

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE ASHBY YAKLAŞIMI İLE  
MALZEME SEÇİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUHAMMET YÜCEL İPEK**

**DENİZLİ, NİSAN - 2015**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE ASHBY YAKLAŞIMI İLE  
MALZEME SEÇİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUHAMMET YÜCEL İPEK**

**DENİZLİ, NİSAN - 2015**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Muhammet Yücel İPEK** tarafından hazırlanan “**ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE ASHBY YAKLAŞIMI İLE MALZEME SEÇİMİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 09.04.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU

.....

Üye

Yrd. Doç. Dr. Gülay YAKAR

.....

Üye

Yrd. Doç. Dr. Arzum ULUKÖY

.....

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır..

.....

Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**MUHAMMET YÜCEL İPEK**

## ÖZET

### ISI DEĞİŞTİRİCİLERİNDE ASHBY YAKLAŞIMI İLE MALZEME SEÇİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MUHAMMET YÜCEL İPEK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. TEZCAN ŞEKERCİOĞLU)

DENİZLİ, NİSAN - 2015

Isı değiştiricileri tasarımında doğru malzemenin belirlenmesi çok önemli bir adımdır. Yapılan çalışmada çok sayıdaki mühendislik malzemesinin arasından en uygun malzemeyi seçebilmek için çok kriterli karar verme mekanizmaları incelenmiştir. Bu mekanizmaların incelenmesi sonucunda ısı değiştiricilerinin malzemesini seçmek için en uygun yöntemin Ashby yaklaşımı olduğuna karar verilmiştir. Detaylı bir şekilde incelenen Ashby yaklaşımı ile üç farklı ısı değiştiricisinin malzemeleri seçilmiştir. Seçilen ısı değiştiricilerinde genel olarak istenen özellikler, sebepleriyle birlikte açıklanmıştır. Üç farklı durum için Ashby yaklaşımı uygulanmıştır. Her bir ısı değiştiricisi için malzeme seçimi yapılırken CES EduPack adlı programda çizilen malzeme grafiklerinden faydalanılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Isı değiştiriciler, malzeme seçimi, Ashby yaklaşımı

## **ABSTRACT**

### **MATERIAL SELECTION OF HEAT EXCHANGERS USING ASHBY APPROACH**

**MSC THESIS**

**MUHAMMET YÜCEL İPEK**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. TEZCAN ŞEKERCİOĞLU)**

**DENİZLİ, APRIL 2015**

Selection of suitable material for heat exchanger design is very important step. In this study, multi criteria decision making methods are studied to select most suitable material within vast amount of engineering materials. Ashby approach is decided to be used for selection of suitable material in heat exchanger. Ashby approach is fully investigated and materials are selected for three different heat exchangers by using it. Properties of the heat exchangers are explained with causes. Three different situations are examined with Ashby approach. Material graphics are used for material selection in these cases which are created in CES EduPack.

**KEYWORDS:** Heat exchangers, material selection, Ashby approach

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                            |             |
|------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖZET</b> .....                                          | <b>i</b>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                      | <b>ii</b>   |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                   | <b>iii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....                                 | <b>v</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b> .....                                 | <b>vii</b>  |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....                                | <b>viii</b> |
| <b>ÖNSÖZ</b> .....                                         | <b>ix</b>   |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                      | <b>1</b>    |
| 1.1    Ön Bilgi .....                                      | 1           |
| 1.2    Tezin Amacı .....                                   | 2           |
| 1.3    Literatür Özeti.....                                | 2           |
| <b>2. ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ</b> .....                        | <b>11</b>   |
| 2.1    Isı Değişticilerinin Sınıflandırılması .....        | 11          |
| 2.1.1    Isı Değişim Şekline Göre Sınıflandırma.....       | 12          |
| 2.1.1.1    Doğrudan Temaslı Isı Değişticileri.....         | 12          |
| 2.1.1.1.1    Karışmayan Akışkanlı Isı Değişticileri .....  | 13          |
| 2.1.1.1.2    Gaz – Sıvı Isı Değişticileri .....            | 13          |
| 2.1.1.1.3    Sıvı – Buhar Isı Değişticileri .....          | 14          |
| 2.1.1.2    Doğrudan Temaslı Olmayan Isı Değişticiler ..... | 14          |
| 2.1.1.2.1    Doğrudan Transferli Isı Değişticileri .....   | 14          |
| 2.1.1.2.2    Depolama Tipi Isı Değişticileri .....         | 14          |
| 2.1.1.2.3    Akışkan Yataklı Isı Değişticileri .....       | 15          |
| 2.1.2    Akışkan Sayısına Göre Sınıflandırma.....          | 15          |
| 2.1.3    Kompaktlığa Göre Sınıflandırma.....               | 16          |
| 2.1.4    Yapısal Özelliklerine Göre Sınıflandırma .....    | 17          |
| 2.1.4.1    Borulu Isı Değişticileri .....                  | 17          |
| 2.1.4.1.1    Çift Borulu Isı Değişticileri.....            | 18          |
| 2.1.4.1.2    Gövde Borulu Isı Değişticileri .....          | 18          |
| 2.1.4.1.3    Spiral Borulu Isı Değişticileri.....          | 19          |
| 2.1.4.2    Levhalı Isı Değişticileri .....                 | 20          |
| 2.1.4.2.1    Contalı Levhalı Isı Değişticileri .....       | 20          |
| 2.1.4.2.2    Spiral Levhalı Isı Değişticileri .....        | 20          |
| 2.1.4.2.3    Lamelli Isı Değişticileri.....                | 21          |
| 2.1.4.2.4    Levha Bobinli Isı Değişticileri .....         | 22          |
| 2.1.4.3    Kanatçıklı Isı Değişticiler .....               | 22          |
| 2.1.4.3.1    Kanatçıklı Borulu Isı Değişticiler.....       | 22          |
| 2.1.4.3.2    Kanatçıklı Levhalı Isı Değişticiler .....     | 23          |
| 2.1.4.4    Rejeneratörler .....                            | 24          |
| 2.1.5    Akış Şekillerine Göre Sınıflandırma.....          | 24          |
| 2.1.5.1    Tek Geçişli Isı Değişticileri .....             | 25          |
| 2.1.5.1.1    Zıt Akışlı Isı Değişticiler .....             | 25          |
| 2.1.5.1.2    Paralel Akışlı Isı Değişticileri .....        | 26          |
| 2.1.5.1.3    Çapraz Akışlı Isı Değişticiler .....          | 26          |
| 2.1.5.1.4    Ayrı Akışlı Isı Değişticiler .....            | 26          |
| 2.1.5.1.5    Bölünmüş Akışlı Isı Değişticiler .....        | 26          |

|           |                                                                                                        |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.1.5.2   | Çok Geçişli Isı Değiştiricileri.....                                                                   | 27         |
| 2.1.5.2.1 | Kanatçıklı Çok Geçişli Isı Değiştiricileri.....                                                        | 27         |
| 2.1.5.2.2 | Gövde Borulu Çok Geçişli Isı Değiştiricileri .....                                                     | 27         |
| 2.1.5.2.3 | Levhalı Çok Geçişli Isı Değiştiricileri .....                                                          | 27         |
| 2.1.6     | Isı Transfer Mekanizmalarına Göre Sınıflandırma .....                                                  | 27         |
| 2.2       | Isı Değiştiricilerinde Kullanılan Malzemeler .....                                                     | 28         |
| <b>3.</b> | <b>TASARIMDA MALZEME SEÇİMİ.....</b>                                                                   | <b>31</b>  |
| 3.1       | Tasarımda Kısıtlayıcılar .....                                                                         | 31         |
| 3.2       | Malzemelerin Sınıflandırılması ve Özellikleri .....                                                    | 32         |
| 3.3       | Malzeme Seçimi .....                                                                                   | 33         |
| 3.3.1     | PSI Yöntemi.....                                                                                       | 36         |
| 3.3.2     | GTMA Yöntemi.....                                                                                      | 37         |
| 3.3.3     | ELECTRE Yöntemi .....                                                                                  | 38         |
| 3.3.4     | TOPSIS Yöntemi .....                                                                                   | 39         |
| 3.3.5     | VIKOR Yöntemi.....                                                                                     | 39         |
| 3.3.6     | PROMETHEE Yöntemi .....                                                                                | 40         |
| <b>4.</b> | <b>ASHBY YAKLAŞIMI VE UYGULAMA ALANLARI.....</b>                                                       | <b>42</b>  |
| 4.1       | Ashby Yaklaşımına Giriş .....                                                                          | 42         |
| 4.1.1     | Tasarım İhtiyaçlarını Belirleme .....                                                                  | 44         |
| 4.1.2     | Sınırlamaları Kullanarak Eleme.....                                                                    | 45         |
| 4.1.3     | Amaca Göre Malzemelerin Sıralanması .....                                                              | 45         |
| 4.1.3.1   | Malzeme İndisleri.....                                                                                 | 45         |
| 4.1.3.2   | Malzeme Grafikleri .....                                                                               | 46         |
| 4.1.4     | Dokümantasyon Araştırması.....                                                                         | 50         |
| 4.2       | Ashby Yaklaşımının Uygulanabileceği Alanlara Ait Örnekler .....                                        | 50         |
| 4.2.1     | Basınçlı Kaplar .....                                                                                  | 50         |
| 4.2.2     | Titreşim Masası.....                                                                                   | 52         |
| 4.2.3     | Isı Duvarları .....                                                                                    | 53         |
| 4.2.4     | Hassas Ölçüm Aletleri .....                                                                            | 54         |
| 4.2.5     | Ashby Yaklaşımının Isı Değiştiricilerine Uygulanması .....                                             | 55         |
| 4.3       | Çok Sınırlamalı ve Çok Amaçlı Durumlarda Malzeme Seçimi .....                                          | 58         |
| 4.3.1     | Birden Fazla Sınırlama ve Bir Amaç .....                                                               | 58         |
| 4.3.1.1   | Analitik Yöntem.....                                                                                   | 59         |
| 4.3.1.2   | Grafik Yöntemi .....                                                                                   | 61         |
| 4.3.2     | Birden Fazla Sınırlama ve Birden Fazla Amaç .....                                                      | 63         |
| 4.3.2.1   | Penaltı Fonksiyonu.....                                                                                | 65         |
| 4.3.2.1.1 | Değişim Sabitinin Belirlenmesi ve Önemi .....                                                          | 67         |
| <b>5.</b> | <b>FARKLI ALANLARDA KULLANILAN ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ<br/>İÇİN ASHBY YAKLAŞIMIYLA MALZEME SEÇİMİ.....</b> | <b>70</b>  |
| 5.1       | Motosiklet Radyatörleri İçin Malzeme Seçimi.....                                                       | 72         |
| 5.2       | Mikroçip Soğutucuları İçin Malzeme Seçimi.....                                                         | 80         |
| 5.3       | Atık Isı Kazanları Kanatçıklı Borularının Malzemesinin<br>Seçilmesi.....                               | 89         |
| <b>6.</b> | <b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>                                                                         | <b>100</b> |
| <b>7.</b> | <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                  | <b>103</b> |
| <b>8.</b> | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                                                  | <b>109</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1: Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması .....                                                                                                      | 12 |
| Şekil 2.2: Isı değişim şekline göre ısı değiştiricileri.....                                                                                                   | 12 |
| Şekil 2.3: Soğutma kulesi çalışma prensibi .....                                                                                                               | 13 |
| Şekil 2.4: Akışkan yataklı ısı değiştiricisi .....                                                                                                             | 15 |
| Şekil 2.5: Akışkan sayısına göre sınıflandırma .....                                                                                                           | 16 |
| Şekil 2.6: Kompaklığa göre ısı değiştiricileri.....                                                                                                            | 16 |
| Şekil 2.7: Yapı şekline göre ısı değiştiricileri.....                                                                                                          | 17 |
| Şekil 2.8: Çift borulu ısı değiştirici .....                                                                                                                   | 18 |
| Şekil 2.9: Gövde borulu ısı değiştirici .....                                                                                                                  | 19 |
| Şekil 2.10: Spiral borulu ısı değiştirici .....                                                                                                                | 19 |
| Şekil 2.11: Contalı levhalı ısı değiştirici .....                                                                                                              | 20 |
| Şekil 2.12: Spiral levhalı ısı değiştirici.....                                                                                                                | 21 |
| Şekil 2.13: Lamelli ısı değiştirici.....                                                                                                                       | 21 |
| Şekil 2.14: Levha bobinli ısı değiştirici.....                                                                                                                 | 22 |
| Şekil 2.15: Kanatçıklı borulu ısı değiştirici .....                                                                                                            | 23 |
| Şekil 2.16: Kanatçıklı levhalı ısı değiştirici.....                                                                                                            | 23 |
| Şekil 2.17: Rejeneratör çalışma prensibi .....                                                                                                                 | 24 |
| Şekil 2.18: Akış şekillerine göre ısı değiştiricileri .....                                                                                                    | 25 |
| Şekil 2.19: Isı transfer mekanizmalarına göre ısı değiştiriciler .....                                                                                         | 28 |
| Şekil 3.1: Tasarımda kısıtlayıcılar .....                                                                                                                      | 31 |
| Şekil 3.2: Malzeme seçimini etkileyen faktörler .....                                                                                                          | 34 |
| Şekil 3.3: Malzeme karakteristik özelliklerinin grafik üzerinde gösterimi<br>ve ilişkilendirilmesi .....                                                       | 37 |
| Şekil 4.1: Fonksiyon, malzeme, şekil ve üretim metodu etkileşimi .....                                                                                         | 42 |
| Şekil 4.2: Malzeme seçim aşamaları .....                                                                                                                       | 43 |
| Şekil 4.3: Maksimum çalışma sıcaklığı grafiği .....                                                                                                            | 47 |
| Şekil 4.4: Elastisite modülü – Yoğunluk Grafiği .....                                                                                                          | 47 |
| Şekil 4.5: Elastisite modülü – Akma sınırı grafiği .....                                                                                                       | 48 |
| Şekil 4.6: Özgül elastisite modülü – Özgül akma sınırı grafiği.....                                                                                            | 48 |
| Şekil 4.7: Termal genleşme – Termal iletkenlik grafiği.....                                                                                                    | 49 |
| Şekil 4.8: Termal genleşme – Elastisite modülü grafiği.....                                                                                                    | 49 |
| Şekil 4.9: Birden çok sınırlama ve amaçların olduğu malzeme seçimlerinde<br>izlenmesi gereken yol .....                                                        | 58 |
| Şekil 4.10: Birden fazla sınırlamanın olduğu durumlarda malzeme seçimi<br>a) Eleme aşamasında verilen sınır değerler, b) Malzemelerin<br>maliyet grafiği ..... | 59 |
| Şekil 4.11: Min.-max problemine grafik yöntemiyle yaklaşım.....                                                                                                | 62 |
| Şekil 4.12: İki farklı amacın tek bir grafikte gösterimi .....                                                                                                 | 64 |
| Şekil 4.13: İki farklı amaç ve bir sınırlamanın grafikte gösterimi.....                                                                                        | 65 |
| Şekil 4.14: Penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş çizgisinin grafik üzerinde<br>gösterimi .....                                                                    | 66 |
| Şekil 4.15: Farklı iki bisikletin ağırlık ve maliyet değişim sabitinin grafikte<br>gösterimi.....                                                              | 68 |
| Şekil 4.16: Değişim sabitinin farklı belirlenmesi durumunda değişen<br>malzeme seçimi .....                                                                    | 69 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 5.1:</b> Motosikletlerde kullanılan tek silindirli motor.....                                         | 73 |
| <b>Şekil 5.2:</b> Motosikletlerde kullanılan kanatçıklı levhalı tip ısı<br>değiştiricilerine örnek .....       | 73 |
| <b>Şekil 5.3:</b> Düzleştirilmiş borunun kesiti .....                                                          | 75 |
| <b>Şekil 5.4:</b> Akma sınırı – yoğunluk grafiği .....                                                         | 77 |
| <b>Şekil 5.5:</b> Kırılma tokluğu – termal iletkenlik grafiği .....                                            | 78 |
| <b>Şekil 5.6:</b> Termal iletkenlik – maliyet grafiği.....                                                     | 79 |
| <b>Şekil 5.7:</b> Farklı kanatçıklara sahip mikroçip soğutucuları .....                                        | 81 |
| <b>Şekil 5.8:</b> Mikroçip soğutucusunun kesiti .....                                                          | 83 |
| <b>Şekil 5.9:</b> $M_1 - M_2$ malzeme grafiği .....                                                            | 85 |
| <b>Şekil 5.10:</b> Uygun bulunmayan malzemelerin çıkarıldığı $M_1- M_2$ grafiği .....                          | 86 |
| <b>Şekil 5.11:</b> Yapılan elemeler sonucu geriye kalan malzemelerin $M_1 - M_2$<br>grafisinde gösterimi ..... | 86 |
| <b>Şekil 5.12:</b> Eşleşme sabitinin $M_1 - M_2$ grafiğinde gösterimi .....                                    | 88 |
| <b>Şekil 5.13:</b> Atık ısı kazanı.....                                                                        | 90 |
| <b>Şekil 5.14:</b> Sıcaklık-entropi diyagramı .....                                                            | 91 |
| <b>Şekil 5.15:</b> İki kademeli atık ısı kazanı.....                                                           | 91 |
| <b>Şekil 5.16:</b> Kanatçıklı borunun kesiti .....                                                             | 93 |
| <b>Şekil 5.17:</b> $M_1 - M_2$ malzeme grafiği .....                                                           | 95 |
| <b>Şekil 5.18:</b> Uygun bulunmayan malzemelerin çıkarıldığı $M_1- M_2$ grafiği .....                          | 96 |
| <b>Şekil 5.19:</b> Yapılan elemeler sonucu geriye kalan malzemelerin $M_1 - M_2$<br>grafisinde gösterimi ..... | 96 |
| <b>Şekil 5.20:</b> $M_1-M_2$ grafiğinde penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş eğrisinin<br>gösterimi.....          | 98 |
| <b>Şekil 5.21:</b> $M_1-M_2$ grafiğinde yeni penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş<br>eğrisinin gösterimi.....     | 99 |

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1:</b> Malzemelerin Sınıflandırılması .....                                                                      | 32 |
| <b>Tablo 3.2:</b> Başlıca malzemelerin karakteristik özellikleri.....                                                       | 33 |
| <b>Tablo 4.1:</b> Fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler.....                                                 | 44 |
| <b>Tablo 4.2:</b> Malzeme indislerine örnekler .....                                                                        | 46 |
| <b>Tablo 4.3:</b> Rot koluna ait fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest<br>değişkenler .....                              | 60 |
| <b>Tablo 4.4:</b> Aday malzemelerin karakteristik özellikleri ve hesaplanan<br>kütleleri.....                               | 61 |
| <b>Tablo 4.5:</b> Aday malzemelerin karakteristik özellikleri ve hesaplanan<br>kütleleri.....                               | 61 |
| <b>Tablo 4.6:</b> Maliyet-ağırlık değişim sabitinin farklı sektörlerdeki değeri .....                                       | 67 |
| <b>Tablo 5.1:</b> Fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler.....                                                 | 71 |
| <b>Tablo 5.2:</b> Farklı ısı değiştiricilerin malzeme seçimlerinde kullanılması<br>öngörülen Ashby yaklaşım yolları .....   | 72 |
| <b>Tablo 5.3:</b> Motosiklet radyatörü için belirlenen sınırlamalar, amaçlar ve<br>serbest değişkenler .....                | 74 |
| <b>Tablo 5.4:</b> Aday malzemelerin malzeme indislerinin sıralanması .....                                                  | 80 |
| <b>Tablo 5.5:</b> Mikroçip soğutucuları için belirlenen sınırlamalar, amaçlar ve<br>serbest değişkenler .....               | 82 |
| <b>Tablo 5.6:</b> Malzeme indislerinin türetilmesi .....                                                                    | 84 |
| <b>Tablo 5.7:</b> Mikroçip soğutucuları için aday malzemelerin değerlendirilmesi .                                          | 89 |
| <b>Tablo 5.8:</b> Atık ısı kazanı kanatçıklı boruları için belirlenen sınırlamalar,<br>amaçlar ve serbest değişkenler ..... | 92 |
| <b>Tablo 5.9:</b> Farklı çelik alaşımların özelliklerinin karşılaştırılması .....                                           | 98 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                                  |   |                                                             |
|----------------------------------|---|-------------------------------------------------------------|
| <b>E</b>                         | : | Elastisite modülü (GPa)                                     |
| <b><math>\rho</math></b>         | : | Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )                                |
| <b><math>R_e</math></b>          | : | Akma sınırı (MPa)                                           |
| <b><math>C_m</math></b>          | : | Birim ağırlık için maliyet (\$/kg)                          |
| <b><math>\lambda</math></b>      | : | Termal iletkenlik ( $\text{W/mK}$ )                         |
| <b><math>C_p</math></b>          | : | Özgül ısı ( $\text{J/kgK}$ )                                |
| <b><math>p_e</math></b>          | : | Malzemenin elektrik direnci ( $\mu\Omega\text{cm}$ )        |
| <b><math>\alpha</math></b>       | : | Termal uzama ( $\text{mm}/^\circ\text{C}$ )                 |
| <b><math>\sigma_t</math></b>     | : | Teğetsel gerilme (MPa)                                      |
| <b><math>r_{bk}</math></b>       | : | Basınçlı kap yarıçapı (cm)                                  |
| <b>s</b>                         | : | Et kalınlığı (mm)                                           |
| <b>p</b>                         | : | Basınç (bar)                                                |
| <b><math>K_{Ic}</math></b>       | : | Kırılma tokluğu ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )             |
| <b><math>a_c</math></b>          | : | Çatlak boyu (mm)                                            |
| <b><math>M_n</math></b>          | : | Malzeme indisi                                              |
| <b><math>C_n</math></b>          | : | Sabit                                                       |
| <b>A</b>                         | : | Titreşim büyüklüğü (m, rad)                                 |
| <b>w</b>                         | : | Frekans (rad/s)                                             |
| <b><math>r_m</math></b>          | : | Masa yarıçapı (cm)                                          |
| <b>I</b>                         | : | Atalet momenti ( $\text{cm}^4$ )                            |
| <b>m</b>                         | : | Ağırlık (kg)                                                |
| <b>k</b>                         | : | Rijitlik ( $\text{N/mm}$ )                                  |
| <b>a</b>                         | : | Termal difüzyon ( $\text{m}^2/\text{s}$ )                   |
| <b>t</b>                         | : | Zaman (s)                                                   |
| <b>q</b>                         | : | İletilen ısı enerjisi ( $\text{W/m}^2$ )                    |
| <b>T</b>                         | : | Sıcaklık ( $^\circ\text{C}$ )                               |
| <b><math>\Delta T</math></b>     | : | İlk ve ikinci sıcaklık arasındaki fark ( $^\circ\text{C}$ ) |
| <b><math>\varepsilon</math></b>  | : | Uzama (mm)                                                  |
| <b>x</b>                         | : | Uzaklık (mm)                                                |
| <b>h</b>                         | : | Isı taşınım katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )            |
| <b>U</b>                         | : | Toplam ısı transfer katsayısı ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )    |
| <b><math>Y_a</math></b>          | : | Yüzey alanı ( $\text{m}^2$ )                                |
| <b><math>\sigma_\zeta</math></b> | : | Çekme dayanımı (MPa)                                        |
| <b><math>F_\zeta</math></b>      | : | Çekme yükü (N)                                              |
| <b>L</b>                         | : | Uzunluk (m)                                                 |
| <b><math>\Delta L</math></b>     | : | İlk ve ikinci uzunluk arasındaki fark (m)                   |
| <b><math>C_c</math></b>          | : | Eşleşme sabiti                                              |
| <b><math>\tilde{m}</math></b>    | : | Farklı ağırlıklar arasından en ağır olanı (kg)              |
| <b><math>P_n</math></b>          | : | Performans parametresi                                      |
| <b>Z</b>                         | : | Penaltı fonksiyonu                                          |
| <b><math>\alpha_n</math></b>     | : | Değişim sabiti                                              |
| <b><math>\alpha</math></b>       | : | Termal genleşme ( $\text{mm}/^\circ\text{C}$ )              |
| <b><math>\sigma_e</math></b>     | : | Eğilme dayanımı (MPa)                                       |
| <b><math>M_e</math></b>          | : | Eğme momenti (Nm)                                           |
| <b>S</b>                         | : | Emniyet katsayısı                                           |
| <b>R</b>                         | : | Elektrik direnci ( $\Omega$ )                               |

## ÖNSÖZ

Yüksek lisansım ve yapılan çalışma boyunca benden hiçbir yardımını esirgemeyen, beni sabırla destekleyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Tezcan ŞEKERCİOĞLU'na, çalışma sırasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Gülay YAKAR'a, çalışmanın yapılmasında bana ilham veren RWE Technology şirketine ve bünyesinde çalışan mühendislere, son olarak da sevgili aileme teşekkürü borç bilir, şükranlarımı sunarım.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Ön Bilgi

Tasarım, belirli bir ihtiyacı gidermek, karşılaşılan problemi çözüme kavuşturmak için yapılan çalışmadır. Yapılan çalışma sonucu bir ürün ortaya çıkabileceği gibi, bir fikir veya aydınlatıcı bir çalışmada ortaya çıkabilir. Tasarım sonucunda bir ürün ortaya çıkıyorsa, bu ürünün görevini yerine getirebilir, kullanışlı, güvenilir, üretilebilir ve pazarlanabilir olması gerekir.

Tasarım sistemli bir şekilde yapılmalıdır ve tasarım yapılırken belirli kurallara uyulmalıdır. Özellikle mühendislik tasarımlarında sunulan ürünün veya fikrin mühendislik kurallarına uygun olması gerekir. Elbette ortaya çıkan ürünün rengi, müşteri ilgisi gibi mühendislikle ilgisi olmayan konular da önemlidir. Ancak tasarımın tanımında olduğu gibi problemin çözüme kavuşması mühendislerin önceliğidir.

Örneğin normal koşullarda çalışan bir alet, büyük kuvvetler altında veya yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında görevini yerine getiremeyebilir. Bu yüzden tasarımın adımlarında geri dönüşler yapılarak tasarımda iyileştirmeler yapılır. Yapılacak olan iyileştirmelerin en başında da tasarımın malzemesi gelir.

Malzeme seçimi yapmak kolay değildir. Çünkü günümüzde 160.000'in üzerinde malzeme vardır (Ashby, 2011). Bu kadar malzeme arasından yanlış malzemeyi seçme ihtimali ise çok yüksektir. Doğru malzemeyi seçmek için birçok bilim adamı ve mühendis malzeme seçimi yaklaşımları geliştirmiştir. Bu yaklaşımlardan bazılarını ileride değinilmiştir.

Bu yaklaşımlardan biri olan Ashby yaklaşımı, yapılan tasarımda en doğru malzemeyi seçme yolunda etkili, kolay ve verimlidir. Malzemelerin karakteristik özellikleriyle oluşturulan grafiklerle birden fazla malzeme, çözüm için seçilebilir ve

değerlendirilebilir. Bu malzemeler arasından da tasarımın ihtiyaçlarını en iyi şekilde karşılayacak optimum özellikteki malzeme seçilir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Kanatlı tip borulu ısı değiştiricilerinde kayıpların önüne geçebilmek için, tasarımda geriye dönüp malzeme seçimini en iyi şekilde yapmak gerekir. Yapılan çalışmayla bu tip ısı değiştiricilerinde verimliliği artırmak amaçlanmıştır. Bu sebeple bu tip ısı değiştiricilerinde kullanılan geleneksel malzemeler yerine, yeni malzemeler Ashby yaklaşımıyla incelenmiştir ve optimum malzeme seçimi yapılmaya çalışılmıştır.

## **1.3 Literatür Özeti**

Ashby (1991) tarafından yapılan çalışmada, tasarımcıların yük taşıyan parçaların performansını optimize etmek için malzeme özellikleri ve şekil olmak üzere iki değişkende oynama yapması gerektiğini önermiştir. Bu çalışmayla şekil ve malzemeyi bir bütün olarak ele almıştır. Ortaya çıkardığı şekil faktörleri ve malzeme indisleriyle, parçaların eğilmeye ve burkulmaya karşı performansını artırmaya yönelik çalışmalar yapmıştır. Çalışmada geleneksel malzemelerin şekilleriyle, mikro ve makro yapıların beraber düzen içinde kullanılmasıyla performansın artırılacağı önerilmiştir.

Ashby ve Cebon (1993) tarafından yapılan çalışmada, tasarım aşamasında olan bir parçanın malzeme ve şeklini seçebilmek için oluşturulan malzeme indisleri ve şekil faktörleri kullanılarak nasıl bir performans sergileyebileceği analiz edilmiştir. Yapılan bir bilgisayar programıyla da birçok mühendislik malzemesine kolay ulaşılmış ve bu programla çizilen grafiklerle malzeme seçimi basit hale getirilmiştir.

Gibson vd. (1995) yaptıkları çalışma ile doğal malzemelerin yüksek mekanik performans sergilemelerinin sebebi olarak gösterilen mikro yapıları incelemişlerdir. Çalışmada bu tür mikro yapıların mühendislik malzemelerinde kullanılmasıyla

performans artışına nasıl katkıda bulunabileceği üzerinde öneriler yapılmış, örnekler verilmiştir.

Kazan tüplerinin öngörülen ömürlerini tamamlayabilmesi için çok sıkı bir hasar yönetim programı gerekmektedir. Bu program, hasar çeşitlerini, hasar öncesi alınması gereken önlemleri, periyodik durum değerlendirmelerini, hasarların kök nedenlerinin gelişimi ve tekrar eden hasarların oluşmaması için alınacak önlemleri içermelidir. Kazan tüplerinde karşılaşılan hasarlar dörde ayrılır: Kimyasallardan dolayı oluşan hasar, alevden dolayı oluşan hasar, uzun süre aşırı ısınma ve yorulma dayanımlarının üzerinde sık sık gerilmelere maruz kalma. Paterson ve Kuntz (1999) tarafından yapılan çalışmayla bu hasarların hepsine karşı koruyucu ve önleyici bilginin öneminden bahsedilmiş, düzenli kontroller ve durum değerlendirmeleri önerilmiştir.

Ashby (2000) tarafından bir uygulama için malzeme seçimi yapılırken birden fazla özelliğin çatışması sonucu hangi malzemenin seçilmesi gerektiği üzerine bir çalışma yürütülmüştür. Değiş tokuş ve değer fonksiyonları geliştirilerek uzlaşmacı bir yol seçilmiştir. Optimum özelliklere sahip malzemenin seçilmesi için grafiklerden ve mühendislik hesaplamalarından faydalanılmıştır.

Kütlenin azaltılması kirişlerin tasarımında her zaman önemli olmuştur. Düşük kütle, yüksek fonksiyonel performansa sahip olunmasına yardımcı olur. Ayrıca maliyetin de düşmesine katkıda bulunur. Ağırlığın düşürülmesi için şekil faktörleri ve malzeme indisleri oluşturulmuştur. Ancak bu şekil faktörleri ve malzeme indisleri genellikle hiçbir ölçü sınırlamasının olmadığı durumlar için türetilmiştir. Ama ölçü sınırlamaları mekanik tasarımlarda çok yaygındır. Burgess (2000a) tarafından yapılmış olan çalışmada, ihtiyaca uygun şekil faktörleri ve malzeme indisleri türetilmiştir. Türetilen bu faktör ve indisler ile yapılan hesaplamalar sonucunda yüksek yoğunluklu malzemelerin düşük yoğunluklu malzemelere göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür. Yani kısıtlı bir alanda çelik gibi yüksek yoğunluğa sahip malzemeler kısıtlı tasarım alanlarında daha iyi performans sergilemektedir.

Burgess (2000b), kirişler için yaptığı çalışmanın aynısını döner miller için de uygulamıştır. Kütlenin düşürülmesi için türetilen şekil faktörleri ve malzeme



indisleri, sınırlandırılmış alanlarda tasarım yapabilmek için geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada görülmüştür ki sınırlandırılmış bir alan, malzeme ve şekil seçiminde çok önemli bir etkiye sahiptir. Çelik gibi yüksek yoğunluklu malzemelerin, kısıtlı alanlarda düşük yoğunluklu malzemelere göre daha iyi performans sergileyebileceği kanıtlanmıştır.

Jee ve Kang (2000) tarafından yapılmış olan çalışmada, malzeme seçiminde bilgisayar destekli programların kullanılmasının öneminden bahsedildikten sonra, malzeme seçimi için Ashby yaklaşımı, ağırlık faktörünü belirlemede kullanılan entropi konsepti ile TOPSIS metodu bir arada kullanılmıştır. Arabalarda, trenlerde ve bazı jeneratörlerde bulunan volanlar için yapılan malzeme seçiminde çıkan sonuçla, şu anda kullanılan volan malzemesinin aynı olduğu görülmüştür.

Pearson ve Anderson (2001) tarafından yapılan çalışmada, farklı tasarımlara sahip olan geri kazanımlı buhar türbinlerindeki ekonomizer ve kızdırıcıların kollektörlerinden çıkan tüplerin kaynaklarında, tüplerdeki büyük sıcaklık farklarından dolayı oluşan termal kuvvetler incelenmiştir. Farklı tasarıma sahip jeneratörlerdeki kızdırıcı, tekrar ısıtıcı ve ekonomizer tüplerinden termokupullarla alınan sıcaklıklar veri olarak alınmıştır. Bu verilerle jeneratörün çalıştırılıp durdurulmasında ve ekonomizerlerin normal operasyonlarında ortaya çıkan sıcaklık farklılıkları hesaplanmıştır. Jeneratör tasarımlarında yapılacak ufak değişikliklerle ısı nedeniyle kuvvetlerin etkisinden dolayı oluşan yorulma hasarlarının önüne geçilebileceği kanıtlanmıştır.

Roketlerin motor şaselerinde malzeme seçimi derinlemesine incelenmesi gereken büyük önem arz eden bir tasarım kriteridir. Aynı şekilde şasenin imalat yöntemi de çok önemlidir ve birçok yöntemin arasından tekniği kanıtlanmış olanı seçmek gerekir. Rajan ve Narasimhan (2002) en iyi malzeme seçimi için performans indislerini kullanmışlardır. Roket şasesi fırlatma esnasında bir yanma odası gibi çalışacağı için basıncı tek bir noktadan dışarı atabilmeli, geri kalan bölgelerde basınca dayanıklı olmalıdır. Malzemelerin karakteristik özellikleri incelendiğinde en uygun malzeme olarak kompozitlerin seçilmesi gerekir fakat birden fazla sebepten ötürü metaller seçilmiştir. Görülmüştür ki üretilen indislerle bulunan malzeme ile gerçek hayatta uygulamada kullanılan malzeme aynı çıkmıştır. Bunda fiyat

faktörünün de etkisi unutulmamıştır. Roket şaseleri için akıtarak sıvama (flow forming) yöntemi seçilmiştir.

Teknolojideki sürdürülebilirliği artırabilmek için geri dönüşümü yapılabilen malzemeler tercih edilmeli ve doğal kaynaklar dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Ermolaeva vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada, arabaların şaselerinde geleneksel ve yeni geliştirilmiş malzemelerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde farklı yaklaşımlar etkili bir şekilde kullanılmıştır. Çalışma sonucunda geleneksel malzemelerin yanında, doğal kaynaklı kompozitlerin de kullanılması uygun bulunmuştur.

Strikar ve Spearing (2003a) tarafından yapılan çalışmada, mikro sistemler için geliştirilen malzemelerin seçiminde Ashby yaklaşımı kullanılmıştır. Mikro sistemlerde farklı durumlar için farklı malzemelerin kullanılması gerektiği verilen örneklerle de gösterilmiştir. Ayrıca malzemelerin bu tür sistemlerde nasıl kullanılabileceğine, üretim şekline de kısaca değinilmiştir.

Strikar ve Spearing (2003b) tarafından yapılan çalışmada, mikro elektrostatik uyarıcıların hangi koşullar altında ne gibi yüklere maruz kalacağı tartışılmış ve bu yüklere dayanabilmesi için seçilmesi gereken malzeme, Ashby yaklaşımıyla seçilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan malzeme indisleriyle ve grafiklerle farklı durumlar için farklı malzemeler önerilmiştir.

Pasini vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, kirişlerde meydana gelen eğilmelerin önüne geçebilmek, daha rijit tasarımlar yapabilmek ve en önemlisi daha hafif kirişler üretmek için kesit alanının her yönde olabilecek değişimleri araştırılmış ve bunun için en uygun geometrinin seçilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmayla uygun geometrili kirişlerin verimliliği artırdığı kanıtlanmıştır.

Ashby vd. (2004) tarafından yapılan çalışma ile malzemelerin ve ürünlerin imalatında kullanılacak olan yöntemlerin seçiminde izlenebilecek stratejiler anlatılmıştır ve bu konuda eksikliklerin olduğu ortaya konulmuştur. Eksik olunan konularda bilgisayar programcılara, mühendislere ve bilim adamlarına düşen görevlere de değinilmiştir.

Farklı uygulamalar için malzeme seçimi yaparken farklı yaklaşımlardan faydalanılır, fakat tam tersi bir malzeme için uygulama alanı seçimi yapmaya yarayan bir yaklaşım yoktur. Salimon vd. (2004) tarafından yapılan çalışmayla bu konuya ışık tutulmuştur. Üç farklı strateji üzerinde çalışılmıştır. Geliştirilen yöntemlerle de desteklenen bilgisayar programı vasıtasıyla (CES), malzemeler için uygulama bulmak mümkün olmuştur.

Yapıların ağırlıklarını minimize etmek tasarımcıların başlıca çözmeye çalıştığı bir problemdir. Bu problemi çözmek için de Shanley, Cox, Parkhouse, Charles, Crane ve son zamanlarda da Ashby ve Weaver farklı yöntemler üzerinde çalışmışlardır, materyal indisleri oluşturmuşlardır. Kirişlerin eğilme dayanımını artırmak ve aynı zamanda kütlesini düşürmek için kullanılan malzeme indisi, kirişlerin en ve genişliğinin artırılması, azaltılması durumunda da kullanılabilir şekilde Burgess vd. (2005) tarafından geliştirilmiştir. Bu indisle hangi tür malzemenin, hangi kesitlerde daha iyi bir seçim olabileceği grafik üzerinde gösterilmiştir.

Rao (2006) tarafından yapılan çalışmada, malzeme seçiminin önemine değinilmiş ve şimdiye kadar geliştirilen bir kaç yaklaşımla, bu yaklaşımların yetersizliğinden bahsedilmiştir. Çalışmada geliştirilen yaklaşım ile grafik teorisi ve matriks yaklaşımı birleştirilmiştir.

Uygulamalarda performansı artırması için kimi zaman tek bir malzeme yerine hibrid malzemeler kullanılmaktadır. Sirisalee vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada hibrid malzemelerin seçimi ele alınmıştır. İki'den fazla malzeme özelliğinin var olduğu durumlarda kullanılması önerilen yaklaşım, denklemler ve grafikler açıklanmıştır.

Shanian ve Savadogo (2006a) tarafından yapılmış çalışmada, ELECTRE 4 yöntemiyle polimer elektrolit enerji hücrelerinde bulunan bipolar plakalar için malzeme seçilmiştir. Aday olan malzemeler karakteristik özelliklerine ve oluşturulan performans indislerine göre bu yöntemle sıralanmıştır ve 4 farklı liste ortaya çıkmıştır. Bu listelerin birincileri ve ikincileri kendi aralarında kıyaslanmış ve malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

Shanian ve Savadogo (2006b) tarafından yapılan çalışmada ELECTRE yöntemi hakkında verilen geniş bilgiden sonra yöntemin ne kadar etkili ve verimli çalıştığı hakkında durum çalışması yapılmıştır. Durum çalışmasında entropi yöntemiyle karakteristik özelliklerin önemlilik değerlendirilmesi yapılmıştır ve ELECTRE 1 ve ELECTRE 2 yöntemleriyle de malzeme seçimi, maliyet dahil ve hariç olmak üzere 4 ayrı şekilde yapılmıştır. Seçilen malzeme CES programındaki bilgiler ile de kıyaslanmış ve seçimin doğru olduğu kanıtlanmıştır.

Shanian ve Savadogo (2006c) tarafından yapılan çalışmada, TOPSIS yöntemiyle polimer elektrolit enerji hücrelerinde bulunan bipolar plakalar için malzeme seçilmiştir. Aday olan malzemeler oluşturulan performans indislerine göre TOPSIS ve geliştirilmiş TOPSIS yöntemleriyle maliyet dahil ve hariç olmak üzere sıralanmıştır ve dört farklı liste ortaya çıkmıştır. Bu listelere göre yapılan yorumlarla plakalar için en uygun malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

Enerji santrallerinde karşılaşılabilecek zorluklar, sıkıntılar Janikowski (2007) tarafından yapılan çalışmada incelenmiş (korozyon, erozyon, maksimum çalışma sıcaklığı, titreşim, mekanik özellikler, vs.) ve bu durumlara uygun, zorlu koşulların üstesinden gelebilecek malzemeler önerilmiştir.

Ashby ve Cebon (2007) tarafından yapılan çalışmada, malzemede tasarım tabanlı yaklaşım ele alınmıştır. Mühendislerin bir ürünü tasarlarken malzeme seçiminde nasıl bir yaklaşım izleyebileceği ortaya konmuş ve bu konu için geliştirilen CES EDUPACK adlı bilgisayar programı ile malzeme bilgilerine daha kolay ulaşım imkanı sağlanmıştır.

Hofmann vd. (2008) deneysel çalışmalar yürüterek düz ve çentikli kanatlı tüplere sahip ters akışlı eşanjörlerin ısı transferini ve basınç düşümlerini optimize etmişlerdir. Kanatlı tüpler için kanat aralığı, kanat kalınlığı, kanat genişliği sabit olmak üzere 3 farklı tüp tercih edilmiştir. Düz I şeklinde, çentikli I ve U şeklinde kanatlı tüpler kullanılmıştır. Nusselt numaraları için geliştirilmiş bağıntılar ve basınç farklılık katsayıları, deneysel sonuçlar ve literatürden gelen eşitliklerle bir araya getirilmiştir.

Rao (2008), malzeme seçimi metodunu da ele alarak başkaları tarafından yapılmış olan çalışmaların da eksikliklerini anlatmış ve geliştirilmiş uzlaşmacı sıralama metodunu geliştirmiştir. Bu metotla, malzemelerin karşılaştırılan özellikleri ne kadar çok olursa olsun, özelliklerin birbirleri arasındaki önemi daha da belirginleştirilerek, görevi yerine getirecek optimum özelliklere sahip malzeme seçimi gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır.

Tasarımcılar, performansı artırmak ve maliyeti düşürmek için malzeme seçimine çok dikkat etmektedirler. Thakker vd. (2008) tarafından yapılan çalışma ile dalgalardan elektrik enerjisi üretmek için tasarlanmış türbinlerin kanatları için optimum özelliklere sahip malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir. 3 ayrı yaklaşım (Ashby, VE, TOPSIS) birlikte kullanılmış ve türbin malzemesi için en iyi malzeme olarak GFRP uygun bulunmuştur. Bilgisayar simülasyonlarıyla da seçim doğrulanmıştır.

Chatterjee (2009) tarafından malzeme seçiminde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelebilmek için VIKOR ve ELECTRE yöntemleri kullanılması önerilmiştir. Başka araştırmacıların yaptıkları çalışmaların, önerilen yöntemler ile çözülmesiyle her iki yöntemin sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Maniya ve Bhatt (2010) tarafından malzeme biliminin son zamanlardaki gelişimine vurguda bulunmuş ve bir tasarım için malzeme seçimi yaparken malzemenin sadece bir özelliğine bakılmaması gerektiği önerilmiştir. Birden fazla malzeme özelliğinin göz önüne alınmasıyla zorlaşan malzeme seçimi konusunda bir yaklaşım oluşturulmuş ve bu yaklaşım matematiksel formüllerle ifade edilmiştir. Oluşturulan bu yaklaşım (PSI) ile diğer yaklaşımlar karşılaştırılmış ve daha doğru ve kolay bir yaklaşım olduğu vurgulanmıştır.

Reddy ve Gupta (2010) tarafından mikro elektronik soğutucular için Ashby'nin yaklaşımı kullanılarak, termal ve mekanik özelliklerini maksimuma çıkarmak için en uygun malzeme seçiminin elektro-termal ısı transferi analiz çalışmaları yapılmıştır. Soğutucuların özellikleri için malzeme grafikleriyle birlikte malzeme indeksleri geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada mikro elektronik soğutucular için alüminyum alaşımları diğer metallere göre daha iyi performans göstermiştir.

Mavridou vd. (2010) kamyon dizel motorlarının verimliliğini artırmak için egzoz gazındaki ısı enerjisini, Rankine çevriminin yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürme üzerine çalışma yapmışlardır. Çevrimde kullanılması planlanan ısı değiştirici türleri incelenmiş ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar ve karşılaştırmalar doğrultusunda, uygun koşulları sağlayabilecek ve yüksek verimliliğe sahip 40 ppi (particles per inch) nikel köpüğüyle desteklenen levhalı tip ısı değiştiricisi tercih edilmiştir.

Cui vd. (2011), araçların daha az yakıt tüketmesi amacıyla daha hafif tasarımlar yapmayı amaçlamışlardır. Bu sebeple de araç ağırlığını düşürmek için malzeme seçimine dikkat edilmiştir. Aracı hafif ve dayanıklı yapan malzemeler daha pahalıdır. Maliyet ve ağırlık arasındaki ilişkiyi daha iyi anlayabilmek için, araçlara özgü farklı geometrilere sahip parçalara uygun performans indisleri geliştirilmiştir. Farklı bilgisayar programlarıyla da yapılan hesaplamalar ve simülasyonların yardımıyla indislerin güvenilir olduğunu kanıtlamıştır.

Ashby (2011) tarafından yapılan çalışmada, malzeme seçimi üzerine geliştirdiği yaklaşımın yanı sıra; şekil, fonksiyon ve imalat yöntemleri de anlatılmış, aralarındaki ilişki incelenmiştir. Geliştirilen performans indisleriyle, bilgisayar programları vasıtasıyla hazırlanan grafiklerle de tasarımcılar için bir kaynak yaratılmaya çalışılmıştır. Her konu için yapılan durum çalışmaları ile de konular pekiştirilmeye çalışılmıştır.

Parate ve Gupta (2011), Ashby yaklaşımı ile elektrostatik mikro işlemcilerin malzeme seçimini yapmışlardır. İşlemciler için performans ve malzeme özellikleri geliştirilerek malzeme seçimi grafikleri çizilmiştir. Seçim grafiklerinden de anlaşıldığı üzere yüksek voltajlar için en iyi aday elmas, sonrasında da silikon karbür ve silikon nitrür uygun görülmüştür. Diğer yönden de yüksek hızlı işlemciler için en iyi çözüm olarak alüminyum önerilmiştir. Alüminyumdan başka, bakır ve nikelin de kullanılabileceği belirtilmiştir.

Jahan vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada, çoklu kriterli seçme mekanizmalarından VIKOR yöntemi eskisiyle ve yeni geliştirilmiş yönleriyle incelenmiştir. Çalışmada beş tane de durum çalışmasına yer verilmiş, diğer araştırmacıların bulguları ile geliştirilmiş VIKOR yöntemi kıyaslanmıştır.

Kovan (2011), aşırı gerilmelere maruz kalan titanyum osteosentez plakaların deformasyona uğramalarını incelemiştir. Yapılan çalışmada Ashby yaklaşımıyla yeni plakalar tasarlanmıştır. Bu tasarımla da daha az malzemeyle daha fazla yüklerle dayanabilecek plakaların üretilebileceği gösterilmiştir.

Rashedi vd. (2012), rüzgar enerjisinden en iyi şekilde faydalanabilmek için rüzgar türbinlerinin kanat ve kule malzeme seçimlerini Ashby yaklaşımı ile incelemiştir. Malzeme seçimi yapılırken ağırlığı, maliyeti, üretim esnasında açığa çıkan karbon miktarını ve malzeme üretilirken tüketilen enerji miktarını minimuma çekmek hedeflenmiştir. Seçilen malzemeler her yönüyle değerlendirilmiştir ve şu an kullanılmakta olan GFRP'ye alternatif olarak epoksi / HS karbon fiber seçilmiştir. Aynı zamanda dökme demir alaşımı olan BS 900/2'de iyi performans sergilemiştir.

Hidrojen yakıt hücrelerinde bulunan bipolar plakaların ısı transferi, elektrik iletimi, gaz geçirgenliği, dayanım ve korozyon konularında belirli standartlar içerisinde olması istenir. Bu standartlara uyacak malzemenin seçimi için Oliveira vd. (2012) tarafından Ashby yaklaşımı kullanılmıştır. İki farklı malzeme grubu arasında (polimer-grafit kompozitler ve metal alaşımları) en uygunu bu yaklaşım ile belirlenmiştir ve yaklaşımın böyle karmaşık görevlerde malzeme seçiminde güvenilir bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

Chauhan ve Vaish (2012) tarafından aşınmaya karşı koruma görevi olan kaplama malzemesinin seçimini yapmak için farklı malzeme seçimi yaklaşımları kullanılmıştır. Ashby ve TOPSIS yaklaşımıyla yapılan malzeme seçimlerinin sonuçlarının aynı olduğu görülmüştür.

Isı boruları, geleneksel ısı değiştiricilerinin kullanılmasının mümkün olmadığı uygulamalarda kullanılır. Isı borularının çalışma sıcaklığına uygun olarak içindeki akışkan farklılık gösterir ve bu sebeple akışkanın aşındırıcı etkilerine ve dış sıcaklığa dayanması için uygun malzeme seçimi yapılmalıdır (Url-1).

Yazdani ve Payam (2015) mikro elektromekanik sistemlerde kullanılması planlanan elektrostatik eyleyicilerin malzeme seçimi için Ashby, VIKOR ve TOPSIS yaklaşımları kullanmışlardır. Üç farklı eyleyici için durum çalışması yapılmıştır ve yaklaşımların birbirleriyle aynı sonucu verdiği görülmüştür.

## 2. ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ

Isı değiştiriciler, farklı sıcaklıktaki iki veya daha fazla akışkanın ya da katı bir yzeyeyle bir akışkanının birbirleri arasında ısı transferi yapmasına olanak sağlayan cihazlardır. Çoğu ısı değiştiricilerinde akışkanlar birbirine karışmaz, bir yzeyeyle birbirlerinden ayrı tutulur. Bu tür ısı değiştiricilerine doğrudan ısı transferi yapan cihazlar ya da reküperatör denir. Akışkanların basınç farkından dolayı birbirine karıştığı ısı değiştiricilerine ise dolaylı ısı transferi yapan cihazlar ya da rejeneratör denir.

Isı değiştiricileri günümüzde birçok yerde kullanılmaktadır: Rafineriler, enerji santralleri, soğutma, iklimlendirme, vs. Ayrıca her gün hayatımızda olmazsa olmazlardan olan arabalarda, buzdolaplarında vs. yerlerde de ısı değiştiricilerinden faydalanılmaktadır.

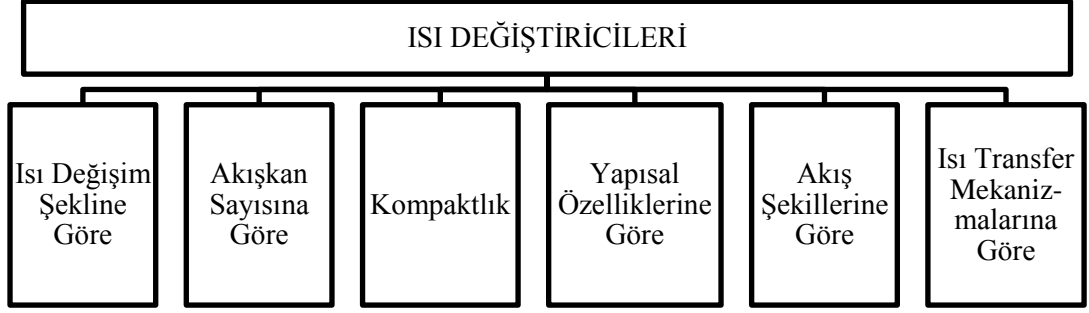
Bazı ısı değiştiricilerinde (rn: Evaporatrlerde), akışkan faz değiştiriyorsa bu tür ısı değiştiricilerine gizli ısı değiştiricisi denir. Faz değişimi olmuyorsa (rn: Ekonomizer), bu tür ısı değiştiricilerine ise duyulur ısı değiştiricisi denir.

Isı değiştiricileri yapı olarak ısı transfer yzeyi, akışkanın dağıtılması için tanklar, giriş ve çıkış boruları, dağıtıcılardan oluşmaktadır. Genellikle ısı değiştiricilerinde hareketli parçalar bulunmamaktadır. Buna istisna olarak dönen tip rejeneratörler örnek gösterilebilir. Akışkanları birbirinden ayıran, ısı transferinin yapıldığı yzeye ana yzeye denir. Isı transfer yzeyinin artırılması için ana yzeye ek olarak kanatçıklar da eklenebilir.

### 2.1 Isı Değiştiricilerinin Sınıflandırılması

Isı değiştiricileri; ısı değişim şekline, akışkan sayısına, ısı geçiş yzeyinin ısı geçiş hacmine oranına (kompaktlık), yapısal özelliklerine, akış şekillerine, ısı transfer mekanizmalarına göre sınıflandırılır. Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması şekil 2.1'de verilmiştir.

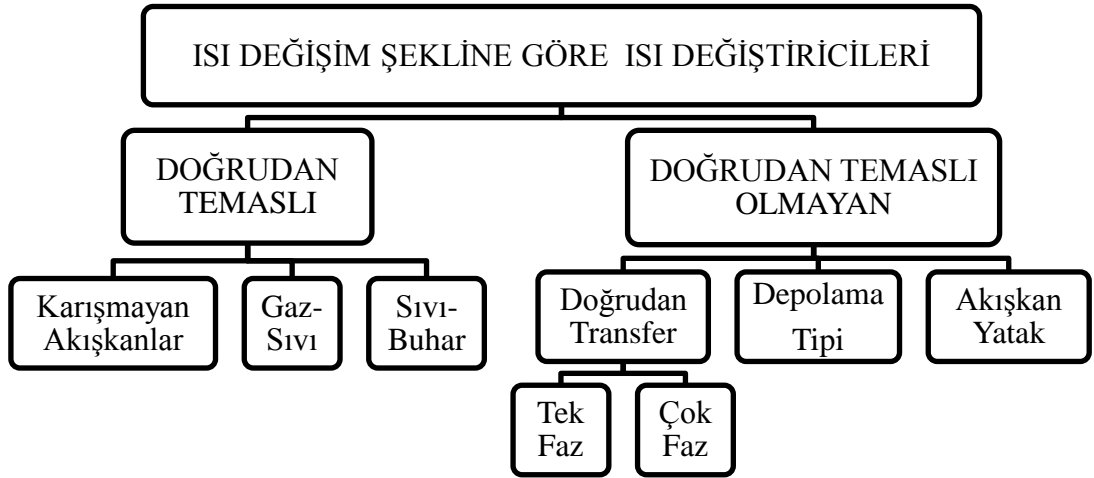




**Şekil 2.1:** Isı değiştiricilerinin sınıflandırılması (Shah ve Sekulic, 2003)

### 2.1.1 Isı Değişim Şekline Göre Sınıflandırma

Isı değiştiriciler ısı değişim şekline göre doğrudan temaslı ve doğrudan temaslı olmayan ısı değiştiriciler olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.2’de sınıflandırma gösterilmektedir.



**Şekil 2.2:** Isı değişim şekline göre ısı değiştiricileri

#### 2.1.1.1 Doğrudan Temaslı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiricilerinde akışkanları birbirinden ayıran duvar yoktur. Akışkanlar arasında ısı transferinin yanında kütle transferi de meydana gelir. Doğrudan temaslı olmayan ısı değiştiricilerine göre yüksek ısı transferi oranına

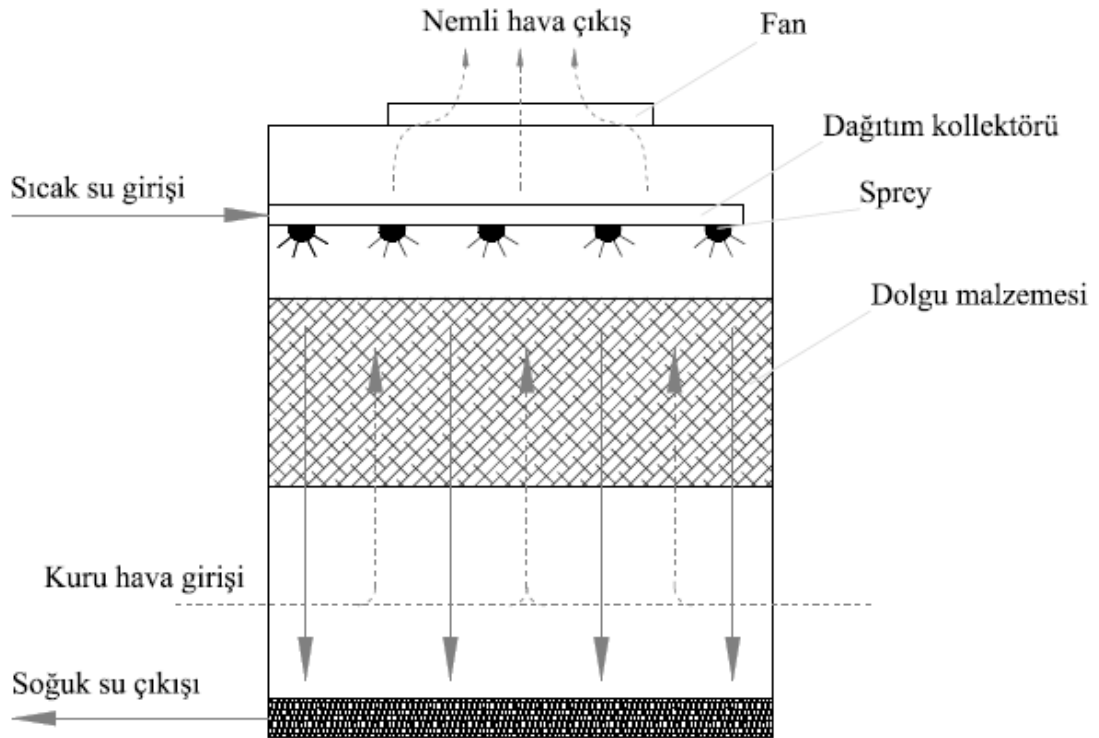
sahiptir, daha ucuzdur ve kirlenmeden ötürü tıkanıklık ihtimali daha düşüktür. Doğrudan temaslı ısı değiştiriciler üç gruba ayrılır: Karışmayan akışkanlı, gaz-sıvı ve sıvı-buhar.

#### 2.1.1.1.1 Karışmayan Akışkanlı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiricilerinde birbirine karışmayan akışkanlar birbirlerine temas ettirilerek ısı transferi sağlanır. Akışkanlar aynı fazda olmayabilir.

#### 2.1.1.1.2 Gaz – Sıvı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiricilerinde akışkanlardan biri gaz (genellikle hava), diğeri ise düşük basınçlı sıvı akışkandır (genellikle su). Isı transferinin büyük çoğunluğu kütle değişimi ile meydana gelir ve genel mekanizma taşınımdır. Buna en güzel örnek Şekil 2.3’de görüldüğü üzere soğutma kuleleridir.



Şekil 2.3: Soğutma kulesi çalışma prensibi

### **2.1.1.1.3 Sıvı – Buhar Isı Değiştiricileri**

Sıvı – buhar ısı değiştiricilerinde buhar, soğutma suyu ile yoğuşturulur veya su atık buhar ile ısıtılır. Enerji santrallerinde kullanılan kızdırıcılar ve degazörler bu tip ısı değiştiricisine örnektir.

### **2.1.1.2 Doğrudan Temaslı Olmayan Isı Değiştiriciler**

Doğrudan temaslı olmayan ısı değiştiricilerinde akışkanların birbirine karışmaması için akışkanları birbirinden ayıran, sadece ısı transferine olanak sağlayan duvarlar vardır. Bu tür ısı değiştiricilerine yüzeysel ısı değiştiricileri de denmektedir. Üç gruba ayrılır: Doğrudan transfer, depolama ve akışkan yataklı ısı değiştiricileri.

#### **2.1.1.2.1 Doğrudan Transferli Isı Değiştiricileri**

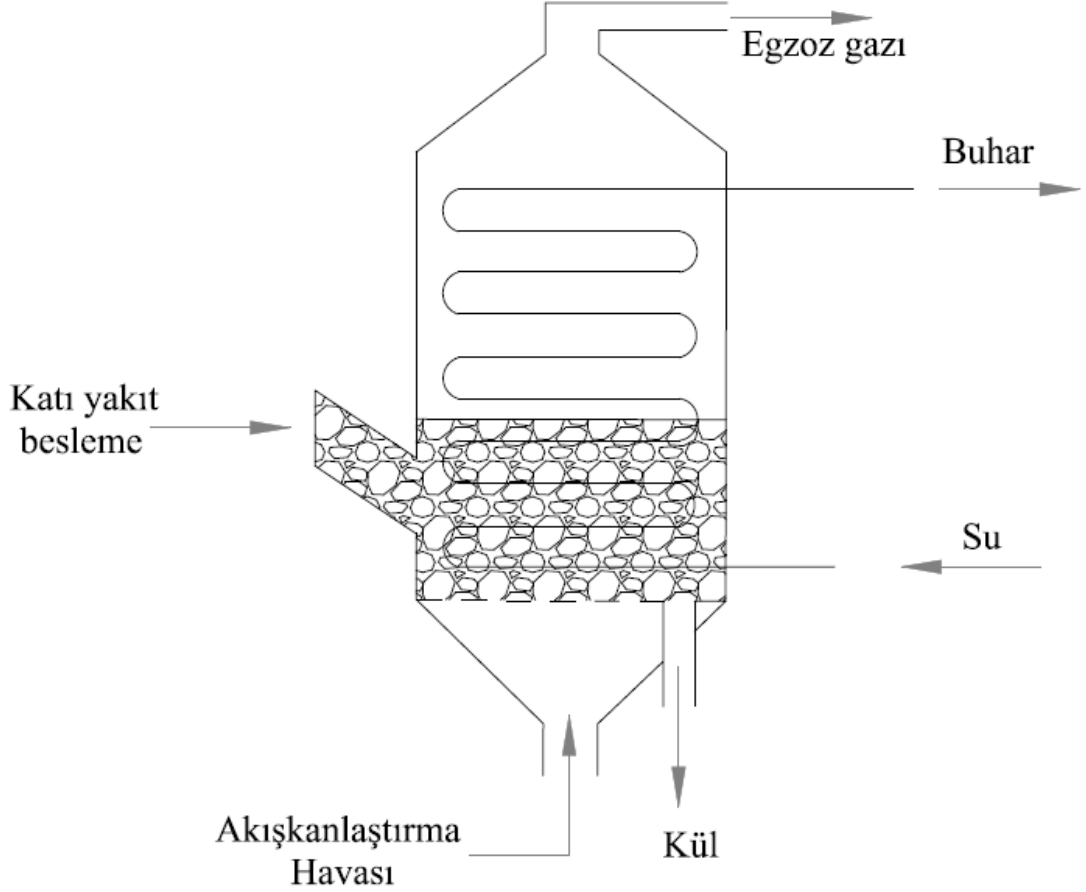
Bu tip ısı değiştiricilerinde sıcak akışkandan soğuk akışkana ısı transferi, akışkanları birbirinden ayıran duvar aracılığıyla sağlanmaktadır. Döner parçalara sahip olmadığı için reküperatör olarak adlandırılır. Birçok yerde bu tip ısı değiştiriciler kullanılır.

#### **2.1.1.2.2 Depolama Tipi Isı Değiştiricileri**

Matris şeklinde olan bu ısı değiştiricisinden iki farklı sıcaklıktaki akışkan birbiri ardına geçirilir. İlk geçen sıcak akışkan matrislere ısı enerjisini vererek soğur ve ardından geçen soğuk akışkan matrislerde depolanmış enerjiyi soğurarak ısınır. Bu tip ısı değiştiricileri rejeneratör olarak adlandırılır. Rejeneratörlerde sızıntı kaçınlmazdır. Genellikle gazdan gaza ısı transferi gerçekteştirilir.

### 2.1.1.2.3 Akışkan Yataklı Isı Değiştiricileri

Bir grup boru, kömür dolu yatağın içerisine daldırılır ve boru içerisinden su geçirilir (Şekil 2.4). Kömür yatağına ise alttan hava verilir ve bir yandan kömür yakılır. Kömür tanecikleri alttan verilen hava sayesinde akışkan gibi hareket eder. Boruyu dışarıdan saran kömür tanecikleri sayesinde ısı transferi artırılmış olur.



Şekil 2.4: Akışkan yataklı ısı değiştiricisi

### 2.1.2 Akışkan Sayısına Göre Sınıflandırma

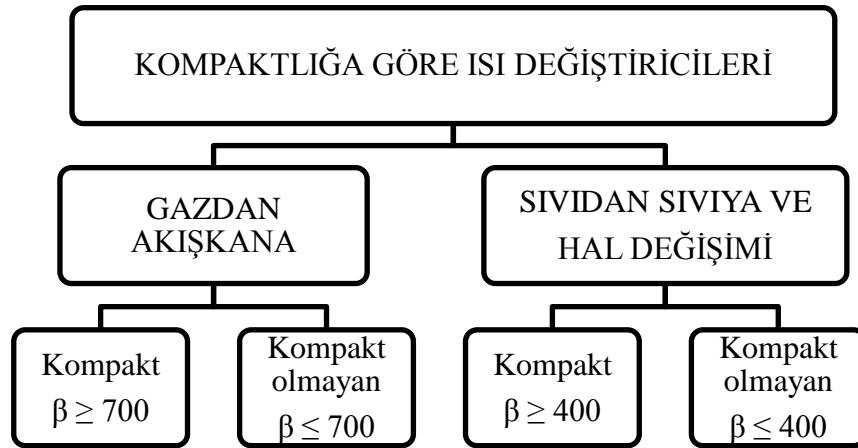
Isıtma, soğutma, ısı geri kazanım işlemlerinde çoğu zaman iki akışkanlı ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Üç akışkanlı ısı değiştiriciler kriyojenide ve bazı kimyasal işlemlerde kullanılır. Üçten fazla akışkana sahip ısı değiştiriciler de bulunmaktadır ve bunlar bazı kimyasal işlemlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de sınıflandırma verilmiştir.



**Şekil 2.5:** Akışkan sayısına göre sınıflandırma

### 2.1.3 Kompaklığa Göre Sınıflandırma

Kompakt ısı değıştirciler ağırlık ve hacmin önemli olduğu yerlerde tercih edilir. Bu tip ısı değıştirciler yüksek ısı transferi sağlayabilen yüksek yüzey yoğunluğuna sahiptirler. Yüzey yoğunluğu ısı transferinin meydana geldiği yüzey alanının hacme oranıdır. Borulu ve levhalı tip ısı değıştircilerine göre daha yüksek verimlilik gösterir. Kompaklığa göre ısı değıştirciler gazdan akışkana, sıvıdan sıvıya ve hal değışimi olarak iki grupta incelenir. Şekil 2.6’da bu sınıflandırma görülmektedir.

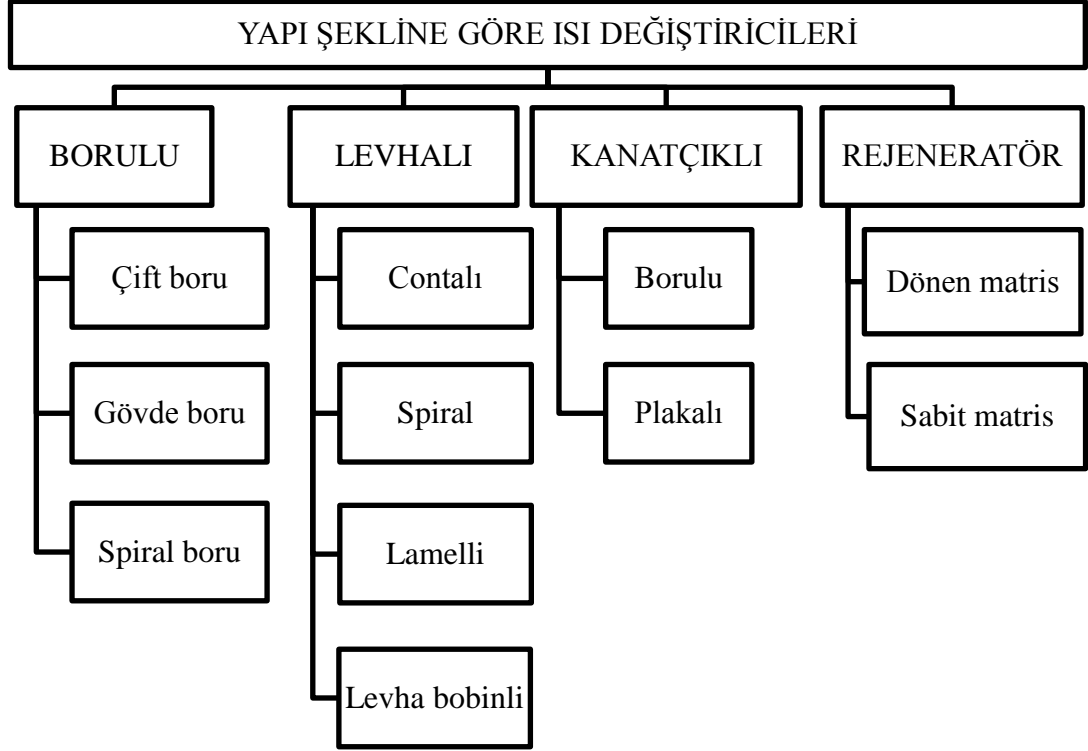


**Şekil 2.6:** Kompaklığa göre ısı değıştircileri

Gazdan akışkana ısı transferi yapan ısı değıştircilerinde gaz tarafında taşınım katsayısı düşük olduğu için gazın temas ettiği yüzey alanı artırılarak (kompaktlık artırılarak) ısı transferi yüksek verimlilikle gerçekleştirilmiş olur.

## 2.1.4 Yapısal Özelliklerine Göre Sınıflandırma

Isı değıştirciler genellikle yapısal özelliklerine göre dört ana branşta sınıflandırılır: Borulu, levhali, kanatçıklı, rejeneratör. Şekil 2.7’de bu sınıflandırma görölmektedir.



Şekil 2.7: Yapı şekline göre ısı değıştircileri

### 2.1.4.1 Borulu Isı Değıştircileri

Borulu ısı değıştirciler genellikle dairesel kesitli borulardan, bunun haricinde eliptik, dörtgen veya burkulmuş tipte borulardan da imal edilmektedir. Akışkanlar arasındaki yüksek basınç farklılıklarının olduğu yerlerde bu tip ısı değıştirciler kullanılır. Gazdan sıvıya ve gazdan gaza yapılacak olan ısı transferlerinde, kirlenmeden dolayı tıkanmaların meydana geleceği yerlerde de borulu ısı değıştirciler tercih edilir. Borulu ısı değıştirciler gövde borulu, çift borulu ve spiral borulu tipler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır.

#### 2.1.4.1.1 Çift Borulu Isı Değiştiricileri

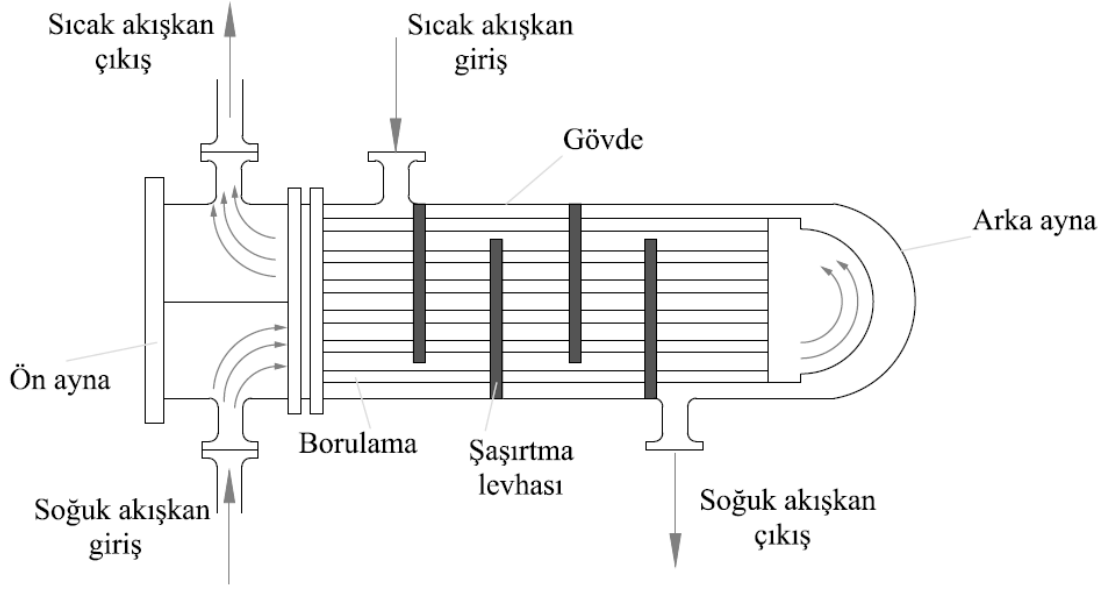
Çift borulu ısı değiştiriciler iç içe geçmiş iki borudan oluşur. Bir akışkan içerideki borudan, diğer akışkan ise içerideki boruyu saran borudan ters akışlı olarak geçirilir. Sabit duvar sıcaklığı istenmesi durumunda ise paralel akışlı olması tercih edilebilir. Maliyetlerinin fazla olması sebebiyle içerideki boru adedi artırılır, boruya kanatçıklar eklenir. Böylece ısı transfer alanı artırılmış olur. Şekil 2.8’de çift borulu ısı değiştiricisine bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.8: Çift borulu ısı değiştirici (U1-2)

#### 2.1.4.1.2 Gövde Borulu Isı Değiştiricileri

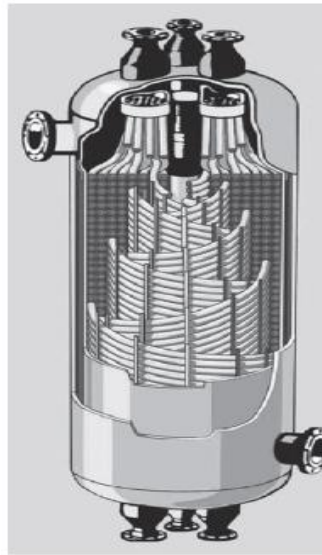
Bu tip ısı değiştiriciler bir demet boru etrafına metal sac sarılarak imal edilir. Boru içerisinden ve sac gövde içerisinden akışkan geçirilerek ısı transferi gerçekleştirilir. Isı değiştiricilerini oluşturan ana malzemeler: Boru demeti, gövde, n ayna, arka ayna, şaşırtma levhası ve boru destekleridir. Şekil 2.9’da bu ana malzemeler görülmektedir. Günümüzde çok fazla tasarıma ve sanayide yaygın kullanıma sahiptir.



**Şekil 2.9:** Gövde borulu ısı değıştirci

#### 2.1.4.1.3 Spiral Borulu Isı Değıştircileri

Sac gövde içersine spiral şeklinde sarılan boruların montajıyla imal edilir. Isı transferi düz halde gövdeden geçirilen borulardan daha fazladır. Küçük bir hacimde çok fazla ısı transferi alanı elde edilir (Şekil 2.10). Termal genleşme problem değildir ancak temizlik neredeyse olanaksızdır.



**Şekil 2.10:** Spiral borulu ısı değıştirci (Thulukkanam, 2013)

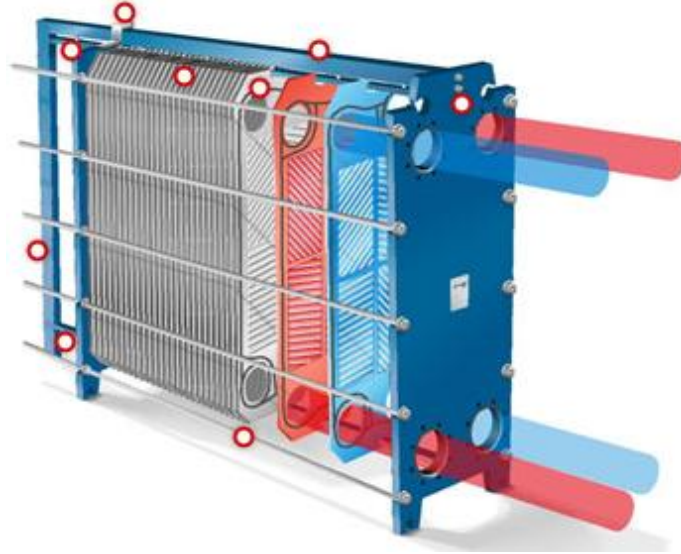


### 2.1.4.2 Levhalı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiriciler adından da anlaşılacağı üzere levhalardan oluşmaktadır. Plakalar çeşitli şekillerde ve boyutlarda olabilir. Levhalı ısı değiştiriciler genellikle düşük basınç ve sıcaklıklarda çalışır. Bu yüzden borulu ısı değiştiricilere göre daha az tercih edilirler. Levhalı ısı değiştiriciler contalı, spiral, lamelli ve levha bobinli olmak üzere dört ana grupta incelenir.

#### 2.1.4.2.1 Contalı Levhalı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiriciler oluklu metal plakaların birbirleriyle temas edecek şekilde montajının yapılmasıyla imal edilir. Plakalarda iki giriş ve iki çıkış vardır. Plakaların montajı bu giriş çıkışlardan contalı olacak şekilde gerçekleştirilir. Bu plakalar içerisinde sıcak ve soğuk akışkanlar geçirilerek akışkanlar arasındaki ısı transferi sağlanır. Temizlikleri kolaydır (Şekil 2.11).

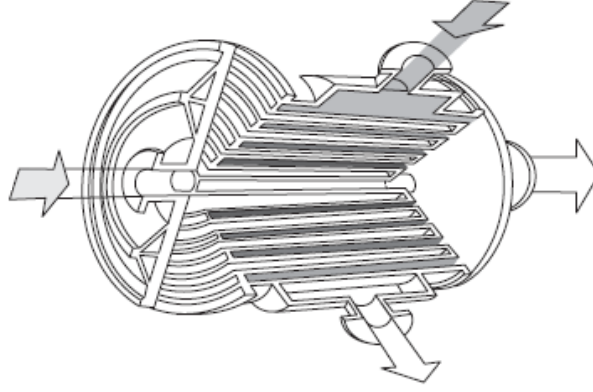


Şekil 2.11: Contalı levhalı ısı değiştirici (Url-3)

#### 2.1.4.2.2 Spiral Levhalı Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiricileri iki uzun metal levhanın spiral şekilde sarılmasıyla imal edilir. Sıcak ve soğuk akışkanlar için spiral bir akış sağlanır. Spiral levhalı ısı

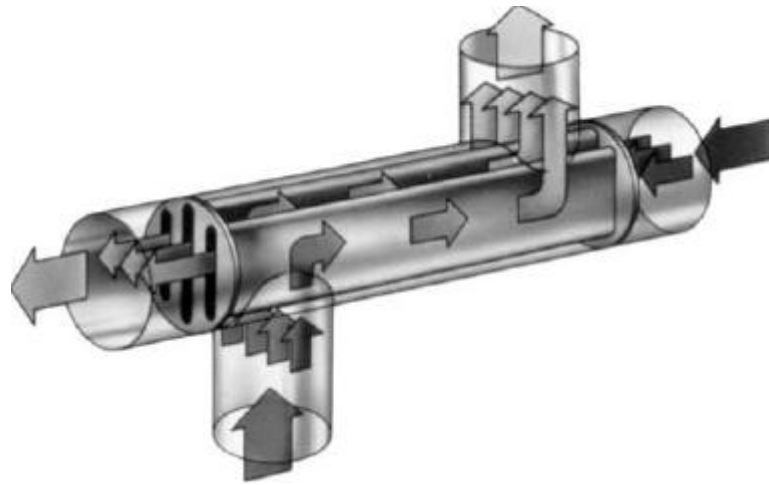
değiştiriciler, gövde borulu ısı değiştiricilerden daha verimlidir, daha yüksek ısı transfer alanına sahiptir. Bu tip ısı değiştiricilerinin çalışma prensibi Şekil 2.12’de verilmiştir.



**Şekil 2.12:** Spiral levhalı ısı değiştirici (Shah ve Sekulic, 2003)

#### 2.1.4.2.3 Lamelli Isı Değiştiricileri

Tasarımı gövde borulu ısı değiştiriciler gibidir ancak silindirik borular yerine düzleştirilmiş borular kullanılmaktadır (Şekil 2.13). Bu tip ısı değiştiriciler endüstriyel uygulamalarda gövde borulu ısı değiştiricilerin yerine de kullanılmaktadır.



**Şekil 2.13:** Lamelli ısı değiştirici (Shah ve Sekulic, 2003)

#### 2.1.4.2.4 Levha Bobinli Isı Değiştiricileri

Bu tip ısı değiştiriciler soğutucu veya ısıtıcı olarak kullanılır. Levha bobinli ısı değiştiriciler az bir maliyetle ve her türlü şekille imal edilebilir. Kriyojenide, boya, yiyecek, vs. endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. şekil 2.14'de bu ısı değiştiricilerine ait bir örnek gösterilmiştir.



şekil 2.14: Levha bobinli ısı değiştirici (Shah ve Sekulic, 2003)

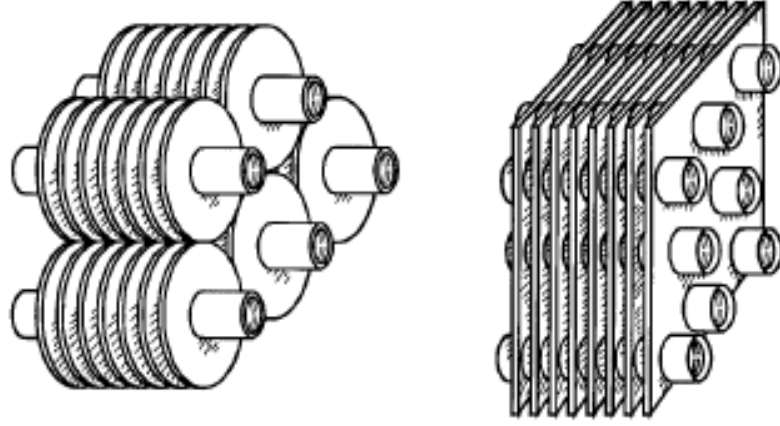
#### 2.1.4.3 Kanatçıklı Isı Değiştiriciler

Gazların veya sıvıların ısı taşınım katsayılarının düşük olduğu durumlarda, ısı değiştiricilerin, ısı transferi yapan yüzeyinin artırılması gerekir. Bu sebeple ana yüzeye, ikincil yüzeyler eklenir ve böylece ısı transfer alanı artırılmış olur. Bu tür ısı değiştiricilerine kanatçıklı ısı değiştiriciler denir. Kanatçıklı ısı değiştiriciler borulu ve plakalı olmak üzere iki grupta sınıflandırılmaktadır.

##### 2.1.4.3.1 Kanatçıklı Borulu Isı Değiştiriciler

Bu tip ısı değiştiriciler en eski ısı değiştiricilerindedir. Boru içerisinden sıvı ve gaz fazında akışkan geçirilirken boru dışından gaz fazında akışkan geçirilir. Gaz

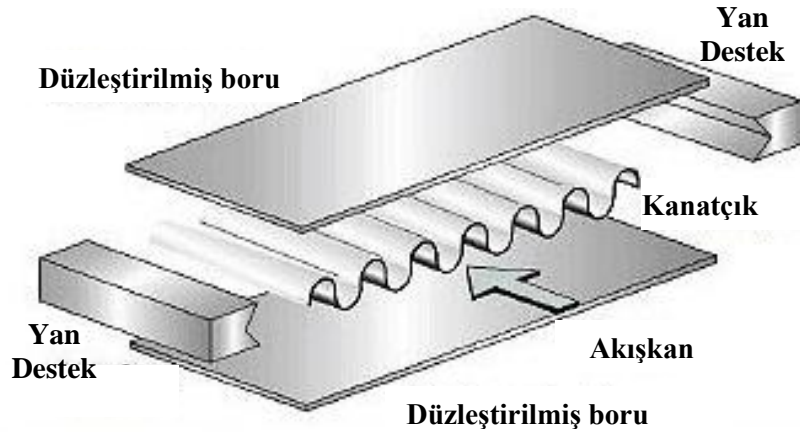
fazındaki akışkanın ısı taşınım katsayısı düşük olduğu için gazın boruya temas ettiği ısı transfer yüzeyinin artırılması için borunun dışına çeşitli şekillerde kanatçıklar eklenir (Şekil 2.15). Boru içerisinden yüksek basınçta sıvı veya gaz akışkanlar geçirebileceği için hava soğutmalı ısı değiştiricilerinde ve enerji santrallerinde tercih edilir.



Şekil 2.15: Kanatçıklı borulu ısı değiştirici (Shah ve Sekulic, 2003)

#### 2.1.4.3.2 Kanatçıklı Levhalı Isı Değiştiriciler

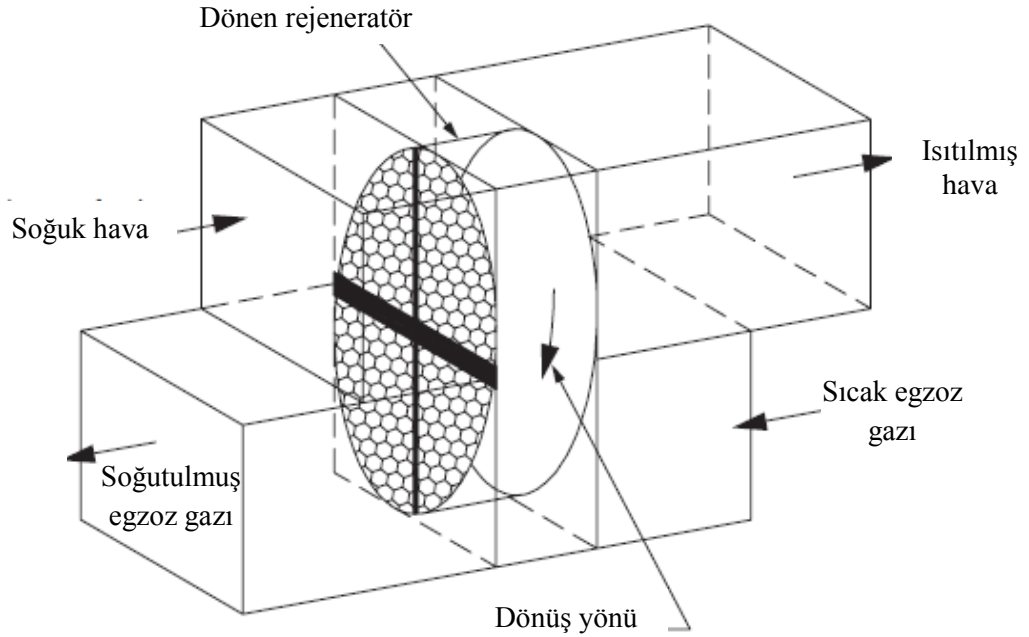
Levhalı ısı değiştiricilerinde yüzey alanını artırabilmek için dalgalı, üçgen veya dörtgen şeklinde kanatçıklar ya da metal köpüğü kullanılır (Şekil 2.16). Kullanılan kanatçıklar basınç dayanımı ve rijitliğe de yardımcı olur. Arabalarda kullanılan radyatörler bu tip ısı değiştiricilerine örnektir.



Şekil 2.16: Kanatçıklı levhalı ısı değiştirici

#### 2.1.4.4 Rejeneratörler

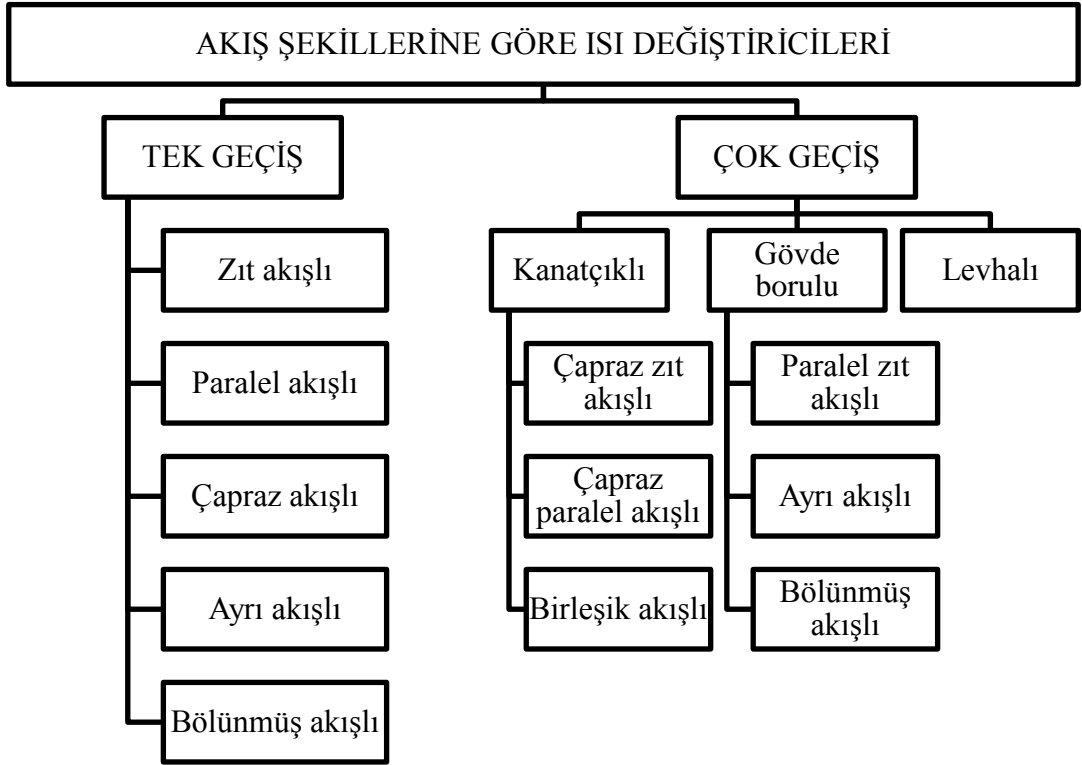
Rejeneratörler, depolama tipi ısı değiştircilerindendir. Cam, imento, metallerin imalatında bacadan atılan ısı enerjisini geri kazandırmak için bu tip ısı değiştircilerin kullanılması, tesisin verimliliğini artırır. Dönen ve sabit matrisli tipleri vardır. Dönen matrisli rejeneratörlere örnek Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17: Rejeneratör alışma prensibi (Thulukkanam, 2013)

#### 2.1.5 Akış Şekillerine Gore Sınıflandırma

Isı değiştircilerinde akış Őekillerinin seğimi verim, basınç dūřümü, minimum ve maksimum hızlar, akış güzergāhları, termal gerilmeler, sıcaklık, borulama ve diğer tasarım kriterlerine gore yapılır. Akış Őekillerine gore tek ve çok geçişli olarak sınıflandırılır, bu sınıflandırma Őekil 2.18’de gösterilmektedir.



**Şekil 2.18:** Akış şekillerine göre ısı değiştiricileri

### 2.1.5.1 Tek Geçişli Isı Değiştiricileri

Tek geçişli ısı değiştiriciler zıt akışlı, paralel akışlı, çapraz akışlı, ayrı ve bölünmüş akışlı olmak üzere beş gruba ayrılır.

#### 2.1.5.1.1 Zıt Akışlı Isı Değiştiriciler

Zıt akışlı ısı değiştiricilerde akışkanlar paralel, fakat birbirlerine zıt şekilde akarlar. En yüksek verime ve ısı transferine bu tip ısı değiştiricilerinde ulaşılır. Termal gerilmeler diğer ısı değiştiricilere göre düşüktür. Tasarımı ve imalatı zor olduğu için yüksek verimlilik aranmıyorsa tercih edilmez.

### **2.1.5.1.2 Paralel Akışlı Isı Değiştiricileri**

Paralel akışlı ısı değiştiricilerde akışkanlar aynı taraftan girerler, birbirlerine paralel olarak aynı yönde hareket ederler ve aynı taraftan ısı değiştiricisini terk ederler. Bu tip ısı değiştiriciler tek geçişli ısı değiştiricileri içerisinde en düşük verime sahiptir. Yüksek termal gerilmeler ve düşük verimlilik yüzünden çok fazla tercih edilmez.

### **2.1.5.1.3 Çapraz Akışlı Isı Değiştiriciler**

Akışkanlar bu tip ısı değiştiricilerinde birbirlerine dik olarak hareket ederler. Termodinamik olarak verimlilik zıt akışlı ile paralel akışlı ısı değiştiricilerinin arasındadır. En büyük sıcaklık farkı akışkanların çıkışlarındaki köşelerde olur. Çapraz akış genellikle kanatçıklı levhalı ısı değiştiricilerinde tasarımı kolaylaştırdığı için tercih edilir.

### **2.1.5.1.4 Ayrı Akışlı Isı Değiştiriciler**

Bu tip ısı değiştiricilerinde akışkanlardan biri ısı değiştiricisine tam ortadan girer ve bir saptırma levhasıyla akışkan iki kola ayrılır ve çıkmadan önce tekrar birleşirler. Akışkan 180° ile ayrılır ve birleşir. Diğer akışkan ise düz bir şekilde hareket eder.

### **2.1.5.1.5 Bölünmüş Akışlı Isı Değiştiriciler**

Ayrı akışlı ısı değiştiricilerde olduğu gibi bir akışkan düz bir şekilde hareket ederken diğer akışkan ısı değiştiricisine bir uçtan girer ve diğer akışkanın her iki ucundan birleşmeden çıkar.

### **2.1.5.2 Çok Geçişli Isı Değiştircileri**

Isı değiştircilerinin boyundan tasarruf sağlar. Yani uzun olan bir ısı değiştircisinin kısalmasına ve veriminin artmasına olanak sağlar. Kanatçıklı, gövde borulu ve levhalı olmak üzere üç ana grupta incelenir.

#### **2.1.5.2.1 Kanatçıklı Çok Geçişli Isı Değiştircileri**

Kanatçıklı ısı değiştircilerinde genel olarak bir akışkan birden fazla çapraz akışlı olarak geçirilerek elde edilir. Çapraz zıt akışlı, çapraz paralel akışlı ve birleşik akışlı türleri vardır.

#### **2.1.5.2.2 Gövde Borulu Çok Geçişli Isı Değiştircileri**

Gövdeden geçirilen boru aynı gövde içerisinden birden fazla geçirilerek imal edilir. Paralel zıt akışlı, aynı akışlı ve bölünmüş akışlı şekilde türleri vardır.

#### **2.1.5.2.3 Levhalı Çok Geçişli Isı Değiştircileri**

Levhalı ısı değiştircilerinde plakalar arasındaki contalara göre birden fazla geçiş uygulanır. Genellikle paralel ve zıt akışlı kombinasyonlar tercih edilir. Bu tip ısı değiştirciler yüksek debilerin olduğu yerlerde düşük sıcaklık değişimi sağlar.

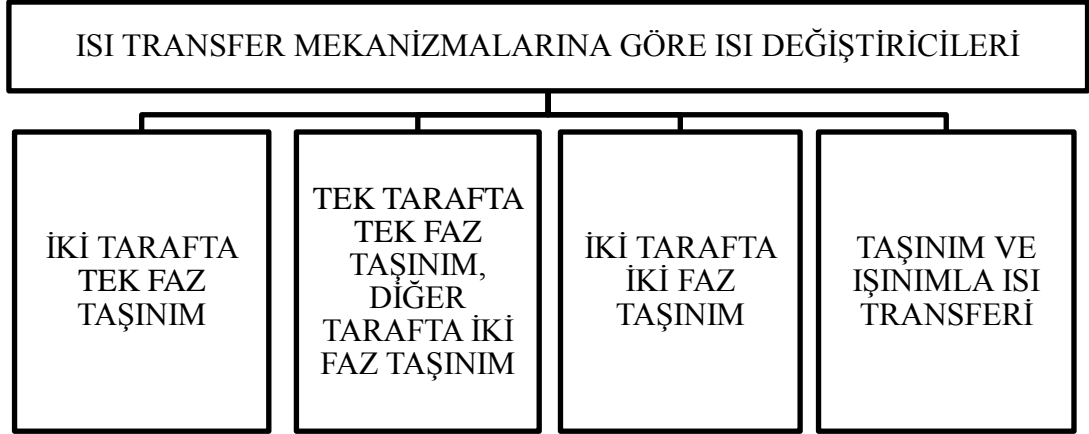
### **2.1.6 Isı Transfer Mekanizmalarına Göre Sınıflandırma**

Termal enerjiyi, ısı değiştircisinde akışkanlar arasında transfer ederken akışkandan yüzeye aktarmak için kullanılan basit ısı transferi mekanizmaları: Tek faz taşınım, iki faz taşınım, birleşik taşınım ve radyasyondur. Isı transfer mekanizmalarına göre sınıflandırma Şekil 2.19'da gösterilmektedir.

Tek faz taşınıma örnek olarak otomotiv radyatörleri, yolcu kabini ısıtıcıları ve ekonomizörler verilebilir. Tek tarafta tek faz taşınım, diğer tarafta iki faz taşınıma



örnek buharlı enerji santrallerindeki yoğuşturucular, gazlı ya da sıvı ısıtmalı buharlaştırıcılar, buhar jeneratörleri verilebilir. İki tarafta da iki faz taşınımına örnek, bir tarafta yoğuşma bir tarafta buharlaşma meydana gelen klimaların buharlaştırıcılarıdır. Taşınım ve ışınilma ısı transferine, atık ısı geri kazanım kazanları örnek gösterilebilir.



**Şekil 2.19:** Isı transfer mekanizmalarına göre ısı değıştiriciler

## 2.2 Isı Değıştiricilerinde Kullanılan Malzemeler

Isı değıştiricileri imalatında kullanılan malzemeler, ısı değıştiricilerinin maruz kaldığı ortam koşullarına göre değışiklik gösterir. Ortam koşulları: Sıcaklık, basınç, akışkan türü, vs. olabilir.

Sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde maksimum çalışma sıcaklığı yüksek olan, sıcaklığın çok düşük olduğu yerlerde ise minimum çalışma sıcaklığı düşük olan malzeme seçilmelidir. Basınç için de aynı şey söylenebilir. Isı değıştirici yüksek basınçlara maruz kalacaksa akma sınırı veya kırılma tokluğu yüksek malzemeler seçilmelidir. Ortamdaki akışkanın türü de malzeme seçimini önemli derecede etkiler. Eğer akışkan korozifse buna uygun malzemenin seçilmesi gerekmektedir.

Yukarıdan da anlaşılacağı üzere, ortam koşullarına uygun malzeme seçerken malzemelerin karakteristik özelliklerine bakılmalıdır. Isı değıştirici malzemesi seçerken dikkat edilmesi gereken en önemli özellik termal iletkenliktir.

Termal iletkenliğin yanı sıra termal uzama, maksimum-minimum çalışma sıcaklıkları, akma sınırı, kırılma tokluğu, yoğunluk, korozyona karşı direnç ve öz direnç ısı değiştiricilerinde malzeme seçerken dikkat edilmesi gereken özelliklerdendir. Karakteristik özelliklerin yanı sıra imal edilebilme özellikleri ve maliyet de malzeme seçimi etkilemektedir.

Isı değiştiricilerinde genel olarak alüminyum, bakır ve çelik alaşımları, seramik ve son olarak da kompozit malzemeler kullanılır. Ortam koşullarına göre bu malzemeler arasında soruna en iyi cevap verebilecek olan seçilir.

Alüminyumun en önemli özelliği, ısı değiştiricilerinde kullanılan diğer malzemelere göre daha düşük yoğunluğa sahip olmasıdır. Ağırlığın düşük olması istenen yerlerde alüminyum kullanılabilir. Alüminyum alaşımlarının akma sınırı ve kırılma tokluğu çelik alaşımları kadar iyi olmayabilir ancak bakır alaşımlarıyla arasında büyük bir fark yoktur. Maliyet açısından bakılırsa alüminyum alaşımları genel olarak çelik alaşımlarından pahalıdır ancak bakır alaşımlarından daha ucuz olması sebebiyle tercih edilir. İmalat için uygundur ancak tamiri biraz zordur. Alüminyum kaynağını yapmak ustalık gerektirmektedir. Kullanılan yerlere örnek: Motorlu taşıtların radyatörleri, kalorifer petekleri, işlemci soğutucuları, kimyasal akışkanların bulunduğu tesislerde (enerji santralleri, petrokimya tesisleri), vs.

Bakır termal iletkenliği en yüksek olan malzemedir. Bakır alaşımlarının akma sınırı ve kırılma tokluğu alüminyum alaşımlarından biraz daha iyidir ancak çelik alaşımları kadar iyi değildir. Yoğunluğu alüminyumdan çok fazladır, çelikle de neredeyse aynıdır. Ancak maliyet bakımından çelik ve alüminyum alaşımlarından daha pahalıdır. Bu sebeple kritik yerlerde kullanılmasına özen gösterilir. Korozyona karşı da en dirençli metallerin başında gelmektedir. Tamiri alüminyuma göre daha kolaydır, kaynak yerine lehim yapılır. Uzun yıllar zarar görmeden, bakım ihtiyacı duymadan işlevini yerine getirebilir. Kullanılan yerlere örnek: Motorlu taşıtların radyatörleri, buzdolabı ısı değiştiricileri, bina ısıtma soğutmalarında, gıda sektöründe, elektronik aletlerin soğutmasında (ısı boruları), kimyasal akışkanların bulunduğu tesislerde (enerji santralleri, petrokimya tesisleri), vs.

Çelik alaşımları genel olarak maliyet bakımından bakır ve alüminyum alaşımlarından daha uygun olduğu için tercih edilir. Korozyona karşı bakır alaşımları

kadar dirençli değildir ancak akma sınırı, kırılma tokluğu ve maksimum çalışma sıcaklığı yüksek olduğu için yüksek basınçlı ve sıcaklıktaki akışkanların bulunduğu yerlerde kullanılır. Termal iletkenliği alüminyum ve bakır alaşımları kadar yüksek değildir. Tamiri ise bakırdan zor, alüminyumdan biraz daha kolaydır. Kullanılan yerlere örnek: Kimyasal akışkanların bulunduğu tesislerde (enerji santralleri, petrokimya tesisleri), konut sıcak su kazanları, vs.

Seramikler de gelişen teknoloji ile ısı değiştiricilerinde yer bulmaktadır. Genel olarak korozyona karşı çok dirençli oldukları için tercih edilir. Kırılgan ve metallere göre daha pahalı oldukları için de her yerde kullanılamazlar. Bazı seramikler termal iletkenlik bakımından bakır ve alüminyum alaşımlarından çok yüksek değerlere sahip olmasına rağmen, genel olarak termal iletkenliği bakır, alüminyum ve çelikten çok daha düşüktür. Aşınma ve korozyonun yoğun olduğu bölgelerde ısı değiştiricisi yüzeyine kaplama olarak da uygulanır. Kullanılan yerlere örnek: İşlemci soğutucuları, yüksek korozyon etkiye sahip akışkanların bulunduğu ısı değiştiriciler, vs.

Kompozit malzemeler farklı malzemelerin bir arada kullanılması ile elde edilir. Amaç: Kullanılan birden fazla malzeme ile her malzemenin iyi yanını birleştirilerek kötü yanlarını olabildiğince düşürmektir. Örneğin; bakırın elektrik iletkenliği, termal iletkenliği kadar yüksektir. Elektriğe karşı dirençli ve yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzeme olması için bakır, epoksi ile birleştirilerek kompozit malzeme elde edilir. Kullanılan yerlere örnek: Genel olarak elektronik aletlerin soğutulmasında, vs.

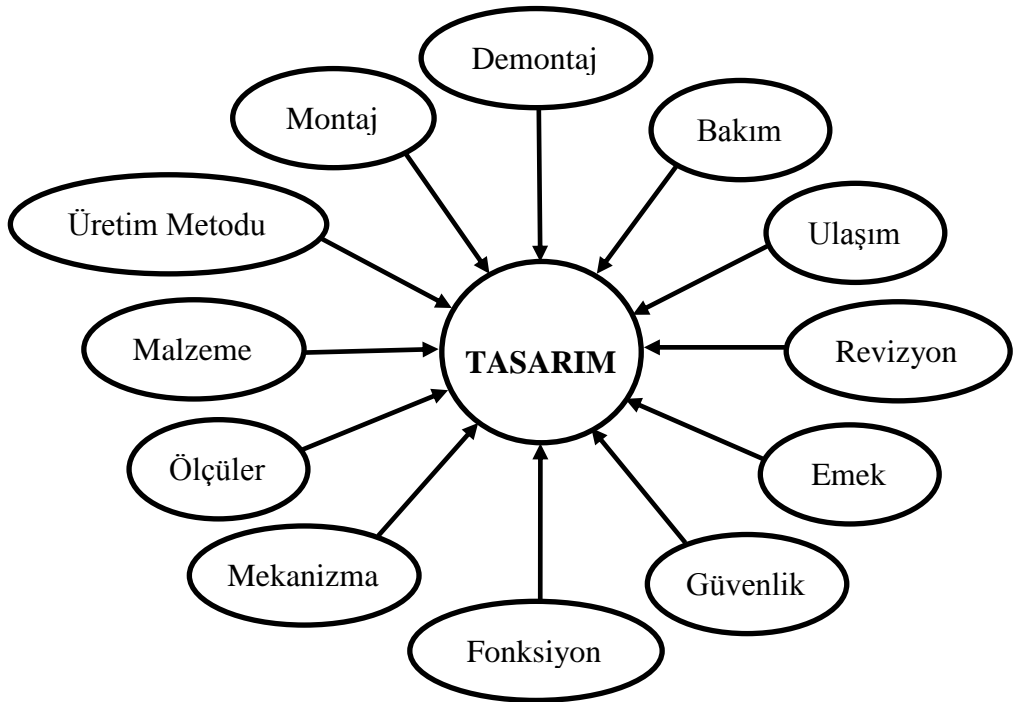
### 3. TASARIMDA MALZEME SEÇİMİ

#### 3.1 Tasarımda Kısıtlayıcılar

Bir problemin giderilmesi, bir ihtiyaca çözüm getirmesi amacıyla yapılan çalışmalar sonucu oluşan ürüne tasarım denir. Bu amaçla yapılan bir çalışmanın sonucunda her zaman ürün ortaya çıkması gerekmez. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya yeni bir fikir veya bilgi dağarcığı da çıkabilir.

Tasarım yaparken atılan her adım bir sisteme uygun olmalıdır. Aksi takdirde tasarımcı çalışmasında başarılı olamaz, çalışma sonucunda bir fikir ve bir ürün ortaya çıkmaz.

Tasarımcı yaptığı sistemli çalışmasında birden çok kısıtlayıcı ile baş etmek zorundadır. Bunlardan bazılarını Şekil 3.1’ de görebiliriz. Tasarımda tasarımcıyı kısıtlayan bir şey de revizyondur. Revizyon, tasarımda artık ihtiyacı karşılamayan bir parçanın veya eski malzemenin yenisi ve daha iyisiyle değiştirilmesidir. Yapılan sistemli çalışmada geri dönüşler ile revizyon işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 3.1: Tasarımda kısıtlayıcılar (Hatamura, 2006)

Tasarımda kısıtlayıcılardan biri de malzemedir. Çalışmalarda doğru malzemeyi seçmek önemlidir. O zamanın şartlarında en uygun malzemeyi seçmek tasarımcının görevidir ve bu o kadar da kolay bir şey değildir. Çünkü malzeme bilimi her gün daha da gelişmektedir ve yeni malzemeler, mühendisler ve bilim adamları tarafından geliştirilmektedir.

### 3.2 Malzemelerin Sınıflandırılması ve Özellikleri

Günümüzde çok sayıda malzeme vardır. Bütün bu malzemelerin de kendilerine has karakteristik özellikleri vardır. Bunlar: Yoğunluk, fiyat, elastisite modülü, akma sınırı, basma dayanımı, sertlik, uzama katsayısı, tokluk, ergime noktası, maksimum ve minimum çalışma sıcaklığı, termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, elektrik geçirgenliği, öz direnci vs.dir.

Bazen tasarımlarda kullanılan malzemeler yetersiz kalabilir. Yani sahip olduğu özellikler istenilen görevi yerine getiremeyebilir. Bu sebeple geliştirilen birçok mühendislik malzemesi vardır. Temelde mühendislik malzemeleri metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört sınıfa ayrılır (Tablo 3.1).

**Tablo 3.1:** Malzemelerin Sınıflandırılması

| Malzeme     | Önemli özellikler                                                                                             | Örnekler                                                                                               |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Metaller    | Sertlik, termal ve elektrik iletkenliği, korozyona karşı dayanım, işlenebilirlik, rijitlik                    | Demir ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, gümüş, altın vs.                                         |
| Seramikler  | Termal dayanım, sertlik, kırılma direnci, yüksek sıcaklığa ve korozyona karşı dayanım                         | Silika, soda camı, çimento, refrakter, silikon karbidler, silikon nitritler ve oksitler, vs.           |
| Polimerler  | Yumuşaklık, düşük yoğunluk, termal ve elektrik direnci, tokluk, yanabilirlik                                  | PVC, PTFE, polietilen, polikarbonat, naylon, epoksiler, pamuk, doğal ve sentetik plastikler, deri, vs. |
| Kompozitler | Belirleyici bir özelliği yoktur. (Diğer malzemelerin önemli özellikleri kompozitlerle yakalanmaya çalışılır.) | GFRP, CFRP, beton vs.                                                                                  |

Her bir sınıf kendi arasında tekrar sınıflara ayrılır. Örneğin metaller; çelikler, dökme demirler, alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, çinko alaşımları, titanyum alaşımları vs. Bu sınıflar da kendi içlerinde alt sınıflara ayrılır ve bu devam eder. Her bir malzemenin bahsedildiği gibi karakteristik özellikleri farklıdır. Tablo 3.2’de yukarıda bahsedilen ana malzemelerin genel olarak sergiledikleri bazı karakteristik özellikler verilmiştir.

**Tablo 3.2:** Başlıca malzemelerin karakteristik özellikleri(Granta Design, 2014)

| Özellikler                                | Metaller             | Seramikler             | Polimerler               | Kompozitler<br>(Örnek:CFRP)       |
|-------------------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Çekme dayanımı<br>(N/mm <sup>2</sup> )    | 200-2200             | 10-800                 | 5-100                    | 550-1000                          |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )             | 2-20                 | 2-17                   | 1-2                      | 1,5-1,6                           |
| Sertlik                                   | Orta                 | Yüksek                 | Düşük                    | Düşük                             |
| Elastisite modülü<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 1-20.10 <sup>4</sup> | 15-70. 10 <sup>4</sup> | 0,7-3,5. 10 <sup>3</sup> | 7-15. 10 <sup>4</sup>             |
| Ergime noktası<br>(°C)                    | 200-3500             | 2000-4000              | 70-200                   | Kullanılan polimere göre değişir. |
| Termal genleşme                           | Orta                 | Düşük                  | Yüksek                   | Düşük                             |
| Termal iletkenlik                         | Yüksek               | Düşük                  | Düşük                    | Düşük                             |
| Elektrik iletkenliği                      | İletken              | Yalıtkan               | Yalıtkan                 | Yarı iletken                      |

### 3.3 Malzeme Seçimi

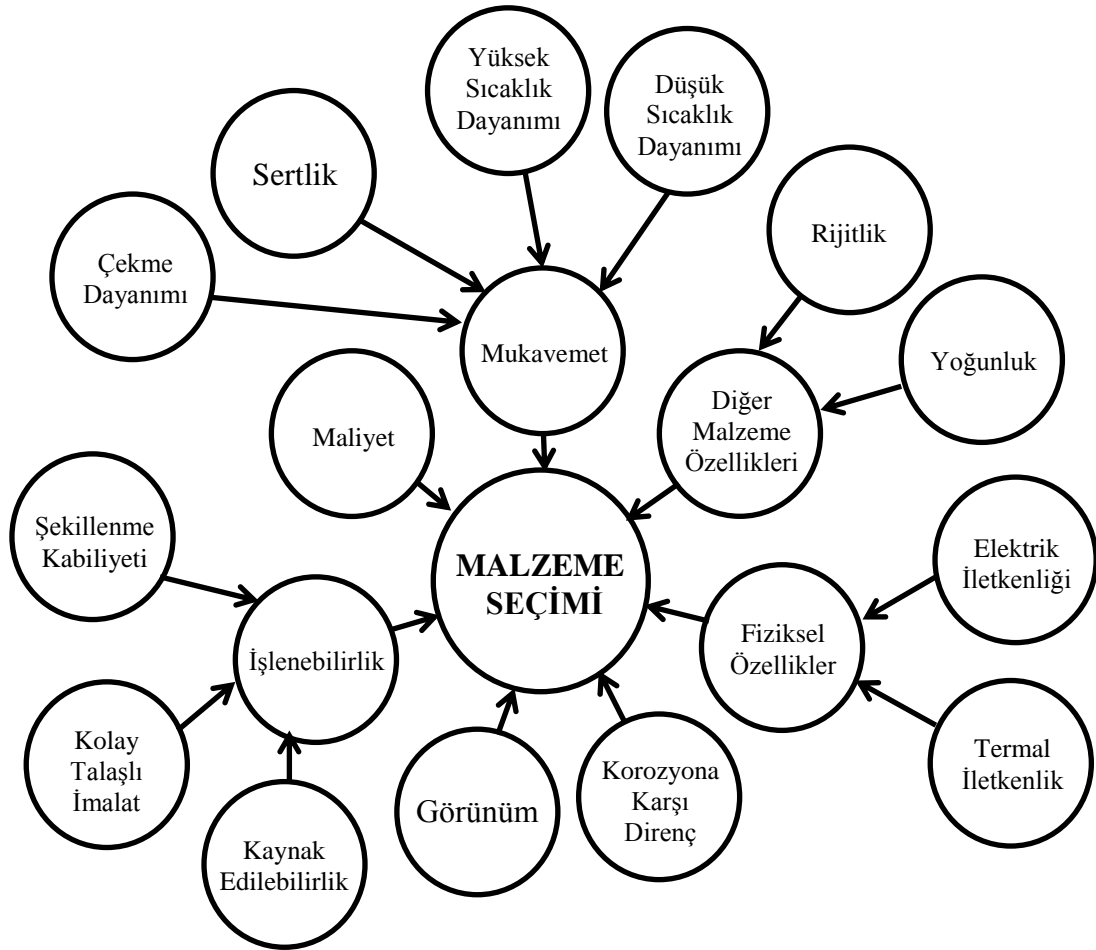
Tasarımın kısıtlayıcılarından biri olan malzeme seçimi, başlı başına ayrı bir konudur. Malzeme seçimini etkileyen bir takım faktörler vardır. Bunların en başında maliyet gelmektedir (Şekil 3.2). Malzemeler doğadan bulunmaları, elde edilmiş yöntemlerine göre fiyatlandırılır. Yüksek özelliklere sahip, tasarımda iyi bir performans sergilemesi beklenen bir malzeme yüksek fiyatından ötürü seçilemeyebilir.

Maliyetin dışında malzeme seçimini etkileyen faktörler: Mukavemet, fiziksel özellikler, işlenebilirlik, korozyona karşı direnç, görünüm, vs. Malzemenin görünümü

dahi önemlidir. Çünkü yapılan ürünün satılabilmesi için güzel bir görüntüye sahip olması gerekir (Şekil 3.2).

Örneğin seramik bir malzeme yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Ancak malzeme boru şeklini alamaz yani ona uygun şekilde işlenemez. Seramik malzeme boru şeklinde işlense bile maliyeti yüksek olur. Malzeme seçimi yaparken faktörlerin birbiriyle uyum içinde olması gerekir.

Tasarımcı malzemeyi seçerken istenmeyen veya düşük olan bir özelliğini görmezden gelemez. Bu tasarımı bütünüyle etkiler, ortaya çıkan ürün istenen işlemi yerine getiremeyebilir, çözülmesi amaçlanan problemi çözemez hatta yeni problemler de ortaya çıkarabilir. Bu yüzden doğru malzemenin seçilmesi için birçok çalışma yürütülmüş, yaklaşımlar geliştirilmiştir veya başka amaçlar için oluşturulan yöntemler malzeme seçimine uyarlanmıştır.



Şekil 3.2: Malzeme seçimini etkileyen faktörler (Hatamura, 1999)

Malzeme seçimi için kullanılan yaklaşımların ortak amacı zamandan, maliyetten, doğal kaynaklardan tasarruf edilmesini sağlamaktır. Ayrıca bu yaklaşımlar yapılması planlanan ürünün ucuz olmasının yanı sıra dayanıklı, güvenilir, kullanışlı, uzun ömürlü ve müşteriye memnun edecek bir ürün olmasına da yardımcı olur.

En basit tasarımlar için bile uygun malzemeyi ya da kombinasyonu seçmek tecrübe ve uzun zaman ister. Tasarımda bulunan bir parça için uygun bir malzeme seçilmezse kendisine zarar verdiği gibi diğer parçalara da zarar verebilir bu da tasarımın performansının düşmesine ve zaman kaybına neden olur. Kaybedilen bu zaman, doğru malzemeyi seçmek için kullanılarak daha aza indirilebilir (Jahan ve Edwards, 2013).

Uzmanlar önceden bir parça için malzeme seçerken ya da kullanılmakta olan parçanın malzemesini yeni bir malzemeyle değiştirirken deneme yanılma yöntemini veya deneysel yöntemleri kullanırlardı. Günümüzde ise bundan kaçınılır ve modern yöntemler tercih edilir. Bu yöntemlerin genel adı çok kriterli karar verme mekanizmasıdır (Shanian ve Savadogo, 2006c).

İki veya daha fazla alternatif malzeme arasından seçim yaparken iki veya daha fazla karakteristik özelliğin çatıştığı durumlarda çok kriterli karar verme mekanizması devreye girer. Mekanizmanın kullanılabilmesi için üç ana şeye ihtiyaç vardır: Alternatifler, kriterler ve kriterler arasında önemliliği belirleyen değerler (Chatterjee ve diğ., 2009) Bu mekanizma ikiye ayrılır: Çok amaçlı ve çok özellikli karar verme mekanizmaları (Chauhan ve Vaish, 2012).

Çok amaçlı karar verme mekanizması birbiriyle çatışan birden fazla özelliğe sahip, çok fazla miktardaki malzemenin arasından uygun olan malzemeyi seçerken kullanılır (Shanian ve Savadogo, 2006a). Bu mekanizmanın özelliği birbirleriyle çatışan amaçların işlenmesi ve iyi tanımlanmış sınırlara sahip olmasıdır. Birbirleriyle çatışan karakteristik özelliklerin oluşturduğu performans indisleriyle malzemeler kendi aralarında sıralanabilir. Oluşturulan performans indislerinin artırılması veya azaltılmasıyla da düşük maliyetli, düşük kütleli ve yüksek dayanımlı malzemeler seçilebilir. Bu mekanizmaya örnek Ashby yaklaşımı verilebilir.



Çok özellikli karar verme mekanizmasında ise malzemelerin karakteristik özellikleri ile oluşturulan performans indisleri yerine matematiksel modellerle malzemeler seçimi yapılır. Çok amaçlı karar verme mekanizmasına göre seçim yapılan malzeme kümesi daha küçüktür, malzemelerin sayısı sınırlıdır (Shanian ve Savadogo, 2006a). Üç ana bölümü vardır: Alternatifler, karakteristik özellikler ve her bir özelliğin bir diğer özelliğe göre önemlilik katsayısı (Shanian ve Savadogo, 2006b). Bu mekanizmanın en büyük avantajı alternatif malzemeleri net bir şekilde sıralamasıdır. Örnek olarak PSI (Preference Selection Index), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation Method), AHP (Analytical Hierarchy Process), ANP (Analytic Network Process), SAW (Simple Additive Weighting), GTMA (Graph Theory and Matrix Approach), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) verilebilir.

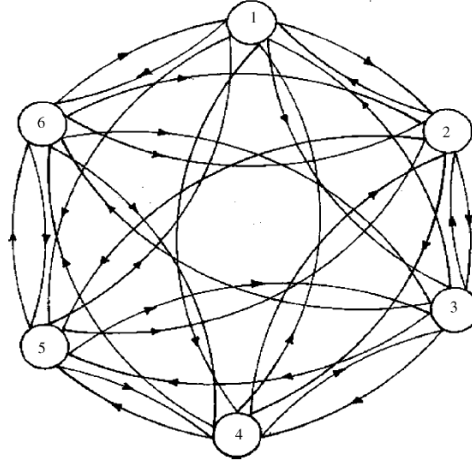
### **3.3.1 PSI Yöntemi**

PSI yöntemi Maniya ve Bhatt'ın 2010'da geliştirdiği yeni bir malzeme seçimi yöntemidir. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en büyük özellik diğer yöntemlerde kullanılan malzeme özellikleri arasındaki önemi sıralayan ağırlık faktörü ve karmaşık hesaplamaların olmamasıdır. Malzeme özelliklerinden hangisinin daha değerli olduğuna bu yöntemde karar vermeye gerek yoktur. Çünkü malzemelerin seçilen herhangi bir özelliğinde en yüksek değere sahip olan malzemeye göre diğer malzemeler sıralanır. Her malzemenin karşılaştırılan özelliklerinde de bu yöntem uygulanır.

Bahsedilen yönleriyle yöntem basit ve kullanışlıdır. Maniya ve Bhatt (2010) tarafından yapılan çalışma ile PSI yöntemi geliştirilmiş TOPSIS ve GTMA yöntemleriyle kıyaslanmış ve güvenilir oldukları da kanıtlanmıştır.

### 3.3.2 GTMA Yöntemi

GTMA yöntemi Rao tarafından geliştirilmiştir. Yöntem grafik teorisiyle matris formu birleştirmiştir. Grafik teorisinde malzemeye ait karakteristik özellikler daire etrafında birbirlerine eşit uzaklıkta yazılır ve sonrasında Şekil 3.3’de görüldüğü gibi birbirleri arasındaki ilişkiler çizgilerle gösterilir. Diyelim ki seçilmesi planlanan malzemelerin altı adet özelliği kıyaslanıyor. Bunların her biri arasındaki ilişkiler karşılıklıdır. Örneğin 2 numaralı özellik 1 numaralı özelliğe göre baskındır, öyleyse 1 numaralı özellik 2 numaralı özelliğe göre daha çekiniktir.



**Şekil 3.3:** Malzeme karakteristik özelliklerinin grafik üzerinde gösterimi ve ilişkilendirilmesi (Rao, 2006)

Malzemelerin kıyaslanan karakteristik özellikleri daha fazla olursa grafik daha büyük ve karmaşık bir hal alır. Bunun önüne geçmek için de grafikte gösterim matris haline getirilir. Matris halinde gösterimde malzemelerin karakteristik özelliklerinin birbirleri arasındaki ilişkiler için değerler verilir ve bu matrisin determinantı alınarak bir fonksiyon elde edilir. Ancak grafikte gösterimde olduğu gibi malzeme özellikleri çok fazlaysa bu fonksiyon büyür ve hesap yapmak zorlaşır. Bu fonksiyonun da çözülmesi ile her bir malzemenin kendilerine ait malzeme uygunluk indisleri bulunur ve bu değerlere göre de malzemeler sıralanır (Rao, 2006).

### 3.3.3 ELECTRE Yöntemi

Bu yöntem 1968 yılında Roy tarafından geliştirilmiş çok kriterli seçme mekanizmasıdır. Yöntem birçok alanda kabul edilmiş olmasına rağmen çok az uygulaması vardır. Araştırmacılar genel olarak sayısal hesaplamalar üzerinde durmuştur, belirsiz mantığı üzerinde durmamıştır. Electre yöntemi malzemelerin her bir karakteristik özelliğini birbiri arasında kıyaslar ve ona göre alternatifleri sıralar. Özellikleri arasından bir tanesi kritik derecede düşük olan malzeme, genelde tasarımcılar tarafından seçilmez. Aynı şekilde bu yöntemde de düşük olan özelliğinden dolayı bu malzeme sıralamada geriye düşer. Bu yönüyle yöntem diğerlerinden ayrılır (Shanian ve Savadogo, 2006b).

Tahminler veya varsayımlarla oluşturulan kesinlik içermeyen bilgilerin dikkate alınmamasını sağlamakta çok etkilidir. Bunun için üç farklı eşik değeri belirlenmiştir: Tercih eşiği, kayıtsızlık eşiği ve veto eşiği. Böylece önemi az olan ilişkiler ifade edilmezler (Rao, 2013).

Electre yöntemi zamanla gelişmiştir ve değişik türleri çıkmıştır. Bunlar: Electre 1, Electre 2, Electre 3, Electre 4, Electre Is ve Electre Trı. Electre 1 yöntemi ilk geliştirilen yöntemdir ve en iyi malzemeyi seçmemize olanak sağlar. Electre 2 yöntemi, en iyi alternatiften en kötü alternatife olacak şekilde sıralama yapar. Electre 3 pseudo-kriterini ve belirsiz ikili sıralamasını kullanır. Electre 4 yönteminde karakteristik özelliklerin önemini belirleyen katsayılar kullanılmaz. Onun yerine kendinde olan bir sistem uygulanır. Electre Is, bilgilerin mükemmel olmadığı problemlerde kullanılır. Electre Trı ise alternatif malzemeleri farklı sınıflarda toplar (Shanian, ve Savadogo, 2006b).

Shanian ve Savadogo yaptıkları çalışmada Electre 4'ü kullanmıştır. Ancak bu çalışmada malzemeler sıralandıktan sonra malzeme seçimi hemen gerçekleşmemiştir. Çünkü birden fazla malzeme birinci, yalnız bir tane malzeme sonuncu gelmiştir. Sonrasında yazarlar kendileri yorum yaparak kullanılması gereken malzemeyi seçmişlerdir (Shanian, ve Savadogo, 2006a). Bu yönüyle Electre yöntemi malzeme seçiminde değil, kullanılmaması gereken malzemeleri elemeye kullanılabilir.

### 3.3.4 TOPSIS Yöntemi

Hwang ve Yoon TOPSIS yöntemini ilk olarak 1981’de bulmuşlardır. 1987 yılında yöntem kendileri tarafından, 1993 yılında da Lai ve Liu tarafından geliştirilmiştir (Url-4).

Malzeme karakteristik özelliklerinin normalizasyonu yapıldıktan sonra entropi yöntemiyle ya da başka bir yöntemle de bu özelliklerin kendi aralarındaki ağırlık değerleri ortaya konur. Buna göre yapılan birkaç matematiksel hesaplamadan sonra pozitif ideal malzemeye geometrik olarak en yakın, negatif ideal malzemeye geometrik olarak en uzak olan malzeme seçilir (Rao, 2013).

Yöntem ilk ortaya çıkarıldığında pozitif ideal çözüme en yakın olan tercih bazen negatif ideal çözüme de diğer tercihlere göre yakın olabiliyordu. Ancak bahsedilen geliştirmeler ile bunun önüne geçilmiştir. Yöntemde bulunan değiş-tokuş özelliğiyle malzemelere ait kriterlerden herhangi biri düşük diğer özellikleri yüksekse düşük olan kriter ihmal edilerek malzeme seçimi yapılabilir. Bu özelliğin TOPSIS yönteminde bulunmasıyla malzeme seçiminde yöntemin sık kullanılması sağlanmıştır.

Uygulanan yöntemin sonucu nümeriktir. Böylece de yapılan sıralamada sonuçlar arasında karşılaştırma yapılabilir ve sonuçların anlaşılabilirliği artırılabilir. Karakteristik özellikler arasında ikili karşılaştırmalar yapılmadığı için yöntem bilgisayarda programlamaya uygundur. Ayrıca bu ve bunun gibi özellikleriyle yöntem basit, kullanışlı ve hızlıdır (Shanian ve Savadogo, 2006c).

### 3.3.5 VIKOR Yöntemi

Uzlaşmacı yaklaşım olarak bilinen VIKOR yönteminin temelleri Yu ve Zeleny tarafından 1973’te atılmıştır. Opricovic tarafından 1979’da geliştirilen yöntem 1980’de şimdiki adını almıştır: VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje. Türkçe anlamı: Çok kriterli optimizasyon ve uzlaşmacı yaklaşım. 1998’de de ilk uygulamaları yapılmaya başlanmıştır (Url-5).

Bu yöntem ile çoklu kriterlere sahip alternatif adaylar arasından seçim yapılırken adaylar arasında karşılıklı ödünler verilerek uzlaşmacı bir yol aranır. Aynı TOPSIS yönteminde olduğu gibi pozitif ideal çözüme en yakın olan aday seçilir (Rao, 2008). Pozitif ideal çözüm denen şey aday malzemelerin özellikleri arasından en yüksek olan değerler seçilir ve her bir özellik için bu değerler alınarak en ideal malzeme sadece kağıt üzerinde yaratılmış olur. Yöntem TOPSIS ile bu konuda farklılık gösterir (Jahan ve diğ., 2011).

Yöntemde karakteristik özellikler arasındaki önem değerini belirlemek için entropi yöntemi gibi yöntemler kullanılabilir. Eğer herhangi bir yöntem kullanılmaz ise özelliklerin değerliliği birbirine eşit kabul edilir.

Yöntemin adımlarından birinde bulunan kriterlerin değerliliği ya da çoğunluğun oyu denen bir sabit, tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Değer sıfır ile bir arasında seçilmelidir ve genelde bu değer 0,5 seçilir. Yöntem sonucunda çıkan sonucun değerlendirilmesi için bu değer iki farklı şekilde (0,5'ten küçük ve büyük olmak üzere) verilerek tekrar çözülmeli ve çıkan sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmalıdır (Yazdani ve Payam, 2015).

Yöntem geliştirilmiş yönüyle özellikle biomedikal uygulamalar için malzeme seçimlerinde kullanılabilir. Çünkü yöntemin uygulanması sonucu çıkan sonuçlar kesindir. Yapılan sıralama nümerik olduğu için seçilen malzeme, diğer aday malzemeler ile kolay bir şekilde kıyaslanabilir (Jahan ve diğ., 2011).

### **3.3.6 PROMETHEE Yöntemi**

Tercih fonksiyonu temelli sıralama yöntemi olan PROMETHEE, karar vermeye uygun bir şekilde sıralama verdiği için çok kriterli seçme mekanizmaları içerisinde önemli bir yere sahiptir. Yöntem ilk olarak Brans ve Vincke tarafından 1985'de geliştirilmiştir daha sonra 1986'da Brans, Vincke ve Mareschal tarafından genişletilmiştir. Adının açılımı: Preference ranking organization method for enrichment of evaluations. Türkçe anlamı: Zenginleştirme ve geliştirmeler için tercih sıralama yöntemi.

PROMETHEE 1 alternatiflerin parçalı bir şekilde sıralama yapılmasına olanak sağlarken, PROMETHEE 2 bütün alternatifleri bir arada sıralar. Yöntem çok kriterli seçme mekanizmaları arasında kendini kanıtlamıştır ve bunun da birçok uygulaması vardır. Yapılan çalışmada PROMETHEE yönteminin dışında diğer yöntemlerde şeker borularının malzeme seçimi için kullanılmıştır ve çıkan sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu yöntem de çıkan sonuç ile diğer sonuçlar uyum içerisinde değildir, çıkan sıralamalarda sadece PROMETHEE yöntemi farklı bir sıralama vermiştir. Çünkü yöntem sadece malzemelerin iyi yönlerine bakmıştır, kötü yönlerini göz ardı ederek onları o yolla sıralamıştır (Anojkumar ve diğ., 2014).

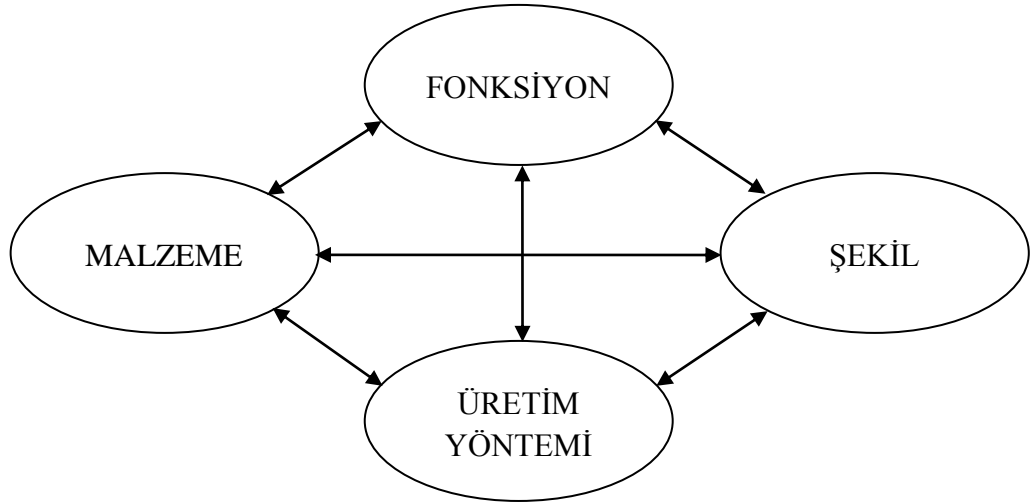
Yöntem, nümerik olarak verilen kriterler ile kolay başa çıkabilirken nümerik olmayan kriterler ile başa çıkmakta zorlanmaktadır. Bu sebeple nümerik olarak verilmeyen kriterler; örneğin korozyona karşı direnç, ışık geçirgenliği, dökülebilirlik, vs., nümerik olarak değer verilmelidir. Bu sebeple belirsiz mantık (fuzzy logic) yöntemi kullanılır. Bu yöntemle bir kriter için belirli olan değer, hiyerarşisine göre sayısal değer almaktadır. Bir başka konuda kriterlerin değerliliği. Yani bir kriter diğer bir kritere göre ne kadar değerli, bunu da belirlemek gerekir. Bu sebeple de AHP (Analytical Hierarchy Process) kullanılarak hangi kriter, hangi kritere göre ne kadar değerli o belirlenir. Kriterlerin değerliliği belirlendikten sonra PROMETHEE yöntemi ile malzemeler kendi aralarında sıralanabilirler (Rao, 2013).

## 4. ASHBY YAKLAŞIMI VE UYGULAMA ALANLARI

### 4.1 Ashby Yaklaşımına Giriş

Malzeme seçiminde uygulanan yöntem, Micheal F. Ashby tarafından ortaya konulmuş ve ismini Ashby'den almıştır. Ashby, malzeme seçimi konusunda yaptığı çalışmaları, makaleleri “Materials Selection in Mechanical Design” adlı kitabında toplamıştır ve yaklaşımın adımlarını detaylı bir şekilde bu kitaba aktarmıştır (Ashby, 2011). Bu bölümde Ashby yaklaşımının önemli adımları kısaca anlatılmış ve konunun daha iyi anlaşılması için birkaç adet durum çalışması örnek olarak verilmiştir.

Malzeme seçiminde fonksiyon, şekil ve üretim metodu etkilidir. Bu etkileşim Şekil 4.1’ de görüldüğü üzere çift taraflıdır. Fonksiyon malzemeyi etkilediği gibi malzeme de fonksiyonu etkiler. Karşılaşılan bir sorun için yüksek özelliklere sahip malzeme kullanılması gerekebilir. Ancak böyle bir malzeme yoksa fonksiyon değiştirilir.



Şekil 4.1: Fonksiyon, malzeme, şekil ve üretim metodu etkileşimi

Tasarım yapılırken her şeyden önce fonksiyonun açık bir şekilde belirtilmesi şarttır. Aksi halde yapılacak tasarım amaçsız olur. Sonrasında belirlenen fonksiyonu yerine getirecek malzeme, şekil ve üretim metodu seçilir.

Fonksiyon, sınırlamalar ve amaçların tanımlanmasıyla belirtilir. Fonksiyonun belirtilmesinin ardından malzemeler arasından görevi yerine getiremeyecek olanlar elenir ve geriye kalan malzemeler sıralanır. Malzemeler arasından da ilk sıradakiler hakkında geniş bir şekilde araştırma yapılır ve neticesinde kullanılması planlanan malzemeye karar verilir. Malzeme seçim aşamaları Şekil 4.2’de de görülmektedir.



Şekil 4.2: Malzeme seçim aşamaları (Ashby, 2011)



#### 4.1.1 Tasarım İhtiyaçlarını Belirleme

Mühendislik tasarımlarında herhangi bir parça bir veya daha fazla göreve sahiptir: Yük taşımak, ısı transfer etmek, yüksek basınçta çalışmak gibi. Örneğin parça düşük sıcaklıklarda çalışabilmeli, yüksek ısı transferi yapabilmeli, elektriği iyi iletmeli, korozif aşınmaya dirençli olmalı vs.

Tasarımcı tarafından getirilen sınırlamalar tasarlanan parçanın amacının dışına çıkmasını önler. Düşük sıcaklıklara, yüksek ısı transferine, iyi elektrik iletkenliğine bir değer vererek bu sınırı belirlenir. Daha yüksek veya daha düşük değerler verilerek malzemelerin kümesi kontrol altına alınmış olur.

Mühendislik tasarımlarında ayrıca amaç da olmalıdır. Örneğin üretilecek parça ucuz ve güvenli olmalı, yüksek performans göstermeli ya da bunların hepsini sağlamalıdır.

Bunların dışında tasarımcının malzemeyi seçebilmesi için serbest değişkenlere de sahip olması gerekir. Çünkü tasarımcı zaten sınırlamalar ile yeteri kadar zorlanmaktadır. Belirtilen amacın gerçekleştirebilmesi için tasarımcının artırıp veya azaltabileceği değişkenlerin belirtilmesi gerekir.

Fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler herhangi bir tasarımda malzeme seçimi için sınır şartlarını tanımlar. Tablo 4.1’de sorulan sorulara verilen cevaplar bunları bulmamıza olanak sağlar.

**Tablo 4.1:** Fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler

|                            |                                                            |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | • Tasarımı yapılan elemandan istenilen görev nedir?        |
| <b>Sınırlamalar</b>        | • Tasarımda istenilen asgari ve azami özellikler nelerdir? |
| <b>Amaç</b>                | • Hangi özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır?         |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | • Hangi tasarım parametreleri değiştirilebilir?            |

#### 4.1.2 Sınırlamaları Kullanarak Eleme

Önceki aşamada belirtilen sınırlamalar ile malzemelerin karakteristik özellikleri karşılaştırılır ve eleme işlemi yapılır. Böylece aday malzemelerin kümesi küçültülmüş olur ve bu kümede aranan malzeme daha kolay bulunur. Örneğin parça 0 °C'nin altında çalışabilmeli, mat bir görüntüye sahip olmalı, kolay işlenebilmeli. Bu değerlere sınır değer denir.

#### 4.1.3 Amaca Göre Malzemelerin Sıralanması

Sınır değerler geriye kalan malzemelerin sıralamasında yardımcı olmazlar. Sıralamanın yapılabilmesi için malzeme indisleri geliştirilmiştir ve indisler malzemelerin performansını ölçerek sıralama yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Bir malzemenin performansı bazen tek bir özelliğine bakılarak belirlenebilir. Bunun için de amacın birden fazla ve karmaşık olmaması gerekir. Eğer ilk aşamada belirlenen amaç birden fazla ve karmaşık ise malzeme indisleri malzemelerin performanslarını belirlemede yardımcı olur.

##### 4.1.3.1 Malzeme İndisleri

Malzeme indisleri malzemelerin karakteristik özelliklerinin kombinasyonudur. Örneğin,  $E/\rho$  malzeme indisi ile düşük yoğunluklu ve rijit malzemeler veya  $\lambda/\alpha$  malzeme indisi ile yüksek ısı akısına sahip, çarpımalara sebebiyet vermeyen malzemeler listede üst sıralarda olabilir. Karakteristik özelliklerin kullanılarak daha çok malzeme indisinin türetilmesi mümkündür, bunlardan bazıları Tablo 4.2'de gösterilmektedir. Karakteristik özelliğin yanında malzeme fiyatı da kullanılarak türetilen malzeme indisleri, maliyetin düşürülmesine yardımcı olur. Malzeme indislerinin türetilmesi ile ilgili örnekler Bölüm 4.2'de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Malzeme indislerine örnekler (Ashby, 2011)

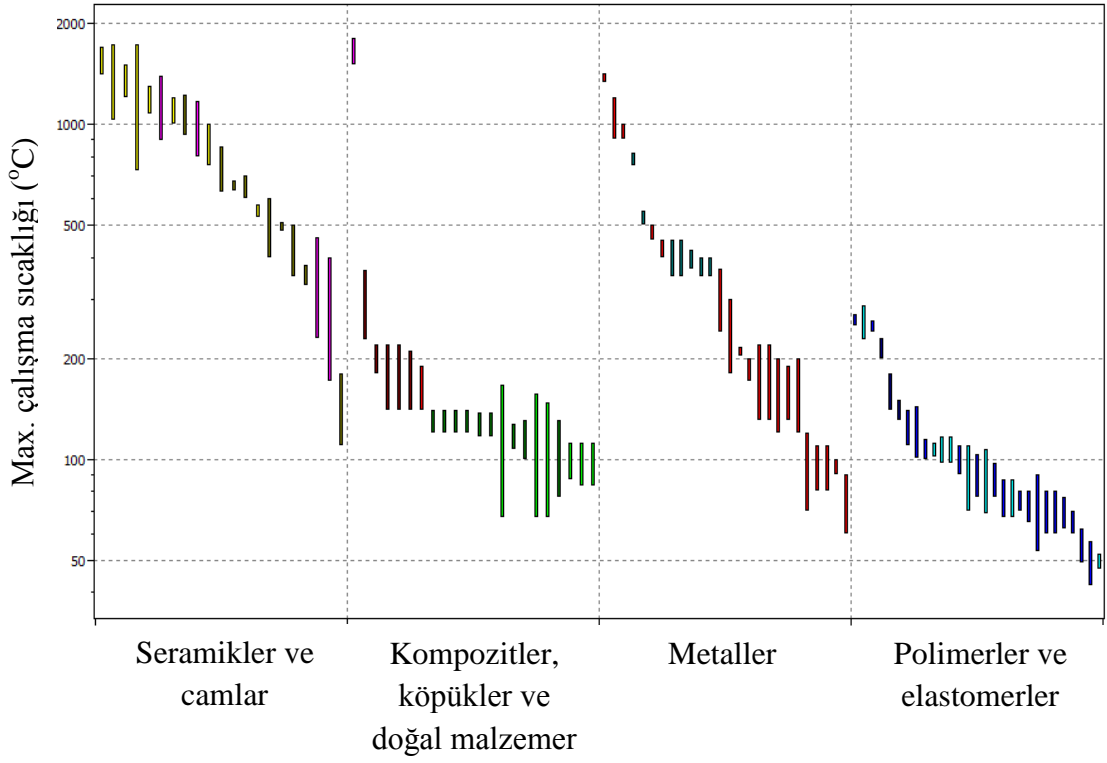
| <b>Fonksiyon / Amaç / Sınırlamalar</b>                           | <b>Malzeme İndisi</b>        |
|------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Rot kolu / min. ağırlık / rijitlik belirlenmiş                   | $\frac{E}{\rho}$             |
| Kiriş / min. ağırlık / rijitlik belirlenmiş                      | $\frac{E^{1/2}}{\rho}$       |
| Kiriş / min. ağırlık / akma sınırı belirlenmiş                   | $\frac{R_e^{2/3}}{\rho}$     |
| Kiriş / min. maliyet / rijitlik belirlenmiş                      | $\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$   |
| Kiriş / min. maliyet / akma sınırı belirlenmiş                   | $\frac{R_e^{2/3}}{C_m \rho}$ |
| Termal yalıtım / min. maliyet / ısı akısı belirlenmiş            | $\frac{1}{\lambda C_p \rho}$ |
| Elektromanyetik / max. çekim alanı / ısı değişikliği belirlenmiş | $\frac{C_p \rho}{p_e}$       |

#### 4.1.3.2 Malzeme Grafikleri

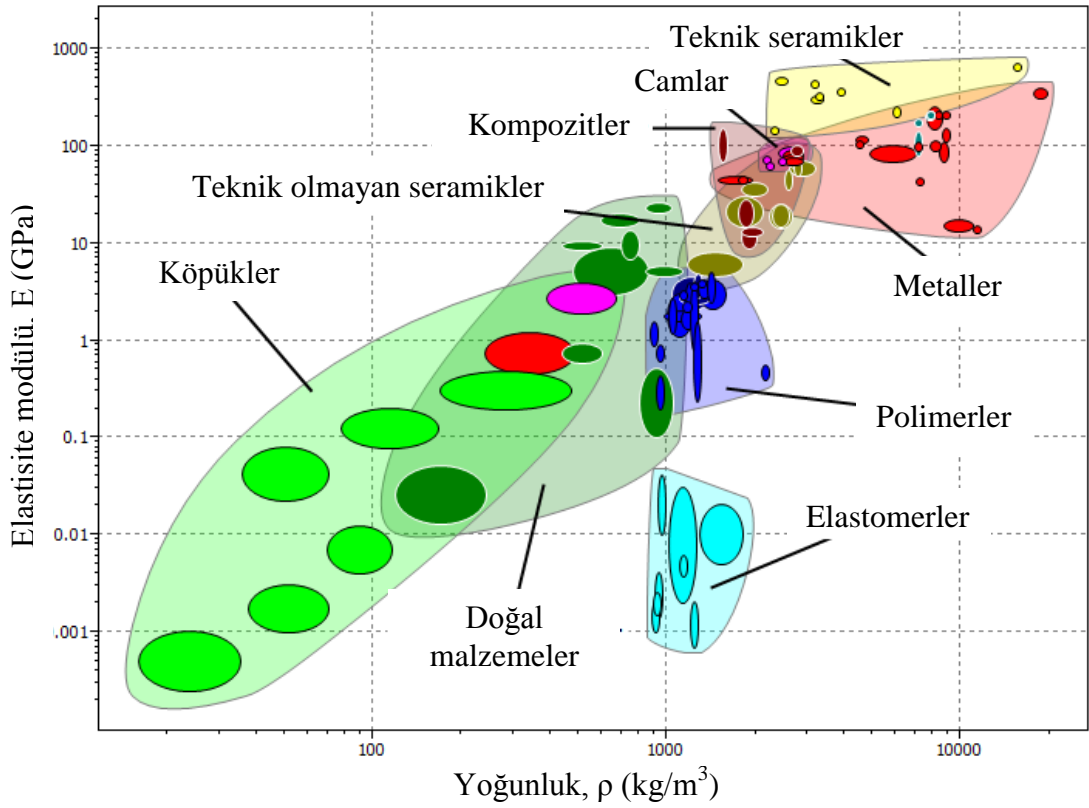
Malzeme grafikleri, tek bir karakteristik özelliğin veya birden fazla karakteristik özelliğin birbiri ile kıyaslanması sonucu ortaya çıkan grafiklerdir. Grafikler lineer olarak çizilemezler çünkü değer aralığı çok fazladır ve lineer çizilen grafikler çok anlaşılır değildir. Bu sebeple çizilen grafikler logaritmik skaladadır.

Balon şeklinde ortaya çıkan malzemelerin ve sınıflarının renklendirilmesi ile daha seçici bir grafik elde edilebilir. Oluşturulan grafikler üzerine de malzeme indislerinin eğimleri çizilerek, belirlenen sınırlamalara uymayan malzemeler elenebilir, geriye kalan malzemeler de kendi arasında sıralanabilir. Grafiklerin eksenleri üzerinde malzemelerin karakteristik özelliklerinin yanı sıra malzeme indisleri de gösterilerek malzeme grafikleri oluşturulabilir.

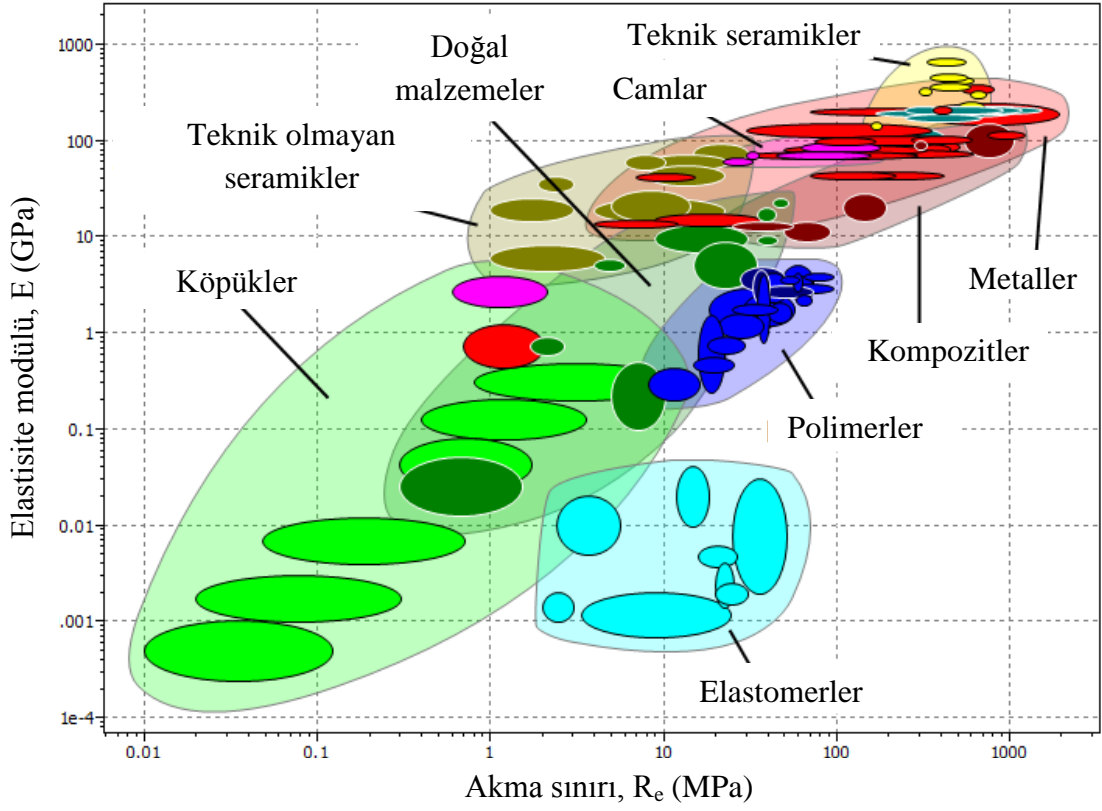
Grafikler, Granta Design şirketi tarafından geliştirilen CES EduPack programı ile bilgisayar ortamında çizilebilmekte ve malzeme indislerinin eğimleri grafikler üzerinde gösterilebilmektedir (Şekil 4.3-4.8). Tez çalışması içinde bulunan grafiklerin çiziminde, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde bulunan program kullanılmıştır.



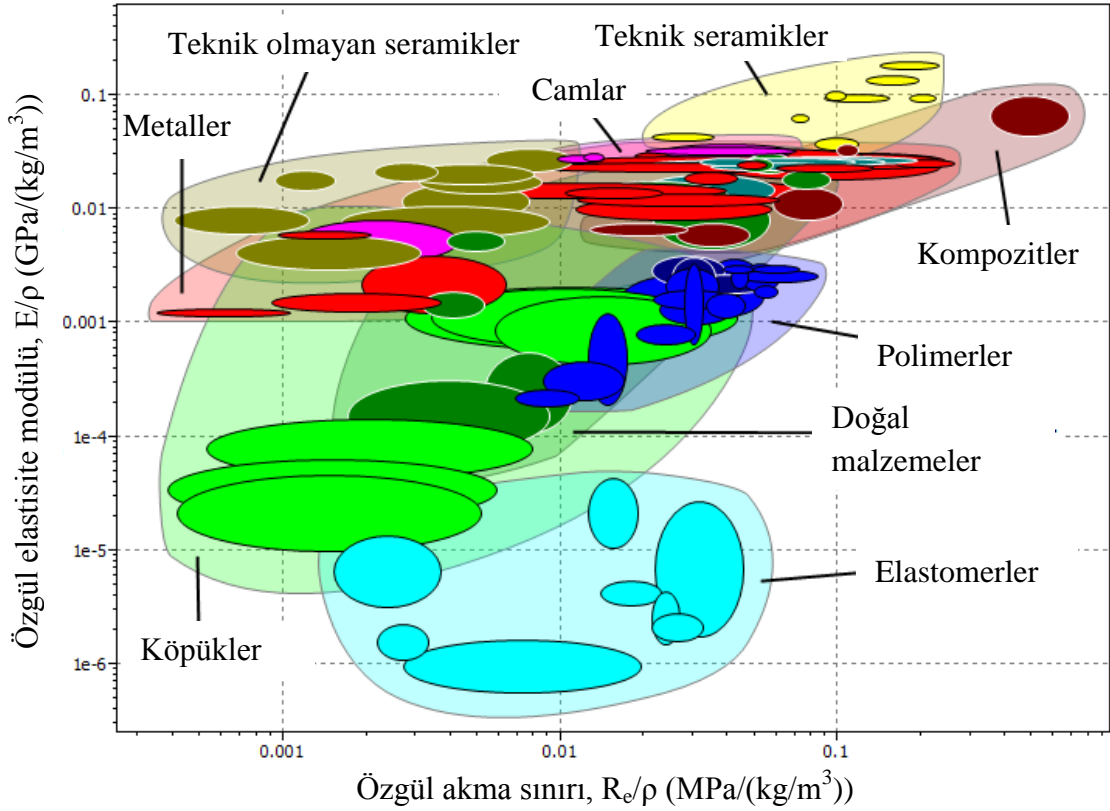
Şekil 4.3: Maksimum çalışma sıcaklığı grafiği



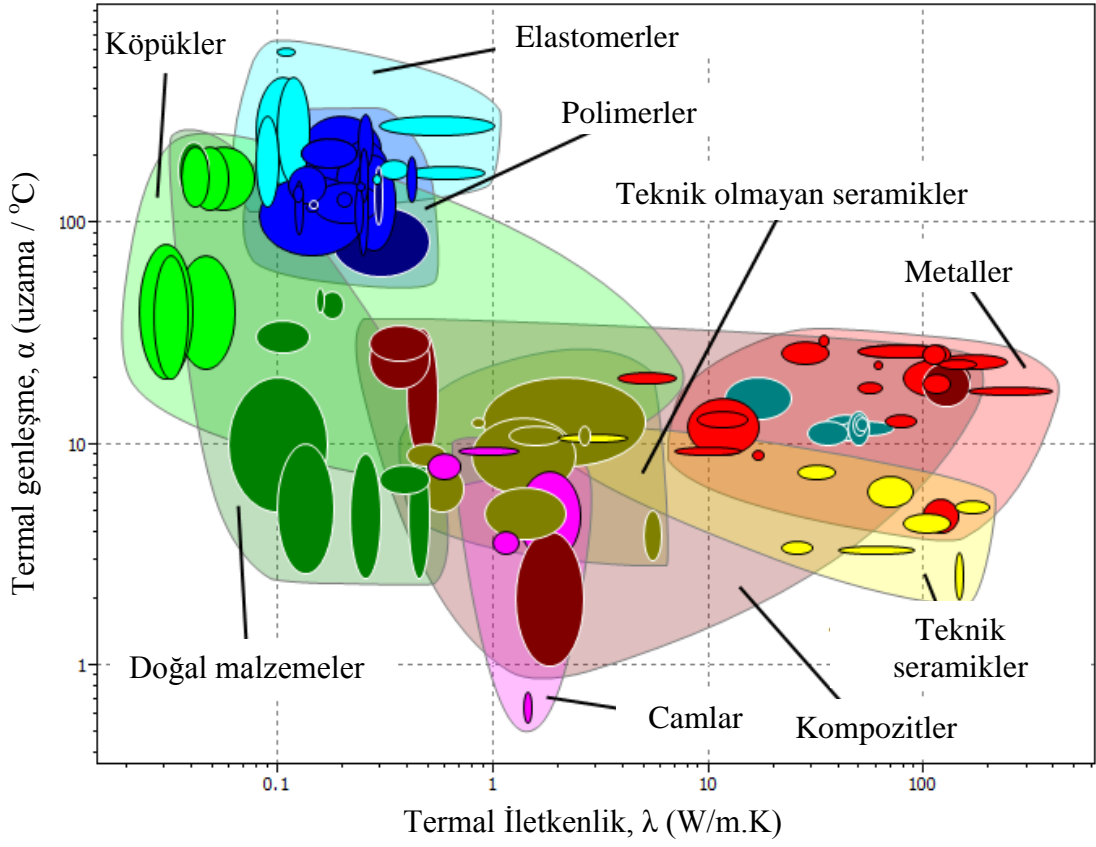
Şekil 4.4: Elastisite modülü – Yoğunluk Grafiği



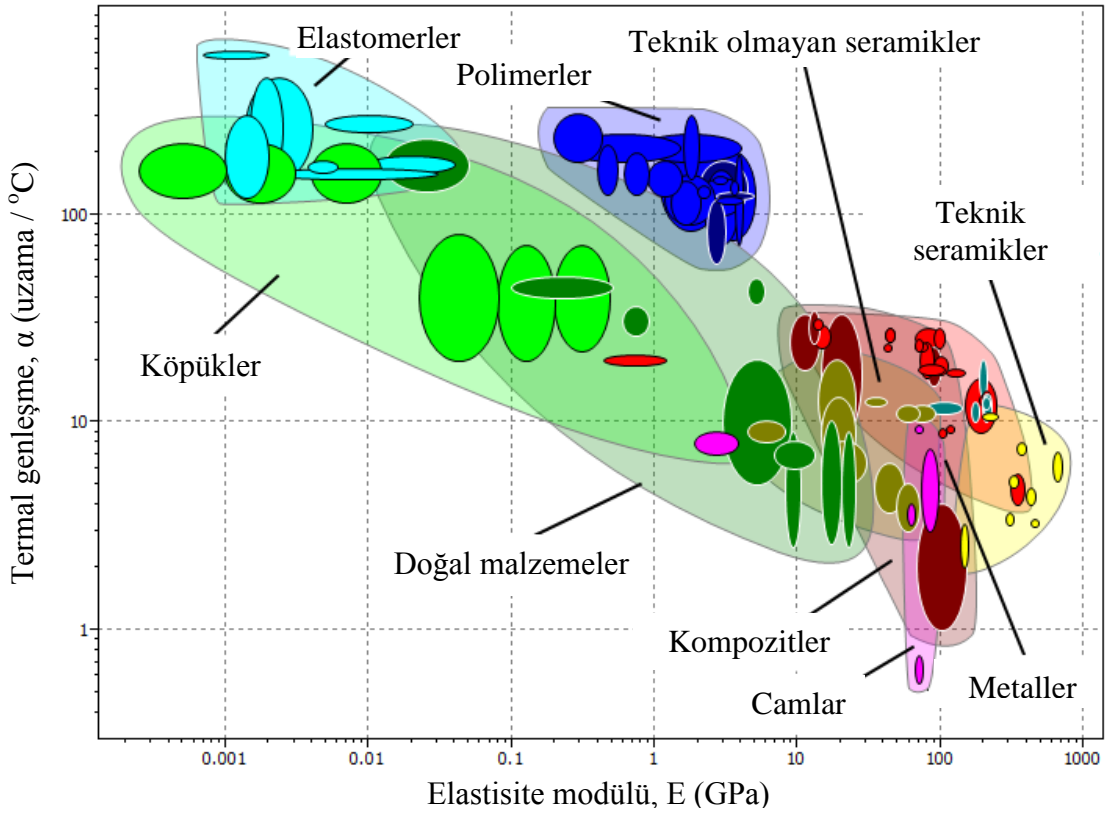
Şekil 4.5: Elastisite modülü – Akma sınırı grafiği



Şekil 4.6: Özgöl elastisite modülü – Özgöl akma sınırı grafiği



Şekil 4.7: Termal genleşme – Termal iletkenlik grafiği



Şekil 4.8: Termal genleşme – Elastisite modülü grafiği

#### 4.1.4 Dokümantasyon Araştırması

Şimdiye kadar atılan adımlar ile sınırlamaların uygulanması ve amaçların artırılması veya azaltılmasıyla malzemeler sıralı bir liste haline getirilmiştir. Oluşturulan listeden doğrudan ilk sıradaki malzemeyi seçmek doğru bir şey değildir. O malzemenin güçlü ve zayıf yanlarına bakılmalı, önceki kullanım alanlarındaki geçmişi kontrol edilmeli ve bunun gibi konular derinlemesine araştırılmalıdır.

Bazı dokümanlar karakteristik özelliklerin verildiği dokümanlar gibi aynı olmayabilir. Bu dokümanlar grafik şeklinde, açıklayıcı ya da resimli şekilde olabilir; önceki kullanılan yerlerde yapılan gözlemler, hata analizleri veya maliyet tabloları bunlara örnek olabilir. Araştırılan ve bulunan bilgilerle alternatif malzemelerin kümesi daraltılır, seçim sağlıklı ve kolay hale getirilir.

## 4.2 Ashby Yaklaşımının Uygulanabileceği Alanlara Ait Örnekler

### 4.2.1 Basınçlı Kaplar

Basınçlı tanklar eğilip bükülerek deforme olmaması ya da sızıntı vererek kullanılamaz hale gelmemesi için tasarlanmıştır.

Tank üzerindeki maksimum teğetsel gerilme denklem (4.1) ile hesaplanır.

$$\sigma_t = \frac{p \cdot r_{bk}}{2 \cdot s} \quad (4.1)$$

Küçük basınçlı kaplar ultrasonik olarak ya da X-ray ile veya sızdırmazlık testi yapılarak test edilebilir. Üzerindeki herhangi bir çatlak veya boşluğun yayılmaması için denklem (4.2) kullanılmaktadır.

$$\sigma_t = \frac{C \cdot K_{1c}}{\sqrt{\pi \cdot a_c}} \quad (4.2)$$

Denklem (4.1) ve denklem (4.2)'den basınç (denklem 4.3) elde edilir.

$$p \leq \frac{2 \cdot s \cdot K_{1c}}{r_{bk} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c}} \quad (4.3)$$

$K_{1c}$  (malzemenin kırılma tokluğu sabiti) malzemeye has bir özelliktir ve denklem (4.4)'de birinci malzeme indisi olarak belirlenmiştir. En büyük değere sahip olan malzeme seçilir.

$$M_1 = K_{1c} \quad (4.4)$$

Eğer ki  $a_c$  değeri çok büyükse bir süre sonra çatlak ilerler ve daha kötü sonuçlara sebep olur. Çatlağın ilerlemeden görülmesi için malzemenin deforme olması istenir ve bu yüzden akma sınırı daha küçük olan malzeme seçilir ki malzeme çatlağın büyümesine sebep olmadan deforme olabilsin. Denklem (4.5)'den denklem (4.6) çekilerek malzeme indisi belirlenir.

$$\pi \cdot a_c = C^2 \cdot \left[ \frac{K_{1c}}{R_e} \right]^2 \quad (4.5)$$

$$M_2 = \frac{K_{1c}}{R_e} \quad (4.6)$$

Büyük basınçlı kaplarda çatlağın ilerlemesi yavaş olacağı için de en başta yapılacak testler, malzemenin ömrünü belirlemede yeterli olmaz. Bunu belirleyebilmek için denklem (4.7)'de görüldüğü üzere  $a_c = s/2$  kabul edilir.

$$\sigma = \frac{C \cdot K_{1c}}{\sqrt{\pi \cdot s/2}} \quad (4.7)$$

Aynı zamanda “s” et kalınlığı tank içerisindeki basıncı muhafaza edecek kadar fazla olmalıdır. Et kalınlığı denklem (4.8)'de verilmiştir.

$$s \geq \frac{p \cdot r_{bk}}{2 \cdot R_e} \quad (4.8)$$

Denklem (4.7) ve denklem (4.8) birleştirilir ise denklem (4.9) oluşturulur ve buradan da malzeme indisi, denklem (4.10) elde edilir.

$$p \leq \frac{4 \cdot K_{1c}^2}{\pi \cdot r_{bk} \cdot R_e} \quad (4.9)$$



$$M_3 = \frac{K_{1c}^2}{R_e} \quad (4.10)$$

$M_3$  değeri en büyük olan malzeme ile en yüksek basınçlara dayanabilecek tank yapılabilir.  $M_2$  ve  $M_3$  değerlerinde kurşun da şartları sağlar ancak et kalınlığı fazla olacağı için ekonomik bir tercih değildir. O yüzden tank malzemesi akma sınırı yüksek olan malzemeler arasından seçilir. Son malzeme indisi de denklem (4.11)'de görülmektedir.

$$M_4 = R_e \quad (4.11)$$

$M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  ve  $M_4$  indisleri belirlendikten sonra bu değerler kırılma tokluğu ve akma sınırı grafiğine işlenir. En uygun malzeme seçilir. Ayrıca burada değerlendirmeye alınmamış olan, ekonomik, korozif etkilere karşı dayanıklılık vs. faktörler de göz önüne alınmalıdır (Ashby, 2011).

#### 4.2.2 Titreşim Masası

Titreşim masası; bir uzay aracı, otomobil, uçak parçası veya herhangi bir aracın titreşim altında ne gibi tepkiler vereceğini öğrenmek için kullanılır. Yutulan titreşim için harcanan enerji denklem (4.12)'de verilmiştir.

$$\text{Enerji} = C_1 \cdot m \cdot A^2 \cdot w^3 \quad (4.12)$$

Titreşim büyüklüğü "A" ve frekans "w" denklem (4.12)'de belirtilmiştir. O yüzden sadece denklem (4.13)'de görülen formül ile kütleyi ele alabiliriz.

$$m = \pi \cdot r_m^2 \cdot s \cdot \rho \quad (4.13)$$

Kalınlık eğilmeye karşı en önemli etkidir. Bu yüzden denklem (4.14) ve denklem (4.15) birleştirilerek kalınlık denklemden çekilir ve denklem (4.16) elde edilir.

$$k = \frac{C_2 \cdot E \cdot I}{r_m^3} \quad (4.14)$$

$$I = s^3 \cdot r_m \quad (4.15)$$

$$s = C_3 \cdot \left( \frac{k \cdot r_m^2}{E} \right)^{1/3} \quad (4.16)$$

Bu formülden de anlaşılacağı üzere en ince kalınlığa sahip olan masa akma sınırı en yüksek olan malzemeden seçilir. Malzeme indisi denklem (4.17)'de görülmektedir.

$$M_1 = E \quad (4.17)$$

Yutulan titreşimden dolayı kaybolan enerjinin minimum seviyede tutulabilmesi için ağırlığın da minimum seviyede tutulması gerekir. Bu sebeple denklem (4.18)'den malzeme indisi, denklem (4.19)'da görüldüğü gibi elde edilir.

$$m = C_3 \cdot \pi \cdot r_m^{8/3} \cdot k^{1/3} \cdot \frac{\rho}{E^{1/3}} \quad (4.18)$$

$$M_2 = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (4.19)$$

En az kütle için  $M_2$  değeri en büyük olan malzeme seçilir. Bunun yanında mekanik titreşim sönümlenme, akma sınırı ve kırılma tokluğu da malzeme indisi olarak alınabilir. Sonrasında  $M_1$  indisi ve mekanik titreşim sönümlenme değeri  $\eta$ -E grafiğinde,  $M_2$  indisi E- $\rho$  grafiğinde gösterilir ve en uygun malzeme seçilir (Ashby, 2011).

### 4.2.3 Isı Duvarları

Evleri ısıtmak için güneşten faydalanmanın birden çok yöntemi vardır. Bunlardan biri de ısı absorbe edebilen duvarlardır. 12 saat boyunca güneşten aldığı enerjiyi, gece evin içerisinde duvar dibinde bulunan bir fanın yardımıyla evin ısıtılması sağlanır. Yalnız duvar fazla kalın olmamalıdır.

Duvar içi ve dışı arasındaki sıcaklık farkı  $\Delta T$  olan duvarın birim alanı için depoladığı enerji denklem (4.20), (4.21) ve (4.22)'nin birleştirilmesiyle denklem (4.23) elde edilir.

$$q = s \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.20)$$

$$s = \sqrt{2 \cdot a \cdot t} \quad (4.21)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (4.22)$$

$$q = \sqrt{2 \cdot t} \cdot \Delta T \cdot \frac{\lambda}{a^{1/2}} \quad (4.23)$$

Denklem (4.23)'den  $M_1$  indisi elde edilir ve indis denklem (4.24)'de verilmiştir. Duvarın ısı taşıma kapasitesinin yüksek olması için  $M_1$  in de o kadar büyük olması gerekir.

$$M_1 = \frac{\lambda}{a^{1/2}} \quad (4.24)$$

Ayrıca denklem (4.21)'den  $w \leq 0,5$  m ve  $t = 12$  saat değerleri verildiği zaman  $a \leq 3 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s olur.  $M_1$  indisi ve termal difüzyon değeri  $\lambda$ -a grafiğinde yerlerini alır. Uygun malzemeler seçilir. Malzeme seçilirken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri de maliyettir. Örneğin, grafikte titanyum alaşımları beton veya tuğladan daha iyi görünmektedir. Ancak fiyat olarak hiç uygun değildir (Ashby, 2011).

#### 4.2.4 Hassas Ölçüm Aletleri

Hassas ölçüm aletlerinde termal dalgalanmalar ve titreşimler ölçüm esnasında aletin hassasiyetini etkiler. Aletin ısı ve titreşim altında zarar görmemesini ve hassas bir ölçüm yapması gerekir. Bu aletin bir ucu oda sıcaklığında diğer bir ucu ise ısıнын kaynağına bağlıdır. Isı iletimi denklem (4.25)'de ve sıcaklık sonucu gerçekleşen uzama denklem (4.26)'da verilmiştir.

$$q = -\lambda \cdot \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (4.25)$$

$$\varepsilon = \alpha \cdot (T - T_0) \quad (4.26)$$

Denklem (4.26)'nın türevi alınır ve denklem (4.25) ile birleştirilirse denklem (4.27) elde edilir.

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{\alpha \cdot dT}{dx} = \left( \frac{\alpha}{\lambda} \right) \cdot q \quad (4.27)$$

Bu denklemden de malzemeyle karakteristik özellikleri olan değerler alınarak malzeme indisi oluşturulur (Denklem 4.28).

$$M_1 = \frac{\lambda}{\alpha} \quad (4.28)$$

Bir diğer problem de titreşimdir. Dışarıdan gelecek uyarılara karşı aletin ölçüm hassasiyetini kaybetmemesi için malzemenin doğal frekansının yüksek olması gerekir. Bu sebeple denklem (4.29) malzeme indisi olarak belirlenmiştir.  $M_2$  indisi ne kadar yüksek tutulursa alet titreşim altında o kadar hassas ölçüm yapar.

$$M_2 = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (4.29)$$

Termal genleşme katsayısı – termal iletkenlik grafiğinde  $M_1$  indisi  $10^7$  değeri olarak kabul edilir.  $M_2$  değeri ise elastisite modülü – yoğunluk grafiğinde gösterilir. Bakır, tungsten ve nikel alaşımları  $M_1$  için mükemmel ancak yüksek yoğunluklarından dolayı  $M_2$  indisiyle çelişir. Bu metaller silisyum ve silisyum karbüre göre iyi bir seçenektir. Bu örnekle günümüzde kullanılan bütün hassas makinelerin çalışmasında karşılaşılan sorunlara ışık tutulmuştur (Ashby, 2011).

#### 4.2.5 Ashby Yaklaşımının Isı Değiştiricilerine Uygulanması

Isı değiştiriciler iki farklı sıcaklıktaki ve basınçtaki akışkanın birbirine karışmadan ısı transferinin yapılmasını sağlar. Bir akışkandan başka bir akışkana ısı transferi:

- a) Akışkandan boruya taşınım
- b) Boru et kalınlığında iletim
- c) Borudan akışkana taşınım ile olur.

Taşınım ve iletim formülleri sırasıyla denklem (4.30) ve (4.31)'de verilmiştir.

$$q = h \cdot \Delta T \quad (4.30)$$

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{s} \quad (4.31)$$

Toplam ısı transferi katsayısı denklem (4.32)'de gösterildiği gibidir ve buna göre yapılan toplam ısı transferi formülü de denklem (4.33)'deki halini alır.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{t}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \quad (4.32)$$

$$q = U \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.33)$$

Isı değiştiricisi içerisindeki akışkanlar gaz fazında ise boru üzerindeki kanatlar vasıtasıyla taşınım yüksektir. Ancak akışkanlar sıvı fazındaysa taşınım ile yapılan ısı transferi ihmal edilebilir. O halde yapılan ısı transferi için kullanılması gereken ısı transferi formülü denklem (4.31)'de verildiği haldedir. Isı değiştiricisinin yüzey alanını da ( $Y_a$ ) bu formüle eklersek formül, denklem (4.34) halini alır.

$$Q = q \cdot Y_a = Y_a \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{s} \quad (4.34)$$

Borudaki basınç farkına dayanabilmesi için boru et kalınlığı yeterli olmalıdır. Boru yüzeyindeki gerilme, boru malzemesinin akma sınırını geçmemelidir. Akma sınırı denklem (4.35)'de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{\Delta p \cdot r}{s} < R_e \quad (4.35)$$

Denklem (4.34) ve (4.35)'in birleştirilmesinden denklem (4.36) elde edilir ve oluşturulan bu denklemden de malzemenin karakteristik özellikleri çekilerek denklem (4.37)'de görünen  $M_1$  indisi elde edilmiş olur.

$$Q = \frac{Y_a \cdot \Delta T}{\Delta p \cdot r} \cdot \lambda \cdot R_e \quad (4.36)$$

$$M_1 = \lambda \cdot R_e \quad (4.37)$$

Seçilecek olan malzemenin akışkanlardan dolayı oluşabilecek korozyonların etkisini en aza indirmek gerekir. Malzemenin çalışma sıcaklığı akışkan sıcaklıklarından fazla olmalıdır. Ayrıca malzemenin bükülüp boru haline getirebilmesi için yeterli süneklığe sahip olması gerekir.

$M_1$  malzeme indisi  $\lambda - R_e$  grafiğinde gösterilir ve üzerinde kalan malzemeler arasından bakır seçilir. Sonrasında CES EduPack programında maksimum çalışma sıcaklığı 150 °C, yüzde uzaması %30, malzeme fiyatı 6 \$/kg'dan az, deniz suyuna karşı dirençli olan bakır alaşımları yeni bir grafikte gösterilir.

Isı iletimini sınırlandırılabilir bir şey de deniz suyu içerisinde yaşayan canlıların borular üzerinde tortulaşarak kalmasıdır. Bunun için boru içerisindeki akışkanlara çözücüler konulabilir, mekanik olarak temizlenebilir ya da malzeme olarak Cu – Ni alaşımı seçilerek bu birikintilerin hiç oluşmaması sağlanabilir. Isı değiştiricisinin ağırlığını azaltmak için de  $M_2$  indisi denklem (4.38)'de görüldüğü üzere verilmiştir.

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{R_e}{\rho} = \frac{\lambda \cdot R_e^2}{\rho} \quad (4.38)$$

Sonrasında denkleme birim fiyatı eklenerek denklem (4.39)'da görülen  $M_3$  indisi elde edilir.

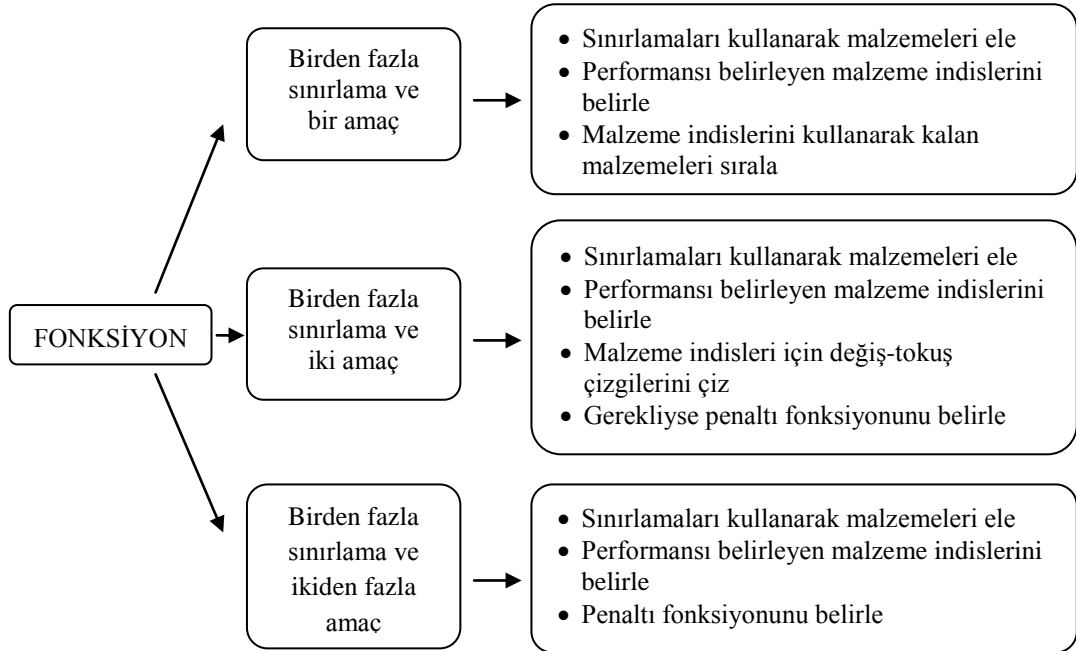
$$M_3 = \frac{\lambda R_e^2}{C_m \rho} \quad (4.39)$$

Sonuç olarak  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  indislerinin de yardımıyla Al alaşımları hafif, ucuz ve istenen şartları sağlayabilecek bir malzeme olarak seçilir (Ashby, 2011).

### 4.3 Çok Sınırlamalı ve Çok Amaçlı Durumlarda Malzeme Seçimi

Ashby yaklaşımını anlatıldığı gibi uygulaması çok basit ve kullanışlıdır. Önce malzemeleri belirlenen sınırlamalarla elenir, daha sonra kalan malzemeleri kendi arasında malzeme indislerini kullanarak sıralanır, en sonunda da doküman araştırması yaparak kullanılması gereken malzeme seçilir.

Birden fazla sınırın ve tek bir amacın bulunduğu durumlarda bu yöntem gayet doğru sonuçlar verebilir. Ancak amacı etkileyen iki sınır varsa problem biraz karmaşık hale gelir ya da birden çok sınır ve amaç varsa problemi başka türlü ele almak gereklidir (Şekil 4.9).

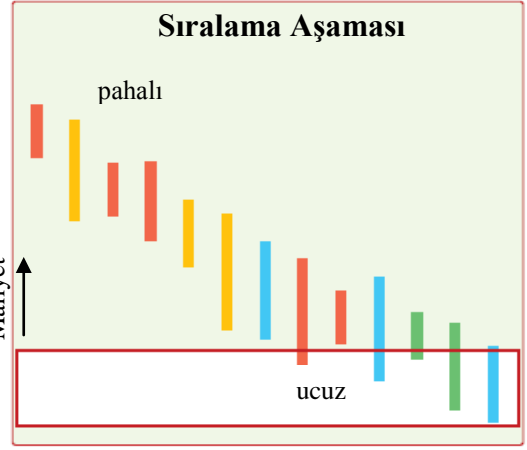


**Şekil 4.9:** Birden çok sınırlama ve amaçların olduğu malzeme seçimlerinde izlenmesi gereken yol (Ashby, 2011)

#### 4.3.1 Birden Fazla Sınırlama ve Bir Amaç

Şekil 4.10'da Ashby yaklaşımının temeli verilmiştir. Şekil 4.10a'da sınırlamaların kullanılması, Şekil 4.10b'de ise tek bir amacın kullanılması ile kalan malzemeler arasında sıralama gösterilmiştir.

| Eleme Aşaması          |            |
|------------------------|------------|
| Elastisite modülü      | > 100 GPa  |
| Akma sınırı            | > 250 MPa  |
| Termal iletkenlik      | > 80 W/m.K |
| Max. çalışma sıcaklığı | > 300 °C   |
| Korozyon direnci       | İYİ        |
| Döküm yapılabilirlik   | EVET       |



(a)

(b)

**Şekil 4.10:** Birden fazla sınırlamanın olduğu durumlarda malzeme seçimi a) Eleme aşamasında verilen sınır değerler, b) Malzemelerin maliyet grafiği (Ashby, 2011)

Ancak amaç maliyetin değil de kütlenin azaltılması olsaydı durum daha farklı olurdu. Çünkü ağırlığı sınırlayan iki tane sınır değerine sınırlamada yer verilmiştir. Yani ağırlık, iki değerinde kendine has formülleriyle değişir ve sonuçlarda sapmalara yol açar, malzeme seçimini etkiler. Bunun önüne geçebilmek için Ashby tarafından analitik ve grafik yöntemi önerilmiştir.

#### 4.3.1.1 Analitik Yöntem

Ağırlığın düşürülmesinin amaç olduğu ve ağırlığı doğrudan etkileyen iki sınır değer (rijitlik ve dayanım) sınır olarak getirilmesi ile malzeme seçimi minimum–maksimum problemine dönüştürülmüş olur. Bu problem denklem (4.40)'da formül haline getirilmiştir. Konunun daha iyi anlaşılması için aşağıdaki örnek verilmiştir.

$$\tilde{m} = \max(m_1, m_2) \quad (4.40)$$

Örnek: Uzunluğu 1 m, rijitliği  $3 \cdot 10^7$  N/m ve çekme yükü de  $10^5$  N olan rot kolunun malzemesi ne olmalıdır? Tasarım ihtiyaçları Tablo 4.3'de görülmektedir.



**Tablo 4.3:** Rot koluna ait fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler

|                            |                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Rot kolu</li></ul>                                                                                                                                  |
| <b>Sınırlamalar</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Uzunluk (L): 1 m</li><li>• Rijitlik (k): <math>3 \cdot 10^7</math> N/m</li><li>• Çekme yükü (<math>F_{\zeta}</math>): <math>10^5</math> N</li></ul> |
| <b>Amaç</b>                | <ul style="list-style-type: none"><li>• Ağırlığı azaltmak</li></ul>                                                                                                                         |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Malzeme seçimi</li></ul>                                                                                                                            |

Ağırlık formülü denklem (4.41)'de görülmektedir. Rijitlik ve dayanımdan ağırlığa ulaşabilmek için sırasıyla denklem (4.44) ve (4.45) kullanılabilir.

$$m = Y_a \cdot L \cdot \rho \quad (4.41)$$

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\zeta}}{Y_a} = E \cdot \epsilon \quad (4.42)$$

$$F_{\zeta} = \frac{E \cdot Y_a}{L} \cdot \Delta L \quad (4.43)$$

$$k = \frac{E \cdot Y_a}{L} \quad (4.44)$$

$$F_{\zeta} = R_e \cdot Y_a \quad (4.45)$$

Denklem (4.44) ve (4.45)'de alan yalnız bırakılır ve bunlar denklem (4.41)'de alanın yerine yazılarak ağırlık formülü geliştirilir ve denklem (4.46) ve (4.47) elde edilir.

$$m_1 = L^2 \cdot k \cdot \frac{\rho}{E} \quad (4.46)$$

$$m_2 = L \cdot F_{\zeta} \cdot \frac{\rho}{R_e} \quad (4.47)$$

Türetilen bu formüller ile Tablo 4.4 oluşturulur.

**Tablo 4.4:** Aday malzemelerin karakteristik özellikleri ve hesaplanan ağırlıkları

| Malzeme | $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | E, GPa | R <sub>e</sub> , MPa | m <sub>1</sub> , kg | m <sub>2</sub> , kg | $\tilde{m}$ , kg |
|---------|----------------------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| x       | 7850                       | 200    | 320                  | 1,17                | 2,45                | 2,45             |
| y       | 2700                       | 50     | 120                  | 1,62                | 2,0                 | 2,0              |
| z       | 4400                       | 100    | 950                  | 1,32                | 0,46                | 1,32             |

Tablo 4.4'den anlaşılacağı üzere sadece ağırlığın düşürülmesi amaç edinildiğinde “z” malzemesi diğer malzemelere göre daha iyi bir seçenektir. Ancak belirlenen sınırlamalar uzunluk 3 m, rijitlik 10<sup>8</sup> N/m, çekme yükü 3.10<sup>4</sup> N şeklinde değiştirilirse, sonuç Tablo 4.5'de görüldüğü gibi değişir. “x” malzemesi diğer malzemelere göre daha hafif olduğu için bu durumda “x” malzemesi seçilir.

**Tablo 4.5:** Aday malzemelerin karakteristik özellikleri ve hesaplanan ağırlıkları

| Malzeme | $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> | E, GPa | R <sub>e</sub> , MPa | m <sub>1</sub> , kg | m <sub>2</sub> , kg | $\tilde{m}$ , kg |
|---------|----------------------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| x       | 7850                       | 200    | 320                  | 35,3                | 2,20                | 35,3             |
| y       | 2700                       | 50     | 120                  | 48,6                | 2,02                | 48,6             |
| z       | 4400                       | 100    | 950                  | 39,6                | 0,42                | 39,6             |

İlk tabloda ağırlık sıralaması  $z < y < x$ , ikinci tabloda  $x < z < y$  olmuştur. Bu anlatılanı kanıtlamaktadır; eğer amacı birden fazla sınırlandırma etkiliyorsa ikisi içinde ayrı şekilde problem çözülerek malzeme seçimi yapılmalıdır.

Örnekte görüldüğü gibi 3 aday malzeme değil de daha fazla aday malzeme kendi arasında sıralanmaya çalışılırdı basit bir bilgisayar programıyla bu iş çözülebilirdi. Ancak bu yaklaşım görsel olarak çok zayıf ve tasarımcıyı yaratıcı düşünceye sevk etmediği için tercih edilmemelidir.

#### 4.3.1.2 Grafik Yöntemi

Bir önceki konuda anlatılan örnekle devam edersek, her iki sınır değer de belirlediği ağırlıkların koordinat sisteminde x ve y'de gösterilmesiyle aday

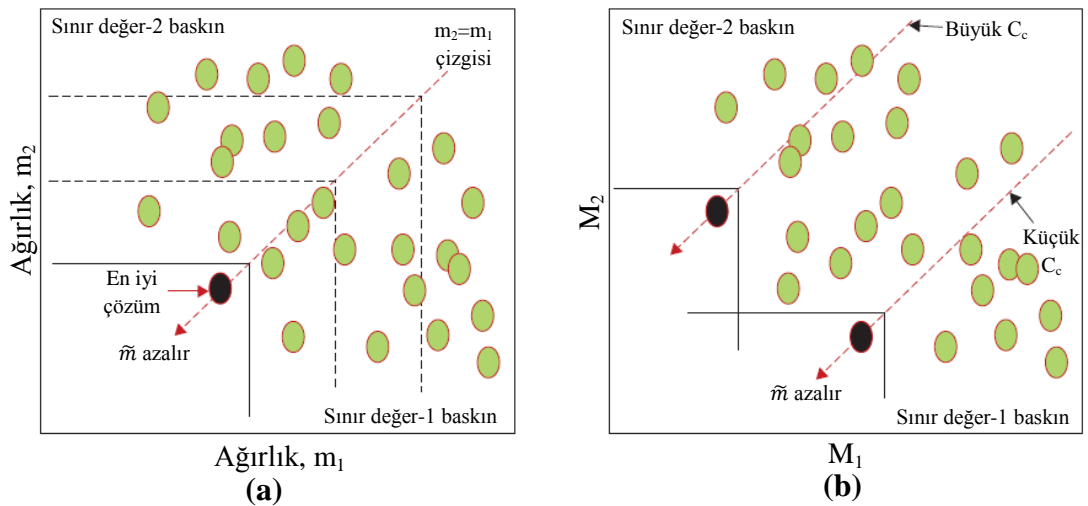
malzemeler Şekil 4.11 a’da olduğu gibi baloncuklar halinde yer alır. Ağırlığın azaltılması amaç olduğu için de en iyi malzeme koordinat sisteminde sol alta yer alır. Sol alttaki malzemelerden de  $m_2$  ve  $m_1$  değerleri birbirine eşit belirlenirse kırmızı ok (eğimi bir olan, orijinden geçen çizgi) üzerindeki malzemelerden sol alta en yakın malzeme seçilir. Sınır değerlerden dayanım, rijitliğe göre daha önemliyse, bu durumda seçilmesi gereken malzeme kırmızı çizginin altında kalan bölgede bulunur.

Şekil 4.11 a’da gösterilen malzemeler sabit bir uzunluk, rijitlik ve çekme dayanımı için oluşturulmuştur. Bunların değiştirilmesi durumunda bu grafik kullanılamaz. Bunun için Şekil 4.11 b oluşturulmuştur. Grafikte ağırlıklar malzeme indisleriyle değiştirilmiştir. Malzeme indisleri denklem (4.46) ve (4.47)’den elde edilir:

$$M_1 = \frac{\rho}{E} \quad (4.48)$$

$$M_2 = \frac{\rho}{R_e} \quad (4.49)$$

Her baloncuk önceki grafikteki gibi ayrı bir malzemeyi temsil eder ve uzunluk, rijitlik ve çekme dayanımı değerlerinden etkilenmez.



**Şekil 4.11:** Min.-max problemine grafik yöntemiyle yaklaşım (Ashby, 2011)

Ağırlıkların eşitliği durumunda çizilen eşleşme sabiti Şekil 4.11 b’de şöyle elde edilir: Denklem (4.50) önce logaritması alınarak denklem (4.51) haline getirilir.

$$M_2 = \left( \frac{L \cdot k}{F_c} \right) \cdot M_1 \quad (4.50)$$

$$\log M_2 = \log M_1 + \log \left( \frac{L \cdot k}{F_c} \right) \quad (4.51)$$

Burada çizginin eğimi değişmemektedir, ancak çizginin grafikteki yeri denklem (4.52)'ye göre belirlenir.

$$C_c = \frac{L \cdot k}{F_c} \quad (4.52)$$

Buradan sonra da malzeme seçimi Şekil 4.11 a ile önceden anlatıldığı gibi devam eder. Çizilen  $C_c$  çizgisinin (eşleşme sabiti) yeri verilen sınır değerlerden herhangi birinin değişmesiyle değişir ve çizgi üzerinde en sol alttaki malzeme seçilir.

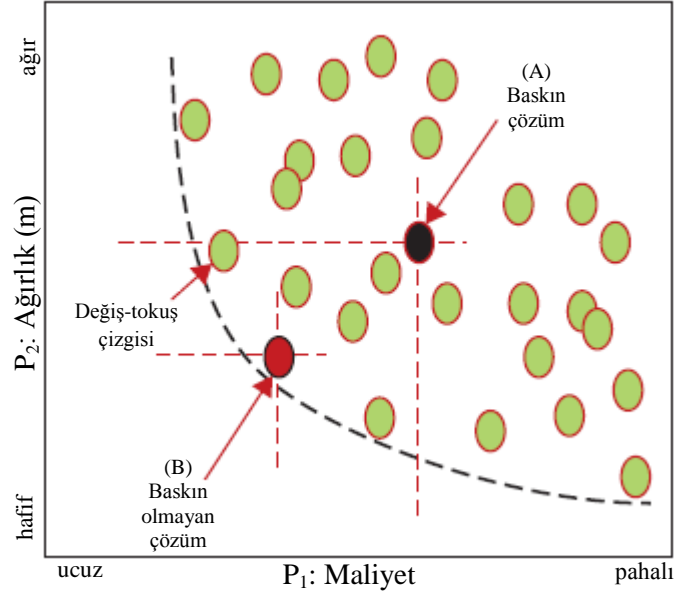
### 4.3.2 Birden Fazla Sınırlama ve Birden Fazla Amaç

Gerçek hayatta tasarımlarda amaç her zaman birden fazladır. Bunlar:

- Tasarımın ağırlığını azaltmak,
- Tasarımın kapladığı hacmi azaltmak,
- Maliyeti düşürmek,
- Tasarımın hayata geçirildiği zaman çevreye olan kötü etkisini en aza indirmek vs.

Bu amaçların dışında da tasarımların farklı amaçları olabilir (korozyon dayanımını artırmak, ısı transferini azaltmak gibi). Elimizdeki bu dört amaç her tasarımda olabilir ve en az ikisi bir tasarımda mevcuttur. Her biri performans parametreleri ( $P_i$ ) tarafından belirlenir.

Birden fazla sınırlamaları sağlarken, aynı anda maliyeti ve ağırlığı azaltmaya yönelik yapılan bir tasarımda, maliyetin performans parametresi  $P_1$ , ağırlığın parametresi de  $P_2$  olarak belirlenmiş ve malzemelerin gösterildiği grafik üzerinde bu parametreler Şekil 4.12'deki gibi yer almıştır.



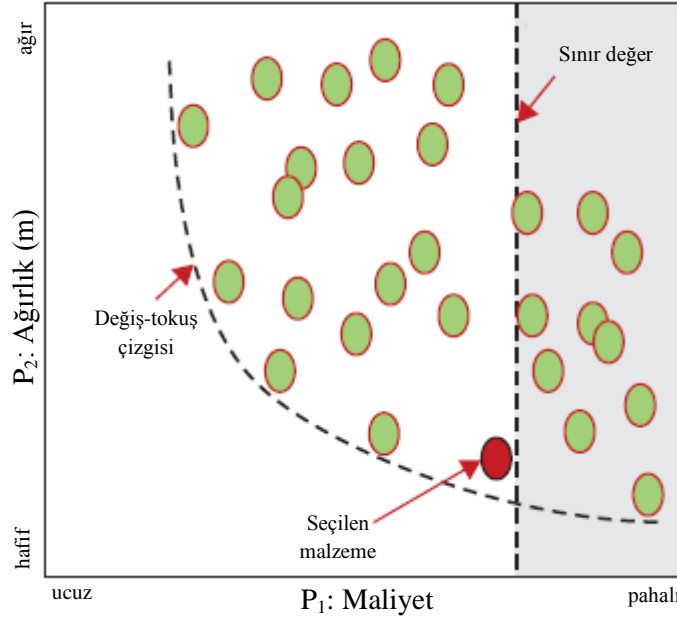
**Şekil 4.12:** İki farklı amacın tek bir grafikte gösterimi (Ashby, 2011)

Buradaki amaç her iki parametrenin de en düşüğünün sağlandığı optimum çözümü bulabilmek. Bunun için grafik üzerinde değiş-tokuş çizgisi dediğimiz çizgi çizilir ve buna en yakın olan malzemeler arasından seçim gerçekleştirilir.

Kırmızı kesikli çizgilerle belirtilen kutuda “A” malzemesi, kutu içerisindeki diğer malzemelere göre ağırlığı ve maliyeti en yüksek olan malzemedir. Bu tür malzemeler diğer malzemelere göre baskın çözüm olarak nitelendirilir. Kutu içerisinde kırmızı renkli ve değiş-tokuş çizgisine en yakın malzeme de baskın olmayan çözüm olarak nitelendirilir.

Bu yolla malzeme seçerken üç farklı strateji izlenir. Birincisi kutu içerisinden değiş-tokuş çizgisine en yakın üç malzeme ele alınır ve bu malzemeler kendi aralarında sıralanarak en iyi malzeme seçilir. Genelde bu yol işe yarar ancak yaramadığı durumlarda ikinci yol kullanılır. İkinci stratejide amaçlardan birine sınır değeri verilerek malzemeler arasından sınırlamayı yerine getiremeyen çözümler elenir ve geri kalanlar arasından malzeme seçimi yoluna gidilir. Yukarıda verilen örnekte maliyete sınır değeri verilerek grafik Şekil 4.13’de görüldüğü haliyle tekrar oluşturulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi sınır değerinin üzerinde kalan malzemeler elenir ve geri kalan malzemeler arasından en hafif olan malzeme seçilir. Ancak bu

yol tercih edilmemelidir. Çünkü bu yolla gerçek optimizasyon yapılmamış olur. Bu yüzden penaltı fonksiyonu dediğimiz üçüncü strateji geliştirilmiştir.



**Şekil 4.13:** İki farklı amaç ve bir sınırlamanın grafikte gösterimi (Ashby, 2011)

#### 4.3.2.1 Penaltı Fonksiyonu

Değiş-tokuş çizgisi aday malzemeler arasından seçilmesi öngörülen malzemelerin alt kümesini oluşturmamıza yardımcı olur. Ancak tasarımcıya sadece tek bir malzeme gereklidir. Bunun için penaltı fonksiyonu geliştirilmiştir (Penaltı fonksiyonuna ayrıca değerlilik fonksiyonu da denir). Penaltı fonksiyonu ile birden fazla ve farklı amaçlar, tek bir amaca indirgenir. Bu fonksiyon denklem (4.53)'de gösterilmiştir.

$$Z = \alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + \dots \quad (4.53)$$

Değiş-tokuş çizgisine yakın olan malzemelerden en düşük penaltı fonksiyonu değerine sahip olan malzeme seçilir. Genelde “Z” değerinin birimi para birimidir. “α” harfi değişim sabitini sembolize eder ve bu sabit, bütün birimleri tek bir türe dönüştürür. Değişim sabiti performans parametrelerinin değerliliğini belirler. Değişim sabitinin belirlenmesi ve malzeme seçimini nasıl etkilediği konusuna ileride ayrıca değinilecektir.

Tasarımlarda genel olarak azaltılması amaçlanan faktör maliyettir. Bu sebeple parametrelerden birine maliyet dersek, onun değişim sabiti de 1 olur. O halde penaltı fonksiyonu denklem (4.54)'de görüldüğü halini alır.

$$Z = C_m + \alpha_2 P_2 + \alpha_3 P_3 + \dots \quad (4.54)$$

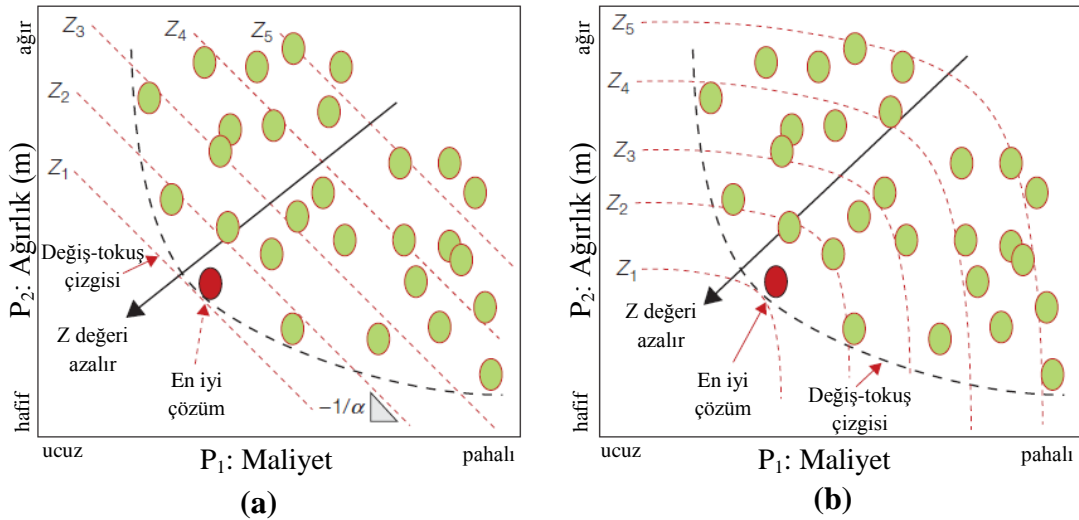
Bir önceki örnekteki gibi maliyet ve ağırlığın azaltılması amaç olarak alınsın. Bu durumda penaltı fonksiyonu denklem (4.55) halini alır.

$$Z = C_m + \alpha m \quad (4.55)$$

Denklem (4.55)'de ağırlık yalnız bırakılırsa denklem (4.56) elde edilir. Bu denklem "m" ve "C<sub>m</sub>" arasındaki lineer değişimi anlatır.

$$m = -\frac{1}{\alpha} \cdot C_m + \frac{1}{\alpha} \cdot Z \quad (4.56)$$

Penaltı fonksiyonu denklem (4.56)'ya göre hesaplanır ve fonksiyon grafik üzerinde, eğimi  $-1/\alpha$  olacak şekilde Şekil 4.14 a'daki gibi çizilir.



**Şekil 4.14:** Penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş çizgisinin grafik üzerinde gösterimi (Ashby, 2011)

Penaltı fonksiyonu Şekil 4.14'de görüldüğü üzere sol alta doğru gidildikçe azalır. En iyi çözüm de orada, penaltı fonksiyonu ile değiş-tokuş çizgisinin kesiştiği yerdedir. Çözüm olarak da grafikten tek bir malzeme seçilmemelidir, bunun yerine kesişim noktasına yakın, ufak bir grup malzeme seçilir. Çünkü seçilecek olan

malzemenin tasarım için ne kadar uygun olduğu dokümantasyon araştırması ile araştırılmalıdır ve bu grubun biraz büyük tutulması faydalıdır.

Penaltı fonksiyonlarının grafik üzerinde gösterimi Şekil 4.14(a)'daki gibi olmaması gerekir, çünkü daha önce anlatıldığı gibi malzeme grafikleri logaritmik olarak çizilir ve penaltı fonksiyonu lineer değil Şekil 4.14(b)' de görüldüğü üzere logaritmik olması gerekir.

#### 4.3.2.1.1 Değişim Sabitinin Belirlenmesi ve Önemi

Değişim sabiti, performans parametrelerinin değerliliğini belirler, birimi ve önemi tasarımın türüne göre farklılık gösterir. Örneğin arabalarda ağırlığı düşürmek önemli bir iştir, ancak uzay gemisinde ağırlığı düşürmek daha değerli, daha önemli bir iştir. Örneğin bir evin ısıtılmasında kullanılan ısı değiştiricinin performansını artırmak önemlidir, ancak elektrikli bir alette ısı transferini artırınca aletin soğumasından ötürü daha fazla işlem yapılabileceği için böyle bir tasarımda değişim sabiti daha büyüktür, daha önemlidir.

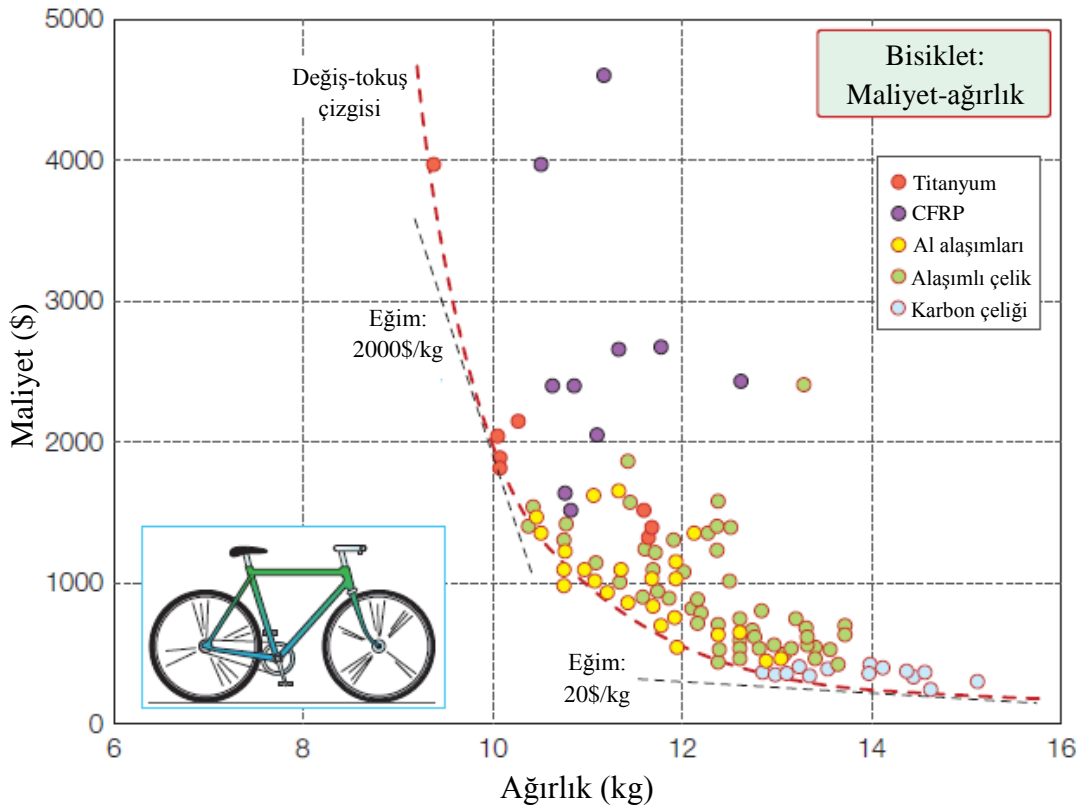
Çoğu mühendislik tasarımlarında değişim sabiti tasarımın ömrüne göre belirlenir. Yani uzun ömürlü bir alette yapılacak olan iyileştirmeyle, maliyetin düşürülmesi önemlidir. Ayrıca tasarımda kullanılan malzemenin türüne göre de değişim sabiti farklılık gösterir. Yani arabalarda kullanılan alüminyum ile uzay gemilerinde kullanılan berilyum veya titanyumun maliyeti aynı olamayacağı için değişim sabiti de farklı olması gerekir. Bu farklılık Tablo 4.6'da verilmiştir.

**Tablo 4.6:** Maliyet-ağırlık değişim sabitinin farklı sektörlerdeki değeri(Ashby, 2011)

| Sektör: Taşıma Sistemleri | Değerlendirme                         | Değişim Sabiti, $\alpha$ (\$/kg) |
|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Araba                     | Yakıt tasarrufu                       | 1-2                              |
| Kamyon                    | Yük kapasitesi artırımı               | 5-20                             |
| Sivil uçak                | Yük kapasitesi artırımı               | 100-500                          |
| Savaş uçağı               | Yük kapasitesi ve performans artırımı | 500-1000                         |
| Uzay gemisi               | Yük kapasitesi artırımı               | 3000-10000                       |

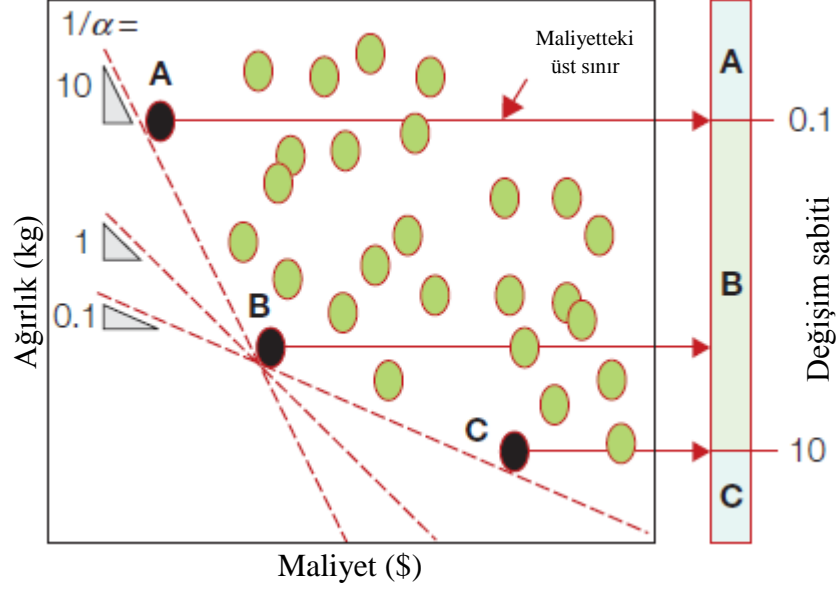


Değişim sabitlerini belirlemek yüksek mühendislik isteyen bir iştir. Bisiklet için ağırlığın düşürülmesini ele alırsak, düşük yoğunluklu malzemenin kullanılmasıyla bu başarılabilir. Ancak ağırlığı düşürmek pahalı olabilir. Çünkü düşük yoğunluklu bir malzemenin bisiklet için kullanılması maliyetlidir. Düşük yoğunluklu malzemeyle yapılan bir bisiklet ile yüksek yoğunluklu malzemedan yapılmış bir bisikletin maliyetleri farklı olduğu gibi, değişim sabitleri de farklıdır. Çünkü düşük ağırlıklı yüksek maliyetli bisikletin, ağırlığının düşürülmesi ile maliyeti düşer ve böylece o bisikletin değişim sabiti de yüksek olarak belirlenir. Bunu Şekil 4.15'deki grafikte daha rahat görebiliriz.



**Şekil 4.15:** Farklı iki bisikletin ağırlık ve maliyet değişim sabitinin grafikte gösterimi (Ashby, 2011)

Tasarım yaparken değişim sabitini doğru belirlemekle malzeme seçimi kolaylaştırılmış olur. Maliyet-ağırlık grafiğinde elde edilen değiş-tokuş çizgisiyle, doğru bir şekilde belirlenmiş değişim sabitinin kesiştiği bölgeden yapılan malzeme seçimi doğru bir iştir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere değişim sabitine 1 ile 10 arasında bir değer verildiğinde seçilen malzeme farklılık gösterir.



**Şekil 4.16:** Değişim sabitinin farklı belirlenmesi durumunda değişen malzeme seçimi (Ashby, 2011)

Yukarıdaki şekilde görüldüğü üzere  $\alpha < 1$  için (A) malzemesi seçilir. Değişim sabiti 0,1 ile 10 arasındaysa (B) malzemesini seçmek daha uygundur. Eğer değişim sabiti 10'dan büyükse (C) malzemesini seçmek uygundur. Çizilen bütün doğrular (B) malzemesini teğet geçse de grafiğin yanındaki değişim sabiti barında hangi malzemenin seçilmesinin gerektiği görülmektedir.

## 5. FARKLI ALANLARDA KULLANILAN ISI DEĞİŞTİRİCİLERİ İÇİN ASHBY YAKLAŞIMIYLA MALZEME SEÇİMİ

Isı değiştiricileri, ikinci bölümde anlatıldığı gibi ısı enerjisinin olduğu her yerde kullanılmaktadır. Farklı amaçlar için kullanılan ısı değiştiriciler farklı tasarımlara ve malzemelere sahiptir. Kullanıldığı ortam şartlarına göre de tasarımı ve malzemesi değişmektedir.

Bu çalışmada ısı değiştiricilerinde optimum malzemeyi belirleyebilmek için geliştirilen bir çok malzeme seçimi yaklaşımları içerisinden Ashby yaklaşımı uygun görülmüştür. Çünkü yaklaşımda kullanılan grafikler ve problemlerin ele alınma yöntemi tasarımcıyı kısıtlamamaktadır. Tam aksine oluşturulan grafikler ile 160.000 civarındaki mühendislik malzemeleri arasından, tasarımcı tarafından belirtilen sınırlamalara uyacak ve tasarımın amacını karşılayacak malzeme seçimi basit ve kolay anlaşılır bir hale getirilmiştir.

Ashby yaklaşımında tasarıma başlamadan önce belirtilmesi gereken fonksiyon, sınırlama, amaç ve serbest değişken tablosunu oluşturmak gerekir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1'de belirtilen sınırlama, amaç ve serbest değişkenler herhangi bir ısı değiştirici için belirlenebilir ya da bunların haricinde de kriter getirilebilir. Belirlenen kriterlere göre malzeme seçimi gerçekteşirilir. O yüzden tasarıma başlamadan önce bu kriterlerin düzgün ve net bir şekilde belirlenmesi gerekir. Aksi takdirde ısı değiştirici için seçilen malzeme pahalı ve gereksiz özelliklere sahip olabilir.

**Tablo 5.1:** Fonksiyon, sınırlamalar, amaç ve serbest değişkenler

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Isı değiştirici</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Sınırlamalar</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Termal iletkenlik</li><li>• Termal uzama</li><li>• Termal difüzyon</li><li>• Termal arpımlara dayanıklı</li><li>• Kapladığı hacim ve ağırlık</li><li>• Kolay kırılmamalı ve atlamamalı, kuvvet altında esnemeli ancak kopmamalı</li><li>• Korozyona karşı direnç</li><li>• Yüksek elektrik direnci</li><li>• Yüksek alışma basıncı</li></ul> |
| <b>Amaçlar</b>             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Isı transferini artırmak</li><li>• Hacmi veya ağırlığı azaltmak</li><li>• Maliyeti azaltmak</li><li>• Kullanılacak tasarımla kirlilik sebebiyle tıkanmaların önüne geçmek</li></ul>                                                                                                                                                             |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Malzeme seçimi</li><li>• Isı değiştiricisi seçimi</li><li>• Maliyet</li></ul>                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Tasarıma uygun bir şekilde belirlenen bu kriterlere bakarak, Ashby yaklaşımında hangi yolun izleneceğini doğru bir şekilde seçmek gerekir ve bu dördüncü bölümde anlatıldığı üzere çok kolaydır. şekil 4.9’da anlatıldığı gibi birden fazla sınırlama ve bir amacın belirtildiğı durumlarda en basit şekliyle malzeme seçimi gerçekleştirilebilir. Ancak sınırlamalardan ikisi de amacı etkiliyorsa durum değişir ve ona uygun bir yol izlenmelidir.

Bazı durumlarda da tasarımın birden fazla amacının olması istenir. Bu sebeple yapılacak malzeme seçimi daha farklı bir şekil alır. Ashby tarafından geliştirilen formüllerin kullanılması ve bilgisayar programı yardımıyla çizilen grafikler ile malzeme seçimi daha detaylı bir şekilde ele alınır ve gerçekleştirilir.

Dördüncü bölümde açıklanan üç farklı Ashby yaklaşımı için üç farklı ısı değiştirici örneği üzerinde çalışma yapılmıştır. İncelenen yaklaşım ve örnekler Tablo 5.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2:** Farklı ısı değiştiricilerin malzeme seçimlerinde kullanılması öngörülen Ashby yaklaşım yolları

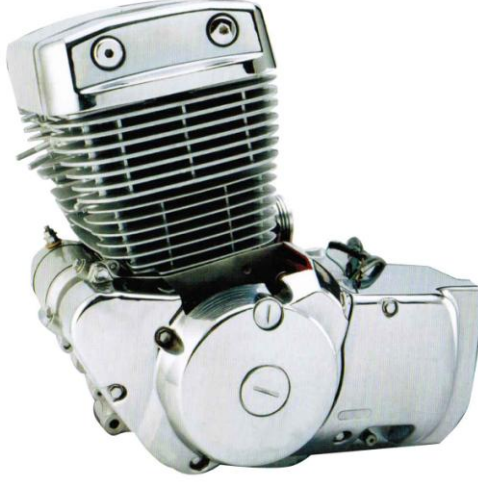
|   | <b>Ashby Yaklaşımları</b>                             | <b>Kullanım Yeri</b>             |
|---|-------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | Bir amaç ve birden fazla sınırlama                    | Motosiklet radyatörü             |
| 2 | Bir amaç ve bu amacı etkileyen birden fazla sınırlama | Mikroçip soğutucuları            |
| 3 | Birden fazla amaç ve sınırlama                        | Atık ısı kazanı kanatlı boruları |

Tablo 5.2’de belirlenen ısı değiştiricilerinin her biri ayrı bir durum çalışması yapılarak kendilerine göre amaçları, sınırlamaları ve serbest değişkenleri belirtilmiş ve malzeme seçimi bunlara göre yapılmıştır.

### **5.1 Motosiklet Radyatörleri İçin Malzeme Seçimi**

İçten yanmalı motor yakıtın motor içinde yanma odası adı verilen sınırlı bir alan içinde yakılması ile oluşan basıncın, piston denen parçayı hareket ettirmesi ile oluşan makinedir. Bu makinelerde yanmadan dolayı oluşan ısı enerjisinin bir kısmı egzoz gazıyla dışarı atılmaktadır, bir kısmı da motorda kalmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla motorda istenmeyen problemler oluşmaktadır. Ortaya çıkan problemlerden kurtulmak için de motorda kalan ısının atılması gerekmektedir.

Motosiklet motorlarında biriken ısının atılması için motor gövdesi üzerinde kanatçıklar monte edilmiştir (Şekil 5.1). Bu yüzey alanını artırarak motor üzerinde havanın daha fazla temas etmesini sağlar ve ısı transferini artırarak motorun aşırı ısınmasını önler.



**Şekil 5.1:** Motosikletlerde kullanılan tek silindirli motor

Ancak yüksek performansa sahip motosikletlerde motorların yüksek hacimlere sahip olmasından ötürü motorda biriken sıcaklık da çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. Şekil 5.1’de gösterilen silindirin dış gövdesi üzerindeki kanatçıklar motorun aşırı ısınmasına engel olamamaktadır. Bu sebeple arabalarda, trenlerde veya yüksek hacimli içten yanmalı motorların bulunduğu yerlerde kullanılan radyatörler, motosikletlerde kullanılmıştır. Motosikletlerde kullanılan radyatörler kanatçıklı levhalı tip ısı değıştircileridir (Şekil 5.2).



**Şekil 5.2:** Motosikletlerde kullanılan kanatçıklı levhalı tip ısı değıştircilerine örnek

Bu tip ısı değıştircilerinde genelde kullanılan malzeme yüksek ısı iletimine sahiptir. Ancak düşük akma sınırına sahip olduğu için kolay bükülür ve zarar görür. Tasarımından ötürü düzleştirilmiş borular arasında yer alan kanatçıklar radyatörün ısı

transfer yüzeyini artırdığı gibi dayanımını da artırmaktadır. Motosikletin altında yer alan radyatörler tamamen açıkta olduğu için borulara veya kanatçıklara yabancı bir cismin çarpması ile zarar görebilir veya delinebilir. Radyatör içerisindeki akışkan boşalursa radyatör görevini yerine getiremez, motorun sıcaklığı artar ve geri dönülemez zararlara sebebiyet verebilir. Bu sebeple radyatör için seçilecek malzemenin darbelere karşı dayanıklı olması, dışarıdan bir darbe aldığı durumda hemen delinmemesi gerekir.

Aynı zamanda radyatör içerisindeki akışkanda kimyasalların kullanılmasıyla malzeme korozyona uğrayabilir. Bu sebeple seçilecek malzemenin kimyasallara karşı dayanıklı olması istenir.

Günümüzde motorlu taşıtların yakıt tüketimini azaltabilmek amacıyla araçta bulunan her şeyin ağırlığının azaltılması amaçlanmaktadır. Buna radyatörler de dahildir. Düşük yoğunluklu malzemelerin kullanılması ile motosikletlerin tükettiği yakıt azaltıldığı gibi, ağırlığın düşmesinden ötürü kullanım da kolaylaştırılır.

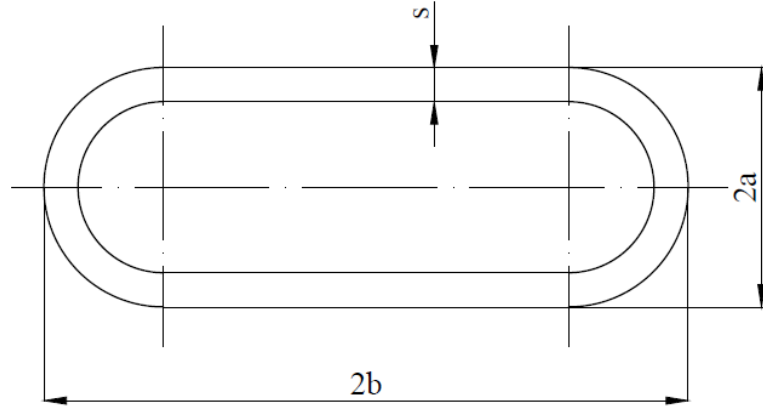
Motosiklet üzerinde genelde motorun yanında yer alan radyatöre çok fazla alan ayrılamaz. Bu sebeple ağırlık gibi radyatörlerin hacmi, kapladığı alan da önemlidir ve radyatör hacminin mümkün olduğunca küçük olması gerekir.

Yüksek performansa sahip motosikletlerin kendileri gibi radyatörleri de pahalıdır. Yukarıda anlatılan sınırlamalar kullanılarak radyatörün daha düşük maliyetlere elde edilmesini sağlamak için optimum malzeme seçilmeye çalışılmıştır. Tablo 5.3’de tasarım için belirlenen kriterler yer almaktadır.

**Tablo 5.3:** Motosiklet radyatörü için belirlenen sınırlamalar, amaçlar ve serbest değişkenler

|                            |                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Motosiklet radyatörü</li></ul>                                                                                                                 |
| <b>Sınırlamalar</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Termal iletkenlik</li><li>• Kapladığı hacim ve ağırlık</li><li>• Kolay çatlamamalı veya delinmemeli</li><li>• Korozyona karşı direnç</li></ul> |
| <b>Amaçlar</b>             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Maliyeti azaltmak</li></ul>                                                                                                                    |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Malzeme seçimi</li></ul>                                                                                                                       |

Radyatör içerisindeki akışkan yüksek basınçlı olmadığı için yüksek basınçlara dayanabilecek malzeme seçmek anlamsızdır. Ancak boruların darbe aldığı anda delinmemesi veya yük altında eğilip bükülmemesi için gereken et kalınlığı önemlidir. Et kalınlığı radyatör ağırlığını etkilediği için de düşük tutulması gereklidir. Bu sebeple et kalınlığını optimum seviyede tutmak gereklidir. Şekil 5.3’de kanatçıklı levhalı tip ısı değiştiricilerinde görülen düzleştirilmiş borunun kesiti görünmektedir.



**Şekil 5.3:** Düzleştirilmiş borunun kesiti

$$m = Y_a \cdot L \cdot \rho \quad (5.1)$$

$$Y_a = \pi \cdot (a + b) \cdot s \quad (5.2)$$

$$\sigma_e = \frac{M_e \cdot a}{I} \leq \frac{R_e}{S} \quad (5.3)$$

$$I = \frac{\pi}{4} \cdot a^3 \cdot s \cdot \left(1 + \frac{3b}{a}\right) \quad (5.4)$$

$$R_e = \frac{M_e \cdot S}{\frac{\pi}{4} \cdot a^2 \cdot s \cdot \left(1 + \frac{3b}{a}\right)} \quad (5.5)$$

$$s = \frac{4 \cdot M_e \cdot S}{\pi \cdot a^2 \cdot R_e \cdot \left(1 + \frac{3b}{a}\right)} \quad (5.6)$$

Denklem (5.3)’deki atalet momenti denklem (5.4)’de, denklem (5.1)’deki alan da denklem (5.2)’de verilmiştir. Bunlar yerlerine yazılarak ve denklem



(5.5)'deki et kalınlığı yalnız bırakılarak denklem (5.6) elde edilmiştir. Denklem (5.2)'de, et kalınlığı yerine yazılarak denklem (5.7) elde edilmiştir.

$$m = \pi \cdot (a + b) \cdot \frac{4 \cdot M_e \cdot S}{\pi \cdot a^2 \cdot R_e \cdot \left(1 + \frac{3b}{a}\right)} \cdot L \cdot \rho \quad (5.7)$$

Denklem (5.7)'de malzemenin karakteristik özelliği olarak yoğunluk ve akma sınırı bulunmaktadır. Bu değerler denklemden çekilerek malzeme indisi oluşturulmuştur (denklem 5.8).

$$M_1 = \frac{R_e}{\rho} \quad (5.8)$$

Boru içerisinde bulunan döküm ve kaynak sırasında ya da kullanıma bağlı olarak oluşan çatlakların büyümesiyle de radyatör boruları akışkanı sızdırmaya başlayabilir. Bunun önüne geçebilmek için de kırılma tokluğu yüksek malzemeler seçilir.

$$K_{1C} = C \cdot R_e \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c} \quad (5.9)$$

Denklem (5.9)' da görülen kırılma tokluğu formülünde akma sınırı yalnız bırakılarak denklem (5.10) edilmiştir. Bu denklemde malzemenin karakteristik özelliği olarak bulunan kırılma tokluğu malzeme indisini oluşturmuştur (denklem 5.11).

$$R_e = C \cdot \frac{K_{1C}}{\sqrt{\pi \cdot a_c}} \quad (5.10)$$

$$M_2 = K_{1C} \quad (5.11)$$

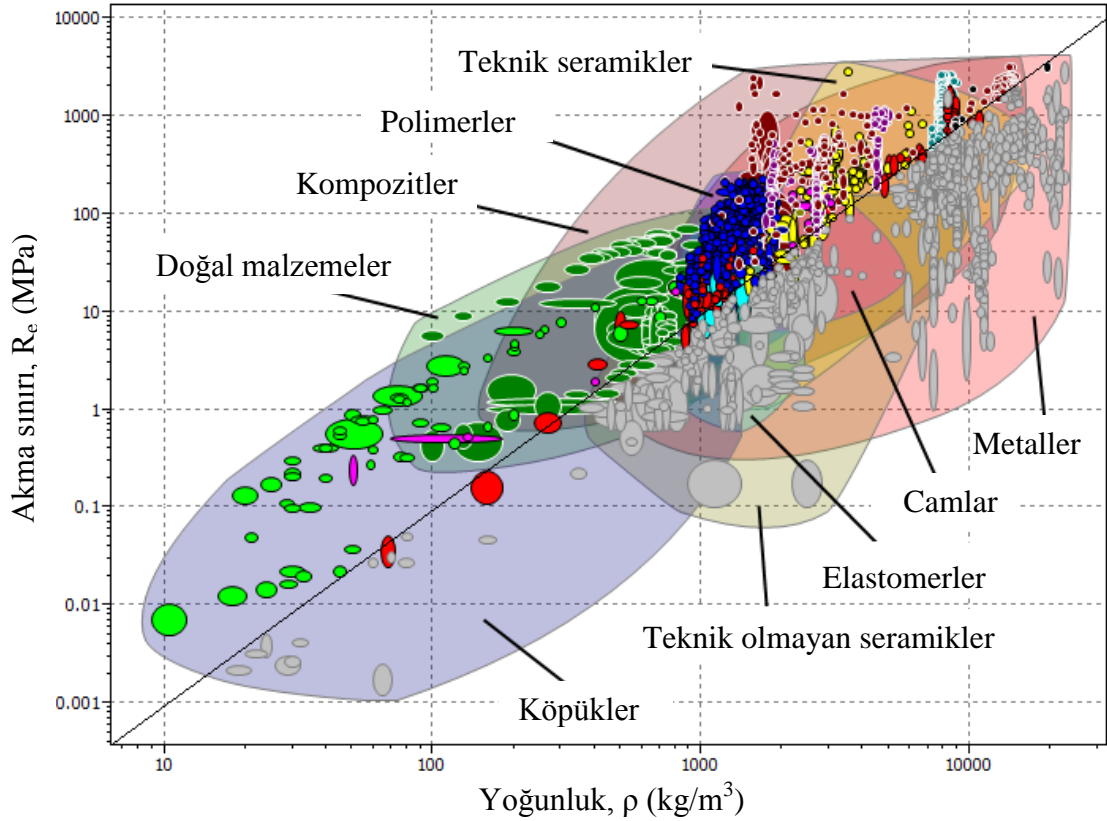
Et kalınlığı dayanım ve ağırlık için önemli olduğu kadar ısı transferi için de önemlidir. Et kalınlığı ne kadar düşük olursa radyatör içerisindeki akışkandan dış ortama yapılan ısı transferi de o kadar fazla olur. Denklem (5.12)'de de görülmektedir ki et kalınlığı düştükçe yapılan ısı transferi artmaktadır (ısı transferi hesaplamalarında kanatçıkların etkisi ihmal edilmiştir).

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{s} \quad (5.12)$$

Ancak et kalınlığının düşürülmesi dayanımı da düşüreceğinden, bunun yerine ısı iletim katsayısı artırılarak yapılan ısı transferi artırılır. Amaç radyatör maliyetinin düşürülmesi olduğu için ısı iletim katsayısı ile birlikte maliyet de üçüncü malzeme indisine eklenmiştir (denklem 5.13).

$$M_3 = \frac{\lambda}{C_m} \quad (5.13)$$

Malzeme indisleri oluşturulduktan sonra grafik üzerine çizilerek seçimin yapılabilmesi için malzemeler daha az sayıya indirilir. Bunun için önce denklem (5.8)'de gösterilen  $M_1$  ile başlanmıştır. Denklemde akma sınırı ve yoğunluk vardır. Bunlar grafik üzerinde Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



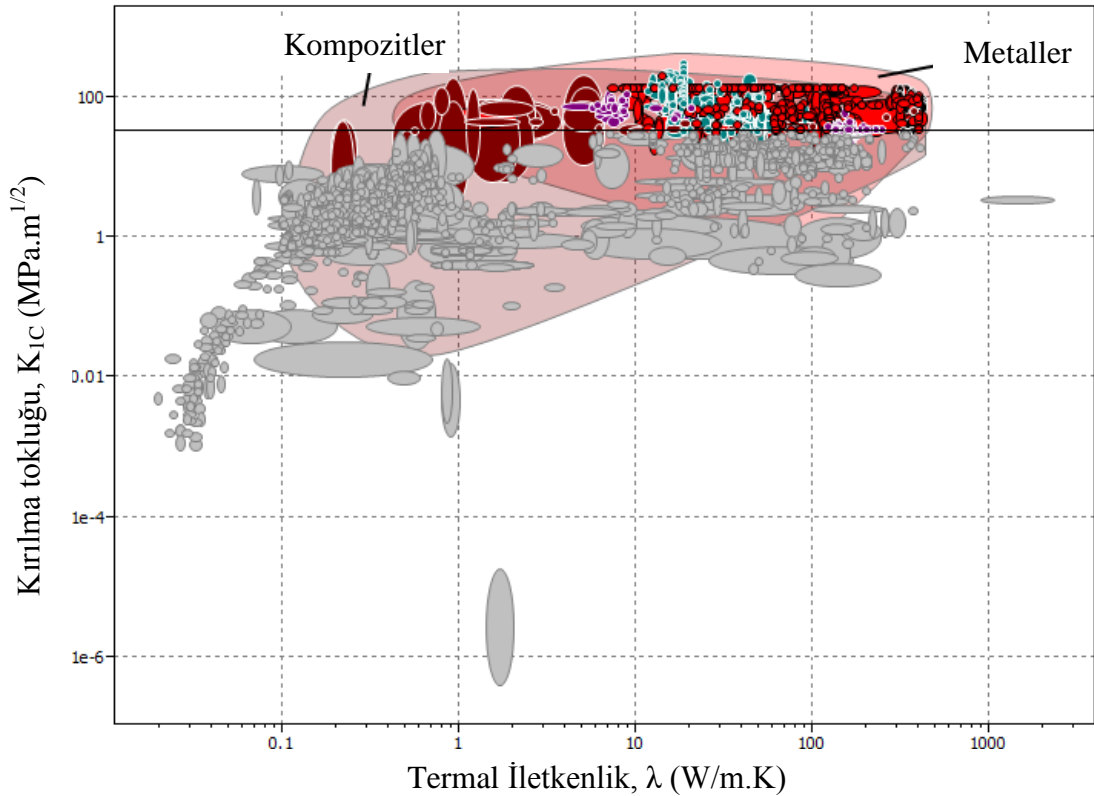
Şekil 5.4: Akma sınırı – yoğunluk grafiği

Akma sınırı yoğunluk grafiğinde, malzeme indisi doğru şeklinde gösterilmiştir. Bu çalışmada doğru orijinden başlayarak çizilmiştir. Yukarısında kalan malzemeler radyatör için uygun görülmüştür. Malzeme indisi doğrusu çizilirken dikkat edilmesi gereken en önemli şey grafikteki malzeme bilgilerinin logaritmik değerde olduğunu unutmamaktır. Malzeme indisinin logaritması alınarak denklem (5.14) elde edilmiştir.

$$\log R_e = \log \rho + \log M_1 \quad (5.14)$$

$M_1$ 'in logaritmasının başındaki rakam, grafik üzerinde çizilen doğrunun eğimini vermektedir. Grafiğin altında veya üstünde kalan malzemeleri de seçmek tasarımcıya kalmıştır. Bu çalışmada doğrunun yukarısında kalan malzemeler radyatör için uygun bulunmuştur ve geri kalan malzemeler gri renkle gösterilerek elenmiştir.

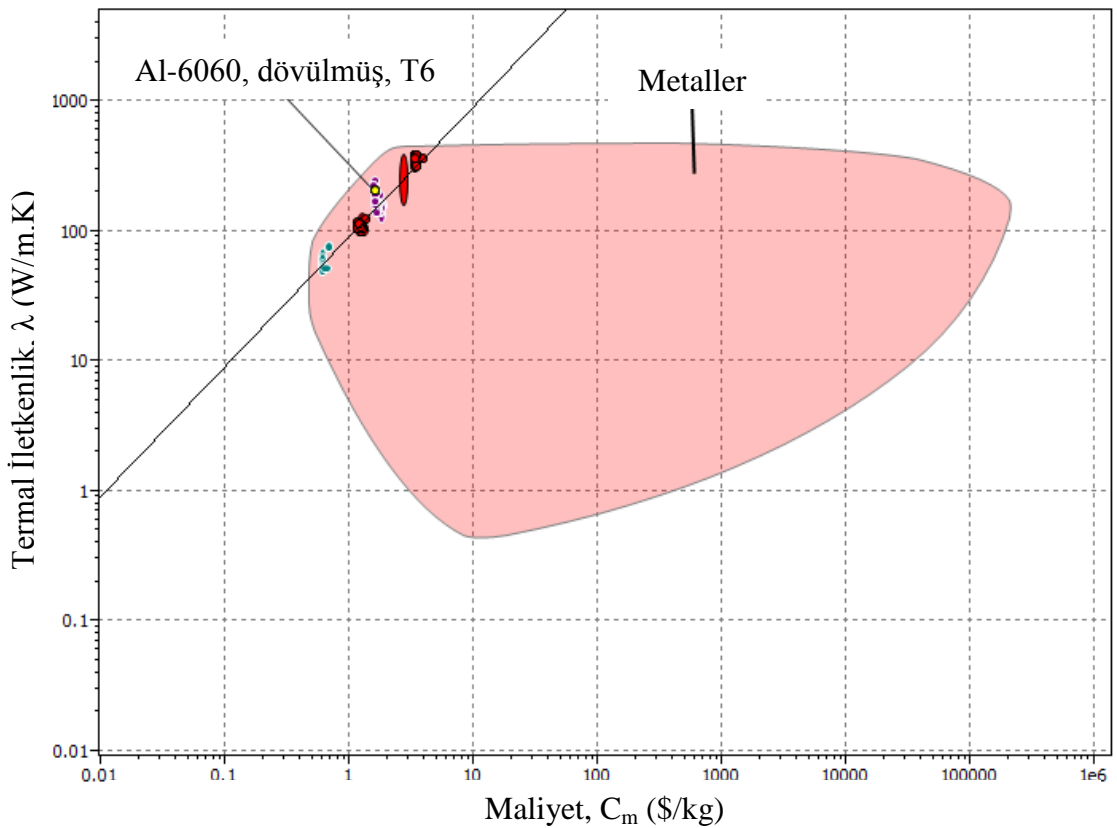
$M_2$  indisi için oluşturulan grafik Şekil 5.5'de görülmektedir. Grafikte doğrunun üzerindeki malzemeler arasından seçim yapılmıştır.



Şekil 5.5: Kırılma tokluğu – termal iletkenlik grafiği

$M_2$  indisi sadece kırılma tokluğunu barındırmaktadır. Sadece kırılma tokluğuyla oluşturulan grafik görsel açıdan malzeme seçimi için yetersiz kalacağından diğer eksene termal iletkenlik eklenmiştir. Grafik üzerinde malzeme indisi çizilirken termal iletkenlik dikkate alınmamıştır, sadece kırılma tokluğuna göre çizilmiştir ve üzerinde kalan malzemeler arasında malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.  $M_2$  indisi radyatörlerde kullanılan Al-6061 malzemesi referans alınarak çizilmiştir. Seçilecek malzemenin bu malzemedan daha iyi özelliklere sahip olması istenmektedir.

Türetilen son malzeme indisinde ( $M_3$ ) yer alan termal iletkenlik ve maliyet grafik üzerinde Şekil 5.6'da gösterilmiştir.  $M_2$  indisi gibi  $M_3$  indisi de Al-6061 referans alınarak çizilmiştir ve doğrunun üzerindeki malzemelerden seçim gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 5.6:** Termal iletkenlik – maliyet grafiği

Oluşturulan üç grafikte doğruların üzerinde kalan malzemeler ile Tablo 5.4 oluşturulmuştur. Bir grafikte uygun bulunan malzeme diğer grafikte uygun bulunamayabilir. Tablo 5.4'de yer alan malzemeler üç grafikte de doğrunun

üzerindedir. CES EduPack yardımıyla çizilen grafiklerde, doğrunun üzerinde yer almayan malzeme diğer grafikte de yer almaz. Bu yönüyle program tasarımcının işini kolaylaştırmaktadır.

**Tablo 5.4:** Aday malzemelerin malzeme indislerinin sıralanması

| Malzemeler                           | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Alüminyum, 1050A, dövülmüş, H9       | 3              | 4              | 1              |
| Alüminyum, 1200, dövülmüş, H4        | 5              | 4              | 2              |
| <b>Alüminyum, 6060, dövülmüş, T6</b> | <b>1</b>       | <b>2</b>       | <b>3</b>       |
| Alüminyum, 6063, dövülmüş, T6        | 2              | 3              | 4              |
| Alüminyum, 5005, dövülmüş, H4        | 4              | 4              | 4              |
| Alüminyum, 2024, dövülmüş, T0        | 6              | 1              | 5              |

Aday malzemelerin hepsi korozyona karşı oldukça dirençlidir. Dikkat edilmesi gereken bir diğer konu malzemelerin şekillenebilirliğidir. 6000 serisi alüminyum alaşımları diğer alaşımlara göre bu konuda daha iyidir. O sebeple Al-6060 ve Al-6063 alaşımları arasından seçim yapılır. Al-6060'ın ekstrüzyon ile işlenebilirliği, termal iletkenliği Al-6063'e göre daha yüksek, maliyeti de daha düşüktür. Bu sebeplerle Al-6060 alaşımı, motosiklet radyatörü için uygun malzeme olarak seçilmiştir.

Seçilen malzeme ile yapılan motosiklet radyatörleri daha dayanıklı ve az maliyete sahip olduğu gibi, daha düşük ağırlığa ve yüksek termal iletkenliğe sahip olacaktır.

## 5.2 Mikroçip Soğutucuları İçin Malzeme Seçimi

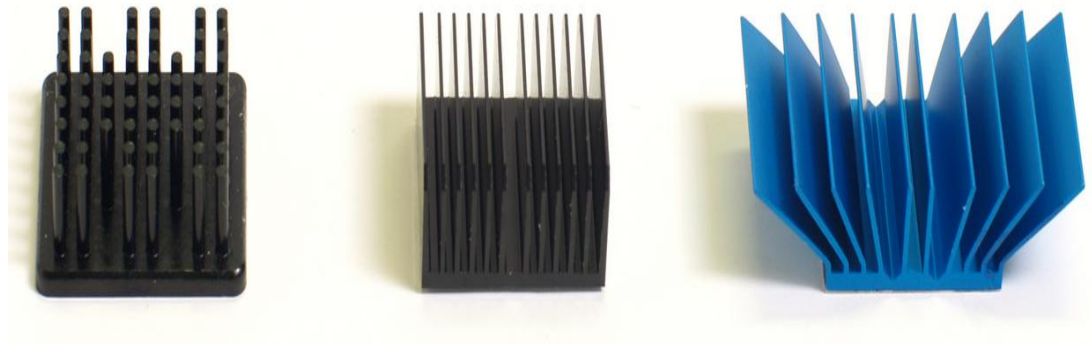
Mikroçipler ince bir ya da birkaç yüzey üzerine yerleştirilmiş, yarı iletken malzemedir (genellikle silikon temelli) üretilen elektronik devredir. Mikroçip içerisinden geçirilen elektrik akımıyla yapılan işlemler yüzde yüz verimliliğe sahip değildir. Yani mikroçip içerisinde elektrik enerjisinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir.

Isı enerjisi mikroçipten uzaklaştırılmazsa mikroçipin sıcaklığı artar ve bu da işlem hızının düşmesine neden olur ya da düşük erime sıcaklığına sahip olan silikonun (yaklaşık 150 °C) erimesine neden olarak mikroçipin kullanılamaz hale gelmesine neden olur. Yüksek sıcaklığın yarattığı sorunlardan korunmak için;

- Daha az işlem yapılarak mikroçipin sıcaklığının artmaması sağlanabilir,
- Yüksek erime sıcaklığına sahip malzemeler kullanılabilir,
- Oluşan ısı enerjisi mikroçipten ve onun bulunduğu alandan uzaklaştırılarak sıcaklığın artmaması sağlanabilir.

Bu çalışmada son madde ele alınmıştır. Mikroçipte oluşan ısıyı uzaklaştırabilmek için soğutucu (heat sink) dediğimiz ısı değiştiriciler kullanılmaktadır. Soğutucular ısıyı oluştuğu ortamdan hava, su veya soğutucu akışkan ile alıp başka bir ortama aktararak mikroçipin ısınmasını engeller. Soğutucular olmadan günümüzdeki bilgisayarlar çalışmazdı.

Isı enerjisinin akışkana aktarılması için soğutucuyla temas ettiği alanın artırılması gerekmektedir. Alanı artırmak için soğutucu üzerine kanatçıklar eklenmektedir. Kanatçıklar farklı şekillerde tasarlanarak farklı tipte soğutucular elde edilmektedir. Şekil 5.7’de görüldüğü üzere silindirik kanatlı, düz kanatlı ve birbirinden ayrılmış şekilde düz kanatlı soğutucular tasarlanmaktadır. Her bir soğutucunun kendine göre avantajı vardır.



**Şekil 5.7:** Farklı kanatçıklara sahip mikroçip soğutucuları (Url-6)

Kanatçıkların tasarımı kadar soğutucularda kullanılan malzeme de önemlidir. Farklı malzemelerle tasarlanan soğutucular ile daha yüksek ısı transferi sağlanabilir. Yapılan çalışmada soğutucuların ısı transferini artırmak için doğru malzemenin seçimi amaçlanmıştır. Ancak bunu yaparken bazı kriterlere dikkat etmek gerekir.

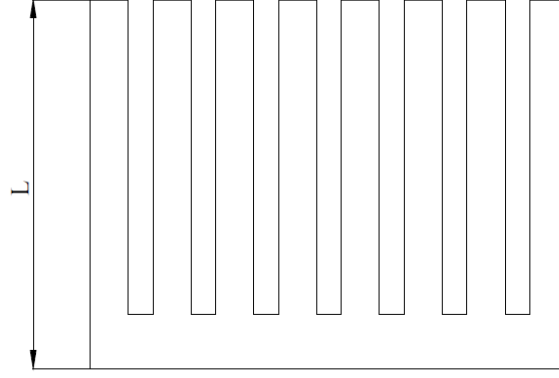
Soğutucu aldığı ısı enerjisi ile uzamaya maruz kalabilir. Ancak günümüzde bilgisayarlar kompakt olarak tasarlanmaktadır ve bilgisayar kasalarının içerisindeki ekipmanların küçük olması gerekmektedir. Boyutları belirli olan soğutucu, kasa içerisinde bunu korumalıdır. Yani termal uzaması küçük olmalıdır.

Dikkat edilmesi gereken en önemli kriterlerden bir diğeri de iletkenliktir. Eğer soğutucu için seçilen malzeme elektriği ileten bir malzemeyse bu istenmeyen sorunların çıkmasına neden olabilir. Bu sebeple yüksek özdirenç sahip malzemenin seçilmesi gereklidir. Mikroçip soğutucuları için gereken kriterler Tablo 5.5’de görülmektedir.

**Tablo 5.5:** Mikroçip soğutucuları için belirlenen sınırlamalar, amaçlar ve serbest değişkenler

|                            |                                                                                                        |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Mikroçip soğutucuları</li></ul>                                |
| <b>Sınırlamalar</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Termal uzama</li><li>• Yüksek özdirenç</li></ul>               |
| <b>Amaçlar</b>             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Isı iletimini artırmak</li></ul>                               |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Malzeme seçimi</li><li>• Isı değiştiricilerin seçimi</li></ul> |

Her sınırlamadan da ayrı ayrı malzeme indisi türetmek mümkündür. Bir önceki çalışmadaki gibi malzeme indislerini bularak grafik üzerinde göstermekle malzeme seçimi bu çalışmada işe yaramayabilir. Çünkü özdirenç ve termal uzama, amacı farklı oranlarda etkilemektedir. Bu durumda dördüncü bölümde anlatıldığı gibi farklı bir yol izlenmelidir. Şekil 5.8’de mikroçip soğutucusunun kesiti görülmektedir.



**Şekil 5.8:** Mikroçip soğutucusunun kesiti

Termal iletim, denklem (5.15)'de ifade edildiği gibidir (ısı transferi hesaplamalarında kanatçıkların etkisi ihmal edilmiştir).

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{L} \quad (5.15)$$

Denklemde görülen “L” ve “ $\Delta T$ ” öz direnç, denklem (5.16) ve termal uzama, denklem (5.17)'de de bulunmaktadır.

$$p_e = \frac{A}{L} \cdot R \quad (5.16)$$

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (5.17)$$

Denklem (5.16)'da “L” çekilerek termal iletim formülüne yazılır ve denklem (5.18) elde edilir.

$$q_1 = \frac{\lambda \cdot p_e \cdot \Delta T}{A \cdot R} \quad (5.18)$$

Denklem (5.18)'de malzeme karakteristik özelliği olarak “ $\lambda$ ” ve “ $p_e$ ” bulunmaktadır. Bunlar denklemden çekilerek ilk malzeme indisi oluşturulur (denklem 5.19).

$$M_1 = \lambda \cdot p_e \quad (5.19)$$



Termal uzama denkleminde “ $\Delta T$ ” yalnız bırakılarak denklem (5.15)’de yerine yazılır ve denklem (5.20) elde edilir.

$$q_2 = \frac{\lambda \cdot \Delta L}{L \cdot \alpha} \quad (5.20)$$

Denklem (5.20)’de bulunan malzeme karakteristik özellikleriyle de  $M_2$  indisi oluşturulur (denklem 5.21).

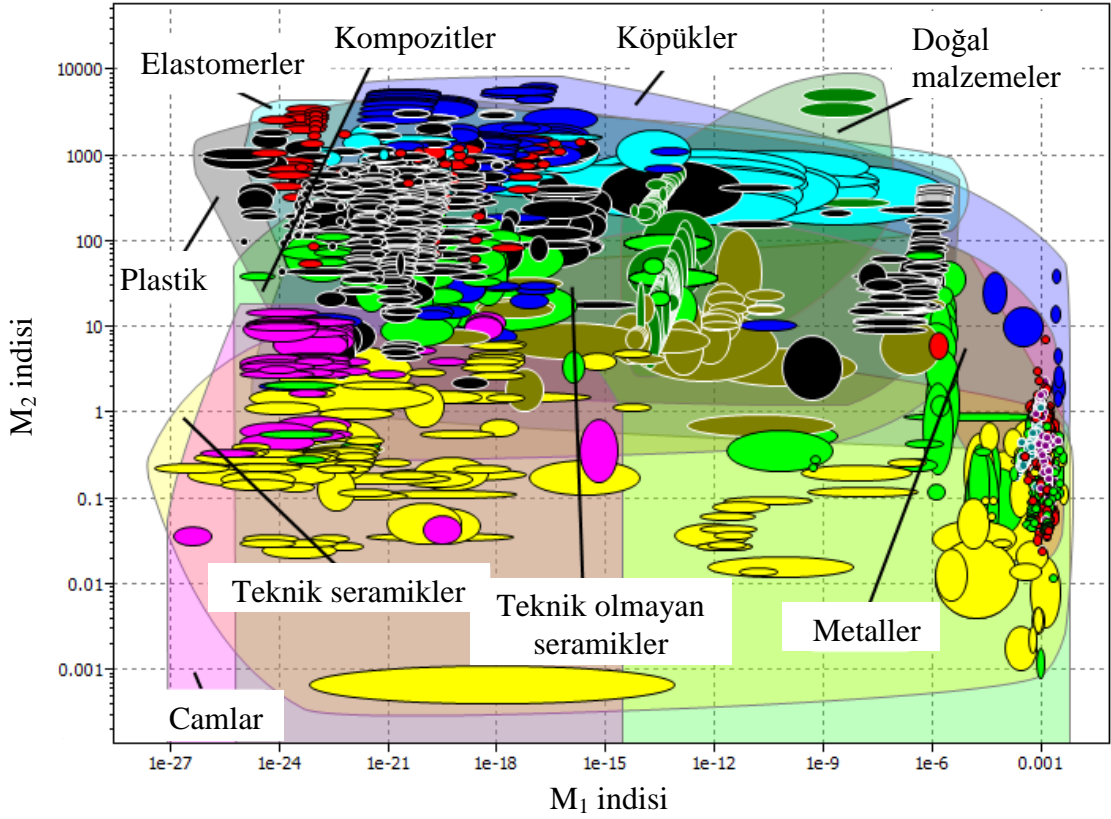
$$M_2 = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (5.21)$$

Her iki malzeme indisi de oluşturulurken pay ve paydanın yeri değiştirilmiştir. Çünkü grafikte orijine en yakın malzemeyi seçebilmek için malzeme indislerinin her ikisinin de azalması gerekmektedir ve bu şekilleriyle indislerin azalmasıyla en iyi malzeme seçimi gerçekleştirilebilir. Yapılan bütün işlemler Tablo 5.6’da özet olarak verilmiştir.

**Tablo 5.6:** Malzeme indislerinin türetilmesi

| Amaç                                                              | Sınırlamalar                                         | Performans Denklemi                                        | Malzeme İndisleri                   |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Termal iletimi artırmak<br>$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{L}$ | Özdirenç<br>$p_e = \frac{A}{L} \cdot R$              | $q_1 = \frac{\lambda \cdot p_e \cdot \Delta T}{A \cdot R}$ | $M_1 = \frac{1}{\lambda \cdot p_e}$ |
|                                                                   | Termal uzama<br>$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T}$ | $q_2 = \frac{\lambda \cdot \Delta L}{L \cdot \alpha}$      | $M_2 = \frac{\alpha}{\lambda}$      |

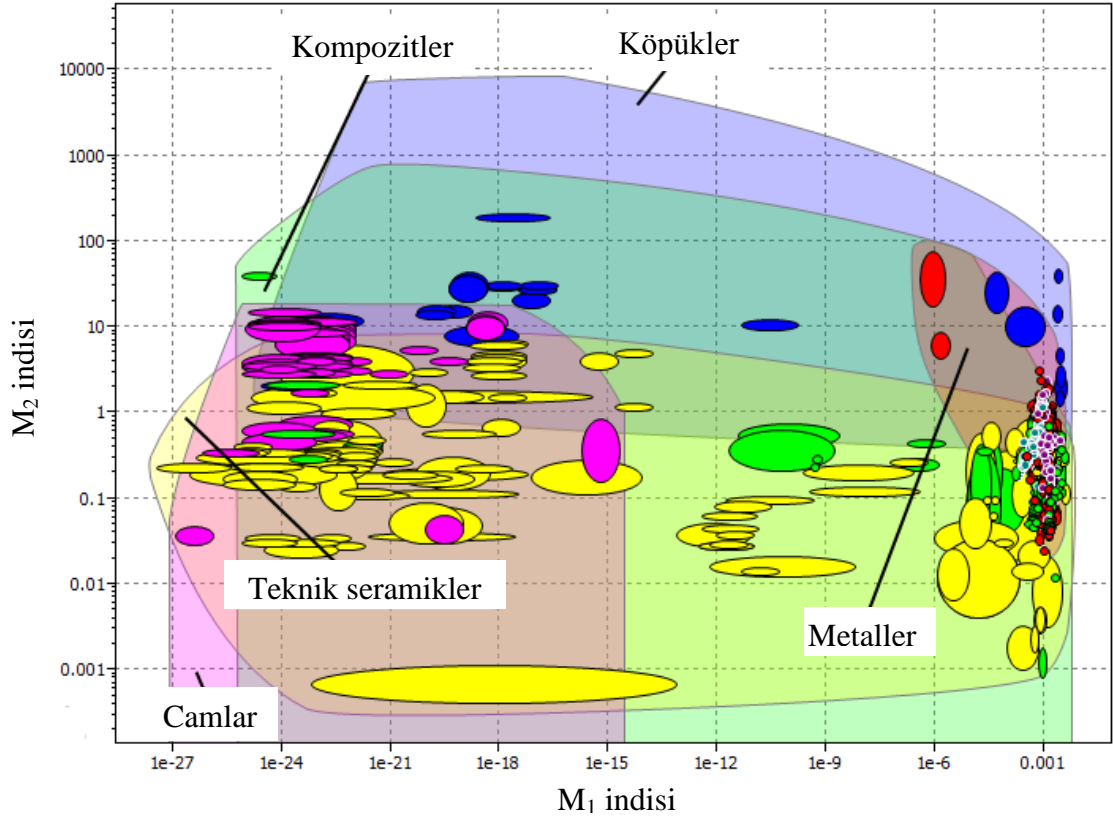
Malzeme indisleri belirlendikten sonra malzeme seçimini yapabileceğimiz bir grafik oluşturulmuştur. Grafikte türetilen malzeme indisleri bu grafiğin eksenlerinde yer almıştır (Şekil 5.9).



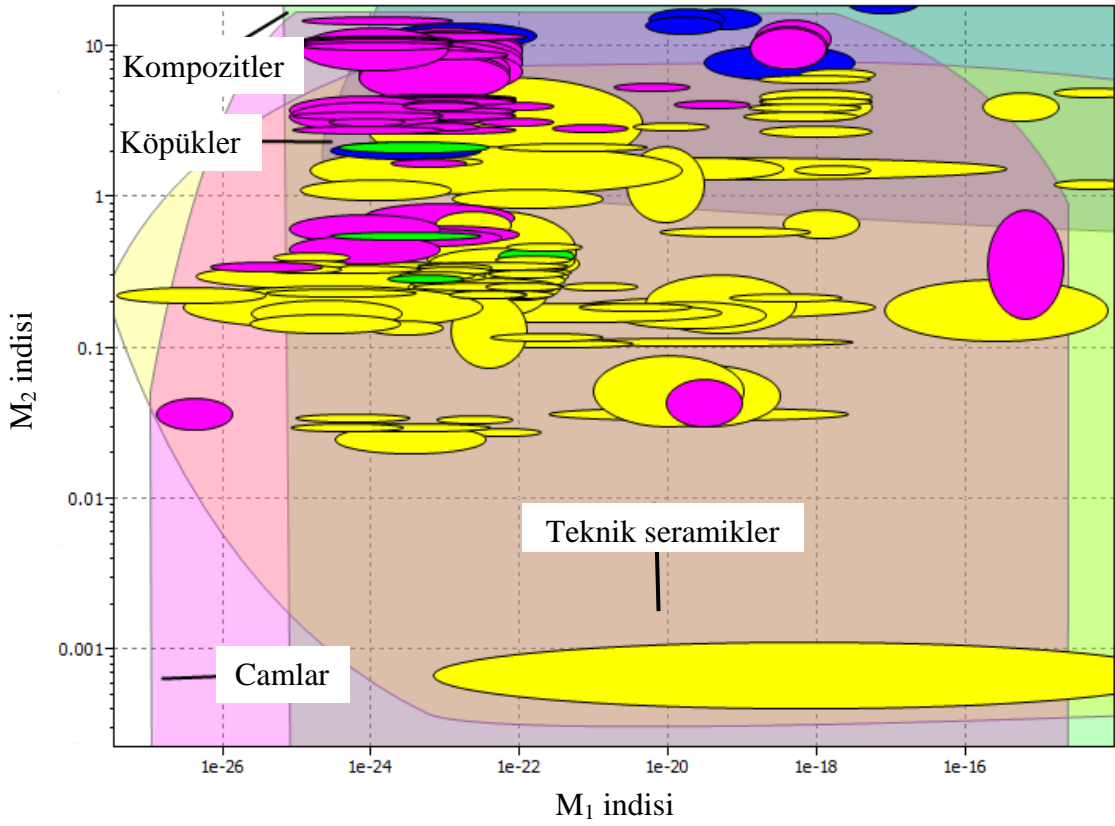
**Şekil 5.9:**  $M_1 - M_2$  malzeme grafiği

Şekil 5.9'daki grafikte çok fazla malzeme olduğundan dolayı ve malzeme seçiminin daha anlaşılır olabilmesi için plastik ve elastomer gibi uygun bulunmayan malzemeler grafikten çıkarılmıştır. Böylece daha sade ve anlaşılır olan Şekil 5.10 elde edilmiş olur.

Seçilmesi amaçlanan malzeme grafikte orijine en yakın olan malzemedir ancak metaller grafiğin en sağında bulunması sonucu seçilmeleri zordur. Bu sebeple malzeme seçimi teknik seramikler, kompozitler, camlar ve köpükler arasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10'daki grafikte metallerin ve düşük indis değerlerine sahip malzemelerin de çıkarılması ile aday malzemelerin bulunduğu küme daraltılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.10: Uygun bulunmayan malzemelerin çıkarıldığı  $M_1$ -  $M_2$  grafiği



Şekil 5.11: Yapılan elemeler sonucu geriye kalan malzemelerin  $M_1$  –  $M_2$  grafiğinde gösterimi

Aday malzemeler arasından seçim yaparken orijine en yakın malzeme seçilir ancak grafikte orijine yakın birden fazla malzeme vardır. Bunlardan birini seçmek için performans denklemleri birbirlerine eşitlenerek eşleşme sabiti elde edilmiştir (denklem 5.22).

$$q_1 = q_2 \quad (5.22)$$

$$\frac{\lambda \cdot p_e \cdot \Delta T}{A \cdot R} = \frac{\lambda \cdot \Delta L}{L \cdot \alpha} \quad (5.23)$$

Denklem (5.23)'de  $M_1$  ve  $M_2$  indisleri yerlerine yazılarak denklem (5.24) elde edilmiştir.

$$\frac{\Delta T}{M_1 \cdot A \cdot R} = \frac{\Delta L}{M_2 \cdot L} \quad (5.24)$$

Denklem (5.24)'de yapılan düzenlemeler sonrası denklem (5.25) elde edilmiştir.

$$\frac{L}{A \cdot R} \cdot M_2 = M_1 \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (5.25)$$

Denklem (5.25)'de malzeme indislerinin dışında yapılan düzenleme ile denklem (5.26) elde edilmiştir.

$$M_2 = M_1 \cdot \alpha \cdot p_e \quad (5.26)$$

Denklem (5.26)'da “ $\alpha$ ” ve “ $p_e$ ” simgeleri eşleşme sabitini oluşturur (denklem 5.27).

$$C_c = \alpha \cdot p_e \quad (5.27)$$

Denklem (5.26)'nın logaritmasının alınması ile eşleşme sabiti grafik üzerinde gösterilmeye hazır hale getirilmiştir (denklem 5.28).

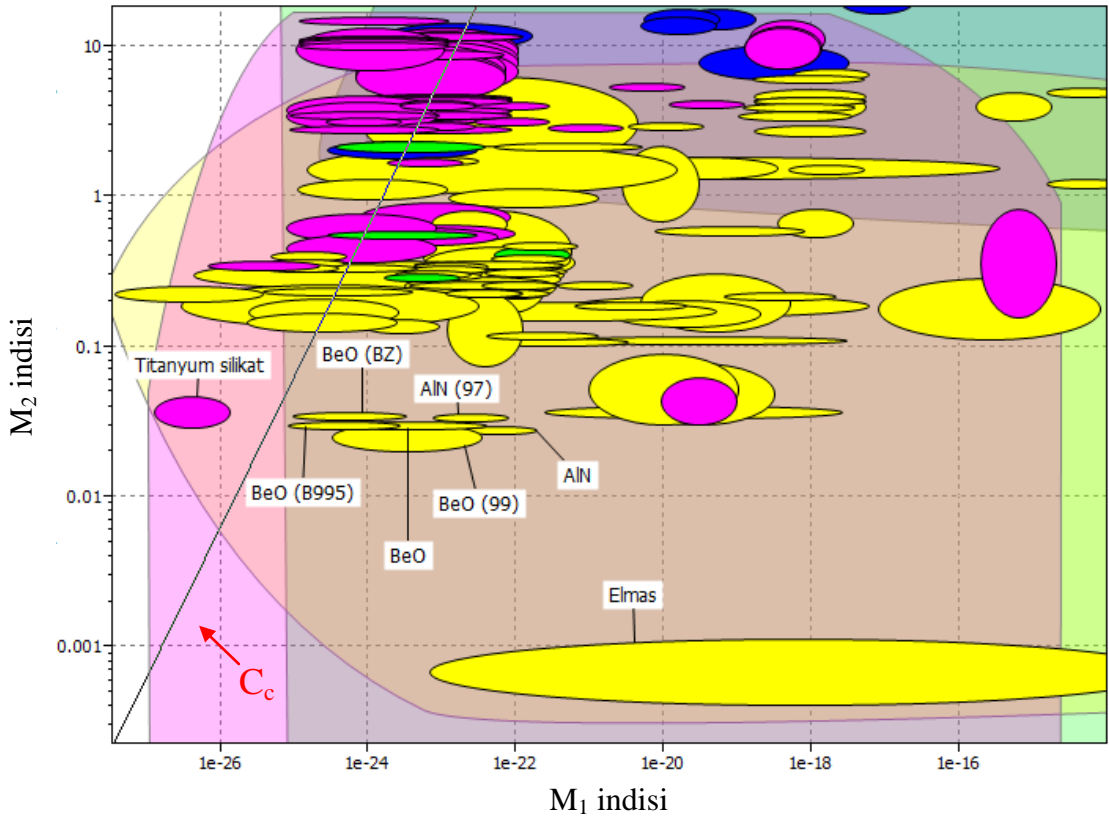
$$\log M_2 = \log M_1 + \log(\alpha \cdot p_e) \quad (5.28)$$

Denklem (5.28)'den anlaşıldığı üzere grafik üzerine çizilecek doğrunun eğimi birdir. Doğrunun nerede olması gerektiği de belirlenen sınırlamaların değişmesiyle

değişmektedir. Değer büyüdükçe grafikte çizilen doğru  $M_2$  indisine yaklaşmaktadır ancak eğimini her zaman korumaktadır.

Şekil 5.11'e eşleşme sabitinin çizilmesiyle Şekil 5.12 elde edilmiştir. Eşleşme sabitinin değeri bir olarak alınmıştır böylece iki indis de aynı önemde, birbirlerine karşı üstünlüğünün olmadığı kabul edilmiştir. Doğrunun eğimi de bahsedildiği gibi birdir.

Şekil 5.12'de orijine en yakın malzemelerden doğru üzerinde herhangi bir malzeme yoktur. Bu sebeple doğruya ve orijine en yakın malzemeler aday olarak ele alınmış ve incelenmiştir (Tablo 5.7).



Şekil 5.12: Eşleşme sabitinin  $M_1 - M_2$  grafiğinde gösterimi

**Tablo 5.7:** Mikroçip soğutucuları için aday malzemelerin değerlendirilmesi

| <b>Aday Malzeme</b> | <b>Yorum</b>                                                                                                         |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Titanyum silikat    | Özdirenci en yüksek malzemelerden biridir ancak termal iletkenliği çok düşüktür.                                     |
| BeO (B995)          | Grafik üzerinde görünen diğer berilyum oksitlere göre daha düşük uzamaya ve daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. |
| AlN                 | Diğer Al oksitlere ve alaşımlarına göre çok daha iyi indis değerlerine sahiptir.                                     |
| Elmas               | Mühendislik malzemeleri arasında en iyi termal iletkenliğe sahip malzemedir. Ancak maliyeti çok yüksektir.           |

Şekil 5.12'deki grafikten de anlaşılacağı üzere BeO (B995) eşleşme sabiti doğrusuna ve orijine en yakın olan malzemedir. Bunun sonucunda mikroçip soğutucuları için en uygun malzeme BeO (B995) seçilmiştir.

Seçilen bu malzeme ile yapılan mikroçip soğutucuları elektriğe karşı daha dirençli, düşük termal uzamaya ve daha yüksek termal iletkenliğe sahip olacaktır.

### **5.3 Atık Isı Kazanları Kanatçıklı Borularının Malzemesinin Seçilmesi**

Atık ısı kazanları sıcak egzoz gazından ısı enerjisini alıp suya aktararak buhar elde edilmesini sağlar. Elde edilen yüksek sıcaklıktaki ve basınçtaki buharın buhar türbininden geçmesiyle de elektrik üretilir.

Atık ısı kazanları genel olarak enerji santrallerinde kullanılmaktadır (Şekil 5.13). Çünkü sıvı veya gaz halindeki fosil yakıtın yakılıp elektrik enerjisi üretilmesinden sonra geriye kalan yüksek sıcaklıktaki egzoz gazı havaya atılmaktadır. Atık ısı kazanlarının enerji santrallerinde kullanılmasıyla verimlilik önemli ölçüde artırılır.

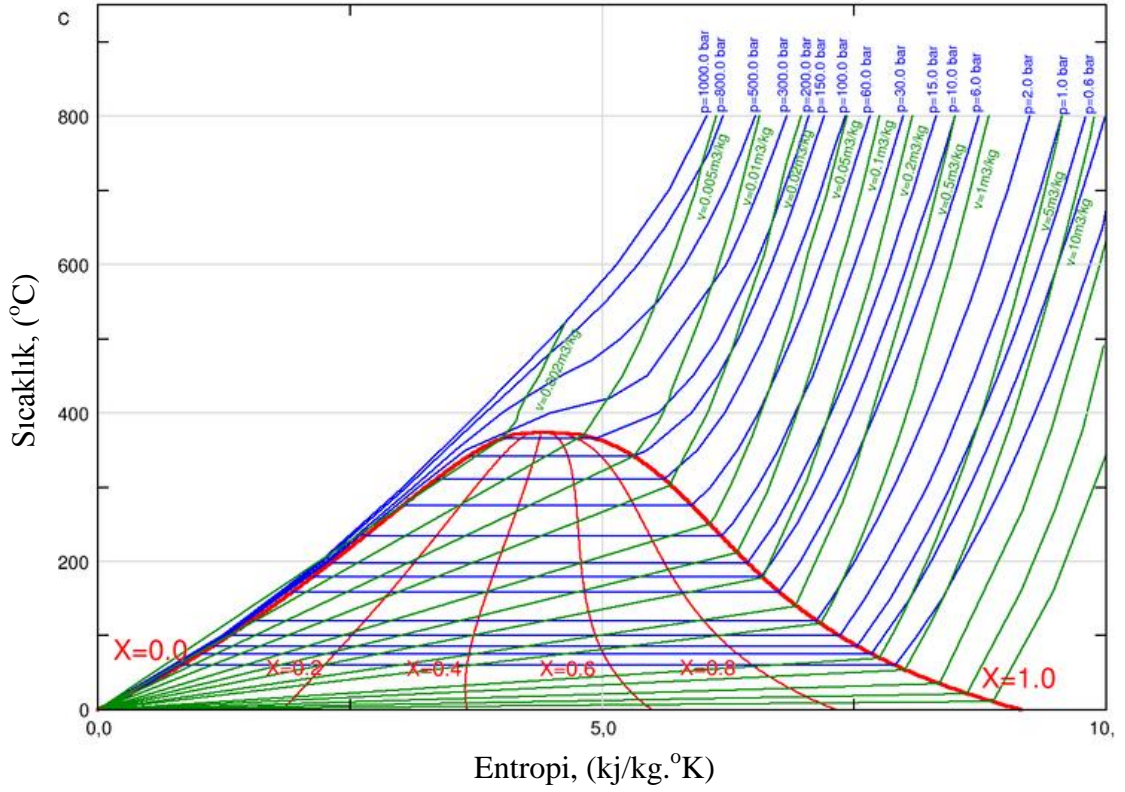
Kazan içerisinde kanatçıklı borular kullanılmaktadır. Böylece sıcak egzoz gazından ısı enerjisi boru içerisindeki akışkana daha hızlı transfer edilir ve egzoz gazının akışı devam ettirilmiş olur.



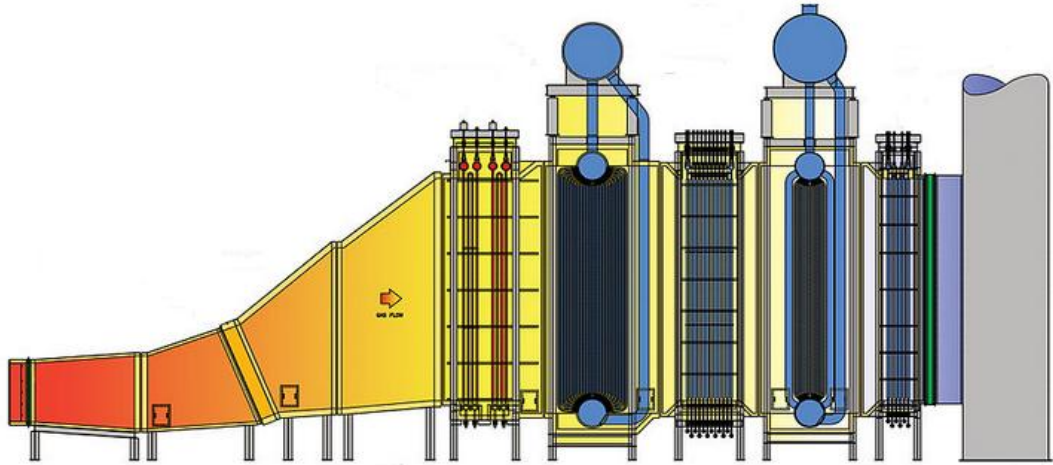
**Şekil 5.13:** Atık ısı kazanı (Url-7)

Atık ısı kazanlarının verimliliğini artırmak için akışkan basıncının mümkün olduğunca düşük olması gerekir. Düşük basınçlarda egzoz gazından akışkana geçen ısı enerjisi daha yüksek olur. Sıcaklık-entropi diyagramına da bakılacak olursa bu açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 5.14). Diyagramda sağa doğru gidildikçe entropi artmaktadır, basınç da azalmaktadır.

Ancak buhar türbininin verimliliğini artırmak için de akışkan basıncının mümkün olduğunca yüksek olması gerekmektedir. Bu sebeple kademeli atık ısı kazanları tasarlanmıştır. Akışkan basıncı her kademede farklıdır. Buhar fazındaki akışkan, kazanı yüksek basınçlarda terk ederek buhar türbinine ulaşır. Bu sebeple akışkanı taşıyan boruların yüksek basınçlara dayanıklı olması gerekmektedir. Egzoz gazının sıcaklığından en iyi şekilde faydalanmak için daha düşük basınçlarda da buhar üretilir. Şekil 5.15’de iki kademeli atık ısı kazanı görülmektedir.



Şekil 5.14: Sıcaklık-entropi diyagramı (Url-8)



Şekil 5.15: İki kademeli atık ısı kazanı (Url-7)

Termal genişmeden ötürü kazan içerisindeki boruların boyları uzar. Kompakt bir tasarımı gerçekleştirebilmek için de kazanda uzamaya müsaade edecek boşluğun mümkün olduğu kadar az olması istenir. Eğer bu boşluk gerektiğinden az verilirse borular genişerek kazanı çevreleyen kaplamaya, boru desteklerine ya da



kendisine zarar verebilir. Bu sebeple boru malzemesi termal uzama değeri en düşük olan malzemeler arasından seçilmelidir.

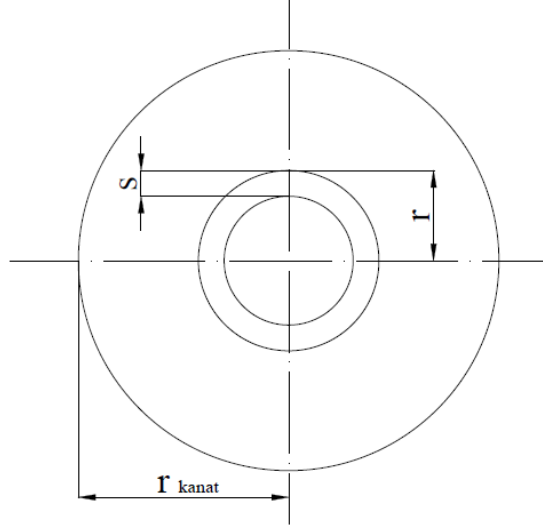
Egzoz gazı çoğunlukla kazan borularına zarar verecek maddeleri içerisinde bulundurur. Aynı şekilde boru içerisindeki akışkan da bu maddeleri içerebilir. Bu sebeplerden ötürü boru malzemesinin korozyona karşı dirençli olması gerekir.

Atık ısı kazanlarında yukarıda belirtilen konular büyük önem arz etmektedir. Bu konulara dikkat edilmeden malzeme seçimi yapılırsa borular zarar görebilir, hatta patlayarak yüksek sıcaklık ve basınçtaki buharın kontrolsüz bir şekilde dışarı salınmasına sebep olur. Bunun sonucunda kazanın bulunduğu tesiste maddi zararın yanında can kaybı da yaşanabilir.

Yapılan çalışmada, sınırlamaları dikkate alarak kazan borularında termal iletimi artırmak, ağırlığı ve maliyeti de düşürmek için en uygun malzemenin seçimi amaçlanmıştır. Atık ısı kazanı kanatçıklı borularının malzemesi için gerekli olan kriterler Tablo 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.16’da kanatçıklı borunun kesiti görülmektedir.

**Tablo 5.8:** Atık ısı kazanı kanatçıklı boruları için belirlenen sınırlamalar, amaçlar ve serbest değişkenler

|                            |                                                                                                                                  |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fonksiyon</b>           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Atık ısı kazanı kanatçıklı boruları</li></ul>                                            |
| <b>Sınırlamalar</b>        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Yüksek çalışma basıncı</li><li>• Termal uzama</li><li>• Korozyona karşı direnç</li></ul> |
| <b>Amaçlar</b>             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Isı iletimini artırmak</li><li>• Ağırlığı azaltmak</li><li>• Maliyeti azaltmak</li></ul> |
| <b>Serbest Değişkenler</b> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Malzeme seçimi</li></ul>                                                                 |



**Şekil 5.16:** Kanatçıklı borunun kesiti

Termal iletim, denklem (5.29); termal uzama, denklem (5.30)'da ifade edildiği gibidir (ısı transferi hesaplamalarında kanatçıkların etkisi ihmal edilmiştir).

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{s} \quad (5.29)$$

$$\alpha = \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (5.30)$$

Termal uzama denklemindeki “ $\Delta T$ ” çekilerek termal iletim denklemine yazılır ve denklem (5.31) elde edilir.

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta L}{s \cdot \alpha} \quad (5.31)$$

Denklem (5.31)'de malzemelerin karakteristik özellikleri çekilerek malzeme indisi oluşturulmuştur (Denklem 5.32).

$$M_1 = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (5.32)$$

Boruların yüksek çalışma basınçlarına dayanabilmesi için boru dış yüzeyi gerilmesinin malzemenin akma sınırından düşük olması gerekmektedir (denklem 5.33).

$$R_e \geq \sigma = \frac{P \cdot R}{2 \cdot s} \quad (5.33)$$

Denklemde görülen et kalınlığı aynı zamanda bir diğer amaç olan ağırlığı da etkilemektedir. Tek bir borunun ağırlığı denklem (5.34)'de verilmiştir (kanatçıklar akışkan basıncı altında kalmadığı için ihmal edilmiştir).

$$m = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot s \cdot L \cdot \rho \quad (5.34)$$

Denklem (5.33)'deki et kalınlığı çekilir ve ağırlık denklemine yazılırsa denklem (5.35) elde edilir.

$$m = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{P \cdot R}{2 \cdot R_e} \cdot L \cdot \rho \quad (5.35)$$

Denklem (5.35)'den de malzeme karakteristik özellikleri olanlar seçilerek ikinci malzeme indisi oluşturulmuştur (denklem 5.36).

$$M_2 = \frac{\rho}{R_e} \quad (5.36)$$

Kanatçıklı borularda belirlenen üçüncü amaç da maliyeti azaltmaktır. Bu sebeple üçüncü malzeme indisi de maliyet olarak belirlenmiştir (denklem 5.37).

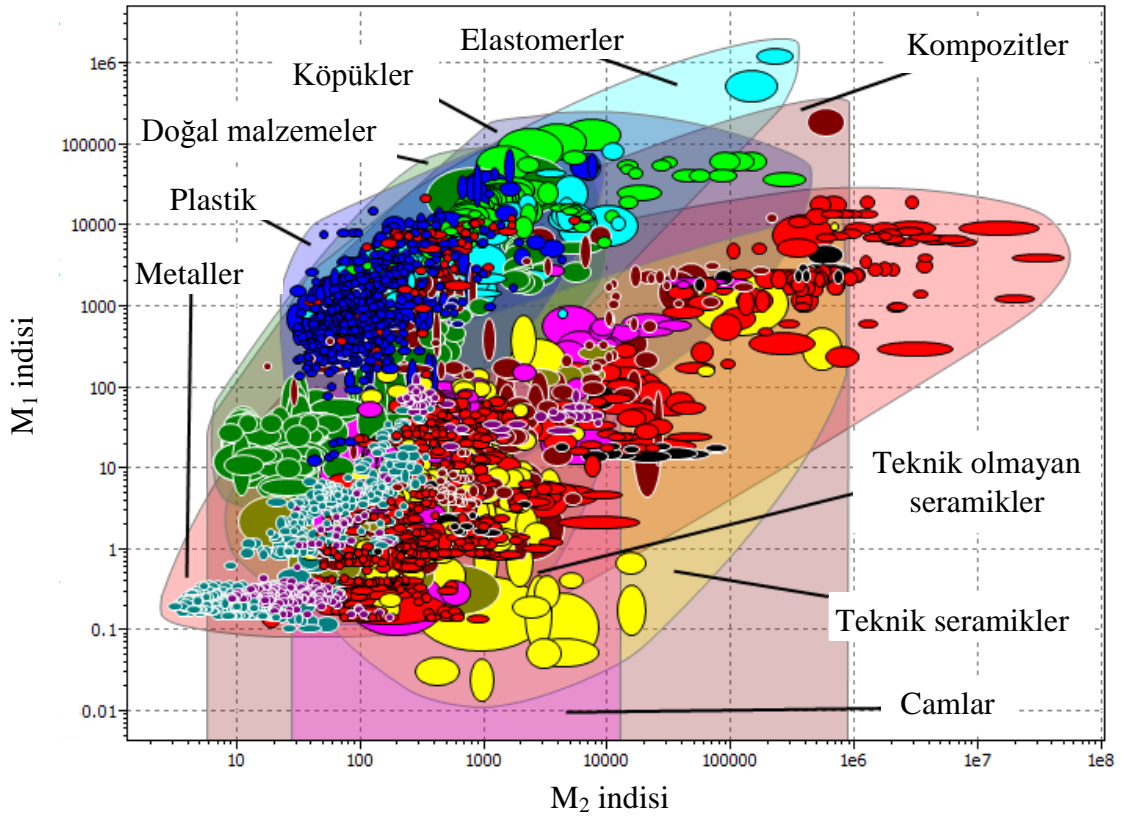
$$M_3 = C_m \quad (5.37)$$

Kullanılan CES EduPack programında üç malzeme indisi ile üç boyutlu grafik oluşturmak mümkün değildir. Bu sebeple oluşturulan son malzeme indisi diğer iki malzeme indisi ile birleştirilmiştir. Malzeme indisleri son haliyle denklem (5.38) ve (5.39)'da görülmektedir.

$$M_1 = \frac{\alpha \cdot C_m}{\lambda} \quad (5.38)$$

$$M_2 = \frac{\rho \cdot C_m}{R_e} \quad (5.39)$$

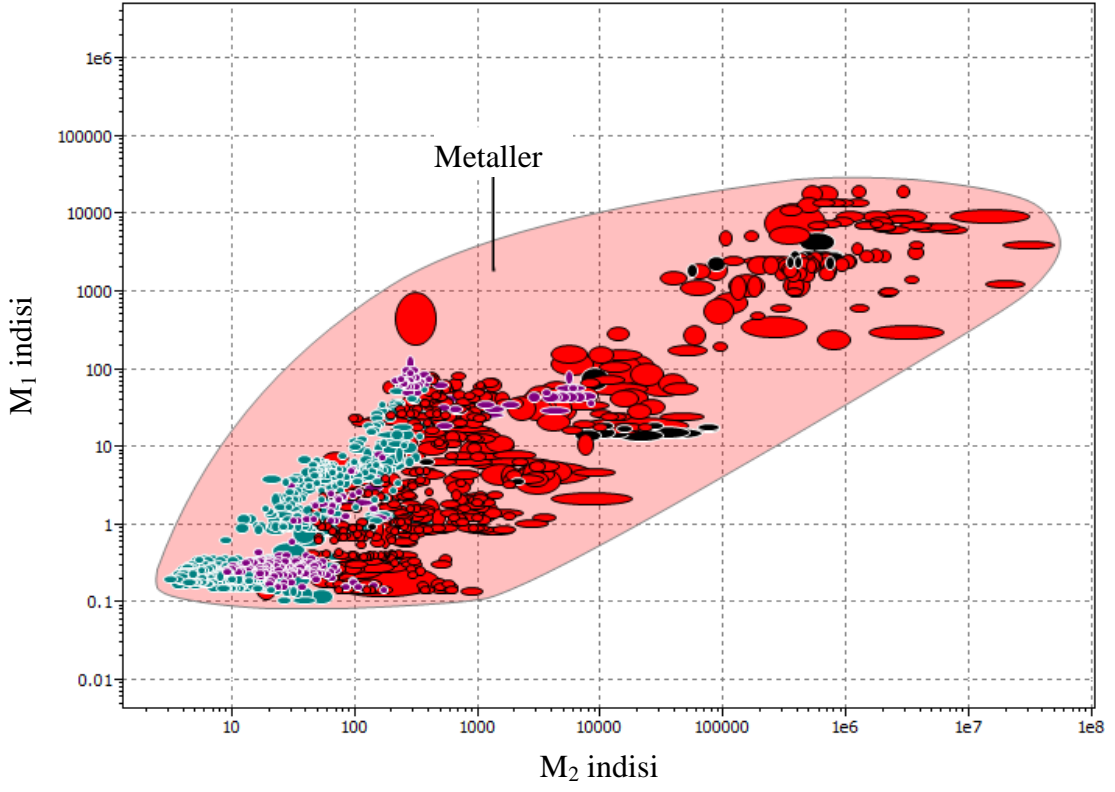
Malzeme indisleri oluşturulduktan sonra malzeme grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 5.17'de bütün malzemelerin yer aldığı grafik görülmektedir.



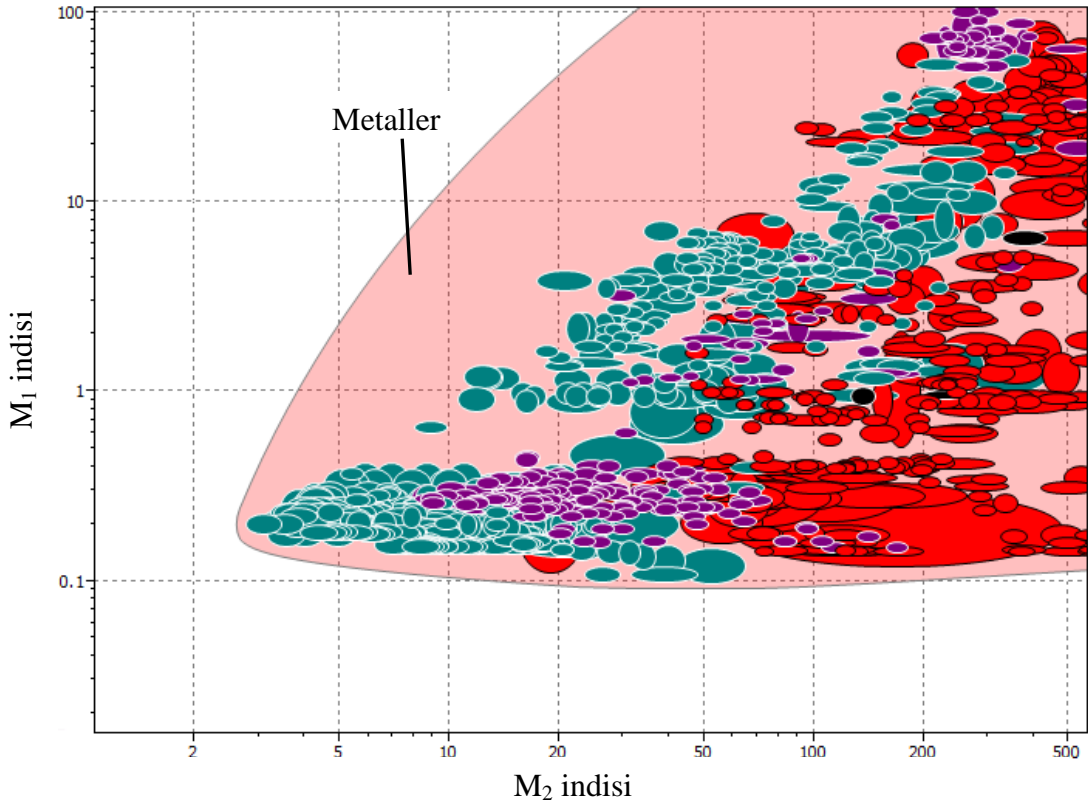
**Şekil 5.17:**  $M_1 - M_2$  malzeme grafiği

Oluşturulan bu grafikte orijine yakın olan malzemeler, yakın olmayan malzemelere göre daha üstün özelliklere sahiptir. Bu sebeple orijine yakın olan metaller haricindeki malzemeler grafikten çıkarılarak yeni grafik oluşturulmuştur (Şekil 5.18).

Orijine uzak olan metaller de Şekil 5.18'teki grafikten çıkarılarak Şekil 5.19'daki grafik oluşturulmuştur. Böylece aday malzemelerin sayısı azaltılmış, malzeme seçimi daha basit hale getirilmiş olur.



Şekil 5.18: Uygun bulunmayan malzemelerin çıkarıldığı M<sub>1</sub>- M<sub>2</sub> grafiği



Şekil 5.19: Yapılan elemeler sonucu geriye kalan malzemelerin M<sub>1</sub> – M<sub>2</sub> grafiğinde gösterimi

Malzeme indisleri oluşturulduktan ve malzeme grafikleri çizildikten sonra penaltı fonksiyonu oluşturulur (denklem 5.40). Penaltı fonksiyonu eşitliğinde yer alan performans parametreleri, oluşturulan iki malzeme indisidir.

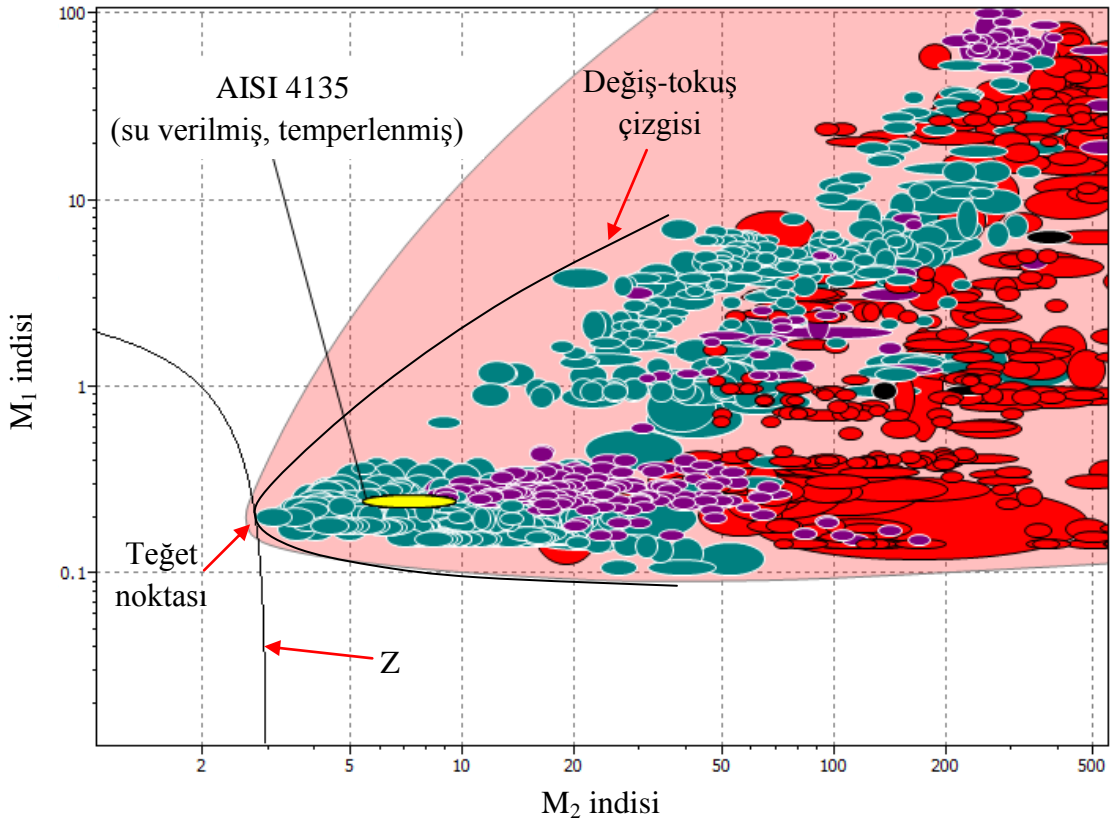
$$Z = \alpha_1 M_1 + \alpha_2 M_2 \quad (5.40)$$

Penaltı fonksiyonunu bir doğru şeklinde Şekil 5.16'daki grafik üzerine yerleştirmek için değeri ve açısının bulunması gereklidir. Değer küçüldükçe doğru orijine yaklaşmaktadır. Fonksiyonun değerini bulmaya şu aşamada gerek yoktur çünkü değerın olabildiği kadar küçük olması gerekmektedir.

Penaltı fonksiyonunun açısı ise değişim sabitlerinin oranıdır. Değişim sabitlerini belirlemek yerine hangi değerin daha büyük olduğuna karar verilerek, malzeme indislerinden hangisinin daha çok önem arz ettiği bulunabilir. Bu çalışmada iki malzeme indisi de aynı oranda değerlidir, birinin diğerine göre bir üstünlüğü bulunmamaktadır. Bu sebeple değişim sabitleri birbirine eşittir ve oranları 1'dir (denklem 5.41).

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1 \quad (5.41)$$

Malzeme grafiği üzerine çizilen penaltı fonksiyonun eğrisi, değiş-tokuş çizgisine teğet ve eğimi de 1 olacak şekilde çizilmiştir (Şekil 5.20). Değiş tokuş çizgisi malzemeleri çevreleyen bir egridir. Eğrinin içerisinde kalan malzemeler arasından seçim yapılır. Teğetin olduğu noktaya en yakın malzeme AISI 9255 karbon çeliğidir. Bu malzeme iki malzeme indisi için de en iyi değerlere sahiptir. Ancak daha detaylı araştırma yapılarak malzemenin kanatçıklı boru için uygun olup olmadığı belirlenmelidir.



**Şekil 5.20:**  $M_1$ - $M_2$  grafiğinde penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş eğrisinin gösterimi

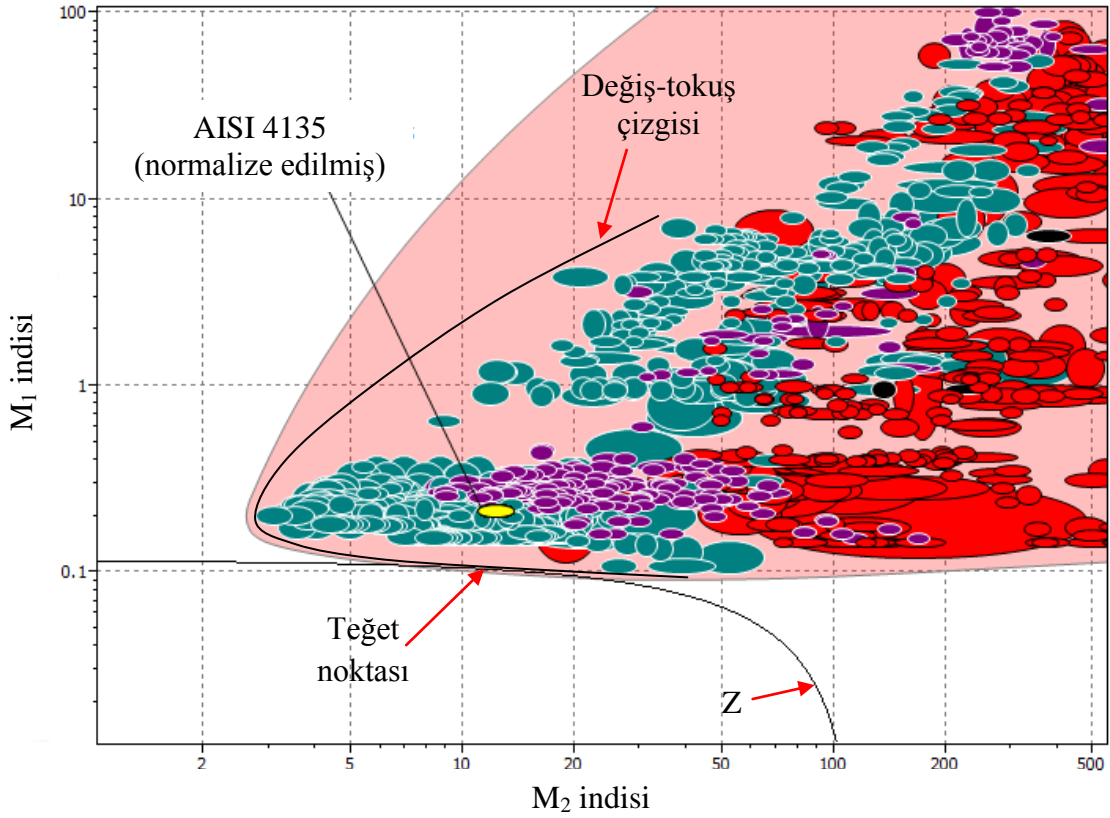
Yapılan literatür araştırmasıyla malzemelerin korozyona karşı direnç, maksimum servis sıcaklığı ve kırılma tokluğu araştırılmıştır. Tablo 5.9’da bazı malzemelerin özellikleri karşılaştırılmıştır. Böylece atık ısı kazanlarında bulunan kanatçıklı borular için en uygun malzeme olarak düşük alaşımlı, su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4135 çeliği seçilmiştir.

**Tablo 5.9:** Farklı çelik alaşımların özelliklerinin karşılaştırılması

| Malzeme          | Korozyona karşı direnç | Maksimum servis sıcaklığı (°C) | Kırılma tokluğu (MPa $\sqrt{m}$ ) |
|------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| AISI 9255        | Uygun                  | 165-195                        | 14-35                             |
| AISI 4042        | Uygun                  | 165-195                        | 24-47                             |
| AISI 1141        | Uygun                  | 275-305                        | 16-33                             |
| AISI 5150        | Uygun                  | 385-415                        | 32-51                             |
| <b>AISI 4135</b> | <b>Uygun</b>           | <b>470-524</b>                 | <b>14-210</b>                     |

Yukarıda yapılan çalışmada iki malzeme indisi de aynı oranda önemlidir. İndislerden biri, diğerine göre daha önemli de olabilir. Örneğin denklem (5.42)'den anlaşılacağı üzere birinci değişim sabiti, ikinci değişim sabitine göre bin kat daha değerli seçilmiştir. Bunun grafik üzerinde gösterimi ve seçilen malzeme de ilkinе göre farklıdır. Şekil 5.21'de eğimi 1000 olan penaltı fonksiyonu ve seçilen malzeme görünmektedir.

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = 1000 \quad (5.42)$$



**Şekil 5.21:**  $M_1$ - $M_2$  grafiğinde yeni penaltı fonksiyonu ve değiş-tokuş eğrisinin gösterimi

Penaltı fonksiyonu ile değiş-tokuş eğrilerinin teğet olduğu noktada yapılan literatür araştırması sonucunda normalize edilmiş AISI 4135 çeliği seçilmiştir. Normalize edilmiş çeliğin, su verilmiş ve temperlenmiş çeliğe göre termal iletkenliği daha yüksek, akma sınırı ise daha düşüktür. Seçilen malzemeler ile yapılan kanatçıklı borular, daha düşük maliyete, termal uzamaya ve ağırlığa sahip olacak; yüksek çalışma basıncı altında, korozif akışkanlara karşı başarılı bir şekilde görevini yerine getirebilecektir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Isı değiştiricileri günümüzde her yerde karşımıza çıkmaktadır. Farklı boyutlarda, farklı görevler için tasarlanan ısı değiştiricileri ortam şartlarına göre görevini yerine getirebilmesi için farklı malzemelerle imal edilirler. Genel olarak alüminyum, bakır, çelik alaşımları, seramik ve kompozit malzemeler kullanılır.

Bu malzemeler arasından en iyisini seçebilmek için malzeme seçim yaklaşımları incelenmiştir. Çok kriterli karar verme mekanizmalarından çok amaçlı karar verme mekanizmasının kullanılması uygun bulunmuştur. Çok amaçlı karar verme mekanizmaları arasından Ashby yaklaşımı pratik ve güvenilir bir yöntem olduğu için ısı değiştiricilerinde malzeme seçimi için uygun görülmüş ve daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Ashby yaklaşımında her şeyden önce malzemenin neye hizmet edeceği, fonksiyonunun ne olacağı doğru bir şekilde belirlenmelidir. Sonrasında duruma uygun olarak tasarımcının belirleyeceği sınırlamalar, amaçlar ve serbest değişkenlerle malzeme seçimi gerçekteştirilir. Bunu yaparken malzeme indisleri ve malzeme grafikleri kullanılır.

Tasarımcı tarafından belirlenen sınırlamaların birden fazlası amacı etkileyebilir ya da tasarımın birden fazla amacının olması istenebilir. Böyle özel durumlarda yaklaşım aynıdır ancak yöntem biraz farklılık gösterir.

Yapılan çalışmada ısı değiştiricileri için malzeme seçimine geçmeden önce genel olarak ısı değiştiricilerini sınırlayan kriterler, amaçlar ve serbest değişkenler belirlenmiştir. Sonrasında üç farklı durum için üç farklı ısı değiştirici seçilmiştir ve sınırlamalar, amaçlar ve serbest değişkenler, her çalışmaya ayrı ayrı uyarlanmıştır.

Ele alınan ilk ısı değiştiricisi motosiklet radyatörü olmuştur. Motosiklet radyatörlerinde sıklıkla karşılaşılan sorunlar ele alınarak belirlenen sınırlamalar ile maliyeti azaltmak amaç edinilmiştir. Sınırlamalar amacı doğrudan etkilememektedir ve tek bir amaç belirlenmiştir. Bu sebeple çalışmada Ashby yaklaşımı en basit

şekliyle uygulanmıştır. Belirlenen üç farklı malzeme indisi ve bunlara uygun olarak çizilen malzeme grafikleriyle malzeme seçimi gerçekleştirilmiştir.

Malzeme indisleri grafiklere yerleştirilirken motosiklet radyatörleri için genel olarak kullanılan bir malzeme referans alınmıştır ve bu belirlenen malzemedan daha iyi özelliklere sahip bir malzeme seçilmeye çalışılmıştır. Çalışmada Al-6061 referans olarak alınmıştır ve ondan daha iyi özelliklere sahip olan Al-6060 malzemesi önerilmiştir.

İkinci durum için ise mikroçip soğutucuları seçilmiştir. Mikroçiplerin neden ısındığı ve soğutulması gerektiği üzerinde durulduktan sonra sınırlamalar ve amaç belirlenmiştir. Belirlenen iki sınırlama amacı farklı şekillerde etkilemektedir. Bu sebeple dördüncü bölümde anlatılan yöntemle malzeme indisleri belirlenmiştir. Belirlenen iki malzeme indisi, malzeme grafiğinin eksenlerine yerleştirilerek malzeme grafiği elde edilmiştir.

Malzeme grafiğinden en uygun malzemeyi seçebilmek için eşleşme sabiti bulunmuş ve sabit, grafik üzerinde doğru olarak çizilmiştir. Doğrunun eğimi de iki malzeme indisinin aynı oranda önemini sağlayabilmek için bir alınmıştır. Sonrasında malzemeler arasından doğruya ve orijine en yakın olan malzeme olarak BeO (B995) seçilmiştir.

Son durum için de atık ısı kazanı içerisindeki kanatçıklı boruların malzemesi seçilmiştir. Kanatçıklı boruların ne gibi şartlarda çalıştığına ve ne gibi zorluklarla karşılaştığına değinilmiştir. Buna uygun olarak da sınırlamalar ve amaçlar belirlenmiştir. Diğer iki çalışmadan farklı olarak bu çalışmada bir amaç yerine üç amaç üzerinde çalışılmıştır. Belirlenen amaçlara uygun olarak üç malzeme indisi elde edilmiştir.

Tek bir grafik üzerinden yapılması planlanan çalışmada üç boyutlu grafik çizilememiştir. Bu sebeple maliyetle ilgili olan indis diğer iki indisle birleştirilmiştir ve elde edilen iki malzeme indisiyle malzeme grafiği çizilmiştir. Grafik üzerindeki malzemelerden en uygununu seçebilmek için değişim sabitlerini belirlemek yerine oranları bir olarak alınmıştır. Böylece iki malzeme indisi de aynı oranda değere sahip olmuştur. Eğimi bir olan penaltı fonksiyonu malzeme grafiğine çizilerek değiş-tokuş

çizgisine teğet yaptığı noktadaki malzemeler incelenmiştir. Sonucunda su verilmiş ve temperlenmiş AISI 4135 çeliği seçilmiştir.

Aynı çalışmada malzeme indislerinden birinin diğerine göre önemli olması durumunda malzeme seçiminin nasıl etkilendiğini incelemek adına değişim sabitlerinin oranı 1000 olarak alınmıştır. Penaltı fonksiyonu eğimi 1000 ve değiş-tokuş çizgisine teğet yapacak şekilde tekrar çizilmiştir. Teğet noktasına yakın malzemelerin incelenmesi sonucunda normalize edilmiş AISI 4135 çeliği seçilmiştir.

Her üç durum için seçilen malzemeler ile ısı değiştiriciler belirlenen amaçlara uygun olarak geliştirilmiştir. Daha iyi özelliklere sahip ısı değiştiricilerin kullanılması ile verimlilik de artırılmış olur. Motosiklet radyatörü için seçilen malzeme motorun aşırı ısınmamasını ve dış kuvvetlere karşı radyatörün daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Mikroçip soğutucusu için seçilen malzeme ile mikroçipte biriken ısı daha hızlı ve güvenli bir şekilde ortamdaki uzaklaştırılır. Atık ısı kazanları kanatçıklı boruları için seçilen malzeme de boruların daha güvenli çalışmasını, daha düşük maliyete ve ağırlığa sahip olmasını sağlar.

Tez kapsamında kullanılan CES EduPack programına daha fazla malzemenin kaydedilmesi ve güncel tutulması ile farklı tasarımlar için daha verimli malzeme seçimleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca programda yapılacak geliştirmeler ile üç boyutlu grafiklerin çizilmesi mümkün kılınabilir. Böylece üç malzeme indisi ile tek bir grafik üzerinden sağlıklı bir şekilde malzeme seçimi gerçekleştirilebilir.

## 7. KAYNAKLAR

Anojkumar, L., Ilangkumaran, M. and Sasirekha, V., “Comparative analysis of MCDM methods for pipe material selection in sugar industry”, *Expert Systems with Applications*, 41, 2964-2980, (2014).

Ashby, M. F., “Materials and shape”, *Acta Metallurgica et Materialia*, 39 (6), 1025-1039, (1991).

Ashby, M. F. and Cebon, D., “Materials selection in mechanical design”, *The 3rd European Conference on Advanced Materials and Processes 1993*, 3, 1-9, (1993).

Ashby, M. F., “Multi-objective optimization in material design and selection”, *Acta Materialia*, 48 (1), 359-369, (2000).

Ashby, M. F., Brechet, Y. J. M., Cebon, D. and Salvo, L., “Selection strategies for materials and processes”, *Materials and Design*, 25, 51-67, (2004).

Ashby, M. F. and Cebon, D., “Teaching engineering materials:the CES Edupack [online]”, (15 Mart 2012), <http://www.grantadesign.com/>, (2007).

Ashby, M. F., *Materials Selection in Mechanical Design*, UK: Butterworth-Heinemann / Elsevier, (2011).

Burgess, S. C., “Shape factors and material indices for dimensionally constrained structures Part 1:Beams”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 214, 371-379, (2000).

Burgess, S. C., “Shape factors and material indices for dimensionally constrained structures Part 2:Shafts”, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 214, 381-388, (2000).

Burgess, S. C., Passini, D., Smith, D. J. and Alemzadeh, K., “A general solution to the material performance index for bending strength design”, *Materials and Design*, 27, 1046-1054, (2005).

Chatterjee, P., Athawale, V. M. and Chakraborty, S., “Selection of materials using compromise ranking and outranking methods”, *Materials and Design*, 30, 4043-4053, (2009).

Chauhan, A. and Vaish, R., “Hard coating material selection using multi-criteria decision making”, *Materials and Design*, 44, 240-245, (2012).

Cui, X., Zhang, H., Wang, S., Zhang, L. and Ko, J., “Design of lightweight multi-material automotive bodies using new material performance indices of thin-walled beams for the material selection with crashworthiness consideration”, *Materials and Design*, 32, 815-821, (2011).

Ermolaeva, N. S., Kaveline, K. G. and Spoormaker J. L., “Materials selection combined with optimal structural design: Concept and some results”, *Materials and Design*, 23, 459-470, (2002).

Gibson, L. J., Ashby, M. F., Karam, G. N., Wegst, U. and Shercliff, H. R., “The mechanical properties of natural materials. II. Microstructures for mechanical efficiency”, *The Royal Society London A*, 450 (1938), 141-162 (1995).

Granta Design, Cae EduPack 2014 Software, London (2014).

Hatamura, Y., *The Practice of Machine Design*, London, UK:Clarendon Press, (1999).

Hatamura, Y., *Decision-making in Engineering Design*, London, UK: Springer-Verlag, (2006).

Hofmann, R., Frasz, F. and Ponweiser, K., “Performance evaluation of solid and serrated Finned-tube bundles with different fin geometries in forced convection”, *5th European Thermal-Sciences Conference*, The Netherlands, (2008).

Jahan A. and Edwards, K. L., *Multi-criteria Decision Analysis For Supporting The Selection of Engineering Materials in Product Design*, London, UK: Butterworth-Heinemann / Elsevier, (2013).

Jahan, A., Mustapha, F., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M. and Bahraminasab, M., "A comprehensive VIKOR method for material selection", *Materials and Design*, 32, 1215-1221, (2011).

Janikowski, D. S., "Selecting tubing materials for power generation heat exchangers", *Power-Gen International Conference*, New Orleans, (2007).

Jee, D. H., and Kang, K. J., "A method for optimal material selection aided with decision making theory", *Materials and Design*, 21, 199-206, (2000).

Kovan, V., "The development of a new mandibular osteosynthesis plate: an application of the Ashby approach", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 225, 199-205, (2011).

Maniya, K. and Bhatt, M. G., "A selection of material using a novel type decision-making method: preference selection index method", *Materials and Design*, 31, 1785-1789, (2010).

Mavridou, S., Mavropoulos, G. C., Bouris, D., Hountalas, D. T. and Bergeles, G., "Comparative design study of a diesel exhaust gas heat exchanger for truck applications with conventional and state of the art heat transfer enhancements", *Applied Thermal Engineering*, 30, 935–947, (2010).

Oliveira, M. C. L. d., Ett, G. and Antunes, R. A., "Materials selection for bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells using the Ashby approach", *Journal of Power Sources*, 206, 3-13, (2012).

Parate, O. and Gupta, N., "Material selection for electrostatic microactuators using Ashby approach", *Materials and Design*, 32, 1577-1581, (2011).

Pasini, D., Smith, D. J. and Burgess, S. C., "Selection of arbitrarily scaled corss-sections in bending stiffness design", *Proceeding of the Institution of*

*Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 217, 113-125, (2003).

Paterson, S. and Kuntz, T., *Boiler Tube Facts*, Boiler Tube Company of America, 5-9 (1999).

Pearson, J. M. and Anderson, R. W., “Root causes of transient tube temperature anomalies measured in horizontal gas path hrsgs”, *EPRI International Conference*, New Orleans, (2001).

Rajan, K. M. and Narasimhan, K., “An approach to selection of material and manufacturing processes for rocket motor cases using weighted performance index”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11, 444-449, (2002).

Rao, R. V., “A material selection model using graph theory and matrix approach”, *Materials Science and Engineering A*, 431 (1-2), 248-255, (2006).

Rao, R. V., “A decision making methodology for material selection using an improved compromise ranking method”, *Materials and Design*, 29, 1949-1954, (2008).

Rao, R. V., *Decision Making in Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*, London: Springer-Verlag, (2013).

Rashedi, A., Sridhar, I. and Tseng, K. J., “Multi-objective material selection for wind turbine blade and tower: Ashby’s approach”, *Materials and Design*, 37, 521-532, (2012).

Reddy, G. P. and Gupta, N., “Material selection for microelectronic heat sinks: An application of the Ashby approach”, *Materials and Design* 31, 113-117, (2010).

Salimon A, A., Brechet, Y., Ashby, M. F. and Greer, A. L., “Selection of applications for a material”, *Advanced Engineering Materials*, 6 (4), 249-265, (2004).

Shah, R. K. and Sekulic, D. P., *Fundamentals of Heat Exchanger Design*, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., (2003).

Shanian, A. and Savadogo, O., “A non-compensatory compromised solution for material selection of bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) using ELECTRE IV”, *Electrochimica Acta*, 51, 5307–5315, (2006).

Shanian, A. and Savadogo, O., “A material selection model based on the concept of multiple attribute decision making”, *Materials and Design*, 27, 329-337, (2006).

Shanian, A. and Savadogo, O., “TOPSIS multiple-criteria decision support analysis for material selection of metallic bipolar plates for polymer electrolyte fuel cell”, *Journal of power Sources*, 159, 1095-1104, (2006).

Sirisalee, P., Ashby, M. F., Parks, G. T. and Clarkson, P. J., “Multi-criteria material selection of monolithic and multi-materials in engineering design”, *Advanced Engineering Materials*, 8 (1-2), 48-56, (2006).

Strikar, V. T. and Spearing, S. M., “Materials selection in micromechanical design: An application of the Ashby approach”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12 (1), 3-10, (2003).

Strikar, V. T. and Spearing, S. M., “Materials selection for microfabricated electrostatic actuators”, *Sensors and Actuators A*, 102 (3), 279-285, (2003).

Thakker, A., Jarvis, J., Buggy, M. and Sahed, A., “A novel approach to materials selection strategy case study: Wave energy extraction impulse turbine blade”, *Materials and Design*, 29, 1973-1980, (2008).

Thulukkanam, K., *Heat Exchanger Design Handbook*, London, UK: CRC Press, (2013).

URL 1, “Heat pipe selection [online]”, (20 Kasım 2014), <http://www.enertron-inc.com/enertron-resources/PDF/How-to-select-a-heat-pipe.pdf>, (2001).



URL 2, (05 Şubat 2015), <http://www.peerlessmfg.com/solutions/heat-exchangers.html>

URL 3, (05 Şubat 2015), <http://www.alsosogutma.com/esanjor.html>

URL 4, (05 Şubat 2015), <http://en.wikipedia.org/wiki/TOPSIS>

URL 5, (05 Şubat 2015), [http://en.wikipedia.org/wiki/VIKOR\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/VIKOR_method)

URL 6, (05 Şubat 2015), [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_sink](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_sink)

URL 7, (05 Şubat 2015),  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_recovery\\_steam\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_recovery_steam_generator)

URL 8, (05 Şubat 2015), <http://tr.wikipedia.org/wiki/Buhar>

Yazdani, M. and Payam, A. F., “A comparative study on material selection of microelectromechanical systems electrostatic actuators using Ashby, VIKOR and TOPSIS”, *Materials and Design*, 65, 328-334, (2015).

## 8. ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Muhammet Yücel İPEK

**Doğum Yeri ve Tarihi** : Acıpayam / 17.05.1988

**Lisans Üniversite** : Selçuk Üniversitesi

**Elektronik posta** : muhammety.ipek@gmail.com

**İletişim Adresi** : Karahasanlı Mah. 2015 Sok. Umutkent 3 Sitesi  
A16 Blok No:1AC İç kapı no:18 Merkezefendi /  
DENİZLİ