	11566.7	568	21	374	-1630	-131	-88	8400	1598	-563	30796	-73567	491167	-418	12829	-20713	
1	2	1	2	-2.5	193.3	10.3	36	-137.5	60	118	-70	21	12.5	27.5	3466.7	6740.0	-933.3	568	165	194	1970	301	688	-5350	-63	13	30796	-106433	-196333	2174	-2929	10813	
1	2	1	2	2.5	193.3	10.3	36	137.5	60	118	180	21	42.5	82.5	3466.7	6740.0	11566.7	568	165	374	1970	301	1293	8400	1598	3038	30796	-106433	491167	2174	12829	44088	

X=

6.8. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

ANSYS programı yardımıyla gerçekleştirilen termal analizler ısıtma deliklerinin optimum yerleşimini ortaya çıkarmıştır. Kalıpta oluşan minimum sıcaklık hedef fonksiyonu olarak alınarak gerçekleştirilen analizler neticesinde, elde edilen optimum kombinasyondaki ısıtma deliklerinin değişken değerleri şu şekildedir;

Delik Boyu $\Rightarrow l = 50mm$

Delik Çapı $\Rightarrow d = 6mm$

Delik Sayısı $\Rightarrow z = 11$

Deliğin Kalıp Merkezine Uzaklığı $\Rightarrow r = 25mm$

Analizler neticesinde elde edilen değerler termal kamera verileriyle doğrulanmıştır ve uygun bir regresyon denklemi önerilerek verilerin regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

ANOVA tabloları sonuçlarında, A faktörünün ve AB, AC, AD etkileşimlerinin etkisi için oluşturulan tüm H_0 hipotezleri reddedilememiştir. Buna göre A faktörünün ve AB, AC, AD etkileşimlerinin sistem çıktısına etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Bununla birlikte B, C, D faktörleri ile BC, BD, CD etkileşimleri için oluşturulan hipotezlerde tüm H_1 hipotezleri reddedilememiştir. Bu da B, C ve D faktörlerinin sistem çıktısına tek başına etkileri ile BC, BD, CD etkileşimlerinin etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.

Benzer şekilde regresyon için oluşturulan H_1 hipotezinin reddedilememesi de regresyonun istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.

Elde edilen hata değerinin düşük olması değişkenlerin sistemi doğru şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Isıtma delikleri incelendiğinde, analizlerde değişken olarak ele alınan delik boyu, delik çapı, delik sayısı ve deliğin kalıp merkezine uzaklığı haricindeki diğer ortam değişkenlerinin etkilerinin düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

Hesaplanan β değerleri, regresyon denklemindeki değişkenlerin ve etkileşimlerinin katsayılarını gösterir. İstatistiksel olarak etkisi anlamlı çıkan değişkenler ve etkileşimler B, C, D, BC, BD, CD olduğuna göre; regresyon denklemindeki katsayılara göre bu değişkenleri ne şekilde artırıp azaltmamız gerektiği yorumlanabilir.

A değişkeninin tek başına etkisi ve AB, AC, AD etkileşimlerinin etkisi için H_0 hipotezlerinin reddedilememesi ve ilgili F_0 değerlerinin 0'a çok yakın olması bu etkilerin göz ardı edilebileceğinin kanıtıdır.

Bu durumda A değişkeni ve etkileşimleri haricindeki tüm diğer değişkenler ve etkileşimleri, ısıtma deliklerinin optimizasyonu probleminde sistem çıktısındaki toplam etkileri oluştururlar. Her bir değişkenin ve etkileşimin diğerine göre etki oranı hakkında Çizelge 6.7. üzerindeki F_0 değerlerine göre yorum yapılabilir.

Çizelge 6.7'ye göre B değişkeninin yani delik çapının kalıpta oluşacak minimum sıcaklığa etkisi C ve D değişkenlerinin etkilerinden daha fazladır. Benzer şekilde C değişkeninin yani delik sayısının etkisi de D değişkenine yani deliğin kalıp merkezine olan uzaklığına oranla daha fazladır.

Tüm ana değişkenlerin etkileri, bu değişkenlerin etkileşimlerinin etkilerinden daha büyüktür ve bu etkileşimlerinin etkileri büyükten küçüğe doğru BC, CD ve BD şeklinde sıralanabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

1. Arora, J., “ Introduction To Optimum Design ”, Berkshire, England, McGraw - Hill Inc., 1989.
2. ANSYS 8.0 Documentation, ANSYS Inc., 2003.
3. Moaveni, S., “ Finite Element Analysis Theory and Application With ANSYS “, Upper Saddle River, New Jersey, Prentice – Hall Inc., 1999.
4. Kılıç, M., Yiğit, A., “ Isı Transferi “, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Vipaş A.Ş., Bursa, 2000.
5. Montgomery, D.C., “ Design and Analysis Of Experiments “, Arizona State University, John Wiley & Sons Inc., 1991.
6. Topkapı Şişe Sanayi A.Ş., “ Pazarlamacılar İçin Cam Ambalaj Üretim Bilgisi Kitabı “, 1992.
7. Lawrence, K.T., “ ANSYS Tutorial Releases 6.1 and 7.0 “, Mechanical and Aerospace Engineering, University Of Texas, Schroff Development Corporation Publications, 2002.
8. OMCO Metals, “ Materials For Glassmoulds “, Conference Notes, İstanbul, 2006.
9. Law, A.M., Kelton, W.D., “ Simulation Modeling and Analysis “, McGraw – Hill Inc., 1998.
10. Nikishkov, G.P., “ Introduction To The Finite Element Method “, University Of Aizu, Aizu – Wakamatsu 965 – 8580, Lecture Notes, Japan, 2004.

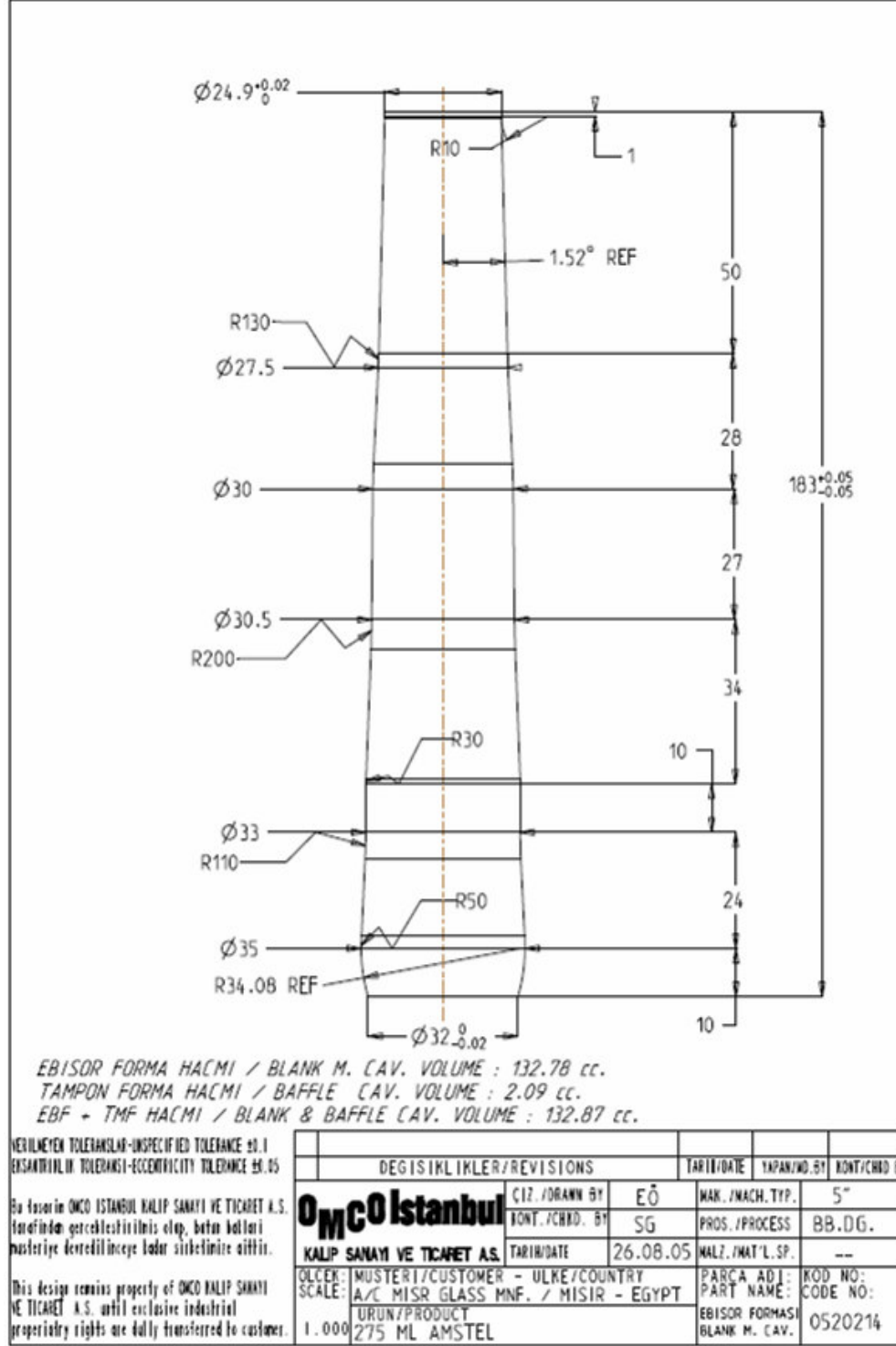
11. <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/>, “ University Of Alberta – ANSYS Tutorials “.
12. <http://www.andrew.cmu.edu/course/24-ansys/problems.htm>, “ Self-Paced Learning On The Web, FEM/ANSYS Problems”.
13. Gökben, S., Kişisel Görüşme, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Emre Öztop; 11.05.1980 tarihinde, Kocaeli'nde doğdu. İlkokulu İsmet İnönü İlkokulunda, ortaokul ve lise öğrenimini Körfez Oruç Reis Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1999 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında Makine Mühendisliği bölümünden mezun olduktan sonra aynı sene içinde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği bölümünü kazanarak kaydını yaptırdı. Bu tarihten itibaren , Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Tasarım ve İmalat Mühendisliği bölümünde öğrenimine devam etmektedir. Aynı zamanda Otokar A.Ş.'de Ürün Mühendisliği departmanında Proje Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

EK-1(b)

EBİŞÖR FORMASI




```
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.08222638492,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.08222638492,1
! /REP,FAST
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,1
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
```

```

/GO
!*
! /COM,
! /COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
! /COM, Thermal
!*
/PREP7
K,1000,0,0,0,
K,1001,0.01,0,0,
K,1002,0,0,-0.01,
! /ZOOM,1,SCRN,0.526074,-0.663068,0.526074,-0.508506
KWPLAN,-1, 1000, 1001, 1002
wpstyle,0.0001,0.1,-1,1,0.003,0,2,,5
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.001000
wpof,,,0.000100
wpof,,,0.000100
wpof,,,0.000100
wpof,,,0.000100
wpof,,,0.000100
wpstyle,0.00001,0.1,-1,1,0.003,0,2,,5
wpof,,,0.000010
wpof,,,0.000010
wpof,,,0.000010
wpof,,,0.000010
wpof,,,0.000010
! /AUTO,1
! /REP,FAST
! VPLOT
*SET,D,0.006
*SET,R,0.03
*SET,L,0.05
*SET,X,7
*SET,ALPHA,22.5
CYL4,0,R,D/2, , ,L
! /DIST,1,0.924021086472,1

```

```

! /REP,FAST
! /DIST,1,1.08222638492,1
! /REP,FAST
CSYS,5
FLST,3,1,6,ORDE,1
FITEM,3,3
VGEN,X+1,P51X, , ,ALPHA, , ,0
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
VDELE, , 3, , ,1
! /DIST,1,0.924021086472,1
! /REP,FAST
! /DIST,1,1.08222638492,1
! /REP,FAST
FLST,2,9,6,ORDE,4
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
FITEM,2,4
FITEM,2,-10
VOVLAP,P51X
FLST,2,9,6,ORDE,2
FITEM,2,2
FITEM,2,-10
VGLUE,P51X
!*
ET,1,SOLID70
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,45
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,1,,420
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7272
MPDE,ALL,1
TBDE,ALL,1
MPTEMP,,,,,,,,
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,45
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,1,,420
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7272

```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,0.78
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,2,,840
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,2720
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,3,,0.0338
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,3,,1007
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,3,,1.1614
!*
TYPE, 1
MAT, 3
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
FLST,5,7,6,ORDE,2
FITEM,5,4
FITEM,5,-10
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 2
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,, , , 2
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'

```

```

CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
TYPE, 1
MAT, 1
REAL,
ESYS, 0
SECNUM,
!*
CM,_Y,VOLU
VSEL,,, 3
CM,_Y1,VOLU
CHKMSH,'VOLU'
CMSEL,S,_Y
!*
VMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
/UI,MESH,OFF
ASEL,S,,, 3
NSLA,S,1
! NPLOT
FLST,2,57,1,ORDE,10
FITEM,2,15636
FITEM,2,15640
FITEM,2,-15647
FITEM,2,16311
FITEM,2,-16314
FITEM,2,16354
FITEM,2,16357
FITEM,2,-16366
FITEM,2,16369
FITEM,2,-16401
/GO
!*
SF,P51X,CONV,38.54,300
ALLSEL,ALL
ASEL,S,,, 1
NSLA,S,1
! NPLOT
FLST,2,222,1,ORDE,11
FITEM,2,16233

```

```

FITEM,2,16236
FITEM,2,-16250
FITEM,2,16297
FITEM,2,-16310
FITEM,2,16341
FITEM,2,-16353
FITEM,2,16402
FITEM,2,-16414
FITEM,2,16439
FITEM,2,-16604
/GO
!*
SF,P51X,CONV,42.32,300
ALLSEL,ALL
ASEL,S,, , 4
NSLA,S,1
! NPLOT
FLST,2,81,1,ORDE,6
FITEM,2,15266
FITEM,2,15292
FITEM,2,15307
FITEM,2,-15309
FITEM,2,15636
FITEM,2,-15711
/GO
!*
SF,P51X,CONV,66.08,300
ALLSEL,ALL
! VPLOT
ASEL,S,, , 11
NSLA,S,1
! NPLOT
FLST,2,94,1,ORDE,10
FITEM,2,15282
FITEM,2,15285
FITEM,2,-15291
FITEM,2,15805
FITEM,2,15820
FITEM,2,-15826
FITEM,2,16217
FITEM,2,-16230
FITEM,2,16233
FITEM,2,-16296
/GO
!*
SF,P51X,CONV,86.25,300
ALLSEL,ALL
ASEL,S,, , 2
NSLA,S,1
! NPLOT

```

```
FLST,2,32,1,ORDE,6
FITEM,2,16297
FITEM,2,16311
FITEM,2,16315
FITEM,2,-16316
FITEM,2,16341
FITEM,2,-16368
/GO
!*
SF,P51X,CONV,102.82,300
ALLSEL,ALL
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,13
FITEM,5,-14
ASEL,S,,P51X
NSLA,S,1
! NPLOT
FLST,2,60,1,ORDE,19
FITEM,2,15292
FITEM,2,-15296
FITEM,2,15636
FITEM,2,-15640
FITEM,2,15648
FITEM,2,-15651
FITEM,2,15806
FITEM,2,-15809
FITEM,2,16297
FITEM,2,16311
FITEM,2,-16316
FITEM,2,16327
FITEM,2,-16341
FITEM,2,16354
FITEM,2,-16356
FITEM,2,16369
FITEM,2,-16371
FITEM,2,16425
FITEM,2,-16438
/GO
!*
SF,P51X,CONV,57.36,300
FLST,2,74,1,ORDE,16
FITEM,2,15285
FITEM,2,15297
FITEM,2,-15306
FITEM,2,15805
FITEM,2,15810
FITEM,2,-15819
FITEM,2,16233
FITEM,2,-16236
FITEM,2,16251
```

```

FITEM,2,-16252
FITEM,2,16298
FITEM,2,-16310
FITEM,2,16317
FITEM,2,-16326
FITEM,2,16402
FITEM,2,-16424
/GO
!*
SF,P51X,CONV,105.64,300
ALLSEL,ALL
VSEL,S,MAT,,2
NSLV,S,1
! NPLOT
FLST,2,4501,1,ORDE,2
FITEM,2,9746
FITEM,2,-14246
!*
/GO
D,P51X,,1000,,,,TEMP,,,,,
ALLSEL,ALL
! VPLOT
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,0
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
SET,LAST
!*
*GET,MINIMUM_SICAKLIK,NODE,15285,TEMP,
!*
! /EFACE,1
!*
! PLNSOL,TEMP,,0,
!*
NSORT,TEMP,,0,1,,0
!*
! PRNSOL,TEMP,
! LGWRITE,LOG_FILE_DOSYASI2,lgw,C:\TEZ\LOG\,COMMENT

```